

VERIFICAÇÃO DE UMA PONTE DE MADEIRA COM ESTRUTURA TRELIÇADA DE ACORDO COM A NBR 7190:2022

Vinícius Moura E Silva¹, Lauren Karoline De Sousa Gonçalves²

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

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

Resumo: Este estudo se propôs a dimensionar as peças de uma ponte de madeira em viga treliçada, utilizando o método de Engesser-Courbon em conjunto com as normas da ABNT NBR 7190:2022, ABNT NBR 7188:2024 e ABNT NBR 8681:2003. A partir do desenvolvimento do trabalho e dos resultados obtidos, pontua-se que as dimensões e tipos de madeira para compor as peças da estrutura atendem aos critérios normativos. No dimensionamento foram consideradas peças roliças de 20cm de diâmetro para madeira de classe D60 na viga treliçada e 25cm de largura por 16cm de altura com madeira classe D40 no tabuleiro. Esse trabalho contribui com as atualizações da norma brasileira NBR7190 trazendo informações sobre as mudanças ocorridas que interferem no dimensionamento das peças.

Palavras chaves: Pontes de madeira, Viga treliçada, Dimensionamento estrutural, Engesser-Courbon.

1. INTRODUÇÃO

A infraestrutura rodoviária no Brasil experimentou um desenvolvimento significativo ao longo das últimas décadas, impulsionando a necessidade de construção de novas pontes para superar desafios e facilitar o uso do modal rodoviário. Segundo Oliveira (2020), as primeiras rodovias brasileiras surgiram por volta da década de 1920. Com a criação do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) em 1937, a expansão da malha rodoviária teve início, ganhando impulso entre 1940 e 1960 com a implementação do Fundo Rodoviário Nacional, a fundação da Petrobrás e o crescimento da indústria automobilística nacional.

No contexto do transporte, as pontes rodoviárias desempenham um papel fundamental, sendo que as de madeira possuem uma história ancestral que remonta à Antiguidade, quando eram construídas com troncos e tábuas. Ao longo da Idade Média, evoluíram para estruturas mais complexas, incorporando técnicas como arcos e pilares. Com a revolução industrial, novos materiais como aço e concreto surgiram, gradativamente substituindo as estruturas de madeira. Atualmente, as pontes de madeira

são menos comuns em áreas urbanas, mas ainda são preservadas em locais rurais e históricos como parte do patrimônio cultural brasileiro.

Embora a madeira seja um material de construção antigo e versátil, seu uso como elemento estrutural ainda é menos comum no Brasil em comparação com países do hemisfério norte. Isso se deve, em parte, ao desconhecimento das características da madeira e à preocupação com sua durabilidade e resistência, bem como ao impacto na degradação florestal. No entanto, é importante considerar a possibilidade de manejo sustentável das florestas, tanto nativas quanto plantadas, e a aplicação de recursos técnicos para o reflorestamento, visando aprimorar a qualidade da matéria-prima de acordo com sua finalidade de uso (Santos, 2019).

A partir do ano de 2000 iniciou-se incentivos por parte dos agentes do setor de base florestal juntamente com setores da construção civil para o desenvolvimento e promoção de produtos e sistemas produtivos voltados para a utilização da madeira como material principal na construção civil (Shigue,2018).

Sendo a madeira um dos materiais mais utilizados há séculos, uma vasta gama de sistemas estruturais fora desenvolvida e evoluída ao longo das décadas. De acordo com Pfeil e Pfeil (2003), entre os diversos sistemas estruturais, o mais tradicional é o sistema treliçado, empregado em coberturas residenciais, pontes e indústrias dos mais diversos tipos.

Assim, este trabalho tem como objetivo dimensionar as peças de uma ponte de madeira seguindo as recomendações da norma brasileira ABNT NBR7190-1:2022, destacando as alterações principais da norma em comparação com o dimensionamento feito por Góis (2022) para a mesma ponte, conforme estabelecido pela ABNT NBR7190:1997. Para isto, este trabalho vislumbra definir os parâmetros da ponte, determinar carga atuante, dimensionar e verificar peças do tabuleiro e da viga treliçada, e ainda pontuar as principais mudanças que ocorreram em relação à atualização da norma brasileira NBR7190 em 2022.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E DEFINIÇÕES

A fim de facilitar o entendimento desse trabalho de conclusão de curso (TCC), e para que ele possa servir como um objeto de estudo para outros trabalhos, foi realizado um levantamento bibliográfico dos principais conceitos que devem ser conhecidos como pré-requisito para o dimensionamento das peças que compõe uma estrutura de madeira. Além disso, serão pontuadas as principais alterações que ocorrerão, relacionadas ao dimensionamento das peças apresentado neste trabalho, com a atualização da norma brasileira utilizada no dimensionamento de estruturas de madeira.

2.1 Definições

A ABNT NBR7188:2024 inclui alguns termos e definições que são essenciais para compreensão do tema abordado, destacando os termos ponte e vão. Ponte é a denominação das estruturas utilizadas para transpor canais aquífero dando continuidade

ao leito normal de uma via, e vão refere-se a distância na horizontal alinhada com o eixo da superestrutura.

2.2 Elemento construtivo

A estrutura a ser dimensionada pertence ao sistema construtivo de pontes treliçadas. As pontes em viga treliçada possuem como característica a facilidade construtiva. Esse sistema, que utiliza madeira, é particularmente eficaz em vãos menores, além de oferecer uma redução significativa nos custos devido à ausência de pilares ao longo da estrutura (Moraes, 2007). Essa ausência de pilares possibilita que a estrutura supere obstáculos em locais onde a seção transversal ou o escoamento da água impossibilitam a instalação de pilares.

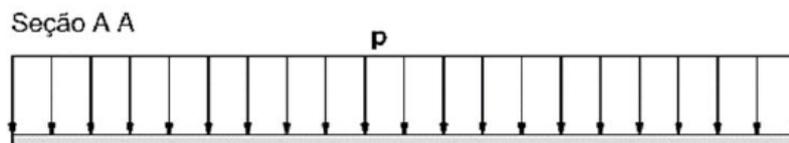
De acordo com Vitório (2015), as pontes em vigas são caracterizadas por um sistema estrutural de tabuleiro composto por duas ou mais vigas longitudinais ou longarinas. Neste trabalho, segue-se a configuração da estrutura de projeto apresentada no trabalho de conclusão de curso de Góis (2022), que é uma ponte em viga treliçada com peças roliças, onde as barras estão sujeitas a esforços normais de compressão e tração. Em relação aos parâmetros relacionados às propriedades físicas e mecânicas do material, serão considerados os valores recomendados pela ABNT NBR7190:2022.

2.3 Cargas móveis

A ABNT NBR7188:2024 estabelece, no item 5.1.1, o padrão para as ações móveis verticais em uma ponte, definidas a partir de um veículo fictício denominado pela norma como veículo-tipo, caracterizado por 6 rodas, 3 eixos de carga com afastamento de 1,5m entre si e uma área de ocupação de 3m por 6m totalizando 18m². Desta forma, a norma recomenda a disposição das cargas estáticas ao longo da seção transversal e longitudinal da ponte. Tais cargas serão utilizadas para carregar a ponte em estudo, juntamente com o peso próprio das peças estruturais.

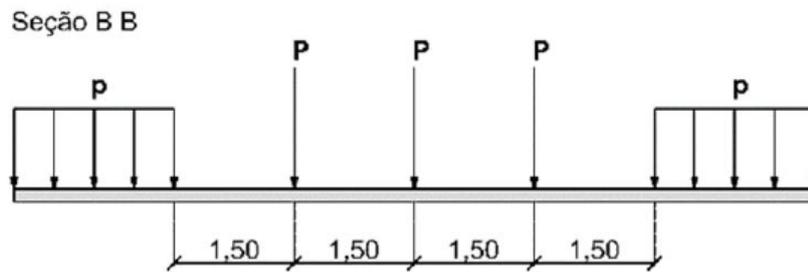
Segundo Magalhães (2018) os carregamentos móveis em pontes rodoviárias exibem cargas exercidas pelos veículos e também pela multidão sobre os passeios, sendo geralmente o esquema de carregamento para as seções longitudinais e transversais semelhantes às apresentadas nas Figuras 1 e 2.

Figura 1: Disposição das cargas móveis na seção transversal



Fonte: ABNT NBR7188:2024

Figura 2: Disposição das cargas móveis na seção longitudinal



Fonte: ABNT NBR7188:2024

De acordo com Calil Junior (2006), as pontes podem ser solicitadas por três tipos de ações diferentes: as permanentes, que são aquelas que solicitam a estrutura por toda vida útil; as acidentais, que possui uma incidência recorrente, mas não constante; e as excepcionais, que ocorrem com menor frequência e geralmente são de curta duração. No contexto deste artigo, as cargas permanentes serão atribuídas ao peso próprio das peças, enquanto as cargas acidentais serão resultantes da ação vertical variável do veículo-tipo.

