



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ITALO SÍLVIO DOS SANTOS DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DAS PASSARELAS DE AÇO DO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE (UFPE-CAA)**

Caruaru
2024

ITALO SÍLVIO DOS SANTOS DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DAS PASSARELAS DE AÇO DO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE (UFPE-CAA)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Civil do
Campus Agreste da Universidade Federal de
Pernambuco – UFPE, na modalidade de artigo
científico, como requisito parcial para obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas

Orientador(a): Prof. Dr. Douglas Mateus de Lima

AGRADECIMENTOS

Antes de mais nada, agradeço a Deus, pela sua imensa graça, por seu infinito amor e por me fortalecer para chegar até aqui, permitindo-me realizar este sonho.

Aos meus pais, Andréa Adriana dos Santos e José Sílvio Gomes da Silva, agradeço por me ensinarem desde cedo os valores que direcionam minha vida. Vocês foram e sempre serão meu porto seguro. Agradeço por sonharem junto comigo e por todos os sacrifícios feitos, que garantiram o êxito nessa conquista.

À minha irmã Eduarda, pelo seu amor, cuidado e companheirismo. Agradeço pelo seu amparo e por todos os conselhos em momentos difíceis.

Também agradeço aos meus grandes amigos Rosinalva Azevedo e Edvanilson dos Santos, que desde antes do início dessa jornada, me incentivaram e motivaram a seguir em frente.

Aos colegas de curso, com quem tive o privilégio de partilhar essa jornada, meu muito obrigado. Em particular aos meus grandes amigos Arnaldo Junior, Breno Vilela, Bruno Bezerra, Daniel Queiroz, Douglas Rafael, Erica Rafaela, Gabriel Portela, Gheyson Iarcone, Isabelle Sales, Jean Firmino, por cada momento memorável que ficará comigo para sempre.

Sou grato ao meu orientador Douglas Mateus de Lima por todas as contribuições acadêmicas e aprendizados que me despertaram o interesse pela engenharia estrutural. Agradeço por toda a paciência e disponibilidade ao longo de todo este trabalho.

À coordenação do curso, nas pessoas das professoras Jocilene Otilia e Débora Cristina, agradeço pelo suporte dedicado, pelos valiosos conselhos e orientações, bem como pelo compromisso constante com o bem-estar e a formação de todos os alunos.

Aos professores do corpo docente, sou profundamente grato, não só pelos ensinamentos técnicos, mas principalmente, pelas experiências profissionais e pessoais que serviram como fonte de inspiração. Sou grato a Almir Cirilo, Alessandro Antunes, Amanda Miranda, Cléssio Lima, Dannúbia Pires, Edevaldo Miguel, Elder Vasconcelos, Elizabeth Pastich, Érika Marinho, Flávio Eduardo, Fernando Contreras, Gilson Lima, Giuliana Bono, Gustavo Bono, Humberto Correia, João Sampaio, José Moura, Juliana V. Schmalz, Kenia Kelly, Maria Victória, Mariana Villela, Maria Isabela, Marília Marinho, Iálysson Medeiros, Michele Lima, Pedro Pereira, Raquel Ferreira, Renato Mahon, Roberto Evaristo, Rubens Correia, Salomão Martinez, Saul Guedes, Saulo Bezerra, Shirley Minnell, Simone Machado, Thais Santos, Thaise Ferreira, Washington de Lima.

Por fim, expresso minha gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta jornada acadêmica

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAA	Centro Acadêmico do Agreste
CBCA	Centro Brasileiro de Construções em Aço
ELS	Estados-limites de serviço
ELU	Estados-limites últimos
FLA	Flambagem local da alma
FLM	Flambagem local da mesa comprimida
FLT	Flambagem lateral com torção
LCPP	Ligações rígidas soldadas simétricas
LCSP	Ligação com duas cantoneiras parafusadas na viga apoiada e soldadas no elemento de suporte
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
PFF	Perfil formado a frio

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Massa específica do ar
V_0	Velocidade básica do vento
V_k	Velocidade característica do vento
S_1	Fator topográfico
S_2	Fator que considera a rugosidade do terreno, as dimensões da edificação, estrutura ou componente em estudo, e de sua altura sobre o terreno
S_3	Fator baseado em conceitos probabilísticos
c_p	Coefficiente de pressão
S_1	Coefficiente de fator topográfico
z	Cota acima do terreno
b_m	Parâmetro meteorológico usado na determinação de S_2
F_r	Fator de rajada
C_a	Coefficiente de arrasto
p	Expoente da lei potencial de variação de S_2
q	Pressão dinâmica do vento
γ_g	Coefficiente de ponderação para cargas permanentes
γ_q	Coefficiente de ponderação para cargas variáveis diversas
$\gamma_{q \text{ vento}}$	Coefficiente de ponderação para cargas de ação do vento
$F_{\text{permanente}}$	Ações permanentes agrupadas
V_{0°	Ação do vento incidente na direção paralelo a menor dimensão em planta
$V_{90^\circ \text{ carregamento } 1}$	Ação do vento no sentido crescente da inclinação da passarela, aplicando sobrepressão na cobertura
$V_{90^\circ \text{ carregamento } 2}$	Ação do vento no sentido crescente da inclinação da passarela, aplicando sucção na cobertura
$V_{-90^\circ \text{ carregamento } 1}$	Ação do vento no sentido decrescente da inclinação da passarela, aplicando sucção na cobertura
$V_{-90^\circ \text{ carregamento } 2}$	Ação do vento no sentido decrescente da inclinação da passarela, aplicando sobrepressão na cobertura
L	Comprimento dos elementos estruturais

Avaliação do desempenho estrutural das passarelas de aço do Centro Acadêmico do Agreste (UFPE-CAA)

Assessment of the structural performance of the steel footbridges at the Agreste Academic Center (UFPE-CAA)

Italo Sílvio dos Santos da Silva¹

RESUMO

O uso de estruturas de aço em passarelas é bastante recorrente no contexto brasileiro, em diversos locais, promovendo a transposição de obstáculos de forma facilitada. Esse tipo de estrutura está presente no Centro Acadêmico do Agreste (CAA-UFPE), com o objetivo de proporcionar melhor mobilidade e acessibilidade aos estudantes e profissionais que ali atuam. Diferentemente de estruturas similares em concreto armado, passarelas de aço exigem atenção especial em diversos aspectos quanto ao projeto, execução e manutenção ao longo de vida útil.

Entre os aspectos que requerem maior cuidado, destacam-se os efeitos causados por ações dinâmicas, como a força do vento e sobrecargas de uso decorrentes do tráfego de pedestres. Além disso, o grau de agressividade ambiental em estruturas de aço é relevante, pois influencia no processo de oxidação do material.

Nesse contexto, o presente estudo visa realizar a inspeção pericial das passarelas do CAA-UFPE, por meio da produção de relatos fotográficos e da identificação dos materiais e perfis utilizados nessas estruturas. A posteriori, será empregado o *software* de engenharia estrutural *SCIA Engineer 24.0* para a modelagem e verificação de desempenho estrutural, contemplando análises estática e modal das passarelas. Paralelamente, serão realizados ensaios experimentais *in loco*, com auxílio de *smartphones*, para obtenção de parâmetros dinâmicos da estrutura estudada.

Palavras-chave: passarelas; análise estrutural; inspeção pericial; análise modal

¹ Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco. E-mail: italo.silvio@ufpe.br

ABSTRACT

The use of steel structures in footbridges is quite common in the Brazilian context, in various locations, facilitating the crossing of obstacles. This type of structure is present at the Agreste Academic Center (CAA-UFPE), with the aim of providing better mobility and accessibility to students and professionals working there. Unlike similar structures in reinforced concrete, steel footbridges require special attention in several aspects related to their design, execution, and maintenance throughout their longevity.

Among the aspects that require greater attention, the effects caused by dynamic actions, such as wind force and overloads from pedestrian traffic, stand out. Additionally, the degree of environmental aggressiveness on steel structures is relevant, as it influences the oxidation process of the material.

In this context, the present study aims to carry out a forensic inspection of the footbridges at CAA-UFPE, through the production of photographic reports and the identification of the materials and profiles used in these structures. Subsequently, the structural engineering *software* SCIA Engineer 24.0 will be used for the modeling and verification of structural performance, including static and modal analyses of the footbridges. In parallel, experimental tests will be conducted on-site, using smartphones to obtain dynamic parameters of the studied structure.

