



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



Matheus Henrique Lopes Dos Santos

**Estudo de caso de uma passarela em estrutura metálica:
dimensionamento segundo a ABNT NBR 8800:2024 e análise modal
numérica.**

Ouro preto - MG
2026

Matheus Henrique Lopes dos Santos
matheushsl46@gmail.com

**Estudo de caso de uma passarela em estrutura metálica:
dimensionamento segundo a ABNT NBR 8800:2024 e análise modal
numérica.**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade Federal de
Ouro Preto como requisito para a obtenção do título
de Engenheiro Mecânico.

Orientador: DSC. Walliston Dos Santos Fernandes
Coorientador: DSC. Gustavo Paunelli Guimaraes

Ouro Preto – Mg
2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S237e Santos, Matheus Henrique Lopes dos.

Estudo de caso de uma passarela em estrutura metálica
[manuscrito]: dimensionamento segundo a ABNT NBR 8800:2024 e
análise modal numérica. / Matheus Henrique Lopes dos Santos. - 2026.
61 f.: il.: color., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Walliston dos Santos Fernandes.

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães.

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

1. Construção metálica. 2. Áreas para pedestres. 3. Análise modal. 4.
Análise estrutural (Engenharia). I. Fernandes, Walliston dos Santos. II.
Guimarães, Gustavo Paulinelli. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV.
Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Matheus Henrique Lopes dos Santos

Estudo de caso de uma passarela em estrutura metálica: dimensionamento segundo a NBR 8800:2024 e análise modal numérica

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Aprovada em 06 de fevereiro de 2026

Membros da banca

[Doutorado] - Walliston dos Santos Fernandes - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Doutorado] - Edson Alves Figueira Junior - (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Doutorado] - Daniela Antunes Lessa - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Walliston dos Santos Fernandes, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 25/02/2026



Documento assinado eletronicamente por **Walliston dos Santos Fernandes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/02/2026, às 15:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1064924** e o código CRC **3EBB16A1**.

A Deus dedico mais esta etapa vencida, meus pais,
pelo apoio.

A minha família, pelo carinho e meus amigos, pelo
amor e apoio.

Aos ciclos que iniciei e encerrei por me tornarem
a pessoa que sou hoje.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeira mente a Deus por toda força nesta caminhada, e em seguida aos meus Pais, Patrícia Guilherme e Roni Lopes, meu irmão, Maxsuell, familiares, pelo apoio fundamental.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Walliston, e ao coorientador, Gustavo, pela dedicação, incentivo e valiosa orientação neste trabalho.

Ao professor Edson Figueira, cuja orientação foi crucial em muitas das minhas escolhas.

Aos amigos que compartilharam o início desta jornada no curso e aos amigos que fiz pelo caminho, pela cumplicidade.

Aos docentes de Engenharia Mecânica, minhas sinceras homenagens por suas contribuições, que foram essenciais para o aprimoramento deste trabalho e da minha vida.

Não poderia deixar de mencionar as experiências que me moldaram, como a passagem pelo Senai e pelas redes de Jovem aprendizagem.

E, por fim, um brinde à vida acadêmica!

“Devemos promover a coragem onde há medo, promover o acordo onde existe conflito, e inspirar esperança onde há desespero. ”

Nelson Mandela.

RESUMO

Este trabalho realiza o dimensionamento mecânico-estrutural com foco na norma NBR 8800:2024 e a análise modal de uma passarela metálica para pedestres, localizada em um ponto crítico da Rodovia dos Inconfidentes, em Itabirito (MG) - (latitude: -20.238087 e longitude: -43.797079). O problema abordado é a necessidade de garantir segurança viária e conforto aos usuários, mitigando riscos de acidentes em área de intenso fluxo de veículos e pedestres. A justificativa reside na aplicação de conceitos da engenharia mecânica para propor uma solução estrutural eficiente, aproveitando as vantagens do aço, como alta resistência específica e rapidez de montagem. O objetivo geral é dimensionar a estrutura metálica e avaliar seu desempenho dinâmico, verificando as frequências naturais para evitar fenômenos de ressonância. Os objetivos específicos compreendem a revisão teórica sobre o comportamento de materiais e vibrações, a aplicação de métodos de cálculo estático e dinâmico, e a utilização de ferramentas computacionais de simulação. A metodologia adota uma abordagem quantitativa e exploratória, utilizando softwares como Ftool para análise de esforços e Ansys para modelagem por elementos finitos e análise modal. Os principais resultados indicam a seleção do perfil W150×13,0, com esforços axiais máximos de 135 kN (compressão) e 94 kN (tração), verificados conforme a NBR 8800:2024. A análise modal identificou a primeira frequência natural de flexão vertical em 10,43 Hz, valor acima da faixa crítica de excitação do passo humano (1,6–5,0 Hz), afastando riscos de ressonância e garantindo conforto e integridade à estrutura. Conclui-se que o projeto atende aos requisitos de resistência mecânica, estabilidade e desempenho dinâmico, validando a aplicação dos princípios da engenharia mecânica no desenvolvimento de estruturas seguras e eficientes para a mobilidade urbana.

Palavras-chave: Dimensionamento mecânico. Análise modal. Estruturas metálicas. Vibrações. Passarela. Análise por elementos finitos.

ABSTRACT

This work presents the mechanical–structural design, with emphasis on the Brazilian standard NBR 8800:2024, and the modal analysis of a steel pedestrian footbridge located at a critical point along the Rodovia dos Inconfidentes in Itabirito, Minas Gerais, Brazil (latitude -20.238087 , longitude -43.797079). The problem addressed is the need to ensure road safety and user comfort by mitigating accident risks in an area with intense vehicle and pedestrian traffic. The justification lies in the application of mechanical engineering concepts to propose an efficient structural solution, taking advantage of the benefits of steel, such as high specific strength and rapid assembly. The general objective is to design the steel structure and evaluate its dynamic performance by verifying its natural frequencies in order to avoid resonance phenomena. The specific objectives include a theoretical review of material behavior and vibrations, the application of static and dynamic calculation methods, and the use of computational simulation tools. The methodology follows a quantitative and exploratory approach, employing software such as Ftool for internal force analysis and Ansys for finite element modeling and modal analysis. The main results indicate the selection of the W150×13.0 section, with maximum axial forces of 135 kN (compression) and 94 kN (tension), verified in accordance with NBR 8800:2024. The modal analysis identified the first natural frequency of vertical bending at 10.43 Hz, a value above the critical range of excitation associated with human walking (1.6–5.0 Hz), thereby eliminating resonance risks and ensuring structural comfort and integrity. It is concluded that the project meets the requirements of mechanical strength, stability, and dynamic performance, validating the application of mechanical engineering principles in the development of safe and efficient structures for urban mobility.

Keywords: Mechanical design. Dynamic analysis. Steel structures. Vibrations. Footbridge. Finite element analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Treliça plana da Escola de Minas	13
Figura 2 – Execução da primeira das cinco passarelas metálicas sobre a BR-282	14
Figura 3 – Tipologias de faces de treliças	14
Figura 4 – Velocidade básica do vento V_0 no Brasil	17
Figura 5 – Ressonância e fator de amplificação	19
Figura 6 – Fluxograma das etapas do estudo	21
Figura 7 – Rodovia dos Inconfidentes – BR-356	22
Figura 8 – Modelagem do terreno	23
Figura 9 – Pré-projeto 2D da passarela	24
Figura 10 – Vistas do treliçado da passarela	27
Figura 11 – Visualização tridimensional da treliça	28
Figura 12 – Altura de instalação da passarela	29
Figura 13 – Rampa de acesso – dimensões em metros	29
Figura 14 – Modelo da treliça plana	31
Figura 15 – Distribuição dos esforços axiais na treliça	31
Figura 16 – Condições de apoio fixo nos pontos A e B	33
Figura 17 – Modo 1 de vibração – flexão vertical	34
Figura 18 – Modo 2 de vibração – oscilação lateral	35
Figura 19 – Modo 3 de vibração – torção global	36
Figura 20 – Vista frontal dos modos de vibração	36
Figura 21 – Vista lateral e superior dos modos de vibração.....	37
Figura 22 – Vista superior dos modos de vibração.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela 1 - Valores $(b/t)_{lim}$	10
Tabela 2 – Frequências de interesse.....	20
Tabela 3 – Variáveis e indicadores.....	2
Tabela 4 – Cargas envolvidas [kN].....	30
Tabela 5 – Frequências naturais obtidas na análise modal [Hz].....	34

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolo:	Descrição:
A	Área;
Ag	Área bruta da seção transversal;
Ae	Área líquida efetiva;
b	Largura do elemento;
t	Espessura do elemento;
Ix	Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo x;
Iy	Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo y;
rx	Raio de giração da seção transversal em relação ao eixo x;
ry	Raio de giração da seção transversal em relação ao eixo y;
fy	Tensão de escoamento do aço;
fu	Tensão resistente à tração do aço;
E	Módulo de elasticidade do aço;
χ	Fator de redução associado à flambagem;
σ	Tensão atuante no elemento;
Q	Coeficiente de flambagem local;
Ct	Fator redutor aplicado à área líquida;
ec	Excentricidade da ligação;
lc	Comprimento do filete ou distância entre furos na direção da força;
lw	Comprimento dos cordões de solda;
q	Pressão dinâmica do vento ponderada;
Pdin	Pressão dinâmica do vento;
Vk	Velocidade característica do vento;
V0	Velocidade básica do vento;
Cf	Coeficiente de força;
Nt,Sd	Força axial de tração solicitante de cálculo;
Nt,Rd	Força axial de tração resistente de cálculo;
K·L	Comprimento efetivo de flambagem;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos.....	4
1.3.1	Geral	4
1.3.2	Específicos.....	4
1.4	Estrutura do Trabalho	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	Estruturas Metálicas	7
2.2	Tensões e deformações.....	7
2.3	Propriedades estruturais.....	11
2.4	Treliças	13
2.5	Passarela Rodoviária.....	14
2.6	Fundamentos das vibrações	17
3	METODOLOGIA.....	21
3.1	Tipos de Pesquisa	21
3.2	Materiais e Métodos	21
3.3	Variáveis e Indicadores	25
3.4	Instrumentos e coleta de dados	26
3.5	Tabulação de dados	26
4	RESULTADOS	27
4.1	Geometria Final e Parâmetros de Implantação.....	27
4.2	Ações Estruturais.....	29
4.3	Esforços Estruturais e Desempenho da Treliça	30
4.4	Verificações de Resistência	31
4.5	Análise Modal no Ansys.....	32
5	CONCLUSÃO.....	39
5.1	Conclusão	39
5.2	Recomendações	40
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

ANEXO.....45

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

A elaboração de projetos de mobilidade urbana tem se mostrado essencial para garantir condições seguras de circulação em áreas com intenso fluxo de veículos e pedestres. Nesse contexto, este estudo tem como foco o desenvolvimento de um projeto social voltado à implantação de uma passarela metálica destinada a melhorar a transição de pedestres em um ponto crítico da malha urbana.

A área selecionada, situada na Rodovia dos Inconfidentes (Agostinho Rodrigues), no município de Itabirito – MG, apresenta significativo comprometimento da segurança viária. O tráfego constante de caminhões vinculados às operações logísticas da mineração, somado ao movimento interurbano e à travessia de pedestres, resulta em congestionamentos frequentes e eleva o risco de acidentes. Dessa forma, a instalação de uma passarela se configura como uma intervenção necessária tanto para mitigar conflitos entre pedestres e veículos quanto para melhorar a fluidez do trânsito local.

Do ponto de vista estrutural, conforme destacado por Fakury *et al.* (2015), as estruturas em aço oferecem elevada relação resistência/peso, além de possibilitarem execução rápida, limpa e adequada a vãos mais extensos, características especialmente relevantes para obras em ambientes urbanos consolidados. Assim, a opção por uma passarela metálica se apresenta tecnicamente viável e eficiente para atender às demandas do local estudado.

Entretanto, além do dimensionamento convencional dos elementos estruturais, torna-se indispensável considerar o comportamento dinâmico da passarela. Estruturas desse tipo estão sujeitas a vibrações induzidas pelo fluxo de pedestres, podendo, em determinados cenários, gerar desconforto ou até comprometer sua integridade a longo prazo. Nesse sentido, uma análise modal de vibrações se faz necessária para avaliar a durabilidade e o desempenho mecânico do sistema ao longo de sua vida útil.

Diante do exposto, este estudo busca integrar a necessidade social de segurança viária à análise técnica e estrutural rigorosa, de modo a propor uma solução duradoura, eficiente e em conformidade com as normas vigentes.

Assim, formula-se a seguinte pergunta-problema:

Como dimensionar uma passarela metálica para a Rodovia dos Inconfidentes – Agostinho Rodrigues, em Itabirito (MG), (latitude: -20.238087 e longitude: -43.797079), e de que forma a análise de vibrações auxilia na verificação de seu desempenho e durabilidade estrutural?

1.2 Justificativa

A indústria metal mecânica brasileira passou por significativa expansão a partir da segunda metade do século XX, impulsionando o desenvolvimento tecnológico e a consolidação de siderúrgicas e unidades industriais em diversas regiões do país. Nesse contexto, o estado de Minas Gerais destaca-se pela forte presença de atividades metalúrgicas, fator que contribuiu diretamente para a ampla difusão do uso de estruturas metálicas em aplicações industriais e urbanas, conforme apontado pela Fundação Estadual do Meio Ambiente (2016).

Ademais, a crescente adoção do aço na construção civil está associada às suas propriedades intrínsecas, como elevada resistência mecânica, reduzida relação peso-resistência, versatilidade construtiva, durabilidade e possibilidade de industrialização dos sistemas estruturais. Segundo Brandão (2024), essas características resultam em maior precisão construtiva, redução de prazos de execução e ganhos em eficiência e sustentabilidade, tornando o material particularmente adequado para obras de infraestrutura urbana, como passarelas para pedestres, que demandam desempenho estrutural confiável, segurança e integração com o ambiente construído.

Do ponto de vista técnico e normativo, o dimensionamento adequado dessas estruturas exige o atendimento rigoroso às prescrições estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 8800:2024, norma que define os critérios para o projeto de estruturas de aço e mistas em temperatura ambiente. A aplicação dessa norma é fundamental para a correta avaliação dos esforços solicitantes, das propriedades mecânicas dos materiais e dos estados limites últimos e de serviço, assegurando que a solução estrutural proposta esteja em conformidade com as boas práticas da engenharia estrutural e com a legislação vigente.

Além das verificações estruturais convencionais, destaca-se a relevância da análise dinâmica, em especial no que se refere às vibrações induzidas por ações humanas. Conforme discutido por Brito (2013), o estudo do comportamento vibratório das estruturas tornou-se essencial para a compreensão dos efeitos de excitações dinâmicas em diferentes faixas de frequência, permitindo a avaliação de critérios de conforto, segurança e desempenho em estruturas metálicas esbeltas, como passarelas. A análise modal, portanto, constitui uma etapa

indispensável para a mitigação de acelerações excessivas que possam comprometer o uso seguro da estrutura.

Sob a perspectiva social e urbana, o desenvolvimento desta pesquisa justifica-se pela demanda real da população local, considerando as características do tráfego intenso de veículos na Rodovia dos Inconfidentes. A proposta de uma passarela metálica adequadamente dimensionada contribui diretamente para a segurança dos pedestres, para a melhoria da mobilidade urbana e para a redução dos riscos associados à travessia da via.

Assim, este acesso ao município de Itabirito, localizado ao longo da BR-356, apresenta histórico recorrente de acidentes de trânsito, incluindo colisões frontais, atropelamentos e ocorrências com vítimas graves e fatais. Registros jornalísticos ao longo dos últimos anos evidenciam a persistência desses sinistros, envolvendo pedestres, motociclistas e veículos pesados, mesmo após a implantação de medidas de *traffic calming*, como a instalação de quebra-molas na via (SOU NOTÍCIA, 2019; 2021; 2022; 2023; 2024; and RADAR GERAL, s.d.). Tal recorrência indica que as intervenções atualmente adotadas não foram suficientes para reduzir de forma efetiva o risco viário no trecho, sobretudo em um contexto de tráfego intenso e circulação mista de veículos e pedestres.