Além disso, com o carregamento definido, torna-se necessário estabelecer as características da madeira que irá compor a estrutura, tais como resistência à flexão (f_b), tração (f_t), compressão (f_c), módulo de elasticidade (E_0), densidade (ρ), entre outras propriedades. Esses dados serão fundamentais para determinar a resistência e a carga suportada pela ponte em viga treliçada. Todos os cálculos relacionados às propriedades da madeira serão realizados em conformidade com a ABNT NBR7190:2022.

2.4 Alterações normativas da NBR 7190 de 1997 para 2022

Ao comparar a atualização da norma ABNT NBR 7190:1997 para a vigente, ABNT NBR 7190-1:2022, é possível observar algumas mudanças que impactam o dimensionamento da ponte de madeira em viga treliçada.

A primeira é em relação aos coeficientes de modificação K_{mod} , onde o K_{mod3} presente na norma de 1997 deixou de existir com a atualização da norma. Ainda em relação aos coeficientes de modificação, a tabela que apresenta os valores para o K_{mod2} , na nova norma, separou as classes de umidade, ou sejam cada classe possui seu próprio coeficiente de modificação e deixam de compartilhar o mesmo valor como era na norma antiga.

Outra mudança observada é que o termo Dicotiledônea, que era utilizado para se referir às madeiras duras, conhecidas como hardwood, não é utilizado na nova norma. Esta passou a classificar as madeiras como coníferas e folhosas. Além disso, a norma trouxe uma nova tabela (Tabela 3 da norma ABNT NBR7190-1:2022) que traz valores característicos de cada tipo de madeira com base em ensaios de peças estruturais, além de uma maior quantidade de classes de resistência em relação à ABNT NBR7190:1997. Outro fator em relação às classes de resistência refere-se às associações. Na norma de

1997, as classes estavam associadas à resistência característica de compressão paralela às fibras; já na nova norma, estão associadas à resistência à flexão.

Outra mudança notória na atualização foi a divisão da norma em sete partes diferentes, onde a parte 1 é referente aos critérios de dimensionamentos, sendo que as demais partes trazem informações relacionadas aos métodos de ensaios.

Os coeficientes de minoração da resistência também sofreram mudanças. Na norma de 1997, o coeficiente de ponderação para o estado limite último decorrente da tração tem o valor de 1,8, enquanto na norma em vigência, seu valor é igual ao de compressão, 1,4.

3. METODOLOGIA

Este estudo tem como objetivo principal o dimensionamento das peças de uma ponte localizada em uma via rural, a qual desempenha um papel crucial no acesso a uma fazenda especializada na produção e colheita de eucalipto. Essa infraestrutura é fundamental para viabilizar o transporte eficiente e seguro desse recurso por meio de caminhões, contribuindo de forma significativa para a logística e operação da fazenda.

Este tópico apresenta a estrutura a ser dimensionada, bem como os desenhos esquemáticos, a descrição dos detalhes de projeto, as formulações, normativas e *softwares* utilizados para o desenvolvimento do trabalho. Vale salientar que a disposição das cargas no tabuleiro e na longarina será descrita, assim como o método de Engesser-Courbon e os coeficientes majoradores aplicáveis.

3.1 Estrutura dimensionada

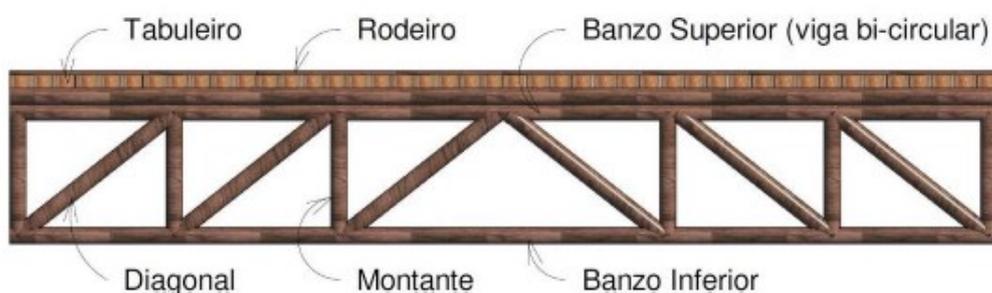
As Figuras 3 e 4 permitem visualizar de forma detalhada a estrutura dimensionada neste estudo e as denominações das peças. Os desenhos do modelo tridimensional e da longarina foram elaborados por Góis (2022).

Figura 3 – Modelo tridimensional da ponte de madeira em estudo



Fonte: Góis (2022).

Figura 4 – Vista frontal da longarina da ponte de madeira em estudo



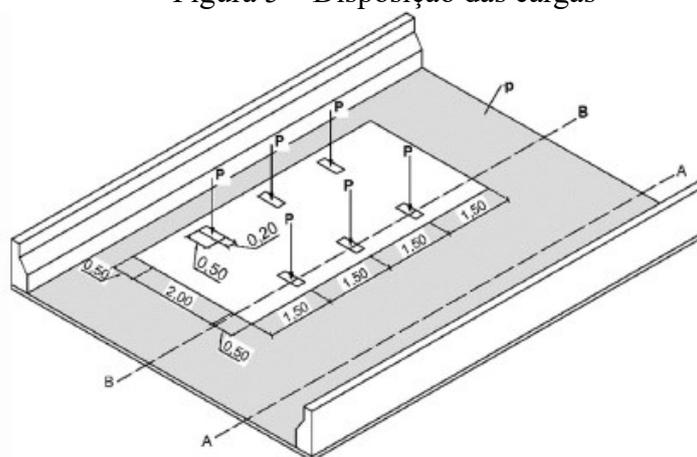
Fonte: Góis (2022).

Segundo Góis (2022), existem diferentes tipos de veículos que podem ser utilizados no transporte de eucalipto, desde pequenos tratores até caminhões trucados com seis semirreboques interligados. No entanto, o projeto da ponte em estudo terá como restrição o trânsito de caminhões com capacidade superior a 30 toneladas, ou seja, limita-se o trânsito para caminhões maiores que um bitruck com 4 eixos, cuja capacidade máxima de carga é de 22 toneladas e peso bruto total de 29 toneladas.

Neste sentido, a ponte em questão será considerada com dimensões de 12 metros de comprimento por 4 metros de largura, sendo projetada para suportar o tráfego classificado como Classe 30. A estrutura será considerada como bi apoiada, que é uma configuração que lhe confere estabilidade e distribuição adequada de cargas.

De acordo com o Manual de Projetos e Construção de Pontes de Madeira, escrito por Calil Junior (2006), as pontes rodoviárias são distribuídas em 3 classes, na qual atribuímos a ponte em análise à classe 30 para veículos-tipo pesando 300 kN, como citado anteriormente, com uma carga distribuída de 5 kN/m² ao longo da faixa de rodagem e totalizando 50 kN por pneu, seguindo as disposições de cargas móveis apresentadas na norma brasileira ABNT NBR7188:2024, conforme a Figura 5.

Figura 5 – Disposição das cargas



Fonte: ABNT NBR7188:2024.

Os rodeiros, responsáveis por distribuir a carga dos veículos, são compostos por tábuas de madeira de alta resistência. A Tabela 1 representa as dimensões de cada elemento estrutural pertencente a ponte de madeira, com as classes de madeira definidas. Cada rodeiro é montado com aproximadamente dezesseis tábuas de 3,00 metros de comprimento, 25 centímetros de largura e 5 centímetros de espessura. O tabuleiro da ponte, composto por pranchas transversais, com espaçamento de 2,50 centímetros entre elas.

Tabela 1 – Dimensões dos elementos estruturais da ponte.

Elementos	Classe Madeira	Dimensões				
		Comprimento (m)	Largura (m)	Espessura (m)	Diâmetro (m)	
Rodeiro	D40	12,00	1,00	0,05	-	
Tabuleiro	D40	4,00	0,25	0,16	-	
Treliça	Banzo superior	D60	12,00	0,20	-	0,20
	Banzo inferior	D60	12,00	0,20	-	0,20
	Diagonais	D60	2,83	0,20	-	0,20
	Montantes	D60	2,00	0,20	-	0,20

Fonte: Autor (2024).

As estruturas treliçadas são do tipo Howe, posicionadas como longarinas. As longarinas possuem comprimentos de 12 metros, espaçadas a cada 2 metros, e compostas por barras roliças de 20 centímetros de diâmetro. O banzo superior é composto por duas barras formando uma viga bi circular, já o banzo inferior, montantes e diagonais utilizam apenas uma barra.

Em relação aos carregamentos, considera-se como carga permanente o peso próprio da estrutura, enquanto que as cargas variáveis estão associadas à carga que pode variar ao longo do tempo, como o tráfego de veículos e outros elementos dinâmicos.