Keywords: footbridges; structural analysis; expert inspection; modal analysis

DATA DE APROVAÇÃO: 21 de outubro de 2024.

1 INTRODUÇÃO

O Centro Acadêmico do Agreste (CAA-UFPE), localizado no município de Caruaru-PE, conta com uma infraestrutura projetada que atende aproximadamente 4.000 discentes, além de dezenas de servidores públicos que desempenham suas atividades diariamente. Os blocos de salas de aula e laboratórios que compõem a instituição, formados por estruturas de elementos pré-moldados de concreto armado, estão interligados por passarelas de aço que facilitam a mobilidade. Essa configuração arquitetônica otimiza a integração e acessibilidade da comunidade acadêmica, além de melhorar a circulação no campus.

As passarelas de aço do CAA-UFPE são estruturadas com vãos relativamente pequenos, de aproximadamente 9 metros de extensão. Apesar dessa característica, o efeito dinâmico associado ao caminhar humano se manifesta de forma perceptível, evidenciado por vibrações indesejadas que ocorrem nessas estruturas. Esse tipo de vibração é uma consideração importante para projetos de passarela, pois, conforme afirma Major (2017), em virtude das características dos vãos transpostos por passarelas de aço, deve-se considerar o efeito dinâmico nas estruturas, tanto devido à ação do vento quanto à dinâmica associada ao tráfego de pessoas.

Associado ao efeito dinâmico, as passarelas do CAA apresentam elementos estruturais que demonstram um grau de deterioração considerável, causado pela corrosão. Esse aspecto merece destaque, uma vez que são observadas falhas no sistema de proteção escolhido para as estruturas, assim como no processo de manutenção das passarelas, o que é nocivo ao desempenho dos elementos estruturais ao longo de sua vida útil. A corrosão modifica as propriedades do metal que são essenciais para o bom desempenho do elemento estrutural (VIEIRA et al., 2018).

Tendo em vista as características das passarelas, compostas por perfis laminados e perfis formados a frio, é essencial considerar as normativas vigentes associadas a esses materiais durante a análise e dimensionamento dos elementos estruturais. Assim, busca-se garantir a estabilidade e a segurança das estruturas a partir do modelo estrutural adotado e dos materiais utilizados na construção das passarelas.

Diante da importância e da demanda de tráfego de pessoas atendida pelas passarelas de aço no CAA, identifica-se a necessidade de avaliar o desempenho do sistema estrutural empregado nessas estruturas. Nessa avaliação serão contempladas, verificações estruturais dos elementos constituintes das passarelas, como longarinas, transversinas e pilares. Com efeito, busca-se avaliar se essas estruturas atendem aos requisitos normativos, garantindo, dessa forma, a acessibilidade, a durabilidade, a segurança e o conforto de seus usuários.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O presente artigo tem como objetivo principal a avaliação de desempenho do sistema estrutural das passarelas de aço do Campus Acadêmico do Agreste (CAA-UFPE), através do uso de ferramentas numéricas e leituras experimentais aferidas *in loco*.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos para o presente trabalho são:

- Realizar inspeção pericial, com foco no prognóstico na análise da durabilidade das passarelas;
- Analisar o sistema estrutural e construtivo das passarelas;
- Realizar o dimensionamento dos elementos estruturais: Vigas principais superiores e inferiores (longarinas), vigas transversais superiores e inferiores (transversinas), pilares, entre outros elementos;
- Realizar análise modal numérica das passarelas;
- Realizar de ensaio experimental de impacto de calcanhares nas passarelas, com foco na obtenção de parâmetros dinâmicos.

1.2 Revisão Bibliográfica

A presente revisão bibliográfica tem como foco abordar os diferentes aspectos inerentes às passarelas de pedestres, especialmente aquelas construídas em aço. Busca-se discorrer acerca de aspectos dinâmicos pertinentes no projeto deste tipo de estrutura. Considera-se ainda verificar como o desgaste e deterioração de elementos estruturais podem afetar o comportamento global de passarelas ao longo da sua vida útil.

No Reino Unido, Dallard *et al.* (2001) promoveram estudos das causas que levaram a ocorrência de vibrações laterais excessivas na *Millenium Bridge*. Os autores investigaram as frequências relacionadas aos esforços verticais e laterais gerados pelo caminhar de grandes aglomerações de pessoas. Através desses, foi percebido que as vibrações ocorrem em trechos específicos da passarela devido à proximidade de frequência do caminhar de grandes grupos de pedestres com a frequência dos modos laterais. Os pesquisadores comprovaram

experimentalmente que outras pontes pedonais ou rodoviárias, cujas frequências naturais se aproximem de 1,3 Hz, também são susceptíveis ao fenômeno de excitação lateral síncrona, ocorrido na *Millenium Bridge*.

Major, Minda e Major (2017) realizaram análises numéricas em passarelas em forma de arco, feitas de aço e alumínio, onde foram avaliadas as frequências naturais da estrutura quando sujeitas aos efeitos dinâmicos do vento e da ação de pedestres. Sendo abordado neste estudo, a importância da análise modal com objetivo de evitar vibrações excessivas, bem como a susceptibilidade ao fenômeno de ressonância de estruturas leves e esbeltas.

Saramago, Santos e Perlingeiro (2018) propuseram uma comparação entre duas metodologias internacionais para análise do comportamento dinâmico de passarelas. Através da aplicação das metodologias estudadas a uma passarela de concreto protendido, os autores constataram semelhanças nos resultados para as acelerações associadas ao modo vertical da estrutura, apesar da abordagem distintas das mesmas.

O trabalho dos autores supracitados, colocam em destaque também o déficit existente nas normativas e bibliografias nacionais, no tocante a análises dinâmicas em passarelas. Havendo dessa forma, bastante necessidade e oportunidade para pesquisas acerca do tema.

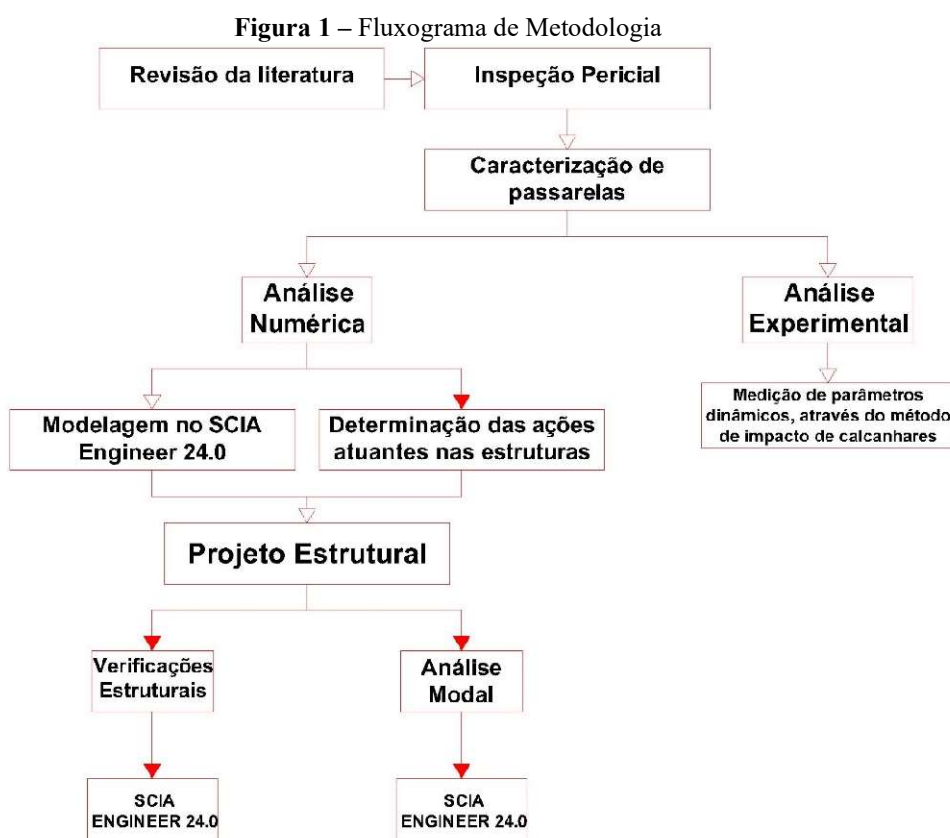
Gonçalves, Granato, Santos e Guimarães (2020) realizaram um trabalho de análise dinâmica e estática para uma passarela de pedestres de aço, com modelo estrutural treliçado. No trabalho, os autores compararam como diferentes cenários de carregamentos dinâmicos afetam as acelerações na estrutura, e consequentemente como induzem vibrações na estrutura. Devido à ausência de limites para acelerações em normativa brasileiras, alternativamente, estes consideraram as normas Bro2004, AASHTO:2009 e Eurocode - EN1991:2003, afim de realizar a comparação e classificação na aceitabilidade da passarela no tocante a conforto dos transeuntes.

