



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



Yuri Geraldo Rodrigues Guimarães

Estudo comparativo entre treliça de aço e treliça de madeira para cobertura de galpão

OURO PRETO

2026

Yuri Geraldo Rodrigues Guimarães

Estudo comparativo entre treliça de aço e treliça de madeira
para cobertura de galpão

Trabalho Final de Curso apresentado como
parte dos requisitos para obtenção do Grau de
Engenheiro Civil na Universidade Federal de
Ouro Preto.

Orientador: Dr. Danilo Luiz Santana Mapa

Coorientador: Dr. Geraldo Donizetti de Paula

OURO PRETO

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G963e Guimarães, Yuri Geraldo Rodrigues.

Estudo comparativo entre treliça de aço e treliça de madeira para cobertura de galpão. [manuscrito] / Yuri Geraldo Rodrigues Guimarães. - 2026.

64 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Danilo Luiz Santana Mapa.

Coorientador: Prof. Dr. Geraldo Donizetti de Paula.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Engenharia de estruturas. 2. Treliças (Construção Civil). 3. Aço - Estruturas - Perfis formados a frio. I. Mapa, Danilo Luiz Santana. II. Paula, Geraldo Donizetti de. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624.014.2

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Yuri Geraldo Rodrigues Guimarães

Estudo comparativo entre treliça de aço e treliça de madeira para cobertura de galpão

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil

Aprovada em 27 de fevereiro de 2026

Membros da banca

Prof. Dr. Danilo Luiz Santana Mapa - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. Geraldo Donizetti de Paula (Universidade Federal de Ouro Preto)
Profª. Drª. Rovadavia Aline de Jesus Ribas (Universidade Federal de Ouro Preto)

Danilo Luiz Santana Mapa, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 09/03/2026



Documento assinado eletronicamente por **Danilo Luiz Santana Mapa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/03/2026, às 17:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1071773** e o código CRC **102FEADD**.

Dedico este trabalho à minha querida avó,

Geralda da Conceição Rodrigues (in memoriam).

Por todo o amor, apoio e incentivo ao longo da minha trajetória.

Do seu neto, enfim engenheiro, que carrega para sempre sua memória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe e ao meu pai, por todo o amor, apoio e incentivo ao longo de toda a minha trajetória acadêmica e pessoal. Nada disso seria possível sem os ensinamentos, a confiança e a dedicação de vocês, que sempre estiveram ao meu lado.

Aos meus amigos, agradeço pela parceria, pelas conversas, pelos momentos de descontração e pelo apoio durante essa caminhada, que tornaram essa jornada mais leve e significativa.

Ao PET Civil, deixo meu sincero agradecimento por todas as oportunidades de crescimento acadêmico, profissional e pessoal proporcionadas ao longo da graduação. Em especial, agradeço à professora e tutora Ana Letícia Pilz de Castro, pelo comprometimento, pela orientação, pela confiança e por todo o apoio oferecido.

Agradeço ao meu orientador, Danilo Luiz Santana Mapa, pelas valiosas sugestões, pelo acompanhamento, disponibilidade e contribuições fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, que foram essenciais para a sua conclusão.

Agradeço também ao meu coorientador, Geraldo Donizetti de Paula, pela orientação, paciência, e pelo apoio técnico ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

A escolha do material estrutural para coberturas de galpões envolve não apenas critérios econômicos, mas também aspectos de desempenho e atendimento aos estados limites. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo comparar treliças do tipo TT20 em aço formado a frio e em madeira estrutural, aplicadas à cobertura de um galpão, mantendo-se a mesma concepção geométrica e as mesmas condições de carregamento, a fim de avaliar as diferenças de comportamento decorrentes do material. A metodologia consistiu na definição do modelo estrutural, no levantamento das ações permanentes e variáveis, na consideração da ação do vento e na elaboração das combinações de ações conforme as normas aplicáveis, seguida da análise estrutural para obtenção dos esforços internos e deslocamentos e das verificações necessárias ao dimensionamento. Os resultados indicaram que a mudança de material altera significativamente a rigidez global do sistema e, conseqüentemente, o desempenho em serviço, tornando a solução em madeira mais sensível aos limites de deslocamento quando se mantém a tipologia originalmente difundida para o aço. Observou-se, ainda, a necessidade de ajustes de seções em elementos comprimidos para atendimento às verificações resistentes, evidenciando que a simples transposição da geometria não garante, por si só, equivalência de desempenho. De modo geral, conclui-se que a solução em aço apresenta comportamento mais favorável quanto à rigidez e ao atendimento aos critérios de serviço na configuração estudada, enquanto a solução em madeira se mostra tecnicamente viável e potencialmente atrativa do ponto de vista econômico do material, desde que sejam adotadas otimizações de rigidez e adequações de dimensionamento compatíveis com suas particularidades.

Palavras-chaves: Treliça de cobertura; cobertura de galpão; Eucalipto citriodora; perfis formados a frio; treliça triangular.

ABSTRACT

The choice of structural material for industrial shed roofs involves not only economic criteria but also performance aspects and compliance with limit states. In this context, this study aimed to compare TT20-type trusses made of cold-formed steel and structural timber, applied to the roof of a shed, while maintaining the same geometric concept and the same loading conditions, in order to assess differences in behavior arising from the material. The methodology consisted of defining the structural model, establishing permanent and variable actions, considering wind action, and developing load combinations according to the applicable standards, followed by structural analysis to obtain internal forces and displacements and the checks required for design. The results indicated that changing the material significantly alters the overall stiffness of the system and, consequently, the serviceability performance, making the timber solution more sensitive to displacement limits when the typology originally developed for steel is maintained. It was also observed that section adjustments in compressed members were necessary to satisfy strength verifications, showing that simply transferring the geometry does not, by itself, ensure equivalent performance. Overall, it is concluded that the steel solution presents a more favorable behavior in terms of stiffness and compliance with serviceability criteria in the configuration studied, while the timber solution is technically feasible and potentially attractive from a material-cost standpoint, provided that stiffness optimizations and design adaptations consistent with its particularities are adopted.

Keywords: Roof truss; Warehouse roof; Eucalyptus citriodora; cold-formed sections; triangular truss..

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Treliza (dimensões em m).....	21
Figura 2: Espaçamento entre treliças.....	22
Figura 3: Mapa de isopletas.....	25
Figura 4: Resultados das cargas de vento.....	26
Figura 5: Carga do vento distribuída na terça	27
Figura 6: Resultados das cargas de vento.....	27
Figura 7: Carga crítica distribuída na terça	32
Figura 8: Resultados da carga crítica na terça	32
Figura 9: Cargas distribuídas na treliça	33
Figura 10: Esforços obtidos na treliça	33
Figura 11: Flechas da tesoura TT20	39
Figura 12: Consumo global de material por área	44
Figura 13: Estimativa preliminar de custo	46
Figura 14: Cargas da nova seção aplicadas na terça	56
Figura 15: Resultados das novas cargas aplicadas na terça	56
Figura 16: Cargas da nova seção aplicada na treliça.....	57
Figura 17: Resultados da nova seção	57
Figura 18: Flechas da nova seção	59
Figura 19: Consumo global da nova seção.....	60
Figura 20: Estimativa de custo com a nova seção.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Cálculo do peso das peças da estrutura	23
Tabela 2: Cargas distribuídas de peso próprio por elemento estrutural	24
Tabela 3: Valores das combinações	28
Tabela 4: Resultado das combinações.....	31
Tabela 5: Valores críticos dos esforços solicitantes.....	34
Tabela 6: Resistência a compressão	35
Tabela 7: Resistência a tração	36
Tabela 8: Deslocamentos.....	38
Tabela 9: Atualização do peso próprio após o redimensionamento	53
Tabela 10: Cargas distribuídas de peso próprio por elemento estrutural redimensionado	54
Tabela 11: Combinações de ações atualizadas após o redimensionamento	55
Tabela 12: Valores críticos da seção redimensionada.....	57

LISTA DE SÍMBOLOS

- $N_{c,d}$ – Força normal de compressão de cálculo
- $N_{t,d}$ – Força normal de tração de cálculo
- $f_{c0,d}$ – Resistência de cálculo à compressão paralela às fibras
- $f_{c0,d}$ – Resistência de cálculo à compressão paralela às fibras
- f_{c0} – Resistência média à compressão paralela às fibras
- f_d – Resistência de cálculo
- $f_{t0,d}$ – Resistência de cálculo à tração paralela às fibras
- $f_{t0,d}$ – Resistência de cálculo à tração paralela às fibras
- f_{t0} – Resistência média à tração paralela às fibras
- k_{mod} – Coeficiente de modificação
- γ_{ap} – Peso específico aparente da madeira
- γ_w – Coeficiente de minoração da resistência da madeira
- A – Área da seção transversal da barra (cm²)
- C_{pi} – Coeficiente de pressão interna
- L – Vão teórico do elemento estrutural (m ou cm)
- q – Carga distribuída aplicada
- V_0 – Velocidade básica do vento
- γ – Coeficiente de majoração das ações
- δ_{fin} – Flecha final
- δ_{int} – Flecha instantânea
- Ψ_0 – Coeficiente de minoração das ações variáveis acompanhantes
- $\Psi_{2,q}$ – Coeficiente de combinação quase permanente da ação variável
- VB_g – Deslocamento devido à ação permanente
- VB_q – Deslocamento devido à ação variável
- $\sigma N_{c,d}$ – Tensão normal de compressão de cálculo
- $\sigma N_{t,d}$ – Tensão normal de tração de cálculo
- $k_{mod,1}$ – Coeficiente de modificação associado à classe de carregamento
- $k_{mod,2}$ – Coeficiente de modificação associado à classe de umidade

SUMÁRIO

1.	Introdução	12
1.1.	Objetivo	13
1.1.1.	Objetivos específicos	13
1.2.	Justificativa	13
2.	Revisão da literatura	15
2.1.	Estrutura de galpões e sistemas de cobertura.....	15
2.2.	Tipologia e comportamento estrutural das treliças	16
2.3.	Estruturas em aço	17
2.4.	Estruturas em aço formado a frio	18
2.5.	Estruturas em madeira	19
2.6.	Critérios de comparação entre os materiais	19
3.	Metodologia.....	21
3.1.	Modelo estrutural analisado	21
3.2.	Carregamentos considerados	22
3.2.1.	Peso próprio.....	22
3.2.2.	Ação do Vento	24
3.2.3.	Combinação de ações	27
3.3.	Verificação dos esforços nas barras	32
3.4.	Deslocamentos e flechas	37
3.5.	Critérios e parâmetros de comparação entre os modelos.....	39
4.	Resultados e Discussões	41
4.1.	Resultados da análise estrutural	41
4.2.	Verificação dos deslocamentos	42

4.3. Comparação entre as soluções estruturais.....	43
4.4. Discussão geral dos resultados e decisões de projeto	47
5. Conclusão	48
REFERENCIAS	50
Apêndice A – Redimensionamento da seção	52

1. INTRODUÇÃO

A construção de galpões de uso geral, edificações de um só pavimento destinadas a atividades industriais, comerciais ou agrícolas, exige soluções estruturais que conciliem segurança, economia, rapidez construtiva e sustentabilidade. Nesse contexto, a cobertura representa o principal elemento estrutural, responsável pela transferência de cargas verticais (permanentes e acidentais) e horizontais (vento) para os pórticos transversais e fundações. Entre os sistemas mais utilizados para coberturas de grandes vãos destacam-se as treliças, estruturas planas compostas por banzos (elementos superiores e inferiores), montantes (verticais) e diagonais, conectados por nós rígidos ou articulados. A treliça triangular (TT) em particular, caracteriza-se por banzos paralelos na base e convergentes no topo, formando um triângulo isósceles com diagonais e montantes distribuídos simetricamente. Neste trabalho, focamos no modelo TT 20 (Nogueira, 2009,), uma treliça triangular com vão livre de 20 m, altura de 2,0 m no centro e perfis tipo U enrijecidos, projetada para espaçamentos entre pórticos de 6 a 9 m.

Historicamente, o aço formado a frio (NBR 14762:2010) domina essas estruturas pela sua resistência mecânica, precisão dimensional e com possibilidade de montagem industrializada. Contudo, a madeira estrutural (NBR 7190-1:2022), especialmente serrada tratada ou laminada colada (MLC), vem ganhando espaço como alternativa de menor impacto ambiental e, em tese, menor custo inicial, especialmente em regiões com abundância de florestas plantadas.

O problema é que não há estudos comparativos sistematizados que avaliem o desempenho de treliças de aço e madeira sob condições idênticas de geometria, carregamento e vão livre, usando especificamente o modelo TT20 como referência. Na prática, a escolha entre os materiais ainda é feita de forma empírica, baseada na experiência do projetista, sem critérios objetivos que considerem taxa de consumo de material, custo e deslocamentos.

Essa lacuna levanta questões centrais: qual seria a real diferença no consumo de material (kg/m^2) entre uma treliça TT20 em aço e outra em madeira, sob as mesmas ações? Como se comportariam os esforços internos e os deslocamentos verticais máximos em cada solução? E em termos de custo, qual material apresentaria menor custo total para o modelo?

1.1. OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo comparativo entre treliças de aço formado a frio e treliças de madeira estrutural do tipo TT 20, aplicadas à cobertura de galpão, avaliando os aspectos estruturais, econômicos, construtivos e ambientais.

1.1.1. Objetivos específicos

- Modelar e dimensionar uma treliça de madeira do tipo TT20;
- Avaliar os esforços internos, deslocamentos e estabilidade dos dois modelos;
- Estimar e comparar o peso próprio e o custo dos materiais de cada estrutura;
- Identificar as vantagens e limitações de cada material quanto ao desempenho estrutural e à aplicabilidade em projetos de galpões;
- Apresentar uma análise técnica e econômica comparativa, destacando qual solução é mais eficiente para o tipo de galpão proposto.

