

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

LUIZ HENRIQUE DE LIMA PADILHA

ANÁLISE COMPARATIVA DOS ESFORÇOS EM LONGARINAS DE PONTES
METÁLICAS TRELIÇADAS – PRATT E WARREN

Joinville

2024

LUIZ HENRIQUE DE LIMA PADILHA

ANÁLISE COMPARATIVA DOS ESFORÇOS EM LONGARINAS DE PONTES
METÁLICAS TRELIÇADAS – PRATT E WARREN

Trabalho apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, no Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura, do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Anelize Borges Monteiro

Joinville

2024

LUIZ HENRIQUE DE LIMA PADILHA

ANÁLISE COMPARATIVA DOS ESFORÇOS EM LONGARINAS DE PONTES
METÁLICAS TRELIÇADAS – PRATT E WARREN

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, no Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura, do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 06 de dezembro de 2024.

Banca Examinadora:

Dra Anelize Borges Monteiro
Orientadora/Presidente

Dr. Julián Asdrubal Buriticá Garcia
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dra Valéria Bennack
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a mim, pela dedicação e força nesta jornada, e à minha família e amigos, pelo amor e apoio constantes, em especial à minha mãe e irmã.

AGRADECIMENTOS

Início este trabalho envolto em gratidão, dedicado a todos que deixaram suas marcas na jornada que me trouxe até aqui.

À minha família, meu alicerce inabalável, ofereço o mais profundo agradecimento, pelo apoio emocional, psicológico e financeiro que sempre me sustentou. À minha mãe, Isabelita de Lima, que acreditou em mim antes mesmo de eu saber o que eram sonhos, criando caminhos onde eu pudesse alcançá-los com liberdade. Seu amor e orientação foram o farol que guiou não apenas esta etapa, mas toda a minha vida. À minha irmã, Ana Laura, minha cúmplice mais próxima, cuja risada iluminou até os dias mais sombrios e cuja parceria sinto como se estivesse escrita nas estrelas. E à minha avó, Marilene, que cuidou de mim mesmo à distância, sempre fazendo seu amor chegar, não importa onde eu estivesse.

Aos amigos que encontrei ao longo deste percurso, Amanda e Heloísa, minha gratidão pela companhia incansável nesses anos de desafios e crescimento. Com vocês compartilhei risadas que aliviaram dias difíceis, conselhos que trouxeram clareza e até o cansaço que, por vezes, tentou nos desmotivar, mas que superamos juntos, encontrando força no apoio mútuo. Também agradeço a Isabelle, sua energia foi uma chama nos momentos em que a minha enfraquecia. E Ana Paula, sua paciência e acolhimento me sustentaram nos períodos mais frágeis, aliviando os pesos que carreguei com suas palavras e sua escuta.

Aos meus professores e mestres, que com sua sabedoria moldaram o engenheiro que estou me tornando. Minha gratidão especial à minha orientadora, Anelize, cujas aulas eram sempre uma fonte de inspiração.

E, finalmente, a Deus, pela dádiva da vida e pela chance de vivenciar cada momento e conquista. Prometo honrar meu diploma de Engenheiro Civil de Infraestrutura e seguir em frente com coragem, sabendo que este é apenas o início de um novo ciclo de sucesso e realização.

RESUMO

Este trabalho realiza uma análise comparativa entre dois modelos de pontes treliçadas metálicas, Pratt e Warren, sob ações de cargas permanentes e móveis. Utilizando a norma ABNT NBR 16694/2020 e o software Ftool, o estudo calcula e compara esforços axiais, cortantes e momentos fletores em ambas as estruturas. A metodologia inclui o método da linha de influência para análise de esforços e considera as características geométricas de cada modelo. A comparação final evidencia diferenças no comportamento estrutural de cada tipo de ponte, especialmente no que diz respeito à localização dos maiores esforços e deslocamentos. Destaca-se que a ponte Pratt apresenta os maiores valores de esforços de compressão, os quais são mais críticos, pois tornam a estrutura suscetível a problemas de instabilidade, como a flambagem.

Palavras-chave: ponte; treliça; Pratt; Warren.

ABSTRACT

This study conducts a comparative analysis of two models of steel truss bridges, Pratt and Warren, under the effects of permanent and moving loads. Utilizing the ABNT NBR 16694/2020 and the Ftool software, the research calculates and compares axial forces, shear forces, and bending moments in both structures. The methodology includes the influence line method for force analysis and considers the geometric characteristics of each model. The final comparison highlights differences in the structural behavior of each type of bridge, particularly regarding the location of the highest forces and displacements. It is noteworthy that the Pratt bridge exhibits the highest compression forces, which are more critical as they make the structure susceptible to instability issues, such as buckling.

Keywords: bridge; truss; Pratt; Warren.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ponte sobre o Rio Severn	17
Figura 2 – Composição longitudinal da ponte	18
Figura 3 – Seção transversal de exemplo para pontes	19
Figura 4 – Elementos da treliça.....	20
Figura 5 – Tipos de treliça	21
Figura 6 – Veículo-tipo	22
Figura 7 – Propriedades mecânicas gerais para aços estruturais.....	23
Figura 8 – Ponte treliçada	24
Figura 9 – Seção S e seu diagrama de corpo livre.....	25
Figura 10 – Ponte no modelo Pratt.....	26
Figura 11 – Ponte no modelo Warren	27
Figura 12 – Modelo esquemático longitudinal da ponte Pratt.....	28
Figura 13 – Modelo esquemático longitudinal da ponte Warren.....	28
Figura 14 – Seção transversal padrão	29
Figura 15 - Modelo da ponte Pratt com as cargas permanentes aplicadas.....	35
Figura 16 - Modelo da ponte Warren com as cargas permanentes aplicadas	36
Figura 17 – Recorte ampliado das cargas permanentes sobre a ponte	36
Figura 18 – Seção transversal padrão com as cargas móveis com o veículo-tipo	37
Figura 19 – Seção transversal padrão com as cargas móveis sem o veículo-tipo	38
Figura 20 – Simplificação da seção transversal	39
Figura 21 – Caso 1.....	39
Figura 22 – Caso 2.....	41
Figura 23 – Caso 3.....	43
Figura 24 – Modelo da ponte Pratt com as cargas móveis aplicadas	46
Figura 25 – Modelo da ponte Warren com as cargas móveis aplicadas	46
Figura 26 – Ponte Pratt com os nós numerados	47
Figura 27 – Ponte Warren com os nós numerados	47
Figura 28 – Diagonal ₆₋₁₇ em destaque.....	48
Figura 29 – Carga unitária no nó 2.....	49
Figura 30 – Carga unitária no nó 2 e reações nos apoios.....	50
Figura 31 – Diagrama de corpo livre da seção sobre a Diagonal ₆₋₁₇	50

Figura 32 – Carga unitária no nó 2, reações nos apoios e gráfico da linha de influência	51
Figura 33 – Gráfico da linha de influência para a Diagonal ⁶⁻¹⁷	52
Figura 34 – Configuração da carga permanente para determinar esforço axial	53
Figura 35 – Configuração da carga móvel para determinar esforço axial	54
Figura 36 – Esforços axiais na Ponte Pratt devido a carga permanente	56
Figura 37 – Esforços cortantes na Ponte Pratt devido a carga permanente	57
Figura 38 – Esforços de momento fletor na Ponte Pratt devido a carga permanente	57
Figura 39 – Deslocamentos horizontais na Ponte Pratt devido a carga permanente	58
Figura 40 – Deslocamentos verticais na Ponte Pratt devido a carga permanente	58
Figura 41 – Esforços axiais na Ponte Pratt devido as cargas móveis	59
Figura 42 – Esforços cortantes na Ponte Pratt devido as cargas móveis	59
Figura 43 – Esforços de momento fletor na Ponte Pratt devido as cargas móveis ...	59
Figura 44 – Esforços axiais na Ponte Warren devido a carga permanente	60
Figura 45 – Esforços cortantes na Ponte Warren devido a carga permanente	60
Figura 46 – Esforços de momento fletor na Ponte Warren devido a carga permanente	61
Figura 47 – Deslocamentos horizontais na Ponte Warren devido a carga permanente	61
Figura 48 – Deslocamentos verticais na Ponte Warren devido a carga permanente	62
Figura 49 – Esforços axiais na Ponte Warren devido as cargas móveis	62
Figura 50 – Esforços cortantes na Ponte Warren devido as cargas móveis	62
Figura 51 – Esforços de momento fletor na Ponte Warren devido as cargas móveis	63
Figura 52 – Maior valor de esforço axial encontrado na ponte Pratt	65
Figura 53 – Maior valor de esforço axial encontrado na ponte Warren	65
Figura 54 – Elemento em compressão na ponte Pratt para as cargas móveis	66
Figura 55 – Elemento em tração na ponte Warren para as cargas móveis	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Coeficiente de ponderação das cargas permanentes – NBR 16694/2020	33
Quadro 2 – Valores obtidos para os perfis das pontes Pratt e Warren sob as cargas permanentes	64
Quadro 3 – Valores obtidos para os perfis das pontes Pratt e Warren sob as cargas móveis.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vigas da ponte Pratt	28
Tabela 2 – Vigas da ponte Warren	29
Tabela 3 – Cargas permanentes para os elementos de aço	32
Tabela 4 – Cargas permanentes majoradas para os elementos de aço	33
Tabela 5 – Cargas permanentes majoradas para os elementos de concreto	34
Tabela 6 – Cargas permanentes majoradas para a viga longarina	35
Tabela 7 – Cargas na ponte	37
Tabela 8 – Cargas móveis finais para as longarinas das pontes Pratt e Warren	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CIA – Coeficiente de impacto adicional

CIV – Coeficiente de impacto vertical

CNF – Coeficiente de números de faixas

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes

OAE – Obra de Arte Especial

SHS – Square Hollow Section

UB – Universal Beam

LISTA DE SÍMBOLOS

- \emptyset – Coeficiente de ponderação
- χ – Redutor de resistência do aço
- A_s – Área da seção transversal
- A_g – área da seção bruta
- F_i – Forças verticais
- f_y – Resistência característica do aço utilizado
- $G_{\text{permanente da treliça}}$ – Carga permanente da treliça
- $G_{\text{permanente da transversina}}$ – Carga permanente da transversina
- $G_{\text{permanente da laje}}$ – Carga permanente da laje
- $G_{\text{permanente do guarda-corpo}}$ – Carga permanente do guarda-corpo
- $G_{\text{permanente do capeamento}}$ – Carga permanente do capeamento
- M_i – Momento fletor
- N – Número de longarinas
- $N_{a,sd}$ – Força solicitante em uma barra de aço
- $N_{a,rd}$ – Força resistente de uma barra de aço
- N_a – Esforços axiais
- $N_{a,cargas\ pontuais}$ – Esforço axial resultante das cargas pontuais
- $N_{a,cargas\ distribuídas}$ – Esforço axial resultante das cargas distribuídas
- $N_{a,t}$ – Esforço axial de tração
- $N_{a,c}$ – Esforço axial de compressão
- $N_{c,rd}$ – Resistência de uma barra de aço submetida a compressão
- P_e – Peso específico do material
- P_{diagonal} – Peso do elemento diagonal da treliça
- P_{montante} – Peso do elemento montante da treliça
- P – Peso de cada roda do veículo-tipo TB-450
- p – Carga circundante do veículo-tipo
- p' – Carga de passeio
- Q – Carga representativa do veículo-tipo majorada
- q – Carga representativa dos outros veículos e do passeio

q' – Carga representativa dos veículos circundantes e de passeio sem a presença do veículo-tipo

R_i – Reação nos apoios

y_i – Valores representativos na linha de influência

X – Comprimento total da longarina

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVOS	16
1.1.1. Objetivo Geral	16
1.1.2. Objetivos Específicos	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS PONTES	17
2.2 COMPONENTES DAS PONTES	18
2.3 PONTES TRELIÇADAS	19
2.4 NORMAS BRASILEIRAS APLICÁVEIS ÀS CARGAS PERMANENTES E MÓVEIS EM PONTES	21
2.5 MÉTODO DA LINHA DE INFLUÊNCIA - MÉTODO DA SEÇÃO.....	23
3. METODOLOGIA	26
3.1. MODELOS ESTRUTURAIS DAS PONTES PRATT E WARREN	26
3.2. CARGAS PERMANENTES NAS PONTES PRATT E WARREN	30
3.2.1 Peso dos elementos de aço	30
3.2.3 Peso dos elementos de concreto	34
3.2.4 Peso da pavimentação	35
3.3. CARGAS MÓVEIS NAS PONTES PRATT E WARREN	36
3.3.1 Cálculo da reação de apoio na longarina	38
<u>3.3.1.1 Caso 1 – Veículo-tipo</u>	<u>39</u>
<u>3.3.1.2 Caso 2 – Cargas distribuídas com a presença do veículo-tipo</u>	<u>40</u>
<u>3.3.1.3 Caso 3 – Cargas distribuídas continuamente</u>	<u>42</u>
3.3.2 Coeficientes de ponderação	44
3.4 CÁLCULO DOS ESFORÇOS.....	47
3.4.1 ESFORÇO DE COMPRESSÃO OU TRAÇÃO NA PONTE PRATT	48
4. APRESENTAÇÃO DE DADOS	56
5. ANÁLISE DE DADOS	64
6. CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS	70

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de deslocamento humano remonta à antiguidade, quando o esgotamento dos recursos em uma determinada região levava à busca por novos territórios. Nesse processo, inúmeros desafios surgiam, muitos dos quais relacionados à topografia das rotas a serem percorridas.

Desde a antiguidade, as pontes surgiram como solução para superar obstáculos naturais, como rios e vales, época em que eram construídas com materiais naturais e rudimentares, como troncos de árvores e pedras (Pinho; Bellei, 2007). Com o avanço das civilizações e o surgimento de desafios mais complexos, como a travessia de grandes distâncias, essas estruturas evoluíram, tornando-se cada vez mais sofisticadas e tecnicamente aprimoradas.

Dentre as diversas tipologias de pontes metálicas, destaca-se a ponte treliçada, cuja configuração estrutural envolve barras metálicas submetidas a esforços de tração e compressão, transmitindo as forças cortantes para os apoios. Apesar do custo de produção de uma treliça ser maior que a laminação de uma viga de aço, a treliça exige menos material (Leet; Uang; Gilbert, 2010).

As principais vantagens das pontes treliçadas em comparação com outros tipos de pontes residem no fato de que os elementos das treliças são submetidos exclusivamente a esforços axiais, além de seu design permitir a construção de estruturas com maiores alturas, reduzindo simultaneamente o peso e a deformação (flecha) da estrutura (Pinho; Bellei, 2007).

Dois modelos predominantes de pontes treliçadas são as de tipo Pratt e Warren, cada uma com um método construtivo distinto. A escolha entre esses modelos depende de uma análise criteriosa do comportamento estrutural frente aos esforços aplicados, em conformidade com as cargas impostas, para identificar a alternativa mais adequada ao projeto em questão. Ainda, as treliças possuem a capacidade de reduzir significativamente o peso do aço nas estruturas, especialmente quando são empregadas estratégias de otimização no design e no projeto das pontes (Seong; Ngian; Zin, 2023).

Neste contexto, propõe-se a análise comparativa dos esforços atuantes em dois modelos de pontes com o mesmo vão, adotando as configurações Pratt e Warren, conforme as diretrizes estabelecidas pela Norma de 2020 NBR 16694 – Projeto de

pontes de aço e mistas de aço e concreto, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Para a simulação dos modelos, será utilizado o software Ftool, versão 4.00.04, onde as cargas serão aplicadas em conformidade com a referida norma. Os resultados gerados, incluindo gráficos de momentos fletores, esforços axiais e esforços cortantes, permitirão uma pré-avaliação sobre as respostas estruturais de cada modelo, assim como indicativos de características favoráveis e adversas para cada caso.

1.1. OBJETIVOS

Para verificar e comparar o comportamento estrutural dos modelos de pontes metálicas treliçadas Pratt e Warren, foram propostos os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

Analisar os esforços solicitantes e deformadas dos dois modelos de pontes metálicas treliçadas, Pratt e Warren, utilizando um software de análise estrutural e as diretrizes da norma ABNT NBR 16694/2020 e comparar os resultados com o intuito de efetuar uma pré-avaliação técnica sobre as respostas estruturais de cada modelo.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Realizar o levantamento sobre a utilização e características das pontes metálicas;
- Aplicar as diretrizes da norma ABNT NBR 16694/2020 nos modelos de pontes de aço treliçadas Pratt e Warren, demonstrando os cálculos analíticos em um elemento da ponte e obtendo os esforços de todos eles com a utilização de software de análise estrutural;
- Analisar os esforços axiais, cortantes e momentos fletores, assim como as deformadas das duas pontes propostas;
- Comparar o comportamento das duas pontes e realizar uma pré-avaliação técnica sobre as respostas estruturais de cada modelo, indicativas de características favoráveis e adversas para cada caso.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

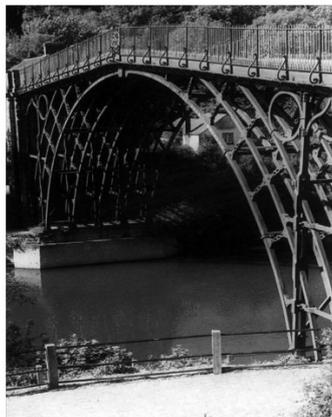
Para compreender o desenvolvimento da análise das pontes dos tipos Pratt e Warren abordadas neste trabalho, é pertinente explorar a evolução histórica das pontes ao longo da trajetória da humanidade, bem como a disseminação das pontes metálicas e as normas brasileiras aplicáveis à determinação dos esforços a que tais estruturas estão sujeitas. Este capítulo discute esses aspectos e introduz os conceitos fundamentais que orientarão a análise técnica das pontes.

