

DIMENSIONAMENTO DAS PEÇAS DE UMA PONTE DE MADEIRA COM ESTRUTURA EM VIGA TRELIÇADA

SIZING OF THE PARTS OF A WOODEN BRIDGE WITH TRUSS BEAM STRUCTURE

Renan Barcelos Góis¹, Lauren Karoline De Sousa Gonçalves²

¹ Graduando na Faculdade de Engenharia Civil – FECIV, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Minas Gerais, Brasil – renangois98@gmail.com

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

Resumo: As pontes são estruturas amplamente utilizadas desde a antiguidade e têm o importante papel de ultrapassar obstáculos e garantir o fluxo livre de pessoas, animais e veículos por uma via. Pelo fato da madeira ser um material com diversas vantagens construtivas, as pontes executadas com esse insumo sempre tiveram grande relevância, apesar de após o período colonial, terem perdido espaço para aquelas feitas com concreto armado ou aço. O presente trabalho tem como objetivo o dimensionamento das peças de uma ponte de madeira com estrutura em vigas treliçadas, com base nas diretrizes da norma ABNT NBR 7190:1997 e de outros trabalhos científicos que tratam do assunto.

Palavras-chave: pontes de madeira; eucalipto citriodora; vigas treliçadas; estruturas.

Abstract: Bridges are structures widely used since ancient times and have the important role of overcoming obstacles and ensuring the free flow of people, animals, and vehicles over a roadway. Because wood is a material with several constructive advantages, bridges made with this material have always had great relevance, although after the colonial period, they have lost space to those made with reinforced concrete or steel. Therefore, the present work deals with the dimensioning of the parts of a wooden bridge with truss beam structure, based on the guidelines of the ABNT NBR 7190:1997 standard and other scientific works that deal with the subject.

Keywords: wooden bridges; citriodora Eucalyptus; trussed beams; structures.

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material presente na vida humana desde as primeiras civilizações, visto que a sua grande resistência e elevada disponibilidade sempre garantiram muita versatilidade e variedade de aplicações. Apesar de seu extenso histórico de utilização, somente na primeira metade do século XX, teorias técnicas a respeito de sua utilização em estruturas passaram a ser desenvolvidas. Além disso, a partir da Segunda Guerra Mundial as pesquisas tecnológicas ganharam força, de forma a permitir que hoje existam excelentes métodos para a execução de projetos em madeira com os mais variados graus de complexidade (PFEIL, 2003).

Desde o início do século XXI, no Brasil, existe um interesse da indústria da construção civil e do setor de base florestal no crescimento, desenvolvimento e ascensão de tecnologias e processos construtivos direcionados à construção em madeira. Apesar disso e da elevada disponibilidade desse recurso no país, a utilização desse material em edificações, tanto na estrutura como na vedação, não acontece de maneira tão significativa, visto que desde o auge do concreto armado no país, no período colonial, este passou a ser o material mais utilizado no setor (SHIGUE, 2018).

A escassez de mão-de-obra especializada de marceneiros e carpinteiros também é um obstáculo para o crescimento da utilização de estruturas de madeira no país (MAURO SÔNEGO, 2020). Da mesma forma, a falta de execução de projetos estruturais de qualidade é outro fator limitante para esse avanço, visto que o dimensionamento incorreto e verificações inadequadas podem comprometer a segurança dos usuários e a vida útil da estrutura (LEMOS, 2021).

Dentre as tantas aplicações da madeira como material estrutural, o presente trabalho destaca, em especial, a sua utilização em pontes de madeira. Estas estruturas possuem elevada importância no desenvolvimento dos municípios do ponto de vista econômico e social, principalmente em zonas rurais, pois garantem a entrada de insumos nas propriedades agrícolas, o escoamento da produção e o livre deslocamento da população.

Entretanto, segundo Calil Junior (2006) a maioria das pontes de madeira no Brasil não são projetadas e construídas por técnicos e construtores especializados em madeiras e isso resulta em estruturas caras, inseguras e de baixa durabilidade. Logo, destaca-se a necessidade do aprimoramento da mão-de-obra que atua nesse setor, além do investimento em projetos de qualidade para garantir a mínima segurança e confiabilidade na execução dessas estruturas.

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo dimensionar as peças de uma ponte de madeira com estrutura em viga treliçada, baseado nas normas ABNT NBR 7190:1997 e ABNT NBR 7188:2013, além de outros trabalhos científicos. O objetivo é aplicar os procedimentos recomendados pela normalização brasileira vigente e as metodologias de cálculo presentes em outras obras que tratam do assunto, observando-se, entre outros aspectos, os critérios de dimensionamento adotados, fatores de segurança e influência das cargas móveis na estrutura.

2. OBJETIVOS

A finalidade do presente trabalho é dimensionar as peças de uma ponte de madeira com estrutura em viga treliçada e, portanto, alguns passos serão seguidos e adotados como objetivos específicos do trabalho, os quais são:

- Definir o escopo e os parâmetros de projeto para o desenvolvimento deste trabalho;
- Executar a modelagem bidimensional e tridimensional da ponte;
- Determinar as cargas atuantes;
- Dimensionar e verificar as peças do tabuleiro;
- Dimensionar e verificar as peças da viga treliçada.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Características das pontes

Uma ponte é uma estrutura que tem como objetivo ultrapassar obstáculos, sendo eles naturais ou não, que interfiram no seguimento de alguma trajetória, como por exemplo rios, lagos e vales (CALIL JUNIOR, 2006). Portanto, admite-se diversas variações na estrutura e elementos de uma ponte para que esta cumpra a sua finalidade, podendo classificá-la quanto ao tempo de operação, o propósito de utilização, os tipos de materiais que a compõe e os sistemas estruturais que elas podem ser executadas.

Com relação ao tempo de operação, uma ponte pode ser classificada como permanente ou temporária, variando de acordo com o objetivo com a qual será empregada. Quanto ao propósito de utilização, ela pode ser, dentre outras, rodoviária, ferroviária, passarela, dutoviária e rodoferroviária. A respeito dos materiais, a definição está relacionada com disponibilidade local de insumo, custo-benefício e necessidades estruturais ou arquitetônicas, sendo que os mais utilizados são o concreto armado convencional ou protendido, o aço, pedras e a madeira (FELIPPE FILHO, 2008).

As pontes de madeira, de modo geral, utilizam os mesmos sistemas estruturais das construídas com outros materiais, tais como pontes em laje, viga, arco, pórtico, estaiadas e suspensas. Dentre esses sistemas, existem ainda outras variabilidades construtivas, visto que o tipo de madeira empregada e os elementos estruturais provenientes deste material podem variar.

Por exemplo, as pontes em viga podem ser executadas com peças roliças, serradas, laminadas coladas, compensadas e vigas treliçadas.

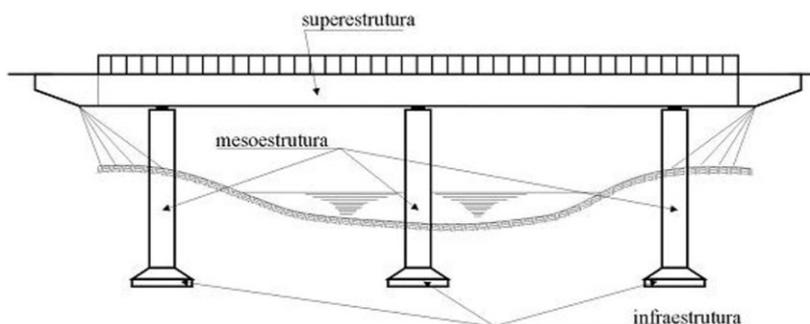
No desenvolvimento deste trabalho será considerada uma ponte em vigas treliçadas. Este tipo de ponte é composto por elementos retilíneos que formam uma série de triângulos, cujas peças são solicitadas predominantemente por esforços axiais de compressão e tração. Além disso, esse sistema construtivo geralmente apresenta um único vão e baixa complexidade de execução, além de economia de material, baixo peso próprio, elevada rigidez e, conseqüentemente, pequenas deformações (CASTRO, 2017).

3.2 Principais elementos das pontes

Os elementos constituintes de uma ponte, com base nos aspectos estruturais, podem ser subdivididos em três partes: infraestrutura, mesoestrutura e superestrutura. Segundo Vitório (2015), a infraestrutura diz respeito aos elementos de fundação, sejam eles sapatas, estacas ou tubulões, que tem por objetivo receber os esforços da estrutura e transmiti-los ao solo de forma a garantir as mínimas condições de segurança, funcionalidade e durabilidade, além de impedir movimentações discordantes na estrutura.

A mesoestrutura, geralmente é constituída pelos pilares, transversinas e aparelhos de apoio, tendo como finalidade a transferência dos esforços da superestrutura para as fundações. Por fim, a superestrutura, composta pelas vigas longarinas e tabuleiro, tem o intuito de transpassar o vão ao qual lhe fora proposto, receber os esforços devido ao tráfego na via e transmiti-los para a mesoestrutura (VITÓRIO, 2015). A Figura 1 representa os elementos supracitados.

Figura 1 – Elementos constituintes de pontes



Fonte: VITÓRIO, 2015.

O tabuleiro de uma ponte de madeira geralmente é feito em tábuas serradas ou toras roliças, que podem ser recobertas por camada asfáltica ou de concreto. Além do tabuleiro e das longarinas, outros elementos fazem parte da superestrutura da ponte, ainda que não apresentem função estrutural, tais como o rodeiro, guarda-corpo, guarda-rodas, passeio para pedestre, a depender das exigências do tráfego da via.

3.3 Principais cargas atuantes na ponte

Assim como todos os materiais que são utilizados em algum tipo de estrutura, a madeira precisa apresentar características de resistência e elasticidade capazes de suportar as solicitações atuantes, tanto de deformações como de carga.