1.2. JUSTIFICATIVA

A crescente demanda por estruturas econômicas, rápidas e sustentáveis tem impulsionado a busca por soluções estruturais otimizadas no setor da construção civil brasileira. Atualmente, com o avanço da Agenda 2030 e de certificações como LEED e AQUA, a escolha do material estrutural transcende os critérios tradicionais de custo e desempenho, passando a integrar também fatores ambientais.

Segundo Nogueira (2009), a treliça triangular (TT) é uma das tipologias mais eficientes em aço formado a frio para vãos de 16 m a 32 m. No entanto, o autor não avaliou alternativas em madeira estrutural, material renovável e de alta disponibilidade no país.

A madeira laminada colada (MLC) ou maciça tratada tem ganhado espaço; entretanto, sua aplicação no contexto nacional ainda é relativamente pouco explorada e deve obedecer aos critérios de projeto das normas brasileiras pertinentes, como a: NBR 7190 (ABNT, 2022), NBR 6120 (ABNT, 2019), NBR 6123 (ABNT, 2023), NBR 8681 (ABNT, 2025), etc.

Comparar aço e madeira sob as mesmas condições da treliça do tipo TT 20 é fundamental: permite não apenas quantificar ganhos ou perdas de eficiência em termos de peso, custo e deslocamentos, mas também validar a aplicabilidade da madeira em vãos que o aço

tradicionalmente domina. Na prática, o estudo gera subsídios técnicos objetivos para que projetistas reduzam a dependência de escolhas puramente empíricas.

Este trabalho, assim, preenche uma lacuna na literatura técnica brasileira, oferecendo uma análise integrada e atualizada que combina os resultados consolidados de Nogueira (2009) com a realidade construtiva contemporânea, contribuindo para a prática profissional em projetos de galpões.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. ESTRUTURA DE GALPÕES E SISTEMAS DE COBERTURA

Os galpões são um dos tipos de edificações mais utilizados em contextos industriais, comerciais e agropecuários. São, basicamente, construções de um pavimento destinadas a cobrir e proteger grandes áreas. Segundo o Manual Brasileiro de Cálculo de Estruturas Metálicas, (1986), essas edificações servem para abrigar atividades produtivas, armazenar materiais ou equipamentos e oferecer proteção contra intempéries. Por sua simplicidade e versatilidade, os galpões são uma solução amplamente aplicada em fábricas, depósitos, centros logísticos e estruturas agrícolas.

Independentemente da finalidade, os galpões geralmente se compõem de um conjunto de pórticos transversais regularmente espaçados, que formam o sistema estrutural principal, junto com elementos secundários de cobertura e fechamento. Essa configuração proporciona rapidez construtiva, modularidade e facilidade de montagem (Bellei, 2012), e são esses aspectos que justificam sua ampla aceitação no setor da construção civil.

De modo geral, a estrutura resistente dos galpões se divide em dois sistemas principais: os pórticos de alma cheia, formados por perfis laminados ou soldados, e os pórticos treliçados, compostos por barras esbeltas em arranjos triangulados. Esses dois sistemas apresentam comportamentos distintos em rigidez, altura, peso próprio e custo. Enquanto os pórticos de alma cheia são mais robustos e simples, sendo comuns em vãos pequenos e médios, os treliçados são preferidos em vãos maiores. Isso acontece porque eles permitem uma otimização do material, resultando em estruturas mais leves e eficientes (Silva; Pignatta, 2020).

Os galpões também devem ser estabilizados longitudinalmente por contraventamentos verticais e horizontais, que garantem o equilíbrio global contra a ação dos ventos. Esses elementos reduzem deslocamentos excessivos, evitam a instabilidade e garantem o desempenho adequado dos pórticos. O contraventamento também limita os comprimentos de flambagem das barras comprimidas, sendo essencial para a segurança da edificação Bellei (2012).

Os galpões também devem ser estabilizados longitudinalmente por contraventamentos verticais e horizontais, que garantem o equilíbrio global contra a ação dos ventos. Esses elementos reduzem deslocamentos excessivos, evitam a instabilidade e garantem o desempenho adequado dos pórticos. Bellei (2012) destaca que o contraventamento também limita os comprimentos de flambagem das barras comprimidas, sendo essencial para a segurança da edificação.

O desempenho estrutural de um galpão, portanto, resulta da interação entre o sistema principal (os pórticos), os elementos secundários (como terças e travamentos) e o sistema de estabilização.

A escolha da tipologia estrutural depende de vários fatores: vão livre, altura, ações previstas, uso, restrições geométricas, custo e facilidade de montagem. Estudos comparativos, como o de Nogueira (2009), já demonstram que diferentes tipologias têm desempenhos variáveis em consumo de material e deslocamentos, o que reforça a importância de uma análise criteriosa no projeto.

Assim, compreender o funcionamento dos galpões é fundamental para o objetivo deste trabalho: comparar materiais e tipologias, investigando especificamente o desempenho de treliças de aço e madeira na cobertura de um galpão de pequeno porte.

2.2. TIPOLOGIA E COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DAS TRELIÇAS

As treliças são sistemas estruturais formados por barras lineares conectadas em arranjos triangulares, atuando predominantemente à tração ou compressão. Pela sua eficiência estrutural e leveza, elas são amplamente utilizadas em coberturas de galpões, pontes, passarelas e estruturas de grande vão (Silva; Pignatta, 2020).

Entre as principais configurações empregadas em coberturas, destacam-se as tipologias Pratt, Howe, Warren e as treliças triangulares. Cada arranjo apresenta características específicas quanto à distribuição de esforços e desempenho. As treliças Pratt, por exemplo, possuem diagonais tracionadas sob carregamento gravitacional, ao passo que as Howe apresentam diagonais comprimidas. E a geometria da tipologia Warren, com diagonais alternadas, favorece uma distribuição mais uniforme dos esforços ao longo da estrutura (Trahair; Bradford, 2017).

No contexto específico de galpões leves, as treliças triangulares ganham destaque. O modelo TT 20 utiliza barras dispostas em formato simples, o que confere facilidade construtiva e boa eficiência resistente. Segundo Nogueira (2009), as treliças triangulares formadas por perfis de aço constituem uma solução leve, econômica e de fácil fabricação, especialmente quando associadas a perfis formados a frio.

Vale ressaltar que o comportamento estrutural de uma treliça depende de um conjunto de fatores, incluindo os ângulos das diagonais, a altura da treliça, a posição relativa dos nós, a

esbeltez das barras comprimidas e a rigidez das ligações. Nos projetos modernos, a análise é realizada geralmente pelo método dos elementos finitos, adotando barras biarticuladas com rigidez axial predominante (Schafer, 2016). A eficiência desse sistema provém da transferência das forças axiais pelos triângulos, o que reduz a necessidade de seções robustas e resulta em estruturas mais leves em comparação com vigas de alma cheia. Assim, o estudo dessas diferentes tipologias é essencial para analisar comparativamente estruturas de aço e madeira aplicadas ao modelo TT 20.

2.3. ESTRUTURAS EM AÇO

O aço consolidou-se como um dos protagonistas da construção civil, combinando alta resistência mecânica, ductilidade e uma notável uniformidade de propriedades. Sua principal vantagem estrutural reside na capacidade de suportar cargas elevadas exigindo seções transversais relativamente pequenas. Isso resulta em estruturas significativamente mais leves e eficientes, especialmente quando comparadas aos sistemas tradicionais de concreto (Silva; Pignatta, 2020).

Na prática, as estruturas metálicas empregam perfis laminados, soldados ou compostos para compor sistemas variados, desde pórticos simples até treliças complexas e coberturas. No cenário de galpões industriais e comerciais, o material ganha destaque pela rapidez de montagem, facilidade logística e modularidade. Segundo Bellei (2012), essas características asseguram uma relação custo-benefício competitiva, sobretudo para vencer vãos médios e grandes.

Do ponto de vista da segurança, a ductilidade do aço é um diferencial crítico. Ela permite que a estrutura redistribua esforços e apresente deformações visíveis antes de uma eventual ruptura, garantindo um comportamento previsível. Somado a isso, a alta resistência específica do material reduz o peso próprio da edificação, o que, por consequência, alivia as solicitações nas fundações (Trahair; Bradford, 2017).

Por outro lado, o uso do aço impõe desafios importantes. A necessidade de proteção rigorosa contra a corrosão e, dependendo do caso, a proteção passiva contra o fogo, são fatores que influenciam tanto a concepção do projeto quanto a rotina de manutenção da edificação (Silva; Pignatta, 2020).

Neste trabalho, o aço será analisado não apenas isoladamente, mas como o parâmetro de referência para a comparação com a madeira na composição de treliças para galpões leves. O foco recairá sobre suas propriedades mecânicas, o comportamento das barras sob tração e compressão e o desempenho global do sistema treliçado.

2.4. ESTRUTURAS EM AÇO FORMADO A FRIO

As estruturas em aço formado a frio consolidaram-se como uma solução predominante em edificações leves, abrangendo galpões, coberturas, mezaninos e sistemas modulares industrializados. Diferentemente dos perfis laminados, estes elementos são produzidos pela conformação mecânica de chapas em temperatura ambiente, ou seja, por dobra a frio. Esse processo permite a fabricação de seções esbeltas com geometrias otimizadas especificamente para os esforços solicitados (Schafer, 2016).

Entre as vantagens mais relevantes desse sistema, destacam-se a elevada relação rigidez/peso e a possibilidade de produção em larga escala com grande regularidade geométrica. Além disso, a flexibilidade para gerar seções especiais facilita o transporte, o manuseio e a montagem, resultando em um alto potencial de industrialização e na consequente redução de custos globais da obra (Silva; Pignatta, 2020).

Entretanto, esses perfis apresentam um comportamento estrutural mais complexo devido à suscetibilidade a fenômenos de instabilidade, como a flambagem local, a flambagem distorcional e a flambagem global. Esses modos de falha exigem avaliação rigorosa durante o projeto. A ABNT NBR 14762:2020 estabelece os métodos de cálculo baseados em critérios de resistência e estabilidade, incorporando inclusive o Método da Resistência Direta (DSM), uma abordagem amplamente difundida na literatura internacional (Schafer, 2016).

No contexto específico de estruturas treliçadas, os perfis formados a frio são particularmente vantajosos. Como nessas estruturas predominam os esforços axiais nas barras, é possível utilizar seções delgadas com grande eficiência estrutural. Nogueira (2009) mostrou que treliças triangulares executadas com esses perfis apresentam baixo consumo de aço e excelente desempenho mecânico, sendo ideais para os vãos pequenos e médios típicos de galpões leves.

Estudos contemporâneos reforçam a necessidade de analisar a instabilidade distorcional e os efeitos de segunda ordem em barras esbeltas comprimidas, fatores que são cruciais para o dimensionamento correto de diagonais e montantes (Zhang; Rasmussen, 2018). Assim, a

utilização de aço formado a frio em sistemas treliçados constitui uma alternativa eficiente, econômica e tecnicamente segura. Contudo, seu desempenho deve ser comparado com materiais alternativos, como a madeira, para identificar a solução mais adequada para cada aplicação, especialmente em coberturas do tipo TT.

2.5. ESTRUTURAS EM MADEIRA

A madeira permanece como um material estrutural amplamente utilizado em coberturas de galpões de pequeno e médio porte, devido ao baixo custo, sustentabilidade e facilidade de execução. A NBR 7190:2022 estabelece os critérios de dimensionamento e caracteriza a madeira como um material anisotrópico, ou seja, com propriedades distintas nas direções longitudinal, radial e tangencial (Dias, 2021).

Apesar dessa complexidade, as treliças de madeira apresentam bom desempenho quando executadas com peças corretamente classificadas, secas e tratadas. Pesquisas recentes mostram que treliças em madeira de eucalipto ou pinus podem alcançar níveis de desempenho estrutural comparáveis aos das treliças metálicas em determinadas situações, principalmente quando se considera a sustentabilidade e a disponibilidade local de materiais (Nunes; Calil Junior, 2019).

Entre as principais vantagens da madeira, destacam-se a alta relação resistência/peso, o isolamento térmico, o menor impacto ambiental, a capacidade de renovação e a facilidade de manipulação. Por outro lado, existem limitações importantes, como a maior variabilidade mecânica, a sensibilidade à umidade e a necessidade constante de tratamento preservativo (Dias, 2021). Ainda assim, a madeira configura-se como uma alternativa viável e competitiva para treliças do tipo TT 20, o que justifica a realização de estudos comparativos.

2.6. CRITÉRIOS DE COMPARAÇÃO ENTRE OS MATERIAIS

A comparação entre treliças de madeira e aço exige a análise de múltiplos critérios estruturais e econômicos. No que tange ao peso próprio, as treliças de aço tendem a ser mais leves, especialmente quando utilizam perfis formados a frio (Schafer, 2016). Em relação aos esforços internos e deslocamentos, o aço apresenta maior módulo de elasticidade, resultando geralmente em estruturas mais rígidas (Bellei, 2012).

Do ponto de vista financeiro, a madeira costuma apresentar menores custos iniciais de material, enquanto o aço pode se tornar mais econômico em vãos maiores ou quando se considera a

velocidade de montagem e a redução de mão de obra (Dias, 2021). A durabilidade e a manutenção também diferem, pois o aço requer proteção contra corrosão e a madeira exige tratamento contra fungos e insetos.