2.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS PONTES

Segundo a norma NBR 9452/2023 – Inspeção de pontes, viadutos e passarelas, Obras de Arte Especiais (OAEs) são elementos da construção civil classificados como pontilhões, viadutos, passarelas e pontes. Conforme definição do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2004), pontes são estruturas que, incluindo os apoios, são edificadas sobre depressões ou obstáculos, como corpos d'água, rodovias ou ferrovias, e têm como função sustentar uma via para a passagem de veículos e outras cargas móveis.

As pontes metálicas tiveram sua ascensão por volta do século XVIII, período em que se iniciou a transição das estruturas de madeira para as de ferro. A primeira ponte executada inteiramente em ferro foi a ponte sobre o Rio Severn (Figura 1), construída em 1779 na Inglaterra (Pinho; Bellei, 2007).

Figura 1 – Ponte sobre o Rio Severn



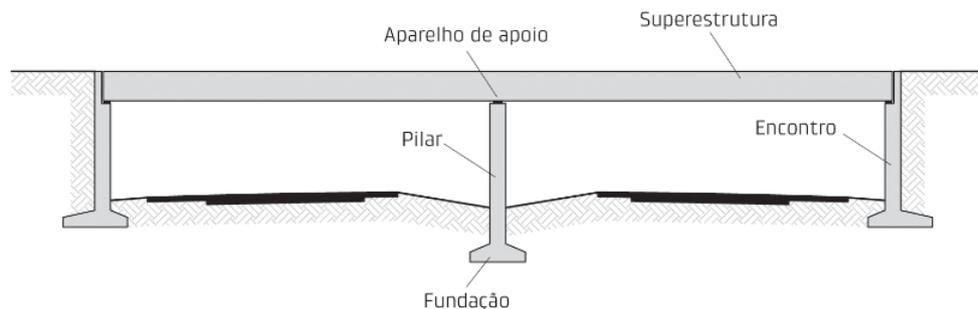
Fonte: Pinho e Bellei (2007, p.13).

O aço utilizado na estrutura das pontes consolidou-se como o material ideal para construções desse tipo após a Revolução Industrial, período em que a produção em massa de metais se tornou viável. Além de permitir a soldagem, o que simplifica significativamente os processos construtivos, a incorporação do carbono ao metal confere características que tornam este material particularmente adequado para esse propósito (Fehér; Baranyai, 2017).

2.2 COMPONENTES DAS PONTES

Freitas (1981) explica que, de forma geral, as pontes podem ser subdivididas em três grupos: superestrutura (estrutura principal e secundária), aparelhos de apoio e infraestrutura (suporte e fundação) (Figura 2).

Figura 2 – Composição longitudinal da ponte



Fonte: El Debs (2021)

A superestrutura é composta por elementos que vencem os obstáculos a serem transpostos, recebendo as cargas impostas à ponte e distribuindo estes esforços aos elementos de apoio como pilares e fundações, respectivamente (Freitas, 1981). A viga longitudinal faz parte da superestrutura e tem o objetivo de receber diretamente as ações aplicadas sobre a laje (Valeriano, 2021).

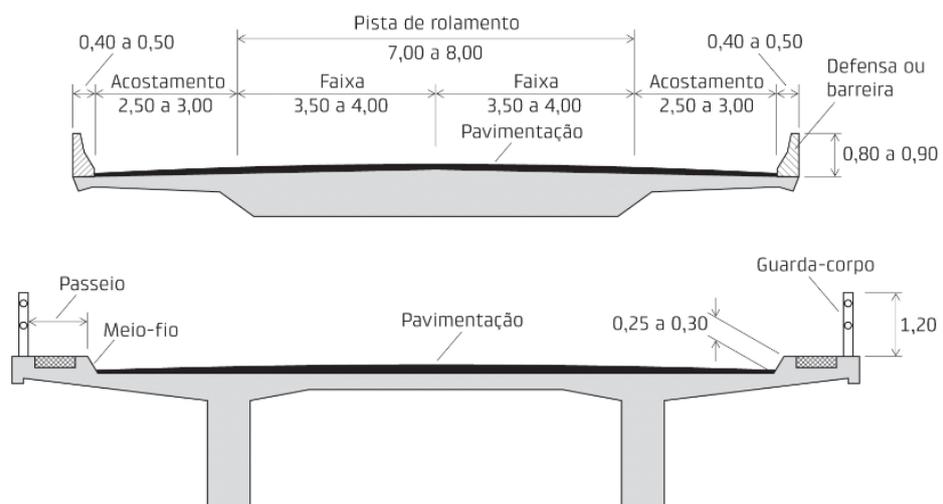
Segundo El Debs (2021), para uma seção transversal genérica de pontes, esta pode ser dividida em:

- Pista de rolamento: área destinada ao tráfego normal de veículos, podendo ser dividida em faixas específicas;
- Acostamento: espaço adicional à pista de rolamento, reservado para o uso de veículos em situações de emergência;

- Barreira ou defesa: componente de segurança instalado lateralmente ao acostamento, com a finalidade de proteger os veículos;
- Passeio: faixa adicional projetada exclusivamente para o deslocamento de pedestres;
- Meio-fio ou guarda-rodas: estrutura projetada para evitar que veículos invadam as áreas destinadas aos pedestres;
- Guarda-corpo: dispositivo de segurança utilizado para proteger os pedestres.

A Figura 3 ilustra um modelo para identificação de cada componente de uma ponte com dimensões comumente utilizadas.

Figura 3 – Seção transversal de exemplo para pontes



Fonte: El Debs (2021).

Nas pontes treliçadas, a viga longarina corresponde ao banzo inferior e trabalha em tração na ponte Pratt e Warren. Segundo Valeriano (2021) sua concepção alivia os esforços do peso próprio e otimiza o aproveitamento de material.

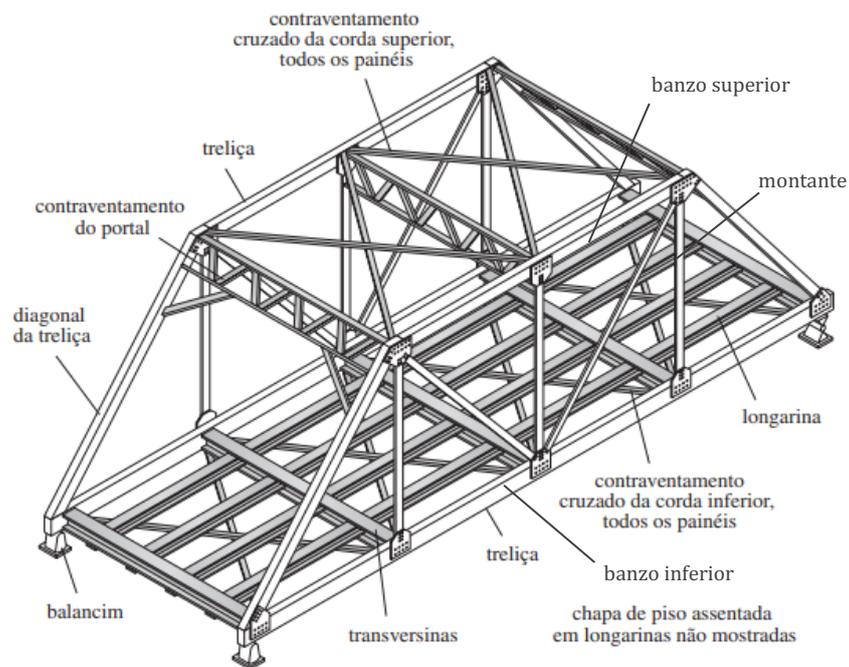
2.3 PONTES TRELIÇADAS

Treliças podem ser definidas como elementos estruturais de barras conectados entre si por articulações sem atrito. Normalmente montadas com design triangular, estas barras trabalham exclusivamente com esforços axiais de compressão

ou tração e tem a aplicação das cargas somente nos nós que as conectam (Leet; Uang; Gilbert, 2010).

Conforme apontam Fehér e Baranyai (2017), o avanço de pontes treliçadas foi impulsionado por diversos fatores, como a Revolução Industrial, o surgimento das primeiras escolas de engenharia, os progressos tecnológicos e o aparecimento de empresas especializadas na construção de pontes. Leet, Uang e Gilbert (2010) ilustram os principais componentes de uma treliça, destacando elementos essenciais como o banzo superior, o banzo inferior, as diagonais e os montantes (Figura 4).

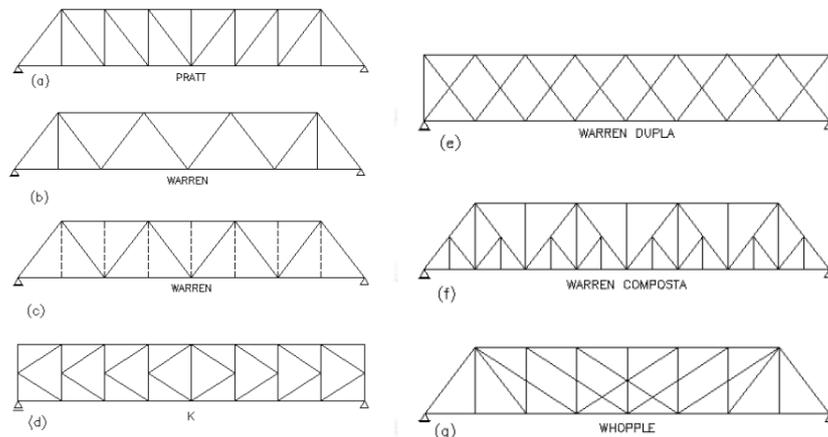
Figura 4 – Elementos da treliça



Fonte: Adaptado de Leet; Uang e Gilbert (2010, p.14)

De acordo com Pinho e Bellei (2007) as configurações de treliça mais usuais são Pratt, Warren (e suas variações), K e Whoople (Figura 5).

Figura 5 – Tipos de treliça



Fonte: Adaptado de Pinho e Bellei (2007, p.23).

Além do design das pontes, no Brasil, o desenvolvimento de projetos exige a aplicação de normas específicas para o cálculo das solicitações a que a estrutura estará submetida. Essas solicitações, denominadas ações ou cargas, são incorporadas ao modelo estrutural e classificadas de acordo com sua natureza, seja permanente ou variável (Valeriano, 2021).

2.4 NORMAS BRASILEIRAS APLICÁVEIS ÀS CARGAS PERMANENTES E MÓVEIS EM PONTES

Para que seja possível obter os esforços axiais, cortantes e de momento nas pontes é necessário definir as respectivas cargas às quais elas estão submetidas, sendo estas separadas em dois grupos: cargas permanentes e cargas variáveis.

A norma NBR 16694/2020 determina que cargas permanentes são ações cuja intensidade permanece constante ao longo da vida útil da construção ou cresce até alcançar um valor limite. Exemplos incluem:

- Peso próprio dos elementos estruturais;
- Peso de pavimentação, revestimentos, barreiras e guarda-corpos;
- Empuxos de terra e de líquidos;
- Forças de protensão;
- Deformações impostas por fluência, retração do concreto ou variações de temperatura.

Ainda de acordo com a norma, as cargas variáveis são ações transitórias que mudam com o tempo, tais como:

- Cargas móveis (veículos e pedestres);
- Ações de construção;
- Ações do vento;
- Variações de temperatura;
- Empuxo de terra provocado por cargas móveis e pressão de água.

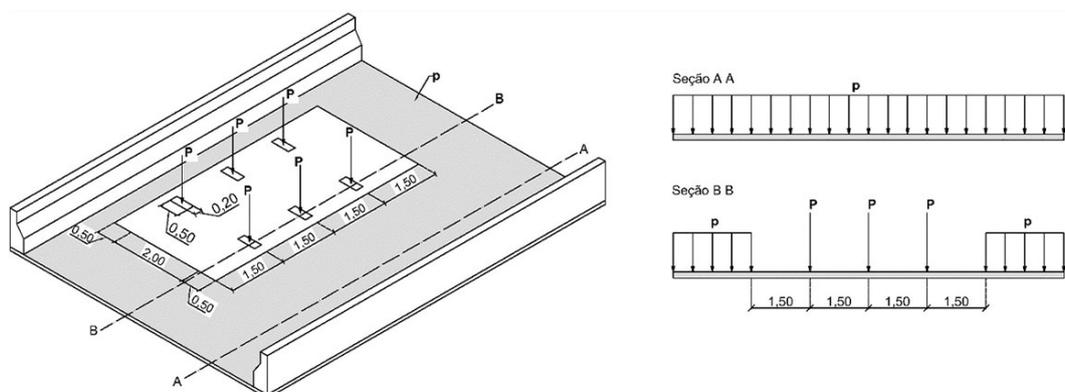
No caso das cargas variáveis, destacam-se o conjunto de forças verticais resultantes do peso das cargas móveis, denominado trem-tipo. É importante salientar que, apesar de existirem os esforços advindos de frenagem e força centrífuga, estes são importantes somente no dimensionamento dos aparelhos de apoio e infraestrutura, como pilares, blocos de coroamento e estacas (Valeriano, 2021).

A ABNT NBR 7188 – Ações devido ao tráfego de veículos rodoviários e de pedestres em pontes, viadutos e passarelas, de 2024, traz as orientações de como devem ser consideradas as cargas móveis nestas estruturas.

De acordo com esta norma, o veículo padrão para a carga móvel rodoviária é chamado de TB-450, com peso de 450 kN composto por seis rodas, três eixos de rodas afastados a 1,5 m e tamanho de 3,0 m de largura e 6,0 m de comprimento. A carga do veículo-tipo é dividida igualmente nas seis rodas, gerando uma carga $P = 75$ kN.

A ABNT NBR 7188/2024 também determina que o veículo-tipo é circundado por uma carga uniformemente distribuída, $p = 5$ kN/m². O veículo-tipo pode ser visualizado na Figura 6.

Figura 6 – Veículo-tipo



Fonte: NBR 7188 (ABNT, 2024, p. 3).

Em relação ao material constituinte das pontes deste trabalho, todos os elementos estruturais das pontes são de aço. A Figura 7 identifica as propriedades mecânicas que devem ser adotadas para os aços estruturais, de acordo com a norma ABNT NBR 8800/2024 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações. O método de cálculo e a considerações destas cargas serão discutidos no Capítulo 3.

Figura 7 – Propriedades mecânicas gerais para aços estruturais

4.6.2.9 Propriedades mecânicas gerais

Para efeito de cálculo, devem ser adotados, para os aços relacionados nesta Norma, os seguintes valores de propriedades mecânicas:

- a) módulo de elasticidade, $E = 200\,000$ MPa;
- b) coeficiente de Poisson, $\nu_a = 0,3$;
- c) módulo de elasticidade transversal, $G = 77\,000$ MPa;
- d) coeficiente de dilatação térmica, $\beta_a = 1,2 \times 10^{-5}$ °C⁻¹;
- e) massa específica, $\rho_a = 7\,850$ kg/m³.

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2024, p. 13).

Além das normas mencionadas, há outras que abordam aspectos relacionados à verificação de segurança e inspeções em OAEs. No entanto, este trabalho concentra-se na análise das solicitações decorrentes das cargas permanentes e variáveis já discutidas, e não abrange tais normas, embora sejam indispensáveis no contexto do dimensionamento de uma ponte em condições reais.

Com as cargas devidamente definidas, diferentes métodos podem ser empregados para o cálculo das respectivas solicitações. Dentre eles, há as ferramentas computacionais, complementadas por métodos teóricos, como o Método da Linha de Influência, que é amplamente utilizado para compreender os princípios subjacentes aos cálculos estruturais.

2.5 MÉTODO DA LINHA DE INFLUÊNCIA - MÉTODO DA SEÇÃO

A determinação das cargas permanentes em uma ponte é obtida de maneira menos complexa, uma vez que resulta de elementos cujas dimensões e pesos são previamente conhecidos. No entanto, para as cargas móveis, torna-se necessário empregar metodologias específicas que permitam estimar a forma como esses esforços são distribuídos entre os diferentes elementos da estrutura.

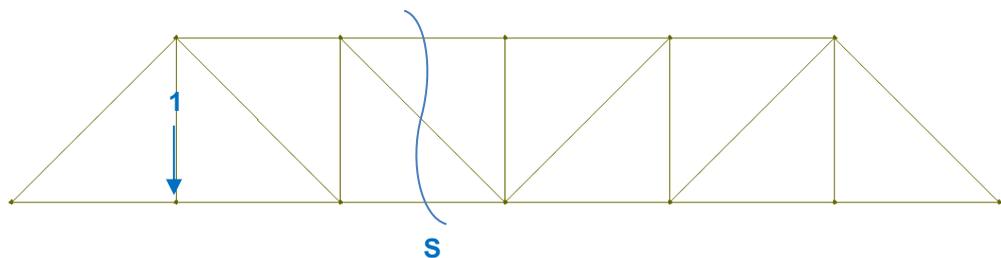
Uma das ferramentas amplamente utilizadas para essa análise é o Método da Linha de Influência. Esse método foi introduzido pelo Prof. E. Winkler em 1867 e é empregado para determinar os máximos esforços que as cargas móveis podem causar na estrutura (Seror, Jesus e Logsdon, 2014).