No âmbito deste estudo, seguindo os critérios de dimensionamento da ponte representada no trabalho de Góis (2022), o tabuleiro da ponte é sustentado diretamente pelas vigas treliçadas. Consequentemente, as cargas dos veículos são transmitidas para as pranchas do tabuleiro, as quais, por sua vez, distribuem esses esforços para as longarinas. Essas longarinas, por sua vez, transferem as cargas para os apoios e fundações da estrutura. É importante mencionar que o presente estudo não inclui o dimensionamento das fundações da ponte, do rodeiro e das conexões entre as peças.

O dimensionamento das peças de madeira seguirá as diretrizes estabelecidas pelas normas técnicas ABNT NBR7190-1:2022 para o dimensionamento de estruturas de madeira, ABNT NBR7188:2024 para determinar as ações devidas às cargas móveis e ABNT NBR8681:2003 para o estabelecimento de ações e seguranças nas estruturas.

Para a análise e modelagem computacional das estruturas, utilizou-se o *software* FTOOL, reconhecido pela sua eficiência e precisão nos cálculos estruturais. Os cálculos relacionados ao dimensionamento e verificação das peças estruturais foram realizados em um *software* de planilhas, o Microsoft Excel.

3.2. Dimensionamento

A ponte de madeira em viga treliçada é uma estrutura composta por rodeiro, tabuleiro e longarinas. No entanto, o rodeiro não será dimensionado neste estudo. Este estudo se concentrará exclusivamente no dimensionamento das peças que compõem as longarinas, responsáveis por suportar diretamente as cargas, e no dimensionamento do tabuleiro, que proporciona a superfície de passagem logo acima das longarinas.

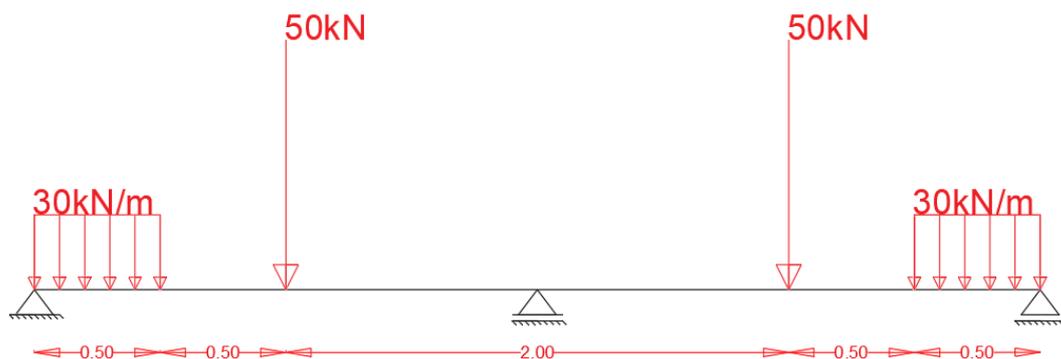
3.2.1. Tabuleiro

O dimensionamento das peças seguirá a norma atualizada, começando pelo tabuleiro devido à forma como os esforços se distribuem pela estrutura. Essa abordagem é fundamental para garantir que as cargas sejam adequadamente suportadas e distribuídas ao longo de toda a ponte, assegurando sua integridade e desempenho conforme as diretrizes normativas.

De acordo com Calil Júnior (2006), os cálculos do tabuleiro devem ser realizados considerando o momento fletor. Nesse contexto, não serão realizadas verificações para a flecha máxima e os esforços cortantes. Este método de dimensionamento proporcionará uma análise das demandas estruturais sobre o tabuleiro da ponte, a fim de determinar se as seções transversais das peças e o tipo de madeira atende a este critério da norma.

Observa-se a partir da Figura 3, que as peças do tabuleiro estão dispostas seguindo a seção transversal da ponte. Deste modo, os esforços atuantes serão aplicados na seção transversal da ponte conforme esquematizado na Figura 6. Como definido anteriormente, a ponte é classe 30 com veículos até 30 toneladas, o que resulta em um carregamento por pneu (P) de 50kN e uma carga distribuída (p) de 30kN/m, resultante da multiplicação entre 5kN/m² pelo comprimento do veículo de 6 metros.

Figura 6 – Disposição do carregamento na seção transversal



Fonte: Autor (2024).

Os valores de cálculo (X_d) serão obtidos conforme o item 5.8.3 da ABNT NBR7190:2022, a partir da seguinte expressão:

$$X_d = K_{mod} \frac{X_k}{\gamma_w} \quad (1)$$

sendo X_k o valor característico de uma propriedade da madeira, K_{mod} o coeficiente de modificação e γ_w o coeficiente de minoração das propriedades.

Os valores característicos para as propriedades da madeira considerada para o tabuleiro, classificada como D40, estão na Tabela 2. Nesta tabela são apresentados os valores característicos de resistência à flexão ($f_{b,k}$), à tração paralela as fibras ($f_{t,0,k}$), à tração perpendicular ($f_{t,90,k}$), à compressão paralela ($f_{c,0,k}$), à compressão perpendicular as fibras ($f_{c,90,k}$) e ao cisalhamento ($f_{v,k}$). Além das resistências, apresenta-se ainda o módulo de elasticidade a 0° médio ($E_{0,m}$) e da densidade média (ρ_k).

Tabela 2 – Propriedades madeira classe D40

$f_{b,k}$ (Mpa)	$f_{t,0,k}$ (Mpa)	$f_{t,90,k}$ (Mpa)	$f_{c,0,k}$ (Mpa)	$f_{c,90,k}$ (Mpa)	$f_{v,k}$ (Mpa)	$E_{0,m}$ (Gpa)	ρ_k (kg/m ³)
40,0	24,0	0,6	26,0	8,3	4,0	13,0	660,0

Fonte: Autor (2024).

O coeficiente de modificação K_{mod} é o produto entre K_{mod1} e K_{mod2} que são coeficientes que levam em consideração a classe de carregamento da estrutura e a classe de umidade admitida. Os coeficientes de minoração das propriedades de acordo com a norma brasileira ABNT NBR7190-1:2022 são 1,4 para estados-limites últimos em decorrência de esforços normais ou 1,8 para estados limites últimos em função de esforços cisalhantes.

Os valores característicos mostrado na Tabela 1 são parâmetros obtidos considerando a umidade de equilíbrio da madeira de 12%. Nos casos de umidade diferente da umidade padrão, é necessário fazer correções conforme recomendações da ABNT NBR7190:2022. As equações estão descritas no item 5.6.1 da ABNT NBR 7190-1:2022 e inseridas a seguir:

$$f_{12} = f_u \left(1 + \frac{3(U - 12)}{100} \right) \quad (2)$$

$$E_{12} = E_u \left(1 + \frac{2(U - 12)}{100} \right) \quad (3)$$

sendo f_{12} a resistência corrigida em relação a umidade de 12%, f_u a resistência em relação a umidade da madeira, U a umidade em análise e E_{12} e E_u a rigidez corrigida para a umidade de 12% e rigidez em relação a umidade da madeira respectivamente.

É fundamental garantir a solidez de uma estrutura, o que inclui não apenas assegurar que a carga exercida não ultrapasse a capacidade de resistência da mesma, mas também considerar sua vida útil. A durabilidade e a capacidade de suportar as cargas ao longo do tempo são aspectos igualmente importantes para garantir a integridade e a segurança da estrutura ao longo de sua vida útil. Neste sentido, a verificação do tabuleiro será realizada com base nos cálculos de momentos fletores máximos de compressão e tração, obtidos

pelo *software* Ftool. A formulação se baseia ao item 6.3.4 da ABNT NBR7190-1:2022, que estabelece os critérios de verificação para flexão simples reta, conforme equação a seguir:

$$\frac{M_d/W}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (4)$$

sendo $f_{m,d}$ o valor de cálculo da resistência à flexão, W é o módulo de resistência da seção transversal à direção paralela às fibras, em relação ao eixo central de inércia perpendicular ao plano de ação do momento fletor e M_d é o valor de cálculo do momento fletor.

3.2.2. Longarina

No dimensionamento das longarinas é necessário estabelecer a situação mais crítica do veículo tipo na seção transversal da ponte em viga treliçada. Primeiramente, é necessário definir a rigidez da ponte conforme o método de distribuição de carga na seção transversal de pontes com vigamento denominado de Engesser-Courbon, onde a rigidez é definida, de acordo com a Eq. (5) (Alves, 2004).

$$\lambda = \frac{l}{2L} \sqrt[4]{\frac{L * n * \rho_L}{l * t * \rho_T}} \quad (5)$$

sendo L e l o comprimento e largura do tabuleiro em metros, n o número de longarinas, t o número de transversinas intermediárias (peças do tabuleiro) e ρ_T e ρ_L é a rigidez média das transversinas e longarinas em m^4 .

As rigidezes das longarinas e transversinas é dada pelas Eqs. (6) e (7), respectivamente:

$$\rho_L = \frac{10 * \pi * D_m^4}{64} \quad (6)$$

$$\rho_t = \frac{b * h^3}{12} \quad (7)$$

sendo D_m o diâmetro médio para esta ponte foi considerado peças roliças uniformes. Logo, o diâmetro é constante e foi considerado um valor de 20cm para montante, diagonal e banzos inferior e superior da viga treliçada.