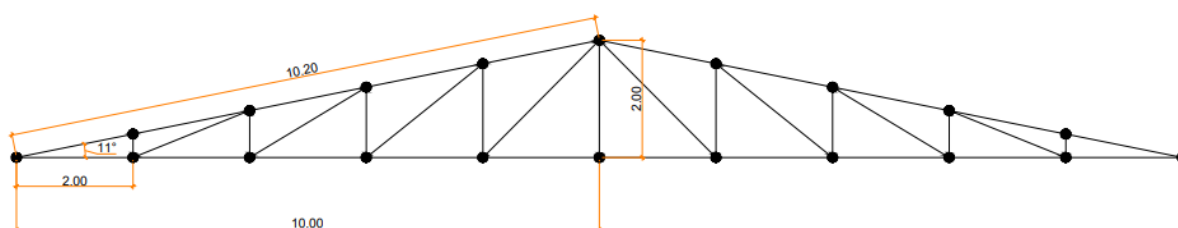
Além disso, o fator tempo de execução costuma favorecer as treliças metálicas, que são mais rápidas de fabricar e montar (Silva; Pignatta, 2020). No quesito sustentabilidade, a madeira de reflorestamento apresenta vantagens claras devido ao menor impacto ambiental (Moses; Prion, 2020). Como destacam Lehmann e Ramage (2021), a escolha final depende do equilíbrio entre desempenho mecânico, custo global e impacto ambiental, o que reforça a importância de estudos comparativos integrados como o proposto neste trabalho.

3. METODOLOGIA

3.1. MODELO ESTRUTURAL ANALISADO

A estrutura selecionada para este estudo é uma treliça plana do tipo TT-20, projetada para o sistema de cobertura de um galpão industrial. A escolha dessa tipologia justifica-se tanto pela sua ampla recorrência em obras de médio porte quanto pela sua adequação para análises comparativas entre materiais. Conforme ilustrado na *Figura 1*, esse tipo de treliça vence um vão livre de 20,0 m, atingindo uma altura máxima de 2,0 m no nó central.

Figura 1: Treliça (dimensões em m)

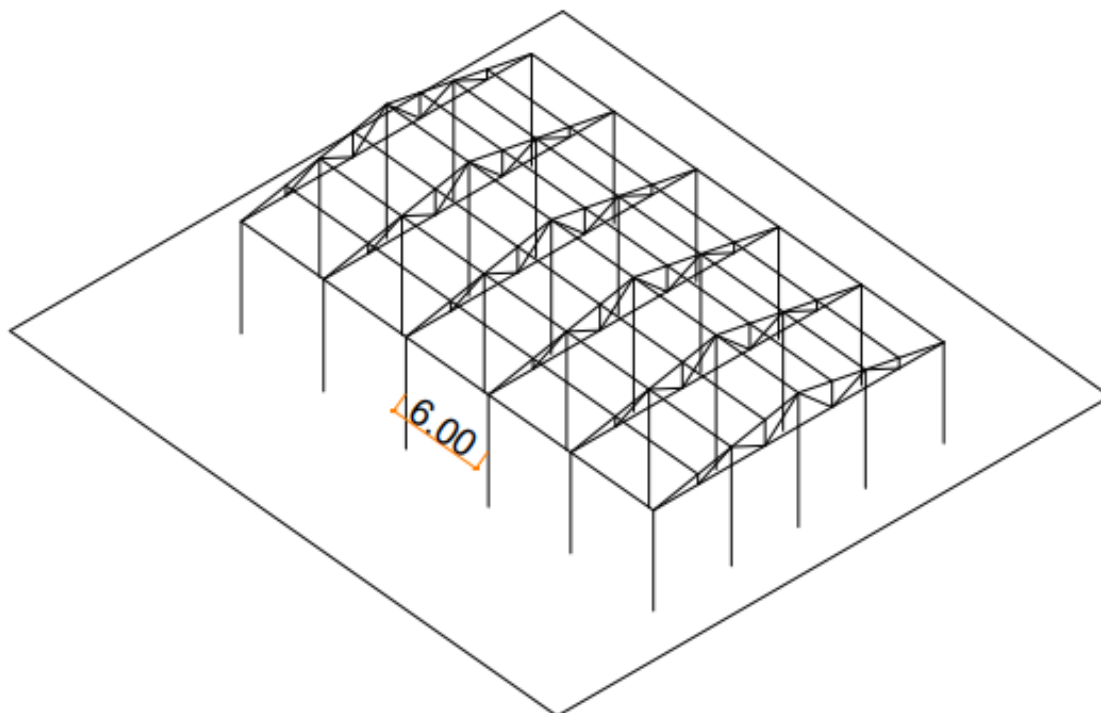


Fonte: O Autor (2026)

Nesse arranjo, a disposição de banzos, montantes e diagonais forma painéis regulares de aproximadamente 2,0 m de comprimento, resultando em uma inclinação de cobertura próxima a 11° , o que é compatível com os padrões usuais do setor (na faixa de 10° a 20°).

O espaçamento entre as treliças foi definido de acordo com práticas usuais de projeto para coberturas de galpões industriais. Conforme apresentado na *Figura 2*, adotou-se um espaçamento regular de 6,0 m entre as treliças.

Figura 2: Espaçamento entre treliças



Fonte: O Autor (2026)

A madeira escolhida foi o *Eucalyptus citriodora* classe C60, e a cobertura considerada é composta por telhas metálicas, materiais amplamente utilizados em sistemas de cobertura de galpões industriais.

3.2. CARREGAMENTOS CONSIDERADOS

O dimensionamento da estrutura foi realizado em conformidade com os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 7190 2022 e tendo como referência o *Dimensionamento de Treliça de Madeira* (Silva, 2025). Na análise estrutural, foram consideradas as ações permanentes, referentes ao peso próprio da estrutura e da cobertura, bem como as ações variáveis, incluindo a sobrecarga de uso e a ação do vento.

3.2.1. Peso próprio

A metodologia empregada para o cálculo do peso próprio dos elementos estruturais foi baseada no procedimento apresentado no trabalho *Dimensionamento de Treliça de Madeira* (Silva, 2025), sendo realizadas as devidas adaptações quanto à geometria da treliça, ao material utilizado e às condições de carregamento consideradas neste estudo.

O peso próprio dos elementos estruturais foi determinado individualmente para cada componente da treliça, incluindo terças, montantes, diagonais e banzos. Para esse cálculo, utilizou-se a densidade da madeira adotada no estudo, associada ao volume correspondente de cada elemento estrutural. Os parâmetros considerados, bem como os valores de área da seção transversal, comprimento, volume, densidade, massa e peso final adotado, encontram-se apresentados na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1: Cálculo do peso das peças da estrutura

	Área (cm ²)	Comprimento (cm)	Volume (cm ³)	Densidade (kg/cm ³)	Massa (kg)	Peso (N)	Peso adotado (kN)
Terça	96	66000	6336000	0,00102	6462,72	63400,28	63,40
Montante	96	11000	1056000	0,00102	1077,12	10565,55	10,57
Diagonal	70	25303,3	1771231	0,00102	1806,66	17723,30	17,72
Banzo superior	70	22435,6	1570492	0,00102	1601,90	15714,66	15,71
Banzo inferior	70	22000	1540000	0,00102	1570,80	15409,55	15,41

Fonte: Adaptado de Silva (2025)

Para o pré-dimensionamento voltado à estimativa do peso próprio, adotou-se a padronização de seções para reduzir o número de bitolas e simplificar o levantamento de volumes. Assim, considerou-se terça e montantes com a mesma seção (6 cm × 16 cm, $A=96$ cm²), por serem elementos associados à rigidez e à transferência de cargas no sistema de cobertura. De forma análoga, adotou-se banzos e diagonais com a mesma seção (5 cm × 14 cm, $A=70$ cm²), por comporem o conjunto principal da treliça responsável pela triangulação e pelo caminho de forças.

Foi adotado para o Eucalipto Citriodora o peso específico aparente $\gamma_{ap} = 1\text{kN}/\text{cm}^3$ conforme a ABNT NBR 7190 1997 sendo aproximado para $\gamma_{ap} = 10\text{kN}/\text{m}^3$ no cálculo do peso próprio da estrutura.

Os valores de peso próprio dos elementos estruturais foram convertidos em cargas distribuídas ao longo de seus comprimentos, por meio da divisão do peso de cada peça pelo respectivo comprimento, expresso em metros. Os resultados obtidos encontram-se apresentados na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2: Cargas distribuídas de peso próprio por elemento estrutural

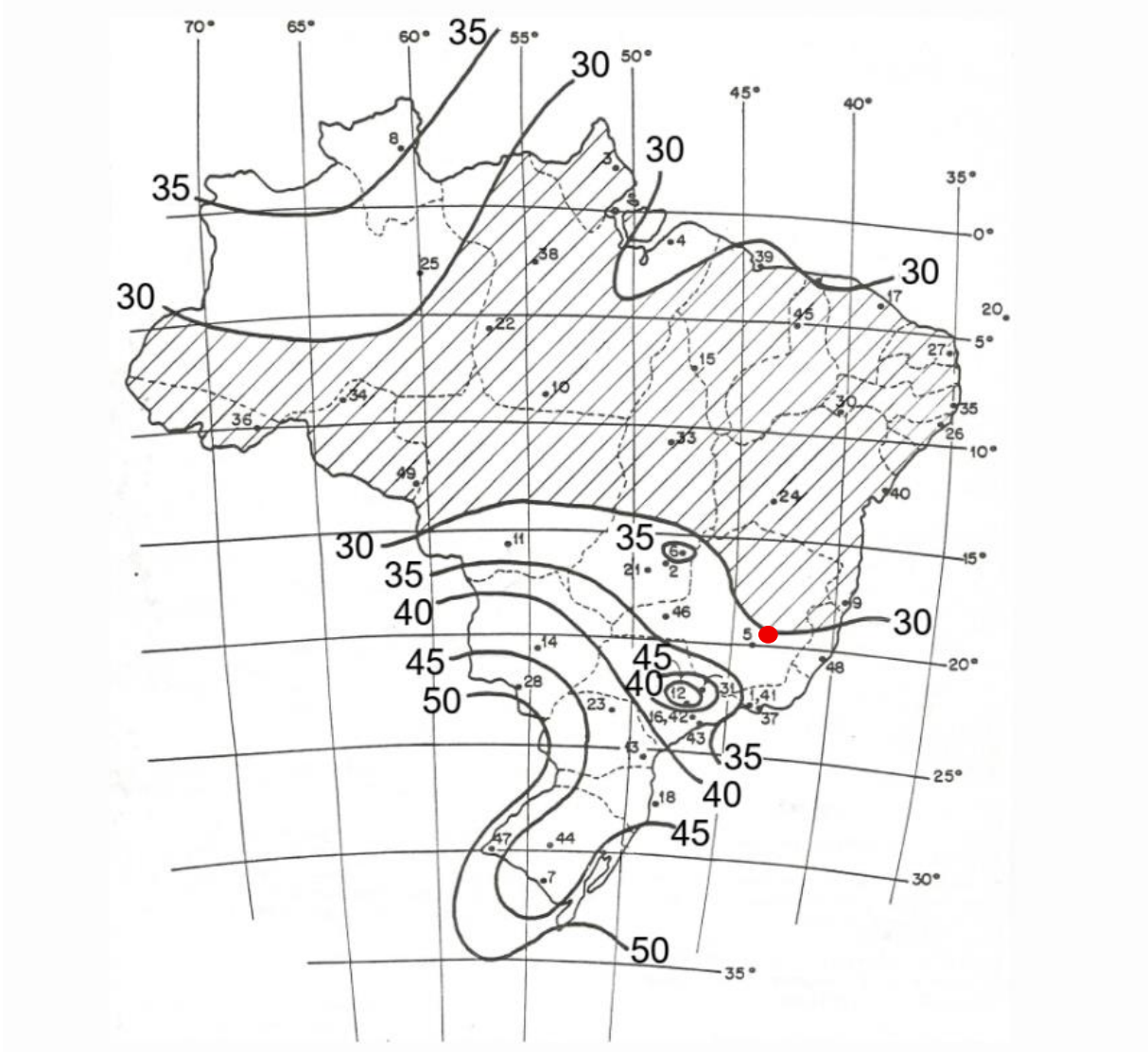
Fatores	Resultados (kN/m)
Carga da terça	0,096
Carga dos montantes	0,048
Carga das diagonais	0,078
Carga do banzo superior	0,070
Carga do banzo inferior	0,070

Fonte: O Autor (2026)

3.2.2. Ação do Vento

A ação do vento na edificação foi determinada conforme os procedimentos estabelecidos na ABNT NBR 6123 2023. A partir do mapa de isopletras de velocidade básica do vento (Figura 3), no qual o ponto vermelho indica aproximadamente a localização do município de Ouro Preto–MG, adotou-se a velocidade básica $V_0 = 30\text{ m/s}$, utilizada como referência para a definição das pressões de vento atuantes na cobertura e, posteriormente, para a obtenção das cargas equivalentes aplicadas ao modelo estrutural.