O Método da Linha de Influência consiste em traçar uma linha que representa o comportamento dos esforços (axiais, cortantes ou de momento fletor) na estrutura. Isso é realizado pela aplicação de uma carga unitária e pela análise de uma seção específica S ao longo da ponte (Seror, Jesus e Logsdon, 2014).

Segundo Chen e Duan (2000), o método das seções é uma abordagem utilizada para analisar treliças e encontrar a linha de influência, permitindo a determinação de esforços internos em elementos específicos da estrutura. Essa técnica baseia-se na criação de diagramas de corpo livre, nos quais a seção transversal S da treliça é isolada. A partir disso, aplicam-se as equações de equilíbrio (somatório de momentos e forças) para calcular os esforços em dois membros desconhecidos da seção cortada.

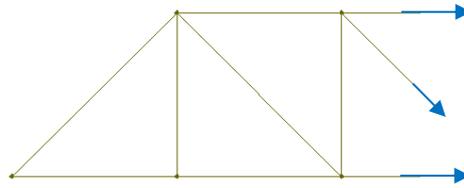
Para exemplificar, considerando a treliça representada na Figura 8 com a carga unitária posicionada no primeiro nó após o apoio, traça-se uma seção S, isolando-a para que seja criado seu diagrama de corpo livre (Figura 9). O equilíbrio de momentos em torno do nó da seção permite determinar o esforço em um elemento específico.

Figura 8 – Ponte treliçada



Fonte: do Autor (2024).

Figura 9 – Seção S e seu diagrama de corpo livre



Fonte: do Autor (2024)

Esse processo é repetido de seção em seção e deslocando a carga unitária através dos nós, facilitando a análise de elementos críticos na estrutura (Chen; Duan, 2000).

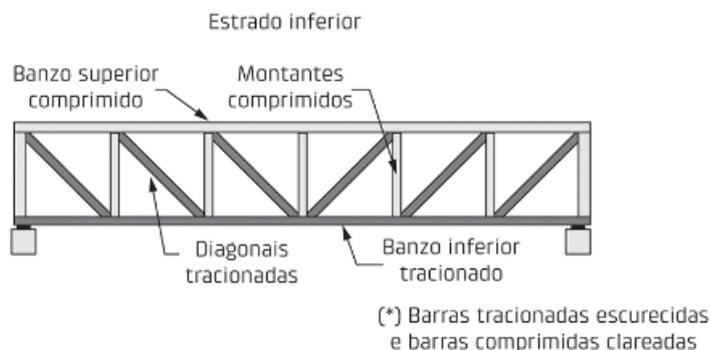
3. METODOLOGIA

Neste capítulo, é apresentada a metodologia utilizada para comparar os esforços solicitantes devido a cargas permanentes e móveis em dois tipos de pontes treliçadas, Pratt e Warren. Para isso, dois modelos estruturais foram escolhidos referentes às pontes dos tipos Pratt e Warren, objetos de comparação, e o processo de obtenção dos esforços que atuam sobre os elementos de ambos os modelos foi realizado utilizando-se tanto do método de linha de influência para demonstração do cálculo analítico em um elemento da ponte quanto o software Ftool (Martha, 2024) para simulação de todos os esforços. Fundamenta-se o estudo nas diretrizes técnicas estabelecidas pela norma ABNT NBR 16694/2020.

3.1. MODELOS ESTRUTURAIS DAS PONTES PRATT E WARREN

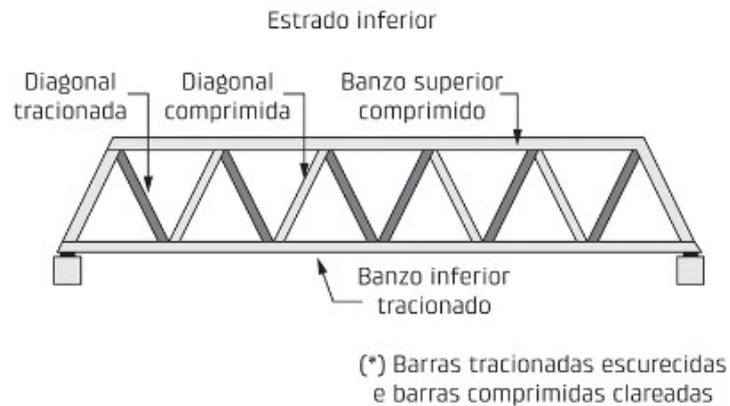
As Figuras 10 e 11 apresentam exemplos das pontes Pratt e Warren, analisadas neste estudo, evidenciando o comportamento dos elementos estruturais em cada modelo. Nessas ilustrações, é possível visualizar a atuação de cada barra da treliça, cujo comportamento será verificado na seção correspondente deste trabalho.

Figura 10 – Ponte no modelo Pratt



Fonte: Valeriano (2021).

Figura 11 – Ponte no modelo Warren



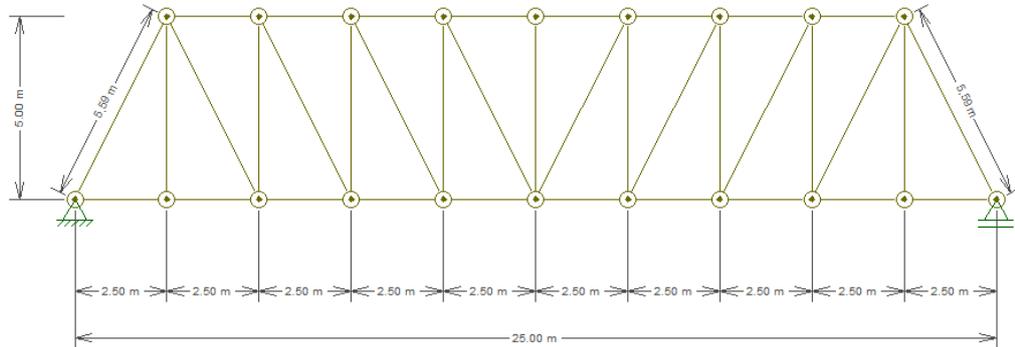
Fonte: Valeriano (2021).

O modelo esquemático das pontes treliçadas utilizado está ilustrado na Figura 12, que apresenta o perfil longitudinal da ponte do tipo Pratt, acompanhada da Tabela 1 contendo as informações das vigas relevantes para o estudo. Da mesma forma, a Figura 13 exhibe o perfil da ponte do tipo Warren, seguida da Tabela 2 com os dados das vigas essenciais para a análise. As duas pontes possuem dimensões de 25 m de comprimento por 9 m de largura.

A escolha das vigas que compõem a parte estrutural da ponte foi feita com base no modelo desenvolvido pelo professor Ubani Obinna (2023) que utilizou vigas classificadas universal beams (UB) e square hollow section (SHS) para seu trabalho. Universal beam é um termo utilizado em alguns países para definir vigas que possuem uma determinada área transversal uniforme ao longo de todo seu comprimento. Já square hollow section é um termo utilizado para uma viga com seção transversal quadrada.

Segundo Valeriano (2021), apesar de estarem rigidamente conectados, os elementos da treliça se comportam como bi rotulados, trabalhando em tração ou compressão. Na concepção dos modelos das pontes este detalhe foi considerado através das rótulas nos nós.

Figura 12 – Modelo esquemático longitudinal da ponte Pratt



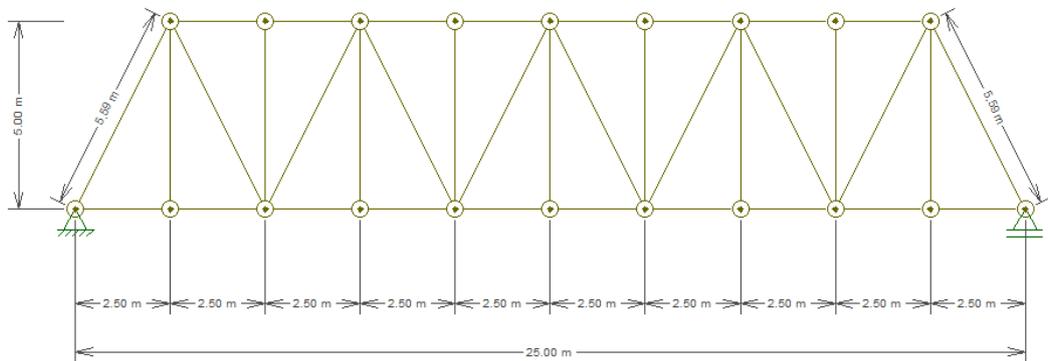
Fonte: do Autor (2024).

Tabela 1 – Vigas do perfil da ponte Pratt

Viga	Código para a viga	Comprimento (m)	Área da seção transversal (m ²)	Quantidade de vigas
Banzo inferior	UB 610x305x179	25	0,0228	1
Banzo superior	UB 533x312x150	20	0,0192	1
Vigas diagonais	SHS 250x250x12.5	5,59	0,0112	10
Vigas montantes	SHS 250x250x12.5	5	0,0112	9
Vigas transversinas	UB 457x191x161	9	0,0206	11

Fonte: do Autor (2024).

Figura 13 – Modelo esquemático longitudinal da ponte Warren



Fonte: do Autor (2024).

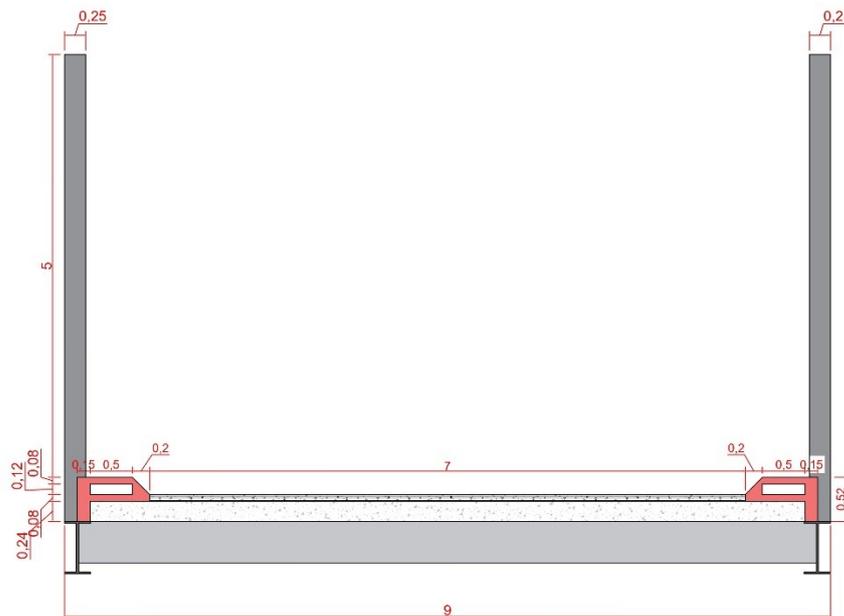
Tabela 2 – Vigas do perfil da ponte Warren

Viga	Código para a viga	Comprimento (m)	Área da seção transversal (m ²)	Quantidade de vigas
Banzo inferior	UB 610x305x179	25,0	0,0228	1
Banzo superior	UB 533x312x150	20,0	0,0192	1
Vigas diagonais	SHS 250x250x12.5	5,59	0,0112	10
Vigas montantes	SHS 250x250x12.5	5,0	0,0112	9
Vigas transversinas	UB 457x191x161	9,0	0,0206	11

Fonte: do Autor (2024).

As duas pontes têm a mesma seção transversal para o tabuleiro, definida de acordo com a Figura 14, considerando laje de concreto com 4 kN/m², capeamento de concreto com espessura de 0,08m e uma área de passeio com seção transversal de 0,194m². Em relação às vigas longarinas, transversinas e às que compõe as respectivas treliças, estas serão abordadas adiante no levantamento de cargas permanentes de cada modelo.

Figura 14 – Seção transversal padrão



Fonte: do Autor (2024).

Considerando a hipótese de que a ponte é simétrica, a análise dos esforços estará relacionada a apenas um lado da ponte e os gráficos de esforços cortantes e de momento fletor serão gerados para somente uma das duas longarinas de aço.

3.2. CARGAS PERMANENTES NAS PONTES PRATT E WARREN

Nas pontes de modelo Pratt e Warren apresentadas neste trabalho, os elementos que correspondem com a definição de carga permanente da ABNT NBR 16694/2020 são: peso próprio da viga no banzo inferior, peso da viga de contraventamento inferior (transversina), peso da viga no banzo superior, peso da laje de concreto, peso do capeamento asfáltico, peso do guarda-corpo e o peso da treliça, que é composta pelas barras diagonais e a montante.

Tanto a seção transversal da ponte como o número de elementos metálicos da estrutura são os mesmos nos dois modelos, portanto o levantamento das cargas permanentes e móveis para a análise das pontes será o mesmo.

3.2.1 Peso dos elementos de aço

Os elementos de aço nas pontes abordadas são elementos estruturais e correspondem ao banzo inferior, banzo superior, diagonais e montantes das treliças. A norma ABNT NBR 16694/2020 indica que para o peso específico de elementos de aço deve ser considerado o valor de 77kN/m^3 .

Para o cálculo de cada parcela da carga permanente que estará atuando na estrutura, a seguinte equação será utilizada a Equação 1:

$$g_{permanente} = P_e \times A_s \quad (1)$$

Onde:

- $g_{permanente}$ – Carga permanente distribuída ao longo da longarina (kN/m);
- P_e – Peso específico do material (kN/m^3);
- A_s – Área da seção transversal (m^2).

Por exemplo, para calcular o peso próprio do banzo inferior (longarina da análise) UB 610x305x179 por metro, o procedimento será dado utilizando a Equação 1 e os dados da Tabela 1:

$$g_{permanente} - UB\ 610x305x179 = 77 \times 0,0228 = 1,756\ kN/m$$

A carga do banzo superior será calculada da mesma forma, obtendo o seguinte valor:

$$g_{permanente} - UB\ 533x312x150 = 77 \times 0,0192 = 1,478\ kN/m$$

Seguindo este método, é possível determinar a carga distribuída de toda estrutura metálica das pontes que está relacionada a uma longarina.

Para simplificação a carga permanente da treliça será considerada uniformemente distribuída sobre toda a extensão da longarina. O levantamento da força peso da treliça sobre a longarina será realizado através do somatório dos pesos totais das vigas diagonais e a montante dividido pelo comprimento total da longarina, como mostra a Equação 2.

$$g_{permanente\ da\ treliça} = \left(\sum P_{diagonal} + \sum P_{montante} \right) \div X \quad (2)$$

Onde:

- $g_{permanente\ da\ treliça}$ – Carga permanente da treliça distribuída ao longo da longarina (kN/m);
- $\sum P_{diagonal}$ – Somatório do peso total das diagonais da treliça (kN);
- $\sum P_{montante}$ – Somatório do peso total dos montantes da treliça (kN);
- X – Comprimento total da longarina (m).

Substituindo os valores da Tabela 1 na Equação 2, tem-se:

$$g_{permanente\ da\ treliça} = (5,59 \times 0,0112 \times 77 \times 10 + 5 \times 0,0112 \times 77 \times 9) \div 25$$

$$G_{\text{permanente da treliça}} = 3,481 \text{ kN/m}$$

As vigas transversais localizadas sob a laje de concreto da ponte estão dispostas com um espaçamento de 2,5 metros ao longo da longarina, tendo seu peso sustentado pelas duas longarinas da estrutura. Dessa forma, o esforço total em uma das longarinas será dividido igualmente entre elas, conforme demonstrado na Equação 3.

$$G_{\text{permanente da transversina}} = P_{\text{transversina}} \div N \quad (3)$$

Onde:

- $G_{\text{permanente da transversina}}$ – Carga permanente da transversina pontual e espaçada a cada 2,5m ao longo da longarina (kN);
- $P_{\text{transversina}}$ – Somatório do peso total das treliças diagonais (kN);
- N – número de longarinas.

Substituindo os valores da Tabela 1 na Equação 3, tem-se:

$$G_{\text{permanente da transversina}} = (9 \times 0,0206 \times 77) \div 2$$

$$G_{\text{permanente da transversina}} = 7,138 \text{ kN}$$

A Tabela 3 contém os valores obtidos para cada elemento.

Tabela 3 – Cargas permanentes para os elementos de aço

Elemento	Carga permanente
Longarina UB 610x305x179	1,756 kN/m
Banzo superior UB 533x312x150	1,478 kN/m
Vigas diagonais e montantes SHS 250x250x12.5	3,481 kN/m
Vigas transversinas UB 457x191x161	7,138 kN

Fonte: do Autor (2024).

As cargas permanentes devem ser majoradas através de um determinado coeficiente, conforme estabelece a ABNT NBR 16694/2020. No Quadro 1 pode ser retirado o valor referente ao peso próprio das estruturas metálicas.