Embora os dispositivos redutores de velocidade existentes tenham como objetivo principal a diminuição pontual da velocidade dos veículos, sua efetividade é limitada em rodovias de caráter arterial, como a BR-356, onde se observa comportamento de aceleração logo após os obstáculos físicos. Além disso, esses dispositivos não eliminam o conflito direto entre pedestres e o tráfego veicular, fator determinante nos atropelamentos registrados no local (RADAR GERAL, s.d.; SOU NOTÍCIA, 2023). Dessa forma, constata-se que a simples adoção de quebra-molas não atende plenamente às diretrizes de segurança viária recomendadas para trechos com elevado volume de travessias irregulares.

Nesse contexto, a implantação de uma passarela para pedestres configura-se como uma solução tecnicamente mais adequada e alinhada às boas práticas de engenharia de tráfego e infraestrutura viária. Segundo as diretrizes do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, passarelas são indicadas em locais com alto fluxo de veículos, histórico de acidentes e significativa demanda de travessia, pois promovem a segregação dos fluxos e reduzem drasticamente o risco de atropelamentos (DNIT, 2010; DNIT, 2021). Assim, a proposta deste trabalho justifica-se pela necessidade de uma intervenção estrutural permanente, capaz de superar as limitações das medidas paliativas existentes e proporcionar maior segurança, funcionalidade e sustentabilidade ao sistema viário analisado.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Dimensionar uma passarela metálica para pedestres, considerando critérios normativos de segurança estrutural e desempenho dinâmico.

1.3.2 Específicos

Realizar revisão teórica sobre estruturas metálicas e vibrações aplicadas a passarelas de pedestres, com foco em critérios de dimensionamento e desempenho dinâmico.;

Definir a geometria e os parâmetros de implantação da passarela (vão, largura, altura livre e acessos), alinhados a requisitos normativos e funcionais;

Apresentar e discutir os resultados de dimensionamento e análise modal, evidenciando a adequação da solução quanto à segurança estrutural e ao risco de ressonância associado à caminhada.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos, além das seções de referências e anexos, de modo a conduzir o leitor de forma lógica e progressiva desde a contextualização do problema até a apresentação dos resultados e conclusões.

No Capítulo 1 – Introdução, são apresentados a contextualização do tema, a formulação do problema, a justificativa do estudo, os objetivos gerais e específicos e a relevância social e técnica da proposta, destacando-se a necessidade de implantação de uma passarela metálica em um ponto crítico da Rodovia dos Inconfidentes, em Itabirito (MG).

O Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica reúne os principais fundamentos teóricos relacionados às estruturas metálicas, ao comportamento mecânico dos materiais, aos critérios normativos da ABNT NBR 8800:2024, às tipologias de treliças aplicadas a passarelas rodoviárias e aos conceitos de vibrações mecânicas e análise modal. Esse capítulo fornece o embasamento técnico necessário para o desenvolvimento das etapas de dimensionamento estrutural e avaliação dinâmica.

No Capítulo 3 – Metodologia, descrevem-se os procedimentos adotados para a condução da pesquisa, incluindo o tipo e a abordagem do estudo, a coleta de dados geoespaciais,

a definição da geometria da passarela, a modelagem estrutural, a determinação das ações atuantes, o uso dos softwares Ftool e Ansys, bem como as etapas de verificação dos Estados Limites Últimos e de Serviço e da análise modal por elementos finitos.

O Capítulo 4 – Resultados apresenta os valores finais adotados para o projeto, contemplando a geometria definitiva da passarela, as ações estruturais consideradas, os esforços internos obtidos, as verificações de resistência dos elementos estruturais e os resultados da análise dinâmica, com a identificação das frequências naturais e dos modos de vibração da estrutura.

Por fim, o Capítulo 5 – Conclusão sintetiza os principais resultados do estudo, avalia o atendimento aos requisitos normativos e de desempenho estrutural e dinâmico, discute a viabilidade técnica da solução proposta e apresenta recomendações para trabalhos futuros e possíveis aprimoramentos do projeto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Fialho (2004), as passarelas urbanas devem ser compreendidas como equipamentos estruturantes da cidade contemporânea, cuja função extrapola a simples transposição física de obstáculos viários. O autor destaca que o crescimento acelerado e, muitas vezes, desordenado, aliado à intensificação do tráfego motorizado, transformou vias urbanas em barreiras à circulação de pedestres, comprometendo a acessibilidade e a continuidade do tecido urbano. Nesse contexto, Fialho (2004) enfatiza que as passarelas assumem papel fundamental na recomposição dessas conexões, atuando como instrumentos de integração e deve considerar simultaneamente aspectos funcionais, estruturais, urbanísticos e estéticos, de modo a garantir não apenas eficiência técnica, mas também adequada inserção na paisagem urbana.

Complementarmente, Ribeiro (2006) argumenta que o projeto de passarelas urbanas envolve um processo decisório complexo, no qual critérios objetivos e subjetivos precisam ser tratados de forma integrada desde as fases iniciais de concepção. O mesmo ressalta que a escolha do sistema estrutural é determinante para o desempenho global da passarela, influenciando sua viabilidade construtiva, comportamento estrutural, imagem urbana e percepção pelos usuários.

Do ponto de vista normativo, o DNIT, por meio da Instrução de Serviço ISF-219 – Projeto de Passarelas para Pedestres, estabelece diretrizes para a recomendação e o dimensionamento dessas estruturas em rodovias federais. O DNIT orienta que a necessidade de passarela seja avaliada com base em critérios como volume e velocidade do tráfego veicular, intensidade da circulação de pedestres, condições de visibilidade e geometria da via. Além disso, o documento ressalta a importância da acessibilidade, da integração com calçadas e do conforto do usuário, de modo a garantir o uso efetivo da estrutura e sua adequada inserção no sistema viário (DNIT, 2022).

O Código de Trânsito Brasileiro (CTB), retrata distinção conceitual entre rodovia e via urbana, onde é fundamental para o planejamento de travessias seguras e para a escolha adequada de dispositivos de moderação de tráfego. E, aos pedestres, o direito de utilizar local adequado para se locomover.

O Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), hoje integrado ao DNIT, estabelece que as rodovias são planejadas primordialmente para o tráfego motorizado de média e alta velocidades. Consequentemente, a interação direta entre veículos e pedestres é inerente e

desaconselhada, demandando a segregação física desses fluxos em locais com alta concentração de pessoas a pé. Para a travessia segura, a diretriz é priorizar o uso de passarelas ou passagens subterrâneas. Na ausência dessas estruturas, a travessia deve ser realizada em linha reta, perpendicular ao eixo da rodovia, com o máximo de atenção.

2.1 Estruturas Metálicas

Segundo ideia de Silva *et al.* (2021), o aço desempenha um papel fundamental no desenvolvimento e engenharia. Esse destaque se deve principalmente à sua variedade de propriedades e características mecânicas, e seu ótimo desempenho, e um custo relativamente baixo. Esse fator é amplamente influenciado por sua disponibilidade na crosta terrestre e pela alta eficiência dos processos de fabricação do aço.

Ademais, Silva *et al.* (2021), indica que a classificação dos aços estruturais é de grande importância, onde os mesmos devem ser selecionados para determinada aplicação, e raramente todas as propriedades serão validadas. O desafio principal é identificar quais propriedades são mais importantes e, a partir daí, escolher o material que atenda a esses requisitos pelo menor custo possível.

Em que complementa Pinedo *et al.* (2021), ressaltando que os componentes metálicos nos setores industriais são utilizados amplamente. E os mesmos, são fabricados com ligas à base de ferro, alumínio, níquel e cobre entre outras ligas. Logo, se enquadram em aplicações específicas exibindo propriedades para atingir o desempenho que lhes serão demandadas.

Adicionando, em entrelinhas do mesmo autor, Chiaverini *et al.* (1996), aos aços ferro carbono pode-se incluir os elementos de ligas e tratamentos térmicos para trazer melhores características mecânicas, que devem modificar seus pontos e limites de restrição a esforços, buscando garantir melhores aplicações e possibilitar estruturas mais acertadas exibindo melhor resistência a tração, compressão, corrosão, cisalhamento, fadiga, dureza, resiliência e tenacidade.

2.2 Tensões e deformações

Conforme apresentado por Beer *et al.* (1995), as estruturas submetidas a tensões iniciam seu comportamento mecânico com deformações lineares que seguem a Lei de Hooke. Ao ultrapassar esse limite, os metais passam ao regime de deformação plástica, no qual as

alterações tornam-se irreversíveis. Nesse contexto, a Lei de Hooke utiliza o módulo de Young, ou módulo de elasticidade, que, dentro do regime elástico, tende a apresentar pouca variação.

Ainda no âmbito do comportamento mecânico, estudos de Garcia *et al.* (2012), evidenciam que um metal dúctil deve obedecer à Lei de Hooke durante sua fase elástica, na qual a deformação é reversível e sua resistência pode ser plenamente caracterizada. Quando solicitado além do limite de escoamento, ingressando no regime plástico, o material passa a sofrer deformações permanentes, indicando que sua capacidade resistente original foi excedida.

Assim, conforme a ABNT NBR 7187: 2021), o carregamento variável contempla ações que podem apresentar mudanças ao longo da vida útil da estrutura, como cargas móveis, cargas de vento e variações térmicas. Neste trabalho, consideram-se apenas as cargas móveis e as de vento, por exercerem maior influência sobre a passarela. As cargas de vento são analisadas nas direções y e x: na primeira, incidem perpendicularmente ao menor lado da passarela, afetando treliças e vigas conectadas; na segunda, incidem perpendicularmente ao maior lado, influenciando banzos e treliças.

Com base nos estudos realizados conforme a ABNT NBR 8800:2024, os coeficientes de ponderação de resistência aplicáveis, por exemplo, a conectores de cisalhamento e metais de solda são apresentados em seções específicas da norma. Esses coeficientes de ponderação das resistências (γ_m) são diferenciados para cada componente estrutural, garantindo que os critérios de dimensionamento e segurança sejam atendidos de forma adequada.

Em estudo do processo de compressão, Andrade *et al.* (2016), destacam que esse esforço axial puro raramente é encontrado, ocorrendo de forma mais típica em pilares nos quais os momentos fletores se anulam. O autor ressalta que, na prática, o dimensionamento deve considerar a combinação de flexo-compressão, cuja aplicação pode ser incomum, mas cuja compreensão é necessária para o correto entendimento estrutural.

Assim, conforme Beer *et al.* (1995), um fenômeno crítico em componentes submetidos à compressão, como pilares ou barras de treliças é a flambagem, onde a mesma trata-se de uma instabilidade elástica que se manifesta quando a carga axial atinge um valor crítico, produzindo uma deformação lateral súbita e reduzindo a capacidade resistente do elemento, podendo levá-lo ao colapso caso não seja adequadamente considerada no dimensionamento.

Segundo a ABNT NBR 8800:2024 a flambagem é uma instabilidade típica de elementos comprimidos e pode ocorrer de três modos principais: por flexão, comum em perfis simétricos que sofrem deslocamentos laterais; por torção, observada em perfis com seção em cruz que giram em torno de seu próprio eixo; e por flexo-torção. A resistência do elemento é determinada com base no índice de esbeltez, que define um fator de redução aplicado à sua capacidade resistente.

A resistência à flambagem elástica de uma barra comprimida, denominada força normal crítica, é determinada considerando os diferentes modos de instabilidade previstos pela ABNT NBR 8800:2024. A análise deve abranger a flambagem por flexão em torno dos dois eixos principais de inércia, assegurando uma verificação completa da estabilidade do elemento submetido à compressão centrada.

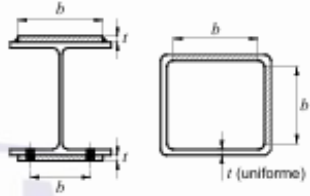
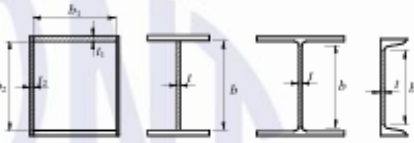
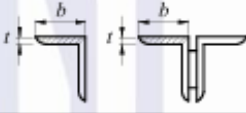
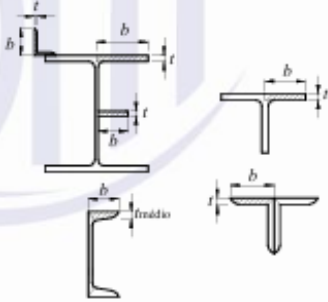
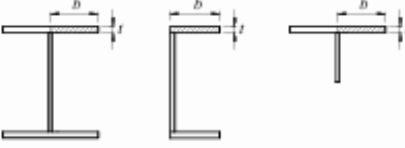
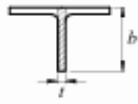
A flambagem por flexão, tratada na ABNT NBR 8800:2024, é analisada separadamente para cada eixo principal. A carga crítica é função do módulo de elasticidade do aço, do momento de inércia da seção transversal e do comprimento de flambagem, o qual depende das condições de contorno do elemento.

Portanto, a determinação das cargas críticas de flambagem, conforme os itens prescritos na ABNT NBR 8800:2024, constitui a base normativa para a verificação da estabilidade de barras comprimidas. Esse procedimento assegura que o elemento possua resistência suficiente para suportar os esforços solicitantes sem perda súbita de estabilidade, atendendo aos critérios de segurança estrutural estabelecidos.

Segundo a ABNT NBR 8800:2024, deve-se calcular a força normal de flambagem elástica da barra, denominada N_e , a qual representa a carga máxima ou força crítica que uma coluna de aço pode suportar antes de sofrer encurvamento por flexão, tanto no sentido horizontal quanto no vertical. Esse cálculo considera a rigidez do material, o formato da seção transversal e o comprimento da barra.

Ademais, a tensão crítica de flambagem local é determinada conforme proposto pela ABNT NBR 8800:2024, que relaciona o limite de esbeltez $(b/t)_{lim}$ ao valor efetivo da tensão de escoamento (f_y), em síntese, a Tabela 1 a seguir constitui referência normativa utilizada para classificar um elemento como compacto, não compacto ou esbelto, de acordo com sua esbeltez local.

Tabela 1 - Valores $(b/t)_{lim}$.

Elementos	Grupo	Descrição dos elementos	Alguns exemplos com indicação de b e t	$(b/t)_{lim}$
AA	1	- Mesas ou almas de seções tubulares retangulares (ver 5.1.3) - Lamelas e chapas de diafragmas entre linhas de parafusos ou soldas		$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	2	- Almas de seções I, H ou U - Mesas ou almas de seção-caixão - Todos os demais elementos que não integram o Grupo 1		$1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
AL	3	- Abas de cantoneiras simples ou múltiplas providas de chapas espaçadoras		$0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	4	- Mesas de seções I, H, T ou U laminadas - Abas de cantoneiras ligadas continuamente ou projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas - Chapas projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas		$0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	5	- Mesas de seções I, H, T ou U soldadas ^a		$0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}}$
	6	- Almas de seções T		$0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

^a $k_c = 4/\sqrt{h/t_w}$, sendo $0,35 \leq k_c \leq 0,76$

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2024).

Onde, a norma ABNT NBR 8800:2024, retrata que a partir da esbeltez relativa do elemento, verifica-se a necessidade de correção da largura efetiva. Quando a relação b/t é inferior ao limite ajustado, considera-se a largura total da chapa.

Por outro lado, segundo a norma ABNT NBR 8800:2024, quando a esbeltez ultrapassa o limite estabelecido, torna-se necessário reduzir a largura efetiva para representar adequadamente os efeitos da flambagem local.