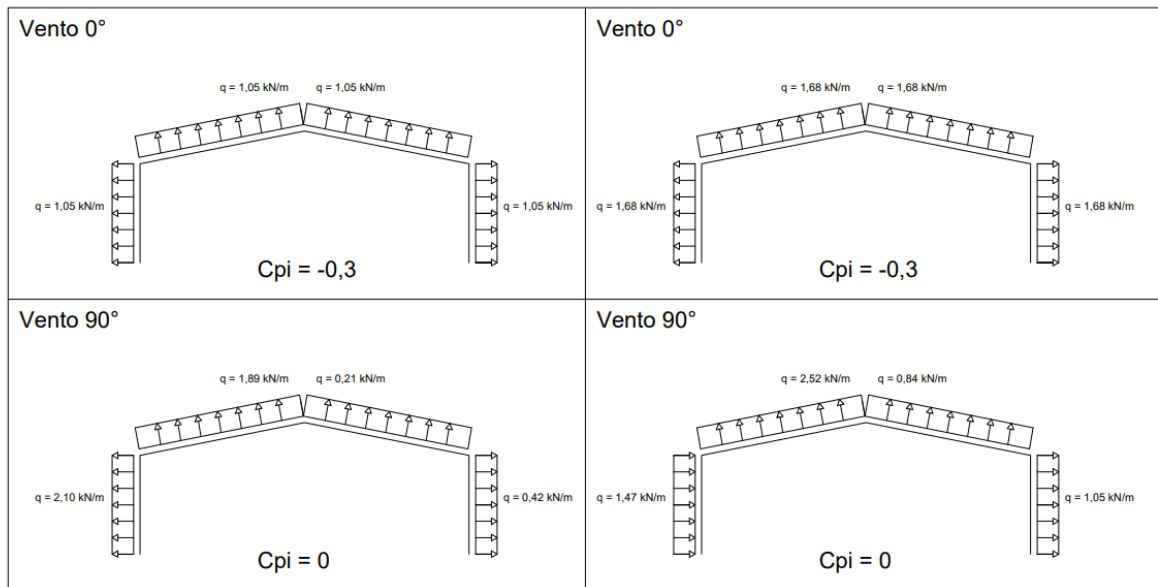
Figura 3: Mapa de isopletas



Fonte: NBR 6123 (ABNT, 2023)

Além da velocidade básica do vento, adotada como 30 m/s, foram consideradas as mesmas condições de exposição utilizadas na dissertação de Nogueira (2009), admitindo-se galpão de uso geral localizado em terreno plano ou fracamente acidentado, aberto e aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados (árvores e edificações baixas), sendo a cota média do topo dos obstáculos menor ou igual a 1 m. Adotou-se, para a pressão interna, $C_{pi} = 0$ ou $C_{pi} = -0,3$, selecionando-se o valor mais desfavorável, considerando-se o galpão com quatro faces igualmente permeáveis. O comprimento longitudinal do galpão foi tomado como 60 m, e o espaçamento entre os pórticos transversais foi adotado como 6 m. Os valores finais das cargas de vento obtidos a partir dessas considerações encontram-se apresentados na Figura 4.

Figura 4: Resultados das cargas de vento



Fonte: O Autor (2026)

Para encontrar as cargas horizontais nas terças utilizou-se a equação X a seguir:

$$F_h = \frac{q \times \sin \alpha}{2} \quad (1)$$

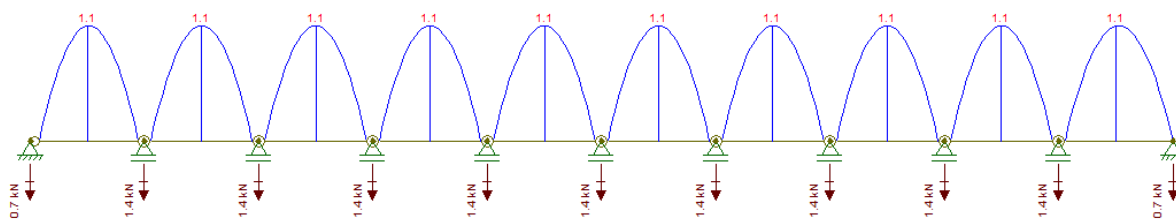
Considerando a situação de carregamento mais desfavorável, obteve-se uma carga horizontal de 0,24 kN/m, a qual foi aplicada no software Ftool, possibilitando a visualização das cargas verticais transferidas para a treliça, conforme apresentado nas Figura 5 e Figura 6.

Figura 5: Carga do vento distribuída na terço



Fonte: O Autor (2026)

Figura 6: Resultados das cargas de vento



Fonte: O Autor (2026)

3.2.3. Combinação de ações

A verificação estrutural baseou-se nas combinações de ações estipuladas pela norma ABNT NBR 8681 2025, integrando as cargas permanentes e variáveis definidas nas etapas anteriores. Os valores adotados para compor esses cenários de carregamento estão detalhados na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3: Valores das combinações

Fatores	Resultados
Cargas da terça (kN/m)	0,096
Carga dos montantes (kN/m)	0,048
Cargas das diagonais (kN/m)	0,078
Carga do banzo superior (kN/m)	0,070
Carga do banzo inferior (kN/m)	0,070
Carga das telhas (kN/m)	0,10
Cargas acidentais (kN/m)	0,30
Carga de vento 1 (kN/m)	1,03
Carga de vento 2 (kN/m)	1,65
Carga de vento 3 (kN/m)	1,85
Carga de vento 4 (kN/m)	0,20
Carga de vento 5 (kN/m)	2,47
Carga de vento 6 (kN/m)	0,82
Coeficiente de majoração para Pesos Próprios (desfavorável)	1,00
Coeficiente de majoração para Pesos Próprios (favorável)	1,00

Fatores	Resultados
Coeficiente de majoração para ações variáveis - γ (vento)	1,00
Coeficiente de majoração para ações variáveis - γ (sobrecarga)	1,50
Coeficiente de minoração - Ψ_0 (vento)	0,60
Coeficiente de minoração - Ψ_0 (Sobrecarga)	0,50

Fonte: O Autor (2026)

As combinações de ações foram determinadas com base na expressão apresentada na equação 2, conforme os critérios estabelecidos pela NBR 8661 (ABNT, 2025). Nessa formulação, consideraram-se as ações permanentes e variáveis, adotando-se, em cada combinação, uma ação variável principal e as demais como acompanhantes, ponderadas pelos respectivos coeficientes.

(2)

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} \times F_{Gi} + [F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \Psi_{0j} \times F_{Qj,k}]$$

Os valores das cargas verticais foram determinados a partir da aplicação da equação (3).

$$F_v = q \times \cos \alpha \quad (3)$$

Conforme descrito por (Silva, 2025) foram analisadas combinações em que a sobrecarga atua como ação variável principal, bem como combinações em que o vento assume esse papel. Para

a ação do vento, foram consideradas cinco situações distintas de carregamento, representativas das diferentes condições de atuação do vento sobre a estrutura. Assim, as combinações foram organizadas de modo a contemplar todas as possibilidades, variando-se a carga de vento principal entre as cinco consideradas, conforme descrito nos tópicos a seguir.

Combinação 1: a principal carga variável é a sobrecarga, utilizando a carga do vento 1;

Combinação 2: a principal carga variável é a sobrecarga, utilizando a carga do vento 2;

Combinação 3: a principal carga variável é a sobrecarga, utilizando a carga do vento 3;

Combinação 4: a principal carga variável é a sobrecarga, utilizando a carga do vento 4;

Combinação 5: a principal carga variável é a sobrecarga, utilizando a carga do vento 5;

Combinação 6: a principal carga variável é a sobrecarga, utilizando a carga do vento 6;

Combinação 7: a principal carga variável é o vento 1;

Combinação 8: a principal carga variável é o vento 2;

Combinação 9: a principal carga variável é o vento 3;

Combinação 10: a principal carga variável é o vento 4;

Combinação 11: a principal carga variável é o vento 5;

Combinação 12: a principal carga variável é o vento 6.

Os resultados obtidos a partir da aplicação dessas combinações de ações estão apresentados na Tabela 4 a seguir, na qual são indicados os valores das solicitações correspondentes a cada combinação considerada.

Tabela 4: Resultado das combinações

Combinação	Resultado (kN/m)
Combinação 1	1,530
Combinação 2	1,902
Combinação 3	2,022
Combinação 4	1,032
Combinação 5	2,394
Combinação 6	1,404
Combinação 7	1,717
Combinação 8	2,337
Combinação 9	2,537
Combinação 10	0,887
Combinação 11	3,157
Combinação 12	1,507

Fonte: Adaptado de Silva (2025)

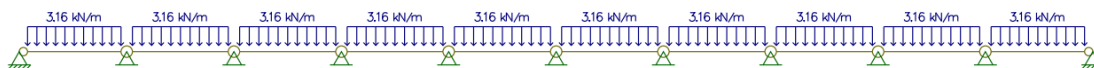
Dentre as combinações de ações analisadas, a condição mais crítica correspondeu àquela que resultou no maior valor de solicitação, igual a 3,157 kN/m. Dessa forma, essa combinação foi adotada para o dimensionamento da estrutura.

3.3. VERIFICAÇÃO DOS ESFORÇOS NAS BARRAS

Nesta seção 3.3 do Capítulo 3 são apresentados os resultados da verificação dos esforços atuantes nas barras da treliça, obtidos a partir das combinações de ações consideradas no dimensionamento.

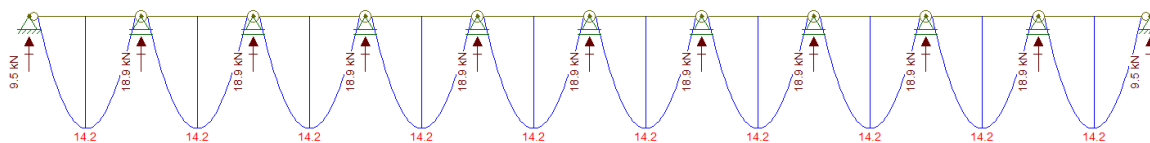
Adotou-se a combinação de ações mais crítica e aplicou-se na terça, no software Ftool, o carregamento distribuído correspondente, com intensidade $q=3,16 \text{ kN/m}$, conforme ilustrado na Figura 7. A partir dessa modelagem, foram obtidos os resultados na terça Figura 8, destacando-se a reação de apoio máxima de 18,9 kN.

Figura 7: Carga crítica distribuída na terça



Fonte: O Autor (2026)

Figura 8: Resultados da carga crítica na terça

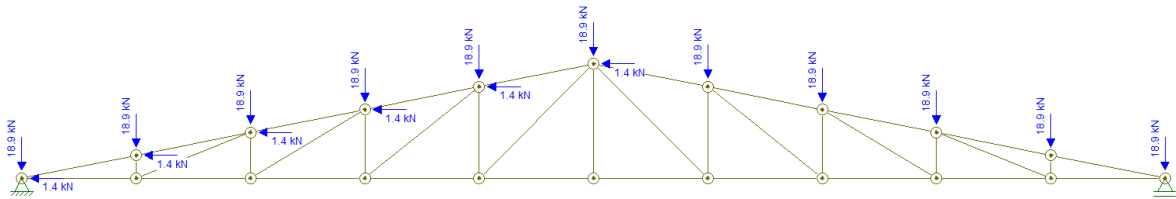


Fonte: O Autor (2026)

Com base nos resultados apresentados nas Figura 6 e Figura 8, foi possível determinar as ações atuantes e proceder à sua aplicação no modelo da treliça, conforme ilustrado na Figura 9. A partir dessa modelagem, obtiveram-se os esforços normais nas barras da estrutura, cujos valores

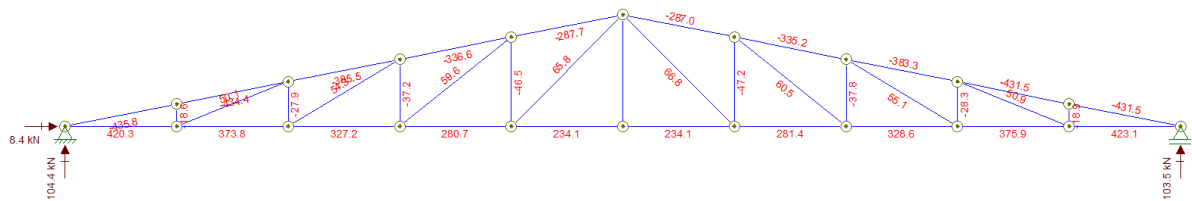
são apresentados na Figura 10, permitindo a análise do comportamento estrutural e o posterior dimensionamento dos elementos.

Figura 9: Cargas distribuídas na treliça



Fonte: O Autor (2026)

Figura 10: Esforços obtidos na treliça



Fonte O Autor (2026)

Para o dimensionamento das barras da treliça, foram considerados os maiores valores absolutos de esforço normal, tanto de tração quanto de compressão, para cada grupo estrutural, sendo eles os banzos, as diagonais e os montantes. Dessa forma, para cada tipo de barra, adotaram-se separadamente os esforços mais desfavoráveis em tração e em compressão. Os valores críticos utilizados no dimensionamento estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Valores críticos dos esforços solicitantes

Tipo de barra	Tração máxima (kN)	Compressão máxima (kN)	Área (cm ²)
Banzos	373,8	446,8	70
Diagonais	66,8	-	70
Montantes	-	47,3	96

Fonte: O Autor (2026)

Para o cálculo das resistências de cálculo à compressão e à tração paralelas às fibras do Eucalipto citriodora, foram adotados os valores médios apresentados na Tabela 1, quais sejam $f_{c0} = 62,0$ MPa e $f_{t0} = 123,6$ MPa. Em seguida, aplicaram-se os coeficientes de modificação $k_{mod,1} = 0,7$ e $k_{mod,2} = 0,8$, cujo produto resulta em $k_{mod} = 0,56$. A resistência de cálculo foi então obtida pela expressão:

$$f_d = \frac{k_{mod} \times f}{\gamma_w} \quad (4)$$

adotando-se $\gamma_w = 1,2$ para a madeira, em consonância com o procedimento de dimensionamento utilizado com base na ABNT NBR 7190 1997.

Assim, para a compressão paralela às fibras, obteve-se:

$$f_{c0,d} = \frac{0.56 \times 62.0}{1.2} = 28,93 \text{ MPa}$$

De modo análogo, para a tração paralela às fibras, tem-se:

$$f_{t0,d} = \frac{0.56 \times 123,6}{1.2} = 57,68 \text{ MPa}$$

Dessa forma, os valores adotados para o Eucalipto citriodora foram $f_{c0,d} = 28,93$ MPa e $f_{t0,d} = 57,68$ MPa, os quais serviram de base para as verificações de compressão e tração paralelas às fibras desenvolvidas neste trabalho.