Quadro 1 – Coeficiente de ponderação das cargas permanentes – NBR 16694/2020

Combinações	Ações permanentes γ_g^a			
	Diretas			Indiretas
	Peso próprio de estruturas metálicas	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados	
Normais	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,35 (1,00)	1,20 (0)
Especiais ou de construção	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,25 (1,00)	1,20 (0)
Excepcionais	1,10 (1,00)	1,15 (1,00)	1,15 (1,00)	0 (0)
	Ações variáveis γ_q^a			Demais ações variáveis.
	Efeito da temperatura	Ação do vento		
Normais	1,20	1,40		1,50
Especiais ou de construção	1,00	1,20		1,30
Excepcionais	1,00	1,00		1,00

^a Os valores entre parênteses correspondem aos coeficientes para as ações permanentes favoráveis à segurança; ações variáveis e excepcionais favoráveis à segurança não podem ser incluídas nas combinações.

Fonte: NBR 16694 (ABNT, 2020, p. 15).

Na Tabela 4 estão apresentados os valores finais que serão considerados na obtenção dos esforços cisalhantes e de momento fletor na longarina da ponte Pratt e da ponte Warren pela ação das cargas permanentes das estruturas metálicas.

Tabela 4 – Cargas permanentes majoradas para os elementos de aço

Elemento	Carga permanente
Longarina UB 610x305x179	2,195 kN/m
Banzo superior UB 533x312x150	1,848 kN/m
Vigas diagonais e montantes SHS 250x250x12.5	4,351 kN/m
Vigas transversinas UB 457x191x161	8,922 kN

Fonte: do Autor (2024).

3.2.3 Peso dos elementos de concreto

Os elementos de concreto presentes nos modelos das duas pontes consistem em: laje de concreto (com largura de 9 m) e guarda-corpo (com área de 0,194 m²). De acordo com a ABNT NBR 16694 de 2020, o peso específico para concreto armado é de 25 kN/m³.

Anteriormente já se definiu o peso específico para a laje pré-moldada sendo 4 kN/m³. Conforme demonstrado na Figura 14, a laje está apoiada sobre ambas as longarinas da estrutura. Dado que os esforços serão avaliados apenas em um dos lados da ponte, o peso distribuído ao longo da longarina será considerado pela metade nesta análise.

Utilizando a Equação 1 obtém-se as cargas permanentes distribuídas ao longo da longarina referentes a estes dois elementos.

$$G_{\text{permanente da laje}} = (4 \times 9) \div 2 = 18 \text{ kN/m}$$

$$G_{\text{permanente do guarda-corpo}} = (25 \times 0,194) \div 2 = 2,425 \text{ kN/m}$$

De acordo com a norma ABNT NBR 16694 de 2020, o coeficiente de ponderação indicado para elementos de concreto pré-moldado é de 1,30, conforme apresentado no Quadro 1. Dessa maneira, ao multiplicar os valores previamente obtidos, determinam-se as cargas permanentes desses elementos, como especificado na Tabela 5.

Tabela 5 – Cargas permanentes majoradas para os elementos de concreto

Elemento	Carga permanente distribuída
Laje pré-moldada	23,4 kN/m
Guarda-corpo	3,153 kN/m

Fonte: do Autor (2024).

3.2.4 Peso da pavimentação

Para a pavimentação a norma ABNT NBR 16694 de 2020 determina que seu peso específico deva ser de 24 kN/m^3 . Com este valor e a espessura desta camada, utilizando a Equação 1 obtém-se:

$$g_{\text{permanente do capeamento}} = (24 \times (0,08 \times 9)) \div 2 = 8,64 \text{ kN/m}$$

O coeficiente de ponderação para elementos moldados no local é de 1,35, conforme Quadro 1. Portanto, na Tabela 6 tem-se todos os valores majorados que serão considerados para o carregamento permanente da viga longitudinal desta análise.

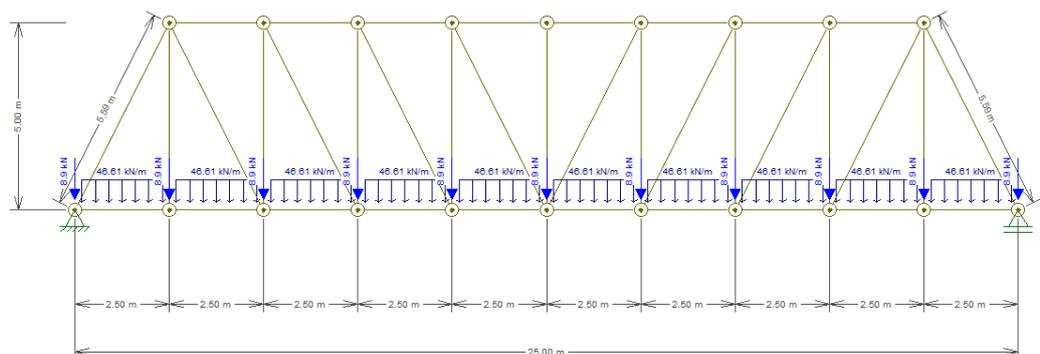
Tabela 6 – Cargas permanentes majoradas para a viga longitudinal

Elemento	Carga permanente
Longarina UB 610x305x179	2,195 kN/m
Banzo superior UB 533x312x150	1,848 kN/m
Vigas diagonais e montantes SHS 250x250x12.5	4,351 kN/m
Vigas transversinas UB 457x191x161	8,922 kN
Laje pré-moldada	23,4 kN/m
Guarda-corpo	3,153 kN/m
Capeamento	11,664 kN/m

Fonte: do Autor (2024).

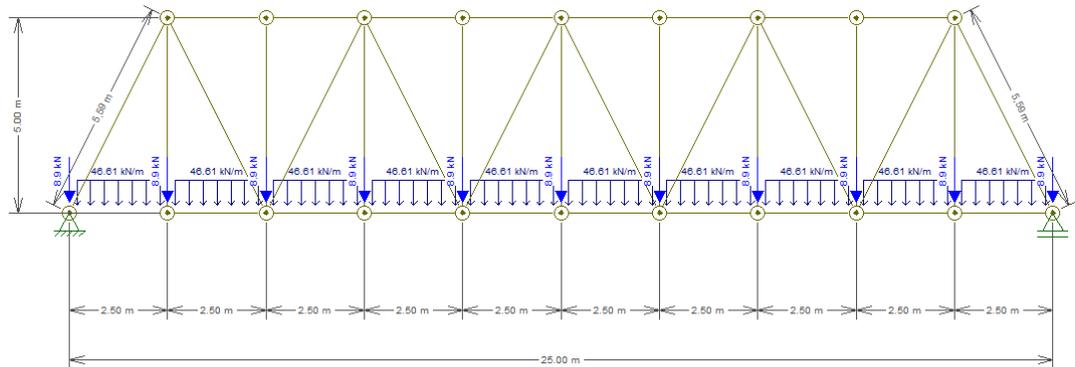
A Figura 15 e a Figura 16, respectivamente, representam as pontes Pratt e Warren com as cargas permanentes aplicadas.

Figura 15 - Modelo da ponte Pratt com as cargas permanentes aplicadas



Fonte: do Autor (2024)

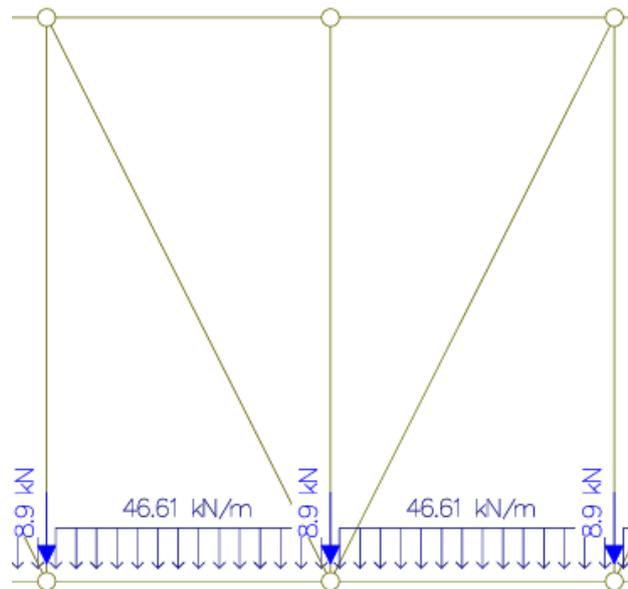
Figura 16 - Modelo da ponte Warren com as cargas permanentes aplicadas



Fonte: do Autor (2024)

Na Figura 17 é realizado um recorte ampliado da ponte Pratt com as cargas permanentes para melhor visualização.

Figura 17 – Recorte ampliado das cargas permanentes sobre a ponte



Fonte: do Autor (2024)

3.3. CARGAS MÓVEIS NAS PONTES PRATT E WARREN

A consideração das cargas móveis representa o peso dos veículos e dos pedestres em movimento nas pontes e é determinada de acordo com a ABNT NBR 7188/2024.

Será utilizado o veículo-tipo padrão TB-450. A Tabela 7 traz os valores de P , referente a carga de cada roda, p , para a carga que o circunda e p' , relacionado a carga de passeio.

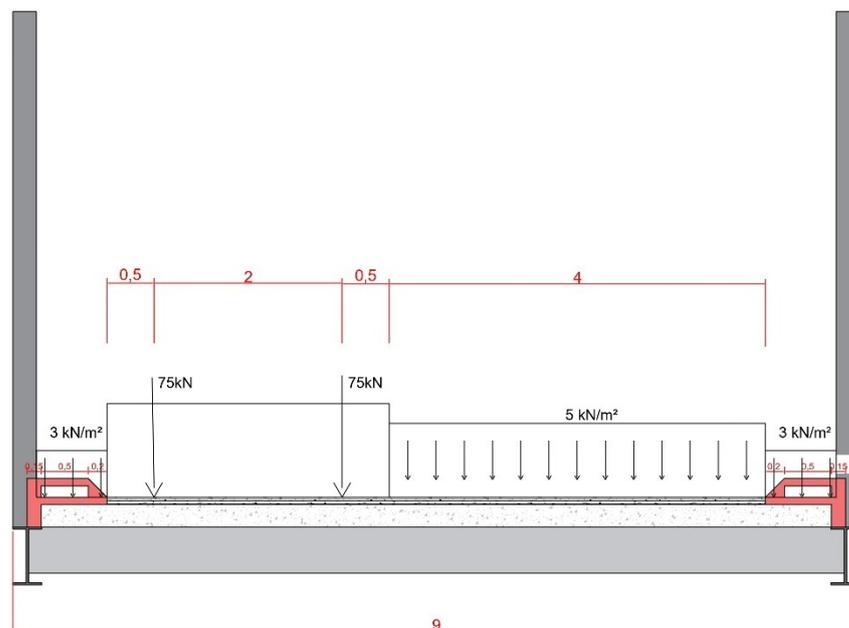
Tabela 7 – Cargas na ponte

Classe do veículo	Peso total do veículo	P	p	p'
TB-450	450 kN	75 kN	5 kN/m ²	3 kN/m ²

Fonte: NBR 7188 (ABNT, 2024, p. 3, 4 e 5).

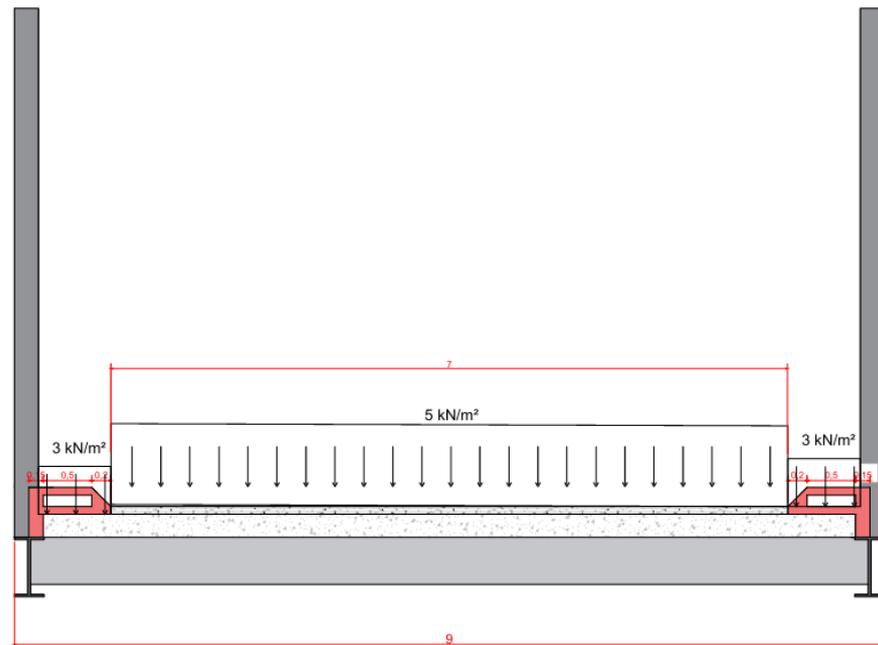
Para o cálculo dos esforços a norma determina que as cargas devem ser posicionadas na posição mais desfavorável para a estrutura. Portanto, para que seja possível obter o valor representativo na longarina analisada, elas foram posicionadas na seção transversal como ilustra a Figura 18, com a presença do veículo-tipo, e na Figura 19 com as cargas que o circundam.

Figura 18 – Seção transversal padrão com as cargas móveis com o veículo-tipo



Fonte: do Autor (2024).

Figura 19 – Seção transversal padrão com as cargas móveis sem o veículo-tipo



Fonte: do Autor (2024).

A partir da linha de influência traçada na seção transversal da ponte serão obtidos os valores das cargas que serão utilizados para as longarinas, definidos em Q , valor apenas do veículo tipo majorado pelos coeficientes da norma, q , referente as cargas distribuídas dos outros veículos e do passeio, e q' , referente as cargas distribuídas na longarina sem a presença do veículo-tipo.

A análise será conduzida na longarina esquerda que, por simetria, apresentará os mesmos resultados caso fosse realizada na longarina direita com as mesmas considerações. Ademais, para determinar os esforços resultantes das cargas móveis na longarina, a avaliação é feita na seção transversal da ponte, comum às duas pontes consideradas neste estudo. Assim, os valores obtidos serão equivalentes tanto para a ponte Pratt quanto para a ponte Warren.

3.3.1 Cálculo da reação de apoio na longarina

Em uma simplificação, para facilitar a visualização dos cálculos, a longarina da esquerda será tratada como um apoio conforme a Figura 20, e serão calculadas as reações para três casos.

Figura 20 – Simplificação da seção transversal



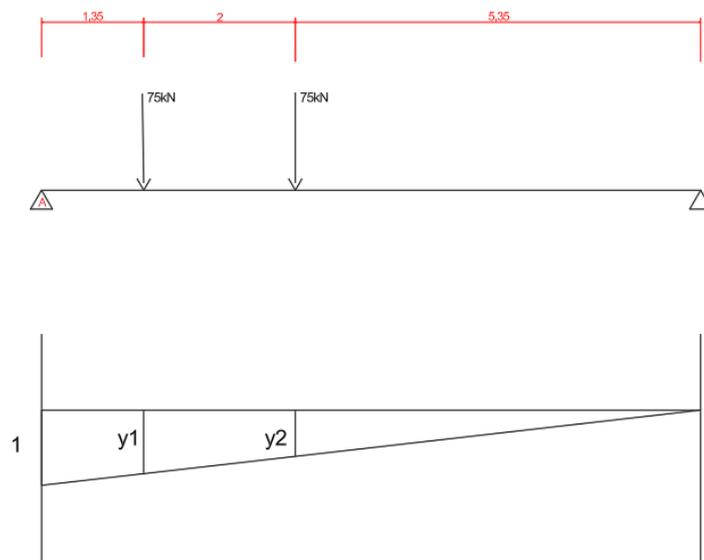
Fonte: do Autor (2024)

No caso 1 será obtida a reação de apoio da longarina somente com as cargas do veículo-tipo aplicadas sobre a ponte. No caso 2, somente as cargas distribuídas estarão sobre a seção transversal da ponte, com o espaço em que deveria estar o veículo-tipo sem carga alguma. Para o caso 3, serão consideradas somente as cargas distribuídas novamente, porém ao longo de toda a seção transversal da ponte.

3.3.1.1 Caso 1 – Veículo-tipo

Para o caso 1 será calculada a reação de apoio no ponto A, conforme mostra a Figura 21, através da linha de influência que foi traçada abaixo.