As propriedades que determinam a capacidade de resistência às deformações elásticas são o módulo de elasticidade, o módulo de elasticidade transversal e o coeficiente de Poisson. Já os parâmetros responsáveis por suportar as cargas aplicadas são as resistências características à compressão, tração, flexão simples, torção, ao choque e ao cisalhamento, inerentes à madeira.

Com relação às cargas atuantes, Calil Junior (2006) aponta que as pontes podem ser solicitadas por três tipos de ações diferentes, as quais são: 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.

Dentre as cargas permanentes, têm-se aquelas devido ao peso próprio dos elementos estruturais, como a madeira e as conexões metálicas. Também existem aquelas que decorrem dos elementos não estruturais, como o pavimento asfáltico ou de concreto, o guarda-rodas, guarda-corpo, rodeiro, além de ações diretas ou indiretas, em função do peso específico do material, que podem ser classificadas nessa categoria.

Conforme Calil Junior (2006), as cargas acidentais se dão por diversos motivos, tais como as cargas móveis devido ao tráfego de pessoas e veículos, o impacto vertical sobre as cargas móveis, as forças relacionadas à aceleração e frenagem dos veículos, forças devido ao vento e impactos laterais nos guarda-rodas e guarda-corpo. Define-se que, embora exista grande variabilidade de resistências e ações com relação às pontes de madeira, todo o procedimento de cálculo e considerações feitas, devem estar em concordância com a normatização brasileira, principalmente com as normas ABNT NBR 7190:1997 e ABNT NBR 7188:2013 que discorrem acerca dos projetos de estrutura de madeira e carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas, respectivamente.

4. METODOLOGIA

Assim como supracitado, as pontes têm o objetivo de ultrapassar obstáculos em locais, situações e condições diversas. Esse trabalho em específico tem a finalidade de dimensionar uma ponte localizada em uma estrada rural, que dá acesso a uma fazenda de plantio e extração de eucalipto e viabiliza o transporte desse insumo por meio de caminhões.

Portanto, para fins de cálculo, importa-se saber as principais características e dimensões da ponte de madeira em questão, as quais são:

Características gerais:

- Comprimento total da ponte: 12,0 metros;
- Largura total da ponte: 4,0 metros;
- Classe da ponte: Classe 30;
- Veículo-Tipo: Tipo 30;
- Quantidade de rodeiros: 2,0;
- Quantidade de pranchas do tabuleiro: 43,0;
- Quantidade de longarinas: 3,0;
- Estrutura devidamente bi apoiada (cálculos não presentes no trabalho).

Características do rodeiro:

- Comprimento: 12,0 metros cada;
- Largura: 1,0 metro cada;
- Espessura: 5,0 centímetros;
- Classe da madeira: C60;
- Aproximadamente dezesseis tábuas de 3,0 x 0,25 x 0,05 metros cada rodeiro.

Características do tabuleiro:

- Comprimento total: 12,0 metros;
- Largura total: 4,0 metros;
- Total de 43 pranchas transversais ao sentido do fluxo de veículos;
- Comprimento por prancha: 4,0 metros;
- Largura por prancha: 0,25 metros;
- Espessura por prancha: 0,16 metros;

- Distância entre pranchas: 2,50 centímetros;
- Tipo da madeira: dicotiledônea;
- Classe da madeira: C40.

Características das longarinas:

- Treliças do tipo Howe;
- Comprimento de cada longarina: 12,0 metros;
- Distância entre longarinas: 2,0 metros;
- Tipo de madeira: Eucalipto Citriodora;
- Todas as barras são toras roliças de 20,0 centímetros de diâmetro;
- Banzo superior: duas barras (viga bi-circular) com 12,0 metros de comprimento;
- Banzo inferior: uma barra com 12,0 metros de comprimento;
- Montantes: seis barras de 1,5 metros cada;
- Diagonais: seis barras de 2,5 metros cada.

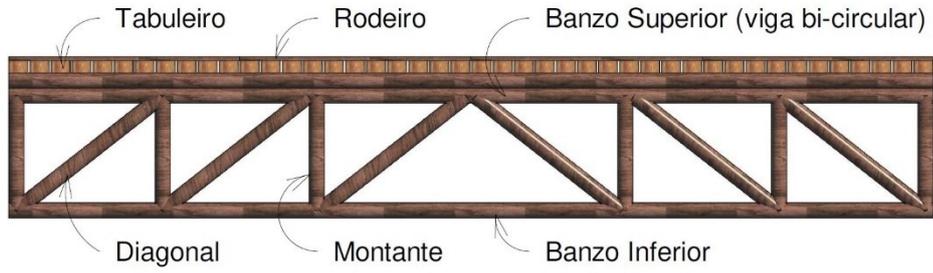
A visualização das Figuras 2, 3, 4, 5 e 6 permite uma melhor compreensão das dimensões e disposições das peças que compõem a estrutura da ponte.

Figura 2 – Perspectiva geral da ponte



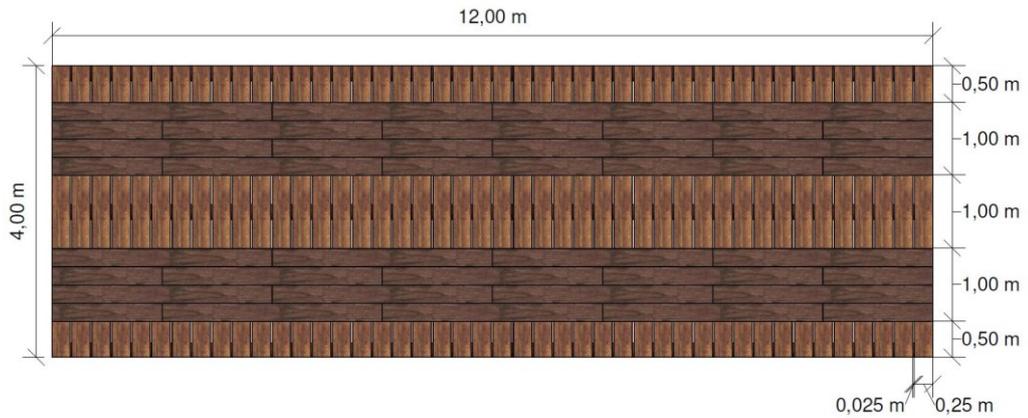
Fonte: Autor, 2022.

Figura 3 – Identificação das peças da ponte



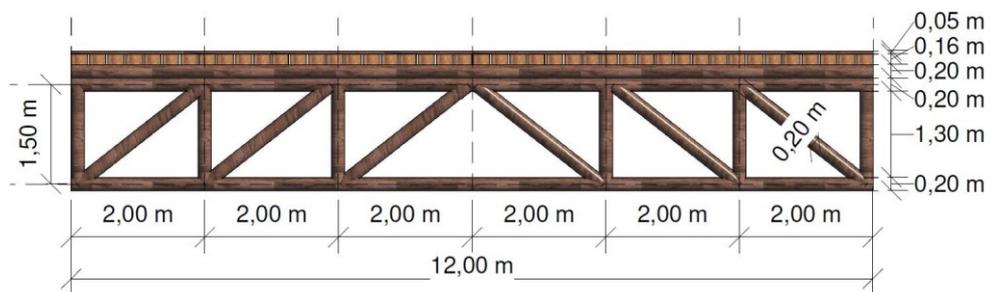
Fonte: Autor, 2022.

Figura 4 – Vista superior da ponte



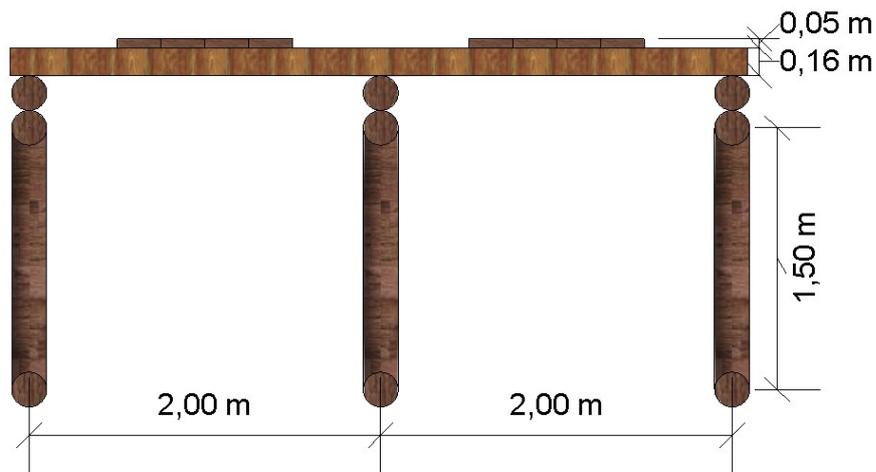
Fonte: Autor, 2022.

Figura 5 – Vista frontal da ponte



Fonte: Autor, 2022.

Figura 6 – Corte transversal na ponte



Fonte: Autor, 2022.

Diversos tipos de veículos podem ser utilizados para o transporte de eucalipto, desde pequenos tratores até caminhões trucados com seis semirreboques interligados. Entretanto, o projeto de ponte desse trabalho limita o trânsito da via rural à caminhões de até 30 toneladas, ou seja, para o caso de transporte de eucalipto, a restrição vai até o caminhão bitruck com 4 eixos, cuja capacidade máxima de carga é de 22 toneladas e o peso bruto total é de 29 toneladas (BSOFT, 2022).

Figura 7 – Caminhão bitruck



Fonte: Forte Campo, 2020.