2.3 Propriedades estruturais

Em passarelas, os aços se apresentam como materiais de alta confiabilidade, por serem isotrópicos e possuírem propriedades uniformemente distribuídas, o que proporciona bom aproveitamento de sua vida útil. Adicionalmente, esse material apresenta excelente potencial de reutilização em processos siderúrgicos e permite reforços e expansões relativamente fáceis, caso a estrutura requeira atualizações futuras (FAKURY *et al.* 2016).

Assim, as características dos materiais variam entre boa ductilidade, que representa a capacidade de deformação plástica antes da ruptura, e a fragilidade, indicada por um baixo nível dessa deformação, resultando em rupturas bruscas. Para essas estruturas, é fundamental garantir confiabilidade nas juntas soldadas, assegurando que o comportamento seja adequado e previsível (DIAS *et al.*, 2006).

Conforme apresentado por Fakury *et al.* (2016), os aços estruturais mais utilizados no Brasil, e em aplicações como passarelas, atendem às exigências da norma ABNT NBR 8800:2024, sendo que, na prática, são empregados aqueles com limite de escoamento igual ou superior a 250MPa, onde a seleção adequada entre esses materiais é fundamental para garantir a segurança, a economia e o desempenho das estruturas metálicas.

Assim sendo, com base nos estudos de Silva *et al.* (2012), de forma direta irá trazer a curva tensão deformação, onde está relacionada com a capacidade de absorção de energia até sua falha, onde vale ressaltar que para desconsideração do processo dinâmico esta condição é válida, onde os materiais que exibem boa ductilidade tendem a ser mais tenazes.

De acordo com Andrade *et al.* (2016), reforça ao afirmar que essa capacidade está relacionada ao material absorver energia, onde em processos dinâmicos, como terremotos, impactos e vibrações. Ademais, Souza *et al.* (1989), descreve que para determinação da resistência e tenacidade, pode ser medida por ensaios de impactos como de Charpy sendo o mais usado por seu baixo custo, e completo dentre os outros.

Outro aspecto a ser considerado, e também escrito por Callister (2007), traz que o fenômeno de fadiga se inicia quando as estruturas são expostas a forças cíclicas, oscilantes e dinâmicas, onde têm-se um longo o período de tempo e se estende a boa parte das falhas em materiais metálicos, causando falhas repentinas e todos materiais estão susceptíveis a tal problema.

Onde complementa Andrade *et al.* (2016), que diz que para elementos sob esforço de tração este fenômeno é menos significativo, diferentemente do esforço de compressão, que a fadiga gera imperfeições de grande impacto.

Em estruturas metálicas, como passarelas, a corrosão constitui um processo espontâneo de deterioração que reduz a espessura útil do material, comprometendo sua vida útil e podendo conduzir a falhas catastróficas quando não controlada. Sua prevenção é realizada mediante métodos protetivos, como pinturas e galvanizações (GENTIL *et al.*, 2022; FAKURY *et al.*, 2016).

Paralelamente, as soldagens, essenciais para a união dos componentes, representam um ponto crítico de alto risco devido à complexidade de verificação e controle. A seleção inadequada do processo ou dos parâmetros de soldagem, a incompatibilidade entre materiais de base e de adição, e uma execução fora das especificações técnicas podem gerar falhas iniciais com elevado potencial de evoluir para colapsos estruturais (WAINER *et al.* 2024; VILLANI *et al.* 2016).

Portanto, para garantir a segurança e durabilidade dessas estruturas, é imperativo um controle rigoroso que una a proteção contra a corrosão à execução de soldagens de alta qualidade. Tal controle demanda a correta seleção dos processos, a estrita observância das especificações técnicas — como corrente, tensão e procedimentos de deposição — e a adequada qualificação dos profissionais envolvidos (FAKURY *et al.* 2016; VILLANI *et al.* 2016; WAINER *et al.* 2024).

Assim, segundo Silva *et al.* (2010), os elementos fundamentais de uma estrutura são determinados a conduzir as forças para o terreno de maneira estável. Cabe ao projetista avaliar e selecionar as alternativas que melhor desempenhem essa função, considerando as vantagens e desvantagens de cada opção.

Nesse contexto, de acordo com o Código de Trânsito Brasileiro (2022), Art. 193 – 581 – 98, uma passarela tem como premissa permitir com que pedestres e/ou ciclistas possam transitar a nível aéreo, similar a pontes, viadutos, porém de menor porte.

E seguindo orientações de Fakury *et al.* (2016), que traz alguns tipos de passarelas metálicas para pedestres, frequentemente construídas com treliças do tipo Pratt, Howe ou Warren, e são soluções estruturais eficientes que combinam leveza e resistência, ademais essas treliças proporcionam a estabilidade necessária para suportar cargas e permitir a passagem segura de pedestres.

2.4 Treliças

Segundo revisões de Almeida (2005), as treliças são sistemas de estrutura onde os componentes são conectados a fim de formar sistemas triangulares, assim, estes elementos estão sujeitos exclusivamente a esforços internos de forças axiais, ou seja, são submetidos apenas a compressão e tração.

Por meio de estudos de Kassimali *et al.* (2016), as treliças planas devem trabalhar no contexto de estabilidade interna, nos quais, deve-se ao número de elementos que o conjunto contém, de forma que todo seu treliçado não sofra deformação e alterações de projeto permanecendo rígidos e contidos em seus determinados pontos de apoio. Assim, pode-se ver um exemplo deste tipo de treliça na Figura 1.



Figura 1 - Treliça plana da Escola de Minas.
Fonte: Pesquisa direta (2024).

Obtêm-se a partir da Figura 1 que as treliças são muito importantes para construções em geral, suportando cargas bem distribuídas e com grande durabilidade e baixa manutenção quando bem aplicadas.

Santos *et al.* (2018), reforça que as treliças normalmente são formadas por elementos de aço e materiais resistentes, onde os mesmos são utilizados em estruturas que são solicitadas por alta confiabilidade e características específicas, nos quais devem suportar esforços diversos fazendo parte de sistemas muito importantes como telhados, pontes passarelas, pode-se verificar na Figura 2 uma passarela que ilustra este cenário.

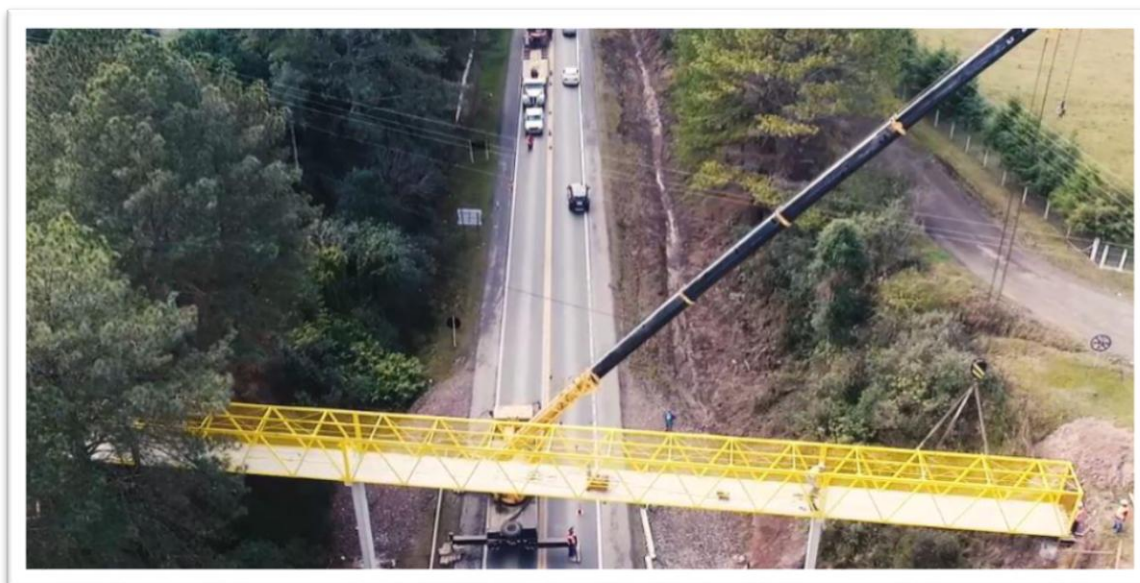


Figura 2 - Execução da primeira das cinco passarelas metálicas sobre a BR-282.
Fonte: Sarkisengestrutural.

É entendido da Figura 2 que a execução da primeira das cinco passarelas metálicas sobre a BR-282, na cidade de Lajes, Santa Catarina, serão pré-montadas na fábrica e sua estrutura corresponde ao que se é encontrado comumente em literatura.

2.5 Passarela Rodoviária

Em sequência, após releitura de estudos de Fakury (2024), as passarelas aplicadas no Brasil em meio rodoviário podem conter muitas geometrias de perfis ou aspectos laterais, no que se diz respeito a estas formas têm-se as geometrias mais utilizadas, conhecidas como Pratt, Howe, Warren seja com ou sem montantes e mostradas na Figura 3.

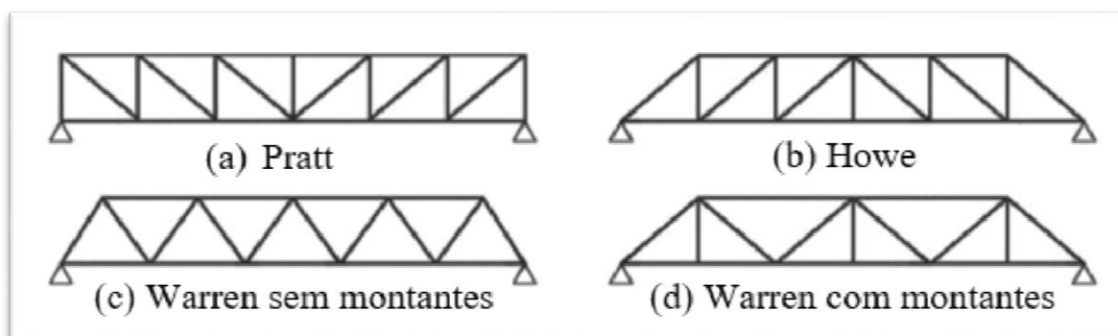


Figura 3 - Tipologias de faces de treliças.
Fonte: Fakury (2024).

É visualizado na Figura 3 as combinações disponíveis mais utilizadas para passarelas em estruturas metálicas, onde as mesmas devem ser estudadas conforme possíveis aplicações, métodos de dimensionamento e material utilizado.

Segundo Pfeil (2009), as treliças são formadas por barras interligadas em nós idealizados como articulados, de modo que os esforços internos atuantes são predominantemente de tração ou compressão, permitindo soluções estruturais racionais para vãos médios e grandes.

De acordo com Balei (2010), a treliça Pratt caracteriza-se pela inclinação das diagonais em direção ao centro do vão, resultando em barras diagonais predominantemente tracionadas quando a estrutura é submetida a carregamentos verticais usuais. Os montantes verticais, nesse sistema, trabalham principalmente à compressão, essa configuração apresenta vantagens significativas em estruturas metálicas, uma vez que os elementos tracionados podem ser dimensionados com seções mais esbeltas, contribuindo para a redução de peso próprio e custo da estrutura.

Conforme destacado por Pfeil (2009), a treliça Howe apresenta a disposição inversa das diagonais em relação à Pratt, fazendo com que essas barras sejam solicitadas predominantemente à compressão, enquanto os montantes verticais atuam à tração, tipologia foi historicamente muito utilizada em estruturas de madeira, nas quais os elementos comprimidos apresentam bom desempenho estrutural.

Onde, de acordo com a pesquisa realizada por Fernández (2010), a treliça Howe, ao ser carregada com seu peso próprio, exibe um comportamento distinto do da treliça Pratt, apresentando compressão nas diagonais e tração nos montantes, em contraste, a treliça Pratt mostra tração nas diagonais e compressão nos montantes quando carregada com seu peso próprio, já a treliça Warren exibe tensões alternadas nas diagonais.

Segundo Pfeil (2009), a treliça Warren sem montantes distingue-se pela ausência de elementos verticais, sendo composta apenas por barras diagonais dispostas de forma alternada, formando uma sequência de triângulos essa configuração proporciona uma distribuição mais uniforme dos esforços internos ao longo da estrutura, alternando tração e compressão nas diagonais conforme a posição do carregamento. Entretanto, a ausência de montantes pode limitar o desempenho da treliça quando submetida a cargas concentradas, resultando em maiores deslocamentos e esforços localizados.

Assim, segundo pesquisas de Paula (2023), as informações sobre as diagonais das mesmas, e entende-se que para a aplicação a treliça Warren que obteve alternância entre tração e compressão e para uma passarela rodoviária, a escolha da geometria Warren é geralmente

preferida devido à sua capacidade de distribuir as cargas de maneira uniforme, o que é essencial para suportar o tráfego constante e as variações de carga ao longo do tempo.

Em releitura da norma ABNT NBR 7188 (2024), a altura livre mínima recomendada para passarelas é de 5,50 metros, assegurando que a passagem de veículos abaixo da estrutura ocorra de forma segura, onde, em projetos de passarelas, é fundamental esta extensão junto aos vãos que a estrutura deve cobrir, além de estabelecer a largura adequada para os pedestres e a altura livre necessária para a circulação de veículos.

De acordo com as diretrizes do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), a determinação do vão a ser superado deve considerar diretamente a largura da rodovia existente, sendo que, para o trecho destinado à implantação da passarela, a largura padrão de uma rodovia simples é de aproximadamente 10 m. Essa referência é fundamental para definir o comprimento adequado da estrutura, garantindo sua compatibilidade com as dimensões da via e assegurando uma integração segura ao entorno operacional.

De acordo com a ABNT NBR 9050 (ABNT, 2020), as rotas acessíveis destinadas à circulação de pedestres devem apresentar altura livre mínima de 2,10 m, de modo a garantir a segurança dos usuários e evitar riscos de choque contra elementos construtivos suspensos. Assim, no projeto de passarelas para pedestres, especialmente quando cobertas, a altura interna livre deve ser dimensionada de forma a respeitar esse limite normativo em toda a extensão do percurso acessível, considerando ainda tolerâncias construtivas, possíveis flechas estruturais e a instalação de elementos secundários, como luminárias e sistemas de cobertura. Dessa forma, a adoção de valores superiores ao mínimo normativo contribui para o atendimento aos requisitos de acessibilidade, segurança e conforto estabelecidos pela NBR 9050.

De acordo com a ABNT NBR 9050 (ABNT, 2020), as rotas acessíveis destinadas à circulação de pedestres em passarelas para travessia sobre rodovias, variam em função do fluxo bidirecional de pedestres, da necessidade de cruzamento seguro e da inclusão de guarda-corpos e elementos de proteção. Nesse contexto, diretrizes técnicas como a ISF-219 do DNIT recomendam larguras usuais iguais ou superiores a 2 m.

Em síntese, a NBR 7188 (ABNT, 2024), as cargas móveis atuantes em passarelas para pedestres devem ser modeladas como cargas uniformemente distribuídas, adotando-se o valor estático de 5,0 kN/m².

Ademais, para análise estática é necessário também estabelecer a velocidade básica do vento V_0 , conforme ilustrado na Figura 4 a seguir, e elucidado pela NBR 6123 (ABNT, 2023),

que é definida como a velocidade de uma rajada de três segundos de duração, medida a dez metros de altura em campo aberto e plano, sendo essencial para o dimensionamento de estruturas expostas a essas condições de vento.