Figura 21 – Caso 1



Fonte: do Autor (2024)

A partir da semelhança de triângulos, com a Equação 4 é possível obter os valores para y_1 e y_2 e, em seguida, com a Equação 5, obter a reação R_1 para o apoio A.

$$\frac{1}{8,7} = \frac{y_i}{x} \quad (4)$$

$$R_i = \sum \text{Carga pontual} \times y_i \quad (5)$$

Para y_1 :

$$\frac{1}{8,7} = \frac{y_1}{7,35}$$

$$y_1 = 0,85$$

Para y_2 :

$$\frac{1}{8,7} = \frac{y_2}{5,35}$$

$$y_2 = 0,62$$

Portanto, para a reação R_1 , referente as cargas do veículo-tipo no caso 1:

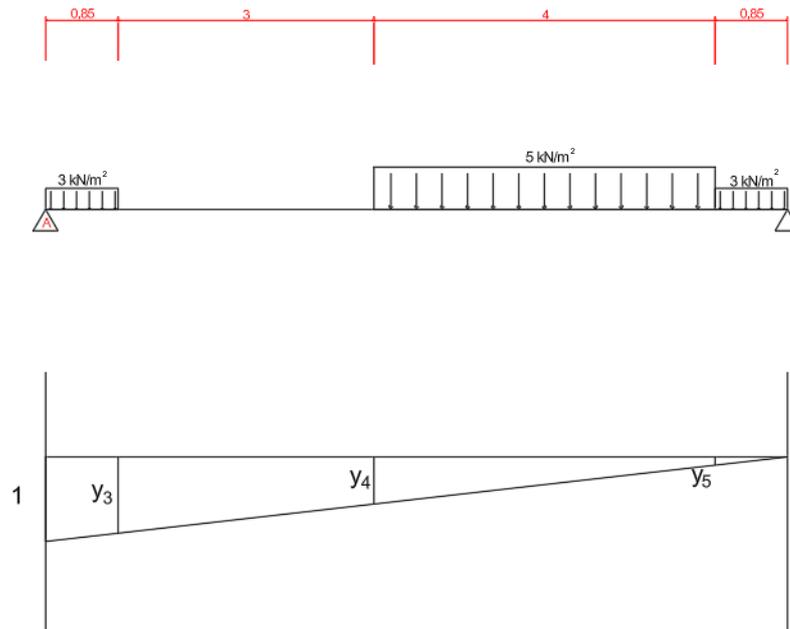
$$R_1 = 75kN \times 0,85 + 75 kN \times 0,62$$

$$R_1 = 110,25 kN$$

3.3.1.2 Caso 2 – Cargas distribuídas com a presença do veículo-tipo

No caso 2 as cargas sobre a ponte serão somente as cargas distribuídas, deixando um espaço vazio para onde estaria o veículo-tipo, conforme mostra a Figura 22.

Figura 22 – Caso 2



Fonte: do Autor (2024)

Do mesmo modo, com a Equação 4, é possível encontrar y_3 , y_4 e y_5 :

$$\frac{1}{8,7} = \frac{y_3}{7,85}$$

$$y_3 = 0,90$$

$$\frac{1}{8,7} = \frac{y_4}{4,85}$$

$$y_4 = 0,56$$

$$\frac{1}{8,7} = \frac{y_5}{0,85}$$

$$y_5 = 0,1$$

Nesse caso, por se tratar de cargas distribuídas, a reação R_2 será calculada por meio da Equação 6, a qual consiste no somatório das cargas distribuídas ponderadas por suas respectivas áreas de atuação na linha de influência. Observa-se que a carga de 3 kN/m^2 , situada mais próxima ao apoio A, e a carga de 5 kN/m^2 serão

multiplicadas pela área trapezoidal correspondente na linha de influência, enquanto a carga de 3 kN/m² localizada no apoio oposto será ponderada pela respectiva área triangular.

$$R_i = \sum \text{Carga distribuída} \times \text{área de aplicação} \quad (6)$$

Sendo assim, tem-se que R₂ será:

$$R_{2,multidão} = 5 \times \left(\frac{(y_4 + y_5) \times 4}{2} \right)$$

$$R_{2,multidão} = 5 \times \left(\frac{(0,56 + 0,1) \times 4}{2} \right) = 6,6 \text{ kN/m}$$

$$R_{2,passeio} = 3 \times \left(\frac{(1 + y_3) \times 0,85}{2} \right) + 3 \times \left(\frac{y_5 \times 0,85}{2} \right)$$

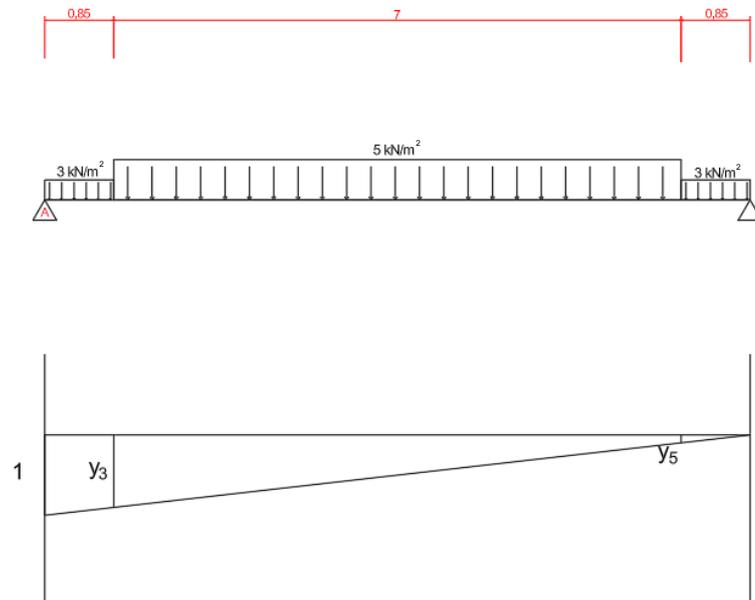
$$R_{2,passeio} = 3 \times \left(\frac{(1 + 0,9) \times 0,85}{2} \right) + 3 \times \left(\frac{0,1 \times 0,85}{2} \right) = 2,55 \text{ kN/m}$$

É importante salientar que os valores da linha de influência estão sendo considerados adimensionais, apesar de serem áreas, e o esforço resultante será dado por uma carga distribuída por metro da estrutura.

3.3.1.3 Caso 3 – Cargas distribuídas continuamente

No caso 3, a seção transversal da ponte e a linha de influência pode ser visualizada na Figura 23.

Figura 23 – Caso 3



Fonte: do Autor (2024)

Os valores da linha de influência que compõem as áreas que serão utilizadas na Equação 6 já foram encontrados. Portanto, resta a aplicação neste caso para encontrar R_3 :

$$R_{3,multidão} = 5 \times \left(\frac{(y_3 + y_5) \times 7}{2} \right)$$

$$R_{3,multidão} = 5 \times \left(\frac{(0,9 + 0,1) \times 7}{2} \right) = 17,50 \text{ kN/m}$$

$$R_{3,passeio} = 3 \times \left(\frac{(1 + y_3) \times 0,85}{2} \right) + 3 \times \left(\frac{y_5 \times 0,85}{2} \right)$$

$$R_{3,passeio} = 3 \times \left(\frac{(1 + 0,9) \times 0,85}{2} \right) + 3 \times \left(\frac{0,1 \times 0,85}{2} \right) = 2,55 \text{ kN/m}$$

3.3.2 Coeficientes de ponderação

Para obter Q , q e q' respectivamente relacionados a R_1 , R_2 e R_3 , é necessário majorar os valores encontrados anteriormente de acordo com os coeficientes presentes na norma ABNT NBR 7188/2024.

Os valores de Q , q e q' são ponderados pelo coeficiente \emptyset que corresponde ao produto do coeficiente de impacto vertical (CIV), do coeficiente de números de faixas (CNF) e do coeficiente de impacto adicional (CIA).

Segundo a ABNT NBR 7188/2024, o CIV amplifica a ação da carga estática com o intuito de simular o efeito dinâmico das cargas e a suspensão dos veículos que estarão sobre a ponte. Como a ponte analisada neste trabalho possui um vão longitudinal de 25 m, a Equação 7 será usada para calcular este coeficiente.

$$CIV = 1 + 1,06 \times \left(\frac{20}{LIV + 50} \right) \quad (7)$$

Sendo LIV o valor do vão da ponte analisada, para uma ponte com 25 m de comprimento contínuo o valor de CIV é:

$$CIV = 1 + 1,06 \times \left(\frac{20}{25 + 50} \right)$$

$$CIV = 1,28$$

O cálculo do CNF é realizado através da Equação 8 e está relacionado ao número de faixas (n) que a carga móvel poderá percorrer, sendo, neste caso, duas faixas. Portanto o CNF será:

$$CNF = 1 - 0,05 \times (n - 2) \quad (8)$$

$$CNF = 1 - 0,05 \times (2 - 2)$$

$$CNF = 1,00$$

O CIA está relacionado a descontinuidade da pista de rolamento. Como as pontes analisadas neste trabalho são de aço, o coeficiente de impacto adicional é igual a 1,15.

Portanto, através da Equação 9 é possível obter o valor para \emptyset .

$$\emptyset = CIV \times CNF \times CIA \quad (9)$$

$$\emptyset = 1,28 \times 1,00 \times 1,15 = 1,472$$

Com os coeficientes de ponderação definidos é possível encontrar os valores de Q, q e q' através das Equações 10, 11 e 12. Para a carga q e q', de acordo com a ABNT NBR 7188/2024, as cargas do passeio não devem ser majoradas.

$$Q = R_1 \times \emptyset \quad (10)$$

$$q = R_{2,multid\tilde{a}o} \times \emptyset + R_{2,passeio} \quad (11)$$

$$q' = R_{3,multid\tilde{a}o} \times \emptyset + R_{3,passeio} \quad (12)$$

Substituindo os valores encontrados anteriormente na Equação 10, obtém-se o valor de Q:

$$Q = 110,25 \times 1,472$$

$$Q = 162,30 \text{ kN}$$

Através da Equação 11, obtém-se o valor para q:

$$q = 6,6 \times 1,472 + 2,55$$

$$q = 12,27 \text{ kN/m}$$

E pela Equação 12, q':

$$q' = 17,50 \times 1,472 + 2,55$$

$$q = 28,31 \text{ kN/m}$$

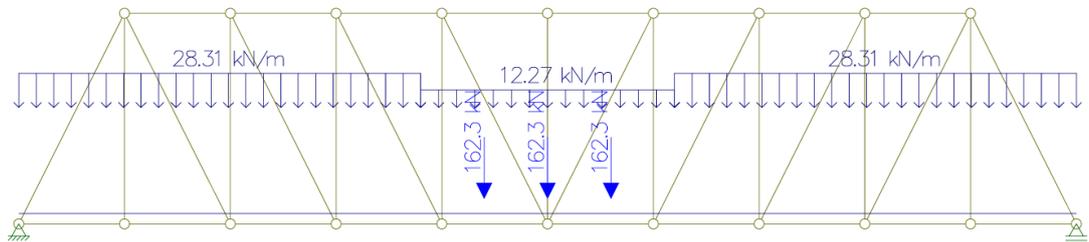
A Tabela 8 apresenta todos os valores necessários para a análise da carga móvel na longarina da ponte Pratt e na longarina da ponte Warren, enquanto a Figura 24 e a Figura 25 ilustram os modelos com a aplicação dessas cargas, respectivamente.

Tabela 8 – Cargas móveis finais para as longarinas das pontes Pratt e Warren

Carga	Valor
Q	162,30 kN
q	12,27 kN/m
q'	28,31 kN/m

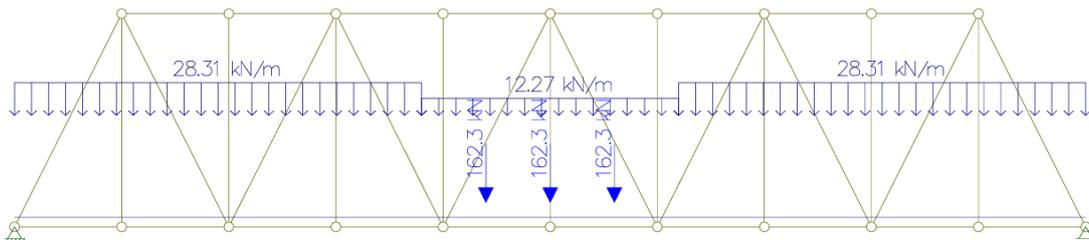
Fonte: do Autor (2024).

Figura 24 – Modelo da ponte Pratt com as cargas móveis aplicadas



Fonte: do Autor (2024)

Figura 25 – Modelo da ponte Warren com as cargas móveis aplicadas

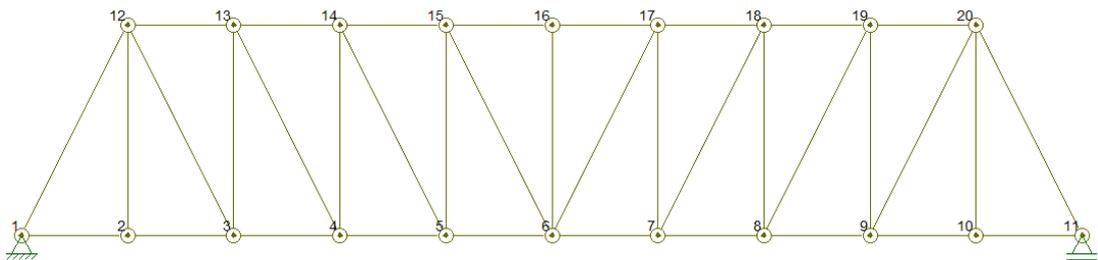


Fonte: do Autor (2024)

3.4 CÁLCULO DOS ESFORÇOS

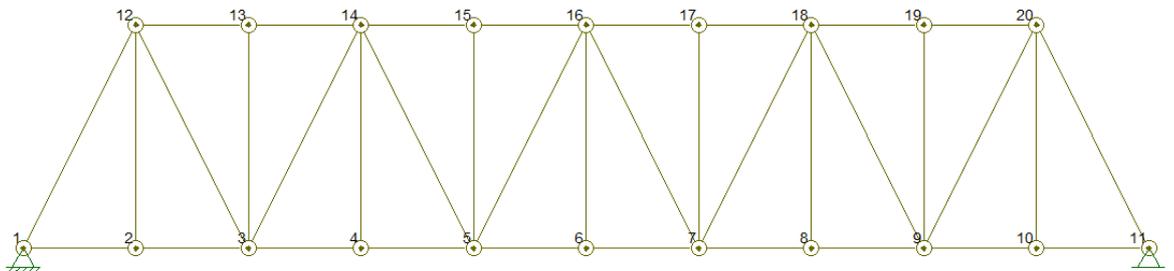
A obtenção das forças cortantes e de momento fletor no banzo inferior, assim como as de compressão ou tração na treliça serão obtidas através do método de linha de influência, com as cargas já apresentadas aplicadas às longarinas. Os nós das pontes serão nomeados com números para identificar o elemento de análise, conforme mostram as Figuras 26 e 27.

Figura 26 – Ponte Pratt com os nós numerados



Fonte: do Autor (2024)

Figura 27 – Ponte Warren com os nós numerados



Fonte: do Autor (2024)

É possível obter os gráficos para os esforços de maneira individual para as cargas permanentes e para as cargas móveis, utilizando o método da linha de influência. Sendo assim será demonstrado de forma analítica o cálculo para um elemento da ponte Pratt, em seguida, através do software Ftool, a obtenção dos esforços para toda a estrutura das duas pontes.

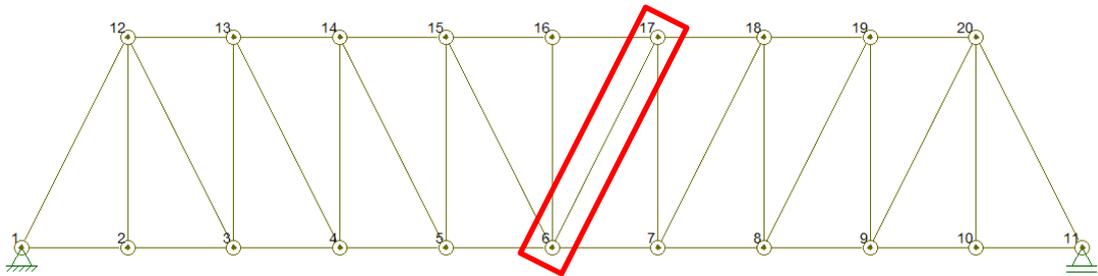
3.4.1 ESFORÇO DE COMPRESSÃO OU TRAÇÃO NA PONTE PRATT

Em uma ponte treliçada, cada elemento estrutural possui uma linha de influência específica. Assim, no caso da ponte Pratt, seria possível obter um total de 37 gráficos distintos, correspondentes aos seus respectivos membros.

Para exemplificar o cálculo, um membro da treliça identificado por Diagonal₆₋₁₇ foi selecionado com o objetivo de obter o gráfico correspondente à linha de influência. A Figura 28 destaca o elemento que será analisado.

É importante destacar que, por convenção, as forças de tração são representadas com sinal positivo, enquanto as forças de compressão são indicadas com sinal negativo. Além disso, as barras que compõem a treliça (diagonais e montantes) estão sujeitas exclusivamente a esforços axiais, sejam eles de tração ou compressão (Leet; Uang; Gilbert, 2010).