Ainda com base em Alves (2004), foram consideradas algumas hipóteses adicionais. Primeiramente, as longarinas são assumidas como sendo paralelas e conectadas entre si perpendicularmente por transversinas, mantendo uma inércia constante. Em relação às transversinas, estas são consideradas simplesmente apoiadas nas longarinas, e supõe-se que as longarinas possuem rigidez infinita à flexão, o que significa que suas deformações são desprezíveis em comparação com as deformações das transversinas. Além disso, os efeitos de torção foram desconsiderados nesse contexto. Com base nessas hipóteses, as transversinas são tratadas como barras rígidas, mantendo seus eixos retos mesmo após a deformação do conjunto. Essas considerações são fundamentais para análises estruturais da ponte a ser dimensionada.

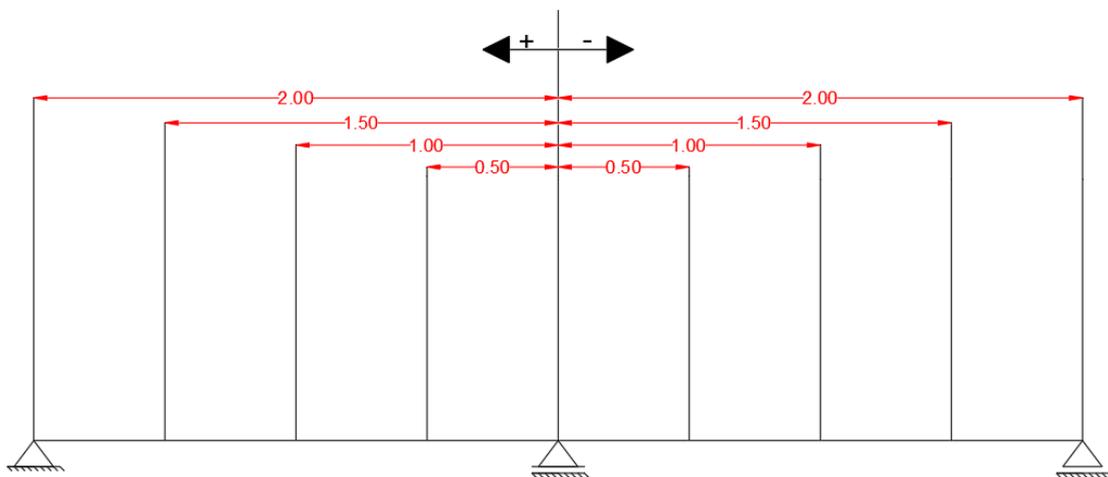
Seguindo com o método, o próximo passo é estabelecer o coeficiente de distribuição transversal com a Eq. (8), conforme apresentado por Alves (2004).

$$R_i = \frac{P}{n} \left(1 + 6 \frac{2 * i - (n + 1)}{n^2 - 1} * \frac{e}{\varepsilon} \right) \quad (8)$$

sendo R_i é o coeficiente de distribuição transversal de carga para uma longarina i considerada, P é a carga em kN, n o número de longarinas, e é a excentricidade da carga em metros e ε é o espaçamento entre as longarinas em metros.

Desta forma, os coeficientes de repartição serão obtidos utilizando uma carga unitária P igual a 1kN em função da excentricidade de aplicação desta carga. Na Figura 7 é possível visualizar as posições da carga unitária em relação a seção transversal da ponte, onde foi considerado a aplicação desta força a cada 50cm.

Figura 7 – Posições da carga unitária



Fonte – Autor (2024).

O método contempla a distribuição das cargas móveis ao longo da longarina a partir dos valores obtidos das seguintes expressões:

$$Q_1 = \varphi Q (r_1 + r_2) \quad (9)$$

$$q_1 = \varphi q (A_1 + A_2) \quad (10)$$

$$q_2 = \varphi q (A_2) \quad (11)$$

sendo os coeficientes representam Q_1 a carga concentrada do veículo tipo em kN, q_1 carga externa ou de multidão em kN/m, q_2 a carga interna em kN/m, φQ o valor majorado da carga estática concentrada em kN, φq valor majorado da carga distribuída em kN/m. O parâmetro A_1 corresponde à área positiva do gráfico da linha de influência limitada pela largura do veículo, enquanto que A_2 é a área positiva do gráfico da linha de influência limitada pela largura da carga externa. Além disso, r_1 e r_2 são os coeficientes de distribuição transversal correspondentes a posição da primeira e segunda roda do veículo tipo, respectivamente. A disposição das cargas majoradas na seção transversal da ponte será a situação mais crítica de sollicitação.

De acordo com ABNT NBR7188:2024, as cargas majoradas nas expressões anteriores, φq e φQ , são definidas a partir dos coeficientes de impacto vertical (CIV), coeficiente de número de faixas (CNF) e coeficiente de impacto adicional (CIA).

O CIV simula o efeito dinâmico da carga em movimento e para um vão de 12 metros é calculado conforme Eq. (12). O CNF amplifica as cargas levando em consideração a probabilidade de a carga móvel ocorrer para um determinado número de faixas, conforme Eq. (13). E o CIA majora a carga móvel devido a imperfeições da estrutura. Os possíveis valores para este coeficiente são 1,25 para obras em concreto ou mistas ou 1 para os demais elementos estruturais.

$$CIV = 1 + 1,06 \left(\frac{20}{LIV + 50} \right) \quad (12)$$

$$CNF = 1 - 0,05(n - 2) \quad (13)$$

sendo LIV o vão da estrutura isostáticas e n o número de faixas.

Apesar da estrutura da ponte apresentada ser em madeira, o coeficiente de impacto adicional adotado por Góis (2022) foi de 1,25, porém para atender as recomendações normativas, neste dimensionamento será considerado CIA igual a 1. Assim, a majoração das cargas concentradas e de multidão são obtidas conforme determina a ANBT NBR 7188:2024 através das Eqs. (14) e (15).

$$\varphi Q = P * CIV * CNF * CIA \quad (14)$$

$$\varphi q = p * CIV * CNF * CIA \quad (15)$$

sendo P é carga por pneu kN e p refere-se a carga distribuída em kN/m².

3.2.3. Combinação das ações

Os cálculos para determinar o peso próprio do rodeiro, do tabuleiro e das vigas treliçadas envolvem a multiplicação da densidade da madeira escolhida pelo volume total das peças. No caso específico do tabuleiro, o resultado dessa operação será dividido pela área do tabuleiro e, em seguida, multiplicado pela largura da faixa de influência de cada longarina. Essa abordagem nos permite obter valores precisos e relevantes para o dimensionamento e a análise estrutural de cada componente da construção.

No Estado Limite Último (ELU) a ponte será submetida as combinações normais. Vale ressaltar que o ELU é quando uma estrutura não consegue mais suportar cargas sem falhar. Sua capacidade máxima considerando cargas, resistência dos materiais, fatores de segurança e comportamento estrutural são calculados para garantir a segurança e estabilidade das construções ao longo do tempo.

As combinações últimas normais são calculadas considerando a Eq.(16) da ABNT NBR 8681:2004.

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} F_{Gi,k} + \gamma_q (F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \Psi_{0j} F_{Qj,k}) \quad (16)$$

A norma também define os coeficientes de ponderação e os fatores de combinação a serem utilizados na combinação última normal, onde γ_{gi} é o coeficiente de ponderação das ações permanentes e γ_q o coeficiente de ponderação das ações acidentais, o Ψ_0 é o coeficiente de ponderação para a carga variável, sendo $F_{Gi,k}$ a carga permanente $F_{Q1,k}$ a carga variável principal e $F_{Qj,k}$ as demais ações variáveis.

O ELS refere-se as condições normais de funcionamento da estrutura, considerando deformações aceitáveis, vibrações, durabilidade e estabilidade para garantir segurança, funcionalidade e conforto dos usuários durante sua vida útil. As combinações no ELS serão determinadas considerando a combinação rara, conforme recomendação da ABNT NBR7190-1:2022. O cálculo das flechas instantâneas é feito conforme Eq. (17).

$$\delta_{inst} = \sum_{i=1}^m \delta_{inst,Gi,k} + \delta_{inst,Q1,k} + \sum_{j=2}^n \Psi_{1j} * \delta_{inst,Qj,k} \quad (17)$$

sendo δ_{inst} a flecha instantânea da estrutura, $\delta_{inst,Gi,k}$ a flecha instantânea gerada pelo carregamento permanente, $\delta_{inst,Q1,k}$ a flecha inicial gerada pelo carregamento variável principal e $\delta_{inst,Qj,k}$ a deflexão causada pelas demais ações variáveis. Além disso Ψ_1 e Ψ_2 são os coeficientes de redução para as ações variáveis.