Os trabalhos citados demonstram a pertinência do estudo de parâmetros dinâmicos em estruturas esbeltas, sendo o foco a verificação de frequências naturais e acelerações, uma vez que estes afetam na percepção do usuário e no conforto de utilização. Percebe-se ainda que a necessidade de recorrência a bibliografias internacionais para classificação das estruturas quanto aos aspectos dinâmicos supracitados expõe a escassez de referências nacionais detalhadas.

Nesse contexto, o presente trabalho busca realizar a análise estrutural de passarelas de pedestres, realizando um estudo criterioso com relação às características dinâmicas das estruturas, sendo verificados os critérios nacionais existentes e, na ausência destes, consulta a referências internacionais, como o Guia SÉTRA.

2 METODOLOGIA

Nesta seção, serão apresentados os tópicos pertinentes a metodologia adotada na análise estrutural realizada na passarela estudada, bem como o procedimento experimental executado, sendo abordados aspectos essenciais para cada etapa descrita. Na Figura 1, se encontra de maneira esquemática todos os processos realizados.



Fonte: Autor (2024)

2.1 Inspeção Pericial das Passarelas

As passarelas estudadas desempenham papel significativo na mobilidade de centenas de usuários diariamente, permitindo que se desloquem entre os blocos de salas de aula e laboratórios na instituição de ensino, o que resulta em uma demanda expressiva.

Por estarem em ambientes externos, as estruturas estão sujeitas a diversos fatores climáticos, como chuvas e insolações. Como consequência, a suscetibilidade ao fenômeno de oxidação é maior, uma vez que o ambiente apresenta agressividade elevada.

Diante disso, foi realizada uma inspeção pericial em uma das passarelas existente na

instituição de ensino, conforme apresentado na Figura 2, tendo como objetivo de vistoriar e registrar fotograficamente as condições dessas estruturas. No processo de vistoria, buscou-se analisar visualmente os elementos estruturais das passarelas, bem como os elementos utilitários, identificando possíveis manifestações patológicas. Complementarmente, foram feitas aferições e anotações de medidas utilizando trena de aço e paquímetro, além da elaboração de esboços simplificados da estrutura, visando à caracterização das passarelas inspecionadas.

Figura 2 - Mapa do CAA-UFPE com destaque para as passarelas do Campus



Fonte: Lima; et. al (2025)

2.2 Sistema Estrutural e Materiais Utilizados

Como constata-se na Figura 3, as passarelas apresentam em seu sistema estrutural vigas principais, vigas secundárias, chapas de piso e sistemas de cobertura. Além disso, apresentam sistemas de guarda-corpos, proporcionando parcialmente o fechamento lateral das estruturas. Verifica-se que o sistema de cobertura das passarelas é sustentado por pilares, nos cantos, enquanto os pilares da região intermediária funcionam como tirantes, sustentando o piso da estrutura.

Figura 3 – Passarela de aço inspecionada

Fonte: Autor (2023)

Os pilares e vigas das estruturas são formadas por perfis formados a frio e perfis laminados de aço, sendo esses elementos produzidos com dimensões de acordo com a ABNT NBR 6355 (2012) e ABNT NBR 15980 (2024), respectivamente. Apoiado sobre as vigas principais, o piso é constituído de chapas xadrez de aço, que se encontra apoiado em vigas transversais inferiores. Ademais, as passarelas apresentam dispositivos de corrimãos em conformidade com a normativa associada a acessibilidade de edificações a ABNT NBR 9050 (2020). Quanto à vedação do sistema de cobertura, este é composto de telhas de aço de seção trapezoidal. Na Tabela 1, apresentam-se as características dos elementos constituintes das passarelas.

No que se refere ao sistema de proteção, os elementos da estrutura apresentam uma camada de revestimento em pintura realizado com esmalte sintético, proporcionando a prevenção da ocorrência de corrosão atmosférica.

Tabela 1 – Caracterização dos elementos

Elemento	Especificação	Padrão
Vigas Principais (Longarinas)	W 310 x 28.3	ASTM A 572
Vigas Transversais Inferiores (Transversinas)		
Pilares das Passarelas	W 150 x 13	ASTM A 572
Vigas Longitudinais Superiores		
Vigas Transversais Superiores	U 100 x 30 x 3.00	NBR 6355
Guarda-corpos das Passarelas	1 1/4" x 1/8"	NBR 7007

Corrimãos	CHAPA LAMINADA	NBR 7007
	TUBO	ASTM A 178
	CABO DE AÇO	NBR ISO 2408
Chapa Xadrez	1/4"	NBR 16875
Telhas	TRAPEZOIDAIS 40 0.8 mm	NBR 14513

Fonte: Autor (2024)

2.3 Ligações

As ligações existentes em projetos de estrutura metálicas podem ser classificadas por múltiplos critérios, podendo ser, por exemplo, o mecanismo de ligação (conectores ou soldas), o esforço predominante na ligação (cisalhamento, compressão, tração, etc.) ou ainda a rigidez da ligação (rígida, semi-rígida ou flexível). Segundo o Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA, 2011), a classificação das ligações quanto a rigidez é fundamental na análise elástica das estruturas. Assim sendo, as ligações existentes nas passarelas serão classificadas quanto ao critério da rigidez, observando-se as orientações apresentadas nos itens que tratam de ligações nas normativas, sendo estes os tópicos 6, da ABNT NBR 8800 (2024), e 10 da ABNT NBR 14762 (2010).

Tomando-se como referência o manual *Ligações em Estruturas Metálicas – Volume 1* (2011), da Gerdau, que tratam de ligações entre perfis laminados de aço, realizou-se também a classificação do tipo de ligação entre os elementos das rampas e passarelas. Na Figura 4A é apresentada a ligação típica entre as longarinas e a viga travessa, enquanto na figura 4B o tipo de ligação entre a viga travessa e a estrutura de concreto armado externa.

Figura 4 – Ligação entre elementos estruturais das passarelas



Fonte: Autor (2023)

Na Tabela 2 é exposta, resumidamente, a classificação adotada para os diferentes tipos de ligações presentes entre os respectivos elementos compostos por perfis laminados.

Tabela 2 – Ligações entre elementos

Elementos conectados	Tipo de ligação
Longarina e Travessa	LCPS
Transversinas e Longarina	LMSS
Pilares e Vigas longitudinais superiores	LMSS
Pilares e Longarinas	LMSS

Fonte: Autor (2024)

A denominação LCPS refere-se à ligação com duas cantoneiras parafusadas na viga apoiada e soldadas no elemento de suporte. Enquanto o termo LMSS consistem em Ligações Rígidas Soldadas Simétricas.

2.4. Modelagem em *Software*

O *software* utilizado na etapa de modelagem e análise e estrutural da passarela foi o *SCIA Engineer 24.0*. Esta é uma ferramenta de cálculo estrutural que utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF) na realização de análises estática e dinâmica, levando-se em consideração os critérios normativos determinados para estruturas de diversos materiais, incluindo o aço. Com isso, é possível através das soluções disponíveis no *software* a obtenção de parâmetros estruturais pertinentes dos elementos constituintes da passarela.

Na realização de análise estática utilizando o *SCIA*, percebeu-se que o *software* tem como referência as verificações previstas na ABNT NBR 8800 (2008), sendo uma versão de normativa desatualizada. Contudo, foram analisadas as verificações equivalentes na versão atualizada da referida norma, constatando-se que permaneceram considerando critérios análogos a referência adotada no *software*. Logo, o processo de avaliação realizado permanece válido e em conformidade com a ABNT NBR 8800 (2024).