Dentre os diferentes esforços que podem incidir sobre a estrutura de uma ponte de madeira, serão considerados nos cálculos apenas o peso próprio das peças, como carga

permanente, e as solicitações decorrentes do trânsito de veículos e seus efeitos dinâmicos, como carga variável. Como as longarinas são vigas treliçadas, suas peças serão verificadas quanto à tração e compressão, já que são os esforços mais relevantes para esse tipo de estrutura. Já o tabuleiro será verificado apenas quanto às tensões decorrentes dos momentos fletores.

No caso desse trabalho, o tabuleiro da ponte está apoiado diretamente sobre as vigas treliçadas. Desta forma, os veículos solicitam as pranchas do tabuleiro, as quais redistribuem os esforços para as longarinas que, então, os transferem para os apoios e fundações. Destaca-se que este trabalho não contempla o dimensionamento das fundações da ponte, bem como das ligações entre as peças.

Para efeitos de cálculo serão considerados os conteúdos presentes nas obras de Calil Junior (2006) e de Castro (2017), que abordam as etapas do dimensionamento de alguns sistemas estruturais de madeira. Essas obras sintetizam, dentre outros trabalhos, as informações presentes na norma ABNT NBR 7190:1997 e contribuem com o entendimento de como ela pode ser usada para os cálculos de diversos sistemas estruturais, principalmente, de uma ponte de madeira com viga treliçada.

Segundo Calil (2006), as pontes rodoviárias podem ser divididas nas classes 12, 30 e 45, as quais estão relacionadas com a capacidade de suporte dos veículos-tipo que pesam 12 tf, 30 tf e 45 tf, respectivamente. Esse mesmo autor, em observância à norma ABNT NBR 7188:2013, definiu as cargas móveis que devem ser consideradas para cada classe e, portanto, a Tabela 1 apresenta valores dos esforços concernentes ao veículo-tipo que trafega em uma ponte rodoviária de classe 30, classe esta, que será utilizada para o dimensionamento do projeto de ponte desse trabalho.

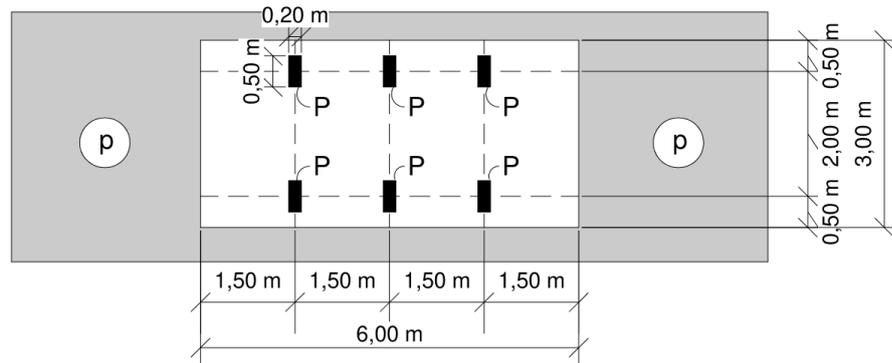
Tabela 1 – Cargas móveis para pontes rodoviárias

Tipo de Veículo	Peso Total (kN)	P Peso por Pneu (kN)	p Carga uniformemente distribuída (kN/m²)
30	300	50	5

Fonte: Autor, 2022.

A Figura 8 abaixo apresenta em planta a disposição dos carregamentos devido às cargas móveis e seus efeitos dinâmicos, conforme citado acima.

Figura 8 – Disposições das cargas móveis em planta



Fonte: Autor, 2022.

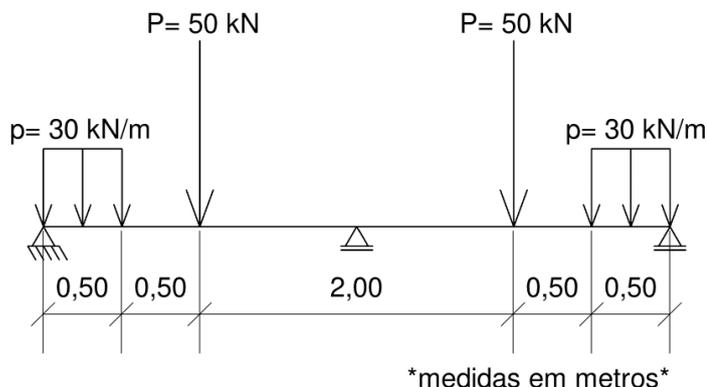
4.1 Dimensionamento do tabuleiro

O tabuleiro é parte essencial na composição da estrutura de uma ponte, principalmente em modelos mais simplificados, como o desse trabalho, em que as pranchas do tabuleiro se apoiam diretamente sobre as longarinas. Como citado anteriormente, por definição de projeto, cada uma dessas pranchas terão dezesseis centímetros de espessura, vinte e cinco centímetros de largura e quatro metros de comprimento.

Segundo Calil Junior (2006), as peças do tabuleiro devem ser dimensionadas somente com relação aos momentos fletores e não precisam ser verificadas quanto às reações de apoio, esforços cortantes e flecha máxima. Além disso, as ações consideradas para os cálculos são apenas as decorrentes das cargas móveis e seus efeitos dinâmicos, visto que a influência do peso próprio é muito pequena quando comparada com a carga acidental.

A Figura 9 apresenta a disposição das cargas solicitantes sobre uma prancha do tabuleiro, para a situação mais crítica. Destaca-se que cada força concentrada de 50 kN refere-se ao peso por pneu do caminhão e a carga distribuída de 30,0 kN/m é respectiva ao produto entre os esforços distribuídos de 5,0 kN/m² e o comprimento do veículo-tipo que é igual a 6,0 metros.

Figura 9 – Disposição das cargas no tabuleiro



Fonte: Autor, 2022.

A norma brasileira ABNT NBR 7190:1997, subdivide as madeiras em classes de resistência. Como foi pré-determinado, o tabuleiro da ponte será executado com madeira dicotiledônea do tipo C40. Considerando a classe de resistência adotada, na Tabela 2 são mostrados os valores da resistência característica à compressão paralela às fibras (f_{c0k}), da resistência característica ao cisalhamento (f_{v0k}), do módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras ($E_{c0,m}$) e da massa específica aparente a 12% de umidade (ρ_{ap}).

Tabela 2 – Valores característicos da madeira de classe C40

f_{c0k} (MPa)	f_{v0k} (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	ρ_{ap} (kg/m ³)
40,00	6,00	19 500,00	950,00
Valores na condição-padrão de referência U = 12%			

Fonte: ABNT NBR 7190:1997.

Ainda de acordo com a mesma norma, o item 6.3.3, referente às características de resistência da madeira serrada, aponta que a relação entre as resistências características de compressão (f_{c0k}) e de tração (f_{t0k}) paralelas às fibras é de 0,77. Logo, para a classe de resistência C40, $f_{t0k} = 51,95$ MPa.

Os valores de cálculo das solicitações resistentes, de acordo com o item 6.4.3 da ABNT NBR 7190:1997, estabelecem uma relação com os valores característicos que pode ser definida por meio de expressões do tipo:

$$X_d = k_{mod} \cdot \frac{X_k}{\gamma_m} \quad (1)$$

Em que:

X_d = resistência de cálculo requerida;

k_{mod} = coeficiente de modificação em função das propriedades da madeira;

X_k = resistência característica do material;

γ_m = coeficientes de ponderação dos materiais.

Nos casos em que a verificação da segurança depende da rigidez da madeira, o módulo de elasticidade efetivo paralelos às fibras, segundo o item 6.4.9 da ABNT NBR 7190:1997, é obtido a partir da seguinte equação:

$$E_{c0,ef} = k_{mod} \cdot E_{c0,m} \quad (2)$$

Em que:

$E_{c0,ef}$ = módulo de elasticidade efetivo paralelo às fibras;

k_{mod} = coeficiente de modificação em função das propriedades da madeira;

$E_{c0,m}$ = módulo de elasticidade médio característico paralelo às fibras da madeira.

O coeficiente de modificação, k_{mod} , é obtido pela multiplicação de três outros coeficientes, como mostra a equação 3, que levam em consideração a classe de carregamento da estrutura ($k_{mod,1}$), a classe de umidade admitida ($k_{mod,2}$) e o eventual emprego de madeira de segunda categoria ($k_{mod,3}$).

$$k_{mod} = k_{mod,1} \cdot k_{mod,2} \cdot k_{mod,3} \quad (3)$$

Os coeficientes de ponderação para o estado limite último, estão apresentados na tabela

Tabela 3 – Coeficientes de ponderação

Coeficiente	Tensão	Valor
γ_{wc}	Compressão Paralela às Fibras	1,4
γ_{wt}	Tração Paralela às Fibras	1,8
γ_{wv}	Cisalhamento Paralelo às Fibras	1,8

Fonte: ABNT NBR 7190:1997.

A segurança de uma estrutura se dá quando as solicitações atuantes são inferiores ou, no máximo, iguais às solicitações resistentes. Tal como dito anteriormente, as verificações no tabuleiro serão feitas apenas com relação ao efeito dos momentos fletores máximos, tanto de compressão como de tração, que serão obtidos com o auxílio do *software* Ftool, por ser uma ferramenta gráfico-interativa que auxilia na compreensão do comportamento estrutural de pórticos planos. Segundo Castro (2017), essas verificações devem seguir as equações 4 e 5.

$$\sigma_{c,d} = \frac{\sigma M_{c,d}}{bh^2} \leq f_{c,d} \quad (4)$$

$$\sigma_{t,d} = \frac{\sigma M_{t,d}}{bh^2} \leq f_{t,d} \quad (5)$$

Em que:

$\sigma_{c,d}$ = tensão de compressão de cálculo;

$\sigma M_{c,d}$ = tensão devida ao momento de cálculo máximo de compressão;

$\sigma_{t,d}$ = tensão de tração de cálculo;

$\sigma M_{t,d}$ = tensão devida ao momento de cálculo máximo de tração;

b = largura de cada peça do tabuleiro;

h = altura de cada peça do tabuleiro;

$f_{c,d}$ = esforço de resistência à compressão de cálculo;

$f_{t,d}$ = esforço de resistência à tração de cálculo.