Para a verificação da resistência à compressão, conforme os critérios estabelecidos pela NBR ABNT NBR 7190 2022, determina-se inicialmente a tensão normal de compressão de cálculo, obtida pela divisão da força normal de compressão de cálculo $N_{c,d}$ pela área da seção transversal da barra. O valor resultante deve ser comparado com a resistência de cálculo à compressão paralela às fibras $f_{c0,d}$. O atendimento a essa condição é expresso pela Equação (5), cujos resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6

$$\sigma N_{c,d} = \frac{N_{c,d}}{A} \leq f_{c0,d} \quad (5)$$

Tabela 6: Resistência a compressão

Parâmetros	Valores calculados
$f_{c0,d}$ (MPa)	28,93
$N_{c,d}$ (kN)	446,8
$\sigma N_{c,d}$ (MPa)	63,83

Fonte: O Autor (2026)

Analizando as informações da Tabela 6, como $63,83 \text{ MPa} > 29,09 \text{ MPa}$ conclui-se que o banzo não atende à compressão para a seção inicial adotada. Diante do não atendimento à compressão, foi necessário o redimensionamento dos banzos, adotando-se uma nova área de seção transversal de $A = 168 \text{ cm}^2$, resultando em:

$$\sigma N_{c,d} = \frac{446,8 \times 1000}{16000} = 27,93 \text{ MPa}$$

Logo, como $27,93 \text{ MPa} < 29,09 \text{ MPa}$, o banzo passa a atender à compressão após o redimensionamento.

De forma análoga, a verificação da resistência à tração é realizada a partir do cálculo da tensão normal de tração de cálculo, determinada pela razão entre a força normal de tração de cálculo $N_{t,d}$ e a área da seção transversal. O valor encontrado deve ser inferior ou igual à resistência de cálculo à tração paralela às fibras $f_{t0,d}$, conforme indicado na Equação (6). Os resultados dessa verificação encontram-se dispostos na Tabela 7

$$\sigma N_{t,d} = \frac{N_{c,d}}{A} \leq f_{t0,d} \quad (6)$$

Tabela 7: Resistência a tração

Parâmetros	Valores calculados
$f_{t0,d}$ (MPa)	57,68
$N_{t,d}$ (kN)	378,8
$\sigma N_{t,d}$ (MPa)	23,36

Fonte: O Autor (2026)

Ressalta-se que, neste trabalho, a verificação das barras comprimidas foi realizada de forma simplificada, com base na comparação entre a tensão normal solicitante e a resistência de cálculo do material. Uma análise mais detalhada considerando os efeitos de instabilidade global e local pode ser realizada em estudos futuros.

3.4. DESLOCAMENTOS E FLECHAS

Para a avaliação dos deslocamentos da estrutura, de acordo com Silva (2025) foram analisados os valores máximos de flecha instantânea e de flecha final, os quais foram comparados com os limites admissíveis estabelecidos pelas recomendações da ABNT NBR 7190 2022. Os valores limites adotados foram definidos em função do vão da estrutura, conforme indicado pelas equações a seguir.

$$\delta_{int} = \frac{L}{300} \quad (7)$$

$$\delta_{int} = \frac{L}{500} \quad (8)$$

$$\delta_{fin} = \frac{L}{150} \quad (9)$$

$$\delta_{fin} = \frac{L}{300} \quad (10)$$

As flechas das terças foram determinadas por meio das Equações (11) e (12), que consideram as contribuições das ações permanentes e variáveis, bem como os efeitos de fluência do material. E os deslocamentos das tesouras foram obtidos diretamente a partir da análise estrutural realizada no software Ftool. Os resultados calculados e os valores máximos admissíveis são apresentados na Tabela 8.

$$\delta_{terça,int} = VB_g + VB_q \quad (11)$$

$$\delta_{terça,fin} = VB_g + (VB_q \times \Psi_{2,q} \times (1 + fluência)) \quad (12)$$

Adotou-se $\phi=0,8$ para a fluência, conforme a ABNT NBR 7190-1:2022, por se tratar de elemento de madeira enquadrado na classe de umidade 3, condição em que a norma prevê maior efeito de deformação lenta em relação à classe 1.

Foi adotado $\Psi_{2,q} = 0,3$ na verificação da flecha final por se tratar de sobrecarga de cobertura associada a acesso eventual para manutenção/inspeção.

Tabela 8: Deslocamentos

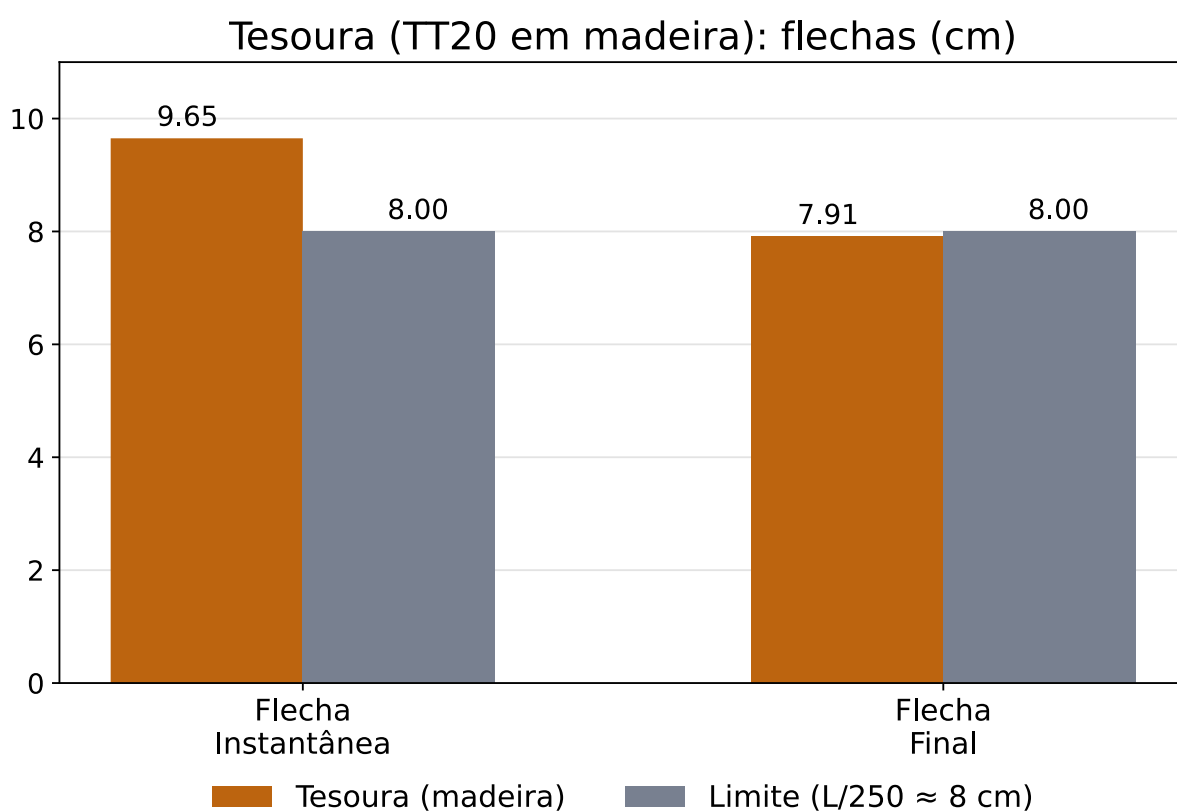
Terça		
	Máximo	Da estrutura
δ_{int} (cm)	1,20	4,82
δ_{int} (cm)	2,00	
δ_{fin} (cm)	2,00	3,84
δ_{fin} (cm)	4,00	
Tesoura		
	Máximo	Da estrutura
δ_{int} (cm)	4,00	9,65
δ_{int} (cm)	6,67	
δ_{fin} (cm)	6,67	7,91
δ_{fin} (cm)	13,33	

Fonte: O Autor (2026)

A verificação dos deslocamentos foi realizada por meio de análises estruturais no software Ftool, considerando separadamente as ações permanentes e as ações variáveis. Para a terça, os deslocamentos foram obtidos a partir da análise individual da viga, submetida a carregamentos distribuídos. Para a tesoura, os deslocamentos foram determinados por meio da análise da

treliça, considerando as cargas concentradas aplicadas nos nós, correspondentes às ações transmitidas pelas terças. A flecha instantânea foi obtida pela combinação das parcelas associadas às ações permanentes e variáveis, enquanto a flecha final considerou os efeitos de fluência do material, conforme critérios normativos. Os resultados foram então comparados com os limites máximos admissíveis estabelecidos em função do vão. A comparação entre as flechas obtidas para a tesoura TT20 em madeira e o limite de referência $L/250$ é apresentada na Figura 11.

Figura 11: Flechas da tesoura TT20



Fonte: O Autor (2026)

3.5. CRITÉRIOS E PARÂMETROS DE COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS

Com o objetivo de realizar uma comparação objetiva entre o modelo TT20 em aço, proposto por Nogueira (2009), e o modelo TT20 em madeira desenvolvido neste trabalho, foram definidos previamente os parâmetros a serem analisados. A comparação foi conduzida mantendo-se constantes a geometria da treliça, o vão livre, o espaçamento entre pórticos e as

ações atuantes, de modo a isolar a influência do material estrutural no comportamento global do sistema.

Foram considerados como parâmetros de comparação os esforços internos nas barras da treliça, os deslocamentos verticais e horizontais máximos e o consumo global de material, expresso em termos de massa por área de cobertura. Esses parâmetros representam a resposta estrutural global dos modelos e permitem avaliar o desempenho relativo das soluções em aço e madeira sob condições equivalentes de projeto.

Não foram objeto de comparação os critérios específicos de dimensionamento de cada material, tais como métodos normativos, verificações locais e detalhamento de ligações, por se tratarem de aspectos intrínsecos a cada sistema construtivo. Da mesma forma, não foram realizadas modificações geométricas ou otimizações adicionais no modelo em madeira com o objetivo de atender aos limites de deslocamento, uma vez que o foco do estudo consiste em avaliar a aplicabilidade direta da tipologia TT20, originalmente concebida para aço, quando transposta para a madeira estrutural.

Dessa forma, eventuais não atendimentos aos critérios de serviço são interpretados como resultados do comportamento estrutural do sistema analisado, e não como falhas de modelagem ou de dimensionamento, contribuindo para a discussão das limitações e potencialidades do uso da madeira em treliças para galpões de grande vão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. RESULTADOS DA ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise estrutural do modelo TT20 em madeira foi realizada com o objetivo de determinar os esforços internos nas barras da treliça e os deslocamentos globais da estrutura, considerando as combinações de ações definidas no Capítulo 3. A modelagem foi conduzida mantendo-se a geometria, o vão livre e as condições de carregamento equivalentes às do modelo TT20 em aço utilizado como referência, de modo a permitir a comparação direta entre as soluções.

A partir da análise, foram obtidos os esforços axiais máximos de tração e compressão nos banzos, diagonais e montantes da treliça. Observou-se que os maiores esforços se concentram nos banzos, responsáveis pelo comportamento global da treliça como viga equivalente, conforme ilustrado na Figura 10, apresentada no Capítulo 3, na qual se evidencia o caminho principal de transmissão das cargas ao longo da estrutura. Os montantes apresentaram solicitações significativamente inferiores, enquanto as diagonais alternaram entre tração e compressão de acordo com a combinação de ações considerada, desempenhando papel fundamental na redistribuição dos esforços internos.

Além dos esforços internos, foram avaliados os deslocamentos verticais e horizontais máximos da estrutura. Os deslocamentos verticais apresentaram valores mais elevados no meio do vão, conforme esperado para estruturas treliçadas submetidas predominantemente a ações gravitacionais. Os deslocamentos horizontais estiveram associados principalmente à ação do vento, refletindo a rigidez global do sistema estrutural frente às ações laterais.

Os resultados obtidos nesta etapa são apresentados na forma de tabelas e diagramas, sendo utilizados nos itens subsequentes para a verificação dos Estados Limites de Serviço e Últimos, bem como para a comparação entre o modelo em madeira e o modelo em aço apresentado por Nogueira (2009). Ressalta-se que, neste subcapítulo, os resultados são apresentados de forma descritiva, sem julgamento quanto ao atendimento aos critérios normativos, que é realizado nos tópicos seguintes.

4.2. VERIFICAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS

A verificação dos deslocamentos foi conduzida no Estado Limite de Serviço (ELS), considerando as flechas instantâneas e as flechas finais. Os valores máximos admissíveis foram definidos em função do vão teórico L , conforme as Equações (7) a (10), enquanto as flechas das terças foram obtidas pelas Equações (11) e (12), incluindo a consideração de fluência (adotada como 0,8), conforme procedimento do trabalho de Silva (2025). Para as tesouras, os deslocamentos foram obtidos diretamente no software Ftool. Os resultados e limites correspondentes estão apresentados na Tabela 8.

De acordo com a Tabela 8, a terça apresentou flecha instantânea de 4,82 cm e flecha final de 3,84 cm, valores superiores aos limites mais restritivos adotados para verificação. A tesoura (treliça TT20) apresentou flecha instantânea de 9,65 cm e flecha final de 7,91 cm, indicando que o desempenho em serviço é governado principalmente pela rigidez global da treliça para o vão de 20 m.

Para fins de comparação com o modelo TT20 da dissertação de Nogueira (2009), destaca-se que o autor adota como referência de controle de deslocamentos um critério usual de deslocamento vertical máximo do tipo $L/250$ para o vão analisado. Assim, tomando-se $L=20$ m = 2000 cm, o limite correspondente é da ordem de 8,0 cm. Quando esses valores são comparados aos limites da ABNT NBR 7190 2022 (Tabela 21) para elementos biapoiados ou contínuos com $L = 2000$ cm, verifica-se que a flecha instantânea da tesoura (9,65 cm) excede o intervalo admissível para δ_{int} , que varia de 4,00 cm ($L/500$) a 6,67 cm ($L/300$), caracterizando não atendimento no estágio imediato. A flecha final (7,91 cm) enquadra-se no intervalo previsto para δ_{fin} , entre 6,67 cm ($L/300$) e 13,33 cm ($L/150$), embora permaneça acima do limite mais restritivo ($L/300$). Assim, os resultados indicam uma condição de serviço mais desfavorável para a solução em madeira quando mantida a mesma concepção geométrica do modelo metálico de referência, principalmente em função do deslocamento instantâneo. Essa interpretação é compatível com o fato de que, na dissertação de Nogueira (2009), o ELS é apresentado como atendido sob o critério adotado, enquanto, no presente estudo, a tesoura em madeira se aproxima do limiar de aceitabilidade e apresenta excedência no comportamento de curto prazo.