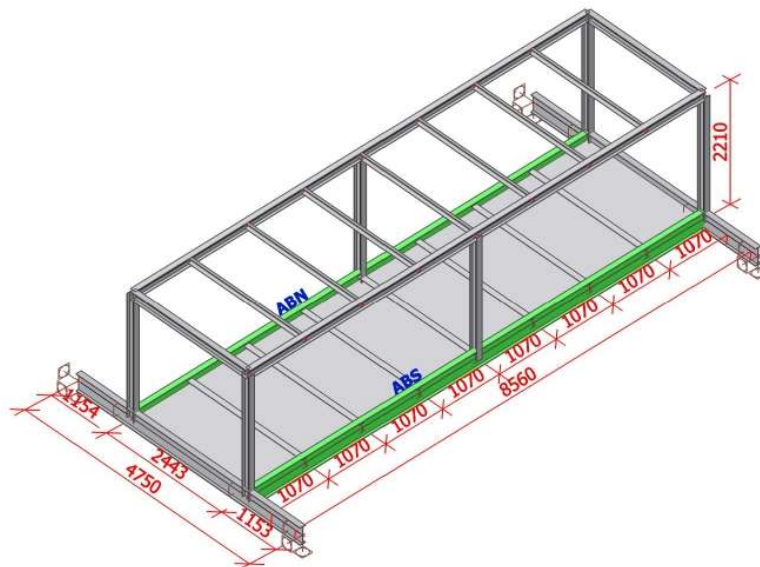
No processo de modelagem da estrutura no *SCIA Engineer 24.0* tomou-se o cuidado de determinar o tipo de material com suas respectivas propriedades mecânicas de forma adequada, visto que as verificações estruturais realizadas pelo *software* levam em consideração esses parâmetros. Sendo assim, foram considerados os elementos conforme indicados na Tabela 3 na modelagem da passarela.

Tabela 3 – Propriedades dos elementos da modelagem numérica das passarelas

Elemento	Tipo	Material	Seção	Comprimento (mm)
Longarinas	Viga (80)	A572 grade 50	W 310 x 28,3	8560
Travessas	Viga (80)			4750
Transversinas	Viga (80)		W 150 x 13,0	2443
Pilares	Pilar (100)		W 150 x 13,0	2210
Vigas Transversais Superiores	Viga (80)		W 150 x 13,0	2443
Vigas Longitudinais Superiores	Viga (80)		W 150 x 13,0	8560
Terças	Viga (80)		U 100 x 50 x 3.00	2443
Chapas de piso	Placa (90)		-	2443 x 1070

A fim de se obter uma modelagem o mais fidedigna possível, foram determinadas as condições de vinculação entre os elementos estruturais. Podendo dessa forma, representar os apoios reais identificados *in loco*, quando realizadas a vistoria nas passarelas. Essa consideração permitiu ainda a possibilidade de analisar os impactos nos resultados, dadas as variações adotadas.

Na Figura 5 é apresentado o modelo numérico considerado nas verificações estruturais realizadas no *SCIA Engineer 24.0*. Destaca-se na figura as dimensões e distâncias adotadas na modelagem, que foram adotadas em conformidade com as medições realizadas no local.

Figura 5 – Modelagem de Passarela de Aço

Fonte: Autor (2024)

2.5 Ações e combinações

Nesta seção serão apresentadas as ações de carregamentos consideradas atuando na estrutura de acordo com os critérios estabelecidos nas normas ABNT NBR 8681 (2003), ABNT NBR 8800 (2024) e ABNT NBR 14762 (2010), sendo as duas últimas normativas específicas no dimensionamento de peças de aço laminado e perfis formados a frio, respectivamente. Sendo também listadas as combinações dos carregamentos atuantes, a fim de considerar os mais diversos cenários possíveis, quanto às condições de carregamento.

Devido a peculiaridade das estruturas, sendo estas passarelas de pedestres, se faz necessário também a consulta da ABNT NBR 7188 (2024), a qual trata de carregamentos específicos para pontes e passarelas rodoviárias. Ressalta-se que foram aplicadas ressalvas para as ações nas previstas na ABNT NBR 7188 (2024). Desta forma, não foram consideradas ações excepcionais devido à colisão de veículos, sendo uma hipótese não aplicável.

Os valores de ações permanentes estão relacionados aos pesos próprios dos elementos estruturais das passarelas, bem como seus elementos acessórios. Dessa forma, as cargas permanentes abrangem os perfis de aço laminado e formados a frio, guarda-corpos, telhas, elementos de ligação, chapas de piso, etc. Foram consultados catálogos de fabricantes, bem como normativas que estabelecem os padrões que cada elemento da passarela deve seguir, a fim de utilizar valores de peso próprio coerentes.

Para o projeto das passarelas em questão, foram adotadas as ações variáveis previstas nas normativas ABNT NBR 7188 (2024) e ABNT NBR 6123 (2023).

a) Sobrecarga aplicada sobre o pavimento

Conforme indicado no item 6.1 da ABNT NBR 7188 (2024), deve ser adotado uma carga vertical uniformemente distribuída sobre toda superfície do pavimento entre os guarda-corpos, sendo o valor dessa carga igual a $5,0 \text{ kN/m}^2$.

Como as passarelas não se encontram em locais de ocorrência de tráfego de veículos, não foi considerada a carga pontual horizontal prevista na normativa supracitada, no item 6.3, pois a passarela não apresenta risco de eventuais impactos de veículos.

b) Cargas devido ação de vento

Para o cálculo da ação do vento atuante na passarela e na rampa, foram observadas as considerações recomendadas na ABNT NBR 6123 (2023).

Conforme a normativa supracitada, foram determinados os valores de parâmetros utilizados no processo de cálculo de pressão estática do vento. Com isso, são apresentados na Tabela 4 os valores referentes aos parâmetros de cálculo, bem como os valores calculados.

Tabela 4 – Parâmetros para cálculo de ação de vento e valores calculados

Velocidade básica do vento, V_0	S_1	S_2	S_3	Velocidade característica do vento, V_k	Pressão dinâmica do vento, q
30 m/s	1	0,86	1,06	25,482 m/s	398,054 N/m ²

Fonte: Autor (2024)

Para o caso da passarela apresentada na Figura 5, tem-se uma cobertura apoiada em pilares de perfis laminados. Sendo assim, de acordo com o item 7.2 da ABNT NBR 6123 (2023), considera-se a ação do vento diretamente atuando nas faces inferior e superior da cobertura plana de uma água, haja vista que os pilares não caracterizam um obstáculo ao escoamento do ar.

Dessa forma, observou-se que a cobertura da passarela se adequa aos critérios previstos no item mencionado da norma, sendo considerados valores de coeficientes de pressão conforme a Tabela 24 da ABNT NBR 6123 (2023), sendo valor máximo igual a 2, porém variando de acordo com a tangente do ângulo de inclinação da cobertura com a horizontal.

Ainda com relação a cobertura, foi considerada uma força de atrito paralela à geratriz da cobertura. Esta é calculada de acordo com item 7.2.2 da ABNT NBR 6123 (2023), sendo proporcional a área, em planta, da estrutura analisada. O valor calculado para a força de atrito é 4,162 kN.

Se tratando dos pilares da estrutura, realizou-se o procedimento para barras prismáticas de comprimento finito, conforme o previsto no item 8.1 da ABNT NBR 6123 (2023). Desta forma, foram obtidos os coeficientes de força, e posteriormente, os valores de forças atuantes nos elementos prismáticos. Na Tabela 5 apresenta-se os valores das forças calculadas para a respectiva passarela.

Tabela 5 – Força por unidade de comprimento atuando nos pilares da passarela

$F_x 0^\circ$ (N/m)	$F_x 45^\circ$ (N/m)	$F_x 90^\circ$ (N/m)	$F_y 0^\circ$ (N/m)	$F_y 45^\circ$ (N/m)	$F_y 90^\circ$ (N/m)
70,255	76,923	0	0	76,923	63,439

Fonte: Autor (2024)

De acordo com a ABNT NBR 8681 (2003), deve-se considerar as combinações de ações que acarretem em efeitos mais desfavoráveis nas seções críticas das estruturas. Para as estruturas de estudo, foram considerados as combinações para estados-limites últimos (ELU) e estados-limites de serviço (ELS) previstas nas normas ABNT NBR 14762 (2010) e ABNT NBR 8800 (2024), haja vista que as estruturas são compostas por perfis laminados e perfis formados a frio (PFF). A fim de determinar de maneira adequada os valores de coeficientes de ponderação das ações, bem como os fatores de combinação e redução para as ações variáveis, foram consultados

o item 4, da ABNT NBR 8800 (2008), e o item 6 da ABNT NBR 14762 (2010).