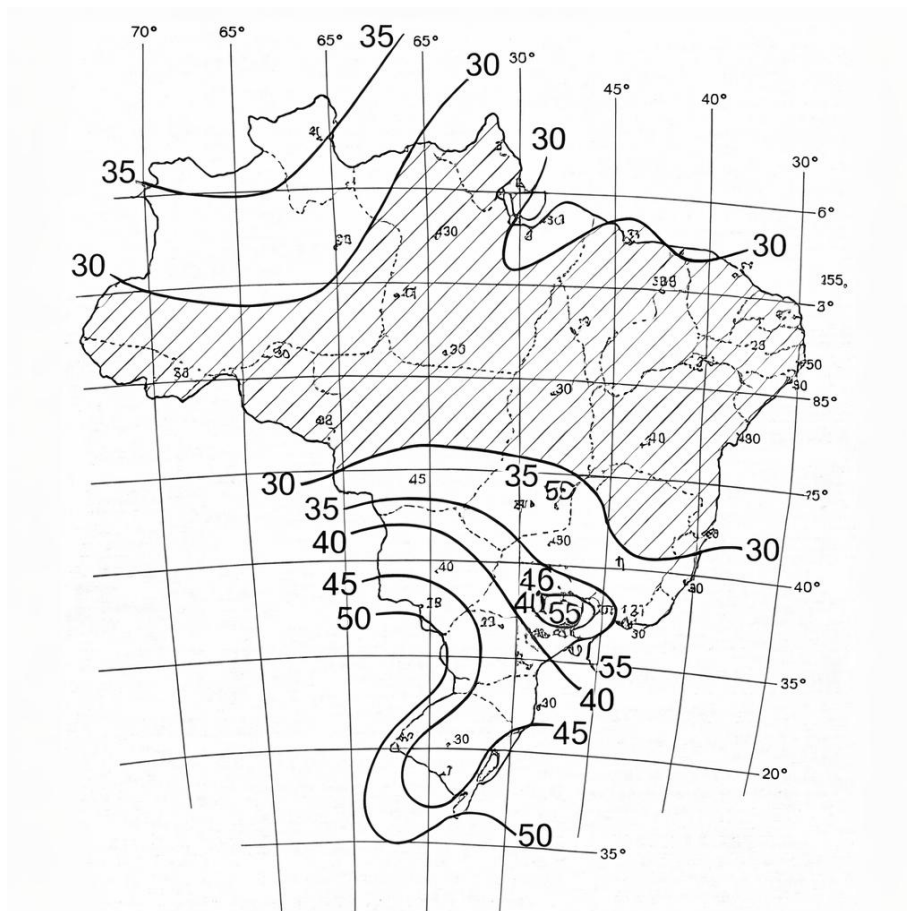


Figura 4 - Velocidade básica do vento V_0 no Brasil.
Fonte: ABNT, NBR 6123 (2023).

Encontra-se na Figura 4 uma imagem com a relação de ventos do mapa Brasileiro, onde pode ser retirada a velocidade do vento máxima das determinadas regiões.

Para o projeto de uma passarela, a ação do vento é determinada conforme a ABNT NBR 6123 (2023). O cálculo parte da velocidade característica da região, a qual é posteriormente ajustada mediante fatores que consideram o relevo local, a rugosidade do terreno, a altura da estrutura e, por fim, o fator estatístico referente ao uso e à importância da edificação.

2.6 Fundamentos das vibrações

Em segunda análise, segundo Sommer (2002), verificar os efeitos das vibrações sobre as estruturas e locais se mostra cada vez mais relevante, sob o qual deve-se buscar métodos para redução e controle de sistemas dinâmicos que quando não previstos podem se tornar maléficos para o projeto.

Estudos de Batista (2018), informa que a partir da ascensão das construções que se tornaram cada vez mais esbeltas, trouxeram consequência aos elementos, que com uma relação de rigidez e frequências naturais mais próximas à das forças, nesse mesmo âmbito estrutural pode se resultar em danos aos elementos de piso, que por sua vez, tendem a apresentar baixas frequências quando submetidas as ações humanas de transposição.

Assim como traz análises de Brito (2013), as mais variadas fontes de vibração podem gerar consequências negativas para as estruturas prejudicando não só sua função, mas também sua segurança, ao qual a atenuação desta energia é dada pela absorção das acelerações pelo piso ou terreno e transmitidas para estruturas adjacentes ao local de impacto.

De acordo com Savi (2017), compreende-se que um sistema de vibração envolve o movimento oscilatório de um corpo em torno de uma posição de equilíbrio, sendo composto pelos elementos fundamentais massa (m), mola (k) e amortecimento (c), responsáveis por caracterizar a resposta dinâmica do sistema. No contexto das estruturas metálicas, esses conceitos são considerados essenciais, pois elementos como vigas, treliças e perfis submetidos a ações dinâmicas como vento, tráfego ou máquinas podem apresentar vibrações que afetam o desempenho e a vida útil da estrutura, exigindo uma análise adequada de rigidez, massa e mecanismos de dissipação. Nesta linha de estudo, Kelly (2018) destaca que sistemas estruturais podem vibrar livremente na ausência de forças externas periódicas, comportamento que permite determinar as frequências naturais e a razão de amortecimento.

Segundo Inman (2018), quando se extrapola este conceito para o entendimento de múltiplos graus de liberdade ou infinitos, visto que se têm infinitos pontos de análise de volume ou elementos elásticos, assim, um método para resolução é a aproximação de sistemas contínuos por sistemas discretos simplificando as soluções e entendimentos por métodos mais precisos.

Em releitura de livro de Junior (2006), a expansão das equações e estudo leva ao entendimento matricial para vários graus de liberdade (GDL), pelo qual é obtido uma matriz de massa, rigidez e amortecimento. O mesmo autor ressalta que essas matrizes serão associadas a vetores de posição, aceleração, velocidade e força, funcionando como sistema acoplado e sendo resolvido de forma simultânea.

Assim, para ampliar o conceito de múltiplos graus de liberdade, em releitura de estudos de Oliveira (2014), o método dos elementos finitos (MEF) constitui uma das principais técnicas numéricas aplicadas à análise estrutural, permitindo a discretização de um meio contínuo em

um conjunto de subdomínios menores, denominados elementos. Oliveira (2014), retrata que esta abordagem possibilita a representação de geometrias complexas, variações de propriedades mecânicas e condições de contorno heterogêneas com maior fidelidade quando comparada a métodos analíticos tradicionais. Ainda conforme o autor, a flexibilidade na escolha do tipo e do tamanho dos elementos confere ao MEF a capacidade de concentrar a malha nas regiões mais solicitadas, tornando-o especialmente eficiente para o estudo de estruturas metálicas, como treliças e passarelas submetidas a carregamentos dinâmicos.

Em conclusão, segundo análise crítica de Savi (2017), é importante aprofundar-se nos conceitos da ressonância, em que a partir de uma análise do sistema submetido a forças harmônicas forçadas será retirado a sua resposta de amplitude de movimento máxima. Savi também discute que esta amplitude irá depender da frequência da força correlacionada com a frequência natural, referente ao sistema analisado, seguindo a Figura a seguir 5.

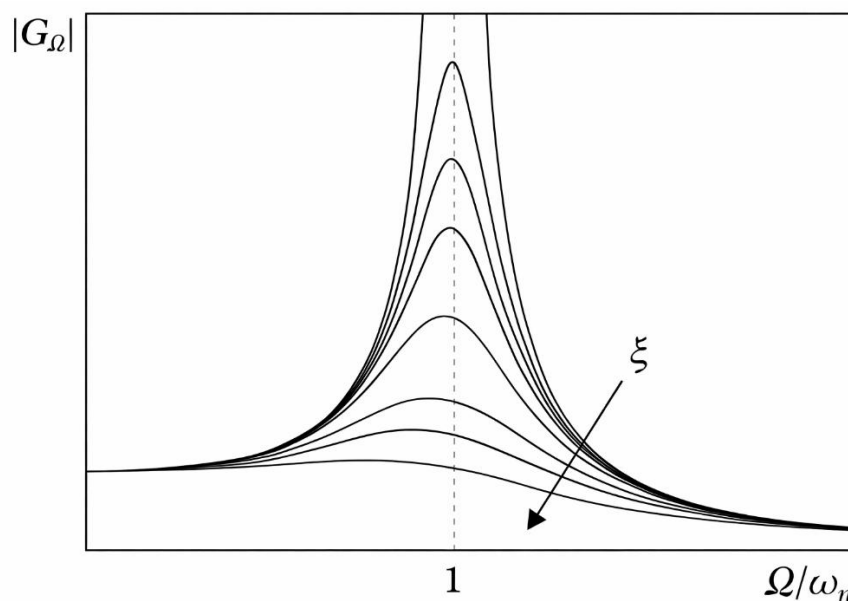


Figura 5– Ressonância e fator de amplificação.
Fonte: Savi (2017).

Observa-se na Figura 5 que a medida que $\xi = \frac{\Omega}{\omega_n}$ se aproxima de 1 a resposta de amplitude $|G\Omega|$ tende a se aproximar do máximo possível, e estoura o limite superior do gráfico.

Segundo Oliveira (2014) e Debona (2016), o primeiro harmônico da caminhada ocorre tipicamente entre 1,8 e 2,2 Hz, enquanto o segundo harmônico responsável pela maior contribuição energética transmitida à estrutura se posiciona justamente entre 3 e 5 Hz, faixa que frequentemente coincide com os modos fundamentais de passarelas metálicas esbeltas. Quando a frequência natural estrutural se situa nesse intervalo, há tendência de amplificação dinâmica, aumento da aceleração vertical e redução do conforto dos usuários, conforme também indicado

em publicações internacionais como o guia de Sétra (2006). Dessa forma, recomenda-se que passarelas metálicas apresentem frequências naturais superiores a 5 Hz, ou, caso isso não seja possível, sejam submetidas a avaliação dinâmica detalhada com verificação dos limites de aceleração admissíveis, conforme o Tabela 2.

Tabela 2 – Frequências de interesse.

Componente da caminhada	Faixa típica (Hz)	Impacto sobre a estrutura
1º harmônico (passo humano)	1,6 – 2,3 Hz	Pode excitar modos estruturais muito baixos
2º harmônico	3,0 – 5,0 Hz	Zona crítica de ressonância com passarelas metálicas

Fonte: Oliveira (2014) *and* Sétra (2006).

Assim, conclui-se que a norma ABNT NBR 8800:2024 desempenha papel central na verificação estrutural dos elementos metálicos analisados. As diretrizes estabelecidas por essa norma orientaram todas as etapas de dimensionamento, desde a definição dos parâmetros mecânicos dos perfis até a verificação dos estados limites últimos e de serviço. Esse arcabouço normativo garantiu coerência técnica às análises desenvolvidas, permitindo que os efeitos de instabilidade, interação entre esforços e variações geométricas fossem tratados de forma consistente com as recomendações vigentes.

Portanto, é entendido que o embasamento normativo e bibliográfico aqui reunido constitui parte essencial do trabalho, assegurando que as verificações apresentadas atendam às boas práticas da engenharia estrutural e reflitam o desempenho esperado para elementos metálicos submetidos às condições de carregamento estudadas. Essa fundamentação técnica garante que os procedimentos e resultados apresentados mantenham aderência às exigências atuais de segurança, confiabilidade e consistência.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta as especificidades da metodologia empregada no desenvolvimento dos tipos de pesquisa, incluindo a classificação do método de dimensionamento e análise de dados, além da descrição dos procedimentos técnicos adotados.

3.1 Tipos de Pesquisa

A luz da releitura dos estudos de Nicholas (2024), esta pesquisa adota uma abordagem quantitativa, de natureza exploratória, combinando com rigor procedimentos técnicos bibliográficos, alinhada a uma pesquisa documental e experimental de simulações, de modo a garantir uma análise profunda e robusta dos dados.

3.2 Materiais e Métodos

Este presente capítulo, visa apresentar os uma proposta para o dimensionamento da passarela e análise dinâmica, que são cruciais para garantir a segurança e eficiência estrutural, conforme ilustrado na Figura 6.

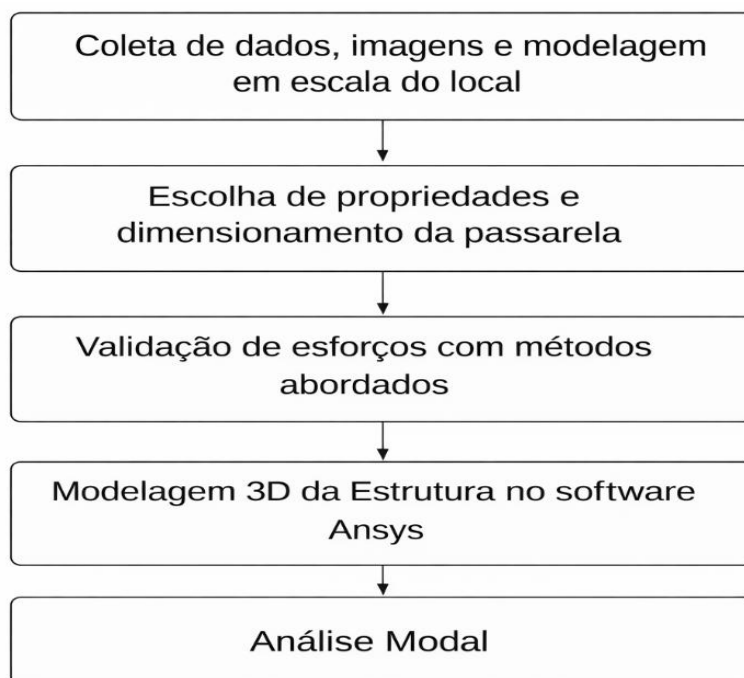


Figura 6 - Fluxograma das etapas do estudo.
Fonte: Pesquisa direta (2024).

Inicialmente, procedeu-se à coleta de dados geoespaciais e imagens do terreno. Para isso, utilizou-se a técnica de captura de imagens de satélite através da plataforma *Google Earth* (2024), com o objetivo de realizar o estudo de implantação e obtenção das medidas da passarela a ser dimensionada. A Figura 7 da área de interesse foi obtida nesta etapa e, posteriormente, importada para o ambiente de modelagem.



Figura 7 – Rodovia dos Inconfidentes Br – 356.
Fonte: *Google Earth* (2024).

A Figura 7 apresenta o terreno de implantação da passarela, representado pela imagem de satélite capturada via *Google Earth* (2024). Nela, é possível visualizar as principais características do local, como a faixa de domínio da rodovia, a topografia geral da área e a presença de elementos naturais e infraestruturas existentes no entorno

Assim, a planta foi ajustada à escala real por meio de vetorização considerando as dimensões originais do terreno, no que foi possibilitado a modelagem no *software Revit student* (2024). Através do ambiente disponibilizado pelo *software*, foram definidos alinhamentos e níveis a partir da planta vetorizada, possibilitou a movimentação de terra necessária. Esta abordagem resultou na modelagem geral final do terreno, que incorporou de forma coesa os elementos de interesse, conforme ilustrado na Figura 8.



Figura 8 - Modelagem do terreno.
Fonte: Pesquisa direta.

Assim, não menos importante, para atender a demanda necessária a altura livre da estrutura foi estabelecida em 6,0 metros, superando o limite mínimo de 5,5 metros preconizado pelo órgão DNIT, assegurando assim uma margem adicional de segurança para o tráfego de veículos. Além de características dos acessos, incluindo rampas e patamares, que foram dimensionadas observando os critérios de acessibilidade da NBR 9050 (2024), garantindo conforto e usabilidade, com projeto de rampas de acesso calculadas em aproximadamente $5,77^\circ$ de inclinação com limite máximo estabelecido em 8,33% de inclinação.

A passarela em questão, visando melhorar a fluidez e o conforto, a largura foi definida com 2,5 metros de largura e 15 metros de extensão conforme figura 9 em sequência. Este modelo permite capacidade de passagem e atende às exigências de segurança e acessibilidade.