3.2.4 Verificações

A estrutura da viga treliçada estará sujeita a esforços axiais de compressão e tração, deste modo as verificações serão feitas conforme o item 6.3.2 e 6.3.3 da ABNT NBR7190-1:2022 na qual estabelece que as tensões de sollicitação devem ser menores que a resistência da peça, para compressão a norma estabelece $\sigma_{Nc,d} \leq f_{c0,d}$ e para a tração $\sigma_{Nt,d} \leq f_{t0,d}$.

Para as peças comprimidas é necessário verificar a estabilidade delas, conforme determina a norma em vigência. Este requisito de dimensionamento depende da esbelteza da peça, calculada conforme a equação a seguir:

$$\lambda = \frac{L_0}{\sqrt{I/A}} \quad (18)$$

sendo L_0 o comprimento de flambagem, I é o momento de inércia na direção analisada e A é a área da seção transversal.

Além disso é necessário calcular a esbelteza relativa correspondentes à flexão em relação aos eixos x e y. Considerando que as peças da treliça são de seções circulares, a esbelteza relativa será a mesma para em ambos os eixos, conforme a equação a seguir:

$$\lambda_{rel,x} = \lambda_{rel,y} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} \quad (19)$$

Para valores de esbelteza relativa maiores que 0,3 devem ser atendido as condições de estabilidades proposto pela ABNT NBR7190-1:2022, conforme equações a seguir:

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{K_{cx}f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + k_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (20)$$

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{K_{cy}f_{c0,d}} + k_M \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (21)$$

onde k_M é um coeficiente de correção em relação a seção transversal da peça e k_{cx} e k_{cy} são calculados através das seguintes equações:

$$k_{cx} = \frac{1}{k_x + \sqrt{(k_x)^2 - (\lambda_{rel,x})^2}} \quad (22)$$

$$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{(k_y)^2 - (\lambda_{rel,y})^2}} \quad (23)$$

$$k_x = 0,5 * \left[1 + \beta_c (\lambda_{rel,x} - 0,3) + (\lambda_{rel,x})^2 \right] \quad (24)$$

$$k_y = 0,5 * \left[1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + (\lambda_{rel,y})^2 \right] \quad (25)$$

sendo β_c o elemento considerado nas partes da estrutura que cumprem os requisitos de desvio de alinhamento, que para peças roliças equivale a 0,2.

Para o efeito de fluência que ocorrerá na viga treliçada, utilizaremos a combinação quase permanente conforme a equação a seguir:

$$\delta_{fin} = \sum_{i=1}^m \delta_{fin,Gi,k} + \sum_{j=1}^n \delta_{fin,Qj,k} \quad (26)$$

onde $\delta_{fin,Gi,k}$ e $\delta_{fin,Qj,k}$ são as flechas finais considerando o efeito de fluência para a carga permanente e variável, respectivamente, com valores definidos através das Eqs (27) e (28).

$$\delta_{fin,G,k} = \delta_{inst,G,k} (1 + \phi) \quad (27)$$

$$\delta_{fin,Qj,k} = \delta_{inst,Qj,k} \Psi_2 (1 + \phi) \quad (28)$$

Os valores limites da flecha inicial (δ_{inst}) e final (δ_{fin}) aceitados pela norma brasileira ABNT NBR 7190-1:2022 para a viga bi apoiada da ponte de madeira está de acordo com a Tabela 3 a seguir:

Tabela 3 – Flechas limites

Flecha	Valor limite
δ_{inst}	L/300
δ_{fin}	L/150

Fonte: Autor (2024).

4.RESULTADOS

Os resultados do dimensionamento das peças da ponte de madeira oferecem uma visão detalhada da sua capacidade estrutural, incluindo análises de esforços e momentos fletores. Esses resultados são fundamentais para avaliar a viabilidade e segurança da estrutura com as seções transversais e classe de madeira empregados.

4.1. Resultados do tabuleiro

O tabuleiro será executado, considerando uma carregamentos de curta duração e portanto $K_{mod1} = 0,9$, e considerando a classe de umidade 3, $K_{mod2} = 0,8$. Desta forma o produto K_{mod2} tem seu valor definido em 0,72. Com isso os valores de cálculo para classe de umidade 3 são definidos na Tabela 4 e corrigidos para a umidade de 12% apresentados na Tabela 5.

Tabela 4 – Propriedades de resistência e rigidez

$f_{b,d}$ (kN/cm ²)	$f_{t,0,d}$ (kN/cm ²)	$f_{t,90,d}$ (kN/cm ²)	$f_{c,0,d}$ (kN/cm ²)	$f_{c,90,d}$ (kN/cm ²)	$f_{v,d}$ (kN/cm ²)	$E_{0,m}$ (kN/cm ²)
2,057	1,234	0,031	1,337	0,427	0,160	668,571

Fonte: Autor (2024).

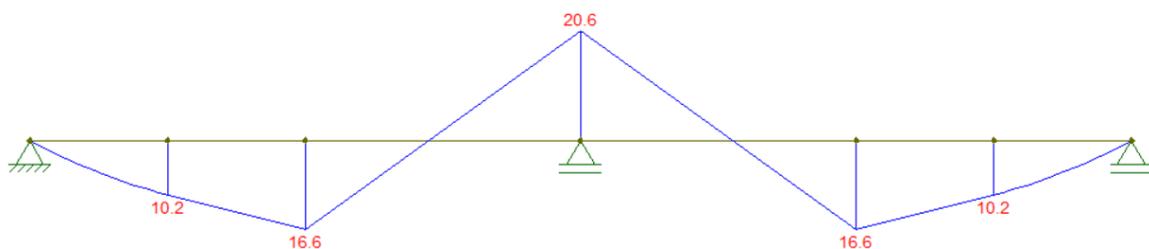
Tabela 5 – Propriedades de resistência e rigidez corrigidas para umidade de 12%

$f_{b,d}$ (kN/cm ²)	$f_{t,0,d}$ (kN/cm ²)	$f_{t,90,d}$ (kN/cm ²)	$f_{c,0,d}$ (kN/cm ²)	$f_{c,90,d}$ (kN/cm ²)	$f_{v,d}$ (kN/cm ²)	$E_{0,m}$ (kN/cm ²)
2,427	1,456	0,036	1,577	0,504	0,188	748,800

Fonte: Autor (2024).

A partir do Ftool, obteve-se os diagramas de esforços referente ao momento fletor no tabuleiro. Na Figura 8 é possível observar os valores considerando os carregamentos mencionados no item 3.2.1.

Figura 8 – Diagrama de momento fletor tabuleiro (kN.m)



Fonte: Autor (2024).

O diagrama mostra um máximo momento fletor positivo ou de tração ($M_{t,d}$) e negativo ou compressão ($M_{c,d}$) equivalentes a 1660 kN.cm e 2060 kN.cm, respectivamente. Tem-se que o módulo de resistência da seção transversal à direção

paralela às fibras (W) equivale a $1066,67 \text{ cm}^3$ e por sua vez a resistência à flexão da madeira adotada $f_{b,d} = 2,427 \text{ kN/cm}^2$, como mostra a Tabela 5.

Desta forma, segue-se com a verificação proposta pela norma para tensões de tração e compressão. A partir da Eq. (4), verifica-se a condição de segurança e obtêm-se os valores das tensões de tração e compressão iguais a 0,64 e 0,79, respectivamente. Logo a estrutura do tabuleiro irá resistir aos esforços solicitantes conforme a seção, material e dimensão adotada para compor a ponte em viga treliçada.

5.2 Resultados da longarina.

Faz-se necessário verificar a estrutura em relação a rigidez, deste modo com o valor da rigidez média das longarinas e transversinas seguindo as Eq. (6) e (7) são $\rho_l = 0,00079 \text{ m}^4$ e $\rho_t = 0,0001 \text{ m}^4$. Verifica-se a estrutura conforme a Eq. (5) chegando no valor de $\lambda = 0,196$.

À medida que o parâmetro λ for menor, a eficiência do método aplicado será maior (Alves, 2004, p. 50). Considerando a Eq. (8), descrita no tópico 3.2.2, considera-se os valores de n , P e ε iguais a 3, 1kN e 2m, respectivamente. Assim, obtêm-se os coeficientes de distribuição transversal de carga que estão na Tabela 6.

Tabela 6 – Coeficientes para distribuição transversal de carga

	Longarina 1	Longarina 2	Longarina 3
$e \text{ (m)}$	R_i	R_i	R_i
-2,00m	0,83	0,33	-0,17
-1,50m	0,71	0,33	-0,04
-1,00m	0,58	0,33	0,08
-0,50m	0,46	0,33	0,21
0,00m	0,33	0,33	0,33
0,50m	0,21	0,33	0,46
1,00m	0,08	0,33	0,58
1,50m	-0,04	0,33	0,71
2,00m	-0,17	0,33	0,83

Fonte: Autor (2024).