Por outro lado, quando se adotam critérios mais conservadores (como os expressos pelas Equações (5) a (8)), os deslocamentos deixam de atender aos limites, reforçando que a transposição direta da tipologia TT20 do aço para a madeira tende a produzir um

comportamento mais deformável. Esse resultado é relevante para a comparação proposta no trabalho, pois evidencia que, embora a treliça mantenha a mesma configuração global, o desempenho em serviço se torna mais sensível às propriedades mecânicas do material e às seções adotadas, devendo ser interpretado como uma limitação de rigidez do sistema em madeira sob as mesmas condições de projeto.

4.3. COMPARAÇÃO ENTRE AS SOLUÇÕES ESTRUTURAIS

A comparação entre a solução em madeira desenvolvida neste trabalho (treliça TT20 e elementos associados) e a solução TT20 apresentada por Nogueira (2009) deve ser interpretada à luz de duas diferenças centrais: a forma de obtenção da ação do vento e o atendimento (ou não) aos critérios de serviço, especialmente deslocamentos. No que se refere ao vento, este trabalho adotou a ABNT NBR 6123:2023 (norma vigente), enquanto Nogueira (2009) utilizou a ABNT NBR 6123:1988. Essa mudança normativa pode alterar coeficientes aerodinâmicos, critérios de exposição e combinações de pressão interna/externa, refletindo diretamente nas cargas distribuídas adotadas no pórtico e, conseqüentemente, na resposta estrutural (esforços e flechas).

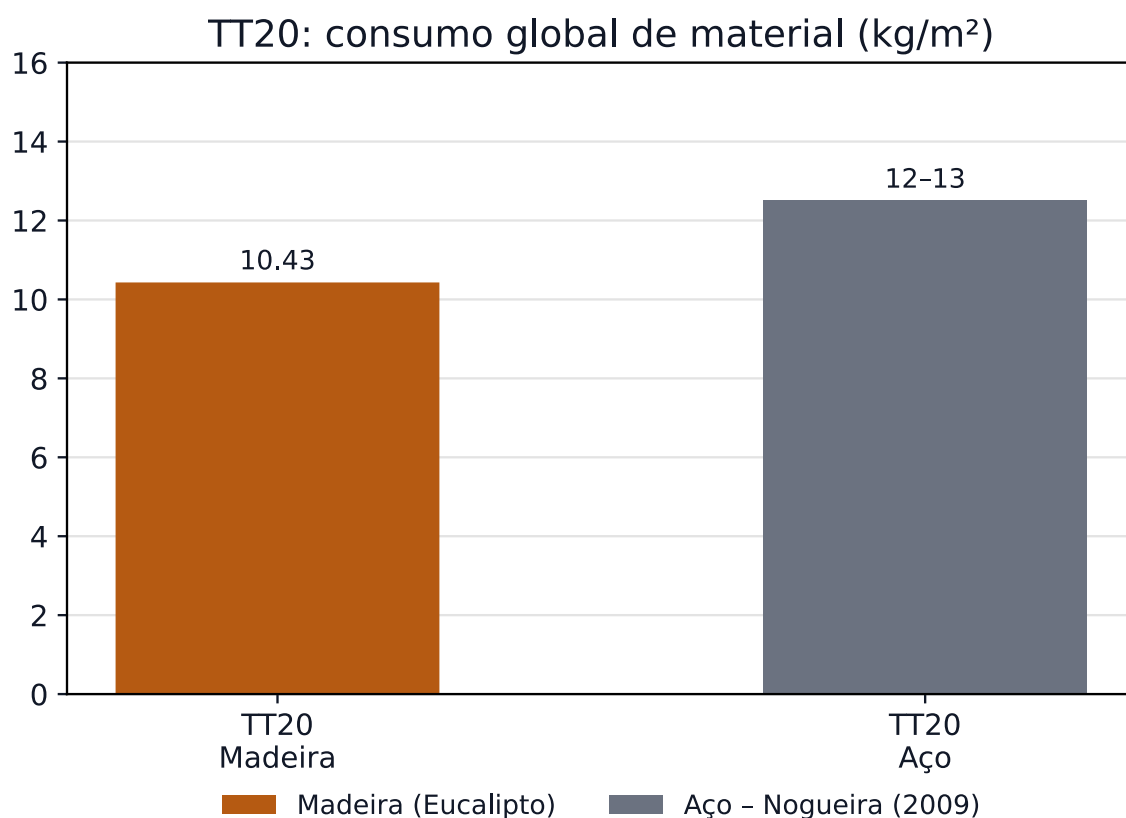
Em termos de magnitude, observa-se que as cargas lineares de vento obtidas neste estudo apresentam valores máximos da ordem de 2,47 kN/m (≈ 252 kgf/m), enquanto na dissertação de Nogueira (2009) aparecem ações distribuídas que atingem magnitudes próximas de 3,64 kN/m (≈ 371 kgf/m), associadas a situações de sucção/pressão (o sinal apenas indica o sentido, mas a magnitude é relevante para comparação). Assim, para o mesmo vão, os picos de carregamento reportados por Nogueira (2009) são superiores, o que é compatível com a sensibilidade do dimensionamento às hipóteses normativas e aos coeficientes adotados em cada edição da NBR 6123.

Quanto ao consumo de material, o presente trabalho obteve massa total aproximada de 12,52 t para o conjunto dimensionado (terças + barras principais), o que corresponde a aproximadamente 10,43 kg/m² quando normalizado pela área em planta do galpão (20 m $\times$ 60 m). No estudo de Nogueira (2009), a análise comparativa é apresentada por meio da taxa global de consumo de aço (kg/m²); para a tipologia TT com $V_0 = 30$ m/s. A Figura 5.14 de Nogueira (2009) indica valores na faixa aproximada de 10,5 a 13,5 kg/m² ao longo dos vãos analisados, sendo que para a região de vão livre de 20 m a taxa se situa visualmente próxima da

ordem

de $\sim 12\text{--}13\text{ kg/m}^2$. A síntese comparativa do consumo global de material por área é apresentada na Figura 12.

Figura 12: Consumo global de material por área



Fonte: O Autor (2026)

Entretanto, é essencial registrar que a massa obtida neste trabalho corresponde a uma configuração preliminar, a qual, conforme discutido no item de verificação de deslocamentos, apresentou valores de flecha instantânea e/ou final em condição crítica (ou não conforme) para alguns critérios de serviço. Assim, o consumo de madeira aqui apresentado não deve ser interpretado como consumo “ótimo” ou “definitivo”, pois uma solução plenamente conforme tende a requerer aumento de rigidez (por exemplo, ajustes de seções, aumento de inércia ou mudanças construtivas), o que pode elevar o consumo e alterar a comparação direta com a solução metálica de referência.

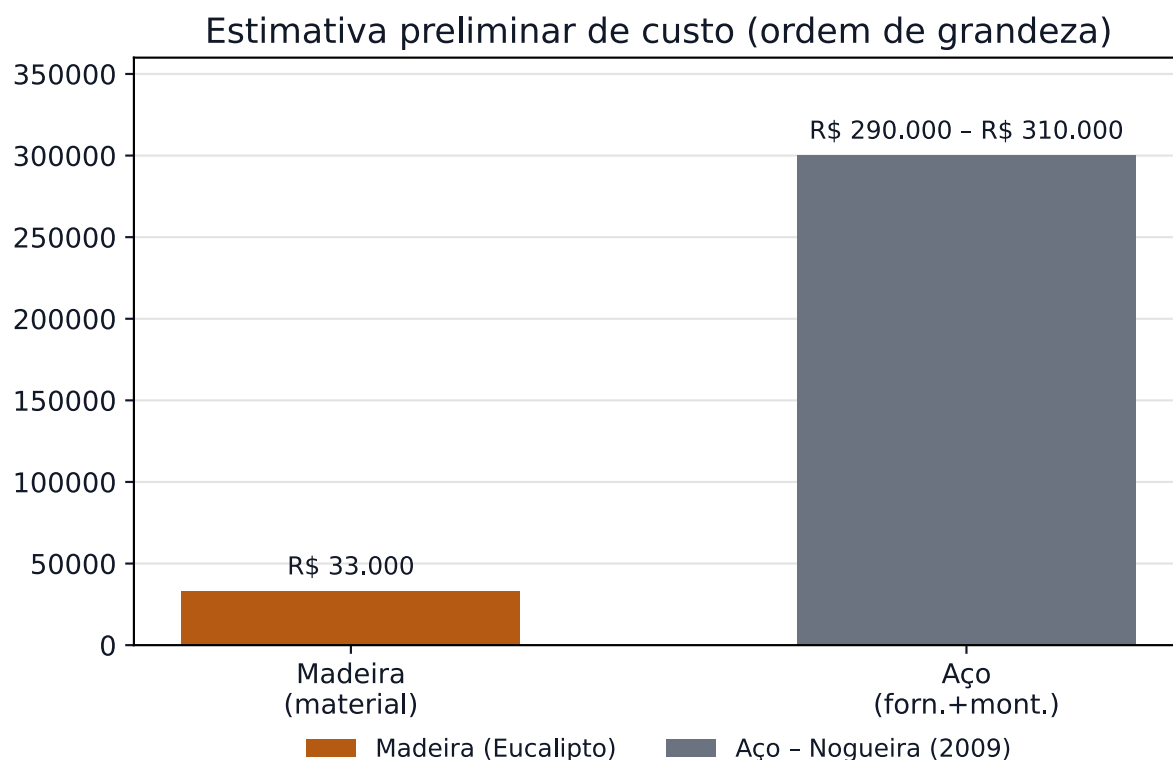
Por fim, apresenta-se uma estimativa preliminar de custo apenas como ordem de grandeza, seguindo fontes de referência com maior aceitação técnica. Para isso, adotou-se o SINAPI como base, sistema oficial mantido por IBGE/CAIXA para pesquisa de custos e índices na construção

civil. Como nem sempre as tabelas completas de insumos por UF/mês estão incorporadas no corpo de trabalhos acadêmicos, uma prática aceitável é utilizar planilhas públicas que declaram explicitamente “base SINAPI” como referência de preço, ainda que isso represente uma aproximação metodológica.

- Para aço estrutural, uma planilha orçamentária pública baseada em SINAPI apresenta custo unitário para elemento metálico em aço estrutural (fornecimento e instalação) da ordem de R\$ 19,20/kg (Prefeitura Municipal de Boa Vista do Cadeado (RS), 2025).
- Para madeira serrada, uma planilha pública baseada em SINAPI apresenta valor de referência de R\$ 2.719,50/m³ (madeira serrada, base SINAPI indicada na planilha) (Governo do Estado de São Paulo, 2021).

Aplicando esses referenciais de forma indicativa ao quantitativo obtido neste trabalho (aproximadamente 12,27 m³ de madeira, a partir do volume total da Tabela de pesos), obtém-se um custo apenas de material da ordem de R\$ 33 mil. Para a solução metálica, usando uma taxa típica de 12–13 kg/m² (Figura 5.14) de Nogueira (2009) para 1.200 m² de área em planta, a massa global estimada seria da ordem de 15–16 t, o que resultaria em um custo de fornecimento/instalação da ordem de R\$ 290 – R\$310 mil. A comparação por ordem de grandeza é apresentada na Figura 13.

Figura 13: Estimativa preliminar de custo



Fonte: O Autor (2026)

Ressalta-se que essa comparação não é “um para um”, pois envolve bases diferentes (madeira como material vs. aço em composição com montagem) e não inclui, no caso da madeira, itens como tratamento, chapas, conectores e mão de obra (Nogueira, 2009). Além disso, como discutido na verificação de deslocamentos, o modelo em madeira apresentou condição crítica em ELS; portanto, para atender aos limites normativos, será necessário aumentar a rigidez do sistema (por exemplo, por meio de ajustes de seções e/ou soluções construtivas), o que tende a elevar o consumo de material e, conseqüentemente, o custo associado. Dessa forma, a estimativa cumpre apenas o papel de situar a ordem de grandeza, e não substituir um orçamento executivo.

4.4. DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS E DECISÕES DE PROJETO

A interpretação dos resultados obtidos deve ser realizada à luz das premissas de modelagem e das decisões de projeto adotadas neste trabalho. Optou-se pela padronização de seções por grupos de barras com o objetivo de simplificar a execução e aproximar o modelo de práticas construtivas usuais em estruturas de madeira. Da mesma forma, não foram realizadas otimizações geométricas adicionais, como aumento da altura da treliça ou alteração do espaçamento entre nós, a fim de preservar a equivalência com o modelo TT20 originalmente concebido para aço e permitir uma comparação direta entre os materiais.

A manutenção do espaçamento entre pórticos igual a 6,0 m, mesmo diante do não atendimento ao critério de deslocamento em determinadas combinações, foi uma decisão metodológica consciente, uma vez que o objetivo do estudo consiste em avaliar a aplicabilidade direta da tipologia TT20 em madeira, e não em desenvolver uma solução otimizada para esse material. Assim, os deslocamentos elevados observados não são interpretados como falhas do modelo, mas como resultados relevantes que evidenciam as limitações da transposição direta da tipologia entre materiais com propriedades mecânicas distintas.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo comparar, para a cobertura de um galpão com vão livre de 20 m e espaçamento entre pórticos de 6 m, o desempenho de treliças do tipo TT20 em aço formado a frio (modelo de referência) e em madeira estrutural (modelo desenvolvido), considerando as mesmas condições geométricas e de carregamento. Para isso, o modelo TT20 em madeira foi modelado, carregado e dimensionado, e seus resultados foram confrontados com os parâmetros do modelo em aço adotado como base comparativa, permitindo uma avaliação integrada sob os aspectos estruturais e econômicos.