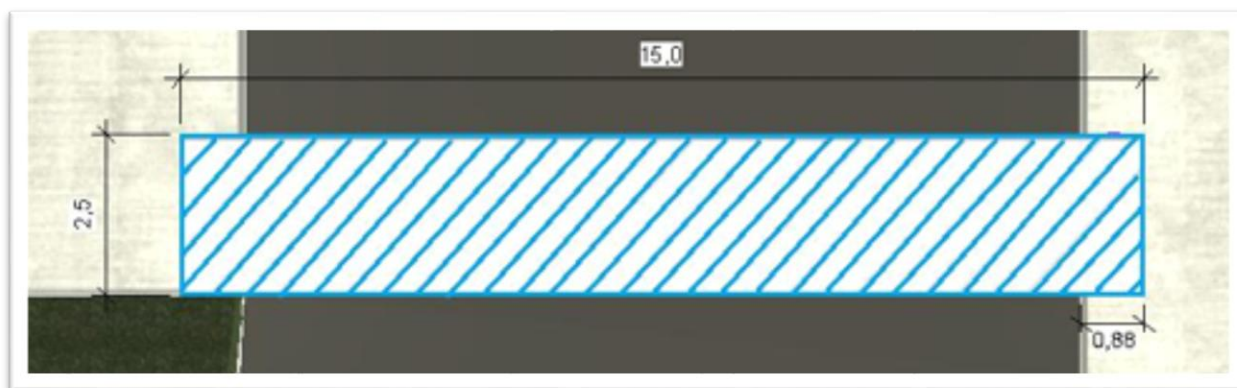


Figura 9 - Pré projeto 2D da passarela.
Fonte: Pesquisa direta.

Inicialmente, procedeu-se ao dimensionamento da estrutura do telhado, etapa fundamental para a definição das ações permanentes e variáveis atuantes sobre a passarela. A partir deste dimensionamento, foi possível obter o peso próprio da cobertura, bem como determinar as ações de vento sobre o telhado e sobre os elementos estruturais associados. Paralelamente, realizou-se a estimativa do peso próprio da estrutura metálica, envolvendo um processo iterativo para identificar o perfil mais adequado dentre as alternativas comerciais, considerando propriedades mecânicas.

Com essas ações dimensionadas peso do telhado, peso teórico dos elementos estruturais da treliça da passarela e cargas devidas ao vento passou-se à etapa de concepção e verificação da treliça principal da passarela. A geometria inicial foi estabelecida com base no estudo anteriormente apresentado, onde, a partir disso, iniciou-se um processo de iteração envolvendo diferentes perfis e materiais para avaliar o comportamento estrutural.

Para analisar os esforços internos, empregou-se o *software Ftool* (2024), no qual foram inseridas as combinações de cargas, a configuração da treliça e as condições reais de apoio. O *software* foi utilizado como ferramenta de validação dos esforços obtidos em cada iteração, permitindo comparar o desempenho estrutural para cada perfil testado e assegurando coerência entre as ações aplicadas e as respostas de cargas de tração e compressão.

O dimensionamento do treliçado foi conduzido com base nas respostas obtidas no *software Ftool*, complementadas pela análise dos perfis estruturais quanto aos Estados Limites Últimos (ELU) e de Serviço (ELS). Nessa etapa, avaliou-se se as tensões e deformações em tração e compressão permaneciam dentro dos limites admissíveis para cada alternativa de perfil. Todas as verificações foram sistematizadas em uma planilha no *software Microsoft Excel*

(2016), permitindo automatizar os cálculos normativos e comparar diferentes configurações estruturais. A integração entre as simulações no *software Ftool* (2024), os cálculos analíticos e o processo iterativo de avaliação possibilitaram a seleção de uma solução estrutural segura, funcional e compatível com os requisitos de projeto.

Com os esforços validados, foi realizada a modelagem 3D da treliça principal da passarela no *software Ansys* (2025.2) permitindo uma representação detalhada dos componentes estruturais e análises estáticas. A partir desse modelo, foi feita a modelagem no ambiente de trabalho *SpaceClaim* que é incluído no *software Ansys* (2025.2), possibilitando a flexibilidade necessária para a etapa de análise dinâmica.

Na sequência, o modelo foi importado para o ambiente de trabalho *Workbench* do *software Ansys* (2025.1) que realiza a análise por elementos finitos (FEM), onde foram aplicadas as condições de contorno e carregamentos definidos previamente.

Finalmente, procedeu-se à análise modal. Esta análise foi fundamental para identificar as frequências naturais da passarela e avaliar sua resposta dinâmica frente a forças externas, assegurando que as suas respostas a vibrações estivessem dentro dos limites normativos e aceitáveis.

Ressalta-se que o presente trabalho teve como objetivo principal avaliar a viabilidade estrutural da passarela metálica, com base nos critérios de dimensionamento, verificação de esforços, deslocamentos e estabilidade global, conforme as prescrições normativas aplicáveis. Nesse sentido, as análises desenvolvidas permitem verificar o desempenho estrutural do sistema proposto sob as ações consideradas.

Contudo, destaca-se que o estudo realizado não substitui nem esgota as análises necessárias relacionadas à segurança viária, à mobilidade urbana e ao comportamento funcional da passarela no contexto do tráfego de pedestres e veículos. Tais aspectos demandam estudos complementares específicos, envolvendo análises de circulação, acessibilidade, sinalização, impacto urbano e integração com o sistema viário existente, os quais extrapolam o escopo deste trabalho.

3.3 Variáveis e Indicadores

De acordo com Gil (2024), uma variável refere-se a algo que pode variar em termos de valores ou categorias. Pode ser numérica, como temperatura, idade ou renda, ou categórica, como sexo (masculino/feminino) e classe social (alta, média, baixa). No contexto de pesquisas,

as variáveis são fundamentais para a análise e comparação de dados, permitindo uma avaliação criteriosa dos fenômenos estudados.

No contexto de um projeto, como o de uma passarela, as variáveis e indicadores são essenciais para garantir um planejamento eficiente. As variáveis, como dimensões da passarela, carga aplicada, esforços estruturais e condições ambientais, são fundamentais para avaliar o comportamento da estrutura. Já os indicadores, como resistência, estabilidade e conformidade com normas técnicas, são indispensáveis para medir o sucesso e a segurança do projeto, permitindo ajustes e melhorias no dimensionamento da estrutura, visualizados no Tabela 3.

Tabela 3 - Variáveis e indicadores.

Variáveis	Indicadores
Dimensões da Passarela	Resistência Estrutural
Carga Aplicada	Estabilidade
Esforços Estruturais	Durabilidade
Frequência de Vibração	Conformidade Normativa
Condições Ambientais	Eficiência do Projeto

Fonte: Pesquisa direta (2024).

3.4 Instrumentos e coleta de dados

Para garantir a precisão e a eficácia na coleta de dados, foram utilizados diversos instrumentos e ferramentas ao longo do desenvolvimento deste projeto. O *Google Earth* (2024) foi fundamental para realizar levantamentos topográficos e obter medidas exatas do local de instalação, enquanto o *software Revit student* (26.0.10.8) permitiu a modelagem 3D detalhada do local de instalação. Para as simulações estruturais e análise de vibrações, foram utilizados os *softwares*, *Ansys* (2025.2) e *Ftool* (2024), que garantiram um dimensionamento adequado da estrutura. Por fim, o *software Microsoft Excel* (2016) foi empregado para cálculos e simulações, complementando o trabalho com dados e gráficos essenciais.

3.5 Tabulação de dados

Com o objetivo de proporcionar uma análise mais intuitiva e clara, os dados coletados são organizados e tabulados no *software Microsoft Excel* (2025), em que gráficos e tabelas são gerados para facilitar a visualização das informações. Além disso, os registros e resultados são elaborados de forma explicativa e detalhada no *software Microsoft Word* (2025), assegurando uma apresentação bem estruturada dos dados relevantes ao projeto.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos no processo de definição geométrica, análise das ações atuantes e dimensionamento estrutural da passarela metálica proposta. As informações expostas refletem exclusivamente os valores finais adotados para o projeto, bem como as respostas estruturais observadas a partir da modelagem.

4.1 Geometria Final e Parâmetros de Implantação

A passarela projetada apresentou altura livre interna de 2,80 (m), largura útil de 2,50 (m) e extensão total de 15,0 (m), valores que atendem plenamente aos critérios normativos e funcionais aplicáveis a estruturas destinadas à circulação de pedestres. A altura adotada supera o valor mínimo recomendado pela ABNT NBR 9050:2020, garantindo conforto espacial, adequada percepção visual e segurança aos usuários, além de compatibilidade com soluções de cobertura metálica e com a implantação de eventuais sistemas complementares, conforme figura 10 a seguir.

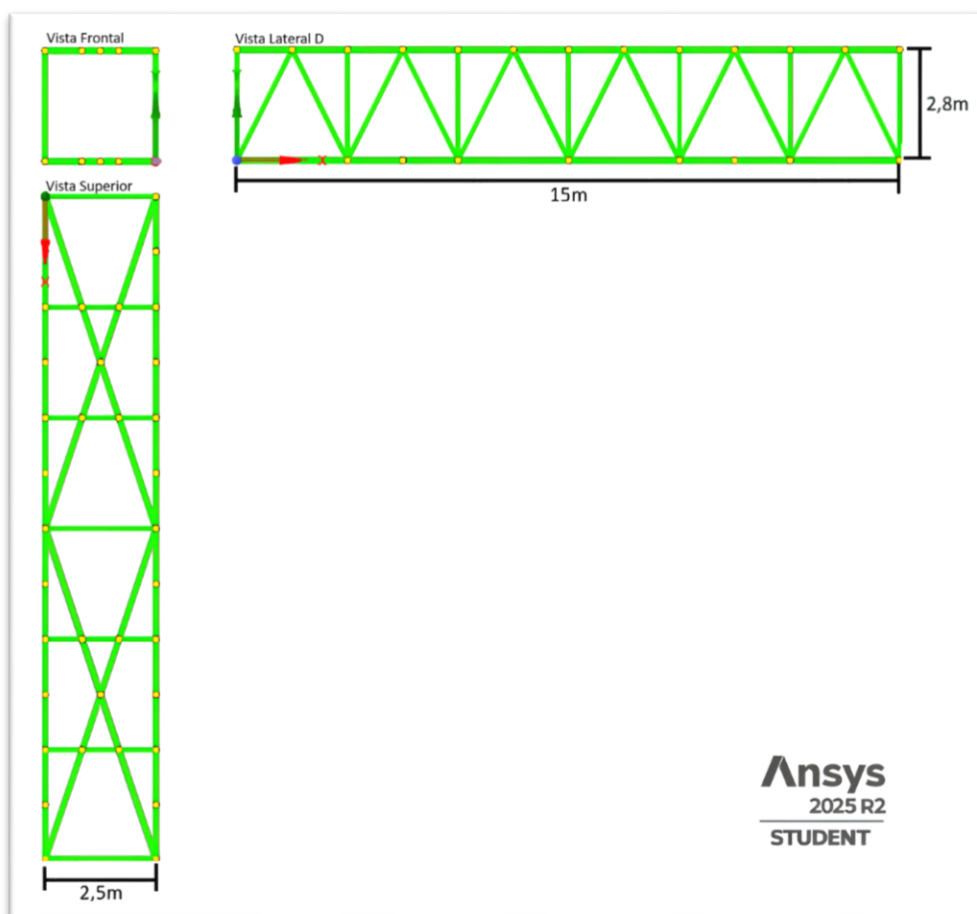


Figura 10 – Vistas do treliçado da passarela.
Fonte: Pesquisa direta.

A largura útil de 2,50 (m) demonstrou-se adequada ao fluxo bidirecional de pedestres e cadeirantes, permitindo a circulação simultânea e confortável de usuários com mobilidade reduzida em cenário crítico. A dimensão atende à norma ABNT NBR 9050:2020, que estabelece 2 (m) como largura mínima, e alinha-se também às diretrizes do DNIT ISF-219:2021 para projetos de passarelas sobre vias rodoviárias. Essa largura contribui para a redução de conflitos de fluxo, melhora as condições ergonômicas do deslocamento e favorece o cumprimento dos requisitos de segurança operacional.

A extensão total de 15,0 (m) mostrou-se adequada para transpor a via, considerando a largura típica de 10,0 m indicada pelo DNIT para vias desse porte, confirmada pela medição real via Google Earth (2024). Essa dimensão permitiu a adoção de uma solução estrutural eficiente, baseada em uma treliça metálica, que atende aos requisitos de funcionalidade e integração urbana. A configuração garante uma transposição segura e desobstruída, com proporções harmoniosas em relação ao entorno, conforme ilustrado pela visualização em 3D e pela elevação em escala da Figura 11.

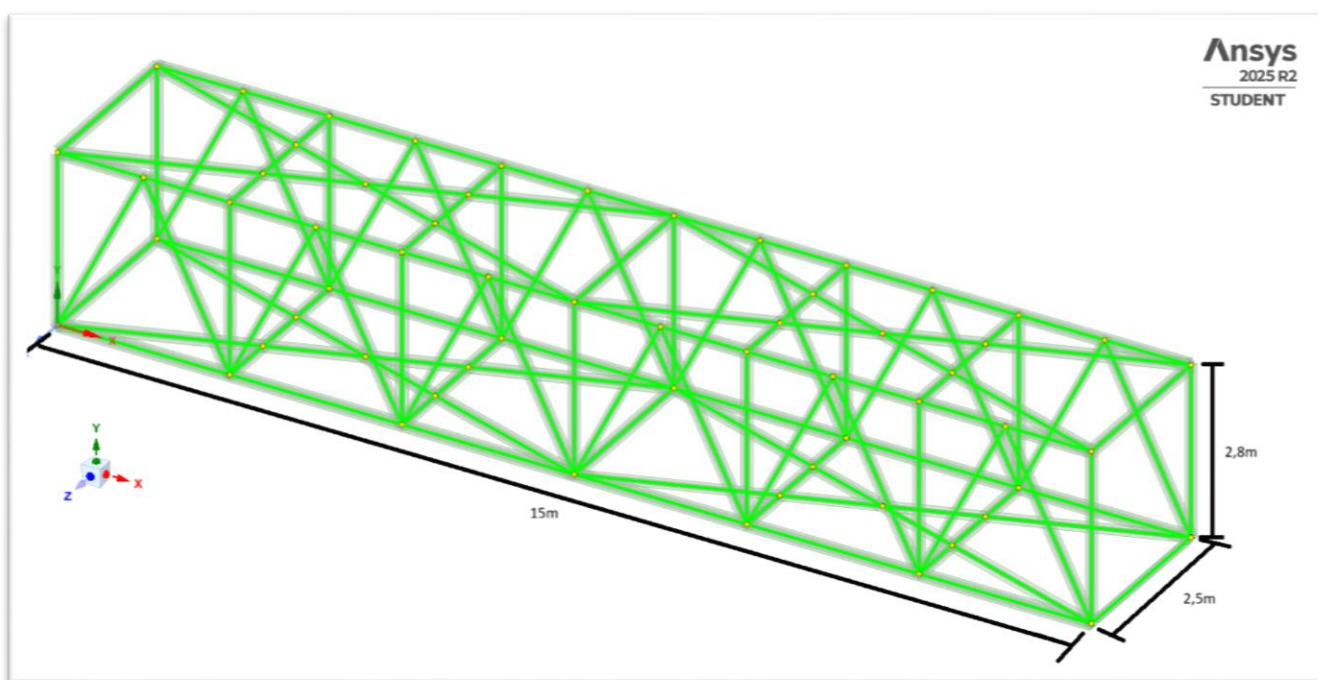


Figura 11 – Visualização tridimensional da treliça.
Fonte: Pesquisa direta.

A altura livre final estabelecida foi de 6 m, valor que supera o mínimo recomendado para garantir segurança ao tráfego de veículos. As rampas de acesso foram dimensionadas com inclinação de 5,57%, distribuída em quatro segmentos contínuos, largura de 3 m e patamar intermediário, assegurando acessibilidade e conforto ao usuário. A plataforma superior foi

definida com largura de 2,5 m e altura interna de 2,8 m, proporcionando fluidez adequada ao deslocamento de pedestres ilustrado na figura 12 e figura 13.