Uma vez definidas as situações de carga atuantes nas passarelas, as combinações de cargas para ELU e ELS devem ser determinadas pelo projetista, de maneira criteriosa, no *software SCIA Engineer 24.0*, permitindo dessa forma as verificações dos elementos de acordo com os critérios normativos.

De acordo com as normativas que regem o dimensionamento de perfis de aço laminados e perfis de aço formados a frio, devem ser consideradas tantas combinações quantas forem necessárias, visando garantir a segurança quanto a todos os estados-limites últimos possíveis. Dessa forma, apresenta-se na Tabela 6 todas as combinações últimas consideradas para a identificação de qual promove resultados mais críticos. Reitera-se que foi classificado como crítico o estado-limite último que promova maiores valores de carregamento nos elementos estruturais das estruturas.

Tabela 6 – Combinações últimas

Combinação	Tipo	Combinações de ações
1	Normal	$1,25 F_{\text{permanente}} + 1,50 F_{\text{sobrecarga}}$
2	Normal	$1,25 F_{\text{permanente}} + 1,40 V_{0^\circ}$
3	Normal	$1,25 F_{\text{permanente}} + 1,40 V_{90^\circ \text{ carregamento 1}}$
4	Normal	$1,25 F_{\text{permanente}} + 1,40 V_{90^\circ \text{ carregamento 2}}$
5	Normal	$1,25 F_{\text{permanente}} + 1,40 V_{-90^\circ \text{ carregamento 1}}$
6	Normal	$1,25 F_{\text{permanente}} + 1,40 V_{-90^\circ \text{ carregamento 2}}$
7	Normal	$1,25 F_{\text{permanente}} + 1,50 F_{\text{sobrecarga}} + 0,84 V_{0^\circ}$
8	Normal	$1,25 F_{\text{permanente}} + 1,50 F_{\text{sobrecarga}} + 0,84 V_{90^\circ \text{ carregamento 1}}$
9	Normal	$1,25 F_{\text{permanente}} + 1,50 F_{\text{sobrecarga}} + 0,84 V_{90^\circ \text{ carregamento 2}}$
10	Normal	$1,25 F_{\text{permanente}} + 1,50 F_{\text{sobrecarga}} + 0,84 V_{-90^\circ \text{ carregamento 1}}$
11	Normal	$1,25 F_{\text{permanente}} + 1,50 F_{\text{sobrecarga}} + 0,84 V_{-90^\circ \text{ carregamento 2}}$
12	Normal	$1,25 F_{\text{permanente}} + 1,40 V_{0^\circ} + 0,9 F_{\text{sobrecarga}}$
13	Normal	$1,25 F_{\text{permanente}} + 1,40 V_{90^\circ \text{ carregamento 1}} + 0,9 F_{\text{sobrecarga}}$
14	Normal	$1,25 F_{\text{permanente}} + 1,40 V_{90^\circ \text{ carregamento 2}} + 0,9 F_{\text{sobrecarga}}$
15	Normal	$1,25 F_{\text{permanente}} + 1,40 V_{-90^\circ \text{ carregamento 1}} + 0,9 F_{\text{sobrecarga}}$
16	Normal	$1,25 F_{\text{permanente}} + 1,40 V_{-90^\circ \text{ carregamento 2}} + 0,9 F_{\text{sobrecarga}}$

Fonte: Autor (2024)

A terminologia $F_{\text{permanente}}$ refere-se ao somatório das ações permanentes das estruturas. $F_{\text{sobrecarga}}$ é utilizado para denominar a ação da sobrecarga aplicada sobre o pavimento das estruturas. Enquanto que $V_{90^\circ \text{ carregamento 1}}$ e $V_{90^\circ \text{ carregamento 2}}$, referem-se à ação do vento atuando na direção ascendente da inclinação do piso passarela, promovendo sobrepressão e sucção na coberta, respectivamente. Já $V_{-90^\circ \text{ carregamento 1}}$ e $V_{-90^\circ \text{ carregamento 2}}$, referem à ação do vento atuando na direção descendente da inclinação do piso da passarela, promovendo sucção e sobrepressão, respectivamente.

Quanto as combinações frequentes, são aquelas que ocorrem na ordem de 10^5 vezes intervalo

de 50 anos. Com isso, ações quase permanentes devem ser consideradas para efeito de análise da aparência da construção, estando a aparência, nesse contexto, associada aos deslocamentos excessivos na estrutura. Assim sendo, diante das características das cargas atuantes na estrutura, foram consideradas as combinações de serviço elencadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Combinações de serviço

Combinação	Tipo	Combinações de ações
17	Quase permanente	$F_{\text{permanente}}+0,3 F_{\text{sobrecarga}}$
18	Frequente	$F_{\text{permanente}}+0,4 F_{\text{sobrecarga}}$
19	Frequente	$F_{\text{permanente}}+0,6 V_{0^\circ}$
20	Frequente	$F_{\text{permanente}}+0,6 V_{90^\circ} \text{ carregamento 1}$
21	Frequente	$F_{\text{permanente}}+0,6 V_{90^\circ} \text{ carregamento 2}$
22	Frequente	$F_{\text{permanente}}+0,6 V_{-90^\circ} \text{ carregamento 1}$
23	Frequente	$F_{\text{permanente}}+0,6 V_{-90^\circ} \text{ carregamento 2}$
24	Frequente	$F_{\text{permanente}}+0,6 V_{0^\circ}+0,3 F_{\text{sobrecarga}}$
25	Frequente	$F_{\text{permanente}}+0,6 V_{90^\circ} \text{ carregamento 1}+0,3 F_{\text{sobrecarga}}$
26	Frequente	$F_{\text{permanente}}+0,6 V_{90^\circ} \text{ carregamento 2}+0,3 F_{\text{sobrecarga}}$
27	Frequente	$F_{\text{permanente}}+0,6 V_{-90^\circ} \text{ carregamento 1}+0,3 F_{\text{sobrecarga}}$
28	Frequente	$F_{\text{permanente}}+0,6 V_{-90^\circ} \text{ carregamento 2}+0,3 F_{\text{sobrecarga}}$

Fonte: Autor (2024)

2.6 Análise experimental de vibração

Na etapa de análise experimental, foi realizado o ensaio de impacto de calcanhares na passarela, com o intuito de aferição de parâmetros dinâmicos da estrutura, como frequência natural e a razão de amortecimento. Para que as aferições fossem realizadas, utilizou-se *smartphones* do modelo Redmi 9 contendo acelerômetros MEMS (micro-electro-mechanical systems), sendo feitas as leituras através do aplicativo *myFrequency*. O aplicativo utilizado permite que a análise de dados seja realizada diretamente no *smartphone*, gerando um espectro de frequência em que todas as frequências são plotadas com suas respectivas amplitudes de aceleração.

O procedimento de coleta de dados consistiu na fixação do *smartphone* na passarela e, posteriormente, realização da excitação da estrutura através de impacto induzidos por uma pessoa. Lago et. al (2019) afirma que o uso de equipamentos e técnicas simplificados permitem a avaliação de forma satisfatória do desempenho de estruturas no tocante a vibrações excessivas. Com isso, a utilização de *smartphones* é uma possibilidade promissora no estudo de vibrações.

Para a realização da coleta de dados, o *smartphone* foi posicionado e fixado com fita adesiva

dupla face na viga principal (longarina) da passarela, sendo a região central da estrutura o local escolhido, pois se espera que as deflexões verticais mais expressivas se manifestem nessa região.

Sendo feita a fixação do celular, uma pessoa com peso próximo de 700 N, posicionada na região central da passarela, induz a vibração na estrutura elevando os calcanhares, provocando o impacto dos seus calcanhares com o piso da estrutura. Sendo o acionamento do dispositivo para coleta de dados realizado com a estrutura em repouso e a finalização da coleta após alguns segundo do impacto no piso, garantido assim a medição associada apenas ao efeito induzido.