Em relação aos esforços internos, a combinação de ações mais crítica identificada no estudo resultou em solicitação de 3,157 kN/m, sendo adotada para o dimensionamento. Nessa condição, observaram-se esforços normais máximos concentrados principalmente nos banzos (até 446,8 kN em compressão e 373,8 kN em tração), seguidos pelas diagonais (até 385,5 kN em compressão e 336,6 kN em tração) e pelos montantes (compressão máxima de 47,3 kN). A estabilidade das barras comprimidas foi verificada de forma simplificada a partir da comparação entre tensões solicitantes e resistências de cálculo; nesse processo, constatou-se que a seção inicialmente adotada para os banzos não atendia à compressão, exigindo redimensionamento para garantir a verificação do ELU de resistência.

Quanto ao desempenho em serviço, os deslocamentos mostraram-se o ponto mais sensível da solução em madeira quando se mantém a mesma concepção geométrica do modelo TT20 de aço. A terça apresentou flecha instantânea de 4,82 cm e flecha final de 3,84 cm, enquanto a tesoura (treliça) atingiu 9,65 cm (instantânea) e 7,69 cm (final). Em termos comparativos, a flecha instantânea da tesoura superou um critério usual de controle de deslocamentos para o vão (ordem de $L/250$, cerca de 8,0 cm), indicando condição mais crítica de rigidez para a solução em madeira sob as mesmas premissas.

No que se refere ao peso próprio/consumo de material, o conjunto dimensionado em madeira (terças + barras principais) apresentou massa total aproximada de 12,52 t, equivalente a cerca de 10,43 kg/m² quando normalizado pela área em planta do galpão. Para o custo, a estimativa preliminar indicou, como ordem de grandeza, aproximadamente R\$ 33 mil para o material de madeira (com base no volume total levantado) e cerca de R\$ 290–310 mil para a solução metálica considerando fornecimento/instalação em função de uma massa global estimada. Ressalta-se, contudo, que a solução em madeira, por apresentar condição crítica de

deslocamentos, tende a demandar aumento de rigidez (por ajustes de seção e/ou soluções construtivas), o que pode elevar o consumo e o custo associados.

Dessa forma, ao identificar vantagens e limitações, conclui-se que a madeira apresenta potencial de menor custo de material e boa viabilidade como alternativa estrutural, porém, na transposição direta da tipologia TT20, mostra-se mais sensível ao ELS, com deslocamentos elevados e necessidade de redimensionamentos em barras comprimidas. O perfil de aço formado a frio, tomado como referência, apresenta maior rigidez e desempenho mais favorável em serviço para a mesma geometria, além de características construtivas associadas à industrialização e montagem. Assim, para o tipo de galpão proposto e mantendo-se a geometria TT20, a solução em aço se mostra mais eficiente no balanço técnico global (especialmente por rigidez e atendimento ao ELS), enquanto a solução em madeira se destaca como alternativa competitiva sobretudo no aspecto econômico do material, porém condicionada à necessidade de aumento de rigidez para plena conformidade em serviço.

Para trabalhos futuros apresentam-se as seguintes sugestões:

Analisar o comportamento estrutural de treliças TT em madeira com diferentes alturas de treliça e arranjos de diagonais, mantendo-se o mesmo vão livre;

Avaliar a influência do espaçamento entre pórticos transversais no desempenho estrutural e no consumo de material de treliças TT em madeira;

Analisar o desempenho de treliças TT utilizando diferentes classes de resistência da madeira, bem como produtos engenheirados, como a madeira laminada colada (MLC);

Avaliar o comportamento estrutural de treliças TT em madeira considerando a modelagem mais realista das ligações, incluindo ligações semirrígidas.

REFERENCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7190:1997: **Projeto de estruturas de madeira**. p. 107, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6120:2019 - Ações para o cálculo de estruturas de edificações. **Design loads for structures**, 30 set. 2019.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6123:2023 - Forças devidas ao vento em edificações. 20 dez. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8681:2025: Ações e segurança nas estruturas — Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 29 set. 2025.

BELLEI, Isac. **Edifícios Industriais em Aço**. São Paulo: PINI, 2012.

DIAS, A. A. **Manual de Projeto e Construção com Madeira**. Campinas: IPT/UNICAMP, 2021.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Composições unitárias: planilha de preços e composições (Edital n. 02/2021)**. [S.l.]: Governo do Estado de São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.transparenciacultura.sp.gov.br/wp-content/uploads/2021/09/Composicoes-Unitarias_Edital_n_02_2021.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2026.

LEHMANN, S.; RAMAGE, M. Engineered timber vs steel for mid-span roof structures. **Construction and Building Materials**, 2021.

Manual Brasileiro de Cálculo de Estruturas Metálicas. São Paulo: MIC/STI, 1986.

MOSES, D.; PRION, H. Sustainable structural design using engineered wood. **Forest Products Journal**, 2020.

NOGUEIRA, Gilcimar Saraiva. **Avaliação de soluções estruturais para galpões compostos por perfis de aço formados a frio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)—Ouro Preto, MG: Universidade Federal de Ouro Preto, set. 2009.

NUNES, S.; CALIL JUNIOR, C. Desempenho estrutural de treliças de madeira de pequeno porte. **Revista Árvore**, 2019.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BOA VISTA DO CADEADO (RS). **Planilha orçamentária: Orçamento base para licitação (ORAMENTO.pdf)**. [S.l.]: Prefeitura Municipal de Boa Vista do Cadeado (RS), 2025. Disponível em: <<https://mail.boavistadocadeado.rs.gov.br/uploads/edital/28889/ORAMENTO.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2026.

SCHAFER, B. Cold-formed steel design using the direct strength method. **Journal of Constructional Steel Research**, 2016.

SILVA, Clara Balotin Leocadio da. **Dimensionamento de uma treliça de madeira segundo as normas brasileira e americana**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil)—Uberlândia, MG, Brasil: Universidade Federal de Uberlândia, 7 maio 2025.

SILVA, F. S.; PIGNATTA, L. T. **Estruturas de Aço: Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Blucher, 2020.

TRAHAIR, N. S.; BRADFORD, M. A. **The Behaviour and Design of Steel Structures to EC3**. London: CRC Press / Taylor & Francis, 2017.

ZHANG, C.; RASMUSSEN, K. J. R. Design and behavior of steel truss structures. **Engineering Structures**, 2018.

APÊNDICE A – REDIMENSIONAMENTO DA SEÇÃO

Neste apêndice apresenta-se o redimensionamento da seção transversal dos banzos da treliça de madeira, em razão do não atendimento à verificação de resistência à compressão paralela às fibras para a seção inicialmente adotada. O procedimento foi realizado com base nos esforços normais máximos obtidos na análise estrutural e nos critérios de verificação estabelecidos pela NBR 7190.

A partir do não atendimento verificado para os banzos comprimidos, procedeu-se ao redimensionamento de sua seção transversal. Na configuração inicial, havia sido adotada uma seção de 5 cm × 14 cm, correspondente a uma área de 70 cm². Para atender à verificação da resistência à compressão paralela às fibras, adotou-se uma nova seção de 7 cm × 24 cm, equivalente a uma área de 168 cm². Com essa alteração, a peça passou a apresentar condição resistente compatível com os requisitos normativos, uma vez que a tensão normal de compressão calculada se tornou inferior à resistência de cálculo da madeira.

A modificação da seção transversal dos banzos implica aumento do peso próprio dos elementos estruturais, tornando necessária a atualização das cargas permanentes consideradas na análise. Assim, procedeu-se ao recálculo do peso próprio dos banzos com base na nova seção adotada, mantendo-se o mesmo peso específico aparente da madeira utilizado no desenvolvimento do estudo. Os novos valores de peso próprio obtidos são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Atualização do peso próprio após o redimensionamento

	Área (cm²)	Comprimento (cm)	Volume (cm³)	Densidade (kg/cm³)	Massa (kg)	Peso (N)	Peso adotado (kN)
Terça	96	66000	6336000	0,00102	6462,72	63400,28	63,40
Montante	96	11000	1056000	0,00102	1077,12	10565,55	10,57
Diagonal	168	25303,3	4250954,4	0,00102	4335,97	42535,90	42,54
Banzo superior	168	22435,6	3769180,8	0,00102	3844,56	37715,18	37,72
Banzo inferior	168	22000	3696000	0,00102	3769,92	36982,92	36,98

Fonte: O Autor (2026)

Os pesos próprios dos elementos estruturais foram transformados em cargas distribuídas lineares ao longo de seus comprimentos, dividindo-se o peso de cada peça pelo respectivo comprimento, em metros. Os valores resultantes são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Cargas distribuídas de peso próprio por elemento estrutural redimensionado

Fatores	Resultados (kN/m)
Carga da terça	0,096
Carga dos montantes	0,048
Carga das diagonais	0,168
Carga do banzo superior	0,168
Carga do banzo inferior	0,168

Fonte: O Autor (2026)

Com a modificação do peso próprio dos banzos, tornou-se necessário atualizar as combinações de ações utilizadas na análise estrutural, uma vez que a carga permanente total da treliça foi alterada. Desse modo, as combinações no Estado Limite Último e no Estado Limite de Serviço foram recalculadas com base no novo valor de carregamento permanente, mantendo-se os mesmos coeficientes parciais e coeficientes de combinação adotados no estudo original. Essa etapa foi necessária para garantir consistência entre o redimensionamento efetuado e a análise estrutural final da solução em madeira.

Tabela 11: Combinações de ações atualizadas após o redimensionamento

Combinação	Resultado (kN/m)
Combinação 1	1,819
Combinação 2	2,191
Combinação 3	2,311
Combinação 4	1,321
Combinação 5	2,683
Combinação 6	1,693
Combinação 7	2,006
Combinação 8	2,626
Combinação 9	2,826
Combinação 10	1,176
Combinação 11	3,446
Combinação 12	1,796

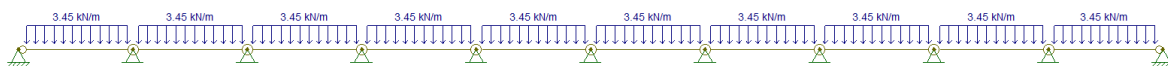
Fonte: O Autor (2026)

A partir da atualização da seção dos banzos e das combinações de ações, procedeu-se à nova verificação estrutural dos elementos redimensionados. Os resultados mostraram que a nova seção adotada passou a atender ao critério de resistência à compressão paralela às fibras. Caso tenham sido observadas alterações nos deslocamentos ou nos esforços internos da estrutura,

esses valores também devem ser apresentados nesta etapa, a fim de demonstrar os efeitos do redimensionamento sobre o comportamento global da treliça.

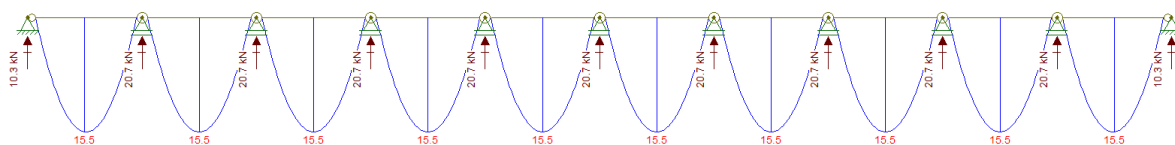
A metodologia de análise adotada no redimensionamento manteve-se consistente com aquela empregada na etapa anterior do estudo. Inicialmente, as cargas atuantes foram aplicadas diretamente sobre as terças, conforme ilustrado na Figura 14, a partir das combinações de ações consideradas. Em seguida, determinaram-se as reações de apoio correspondentes, cujos valores estão apresentados na Figura 15. Posteriormente, essas reações foram transferidas e aplicadas como carregamentos nodais no modelo da treliça, conforme mostrado na Figura 16, permitindo a obtenção dos novos esforços e deslocamentos da estrutura redimensionada. Os resultados da análise da treliça podem ser observados na Figura 17, enquanto os valores máximos obtidos para os principais parâmetros analisados são apresentados de forma sintética na Tabela 12: Valores críticos da seção redimensionada.