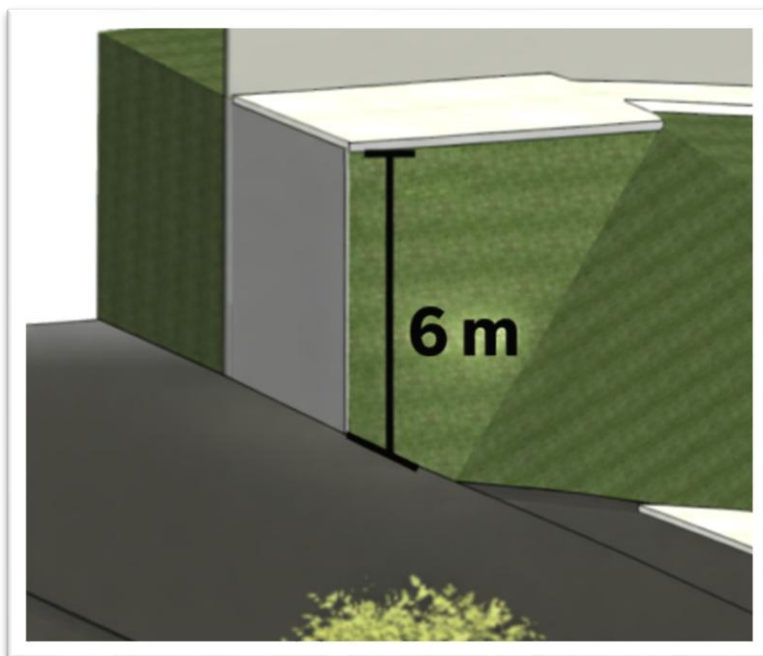


Figura 12 – Altura de instalação da passarela.
Fonte: Pesquisa direta.

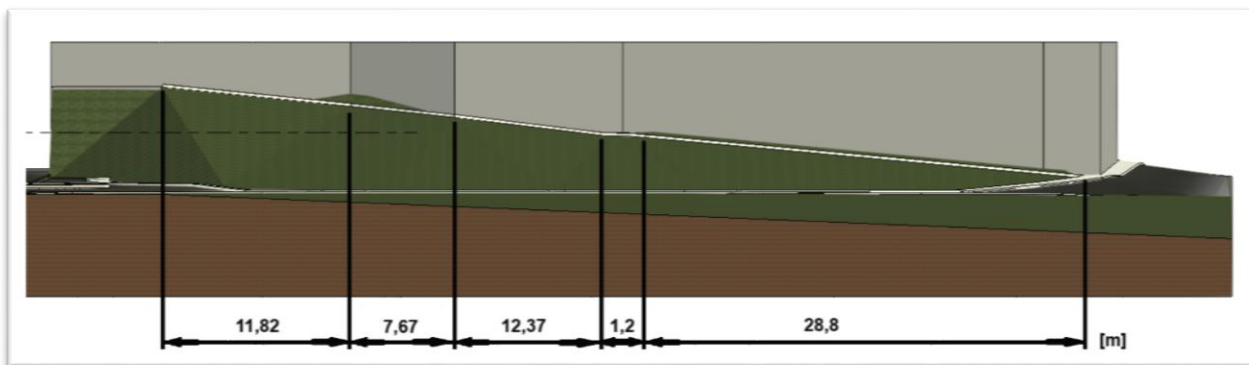


Figura 13 – Rampa de acesso – dimensões em metros.
Fonte: Pesquisa direta.

4.2 Ações Estruturais

A ação do vento resultou em uma velocidade característica de 33 m/s, a partir da qual foi determinada a pressão dinâmica do vento, calculada conforme os critérios estabelecidos na ABNT NBR 6123:2023, resultando em um valor de 667,56 N/m². A análise dos coeficientes de forma e pressão resultou em um carregamento crítico de sucção equivalente a 80 kg/m², valor utilizado nas verificações de cobertura e de dimensionamento geral da estrutura.

A majoração das ações adotada no dimensionamento segue os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 8681:2020, a qual define os coeficientes parciais aplicáveis às cargas permanentes e variáveis nas combinações de cálculo. Conforme a norma, as ações permanentes desfavoráveis foram majoradas por um coeficiente típico de 1,4 ou 1,5, enquanto as ações variáveis, como sobrecargas de uso e efeitos do vento, receberam coeficientes compatíveis com sua natureza e probabilidade de ocorrência. Assim, a majoração das cargas não representa um aumento real das solicitações, mas um artifício normativo essencial para assegurar níveis adequados de segurança estrutural conforme os Estados Limites Últimos prescritos em norma.

As cargas atuantes na estrutura foram quantificadas conforme a Tabela 4, resultando nos valores finais:

Tabela 4 – Cargas envolvidas em kN.

Elemento	Carga	Carga Majorada
Telhado	8,27	10,34
Vento	31,2	43,68
Piso	19,21	24,01
Treliçado	34,03	42,54
Carga Móvel	187,5	271,25

Fonte: Pesquisa direta.

Com base nessas magnitudes e na disponibilidade comercial, adotou-se como elemento principal o perfil W150×13,0, que apresentou desempenho satisfatório nas verificações subsequentes.

4.3 Esforços Estruturais e Desempenho da Treliça

A treliça foi modelada em *software Ftools* (2024) considerando a distribuição das cargas permanentes e variáveis conforme sua ação na estrutura. A corda inferior de um lado da treliça, visto que a passarela é composta por dois treliçados paralelos, foi submetida a um carregamento linear de 10,88 kN/m, enquanto os elementos superiores receberam 2,51 kN/m, carregamentos estes considerando duas treliças planas evidenciada na figura 14.



Figura 14 – Modelo da treliça plana.
Fonte: Pesquisa direta.

A análise estrutural em *software Ftools* (2024) resultou nos valores máximos de esforço axial, visualizados na figura 15 a seguir.

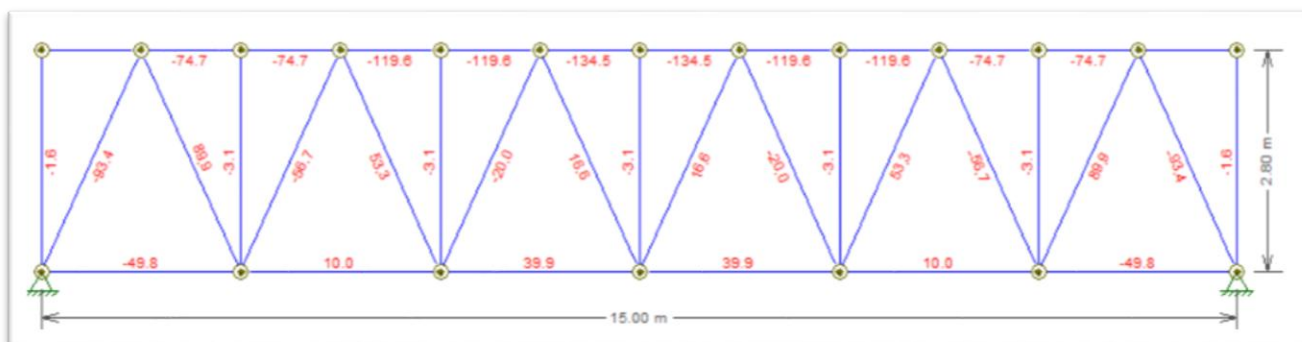


Figura 15 – Distribuição dos esforços axiais na treliça.
Fonte: Pesquisa direta.

- Esforço máximo de compressão: 135 kN;
- Esforço máximo de tração: 94 kN.

Esses valores permitiram identificar os elementos críticos e serviram como referência para as verificações de resistência. O comportamento global obtido mostrou boa distribuição de esforços, com predominância de compressão nos banzos superiores e tração nas cordas inferiores.

4.4 Verificações de Resistência

4.4.1 Compressão

A resistência à compressão do perfil W150×13 resultou nos seguintes valores, os quais sintetizam o comportamento global e local do elemento quando submetido aos esforços obtidos na análise estrutural:

- Carga crítica elástica no eixo x: 2005,5 kN;
- Carga crítica elástica no eixo y: 259,0 kN;
- Esbeltez reduzida: $\lambda_o = 1,42$;
- Fator de redução: $\chi = 0,4295$;
- Largura efetiva da mesa: 130,6 mm;
- Área efetiva: $A_{ef} = 0,00215 \text{ m}^2$;
- Resistência de cálculo: $N_c, R_d = 319,3 \text{ kN}$.

Como comparação, o esforço solicitante foi de 135 kN, o que indica uma utilização de aproximadamente 42,3% da capacidade resistente. Assim, o elemento apresenta comportamento seguro à compressão, com margem estrutural satisfatória.

4.4.2 Tração

Considerando os coeficientes ϕ conforme as normas anteriormente apresentadas para o perfil W150x13 selecionado nesta passarela, com a área bruta de 16,6 cm², foram calculados a seção líquida e a seção bruta, onde foi obtido:

- $N_t R_d$, Resistência de cálculo ao escoamento: 475 kN;
- $N_t R_d$, Resistência de cálculo à ruptura: 541 kN.

Tais valores excedem amplamente o esforço máximo solicitante de 94 kN, que corresponde a uma utilização de 19,79%, confirmando que o perfil escolhido atende com folga às exigências de segurança no regime de tração.

4.5 Análise Modal no Ansys

Com base no processo de modelagem numérica apresentado, conclui-se que a definição do modelo estrutural no ambiente de elementos finitos foi conduzida de forma coerente com os objetivos do estudo. A correta importação da geometria, a atribuição das propriedades dos materiais, a definição das seções transversais e a geração da malha garantiram uma representação adequada do comportamento físico da passarela metálica. Essas etapas iniciais foram fundamentais para assegurar a confiabilidade dos resultados obtidos na etapa de análise modal.

A aplicação das condições de contorno, por meio dos apoios fixos definidos no ponto A e B representados na Figura 16 em corte do modelo. A consideração da aceleração da gravidade permitiu uma representação mais fiel do estado físico da estrutura, influenciando a distribuição de massas e, conseqüentemente, a resposta dinâmica do sistema.

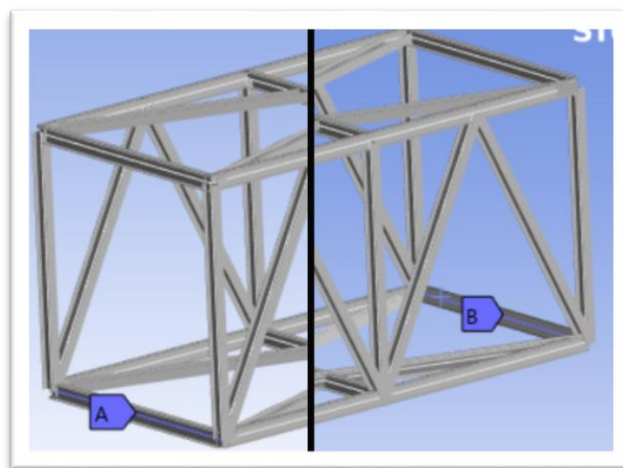


Figura 16 – Condições de apoio fixo nos pontos A e B.
Fonte: Pesquisa direta.

A análise modal realizada permitiu determinar as frequências naturais e os modos de deformação associados, fornecendo subsídios importantes para a avaliação do conforto e da segurança dos usuários. A análise dos deslocamentos evidenciou um comportamento estrutural compatível com o uso por pedestres, indicando que a rigidez global da estrutura é adequada. Dessa forma, o estudo contribui para a verificação do desempenho dinâmico da passarela, aspecto essencial em projetos dessa natureza.

Observou-se que os primeiros modos são dominados por movimentos globais, com flexão vertical do tabuleiro e deslocamentos laterais, influenciados por ações de vento e pelo tráfego de pedestres. Esses modos correspondem a padrões naturais de deformação da estrutura, associados a frequências específicas e dependentes de propriedades como geometria, rigidez, massa e condições de contorno, sendo essenciais para a compreensão da resposta dinâmica do sistema.

Em análises modais, os modos de vibração permitem compreender como a estrutura responde dinamicamente a diferentes estímulos. A identificação desses padrões é fundamental

para avaliar o conforto dos usuários e evitar fenômenos indesejáveis como o de ressonância. A seguir, a tabela mostra os três primeiros modos de vibração deste treliçado.

Tabela 5 – Frequências naturais obtidas na análise modal.

Modo	Frequência (hz)
1	10,431
2	17,316
3	22,379

Fonte: Pesquisa direta.

Os modos superiores aos apresentados superaram os 23Hz e trazem formas de vibração mais complexas, envolvendo deformações localizadas em diagonais e montantes. A predominância de modos globais de baixa frequência confirma o comportamento esperado para estruturas metálicas esbeltas de vão intermediário, evidenciando que este projeto está seguro para aplicação, sendo todos os modos são superiores aos 5 Hz que garante que a passarela não entrará em ressonância com a passada humana.

O primeiro modo de vibração corresponde predominantemente à flexão vertical do tabuleiro, ocorrendo a uma frequência natural de 10,431 Hz. Nesse modo, observa-se um comportamento global da estrutura, no qual o tabuleiro apresenta deslocamentos verticais mais significativos, característicos de sistemas esbeltos submetidos a ações dinâmicas. Esse modo é especialmente relevante para a avaliação do conforto dos pedestres, uma vez que está diretamente associado às excitações induzidas pela caminhada e pela movimentação dos usuários sobre a passarela, demonstrado na figura 17 a seguir.

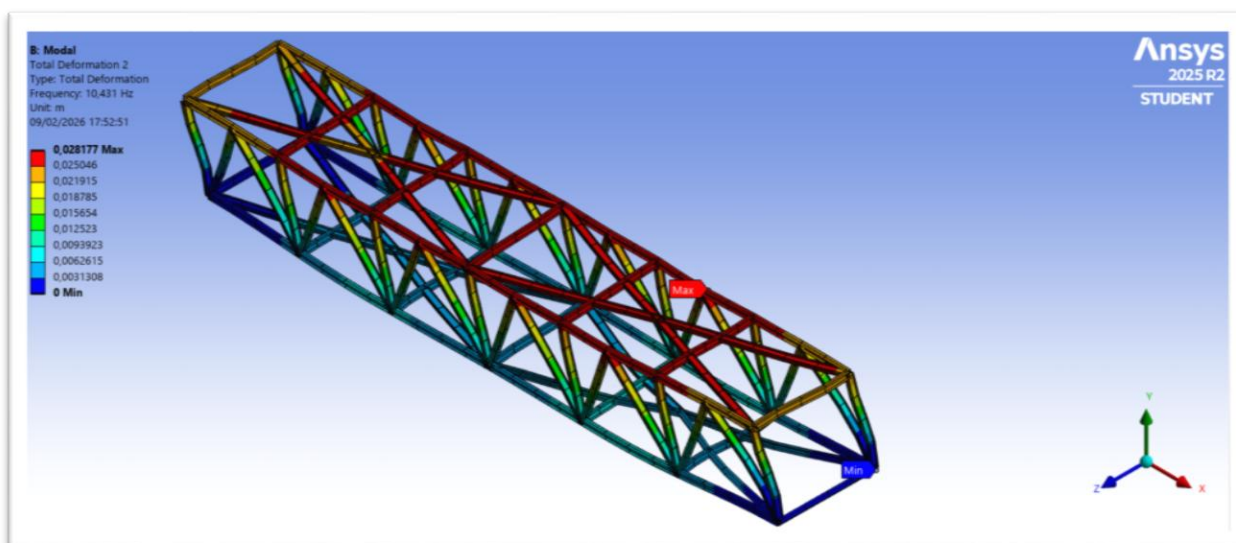


Figura 17 – Modo 1 de vibração – flexão vertical.
Fonte: Pesquisa direta.

O segundo modo de vibração caracteriza-se pela oscilação lateral da treliça, associado a uma frequência natural de 17,316 Hz. Nesse modo, predominam deslocamentos transversais da estrutura, evidenciando a resposta global do sistema frente a excitações horizontais, como aquelas induzidas pela ação do vento ou pela movimentação assimétrica dos pedestres. A identificação desse modo é fundamental para a avaliação da estabilidade lateral e do comportamento dinâmico da passarela, a seguir visualizado na figura 18.