4.2 Dimensionamento da longarina

O dimensionamento da longarina consiste em compreender a maior ou menor incidência das cargas móveis sobre uma ponte de madeira, levando em consideração o posicionamento do veículo padrão ao longo de uma seção transversal. Desta forma, será utilizado para esse fim o

Método de Engesser-Courbon, que é um método aproximado dos coeficientes de distribuição transversal de cargas.

Segundo Castro (apud ALVES, 2004, p. 50), além das considerações básicas relativas à Teoria das Estruturas como, por exemplo, o comportamento elástico-linear das peças, pequenos deslocamentos e seções planas, algumas outras precisam ser levadas em conta, tais como:

- a) As longarinas encontram-se paralelas entre si e perpendiculares às transversinas, às quais possuem rigidez infinita à flexão.
- b) As deformações sofridas pelas transversinas em relação às deformações das longarinas são desconsideradas, bem como o efeito de torção naqueles elementos.

Após essas considerações, em primeiro lugar, faz-se necessário a verificação da estrutura da ponte quanto à sua rigidez, para que se tenha uma razoável garantia da utilização desse método, devendo obedecer a equação 6.

$$\lambda = \frac{b}{2L} \cdot \sqrt[4]{\frac{L}{b} \cdot \frac{n}{t} \cdot \frac{\rho_L}{\rho_t}} \leq 0,30 \quad (6)$$

Em que:

b = largura da ponte (distância entre longarinas extremas), dada em m;

L = comprimento do tabuleiro, dado pelo comprimento do vão, em m;

n = número de vigas principais (longarinas);

t = número de transversinas intermediárias (peças do tabuleiro);

ρ_L = rigidez média das longarinas (I_l) em m^4 ;

ρ_t = rigidez média das transversinas (I_t), em m^4 .

O autor Hellmeister (1983), em sua obra, estuda o comportamento e a utilização da madeira do tipo eucalipto citriodora em pontes. Ele sugere a utilização de uma viga bi-circular, composta por duas peças perfeitamente solidarizadas por anéis e parafusos metálicos, no banzo superior de vigas treliçadas. Com isso, além de permitir a utilização de madeiras cujas toras apresentam efeito de conicidade de seção transversal, essa consideração eleva a rigidez das peças em até dez vezes com relação à uma peça simples. Desta forma, é possível que as peças do tabuleiro se apoiem diretamente no banzo superior das longarinas, pois a rigidez das vigas

bi-circulares contribui para que as peças das treliças sejam solicitadas majoritariamente por esforços axiais, que é a principal característica de resistência desse tipo de estrutura. A rigidez desse tipo de viga é obtida pela equação 7.

$$\rho_L = \frac{10 \cdot \pi \cdot D_m^4}{64} \quad (7)$$

Em que D_m corresponde ao diâmetro médio, em determinada seção, das duas peças que compõem a viga bi-circular e tem valor ainda mais representativo quando elas apresentam variação de diâmetro. Entretanto, no presente projeto, serão consideradas duas toras de diâmetros constantes e iguais a vinte centímetros. A rigidez das transversinas pode ser calculada pela equação 8.

$$\rho_t = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (8)$$

Em que:

b = largura das pranchas do tabuleiro;

h = espessura das pranchas do tabuleiro.

A equação que pressupõe a distribuição transversal de carga para uma longarina i considerada é dada em função da excentricidade de aplicação da carga unitária, no eixo principal da seção transversal (Equação 9).

$$r_i = \frac{P}{n} \left[1 + 6 \left[\frac{2i - (n + 1)}{n^2 - 1} \right] \cdot \frac{e}{\varepsilon} \right] \quad (9)$$

Em que:

r_i = é o coeficiente de distribuição transversal de carga para uma longarina i considerada;

P = é a carga concentrada unitária, em kN;

n = corresponde ao número de vigas principais (longarinas);

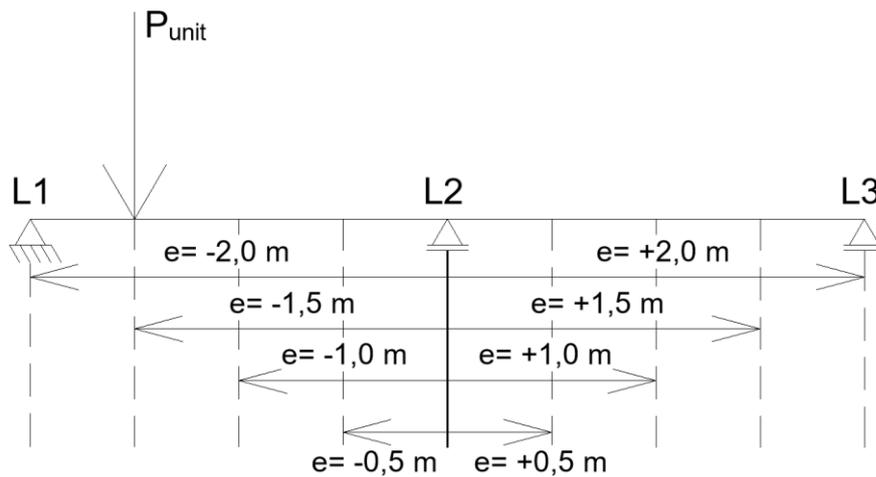
i = corresponde a viga principal (longarina) considerada;

e = é a excentricidade onde a carga unitária P é aplicada, dada em m;

ε = é o espaçamento entre as vigas longitudinais, dada em m.

A Figura 10 mostra a identificação das longarinas em L1, L2 e L3 e demonstra as excentricidades com as quais a carga unitária é aplicada, em relação à seção transversal da ponte.

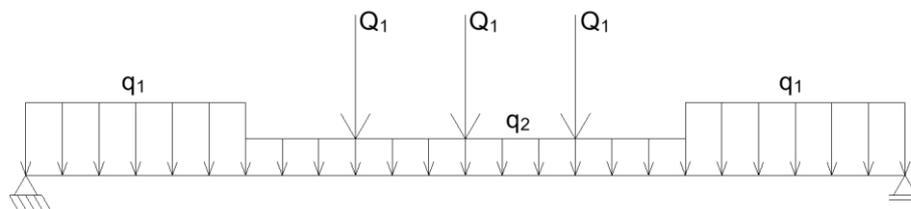
Figura 10 – Posições da carga unitária



Fonte: Autor, 2022.

O método de Engesser-Courbon compreende a distribuição das cargas móveis sobre as longarinas conforme é apresentado na Figura 11, em que Q_1 é a carga concentrada do veículo-tipo que solicita a longarina considerada, q_1 é conhecida como carga de multidão ou carga externa e q_2 é a carga interna distribuída.

Figura 11 – Distribuição as cargas móveis nas longarinas



Fonte: Autor, 2022.

A obtenção dos valores de Q_1 , q_1 e q_2 se dão por meio das equações 10, 11 e 12.

$$Q_1 = \varphi Q (r_1 + r_2) \quad (10)$$

$$q_1 = \varphi q (A_1 + A_2) \quad (11)$$

$$q_2 = \varphi q \cdot A_2 \quad (12)$$

Em que:

φQ = é o valor majorado da carga estática concentrada na seção transversal, em kN;

φq = é o valor majorado da carga distribuída na seção transversal, em kN/m;

A_1 = corresponde à área positiva do gráfico limitada pela largura padrão do veículo;

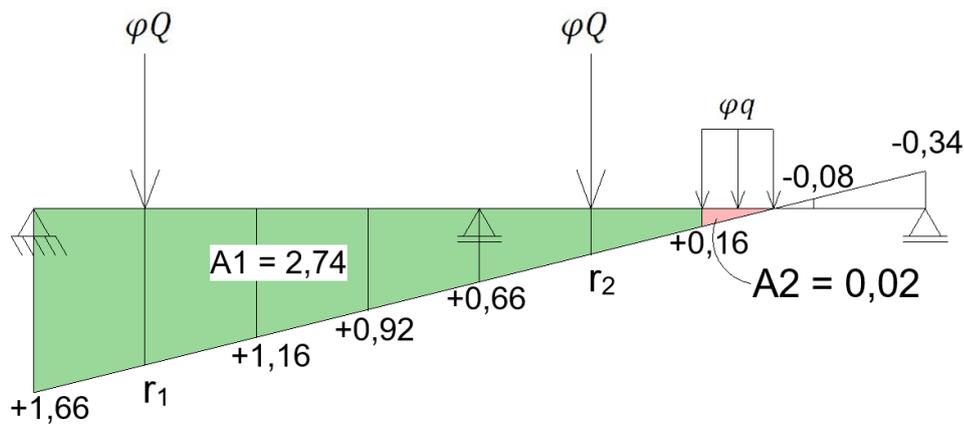
A_2 = corresponde à área positiva do gráfico limitada pela largura da carga de multidão;

r_1 = coeficiente de distribuição transversal correspondente à posição do primeiro pneu, mais à esquerda;

r_2 = coeficiente de distribuição transversal correspondente à posição do segundo pneu, mais à direita.

A Figura 12 representa graficamente um exemplo da disposição das cargas majoradas φQ e φq na seção transversal.

Figura 12 – Disposição das cargas majoradas



Fonte: Autor, 2022.