Figura 14: Cargas da nova seção aplicadas na terça



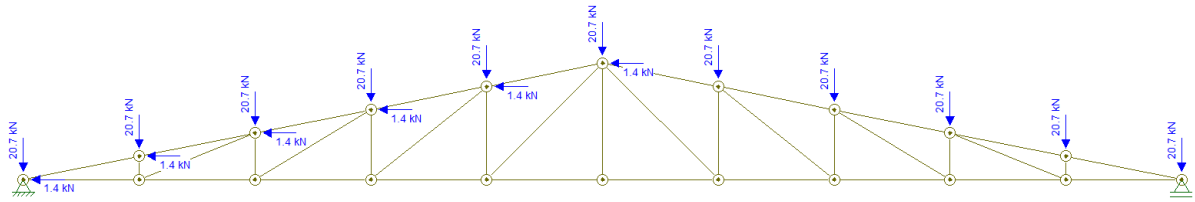
Fonte: O Autor (2026)

Figura 15: Resultados das novas cargas aplicas na terça



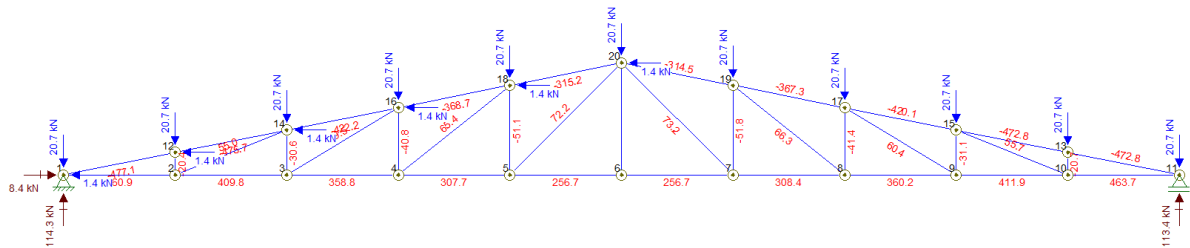
Fonte: O Autor (2026)

Figura 16: Cargas da nova seção aplicada na treliça



Fonte: O Autor (2026)

Figura 17: Resultados da nova seção



Fonte: O Autor (2026)

Tabela 12: Valores críticos da seção redimensionada

Tipo de barra	Tração máxima (kN)	Compressão máxima (kN)
Banzos	460,9	477,1
Diagonais	73,2	-
Montantes	-	51,8

Fonte: O Autor (2026)

No dimensionamento dos elementos da treliça redimensionada, foram mantidos os mesmos valores de resistência de cálculo à compressão paralela às fibras ($f_{c0,d}$) e à tração paralela às fibras ($f_{t0,d}$) adotados na análise original, uma vez que não houve alteração da classe de resistência nem das propriedades do material empregado, mas apenas das seções transversais de determinados elementos. Dessa forma, as verificações de resistência foram realizadas com

base nos esforços obtidos na nova análise estrutural, considerando-se as expressões e os critérios normativos já anteriormente apresentados. Na sequência, apresentam-se as verificações correspondentes dos elementos redimensionados, com o objetivo de demonstrar o atendimento aos requisitos de segurança estabelecidos em norma.

$$\sigma N_{c,d} = \frac{477,1 \times 1000}{16800} = 28,39 \text{ MPa}$$

Como $28,39 \text{ MPa} > 28,91 \text{ MPa}$, a seção atende à verificação à compressão.

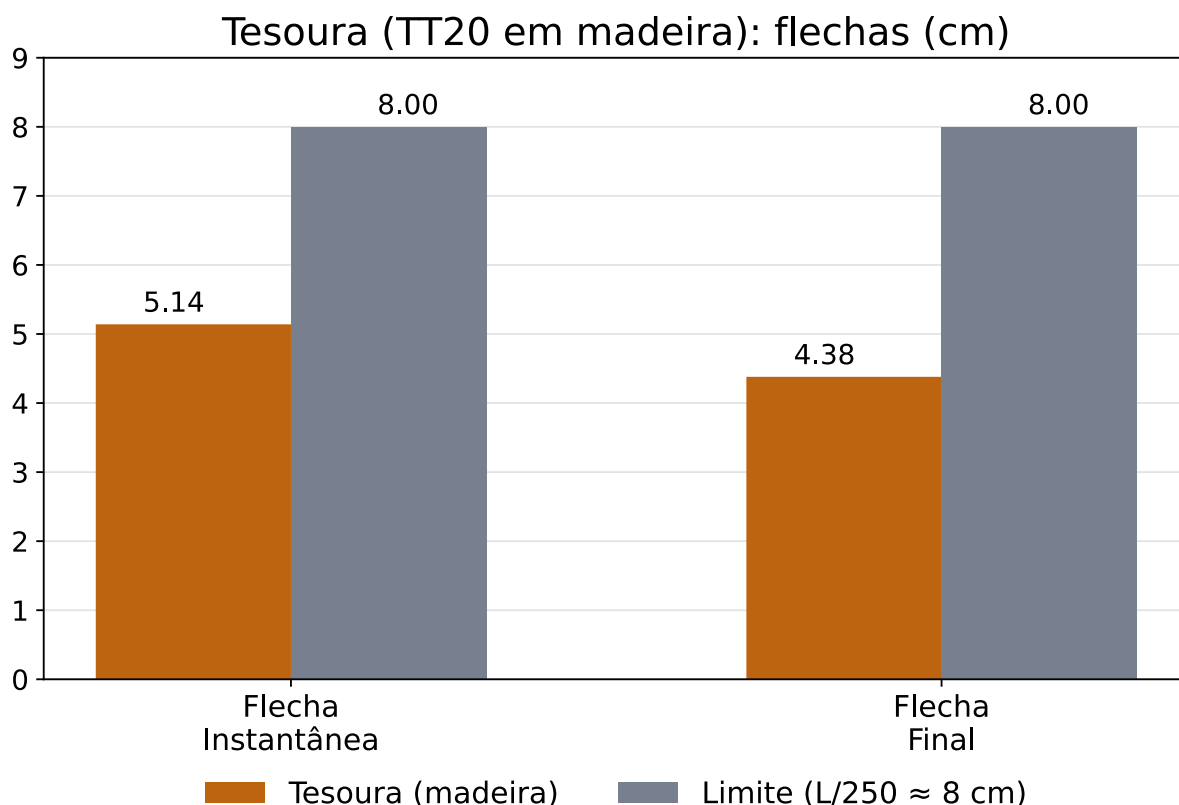
$$\sigma N_{t,d} = \frac{460,9 \times 1000}{16800} = 27,43 \text{ MPa}$$

Como $57,68 \text{ MPa} > 27,43 \text{ MPa}$, a seção atende à verificação à tração.

Além da verificação da resistência dos elementos redimensionados, torna-se necessário reavaliar os deslocamentos da estrutura, uma vez que a alteração da seção transversal dos banzos modifica a rigidez dos elementos e, simultaneamente, provoca alteração no peso próprio da treliça. Assim, foi realizada nova análise dos deslocamentos, com ênfase nas flechas máximas dos elementos mais solicitados, a fim de verificar o atendimento aos critérios de serviço adotados no trabalho.

A reavaliação das flechas foi conduzida com base nas combinações de serviço atualizadas, considerando-se os efeitos das ações permanentes e variáveis, bem como os coeficientes de combinação utilizados no estudo original. Foram analisadas, em especial, a flecha instantânea e a flecha final, comparando-se os resultados obtidos antes e depois do redimensionamento. Os resultados dessa verificação podem ser observados na Figura 18.

Figura 18: Flechas da nova seção

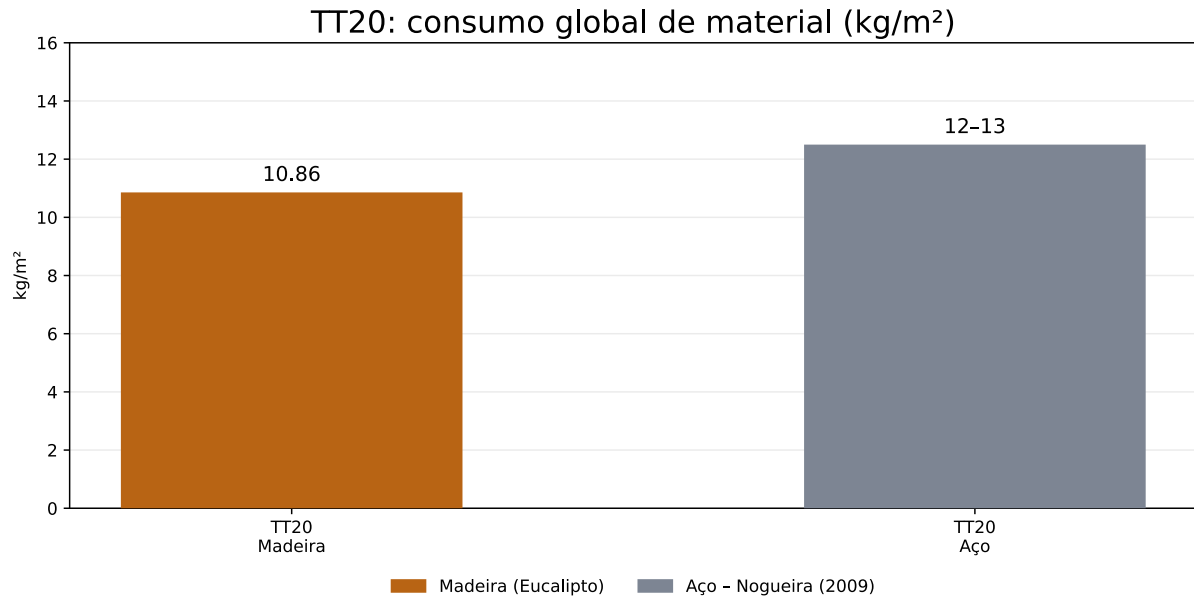


Fonte: O Autor (2026)

Com base nos resultados obtidos, foi possível verificar se o aumento da seção dos banzos contribuiu para melhorar o desempenho global da estrutura em serviço, reduzindo deslocamentos excessivos e tornando a solução estrutural mais compatível com os limites normativos adotados.

Com o redimensionamento dos banzos e a consequente elevação da seção dos elementos mais solicitados, verificou-se aumento no consumo global de material da solução em madeira. Na configuração inicial, o consumo era de 10,43 kg/m², passando para aproximadamente 10,86 kg/m² após o redimensionamento. Esse acréscimo, embora moderado, reflete diretamente o aumento da área transversal adotada para os elementos comprimidos, resultando em maior massa total da treliça. Ainda assim, a solução em madeira permaneceu com consumo global inferior ao intervalo de 12 a 13 kg/m² adotado como referência para a solução metálica. A síntese comparativa desses valores é apresentada no gráfico da Figura 19.

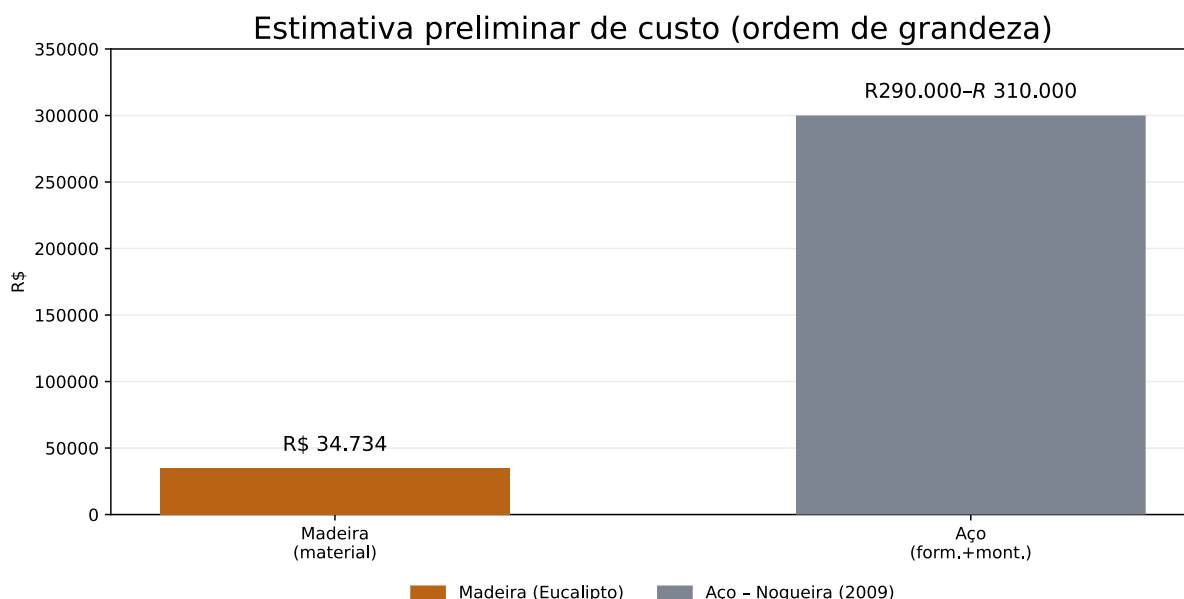
Figura 19: Consumo global da nova seção



Fonte: O Autor (2026)

Após o redimensionamento dos banzos e a atualização das ações permanentes, procedeu-se à reavaliação comparativa da solução em madeira, considerando os efeitos do aumento de seção sobre os indicadores globais de custo. Com a nova configuração, o volume total de madeira considerado para a treliça passou a ser de aproximadamente 12,77 m³ e, adotando-se o valor de referência de R\$ 2.719,50/m³ para madeira serrada, obteve-se um custo estimado da ordem de R\$ 34,7 mil apenas para o material. Esse valor é superior ao obtido para a configuração inicial, cujo custo era da ordem de R\$ 33 mil, evidenciando o impacto direto do redimensionamento sobre a estimativa econômica da solução. A comparação atualizada entre a solução em madeira redimensionada e a solução metálica pode ser observada na Figura 20, na qual se verifica que, mesmo após esse acréscimo, a alternativa em madeira permanece economicamente mais favorável que a solução em aço considerada no estudo.

Figura 20: Estimativa de custo com a nova seção



Fonte: O Autor (2026)

Ao se comparar a estimativa de custo da solução em madeira antes e após o redimensionamento, observa-se um acréscimo decorrente do aumento da seção transversal dos elementos comprimidos e, por consequência, do volume total de material empregado. Na configuração inicial, o custo estimado da madeira era da ordem de R\$ 33 mil, ao passo que, após o redimensionamento, esse valor passou para aproximadamente R\$ 34,7 mil. Tal variação corresponde a um aumento absoluto de cerca de R\$ 1,7 mil e relativo de aproximadamente 5% em relação à situação inicialmente analisada. Ainda assim, mesmo com a elevação observada, a solução em madeira manteve-se economicamente mais favorável que a alternativa em aço considerada no estudo.

O redimensionamento dos banzos comprimidos mostrou-se necessário para adequar a solução estrutural em madeira aos critérios de segurança estabelecidos em norma. A atualização do peso próprio e das combinações de ações permitiu tornar a análise mais consistente, evitando que a nova seção fosse avaliada isoladamente e sem compatibilidade com o restante do modelo estrutural. Dessa forma, a solução final em madeira passou a representar uma condição mais realista e tecnicamente adequada para fins de comparação com a alternativa metálica.