Desta forma é possível traçar as linhas de influência de cada longarina com base nos valores de R_i , como mostra as Figuras 9, 10 e 11.

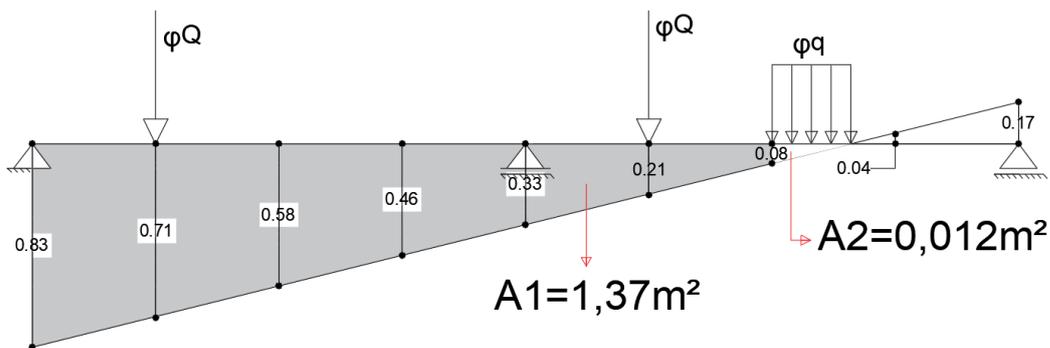
De acordo com as informações apresentadas, os valores dos coeficientes de ponderação para majoração da carga para a ponte com vão de 12 metros e 1 faixa de rodagem são $CIV = 1,34$, $CNF = 1,05$ e $CIA = 1,00$.

Portanto o valor majorado será o produto entre os coeficientes acima multiplicado pela carga por pneu (P), para majorar a carga concentrada, ou pela carga distribuída (p). Os resultados desse aumento das cargas são $\varphi Q = 70,45 \text{ kN}$ e $\varphi q = 7,05 \text{ kN/m}^2$, obtendo-se então os valores carga concentrada do veículo tipo em kN (Q_1). Carga externa

ou de multidão em kN/m (q_1), carga interna em kN/m (q_2) e os mesmos são aplicados na seção transversal da ponte considerando a situação mais crítica como mostra a Figura 9, 10 e 11, que também retratam as áreas.

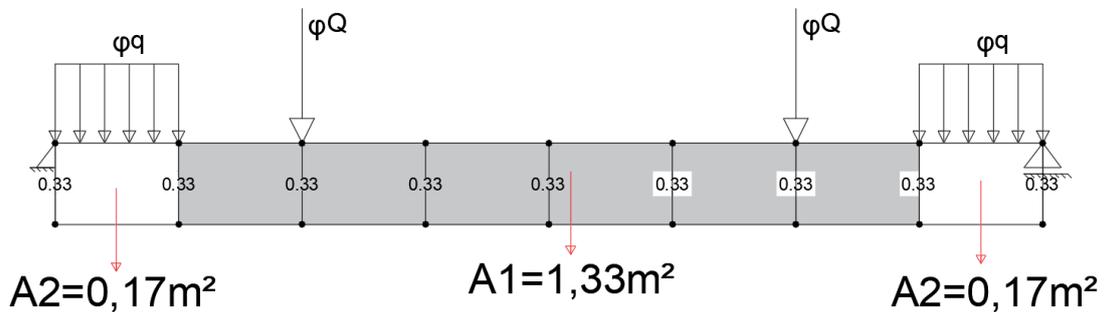
Para os valores obtidos, com a aplicação do método de Engesser-Courbon, obtemos as cargas Q_1 , q_1 e q_2 , conforme retrata a Tabela 7 para cada longarina.

Figura 9 – Cargas majoradas na seção transversal para longarina 1



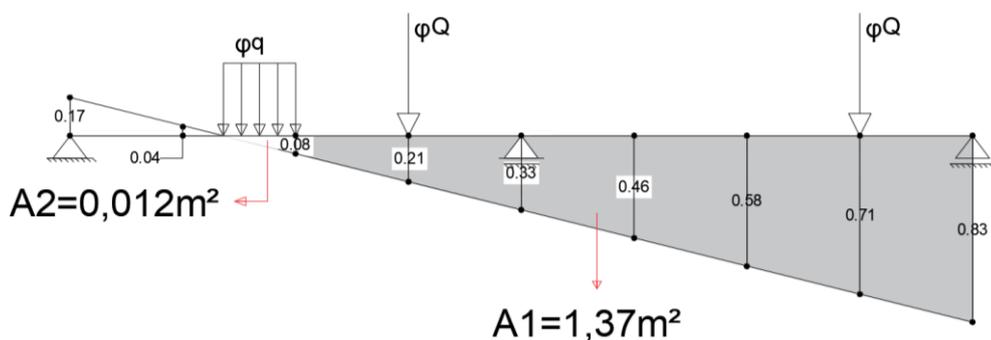
Fonte: Autor (2024).

Figura 10 - Cargas majoradas na seção transversal para longarina 2



Fonte: Autor (2024).

Figura 11 - Cargas majoradas na seção transversal para longarina 3



Fonte: Autor (2024).

Tabela 7 – Resultados método de Engesser-Courbon

	Longarina 1	Longarina 2	Longarina 3
A_1 (m ²)	1,370	1,330	1,370
A_2 (m ²)	0,012	0,170	0,012
r_1	0,710	0,330	0,710
r_2	0,210	0,330	0,210
Q_1 (kN)	64,815	46,498	64,815
q_1 (kN/m)	9,736	10,568	9,736
q_2 (kN/m)	0,085	1,198	0,085

Fonte: Autor (2024).

Os valores de cálculo foram obtidos através da ABNT NBR 7190-1:2022 levando em consideração o K_{mod} e o coeficiente de minoração (γ_w) igual a 1,4 decorrente de tensões normais. No cálculo das longarinas, considerou carregamento de longa duração e classe de umidade igual a três. Neste caso, as propriedades com valores característicos do tipo escolhido são retratadas nas Tabelas 8 e corrigidos para a umidade de 18%, conforme as Eqs. (2) e (3). Os resultados estão apresentados na Tabela 9. Vale destacar que a norma informa o valor de 8,4kN/m³ para a densidade média da madeira tipo D60. Os coeficientes de modificação K_{mod1} e K_{mod2} foram determinados como 0,7 e 0,8, respectivamente, resultando em um valor final de K_{mod} de 0,56. Além disso a tabela trás o valor de módulo de elasticidade a 0° ($E_{0,05}$) referente ao tipo de madeira adotada.

Tabela 8 – Propriedades características de resistência e rigidez madeira D60

$f_{b,k}$ (MPa)	$f_{t,0,k}$ (MPa)	$f_{c,0,k}$ (MPa)	$E_{0,m}$ (GPa)	$E_{0,05}$ (GPa)
60	36	32	17	14

Fonte: Autor (2024)

Tabela 9 – Propriedades de cálculo de resistência e rigidez madeira D60

$f_{b,d}$ (kN/cm ²)	$f_{t,0,d}$ (kN/cm ²)	$f_{c,0,d}$ (kN/cm ²)	$E_{0,m12}$ (kN/cm ²)	$E_{0,05,12}$ (kN/cm ²)
2,832	1,699	1,510	761,600	627,200

Fonte: Autor (2024)

O peso próprio das peças que compõe a estrutura constituirá a carga permanente da ponte em viga treliçada, logo o produto entre o volume da estrutura e a densidade média do tipo de madeira escolhido resultará no peso total, que será distribuído para cada longarina conforme a faixa de influência. O peso próprio do tabuleiro e rodeiro é representado na Tabela 10.

Tabela 10 – Peso próprio do tabuleiro e rodeiro da ponte

Peso próprio tabuleiro	Tabuleiro	Rodeiro
Volume de uma peça (m ³)	0,1600	0,0375
Densidade (kN/m ³)	6,60	6,60
Quantidade de peças	43	16
Peso próprio do tabuleiro (kN)	45,41	3,96
Área do tabuleiro (m ²)	48	24
Carga distribuída (kN/m ²)	0,90	0,20

Fonte: Autor (2024).

A faixa de influência para as longarinas na extremidade (longarinas 1 e 3) da seção transversal são de 1 metro cada, enquanto para a longarina localizada ao centro da seção transversal (longarina 2) é de 2 metros. Deste modo o peso próprio do rodeiro e tabuleiro para cada longarina será o produto da carga distribuída pela faixa de influência. Os resultados estão apresentados na Tabela 11.

Tabela11 – Peso próprio por longarina

	Peso próprio do tabuleiro por longarina (kN/m)	Peso próprio do rodeiro por longarina (kN/m)
Longarina 1	0,946	0,165
Longarina 2	1,892	0,330
Longarina 3	0,946	0,165

Fonte: Autor (2024).

O peso próprio de cada longarinas é retratado na Tabela 12, calculado separadamente para cada peça que compõe a treliça, banzo superior, banzo inferior, montante e diagonal, levando em consideração o comprimento (L) e diâmetro (D), de cada uma.