Para obtenção dessas cargas, a norma brasileira ABNT NBR 7188:2013 aponta que é necessário conhecer os coeficientes de ponderação das cargas móveis, que são os índices de impacto vertical, número de faixas e impacto adicional e podem ser obtidos pelas equações 13 e 14.

$$CIV = 1 + 1,06 \cdot \left(\frac{20}{Liv + 50} \right) \quad (13)$$

$$CNF = 1 - 0,05 \cdot (n - 2) > 0,9 \quad (14)$$

Em que:

CIV = coeficiente de impacto vertical para estruturas com vãos entre 10 e 200 metros;

CNF = coeficiente de número de faixas;

Liv = vão a ser vencido pela ponte;

n = número de faixas da via;

CIA = coeficiente de impacto adicional, igual a 1,25 para construções em concreto ou mistas ou 1,15 para construções em aço.

Por fim, as cargas majoradas φQ e φq podem ser obtidas por meio das seguintes expressões.

$$\varphi Q = P \cdot CIV \cdot CNF \cdot CIA \quad (15)$$

$$\varphi q = p \cdot CIV \cdot CNF \cdot CIA \quad (16)$$

Em que:

P = carga concentrada por pneu do veículo-tipo [kN];

p = carga de multidão, ou distribuída, devido ao veículo-tipo [kN/m²];

As cargas móveis devido ao tráfego de veículos são as principais fontes de solicitação estrutural em uma ponte. Entretanto, mesmo que a madeira não tenha peso próprio tão elevado, ele é significativo e faz-se necessário sua consideração nos cálculos e verificações, como carga permanente.

Os elementos da ponte que farão parte desses cálculos são o tabuleiro e as vigas treliçadas, visto que os rodeiros apresentam peso insignificante com relação às outras partes citadas. Para os tabuleiros, o peso próprio será obtido por meio do produto entre o volume total das peças, a massa específica aparente das madeiras do tipo C40 e a largura da faixa de influência sobre cada longarina, além de dividir pela área do tabuleiro. Com as treliças o procedimento será semelhante, em que se deve obter o volume de cada peça que as compõem e multiplicar pela massa específica aparente da madeira do tipo eucalipto citriodora, cuja massa específica aparente é igual a 999,00 kg/m³.

Em posse dos valores da carga permanente, decorrente do peso próprio, e das ações variáveis, devido ao tráfego de veículos, procede-se com o dimensionamento das peças da

treliça. Logo, com o auxílio do *software* Ftool, deve-se obter os esforços axiais solicitantes para cada tipo de ação.

Para as pontes de madeira, as combinações utilizadas são as últimas normais para o estado limite último e a de longa duração para o estado limite de utilização. Entretanto, como a treliça não será verificada quanto à flecha e suas peças serão dimensionadas quanto à compressão e tração, logo será considerado apenas o estado limite último, ao qual os esforços são mais críticos e podem ser obtidos pela equação 17.

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{Gi} F_{Gi,k} + \gamma_Q \cdot \left[F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \Psi_{0j} F_{Qj,k} \right] \quad (17)$$

Em que:

F_d = esforço solicitante de cálculo;

γ_{Gi} = coeficiente de ponderação das ações permanentes;

$F_{Gi,k}$ = o valor das ações permanentes;

γ_Q = coeficiente de ponderação das ações acidentais;

$F_{Q1,k}$ = o valor da ação variável considerada como ação principal para determinada combinação;

Ψ_{0j} = coeficiente de ponderação das ações variáveis;

$F_{Qj,k}$ = o valor das ações variáveis consideradas como ação secundária para determinada combinação.

A norma ABNT NBR 7190:1997 apresenta os valores dos coeficientes de ponderação γ_{Gi} e γ_Q necessários para os cálculos das combinações, os quais estão apresentados nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Coeficientes de ponderação das ações variáveis

Combinações	Ações variáveis em geral
Normais	$\gamma_Q=1,4$
Especiais ou de construção	$\gamma_Q=1,2$
Excepcionais	$\gamma_Q=1,0$

Fonte: adaptado de ABNT NBR 7190:1997.

Tabela 5 – Coeficientes de ponderação das ações permanentes de grande variabilidade

Combinações	Para efeitos	
	Desfavoráveis	Favoráveis
Normais	$\gamma_G= 1,4$	$\gamma_G= 0,9$
Especiais ou de construção	$\gamma_G= 1,3$	$\gamma_G= 0,9$
Excepcionais	$\gamma_G= 1,2$	$\gamma_G= 0,9$

Fonte: ABNT NBR 7190:1997.

As verificações das treliças são semelhantes às do tabuleiro, em que as solicitações atuantes devem ser inferiores ou, no máximo, iguais as solicitações resistentes, conforme as equações 18 e 19. Portanto, deve-se compreender qual a longarina mais solicitada, para assim prosseguir com o dimensionamento.

$$\sigma_{c,d} = \frac{F_{d,c}}{A_s} \leq f_{c,d} \quad (18)$$

$$\sigma_{t,d} = \frac{F_{d,t}}{A_s} \leq f_{t,d} \quad (19)$$

Em que:

σ_{cd} = tensão de compressão de cálculo;

σ_{td} = tensão de tração de cálculo;

$F_{d,c}$ = força normal de compressão obtida pelo Ftool;

$F_{d,t}$ = força normal de tração obtida pelo Ftool;

A_s = área transversal da peça a ser considerada;

$f_{c,d}$ = esforço de resistência à compressão de cálculo;

$f_{t,d}$ = esforço de resistência à tração de cálculo.

A norma brasileira ABNT NBR 7190:1997 apresenta no Anexo E os valores médios usuais de resistência e rigidez de algumas madeiras nativas e de florestamento. Como foi pré-determinado, as vigas treliçadas da ponte serão executadas com madeira do Eucalipto Citriodora, cujas características principais podem ser observadas na tabela abaixo. Deve-se obter os valores de cálculo para essa espécie, de modo semelhante ao calculado para a madeira de classe C40, utilizada no tabuleiro.

Tabela 6 – Valores característicos da madeira do tipo Eucalipto Citriodora

f_{c0k} (MPa)	f_{v0k} (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	ρ_{ap} (kg/m ³)
62,00	10,70	18 421,00	999,00
Valores na condição-padrão de referência U = 12%			

Fonte: ABNT NBR 7190:1997.

Por fim, de acordo com a norma ABNT NBR 7190:1997 deve-se fazer a verificação da estabilidade das peças comprimidas, de acordo com as seguintes equações:

$$\lambda_e = \frac{L_0}{i_{min}} \quad (20)$$

$$i_{min} = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}} \quad (21)$$

Em que:

λ_e = índice de esbeltez da peça verificada;

L_0 = é o comprimento da peça, caso ambas as extremidades sejam apoiadas ou engastadas;

i_{min} = é o raio de giração mínimo da seção transversal do elemento;

I_{min} = é o menor momento de inércia entre I_x e I_y ;

A = área de seção transversal da peça analisada.

Segundo Castro (2017), para peças medianamente esbeltas, com $40 < \lambda \leq 80$, a verificação da instabilidade se dá por meio da seguinte condição.

$$\frac{\sigma_{Nd}}{f_{c,d}} + \frac{\sigma_{Md}}{f_{c,d}} \leq 1 \quad (22)$$

Em que:

σ_{Nd} = o valor de cálculo da tensão de compressão devida à força normal de compressão;

σ_{Md} = o valor de cálculo da tensão de compressão devida ao momento fletor M_d , dado pela equação 23.

$$M_d = N_d \cdot e_d \quad (23)$$

Em que:

$$e_d = e_1 \cdot \left(\frac{F_E}{F_E - N_d} \right) \quad (24)$$

$$F_E = \frac{\pi^2 E_{c0,ef} I}{L_0^2} \quad (25)$$

$$e_1 = e_i + e_a \quad (26)$$

$$e_i = \frac{h}{30} \quad (27)$$

$$e_a = \frac{L_0}{300} \quad (28)$$

Onde:

N_d = força de compressão de cálculo na peça;

e_d = excentricidade de cálculo;

e_1 = excentricidade de primeira ordem;

e_i = excentricidade inicial;

e_a = excentricidade acidental mínima;

F_E = carga crítica de Euler;

$E_{c0,ef}$ = módulo de elasticidade efetivo;

I = o momento de inércia da seção transversal da peça no plano de flexão considerado;

L_0 = comprimento da peça, quando está bi-apoiada ou engastada;

h = altura da seção transversal da peça.

5. RESULTADOS

Os resultados aqui apresentados seguirão as diretrizes mencionadas na metodologia. Desta forma, serão demonstrados o dimensionamento das peças do tabuleiro e das longarinas, com suas respectivas decorrências.

5.1 Dimensionamento do tabuleiro

Considerando para a execução do tabuleiro uma madeira de classe C40, carregamento de curta duração, classe de umidade 3 e 4 e que será utilizado madeira de primeira categoria, tem-se que os coeficientes de modificação $k_{mod,1}$, $k_{mod,2}$ e $k_{mod,3}$, equivalem respectivamente a 0,90, 0,80 e 1,00 e, portanto, o valor de k_{mod} é igual a 0,72. Diante disso, as resistências características e módulo de elasticidade efetivo de cálculo são apresentados na tabela 7.