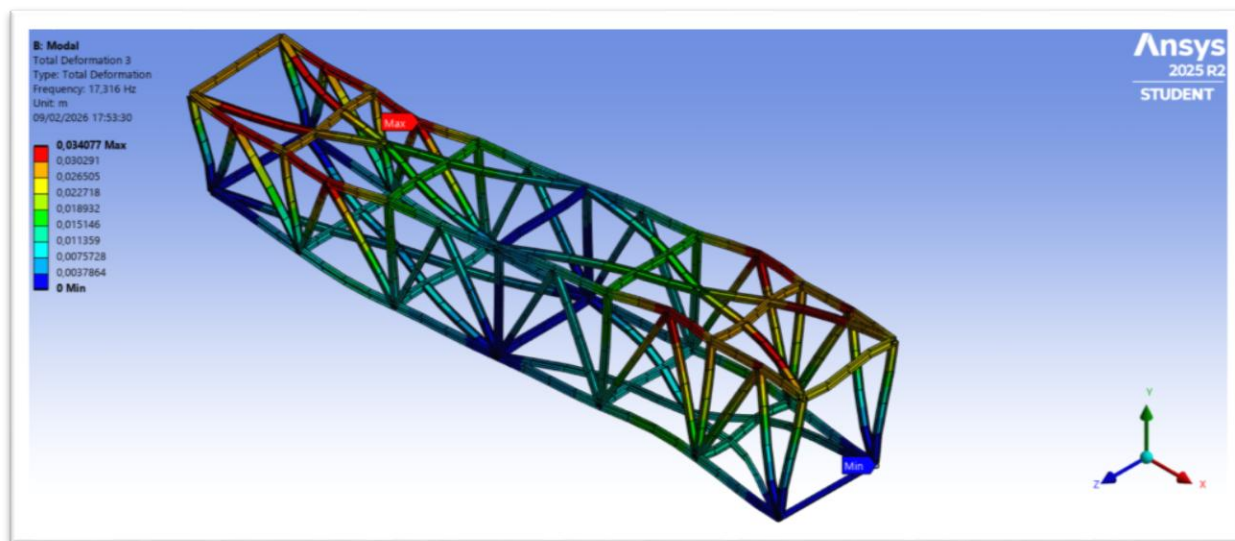


Figura 18 – Modo 2 de vibração – oscilação lateral.
Fonte: Pesquisa direta.

O terceiro modo de vibração está associado à torção global da estrutura, ocorrendo a uma frequência natural de 22,379 Hz. Nesse modo, observa-se a rotação do conjunto estrutural em torno do eixo longitudinal, resultante da interação entre a rigidez torsional da treliça e a distribuição de massas do sistema. Esse comportamento é relevante para a avaliação da integridade estrutural e do desempenho dinâmico da passarela, especialmente sob ações excêntricas e combinações de carregamentos assimétricos, associado a figura 19.

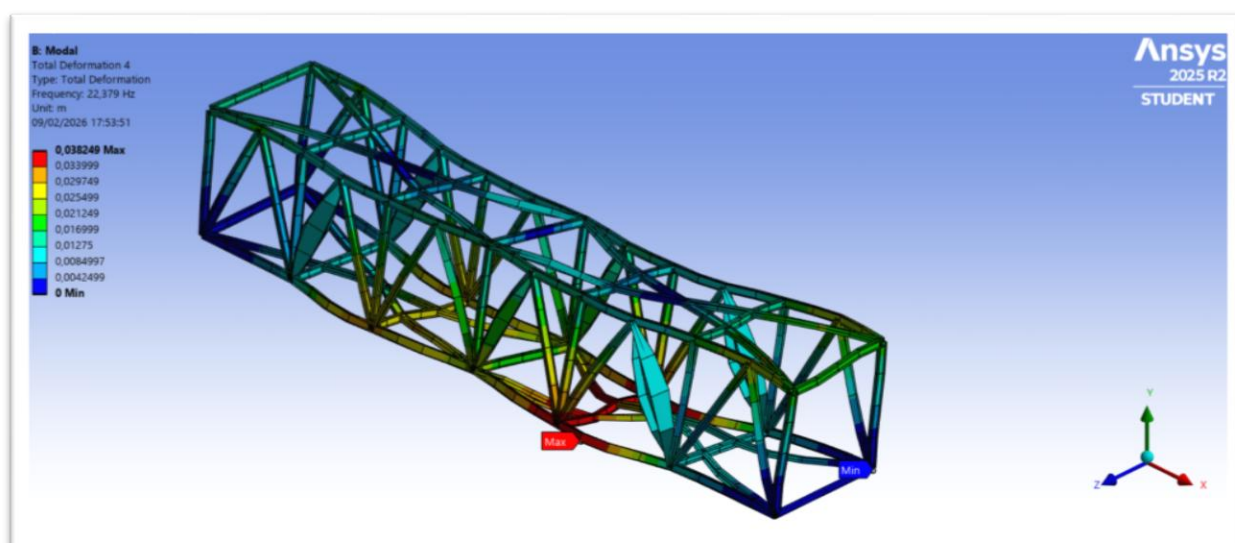


Figura 19 – Modo 3 de vibração – torção global.
Fonte: Pesquisa direta.

A comparação dos modos de vibração, a partir das vistas frontal, lateral e superior, permite uma compreensão global do comportamento dinâmico da estrutura. Observa-se que cada modo apresenta padrões distintos de deformação, evidenciando diferentes mecanismos de resposta associados à flexão, oscilação lateral e torção do sistema estrutural. A análise conjunta dessas vistas facilita a identificação das regiões com maiores amplitudes de deslocamento e a forma como a estrutura se deforma espacialmente. Dessa forma, as figuras 20, 21 e 22 permitem a comparação visual dos modos contribuem para a interpretação dos resultados da análise modal e para a avaliação qualitativa da rigidez e do desempenho dinâmico da passarela.

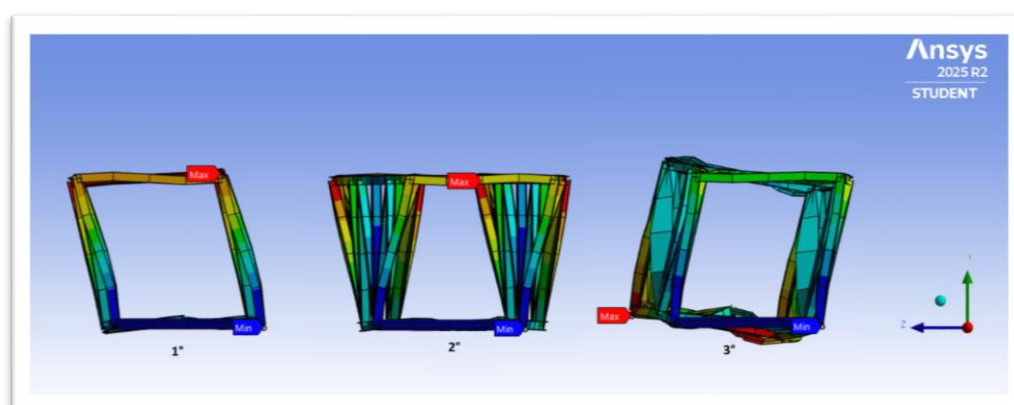


Figura 20 – Vista frontal dos modos de vibração.
Fonte: Pesquisa direta.

Na Figura 20 é possível compreender e visualizar a diferença de vibração entre os modos analisados por meio da observação frontal da estrutura. Essa perspectiva evidencia as distintas formas modais associadas a cada frequência natural.

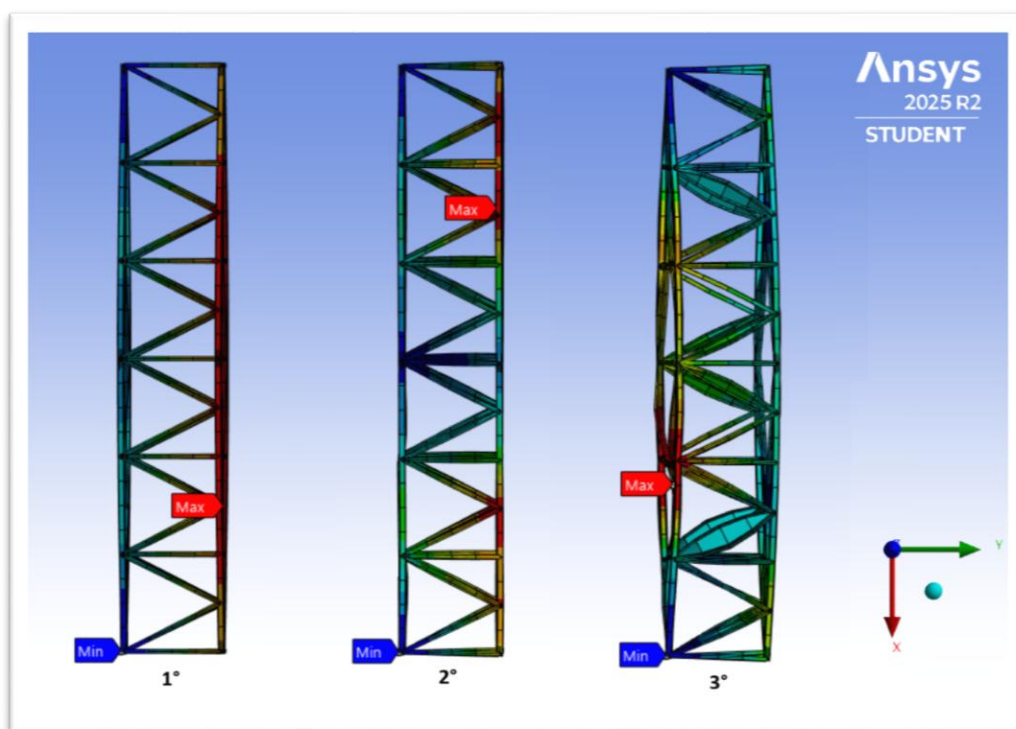


Figura 21 – Vista lateral e superior dos modos de vibração.
Fonte: Pesquisa direta.

Na Figura 21, a observação lateral permite identificar com maior clareza os deslocamentos verticais associados aos modos de vibração analisados. Essa perspectiva evidencia a distribuição das amplitudes ao longo do vão e a participação global da estrutura.

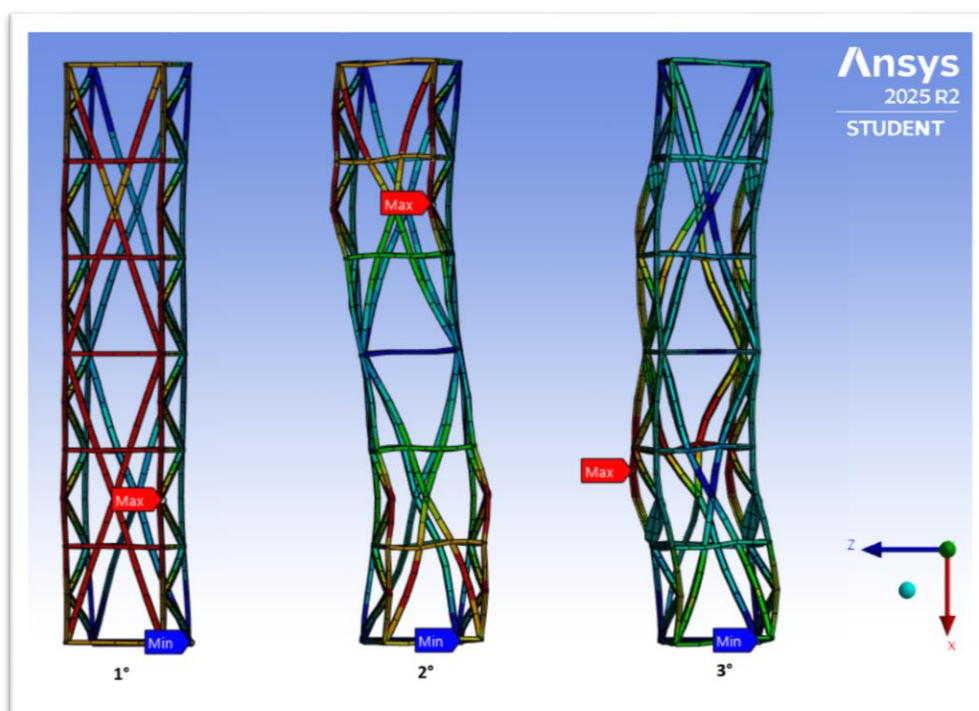


Figura 22 – Vista superior dos modos de vibração.
Fonte: Pesquisa direta.

Na Figura 22, a visualização superior possibilita a análise dos deslocamentos transversais e dos efeitos de torção presentes nos modos de vibração estudados. Essa perspectiva destaca assimetrias no comportamento dinâmico da estrutura. As diferenças entre os modos são observadas principalmente na forma como as seções transversais participam da vibração.

De modo geral, os resultados obtidos demonstram que a passarela apresenta comportamento dinâmico coerente com o sistema estrutural adotado. As frequências naturais calculadas situam-se em faixas compatíveis com as recomendações normativas, indicando desempenho satisfatório quanto ao conforto dos usuários.

5 CONCLUSÃO

5.1 Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo o dimensionamento estrutural e a avaliação do desempenho dinâmico de uma passarela metálica para pedestres a ser implantada na Rodovia dos Inconfidentes (Agostinho Rodrigues), no município de Itabirito – MG, integrando aspectos normativos, estruturais e sociais. A proposta buscou atender às necessidades de segurança viária e mobilidade, ao mesmo tempo em que se manteve em conformidade com as exigências técnicas estabelecidas pelas normas brasileiras vigentes escolhidas.

A partir do levantamento das condições de implantação e da definição dos parâmetros geométricos, foi possível estabelecer uma solução estrutural compatível com o local estudado, respeitando critérios de acessibilidade, altura livre mínima, largura de circulação e segurança dos usuários. A escolha da estrutura metálica mostrou-se adequada, sobretudo pela elevada relação resistência/peso, facilidade construtiva e possibilidade de execução modular, características favoráveis a intervenções em ambientes urbanos consolidados.

O dimensionamento estrutural, realizado com base na ABNT NBR 8800:2024, indicou que o perfil adotado atende com ampla margem aos Estados Limites Últimos e de Serviço, evidenciando um elevado nível de segurança estrutural. Entretanto, é importante ressaltar que a NBR 8800, por ser voltada predominantemente a perfis laminados e soldados, tende a conduzir a soluções mais conservadoras quando aplicada a elementos constituídos por chapas dobradas. Nesse contexto, a utilização da ABNT NBR 14762:2010 — Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio poderia resultar em valores de resistência e esbeltez mais condizentes com o comportamento real esperado para uma passarela metálica, possibilitando soluções estruturalmente adequadas e potencialmente mais otimizadas.

A análise dinâmica realizada por meio do método dos elementos finitos no *software Ansys* (2025) permitiu identificar as frequências naturais e os modos de vibração da passarela. Os resultados mostraram que a frequência fundamental da estrutura é superior a 10 Hz, valor significativamente acima da faixa crítica associada às excitações induzidas pelo caminhar humano. Dessa forma, conclui-se que a estrutura não apresenta risco de ressonância ou desconforto excessivo aos usuários, atendendo aos critérios de desempenho dinâmico recomendados na literatura técnica.

Assim, os resultados obtidos indicam que a solução proposta apresenta um elevado nível de segurança estrutural, atendendo plenamente aos requisitos normativos e aos critérios de desempenho estático e dinâmico estabelecidos para passarelas metálicas. As verificações realizadas demonstraram que os elementos estruturais operam com níveis de solicitação significativamente inferiores às suas capacidades resistentes, evidenciando um comportamento estrutural conservador.

Dessa forma, embora a passarela proposta se mostre tecnicamente adequada sob a ótica de engenharia, o estudo evidencia a importância de uma abordagem integrada que considere não apenas o desempenho mecânico, mas também aspectos de otimização estrutural, custo, construtibilidade e melhor escolha do processo de dimensionamento. Nesse sentido, o trabalho contribui para a compreensão crítica de projeto reforçando a necessidade de análises comparativas em etapas preliminares de concepção.