Tabela 12 – Peso próprio treliça

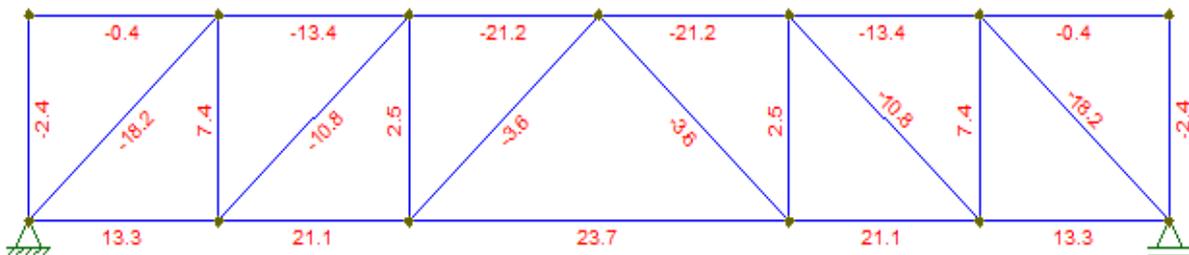
	L (m)	D (m)	ρ (kN/m³)	Volume (m³)	Quant.	Peso total (kN)	Peso total	
Banzo superior	12,00	0,20	8,40	0,38	2	6,33	17,68 kN	1,47 kN/m
Banzo inferior	12,00	0,20	8,40	0,38	1	3,17		
Diagonais	2,83	0,20	8,40	0,09	6	4,48		
Montantes	2,00	0,20	8,40	0,06	7	3,69		

Fonte: Autor (2024).

A carga permanente (G) por longarina será a soma dos pesos próprios evidenciados anteriormente. Desta forma, a longarina 1 e 3 (extremidades) terão um carregamento permanente distribuído de 2,584kN/m, enquanto que a longarina 2 (centro) será de 3,695kN/m.

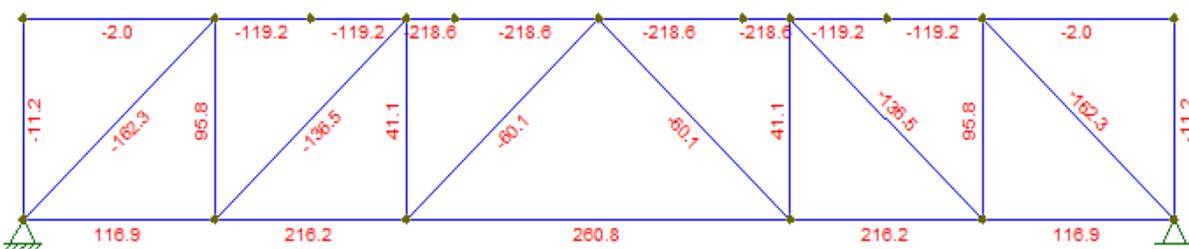
Os diagramas de esforço normal das treliças em relação ao peso próprio e cargas móveis são retratados nas Figuras 12, 13, 14 e 15.

Figura 12 – Esforço normal longarinas 1 e 3 decorrente do peso próprio



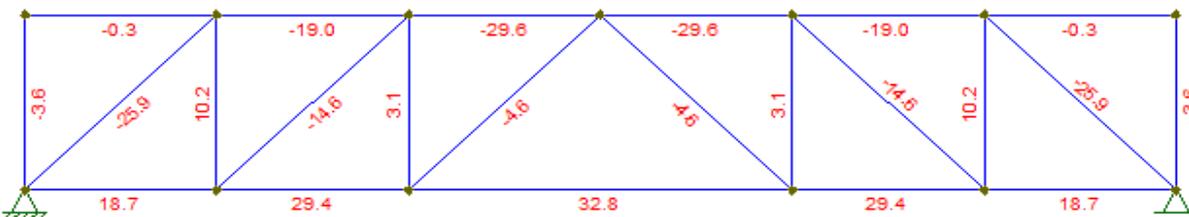
Fonte: Autor (2024).

Figura 13 – Esforço normal longarinas 1 e 3 decorrente da carga móvel



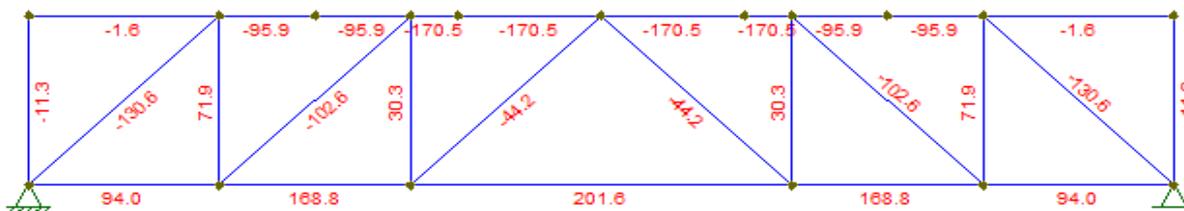
Fonte: Autor (2024).

Figura 14 – Esforço normal longarina 2 decorrente do peso próprio



Fonte: Autor (2024).

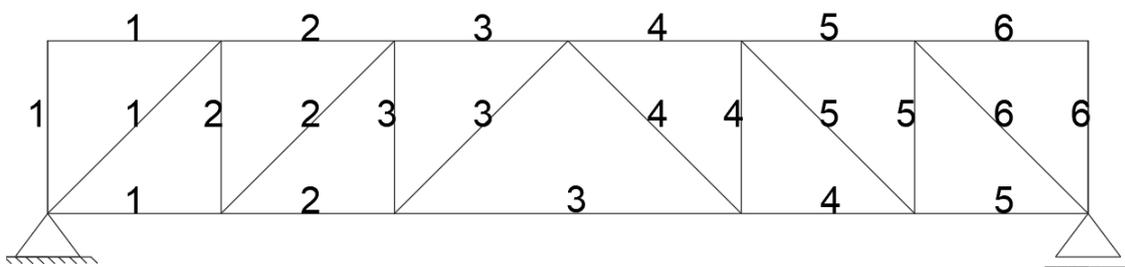
Figura 15 – Esforço normal longarina 2 decorrente da carga móvel



Fonte: Autor (2024).

Com base nos diagramas de esforços normais obtidos no Ftool, faz-se as combinações últimas normais para o estado limite último da estrutura. Deste modo, é possível comparar os esforços resistentes com os solicitantes para validar as longarinas conforme a norma ABNT NBR7190-1:2022. Cada peça da treliça foi numerada conforme a Figura 16 para identifica-las na Tabela 13 na coluna nomeada como Id.

Figura 16 – Identificação das peças das treliças



Fonte: Autor (2024).

Tabela 13 – Esforços nas peças das longarinas 1 e 3

	Id	G (kN)	Carga acidental (kN)	Combinação para ELU (kN)	σR (kN/cm ²)	σS (kN/cm ²)
Banzo superior	1	-0,4	-2	-3,54	1,51	0,01
	2	-13,4	-119,2	-196,89	1,51	0,31
	3	-21,2	-218,6	-356,52	1,51	0,57
	4	-21,2	-218,6	-356,52	1,51	0,57
	5	-13,4	-119,2	-196,89	1,51	0,31
	6	-0,4	-2	-3,54	1,51	0,01
Banzo inferior	1	13,3	116,9	193,305	1,70	0,62
	2	21,1	216,2	352,785	1,70	1,12
	3	23,7	260,8	423,195	1,70	1,35
	4	21,1	216,2	352,785	1,70	1,12
	5	13,3	116,9	193,305	1,70	0,62
Diagonal	1	-18,2	-162,9	-268,92	1,51	0,86
	2	-10,8	-136,5	-219,33	1,51	0,70
	3	-3,6	-60,1	-95,01	1,51	0,30
	4	-3,6	-60,1	-95,01	1,51	0,30
	5	-10,8	-136,5	-219,33	1,51	0,70
	6	-18,2	-162,9	-268,92	1,51	0,86
Montante	1	-2,4	-11,2	-20,04	1,51	0,06
	2	7,4	95,8	153,69	1,70	0,49
	3	2,5	41,1	65,025	1,70	0,21
	4	2,5	41,1	65,025	1,70	0,21
	5	7,4	95,8	153,69	1,70	0,49
	6	-2,4	-11,2	-20,04	1,51	0,06

Fonte: Autor (2024).

Para a aplicação combinação última normal, os coeficientes de ponderação das ações permanentes e acidentais são 1,35 e 1,5, respectivamente, conforme a norma brasileira ABNT NBR8681:2003. A área das seções é de 314,16cm² para o banzo inferior,

diagonais e montantes, e de 628,32cm² para o banzo superior. Desta forma as Tabelas 13 e 14 representam as combinações realizadas e as tensões de resistência (σ_R) e tensões solicitantes (σ_S) para as longarinas.