Realizada a coleta de dados, são apresentadas na interface do aplicativo o gráfico da aceleração em função do tempo, devido ao efeito de vibração. Sendo possível a obtenção da frequência natural e também da razão de amortecimento da estrutura, através da seleção do intervalo de leitura feita.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presente seção apresenta e discorre sobre os resultados observados a partir da realização dos procedimentos descritos na seção referente à metodologia. Serão destacados os aspectos considerados pertinentes e identificados na etapa de inspeção das passarelas. Posteriormente, serão detalhados os valores referentes à etapa de verificações de cada elemento estrutural da passarela, comparando aos limites normativos recomendados. Por fim, serão discutidos os parâmetros dinâmicos da estrutura, fazendo uma comparação entre resultados experimentais e numéricos alcançados, além das respectivas discussões.

3.1 Inspeção pericial

No processo de inspeção das passarelas, buscou-se identificar possíveis anomalias existentes, especialmente nos elementos da mesoestrutura. Foram vistoriados tanto elementos estruturais, como longarinas e vigas travessas, quanto os elementos utilitários das passarelas. Na Figura 6, é evidenciada a ocorrência de corrosão em vários elementos da estrutura, principalmente na viga travessa. A corrosão deste elemento pode ser justificada pela ineficiência do sistema de drenagem de águas pluviais da passarela, promovendo o acúmulo de água na viga travessa e, conseqüentemente, criando-se um ambiente propício para a ocorrência da corrosão.

Dessa forma, percebe-se que além da exposição a intempéries, problemas em dispositivos auxiliares da passarela são fatores agravantes na formação de manifestação de patologias,

demandando assim medidas corretivas para melhoramento dos respectivos sistemas. Como medidas possíveis, pode ser realizada a manutenções visando, se necessário, a substituição, parcial ou integral, do sistema de drenagem existente nas passarelas, reduzindo o acúmulo de água.

Figura 6 – Patologias identificadas em elementos estruturais das passarelas



Fonte: Autor (2024)

3.2 Projeto estrutural

No processo de análise estrutural, realizado com o *software SCIA Engineer 24.0*, foram calculadas as solicitações predominantes nos elementos que compõem as passarelas, bem como as verificações previstas na ABNT NBR 8800 (2024) e ABNT NBR 14762 (2010). Embora a versão do *software* utilizado considere, para os perfis laminados de aço, os critérios previstos na versão da ABNT NBR 8800 (2008), as verificações referentes ao estado-limite último (ELU) seguem válidas, visto que as análises seguem os mesmos procedimentos da ABNT NBR 8800

(2024). Dessa forma, serão apresentados os valores de esforços internos, como também as respectivas verificações realizadas em conformidade com as normas ABNT NBR 8800 (2024) e ABNT NBR 14762 (2010).

Os esforços predominantes nos perfis laminados das vigas principais (longarinas) e das transversinas são devido a flexo-compressão. Com isso, foram realizadas as verificações conforme recomendadas pela ABNT NBR 8800 (2024), sendo verificados para os respectivos elementos os mecanismos de flambagem local da alma (FLA) e flambagem local da mesa comprimida (FLM), bem como o mecanismo de flambagem lateral com torção (FLT). Sendo necessário a verificação dos diferentes modos de flambagem visando identificar qual destes é responsável por determinar o menor valor de esforço resistente, sendo este preponderante no processo de verificação do elemento estrutural.

Realizou-se também a verificação dos esforços combinados de compressão e flexão atuante nos perfis, garantindo assim a resistência e estabilidade quando sujeito aos efeitos de forma simultânea.

Os valores de momentos resistentes de cálculo para o perfil W 310 x 28.3 (longarina) foram limitados pelo mecanismo de FLT para o eixo de maior inércia, a saber, o eixo x, sendo o valor de 12380 kN.cm enquanto para o eixo y o valor foi determinado em função da flambagem local da mesa, sendo seu valor 1459 kN.cm.

Nas vigas cujos perfis são W 150 x 13 (transversinas), de forma análoga as longarinas, o mecanismo de flambagem lateral com torção foi preponderante na determinação do momento resistente de cálculo em relação ao eixo x, tendo o valor de 2381 kN.cm, enquanto para o eixo y o valor é 769 kN.cm, limitado pelo FLM.

As verificações para os estados-limites de serviço de ambos os elementos devem atender aos requisitos apresentados na ABNT NBR 8800 (2024). Conforme indicado na referida norma, o deslocamento máximo vertical admitido para combinações frequentes de serviço para as longarinas é $L/500$, uma vez que estas suportam os pilares da estrutura. Enquanto para as transversinas o valor máximo do deslocamento vertical não deve superar $L/350$. Em ambos os casos, L representam os comprimentos das longarinas e transversinas.

Dessa forma, os valores limitantes são 17,71 mm e 6,98 mm para as longarinas e a transversinas, respectivamente. Os deslocamentos calculados no *SCIA Engineer 24.0* para a longarina e transversina mais solicitadas foram respectivamente 12,50 mm e 13,20 mm. Assim, o perfil da longarina atende aos limites estabelecidos, visto que seu deslocamento equivale a aproximadamente 70% do valor limite, entretanto, a transversina mais solicitada não atende ao deslocamento máximo admissível, sendo assim necessário a utilização de um perfil com inércia

superior, visando atender estado-limite de serviço.

Em ambos os extremos da passarela os perfis das vigas travessas, os perfis do tipo W 310 x 28.3, semelhantes aos das vigas principais, apresentam como esforços solicitantes predominantes a flexão, esforço cortante e compressão. Assim sendo, verificou-se a estabilidade dos respectivos elementos conforme os critérios recomendados pela ABNT NBR 8800 (2024).

Foram verificados os mecanismos de flambagem local da mesa comprimida (FLM), flambagem local da alma (FLA) e flambagem lateral com torção (FLT) sendo obtido como momentos fletores resistentes 12920 kN.cm e 1459 kN.cm, em relação ao eixo x e y, respectivamente.

Foram verificados os valores limites estabelecidos em relação aos deslocamentos verticais máximos, sendo o valor limites dado pela expressão $L/500$, no qual L representa o comprimento do elemento. Com isso, o valor máximo de deslocamento vertical é 9,5 mm, enquanto o valor calculado através do *SCIA Engineer 24.0* foi 2,9 mm, sendo o estado-limite atendido.

As seções W que compõem os pilares da estrutura das passarelas possuem como ações solicitantes predominantes a flexão composta, nos pilares de canto, e tração, nos pilares centrais da estrutura. Assim, os pilares de canto devem ser verificados conforme os requisitos apresentados pela ABNT NBR 8800 (2024) referentes à flexão e compressão. Por apresentarem comportamento de tirantes, os pilares centrais devem ser verificados em relação aos critérios de elementos sujeitos a tração.

Conforme os requisitos normativos supracitados, o valor de esforço normal resistente de cálculo do perfil resulta em 521 kN referente a tração e 377 kN referente a compressão. Enquanto os momentos resistentes com relação aos eixos x e y são, respectivamente, 2942 kN.cm e 769 kN.cm.

As vigas longitudinais superiores contidas na cobertura das passarelas apresentam perfis W 150 x 13, iguais aos das transversinas da estrutura. Dessa forma, as verificações realizadas verificaram-se a flexão, bem como àquelas o esforço normal.

Seguindo-se os procedimentos indicados em norma, calculou-se os momentos resistentes de cálculo associados aos eixos de maior e menor inércia do perfil W 150 x 13.0 utilizado, tendo como resultado o valor de 2942 kN.cm para o eixo x.

No que diz respeito aos estados-limites de serviço, verificou-se que o valor limite para deslocamentos verticais máximos recomendados para vigas de cobertura não deve exceder o valor limite de $L/250$, sendo L igual a 8556 mm, aproximadamente. Desta forma, o valor limite de deslocamento é 34,22 mm, enquanto o valor calculado utilizando o *SCIA Engineer 24.0* é

12,4 mm, representado aproximadamente 36% do valor limite, sendo assim o critério normativo atendido com ampla segurança.

Os elementos transversais contidos na cobertura das passarelas, denominadas terças, por serem perfis formados a frio (PFF) tiveram suas verificações realizadas em conformidade com as recomendações da ABNT NBR 14762 (2010). Desse modo, verificou-se que o mecanismo associado a flambagem lateral com torção (FLT) é determinante no momento resistente para o eixo x peça, resultando em 3,05 kN.m. Observou-se também a necessidade de verificação para os efeitos combinados da flexão atuando simultaneamente com o cisalhamento, compressão e tração, sendo cada solicitação combinada com a flexão separadamente, de acordo com a referida norma utilizada.