5.2 Recomendações

Visto o desenvolvimento deste estudo, pode-se avaliar como alternativas de melhoria os seguintes tópicos:

- Estudo de viabilidade com desenvolvimento de perfis de menor porte, não disponíveis em indústria convencional.
- Aplicação de outros métodos de dimensionamento com abordagem de outras normas.

Por fim, destaca-se que o estudo desenvolvido pode servir como base para projetos futuros semelhantes, podendo ser aprimorado. Então, assim, recomenda-se os pontos a seguir as propostas:

- Estudo de viabilidade econômica da aplicação da passarela dimensionada.
- Controle de vibração por mudança de rigidez: efeito de camadas de borracha aplicadas às superfícies estruturais na frequência natural de passarelas em simulação.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7188: Passarelas e pontes: critérios para projeto, cálculo e execução**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9050: Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos**. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8681:2020 — Ações e segurança nas estruturas — Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6123:2023 – Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

BATISTA, Magno Dourado. **Análise dinâmica e controle de vibrações em passarela da Octogonal – Brasília**. 2018. 98 f. Dissertação (Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **ISF-219: Projeto de passarela para pedestres**. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/ferrovias/instrucoes-de-servicos-ferroviarios/isf-219-projeto-de-passerela-para-pedestres.pdf>. Acesso em: 18 set. 2024.

CHIAVERINI, Vicente. **Aço e ferros fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1996.

BELLEI, I. H. **Edifícios industriais em aço: projeto e montagem**. São Paulo: Oficina de Textos. Disponível em: https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/ofitexto.arquivos/degustacao/edificios-industriais-aco_deg.pdf. Acesso em: [04/01/2026].

DEBONA, Gilvan Lunz. **Monitoração experimental e modelagem numérica sobre a resposta estrutural dinâmica de passarelas de pedestres**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <https://www.bdt.d.uerj.br:8443/handle/1/22119>. Acesso em: 3 dez. 2025.

FAKURY, Ricardo Hallal; CASTRO E SILVA, Ana Lydia Reis de; CALDAS, Rodrigo Barreto. **Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016. E-book. ISBN 9788581434114. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/2172/pdf/0>. Acesso em: 22 jul. 2024.

FERNÁNDEZ, Bianca Oliveira. **Sistemas de treliças modulares para pontes de madeira: uma boa alternativa para o Estado do Pará**. 2010. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. Disponível em: https://producaocientifica.eesc.usp.br/producao/2010ME_BiancaOliveiraFernandez.pdf. Acesso em: 21 ago. 2024.

FERREIRA FILHO, José Osvaldo. **Estudo sobre os métodos convencionais de reabilitação e reforço de estruturas de aço**. 2017. 85 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2017.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017. E-book. ISBN 9788597011340. Disponível

em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597011340/>. Acesso em: 23 set. 2024.

GRAEBIN, Laerti. **Dimensionamento de uma passarela em estrutura metálica na cidade de Novo Hamburgo/RS**. 2018. 110 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2018.

GRILLO, Newton Luiz. **Introdução ao estudo de vibrações mecânicas**. São Paulo: Blucher, 2021. E-book. ISBN 9788521214358.

INMAN, Daniel J. **Vibrações mecânicas**. Rio de Janeiro: LTC, 2018. E-book. ISBN 9788521632706.

GOOGLE EARTH. **Imagem de satélite da região metropolitana de Minas Gerais**. 2024. Disponível em: <https://earth.google.com>, Acesso em: 10 fev. 2024.

JUNIOR, José Santiago. **Introdução às vibrações mecânicas**. São Paulo: Blucher, 2006.

KASSIMALI, Aslam. **Análise estrutural**. 5. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016. E-book. ISBN 9788522125050. KELLY, S. Graham. **Vibrações mecânicas: teorias e aplicações**. São Paulo: Cengage Learning, 2018. E-book. ISBN 9788522126712.

LIRA, Bruno Carneiro. **O passo a passo do trabalho científico**. Petrópolis, RJ: Vozes, 2018. E-book. ISBN 9788532658958.

MINAS GERAIS. Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Panorama da mineração em Minas Gerais – 2016**. Belo Horizonte: FEAM, 2016. Disponível em: <http://www.feam.br>. Acesso em: 25 jul. 2024.

MINAYO, Maria Cecília de Souza (Org.). **Pesquisa social: teoria, método e criatividade**. 26. ed. Rio de Janeiro: Vozes, 2007.

NETO, Antonio dos Reis de F. et al. **Vibrações mecânicas**. Porto Alegre: Bookman, 2022. E-book. ISBN 9788582606040.

OLIVEIRA, Henrique Guimarães de. **Estudo dos efeitos causados por vibrações induzidas por humanos em passarelas metálicas treliçadas**. 2014. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/101201>. Acesso em: 3 dez. 2025.

PAULA, Hugo Carneiro de. **Comparação entre sistemas treliçados do tipo Pratt, do tipo Warren e do tipo Howe, com foco no menor peso**. 2023. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade Ari de Sá, Fortaleza, 2023.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michele. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

PINEDO, Carlos E. **Tratamentos térmicos superficiais de aços**. São Paulo: Blucher, 2021. E-book. ISBN 9788521213849.

RAO, Singiresu S. **Vibrações mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2008.

SAVI, Marcelo A.; PAULA, Aline S. **Vibrações mecânicas**. Rio de Janeiro: LTC, 2017. E-book. ISBN 9788521632621.

SÉTRA – Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes. **Footbridges: assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading – Technical guide**. Paris: Sétra, 2006. Disponível em: <https://www.setra.equipement.gouv.fr/>. Acesso em: 3 dez. 2025.

SILVA, André Luiz V. da Costa E. **Refino dos aços: fundamentos e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2023. E-book. ISBN 9788521214778.

SILVA, André Luiz V. da Costa; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2021. E-book. ISBN 9788521213771.

SOMMER, Rosana Maria Rennó. **Análise de vibrações em pisos mistos aço/concreto**. 2002. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

WALLIMAN, Nicholas. **Métodos de pesquisa**. Rio de Janeiro: LTC, 2015. E-book. ISBN 9788521630962.

BRÁS, Carolina. A prática de uma arquitetura consciente: o caso prático de uma habitação na Maia. 2024. Dissertação (Mestrado Integrado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto, Porto, 2024.

BRANDÃO, Jeferson Cardoso. O aço na construção civil, usos, vantagens e limitações: revisão da literatura. **RECIMA21: Revista Científica Multidisciplinar**, São Paulo, v. 5, n. 4, p. e5114, 6 abr. 2024. DOI: <https://doi.org/10.47820/recima21.v5i4.5114>. Disponível em: <https://recima21.com.br/index.php/recima21/article/view/5114>. Acesso em: [07/02/2026].

RADAR GERAL. **Em choque entre carro e moto na BR-356, motoboy sofre fratura de fêmur**. *Itabirito, s.d*. Disponível em: <https://radargeral.com.br/itabirito/itabirito-br-356-em-choque-entre-carro-e-moto-motoboy-sofre-fratura-de-femur/>. Acesso em: [07/02/2026].

RADAR GERAL. **Mulher é atropelada na BR-356 em Itabirito e é levada para o João XXIII em estado grave**. *Itabirito, s.d*. Disponível em: <https://radargeral.com.br/br-356/mulher-e-atropelada-na-br-356-em-itabirito-e-e-levada-para-o-joao-xxiii-em-estado-grave/>. Acesso em: [07/02/2026].

RADAR GERAL. **Caminhão mata pedestre no Acesso 2 de Itabirito; vítima é arremessada a cerca de 15 m**. *Itabirito, s.d*. Disponível em: <https://radargeral.com.br/itabirito/br-356-caminhao-mata-pedestre-no-acesso-2-de-itabirito-vitima-e-arremessada-a-cerca-de-15-m/>. Acesso em: [07/02/2026].

SOU NOTÍCIA. **Nova colisão de automóveis no Acesso 2 de Itabirito**. *Itabirito, 17 maio 2021*. Disponível em: <https://www.sounoticia.com.br/noticia/83737/geral/nova-colisao-de-automoveis-no-acesso-2-de-itabirito-17052021>. Acesso em: [07/02/2026].

SOU NOTÍCIA. **Acidente grave deixa quatro pessoas feridas no Acesso 2 da BR-356**. *Itabirito, 01 jul. 2022*. Disponível em: <https://www.sounoticia.com.br/noticia/94413/geral/itabirito-br-356-acidente-grave-deixa-quatro-pessoas-feridas-no-acesso-2-01072022>. Acesso em: [07/02/2026].

SOU NOTÍCIA. **Mulher é atropelada ao atravessar a BR-356 próximo ao Acesso 2; estado é grave**. *Itabirito, 01 abr. 2023*. Disponível em: <https://www.sounoticia.com.br/noticia/105572/geral/itabirito-br-356-mulher-e-atropelada-ao-atravesar-rodovia-proximo-ao-acesso-2-estado-e-grave-01042023>. Acesso em: [07/02/2026].

SOU NOTÍCIA. **Itabirito: acidente entre carro e carreta na BR-356 deixa mulher ferida no Acesso 2**. Itabirito, 18 jun. 2024. Disponível em: <https://www.sounoticia.com.br/noticia/122008/geral/itabirito-acesso-2-acidente-entre-carro-e-carreta-na-br-356-deixa-mulher-ferida-18062024>. Acesso em: [07/02/2026].

SOU NOTÍCIA. **Homem é atropelado próximo ao Acesso 2 de Itabirito**. Itabirito, 20 abr. 2019. Disponível em: <https://www.sounoticia.com.br/noticia/65567/geral/homem-e-atropelado-proximo-ao-acesso-2-de-itabirito-20042019>. Acesso em: [07/02/2026].

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Segurança Viária**. Brasília: DNIT, 2010.

BRASIL. **Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. ISF-219: projeto de passarela para pedestres**. Brasília, DF: DNIT, 2015. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/ferrovias/instrucoes-de-servicos-ferroviarios/isf-219-projeto-de-passerela-para-pedestres.pdf>. Acesso em: [07/02/2026].

BRASIL. **Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997**. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 24 set. 1997. Disponível em: <https://www.detran.am.gov.br/wp-content/uploads/2015/04/ctb.pdf>. Acesso em: [07/02/2026].

FIALHO, Antônio de Pádua Felga. **Passarelas urbanas em estrutura de aço**. 2004. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Ouro Preto, 2004. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/items/d0b7c8b1-4386-4266-97e1-3a4ed34ff9b9>. Acesso em: [07/02/2026].

FIALHO, Antônio de Pádua F.; RIBEIRO, Luiz Fernando L. **Matriz multicriterial para escolha de sistema estrutural na concepção de passarelas urbanas em aço. Construção Metálica**, n. 77, p. 30-34, 2006. Disponível em: https://www.abcem.org.br/lib/php/_download.php?now=0&arq=produtos/305_artigo_ed77.pdf. Acesso em: [07/02/2026].

ANEXO

Compressão:

Perfil Adotado	150x13		
Massa linear	13 Kg/m	Wx	85,8 cm ³
d	148 mm	rx	6,18 cm
hw = d'	118 mm	ly	82 cm ⁴
bf	100 mm	Wy	16,4 cm ³
tw	4,3 mm	ry	2,22 cm
tf	4,9 mm	u	0,67 m ² /m
h	138 mm	k	9,8 mm
A	16,6 cm ²	h0	138,2 mm
Ix	635 cm ⁴		

Aço Astm A572		
fy	315	Mpa
fu	440	Mpa
E	200000	Mpa

Índice de Flambagem		
Lx	250	cm
Ly	250	cm
Limite de flambagem	200	
$\lambda_x = (Lx \cdot k) / r_x$	40,5	≤ 200 ok
$\lambda_y = (Ly \cdot k) / r_y$	112,6	≤ 200 ok

Flambagem Local			
Alma		Flange	
hw/tw	27,4	(1) bf/tf	20,4
$(hw/tw)_{lim} = 1,49 \cdot \sqrt{E/f_y}$	37,5	(2) $0,56 \cdot \sqrt{E/f_y}$	14,1
$hw/tw \leq (b/t)_{lim}$	Compacto	(1) $\leq$ (2)	Não Compacto

Flambagem por flexão		
$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{L_x^2}$	Nex [kN]	2005,5
	Lx [m]	2,5
	Ix [m ⁴]	0,00000635
$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{L_y^2}$	Ney [kN]	259,0
	Ly [m]	2,5
	Iy [m ⁴]	0,00000082
O índice de esbeltez reduzido		
$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g f_y}{N_e}}$	Ag [m ²]	0,00166
	fy [M*N/m ²]	315
	Ne [MN]	0,259
	λ_0	1,42
Fator de redução χ		
— para $\lambda_0 \leq 1,5$: $\chi = 0,658 \lambda_0^2$	$\lambda_0 \leq 1,5$	Certo
	χ	0,4295
— para $\lambda_0 > 1,5$: $\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}$	Utilizar o Certo	
	$\lambda_0 > 1,5$	Errado
	χ	0,4344

Dados	
f_y [MPa]	315
$b = h_w$ [mm]	118
$t = t_w$ [mm]	4,3
$(h_w/t_w)_{lim}$	37,5
χ	0,43

Tabela 5 – Fatores c_1 e c_2 para cálculo de flambagem local		
Elemento	c_1	c_2
AA (exceto paredes de seções tubulares retangulares)	0,18	1,31
Paredes de seções tubulares retangulares	0,20	1,38
AL	0,22	1,49

Largura efetiva dos elementos da seção			
Utilizar a Condição Indicada com Certo			
Condição 1 (sem redução)			
b/t	27,4	$b/t)_{lim} / \text{raiz}(\chi)$	57,3
$\frac{b}{t} \leq \frac{(b/t)_{lim}}{\sqrt{\chi}}$		Certo	
		$b_{ef} = b$	b_{ef} 118
Condição 2 (com redução)			
$\frac{b}{t} > \frac{(b/t)_{lim}}{\sqrt{\chi}}$		Errado	
		c_1	0,18
		c_2	1,31
$\sigma_{el} = \left(c_2 \frac{(b/t)_{lim}}{b/t} \right)^2 f_y$		σ_{el} [Mpa]	1011,85
		σ_{el}	315
		Utilizado[Mp	
$b_{ef} = b \left(1 - c_1 \sqrt{\frac{\sigma_{el}}{\chi f_y}} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{el}}{\chi f_y}}$			
		b_{ef}	130,60

Tensão de flambagem local MAIOR que a que o material suporta.

b_{ef}	271
A_{ef} [mm ²]	0,00215
γ_{a1}	1,10
Força axial resistente de cálculo	
$N_{c,Rd} = \frac{\chi A_{ef} f_y}{\gamma_{a1}}$	
$N_{c, Rd}$	319,3 kN
$N_{c, Sd}$	135 kN
Suporta	
Carga utilizada	42,3%

Tração:

Verificação a tração Perfil I 150x13

* Considerando os coeficientes ELU conforme a norma NBR 8800 2024 Tabela 3

$$\gamma_{a1} \Rightarrow 1,1 \quad \gamma_{a2} = 1,35$$

Seção Bruta

Seção Líquida

$$N_{T,nd} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

$$N_{T,nd} = \frac{A_e \cdot f_u}{\gamma_{a2}}$$

$$f_y = 315 \text{ MPa}$$

$$A_e = A_g \text{ (Serão soldados)}$$

$$f_u = 440 \text{ MPa}$$

$$\frac{b}{4} \\ 16,6 \text{ cm}^2 \Rightarrow 1,66 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$N_{T,nd} = \frac{1,66 \times 10^{-3} \cdot 315 \times 10^6}{1,1} \Rightarrow 475,36 \text{ kN}$$

$$N_{T,rd} = \frac{1,66 \times 10^{-3} \cdot 440 \times 10^6}{1,35} \Rightarrow 541,04 \text{ kN}$$