Figura 28 – Diagonal₆₋₁₇ em destaque



Fonte: do Autor (2024)

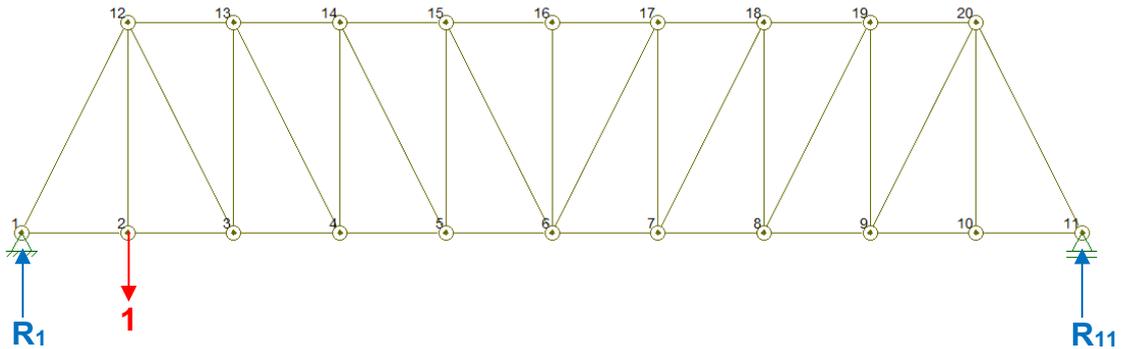
Para obter a linha de influência para o Diagonal₆₋₁₇ uma carga unitária será posicionada ao longo dos nós no banzo inferior, simulando as diferentes posições que a carga real pode ter. A partir desta carga unitária, as reações de apoio serão calculadas nos nós 1 e 11, onde estão localizados os apoios da ponte, através do somatório de forças na direção vertical (F_y) pela Equação 13 e do somatório de momentos (M) pela Equação 14 para então a força F_{6-17} ser calculada e plotada no gráfico da linha de influência.

$$F_y = \sum F_{y,i} \quad (13)$$

$$M_i = \sum F_{y,i} \times d \quad (14)$$

Onde $F_{y,i}$ é a força aplicada em cada nó i e d é a distância do ponto de análise. Para o primeiro caso a carga unitária é posicionada no nó 2 (Figura 29).

Figura 29 – Carga unitária no nó 2



Fonte: do Autor (2024)

De acordo com Leet, Uang e Gilbert (2010), analisando a estrutura isostática por meio do método das seções utilizam-se as equações de equilíbrio para resolver o problema ($\sum F_y = 0$ e $\sum M_i = 0$). Assim, através da Equação 14 é possível calcular a reação no outro apoio (R_{11}).

$$M_1 = -1 \times 2,5 + R_{11} \times 25$$

$$0 = -1 \times 2,5 + R_{11} \times 25$$

$$R_{11} = \frac{1}{10}$$

Através da Equação 13 obtém-se a reação no nó 1, R_1 , neste primeiro caso.

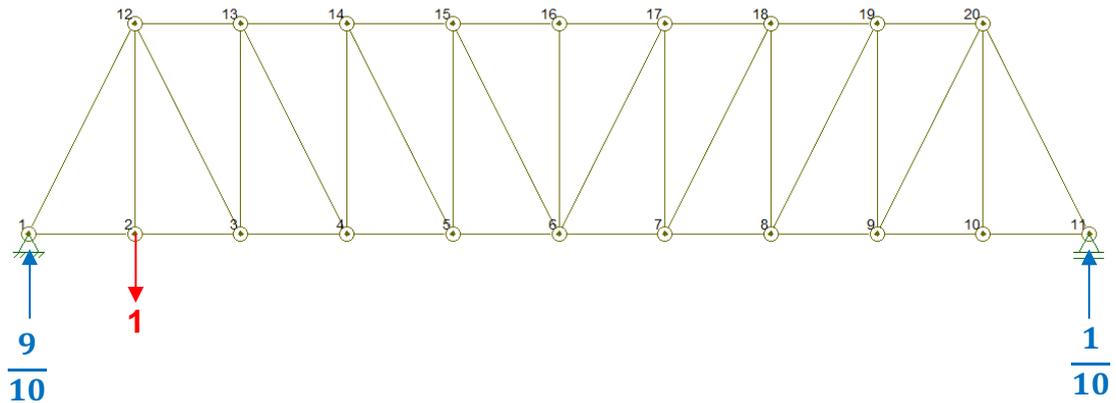
$$F_y = \sum F_{y,i}$$

$$F_y = \frac{1}{10} - 1 + R_1 = 0$$

$$R_1 = \frac{9}{10}$$

Assim, tem-se a seguinte configuração, conforme a Figura 30:

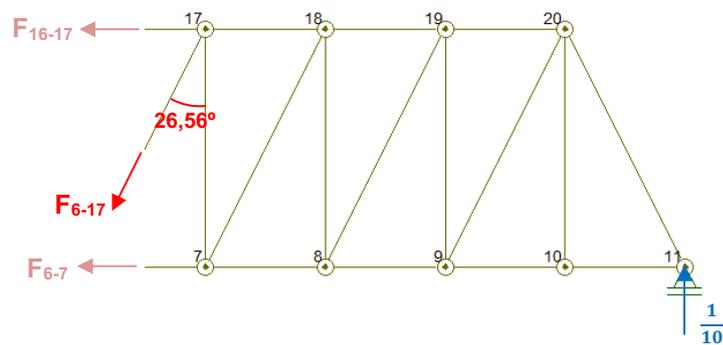
Figura 30 – Carga unitária no nó 2 e reações nos apoios



Fonte: do Autor (2024)

Traçando uma seção sobre o membro Diagonal₆₋₁₇ e retirando o diagrama de corpo livre, a força axial F_{6-17} exercida sobre a diagonal pode ser obtida através da Equação 13. A Figura 31 ilustra o diagrama de corpo livre e os valores necessários para o cálculo.

Figura 31 – Diagrama de corpo livre da seção sobre a Diagonal₆₋₁₇



Fonte: do Autor (2024)

Portanto, F_{6-17} será:

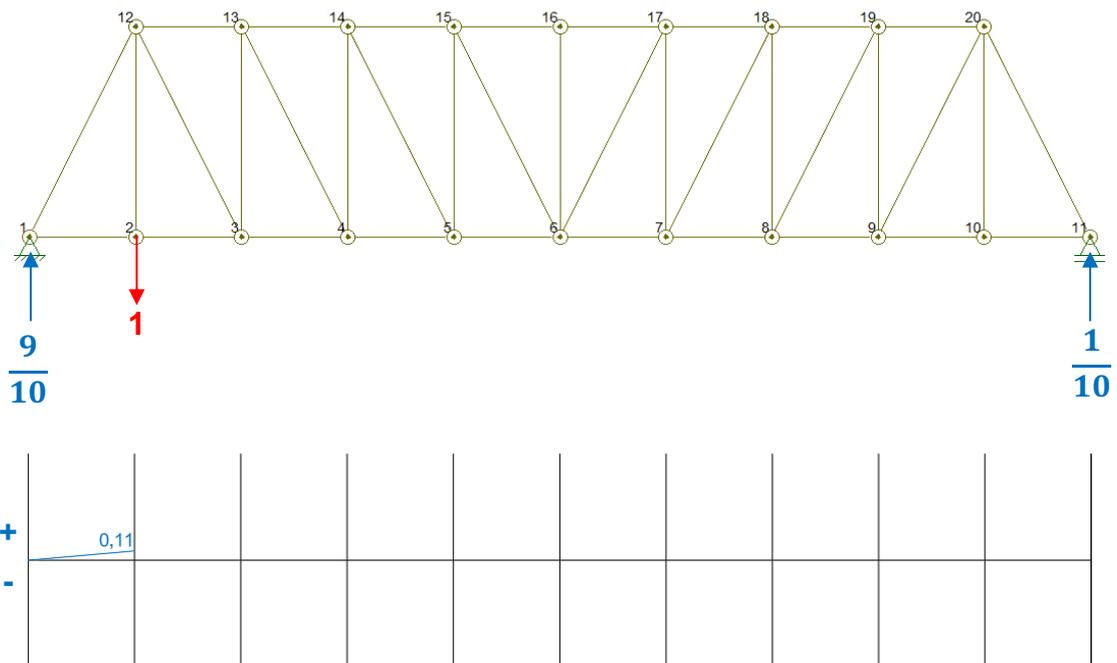
$$F_y = R_{11} - F_{6-17} \times \cos 26,56 = 0$$

$$F_{6-17} = \left(\frac{1}{10}\right) \div \cos 26,56$$

$$F_{6-17} = 0,11$$

O valor encontrado será o primeiro plotado no gráfico da linha de influência e então conectado por uma linha reta ao ponto inicial do gráfico, conforme a Figura 32. Como os nós 1 e 11 estão localizados sobre os apoios o seu valor no gráfico é igual a zero.

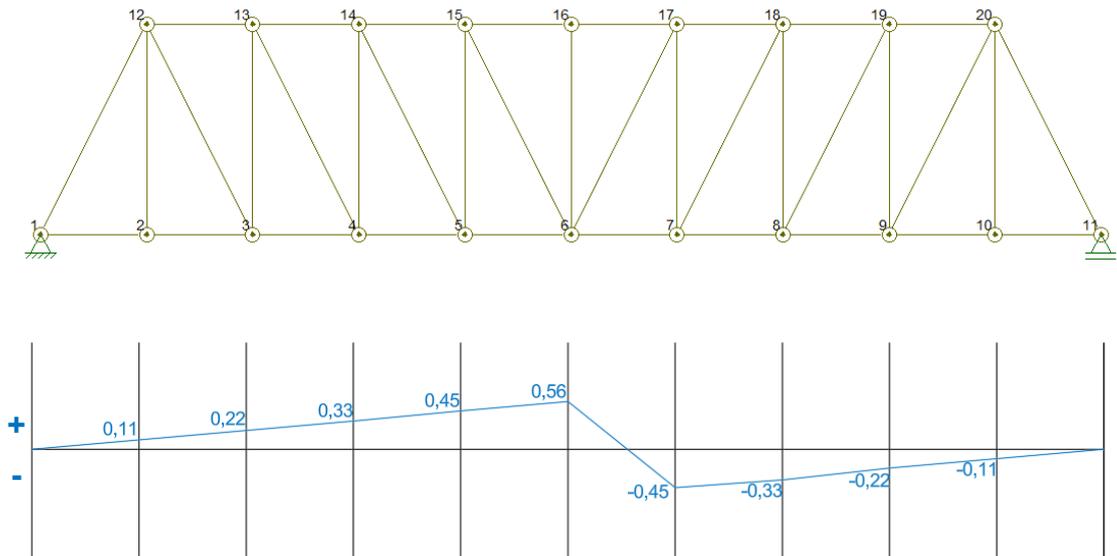
Figura 32 – Carga unitária no nó 2, reações nos apoios e gráfico da linha de influência



Fonte: do Autor (2024)

Os mesmos cálculos serão aplicados sequencialmente aos nós, do nó 3 ao nó 10, deslocando-se a carga unitária em cada nó e recalculando as reações de apoio R_1 e R_{11} . Os valores obtidos serão plotados no gráfico da linha de influência para a Diagonal₆₋₁₇. A Figura 33 apresenta o gráfico final resultante.

Figura 33 – Gráfico da linha de influência para a Diagonal₆₋₁₇



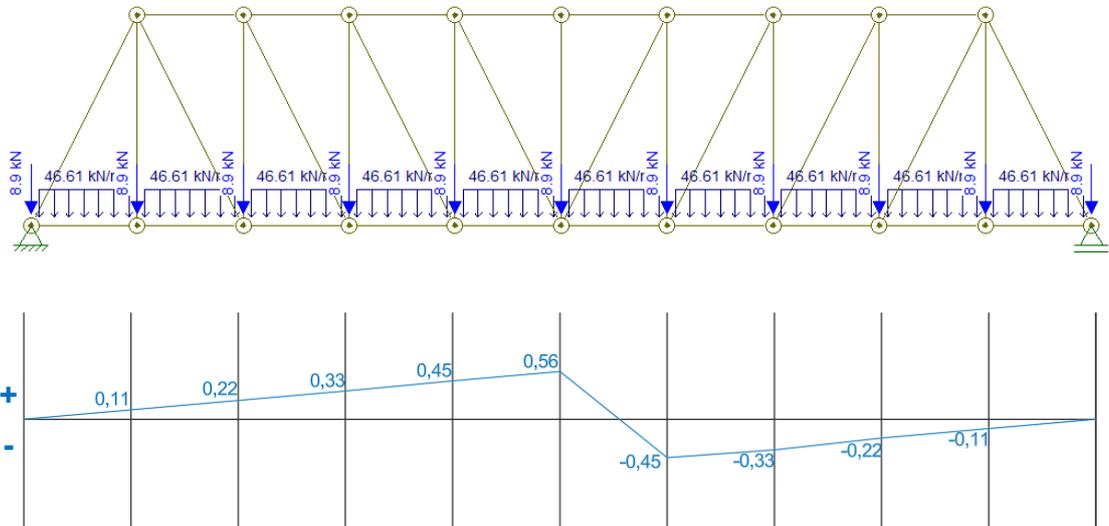
Fonte: do Autor (2024)

Para determinar os esforços axiais (N_a) aos quais a diagonal em questão está sendo solicitada o método será o mesmo utilizado na seção transversal para obter os valores característicos das cargas móveis em 3.3. As cargas distribuídas serão multiplicadas pela respectiva área abaixo formada pelas linhas traçadas no gráfico de linha de influência e as cargas pontuais serão diretamente multiplicadas pelos valores de y_i , também obtidos pelo gráfico pela semelhança de triângulos.

Seguindo a convenção, os valores positivos são considerados esforços axiais de tração ($N_{a,t}$) e os negativos, compressão ($N_{a,c}$). O somatório resultante das cargas permanentes sobre o gráfico da linha de influência resulta na magnitude da força a qual a diagonal estará sendo solicitada.

A Figura 34 mostra a ponte com as cargas permanentes aplicadas e abaixo a linha de influência anteriormente obtida.

Figura 34 – Configuração da carga permanente para determinar esforço axial



Fonte: do Autor (2024)

Portanto, para as cargas pontuais de 8,9kN, através da Equação 5, tem-se:

$$N_{a,cargas\ pontuais} = 8,9 \times (0,11 + 0,22 + 0,33 + 0,45 + 0,56 - 0,45 - 0,33 - 0,22 - 0,11)$$

$$N_{a,cargas\ pontuais} = 4,72\text{ kN}$$

Para as cargas distribuídas, pela Equação 6:

$$N_{a,cargas\ distribuídas} = 46,61 \times (3,9 - 2,5)$$

$$N_{a,cargas\ distribuídas} = 69,91$$

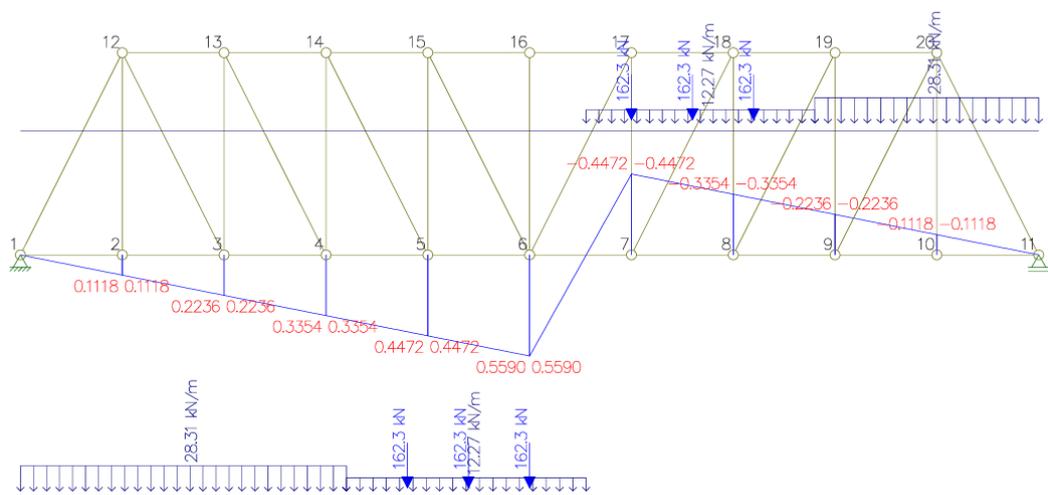
O esforço axial resultante para a Diagonal₆₋₁₇ referente as cargas permanentes é:

$$\text{Esforço axial na Diagonal}_{6-17} = 74,63\text{ kN}$$

Como o resultado é um valor positivo, a barra diagonal sofre uma tração de 74,63 kN quando considerado somente os esforços relacionados as cargas permanentes.

Para as cargas móveis, estas serão posicionadas na situação mais crítica para cada caso, primeiro com o trem-tipo posicionado no vértice da parte positiva (tração) e depois com ele posicionado no vértice da parte negativa (compressão), conforme ilustra a Figura 35, e calculados os respectivos esforços através da Equação 5 e 6.

Figura 35 – Configuração da carga móvel para determinar esforço axial



Fonte: do Autor (2024)

Para o esforço máximo de tração serão consideradas somente as cargas sobre os valores positivos da linha de influência, sendo este o caso mais crítico.

Para as cargas pontuais, pela Equação 5 tem-se:

$$N_{a,t-cargas\ pontuais} = 162,3 \times (0,43 + 0,49 + 0,56)$$

$$N_{a,t-cargas\ pontuais} = 240,20\text{ kN}$$

Para as cargas distribuídas, pela Equação 6:

$$N_{a,t-cargas\ distribuídas} = 12,27 \times 2,4 + 28,31 \times 1,4$$

$$N_{a,t-cargas\ distribuídas} = 69,08\ kN$$

O esforço axial máximo de tração resultante para a Diagonal₆₋₁₇ referente as cargas móveis é:

$$N_{a,t-Diagonal\ 6-17} = 309,28\ kN$$

Para o esforço máximo de compressão serão consideradas somente as cargas sobre os valores negativos da linha de influência da Figura 35.