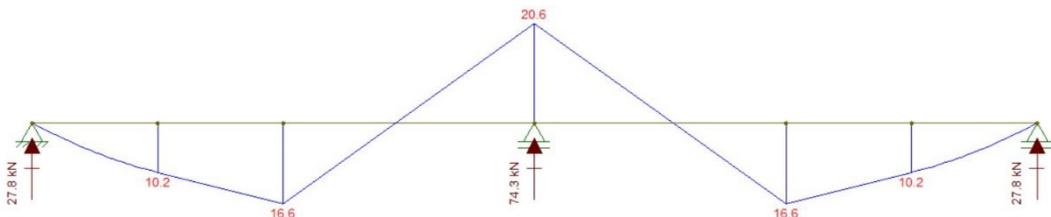
Tabela 7 – Valores de cálculo da madeira de classe C40

$f_{c0,d}$ (kN/cm ²)	$f_{t0,d}$ (kN/cm ²)	$f_{v0,d}$ (kN/cm ²)	$E_{c0,ef}$ (kN/cm ²)
2,06	2,08	0,24	1404,00

Fonte: Autor, 2022.

Com o auxílio do *software* Ftool se obteve os momentos fletores máximos de cálculo à compressão ($M_{c,d}$) e à tração ($M_{t,d}$), iguais a 20,6 kN.m e 16,6 kN.m, respectivamente, assim como mostra a Figura 13.

Figura 13 – Diagrama de momento fletor no tabuleiro



Fonte: Autor, 2022.

Diante disso, faz-se possível a determinação das tensões de compressão e de tração, decorrentes dos momentos fletores encontrados, e as verificações pertinentes, conforme indicam as Equações 4 e 5. Os resultados podem ser observados na Tabela 8 a seguir.

Tabela 8 – Verificação das tensões do tabuleiro

$\sigma_{c,d}$ (kN/cm ²)	$f_{c0,d}$ (kN/cm ²)	$\sigma_{t,d}$ (kN/cm ²)	$f_{t0,d}$ (kN/cm ²)	Verificação da compressão	Verificação da tração
1,93	2,06	1,56	2,08	Peça verificada!	Peça verificada!

Fonte: Autor, 2022.

Portanto, como os esforços solicitantes são menores que os esforços resistentes, as peças do tabuleiro estão verificadas e podem ser utilizadas nas dimensões e especificações as quais foram determinadas.

5.2 Dimensionamento das longarinas

Assim como pressupõe o método de Engesser-Courbon, para garantia de sua eficiência é necessário verificar a rigidez da estrutura da ponte, conforme a equação 6. Para tanto, $b = 4,00$ m, $L = 12,00$ m, $n = 3$, $t = 43$; a rigidez das longarinas e das pranchas do tabuleiro são obtidas por meio das equações 7 e 8.

$$\rho_L = \frac{10 \cdot \pi \cdot D_m^4}{64} = \frac{10 \cdot \pi \cdot 0,20^4}{64} = 0,0008 \text{ m}^4$$

$$\rho_t = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{0,25 \cdot 0,16^3}{12} = 0,0001 \text{ m}^4$$

Logo, aplicando a equação 6 para verificar a estrutura da ponte quanto à sua rigidez tem-se:

$$\lambda = \frac{b}{2L} \cdot \sqrt[4]{\frac{L}{b} \cdot \frac{n}{t} \cdot \frac{\rho_L}{\rho_t}} = \frac{4}{2 \cdot 12} \cdot \sqrt[4]{\frac{12}{4} \cdot \frac{3}{43} \cdot \frac{0,0008}{0,0001}} = 0,20$$

$$\lambda = 0,20 \leq 0,30 \leftarrow \text{Ok!}$$

Através da equação 9 e sabendo-se que $P = 1$, $n = 3$, $\varepsilon = 2m$, é possível obter o coeficiente de distribuição transversal. Entretanto, i varia de acordo com a longarina que está

sendo analisada e se altera conforme o ponto de aplicação da carga unitária, bem como mostra a Figura 10. Sendo assim, obtém-se o coeficiente de distribuição transversal de carga para cada uma das longarinas conforme indicado nas equações abaixo.

Para L1,

$$r_1 = \frac{1}{3} \left[1 + 6 \left[\frac{2 \cdot 1 - (3 + 1)}{(3)^2 - 1} \right] \cdot \frac{e}{2} \right] = \frac{1}{3} - \frac{e}{4}$$

Para L2,

$$r_2 = \frac{1}{3} \left[1 + 6 \left[\frac{2 \cdot 2 - (3 + 1)}{(3)^2 - 1} \right] \cdot \frac{e}{2} \right] = \frac{1}{3}$$

Para L3,

$$r_3 = \frac{1}{3} \left[1 + 6 \left[\frac{2 \cdot 3 - (3 + 1)}{(3)^2 - 1} \right] \cdot \frac{e}{2} \right] = \frac{1}{3} + \frac{e}{4}$$

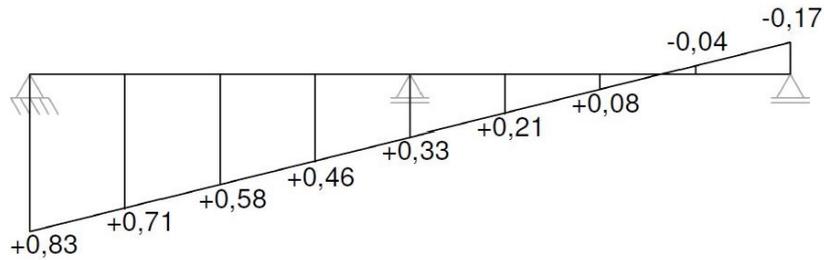
A Tabela 9 expressa os valores do coeficiente de distribuição transversal de carga em função da excentricidade e as Figuras 14, 15 e 16 apresentam as linhas de influência obtidas.

Tabela 9 – Coeficiente de distribuição transversal de carga

Longarina L1		Longarina L2		Longarina L3	
<i>e</i>	<i>r_i</i>	<i>e</i>	<i>r_i</i>	<i>e</i>	<i>r_i</i>
-2,00	0,83	-2,00	0,33	-2,00	-0,17
-1,50	0,71	-1,50	0,33	-1,50	-0,04
-1,00	0,58	-1,00	0,33	-1,00	0,08
-0,50	0,46	-0,50	0,33	-0,50	0,21
0,00	0,33	0,00	0,33	0,00	0,33
0,50	0,21	0,50	0,33	0,50	0,46
1,00	0,08	1,00	0,33	1,00	0,58
1,50	-0,04	1,50	0,33	1,50	0,71
2,00	-0,17	2,00	0,33	2,00	0,83

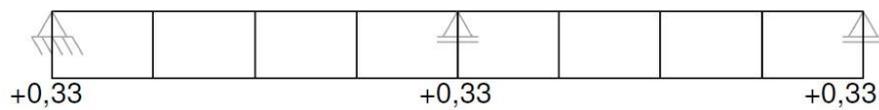
Fonte: Autor, 2022.

Figura 14 – Linha de influência da longarina L1



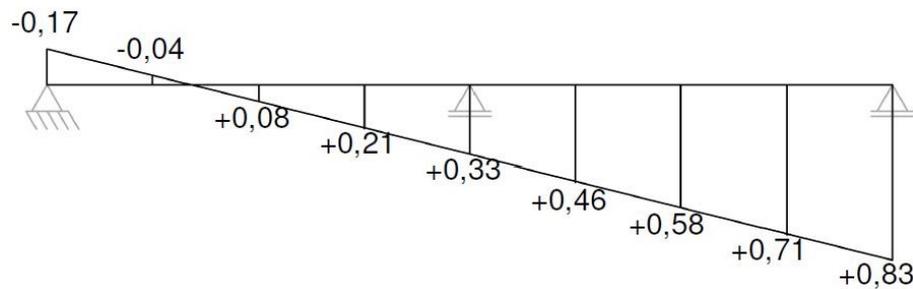
Fonte: Autor, 2022.

Figura 15 – Linha de influência da longarina L2



Fonte: Autor, 2022.

Figura 16 – Linha de influência da longarina L3



Fonte: Autor, 2022.

Para se obter os valores dos esforços decorrentes da distribuição transversal de cargas pelo método de Engesser-Courbon, calcula-se primeiramente os coeficientes de ponderação. *CIV*, *CNF* e *CIA*. Sendo assim, apresenta-se abaixo os valores calculados para o coeficiente de Impacto Vertical (*CIV*), coeficiente de Número de Faixas (*CNF*) e o coeficiente de Impacto Adicional (*CIA*):

$$CIV = 1 + 1,06 \cdot \left(\frac{20}{Liv + 50} \right) = 1 + 1,06 \cdot \left(\frac{20}{12 + 50} \right) = 1,34$$

$$CNF = 1 - 0,05 \cdot (n - 2) = 1 - 0,05 \cdot (1 - 2) = 1,05 > 0,9 \leftarrow \mathbf{Ok!}$$

$$CIA = 1,25 \leftarrow \text{considerando o pior caso.}$$

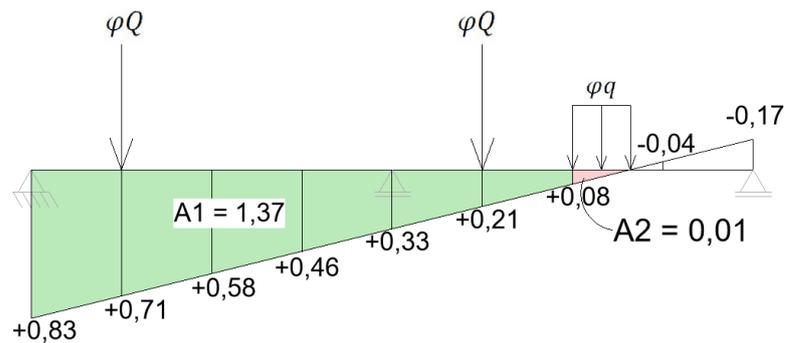
Logo, obtêm-se os valores das cargas majoradas φQ e φq conforme segue:

$$\varphi Q = P \cdot (CIV \cdot CNF \cdot CIA) = 50 \cdot (1,34 \cdot 1,05 \cdot 1,25) = 87,94 \text{ kN}$$

$$\varphi q = p \cdot CIV \cdot CNF \cdot CIA = 5 \cdot (1,34 \cdot 1,05 \cdot 1,25) = 8,79 \text{ kN/m}^2$$