Realizando as verificações de flexão e esforços combinados, identificou-se que a terça mais solicitada apresenta amplo aproveitamento do perfil U 100 x 30 x 3.0, sendo atendidas as condições de estabilidade dos respectivos elementos. Este elemento apresentou os valores de momentos resistentes em relação aos eixos x e y iguais a 18 kN.cm e 0,31 kN.cm, respectivamente. Ambos os valores estão associados a Flambagem Lateral com Torção (FLT)

Os resultados calculados no *software SCIA Engineer 24.0*, bem como o rendimento de cada um dos perfis das passarelas são apresentados resumidamente na Tabela 8.

Tabela 8 – Esforços solicitantes de cálculo nos elementos da passarela

Elemento	N _d (kN)	M _{dx} (kN.cm)	M _{dy} (kN.cm)	V _{dx} (kN)	V _{dy} (kN)	Rendimento (%)
Vigas principais (Longarinas)	5,67	4885	0,2	0,02	0,44	40
Transversinas	0,44	642	0,33	0,01	0,49	26
Vigas Travessas	2,98	-4251	172	-2,84	47,8	45
Pilar de Canto	-9,07	2514	34,2	-0,23	-17,4	92
Pilar Intermediário	11	-11,6	86,1	-0,49	0,13	13
Vigas longitudinais superiores	-18,1	-1343	0	0,01	7,28	64
Terça	0	18	0,3	0	0,08	7

Fonte: Autor (2024)

3.3 Análise modal

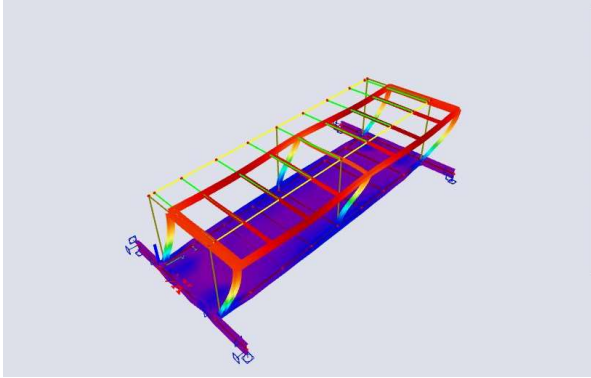
Serão apresentados nesta seção os resultados associados aos parâmetros dinâmicos da passarela de estudo, sendo realizado a comparação entre os resultados obtidos “in situ”, experimentalmente e numericamente. Observa-se ainda os limites previstos em normativas nacionais e, na ausência destes, comparativo com bibliografias internacionais.

3.3.1 Numérica

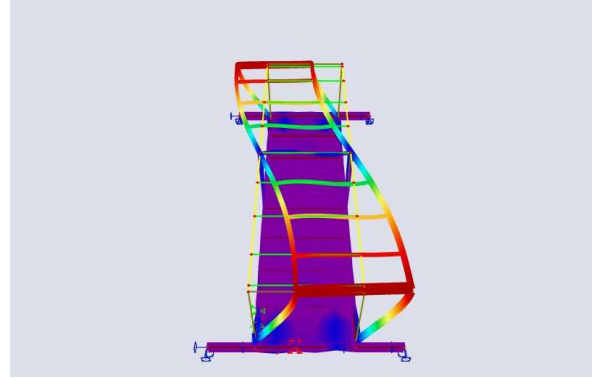
Realizada a modelagem da passarela, efetuou-se a análise modal numérica tendo como resultados os modos de vibração, bem como suas respectivas frequências naturais. Na Figura 7 são indicados os seis modos apresentados obtidos no processo de análise modal numérica no *SCIA*. Devido o escopo deste trabalho, a análise concentrou-se no modo vertical, indicado na Figura 7C e 7D, pois estes refletem aos impactos promovidos pelo caminhar humano e observado na etapa experimental realizada. O modo vertical nessa situação apresentou uma frequência natural no valor de 13,32 Hz.

Figura 7 – Modos de vibração para passarela

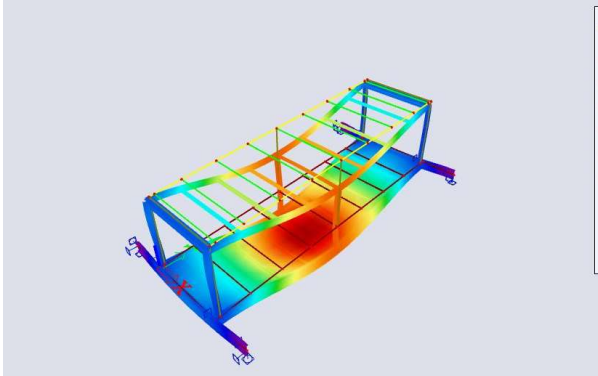
A. Modo 1 – 5,17 Hz



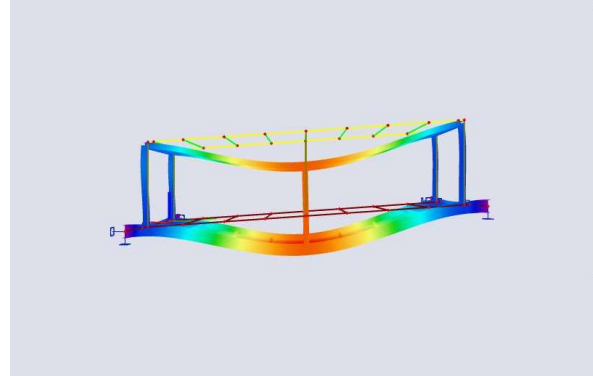
B. Modo 2 – 5,85 Hz



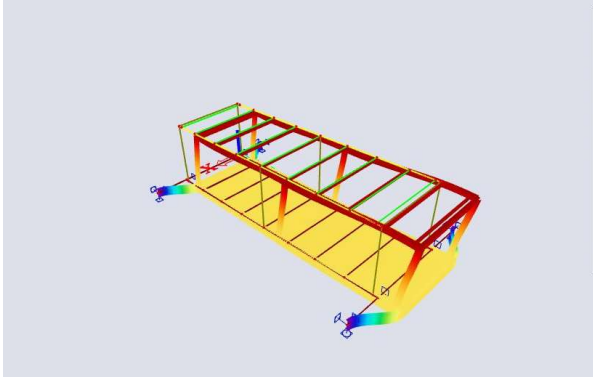
C. Modo 3 – 13,32 Hz (Isometria)



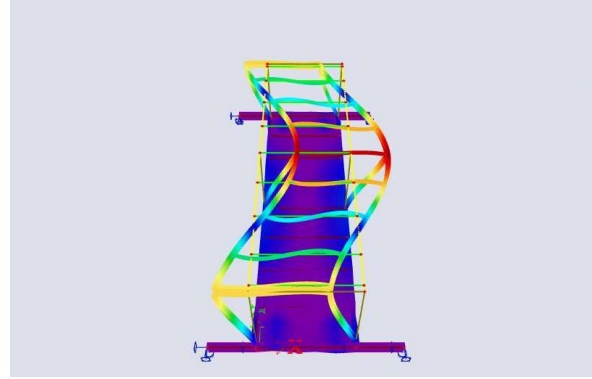
D. Modo 3 – 13,32 Hz (Vista lateral)



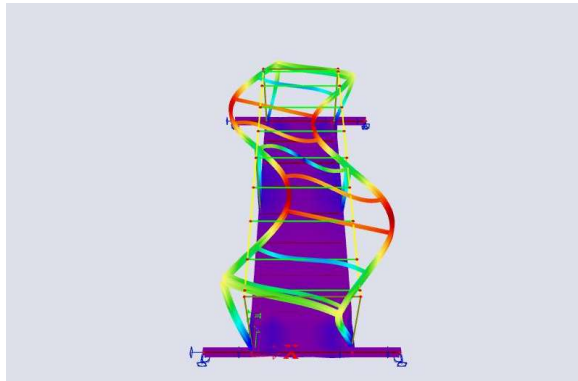
E. Modo 4 – 9,11 Hz



F. Modo 5 – 9,93 Hz



G. Modo 6 – 15,66 Hz



Fonte: Autor (2024).