Para as cargas pontuais, pela Equação 5 tem-se:

$$N_{a,c-cargas\ pontuais} = 162,3 \times (-0,45 - 0,38 - 0,31)$$

$$N_{a,c-cargas\ pontuais} = -185,02\ kN$$

Para as cargas distribuídas, pela Equação 6:

$$N_{a,c-cargas\ distribuídas} = 12,27 \times (-1,8) + 28,31 \times (-0,7)$$

$$N_{a,c-cargas\ distribuídas} = -41,90\ kN$$

O esforço axial máximo de compressão resultante para a Diagonal₆₋₁₇ referente as cargas móveis é:

$$N_{a,c-Diagonal\ 6-17} = -226,92\ kN$$

Como mencionado, os cálculos foram realizados para cada elemento da ponte, conforme demonstrado anteriormente. Utilizando o software Ftool, as pontes foram modeladas, permitindo a obtenção dos esforços de compressão, tração, cortante e momento em cada elemento estrutural caso estivesse sujeito a tais solicitações.

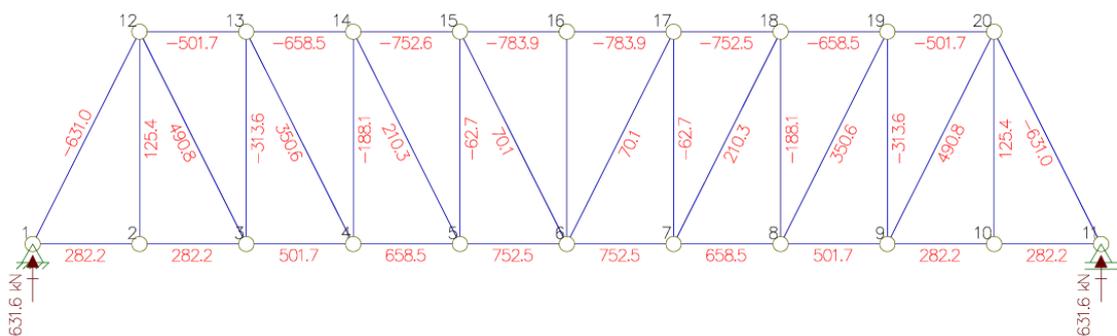
4. APRESENTAÇÃO DE DADOS

Para obter os gráficos de compressão, tração, cortante e momento das duas pontes deste trabalho, o software Ftool foi utilizado. Com os dados das Tabelas 1 e 2 e com os valores das propriedades para aço estrutural definidas pela norma ABNT NBR 8800/2024 e comentadas na seção 2.4 foi possível construir o modelo para as pontes Pratt e Warren.

A descrição do método para inserção dos modelos das pontes não será descrita pois o foco deste trabalho é a análise dos resultados. O manual de utilização do software está disponível em seu próprio site Ftool (Martha, 2024).

A Figura 36 mostra a ponte Pratt com os esforços axiais em cada membro para as cargas permanentes. É possível observar que os esforços calculados pelo software na Diagonal₆₋₁₇ estão próximos aqueles obtidos manualmente pelo método da linha de influência na seção 3.4.1.

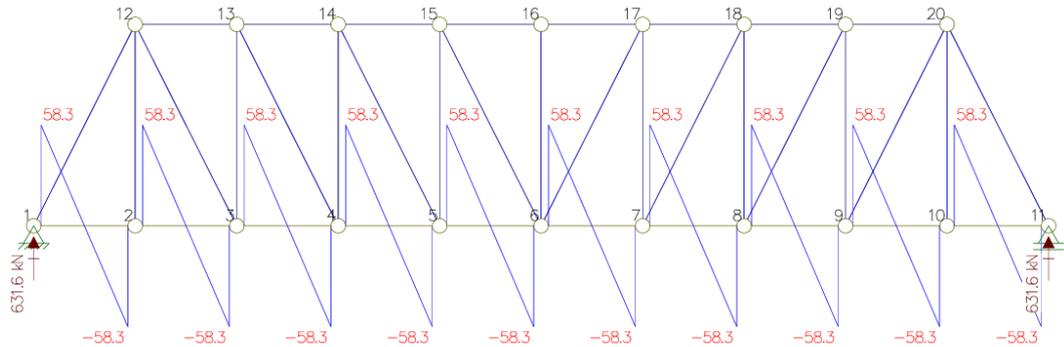
Figura 36 – Esforços axiais na Ponte Pratt devido a carga permanente



Fonte: do Autor (2024).

A Figura 37 mostra os resultados dos esforços cortantes para o perfil da ponte Pratt devido a carga permanente.

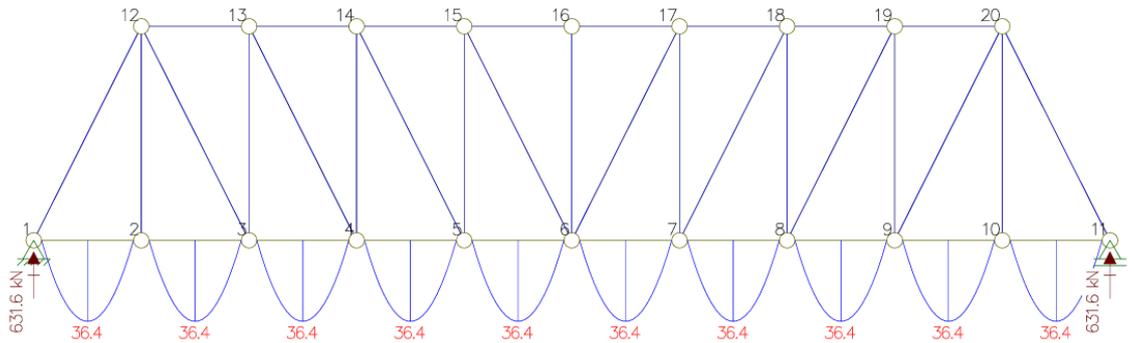
Figura 37 – Esforços cortantes na Ponte Pratt devido a carga permanente



Fonte: do Autor (2024).

A Figura 38 mostra os resultados dos esforços de momento fletor para o perfil da ponte Pratt devido a carga permanente.

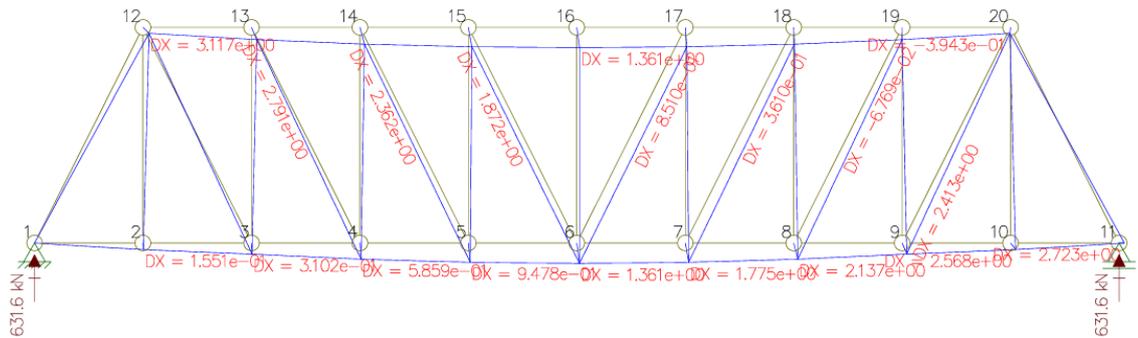
Figura 38 – Esforços de momento fletor na Ponte Pratt devido a carga permanente



Fonte: do Autor (2024).

A Figura 39 mostra os resultados dos deslocamentos horizontais para o perfil da ponte Pratt devido a carga permanente.

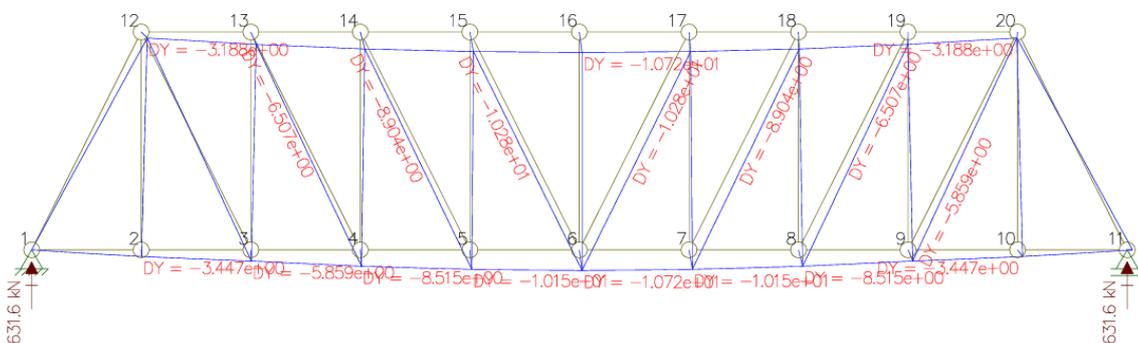
Figura 39 – Deslocamentos horizontais na Ponte Pratt devido a carga permanente



Fonte: do Autor (2024).

A Figura 40 mostra os resultados dos deslocamentos verticais para o perfil da ponte Pratt devido a carga permanente.

Figura 40 – Deslocamentos verticais na Ponte Pratt devido a carga permanente

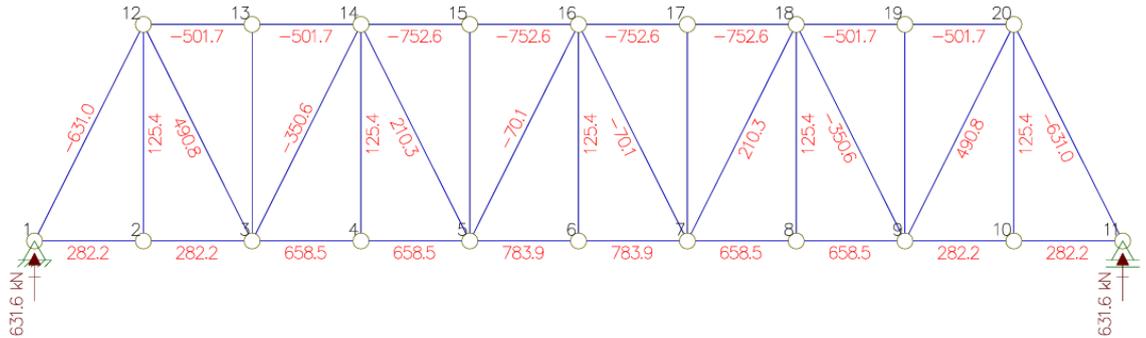


Fonte: do Autor (2024).

A Figura 41 mostra o perfil da ponte Pratt com os esforços axiais em cada elemento, agora para as cargas móveis. É possível observar novamente que os esforços calculados pelo software na Diagonal₆₋₁₇ estão próximos daqueles obtidos manualmente pelo método da linha de influência na seção 3.4.1.

Do mesmo modo, através do Ftool, também foram obtidos os gráficos para o modelo da ponte Warren. A Figura 44 mostra os esforços axiais para o perfil da ponte devido a carga permanente.

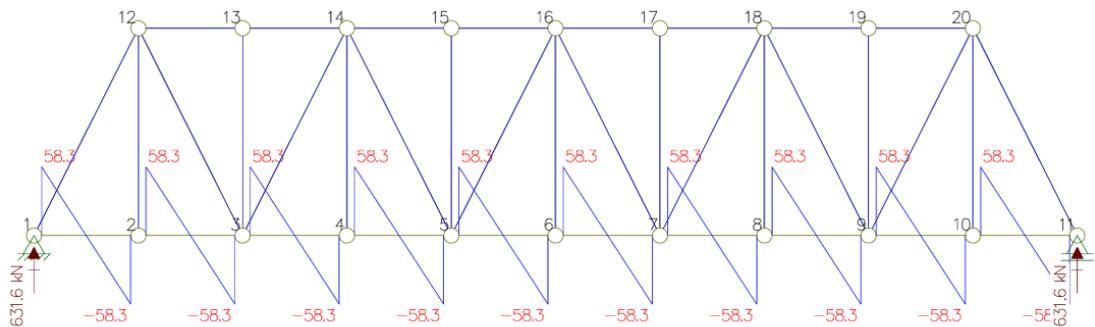
Figura 44 – Esforços axiais na Ponte Warren devido a carga permanente



Fonte: do Autor (2024).

A Figura 45 mostra os resultados dos esforços cortantes para o perfil da ponte Warren devido a carga permanente.

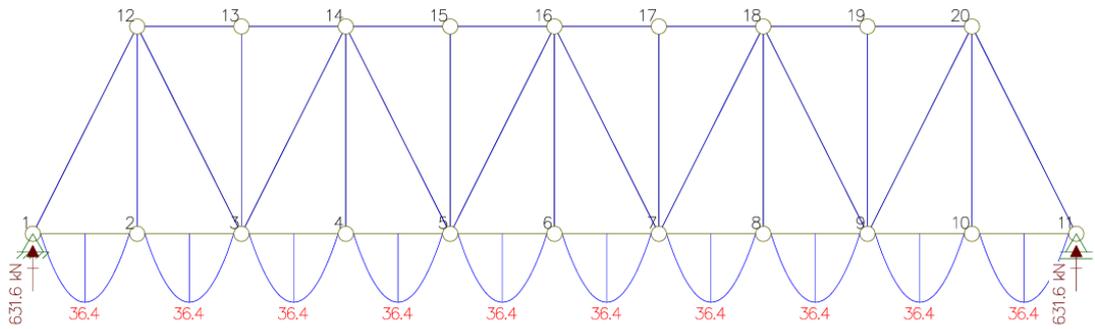
Figura 45 – Esforços cortantes na Ponte Warren devido a carga permanente



Fonte: do Autor (2024).

A Figura 46 mostra os resultados dos esforços de momento fletor para o perfil da ponte Warren devido a carga permanente.

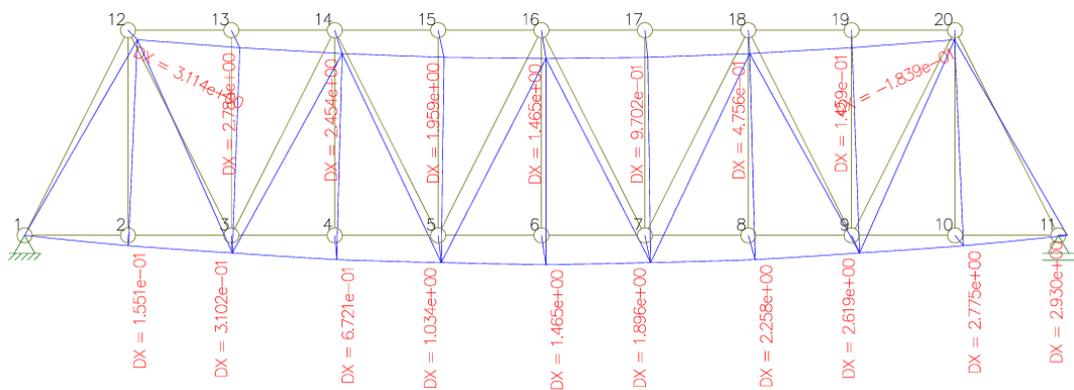
Figura 46 – Esforços de momento fletor na Ponte Warren devido a carga permanente



Fonte: do Autor (2024).

A Figura 47 mostra os resultados dos deslocamentos horizontais para o perfil da ponte Warren devido a carga permanente.

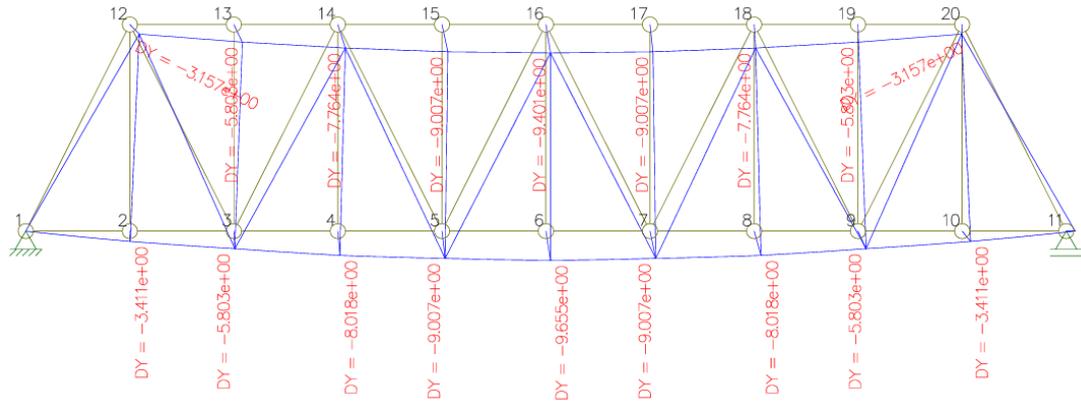
Figura 47 – Deslocamentos horizontais na Ponte Warren devido a carga permanente



Fonte: do Autor (2024).

A Figura 48 mostra os resultados dos deslocamentos verticais para o perfil da ponte Warren devido a carga permanente.