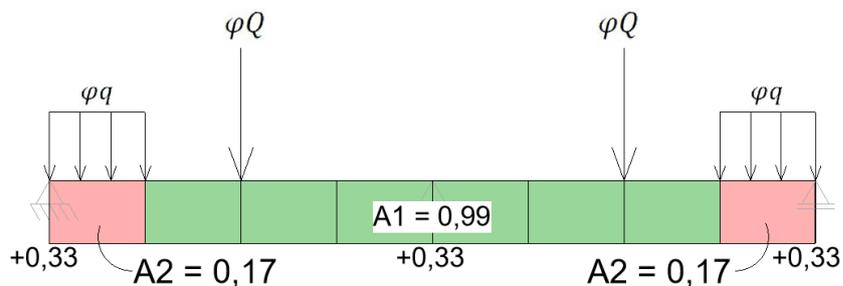
Assim como dito anteriormente, a área A_1 corresponde à área positiva do gráfico limitada pela largura padrão do veículo e a área A_2 corresponde à área positiva do gráfico limitada pela largura da carga de multidão. Além disso, para cada uma das longarinas, as cargas Q_1 , q_1 e q_2 serão obtidas para a situação mais crítica, mas que garanta uma mínima segurança para o veículo. As Figuras 17, 18 e 19 abaixo, demonstram a disposição das cargas considerada para cada uma das situações e a tabela 10 apresenta os valores de área e coeficientes de distribuição transversal correspondentes.

Figura 17 – Disposição das cargas majoradas para a longarina L1



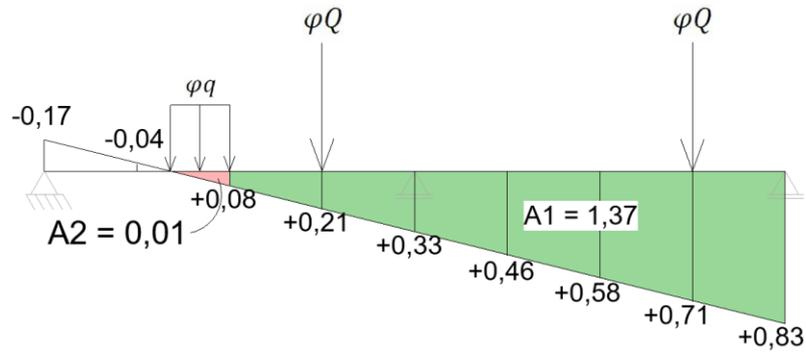
Fonte: Autor, 2022.

Figura 18 – Disposição das cargas majoradas para a longarina L2



Fonte: Autor, 2022.

Figura 19 – Disposição das cargas majoradas para a longarina L3



Fonte: Autor, 2022.

Tabela 10 – Parâmetros de cálculo das cargas de Engesser-Courbon

	Longarina L1	Longarina L2	Longarina L3
A_1	1,37	1,33	1,37
A_2	0,01	0,17	0,01
r_1	0,71	0,33	0,21
r_2	0,21	0,33	0,71

Fonte: Autor, 2022.

Logo, pode-se obter as cargas Q_1 , q_1 e q_2 , conforme é proposto o método de Engesser-Courbon, pelas equações 10,11 e 12 e seus valores estão apresentados na tabela 11 abaixo, para cada uma das longarinas.

Tabela 11 – Cargas de distribuição transversal

	Longarina L1	Longarina L2	Longarina L3
Q_1	80,73	58,12	80,73
q_1	12,13	11,62	12,13
q_2	0,11	2,91	0,11

Fonte: Autor, 2022.

Segue-se o dimensionamento com o cálculo das cargas permanentes atuantes sobre as longarinas, decorrentes do peso próprio das peças.

Tabela 12 – Parâmetros para cálculo do peso próprio do tabuleiro

Quantidade de peças	Largura (m)	Altura (m)	Comprimento (m)	ρ_{ap} (kN/m ³)	Área do tabuleiro (m ²)
43	0,25	0,16	4,00	9,50	48,00

Fonte: Autor, 2022.

A largura de influência do tabuleiro para as vigas L1 e L3, é de 1 metro e para a longarina L2 são 2 metros. Dessa forma, os esforços de cálculo devido ao peso próprio do tabuleiro são:

Tabela 13 – Peso próprio do tabuleiro por treliça

	Longarina L1	Longarina L2	Longarina L3
$F_{Gi,k}$ (kN/m)	1,36	2,72	1,36

Fonte: Autor, 2022.

Os valores do peso próprio e dos carregamentos permanentes das treliças, são apresentados nas tabelas 14 e 15, respectivamente.

Tabela 14 – Peso próprio da treliça

Peça	Comprimento (m)	Diâmetro (m)	Quantidade	Densidade (kN/m ³)	Peso das Peças (kN)	Peso Total (kN/m)
Banzo Superior	12,00	0,20	2,00	9,99	7,53	1,70
Banzo Inferior	12,00	0,20	1,00	9,99	3,77	
Diagonais	2,50	0,20	6,00	9,99	4,71	
Montantes	2,00	0,20	7,00	9,99	4,39	

Fonte: Autor, 2022.

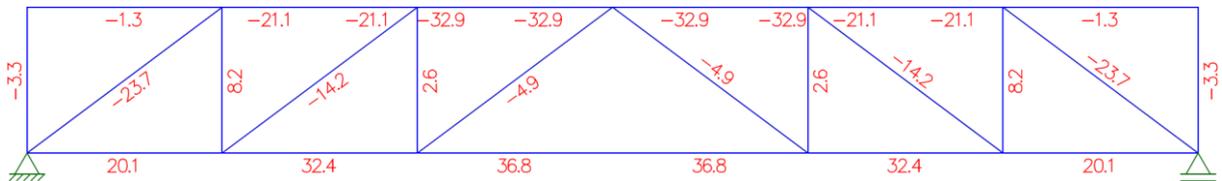
Tabela 15 – Carregamento permanente sobre as treliças

Longarina	Peso do Tabuleiro (kN/m ²)	Peso Próprio da Treliça (kN/m)	Carga Permanente (kN/m)
L1	1,36	1,70	3,06
L2	2,72		4,42
L3	1,36		3,06

Fonte: Autor, 2022.

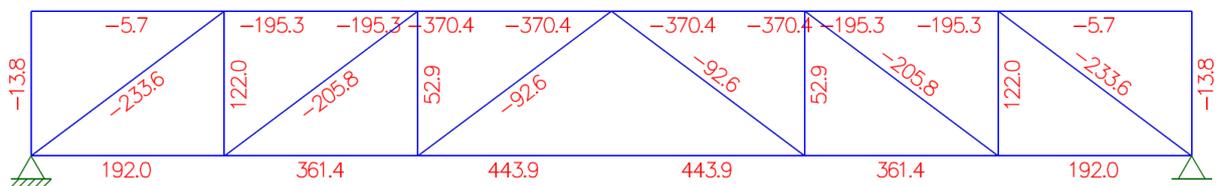
Inserindo-se as forças decorrentes do carregamento permanente e das cargas móveis, obtém-se os seguintes esforços.

Figura 20 – Diagrama de esforço normal devido ao peso próprio sobre as longarinas L1 e L3



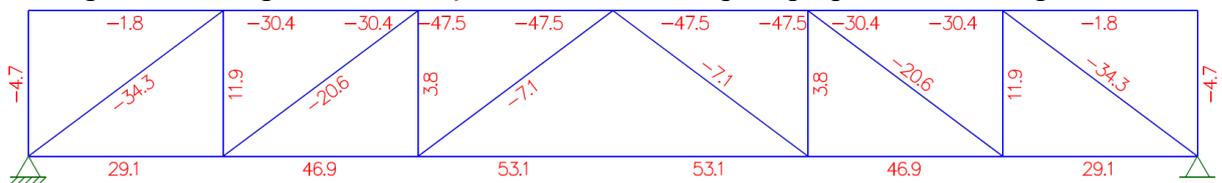
Fonte: Autor, 2022.

Figura 21 – Diagrama de esforço normal devido às cargas móveis sobre as longarinas L1 e L3



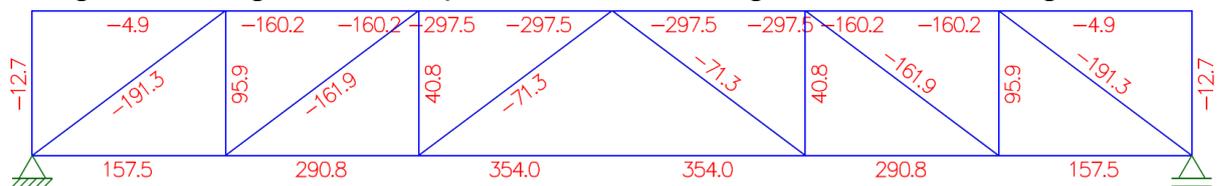
Fonte: Autor, 2022.

Figura 22 – Diagrama de esforço normal devido ao peso próprio sobre a longarinas L2



Fonte: Autor, 2022.

Figura 23 – Diagrama de esforço normal devido às cargas móveis sobre a longarinas L2



Fonte: Autor, 2022.

Considerando a madeira do tipo eucalipto citriodora, carregamento de longa duração, classe de umidade 3 e 4 e que será utilizado madeira de primeira categoria, tem-se que os coeficientes de modificação $k_{mod,1}$, $k_{mod,2}$ e $k_{mod,3}$ equivalem respectivamente a 0,60, 0,80 e 1,00 e, portanto, o valor de k_{mod} é igual a 0,48. Diante disso, as resistências características e módulo de elasticidade efetivo de cálculo são os apresentados na tabela 16.