3.3.2 Experimental

Na etapa experimental, foram analisados os dados referentes a direção do eixo Z, sendo este associado a sentido associado as vibrações no sentido vertical. Na Figura 8 apresenta-se o recorte de um dos ciclos dos valores de frequência obtida para as vigas principais da estrutura, constatando que estes são iguais e apresentam o valor de 9,5 Hz, diferindo apenas na razão amortecimento sendo, 3,64% e 3,77%, respectivamente para cada longarina. Com relação a aceleração RMS, obteve-se para os elementos ABN e ABS, conforme pode ser visto na Figura 5, os valores 0,236 m/s² e 0,221 m/s², respectivamente.

Figura 8 – Frequências naturais e razão de amortecimento

Fonte: Lima; et. al (2025)

3.2.3 Comparação dos resultados dos parâmetros dinâmicos

Conforme evidenciado nos resultados experimentais e numéricos para ABN e ABS, sendo 9,5 Hz e 13,32 Hz, respectivamente, os valores de frequência apresentaram uma divergência significativa entre si, uma vez que estes apresentaram um coeficiente de variação de 23,63%. Sendo a frequência obtida na análise numérica maior que os dados experimentais.

Embora existam as variações entre os resultados experimental e numérico, ambos os valores atendem aos requisitos normativos no que diz respeito as frequências naturais, tendo em conta que a ABNT NBR 8800 (2024) sugere que estes valores sejam superiores a 3Hz.

Devido à ausência de valores limites associados as acelerações nas referências nacionais, tomou-se como base o guia SÉTRA (2006) para efeitos de comparação do nível de conforto da passarela em relação a este parâmetro. Na Tabela 9 apresentam-se os limites adotados pelo guia.

Tabela 9 – Relação entre nível de conforto e aceleração

Intervalo	Aceleração (m/s ²)	Nível de Conforto
1	0,0 – 0,5	Máximo
2	0,5 – 1	Médio
3	1 – 2,5	Mínimo
4	>2,5	Intolerável

Fonte: SÉTRA (2006)

Comparando os valores de aceleração com os intervalos da Tabela 9, percebe-se que as passarelas se encontram no intervalo 1. Desta forma, de acordo com os critérios do guia adotado, o nível de sensações de conforto no uso das estruturas é considerado máximo.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A inspeção realizada de forma preliminar, permitiu identificar manifestações patológicas, do tipo corrosão, em elementos de algumas das passarelas. Embora os elementos apresentem um sistema de proteção realizado com pintura, deve-se realizar manutenções assíduas neste, uma vez que as passarelas se encontram em ambientes externos, logo, expostas agentes do intemperismo, como chuva, insolação e poluentes atmosféricos.

Com relação a verificação estrutural realizada através do *SCIA Engineer 24.0*, os resultados constataram que os perfis utilizados na composição da estrutura da passarela apresentam ampla resistência em resposta aos esforços solicitantes, tendo as vigas principais um aproveitamento de 26%, por exemplo. Dessa forma, os estados-limites últimos (ELU) considerados para cada elemento estrutura, apresentaram-se conforme as recomendações da ABNT NBR 8800 (2024) e ABNT NBR 14762 (2010). De forma análoga, as verificações referentes aos deslocamentos excessivos, também atendem aos valores limites apresentados nas referidas normas.

As verificações dos parâmetros também realizadas, experimentalmente e numericamente, comprovaram que as frequências associadas ao modo vertical da passarela estudada, em ambos os casos, são superiores a 3 Hz. Relativamente as acelerações aferidas experimental, estas apresentaram valores dentro dos limites considerados neste estudo. Entretanto, embora os parâmetros dinâmicos encontrados demonstrem conformidade com as referências, não é correto afirmar que as passarelas estão totalmente aptas para ao uso do público, visto que o estudo experimental realizado não condiz com o tráfego de várias pessoas que ocorre em situações reais de uso.

Diante disto, como sugestão de trabalhos futuros, tem-se a realização de ensaios experimentais em todas as passarelas presentes no CAA-UFPE, afim de comparar com os resultados obtidos neste trabalho, sendo considerados também carregamento de múltiplas pessoas na estrutura. No tocante a normativas, é sugerido que sejam feitas abordagens de estudo tendo como referências as normas ISSO 10137 e Steel Design Guide 11. De forma complementar, realizar a modelagem das demais passarelas, atentando-se aos pormenores de cada estrutura, como por exemplo a conexão entre as longarinas e vigas travessas, visto que a rigidez da ligação entre estes elementos é um aspecto significativo nos resultados de frequências naturais. Dessa forma, espera-se incentivar o estudo do controle de vibrações nas respectivas passarelas, através da análise e implantação de dispositivos de controle de vibração, afim da

extensão da vida útil dessas estruturas.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14762:** Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16875:** Chapas e bobinas de aço laminadas, revestidas ou não, para peças estampadas a quente - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6123:** Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6355:** Perfis estruturais de aço formados a frio - Padronização. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7007:** Aços-carbono e aços microligados para barras e perfis laminados a quente para uso estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7188:** Ações devido ao tráfego de veículos rodoviários e de pedestres em pontes, viadutos e passarelas. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8186:** Ações e seguranças nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800:** Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9050:** Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- CENTRO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO EM AÇO (CBCA). (2011). **Ligações em estruturas metálicas**. Volume 1. Rio de Janeiro: CBCA.
- LIMA, D. M.; GILÓ, B. M. S.; CAVALCANTI, M. E. V.; PEREIRA, I. L.; LUCENA, S. S. D.; GALINDO, T. A.; BEZERRA, C. J. M.; ALVES, I. R. M.; SILVA, I. S. S.; MEDEIROS, I.S. Vibration analysis of steel footbridges: Experimental investigation, numerical modelling and theoretical approach. **Structures**, vol. 72, fev. 2025.
- MAJOR, Maciej; MINDA, Izebela; MAJOR, Izabela. Dynamic Numerical Analyses of Footbridge. **Civil and Environmental Engineering**, vol. 13, p. 58-66, 16 de jun. 2017.

VIEIRA, G. D.; BATISTA, A. L. S.; PARANHOS, L. P.; NEIVA, P. H. G.; PRAZERES, P. G. C. Análise Patológica de uma Passarela Metálica. In: **X Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas**, Rio de Janeiro, maio 2018.

SARAMAGO, Gabriel Araujo; SANTOS, Sergio Hampshire de Carvalho; PERLINGEIRO, Mayra Soares Pereira Lima. Análise Dinâmica de Passarelas. In: **X Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas**, Rio de Janeiro, maio 2018.

GONÇALVES, P.C; GRANATO, E.C; SANTOS V.C, GUIMARÃES, A.G. ANÁLISE DE VIBRAÇÕES DE PASSARELA DE PEDESTRES DEVIDO À MOVIMENTAÇÃO HUMANA. **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural**, Passo Fundo, V. 17 n. 2, p. 1-22, jan./abr. 2020.

DALLARD, P.; FITZPATRICK, A. J.; FLINT, A.; LE BOURVA, S.; LOW, A; RIDSDILL SMITH, R. M.; WILLFORD, M. The London Millennium Footbridge. **The Structural Engineer**, v. 79, n. 22, p. 17–21, 2001.

RODRÍGUEZ-SUESCA, A. E.; GUTIÉRREZ-JUNCO, O. J.; HERNÁNDEZ-MONDE, E.. Vibration performance assessment of deteriorating footbridges: A study of Tunja's public footbridges. **Engineering Structures**, 256, 113997, 01 de abr. 2022.

SETRA ' - service d'Etudes '. Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading (2006). Techniques des routes et autoroutes. Paris.

ITALO SÍLVIO DOS SANTOS DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DAS PASSARELAS DE AÇO DO CENTRO
ACADÊMICO DO AGRESTE (UFPE-CAA)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Civil do Campus
Agreste da Universidade Federal de Pernambuco –
UFPE, na modalidade de artigo científico, como requisito
parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
Civil.

Defesa realizada por videoconferência.

Área de concentração: Estruturas

Aprovado em 21 de outubro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Douglas Mateus de Lima (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Flávio Eduardo Gomes Diniz (Avaliador)
Universidade Federal de Pernambuco

Engº. M.Sc. Henrique Tavares Lima (Avaliador)
Concordia University

Engº. M.Sc. Iálysson da Silva Medeiros (Avaliador)
Universidade Federal do Rio de Janeiro