Tabela 14 – Esforços nas peças da longarina 2

		G (kN)	Carga acidental (kN)	Combinação ELU (kN)	σ_R (kN/cm ²)	σ_S (kN/cm ²)
Banzo superior	1	-0,30	-1,60	-2,81	1,51	0,01
	2	-19,00	-95,90	-169,50	1,51	0,27
	3	-29,60	-170,50	-295,71	1,51	0,47
	4	-29,60	-170,50	-295,71	1,51	0,47
	5	-19,00	-95,90	-169,50	1,51	0,27
	6	-0,30	-1,60	-2,81	1,51	0,01
Banzo inferior	1	18,70	94,00	166,25N	1,70	0,53
	2	29,40	168,80	292,89	1,70	0,93
	3	32,80	201,60	346,68	1,70	1,10
	4	29,40	168,80	292,89	1,70	0,93
	5	18,70	94,00	166,25	1,70	0,53
Diagonal	1	-25,90	-130,60	-230,87	1,51	0,73
	2	-14,60	-102,60	-173,61	1,51	0,55
	3	-4,60	-44,20	-72,51	1,51	0,23
	4	-4,60	-44,20	-72,51	1,51	0,23
	5	-14,60	-102,60	-173,61	1,51	0,55
	6	-25,90	-130,60	-230,87	1,51	0,73
Montante	1	-3,60	-11,30	-21,81	1,51	0,07
	2	10,20	71,90	121,62	1,70	0,39
	3	3,10	30,30	49,64	1,70	0,16
	4	3,10	30,30	49,64	1,70	0,16
	5	10,20	71,90	121,62	1,70	0,39
	6	-3,60	-11,30	-21,81	1,51	0,07

Fonte: Autor (2024).

Observa-se que os valores de resistência são maiores que as solicitações, logo a viga treliçada atende a norma vigente. Para as peças comprimidas a norma estabelece uma verificação quanto a estabilidade lateral, para a viga treliçada foi considerado o maior esforço de compressão de cada peça.

Tabela 15 – Esbeltez e Coeficientes

	N_d (kN)	L_0 (cm)	I (cm ⁴)	A (cm ²)	λ	λ_{rel}	$k_x = k_y$	K_c	$\sigma_{N_{c,d}}$ (kN/cm ²)
Banzo superior	-356,5	200,0	7854,0	314,2	40,0	0,6	0,7	0,9	1,1
Diagonal	-268,9	283,0	7854,0	314,2	56,6	0,8	0,9	0,8	0,8
Montante	-21,8	200,0	7854,0	314,2	40,0	0,6	0,7	0,9	0,1

Fonte: Autor (2024).

Considerando os valores apresentados na Tabela 15 e a Eq. (20), obteve-se na verificação considerando a peça mais solicitada do banzo superior, diagonal e montante os valores iguais a 0,82, 0,70, e 0,05, respectivamente. Observa-se que ambos os valores foram inferiores a um, valor de referência para atender ao critério normativo. Logo todas as peças atendem aos critérios da norma.

Por fim, faz-se o cálculo da flecha no ELS segundo a ABNT NBR7190-1:2022. Considera-se o coeficiente de fluência igual a 0,8 por ser madeiras roliças de classe de umidade 3. Deste modo, os valores obtidos a partir da verificação estão representados na Tabela 16 e 17. Vale ressaltar que o módulo de elasticidade adotado é o valor médio para o tipo D60, e ψ_2 tem seu valor definido em 0,3 para atender a norma brasileira ABNT NBR8681:2003.

Tabela 16 – Flecha inicial

	$\delta_{inst,G,k}$ (mm)	$\delta_{inst,Q,k}$ (mm)	δ_{inst} (mm)	Valor limite (mm)	coeficiente de fluência
Longarinas 1 e 3	2,10	18,02	20,12	40,00	0,8
Longarinas 2	2,37	14,00	16,37	40,00	0,8

Fonte: Autor (2024).

Tabela 17 – Flecha final

	$\delta_{fin,G,k}$ (mm)	$\delta_{fin,Q,k}$ (mm)	Flecha Final (mm)	Valor limite (mm)	Verificação
Longarinas 1 e 3	3,78	9,73	13,51	80,00	Verificado
Longarinas 2	4,27	7,56	11,83	80,00	Verificado

Fonte: Autor (2024).

Os valores das flechas iniciais foram extraídos do *software* Ftool e a ponte em viga treliçada atende a norma em vigência. A flecha limite em vigas é um parâmetro crucial no dimensionamento de estruturas, especialmente em casos onde o conforto e a estética são importantes. A flecha é a deflexão vertical máxima que a viga treliçada sofrerá, sendo o valor limite calculado igual a 8cm. Essa limitação visa garantir que a deformação da viga permaneça dentro de limites aceitáveis para o uso seguro e confortável do ambiente construído.

6. CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos, pontua-se que as peças da estrutura da ponte atenderam aos requisitos estabelecidos pela norma brasileira NBR 7190 vigente. No dimensionamento, para a estrutura treliçada foram utilizadas peças roliças de 20cm de diâmetro, classificadas como D60. Para as pranchas do tabuleiro utilizou-se peças com seção transversal de 25cm de largura, 16cm de altura e 4 metros de comprimento, classificadas como D40.

Em relação as atualizações da norma utilizada para o dimensionamento de estruturas de madeira, observa-se que alguns pontos tiveram alterações em relação aos materiais e suas classes de resistência, e as formulações. No entanto, destaca-se que foi possível atender aos critérios de segurança ao considerar as mesmas dimensões e parâmetros de projeto da estrutura dimensionada por Góis (2022).

Propõe-se que seja realizado em estudos futuros, o dimensionamento das ligações entre os elementos das pontes utilizando os critérios da nova norma ABNT NBR 7190-1:2022. E também sugere-se que o dimensionamento seja realizado com madeiras de classe de resistência mais baixa, como uma D50 para as vigas treliçadas e uma D30 para o tabuleiro, a fim de verificar a classe de resistência mínima para os elementos da ponte. Outro trabalho relevante é substituir as peças roliças por peças de madeira lamelada colada (MLC).

REFERÊNCIAS

ALVES, E. V.; ALMEIDA, S. M. F.; JUDICE, F. M. S. Métodos de análise estrutural de tabuleiros de pontes em vigas múltiplas de concreto protendido. Engevista, Rio de Janeiro, v. 6, n. 2, ago. 2004. DOI: <https://doi.org/10.22409/engevista.v6i2.138>. Disponível em: <https://periodicos.uff.br/engevista/article/view/8763>. Acesso em: 10 fevereiro. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7188**: Ações devido ao tráfego de veículos rodoviários e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

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

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. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

GÓIS, R. B. Trabalho de conclusão de curso: Dimensionamento das Peças de uma Ponte de Madeira com Estrutura em Viga Treliçada. Uberlândia, 2022.

JUNIOR, C. C. et al. **Manual de projeto e construção de pontes de madeira**. Universidade de São Paulo. São Carlos. 2006.

MAGALHÃES, P. R. C. Trabalho de conclusão de curso: Aplicação de Cargas Móveis em Pontes: Estudo Comparativo das CVCS Carregadas em Pontes Antigas. 2018. Disponível em: <https://repositorio.uniceub.br/jspui/bitstream/prefix/13956/1/21341291.pdf>. Acesso em: 04 de março de 2024.

MORAES, V. M. Ponte mista de madeira-concreto em vigas treliçadas de madeira. 2007. 180 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia

de Ilha Solteira, 2007. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/046b086f-0c11-4f04-9f0a-9db20e55dbaa>. Acesso em: 20 fevereiro de 2024.

OLIVEIRA, M. B. Reforço Estrutural de Pontes Rodoviárias em Concreto Armado Utilizando Protensão Externa. 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/30552/4/ReforçoEstruturalDe.pdf>. Acesso em: 19 de fevereiro de 2024.

PFEIL, W.; PFEIL, M. Estruturas de madeira. 2003.

SANTOS, R. C. Estruturas de Madeira e Estruturas Metálicas. 2019. Disponível em: https://cm-cls-content.s3.amazonaws.com/201901/INTERATIVAS_2_0/ESTRUTURAS_DE_MADEIRA_E_ESTRUTURAS_METALICAS/U1/LIVRO_UNICO.pdf. Acesso em: 01 de março de 2024.

SHIGUE, E. K. Difusão da construção em madeira no Brasil: Agentes, Ações e produtos. 2018. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/102/102131/tde-03092018-094051/publico/DissCorrigidaErichKazuoShigue.pdf>. Acesso em: 16 de fevereiro de 2024.

VITÓRIO, J. A. P. Pontes e Viadutos Rodoviários: Conceituação, conservação, segurança e reforço estrutural. 2015. Escola Politécnica de Pernambuco Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Recife, 2015. Disponível em: https://vitorioemelo.com.br/publicacoes/Pontes_Viadutos_Rodoviaros.pdf. Acesso em: 4 março 2024.