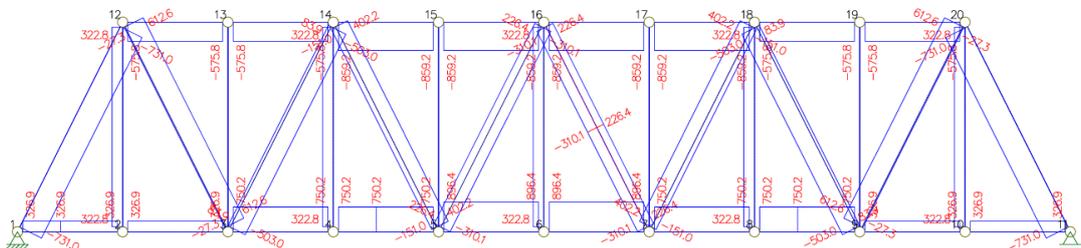
Figura 48 – Deslocamentos verticais na Ponte Warren devido a carga permanente



Fonte: do Autor (2024).

A Figura 49 mostra o perfil da ponte Warren com os esforços axiais em cada membro, agora para as cargas móveis.

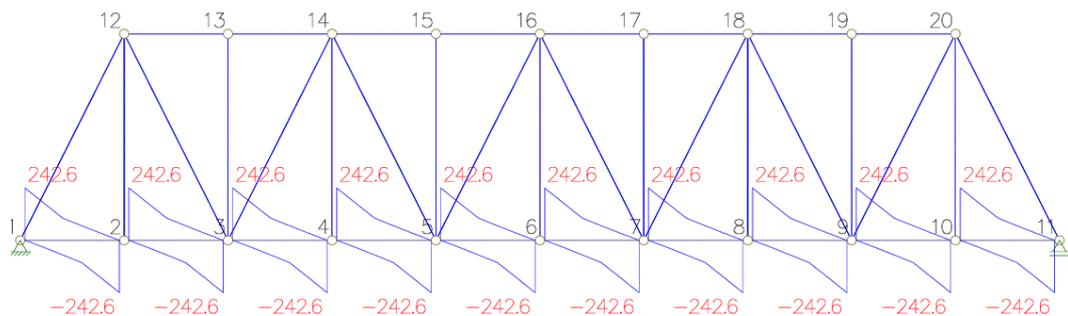
Figura 49 – Esforços axiais na Ponte Warren devido as cargas móveis



Fonte: do Autor (2024).

A Figura 50 mostra os resultados dos esforços cortantes para o perfil da ponte Warren devido as cargas móveis.

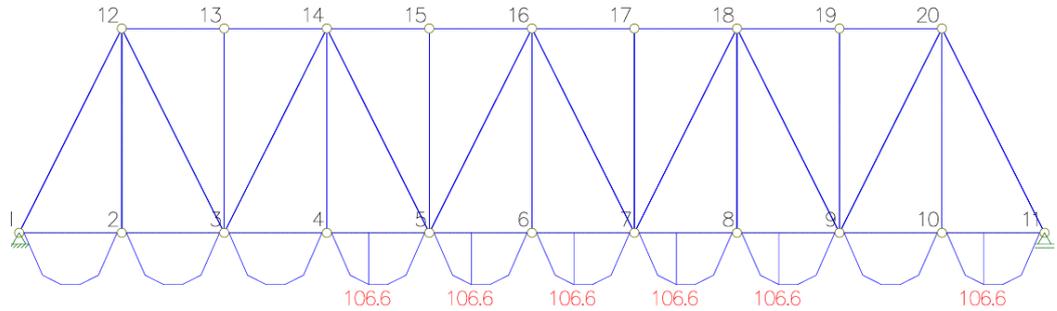
Figura 50 – Esforços cortantes na Ponte Warren devido as cargas móveis



Fonte: do Autor (2024).

A Figura 51 mostra os resultados de momento fletor para o perfil da ponte Warren devido as cargas móveis.

Figura 51 – Esforços de momento fletor na Ponte Warren devido as cargas móveis



Fonte: do Autor (2024).

A partir dos gráficos obtidos do software é possível realizar uma análise comparativa do comportamento das pontes sob os esforços das cargas permanentes e móveis.

5. ANÁLISE DE DADOS

Para análise dos dados e comparação o Quadro 2 reúne os valores máximos e mínimos obtidos dos gráficos com as cargas permanentes aplicadas para cada caso apresentado anteriormente.

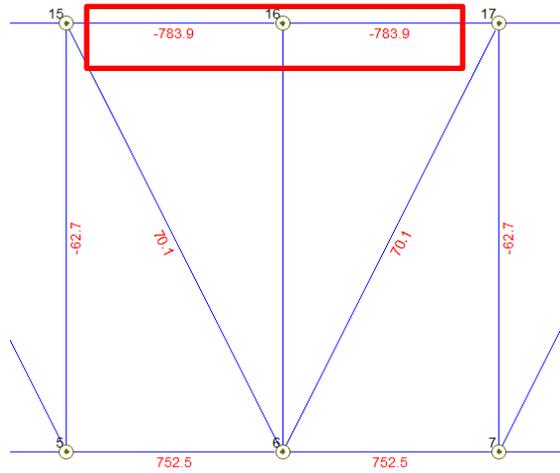
Quadro 2 – Valores obtidos para os perfis das pontes Pratt e Warren sob as cargas permanentes

Esforço	Carga	Ponte	Máximo	Tipo	Mínimo	Tipo
Axial	Permanente	Pratt	783,9 kN	Compressão	70,1 kN	Tração
Axial		Warren	783,9 kN	Tração	70,1 kN	Compressão
Cortante		Pratt	58,3 kN	-	58,3 kN	-
Cortante		Warren	58,3 kN	-	58,3 kN	-
Momento fletor		Pratt	36,4 kNm	-	36,4 kNm	-
Momento fletor		Warren	36,4 kNm	-	36,4 kNm	-
Deslocamento vertical		Pratt	10,72 mm	-	3,188 mm	-
Deslocamento vertical		Warren	9,655 mm	-	3,157 mm	-
Deslocamento horizontal		Pratt	3,117 mm	-	0,068 mm	-
Deslocamento horizontal		Warren	3,114 mm	-	0,146 mm	-

Fonte: do Autor (2024).

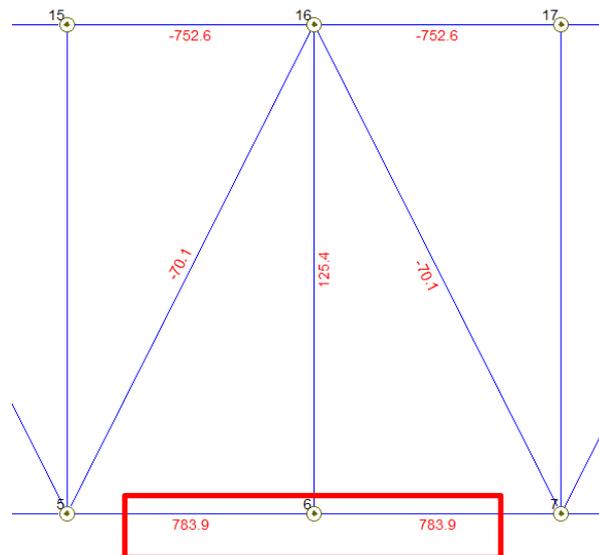
Para os esforços cortantes e de momento não há diferença se analisados apenas os valores, estando eles sobre o banzo inferior de ambas as pontes. Porém para os esforços axiais, apesar de mesma magnitude, ao analisar em quais elementos eles estão aplicados nota-se que os maiores esforços axiais estão presentes no banzo superior na ponte Pratt (Figura 52) e no banzo inferior na ponte Warren (Figura 53).

Figura 52 – Maior valor de esforço axial encontrado na ponte Pratt



Fonte: do Autor (2024).

Figura 53 – Maior valor de esforço axial encontrado na ponte Warren



Fonte: do Autor (2024).

Esse aspecto merece atenção, visto que ambas as pontes foram construídas com os mesmos elementos estruturais. Tanto os banzos inferiores quanto os superiores das duas pontes utilizam vigas de aço com áreas de seção transversal idênticas, respectivamente em cada estrutura.

Segundo Fakury, Silva e Caldas (2016), a principal característica geométrica em barras tracionadas está na área da seção transversal. A viga do banzo inferior possui uma área de seção transversal maior que a do banzo superior, tendo os esforços distribuídos ao longo de uma superfície maior.

Outra diferença entre as pontes está no deslocamento vertical para a presença somente das cargas permanentes. A ponte Pratt teve um deslocamento de mais de 1mm em relação a ponte Warren.

A análise dos esforços também é necessária para as cargas móveis. O Quadro 3 traz os valores máximos e mínimos obtidos dos gráficos com estas cargas aplicadas.

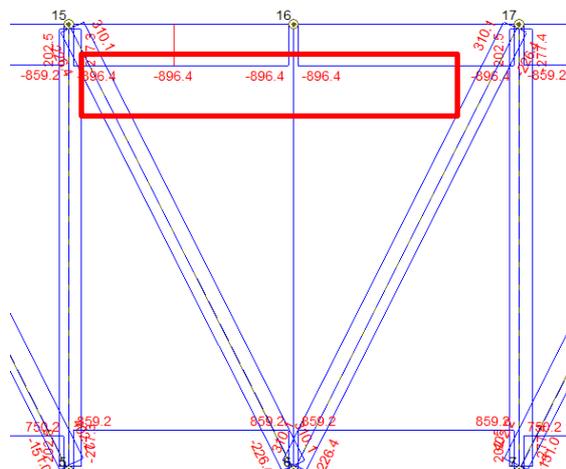
Quadro 3 – Valores obtidos para os perfis das pontes Pratt e Warren sob as cargas móveis

Esforço	Carga	Ponte	Máximo	Tipo	Mínimo	Tipo
Axial	Móvel	Pratt	896,4 kN	Compressão	27,3 kN	Compressão
Axial		Warren	896,4 kN	Tração	27,3 kN	Compressão
Cortante		Pratt	242,6 kN	-	242,6 kN	-
Cortante		Warren	242,6 kN	-	242,6 kN	-
Momento fletor		Pratt	106,6 kNm	-	106,6 kNm	-
Momento fletor		Warren	106,6 kNm	-	106,6 kNm	-

Fonte: do Autor (2024).

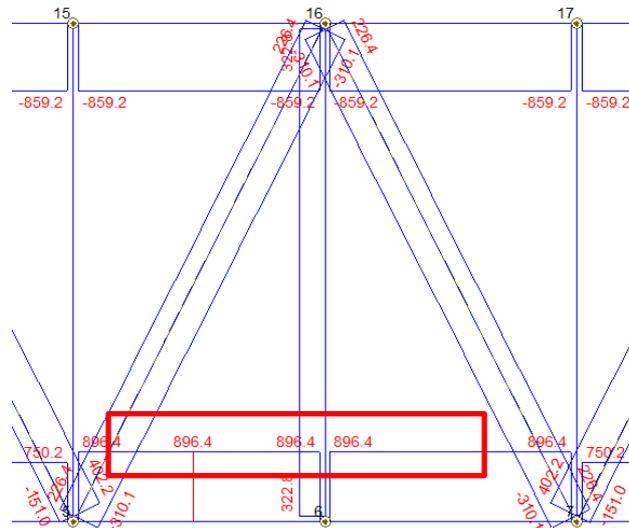
Novamente os valores dos esforços, em magnitude, são os mesmos nas duas pontes com diferença apenas no elemento em que estão aplicados. A ponte Pratt segue tendo o maior esforço axial no banzo superior (Figura 54), enquanto na ponte Warren este se localiza sobre o banzo inferior (Figura 55).

Figura 54 – Elemento em compressão na ponte Pratt para as cargas móveis



Fonte: do Autor (2024).

Figura 55 – Elemento em tração na ponte Warren para as cargas móveis



Fonte: do Autor (2024).

Pela mesma análise, tendo o banzo inferior uma maior área de seção transversal, este possui um melhor dimensionamento para absorver os esforços de tração (Fakury; Silva; Caldas, 2016).

Neste contexto, observa-se que os maiores esforços na ponte Pratt são de compressão, localizados no banzo superior da estrutura e embora o aço apresente bom desempenho tanto sob tração quanto sob compressão, o estado de compressão é mais crítico, pois torna os elementos estruturais suscetíveis a problemas de instabilidade, como a flambagem (Fakury; Silva; Caldas, 2016).

Para que barras submetidas a esforços de tração e compressão sejam dimensionadas é necessário que a relação entre a força solicitante $N_{a,sd}$ e a força resistente $N_{a,rd}$ satisfaça a Equação 15 (Fakury; Silva; Caldas, 2016).

$$N_{a,sd} \leq N_{a,rd} \quad (15)$$

No caso de compressão, a força axial resistente é dada pela Equação 16 (Fakury; Silva; Caldas, 2016). Nota-se que o cálculo da resistência de uma barra submetida a compressão ($N_{c,rd}$) é proporcional a área de sua seção bruta A_g .

$$N_{c,rd} = \chi A_g f_y \quad (16)$$

Onde χ é um redutor da resistência, com base nas tensões residuais e curvatura inicial da barra e f_y é a resistência característica do aço utilizado.

Portanto, como apresentado anteriormente, a ponte Pratt teve os maiores esforços de compressão, estes localizados sobre o banzo superior, com uma seção transversal menor comparado a ponte Warren.

6. CONCLUSÃO

Com base nas análises realizadas, nota-se que, enquanto a ponte Pratt concentra os maiores esforços (sendo estes de compressão) no banzo superior, a ponte Warren apresenta esses esforços (de tração) predominantemente no banzo inferior. Esse comportamento reflete a geometria e a disposição dos elementos estruturais, merecendo atenção no caso da ponte Pratt, onde a compressão está associada a uma maior suscetibilidade à flambagem.

Adicionalmente, os deslocamentos verticais foram analisados, evidenciando que a ponte Pratt apresentou maior deformação em relação à ponte Warren sob cargas permanentes. Apesar de ambas as pontes utilizarem os mesmos materiais, a área de seção transversal do banzo inferior confere à ponte Warren uma vantagem em termos de desempenho estrutural, particularmente na absorção de esforços de tração.

A análise dos esforços, tanto sob cargas permanentes quanto móveis, confirma que o design e a otimização geométrica desempenham papéis fundamentais na eficiência das estruturas treliçadas, tornando-as uma solução robusta e versátil na construção de pontes modernas.

Por fim, recomenda-se para trabalhos futuros a realização de um dimensionamento mais aprofundado das pontes treliçadas dos tipos Pratt e Warren, com foco na análise da resistência e do comportamento dessas estruturas sob os efeitos da compressão. Além disso, sugere-se uma comparação detalhada com outros modelos usuais de treliças, visando ampliar o entendimento sobre suas características e desempenho estrutural.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7188**. Ações devido ao tráfego de veículos rodoviários e de pedestres em pontes, viadutos e passarelas. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9452**. Inspeção de pontes, viadutos e passarelas - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16694**. Projeto de pontes de aço e mistas de aço e concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- CHEN, Wai-Fah; DUAN, Lian (org.). **Bridge Engineering Handbook**. Boca Raton: CRC, 2000.
- DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA/IPR. **DNIT 010/2004**. Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido - Procedimento. Rio de Janeiro: DNIT, 2004.
- EL DEBS, Mounir Khalil. **Pontes de concreto**: com ênfase na aplicação de elementos pré-moldados. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.
- FAKURY, Ricardo Hallal; SILVA, Ana Lydia Reis de Castro e; CALDAS, Rodrigo Barreto. **Dimensionamento básico de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.
- FEHÉR, Eszter; BARANYAI, Tamás. A Retrospective Analysis of the Evolution of Pratt Trusses in Indiana. **Periodica Polytechnica Architecture**, [S.L.], v. 48, n. 1, p. 58-64, 23 maio 2017. Periodica Polytechnica Budapest University of Technology and Economics. <http://dx.doi.org/10.3311/ppar.10612>.
- FREITAS, Moacyr de. **Pontes**: introdução geral - definições. São Paulo: EPUSP, 1981.
- LEET, Kenneth M.; UANG, Chia-Ming; GILBERT, Anne M.. **Fundamentos da análise estrutural**. 3. ed. Porto Alegre: AMGH, 2010.
- MARTHA, F. L. **Ftool**: Programa gráfico-interativo para ensino do comportamento estrutural. Versão 4.00.04. 2024. Disponível em: <https://www.ftool.com.br/Ftool/>. Acesso em: 20 ago. 2024.
- OBINNA, Ubani. **Structural Analysis and Design of Truss Bridges**. 2023. Disponível em: <https://structville.com/design-of-truss-bridges>. Acesso em: 27 set. 2024.
- PINHO, Fernando Ottoboni; BELLEI, Ildony Hélio. **Pontes e viadutos em vigas mistas**. 2. ed. Rio de Janeiro: CBCA, 2007.

SEONG, Tan Hean; NGIAN, Shek Poi; ZIN, Rosli Mohamad. Economical Aspect of Truss Design Through Geometry Configuration. **Advanced Research In Applied Sciences And Engineering Technology**, [S.L.], v. 30, n. 1, p. 105-114, 8 mar. 2023.

SEROR B. C. T., JESUS J. M. H. e LOGSDON N. B. **Linhas de Influência de Vigas Treliçadas**. E&S - Engineering and Science, 1:1, 2014.

VALERIANO, Ricardo. **Pontes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.