	I6	20,10	192,00	296,94	314,16	3,30	0,95	Ok!
Diagonal	D1	-23,70	-233,60	-360,22	314,16	2,13	1,15	Ok!
	D2	-14,20	-205,80	-308,00	314,16	2,13	0,98	Ok!
	D3	-4,90	-92,60	-136,50	314,16	2,13	0,43	Ok!
	D4	-4,90	-92,60	-136,50	314,16	2,13	0,43	Ok!
	D5	-14,20	-205,80	-308,00	314,16	2,13	0,98	Ok!
	D6	-23,70	-233,60	-360,22	314,16	2,13	1,15	Ok!
Montante	M1	-3,30	-13,80	-23,94	314,16	2,13	0,08	Ok!
	M2	8,20	122,00	182,28	314,16	3,30	0,58	Ok!
	M3	2,60	52,90	77,70	314,16	3,30	0,25	Ok!
	M4	2,60	55,90	81,90	314,16	3,30	0,26	Ok!
	M5	8,20	122,00	182,28	314,16	3,30	0,58	Ok!
	M6	-3,30	-13,80	-23,94	314,16	2,13	0,08	Ok!

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 18 - Verificação das peças da treliça L2

Elemento Estrutural	Peça	Esforço Normal (kN)			Área (cm²)	σ_R (kN/cm²)	σ_S (kN/cm²)	Verificação
		Carga Permanente Fgk	Carga Acidental Fqk	Combinação para ELU				
Banzo Superior	S1	-1,80	-4,90	-9,38	314,16	2,13	0,03	Ok!
	S2	-30,40	-160,20	-266,84	314,16	2,13	0,85	Ok!
	S3	-47,50	-297,50	-483,00	314,16	2,13	1,54	Ok!
	S4	-47,50	-297,50	-483,00	314,16	2,13	1,54	Ok!
	S5	-30,40	-160,20	-266,84	314,16	2,13	0,85	Ok!
	S6	-1,80	-4,90	-9,38	314,16	2,13	0,03	Ok!
Banzo Inferior	I1	29,10	157,50	261,24	314,16	3,30	0,83	Ok!
	I2	46,90	290,80	472,78	314,16	3,30	1,50	Ok!
	I3	53,10	354,00	569,94	314,16	3,30	1,81	Ok!
	I5	46,90	290,80	472,78	314,16	3,30	1,50	Ok!
	I6	29,10	157,50	261,24	314,16	3,30	0,83	Ok!
Diagonal	D1	-34,30	-191,30	-315,84	314,16	2,13	1,01	Ok!
	D2	-20,60	-161,90	-255,50	314,16	2,13	0,81	Ok!

	D3	-7,10	-71,30	-109,76	314,16	2,13	0,35	Ok!
	D4	-7,10	-71,30	-109,76	314,16	2,13	0,35	Ok!
	D5	-20,60	-161,90	-255,50	314,16	2,13	0,81	Ok!
	D6	-34,30	-191,30	-315,84	314,16	2,13	1,01	Ok!
Montante	M1	-4,70	-12,70	-24,36	314,16	2,13	0,08	Ok!
	M2	11,90	95,90	150,92	314,16	3,30	0,48	Ok!
	M3	3,80	40,80	62,44	314,16	3,30	0,20	Ok!
	M4	3,80	40,80	62,44	314,16	3,30	0,20	Ok!
	M5	11,90	95,90	150,92	314,16	3,30	0,48	Ok!
	M6	-4,70	-12,70	-24,36	314,16	2,13	0,08	Ok!

Fonte: Autor, 2022.

De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que as longarinas L1 e L3 são as mais solicitadas e, portanto, para a verificação da estabilidade das peças comprimidas, deve-se considerar a maior carga solicitante de compressão nas peças. O banzo superior é uma peça única, porém será considerado o maior esforço atuante na peça, ou seja, a solicitação no trecho S3, no qual $F_d = -564,62$ kN. A diagonal dimensionada será a peça D1, que $F_d = -360,22$ kN, e o montante será o M1, cujo $F_d = -23,94$ kN. As tabelas 19 e 20 apresentam os parâmetros e as verificações pertinentes às peças citadas, através dos procedimentos descritos na metodologia, conforme as equações 18 a 28.

Tabela 19 - Verificação das peças das treliças L1 e L3

	$i_{mín}$ (m)	L_0 (m)	λ	e_a (m)	e_i (m)	e_1 (m)	F_E (kN)	e_d (m)
Banzo Superior (S3)	0,05	2,00	40,00	0,01	0,01	0,02	1713,50	0,01
Diagonal (D1)	0,05	2,50	50,00	0,01	0,01	0,02	1096,64	0,01
Montante (M1)	0,05	2,00	40,00	0,01	0,01	0,02	1713,50	0,01

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 20 - Verificação das peças das treliças L1 e L3

	N_d (kN)	M_d (kN)	σN_d (kN/m ²)	σM_d (kN/m ²)	Verificação
Banzo Superior (S3)	-564,62	7,08	7987,74	2670,23	Ok!
Diagonal (D1)	-360,22	4,07	5096,07	1534,41	Ok!
Montante (M1)	-23,94	0,39	762,03	751,53	Ok!

Fonte: Autor, 2022.

6. CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que as orientações e diretrizes estabelecidas pelas normas ABNT NBR 7190:1997 e ABNT NBR 7188:2013, além de outros trabalhos concernentes à projetos de estruturas de madeira, conduzem a resultados plausíveis com relação ao dimensionamento das peças de uma ponte em vigas treliçadas e à compreensão da influência das cargas móveis nesse tipo de estrutura, garantindo sua integridade e segurança. Destaca-se a facilidade de utilização e a eficiência do método simplificado de distribuição de cargas transversais de Engesser-Courbon, que contribuiu em demasia com a compreensão de como o efeito das cargas móveis é transmitido do tabuleiro para as vigas longarinas.

Entretanto, observou-se que apesar de diversos conteúdos científicos citarem as pontes em vigas treliçadas, poucos deles orientam especificamente a respeito das diretrizes e etapas de dimensionamento para esse tipo de estrutura. Com isso conclui-se que, apesar dessa disposição estrutural ser uma alternativa possível, ela não é a mais utilizada, principalmente ao se tratar do escopo desse projeto, destacando-se o emprego das pontes em vigas roliças para cumprir a mesma função.

Este trabalho abordou apenas o dimensionamento das peças de madeira da estrutura em questão. Porém, sugere-se como continuação do trabalho, o cálculo das ligações entre os elementos da ponte, porque essas cumprem a importante função de, além de contribuir na sustentação da estrutura, transferir eficientemente os esforços pelas peças de madeira. Por isso, evidencia-se a necessidade de que, principalmente, as vigas treliçadas sejam construídas por uma empresa especializada.

Por fim, salienta-se que ao contrário do senso comum, a madeira não é um material ultrapassado e que está em desuso. Cada vez mais, tem-se desenvolvido estudos e aprimoramentos tecnológicos que abordam a utilização desse insumo em diversos tipos de estrutura. Isso é evidenciado principalmente, pela recente atualização da norma brasileira

ABNT NBR 7190, após quase 25 anos, enfatizando a preocupação dos cientistas e pesquisadores do país com os avanços em pesquisa nesse assunto. Desta forma, torna-se relevante, como contribuição desse trabalho, refazer os cálculos verificando as possíveis alterações e seus impactos nos resultados obtidos em comparação com a antiga norma vigente.

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: 6 jul. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7188**: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

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

BSOFT. **A capacidade de carga conforme o caminhão**. Paraná, 8 jun. 2021. Disponível em: <https://blog.bsoft.com.br/capacidade-de-carga>. Acesso em: 22 jun. 2022.

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

CASTRO, Victor Ribeiro. **Dimensionamento e concepção de uma ponte em estrutura de madeira**. 2017. Dissertação (Bacharel em Engenharia Civil). Universidade Veiga de Almeida, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: https://www.academia.edu/41629382/Dimensionamento_e_Concep%C3%A7%C3%A3o_de_uma_Ponte_em_Estrutura_de_Madeira. Acesso em: 18 maio 2022.

FELIPPE FILHO, W. N. **Avaliação dos coeficientes de impacto utilizados no cálculo de pontes rodoviárias via análise dinâmica de estruturas**. 2008. Dissertação (Bacharel em

Engenharia Civil). Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2017. Disponível em: <https://www.ufjf.br/mac/files/2009/05/tcc-waldir.pdf>. Acesso em: 20 maio 2022.

FORTE CAMPO. **Galeria**. Minas Gerais: 2020, il. color.

HELLMEISTER, J. **Pontes de eucalipto citriodora**. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRAS E DAS ESTRUTURAS DE MADEIRA - EBRAMEM, 1., 1983, São Carlos. Anais... São Carlos: USP/EESC, 1983.

LEMOS, M. F. O. **Desenvolvimento De Ferramenta Computacional para Dimensionamento de Elementos de Ligação para Estruturas De Madeira**. Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2021.

MAURO SÔNEGO. **Setores Apontam Carência de Profissionais Qualificados**. Disponível em: <http://www.engeplus.com.br/noticia/geral/2020/setores-apontam-carencia-de-profissionais-qualificados>. Acesso em: 03 abril. 2021.

PFEIL, W. **Estruturas de Madeira**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC 2013. CALIL JUNIOR, Carlito, Dimensionamento de elementos estruturais de madeira. São Paulo: Manole, 2003.

SHIGUE, E.K. **Difusão da Construção em Madeira no Brasil**. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

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: 18 maio 2022.