



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
POLO UNIVERSITÁRIO DE GOIANÉSIA

DANIEL LAREDO CARDOSO
ROBSON ALHO DOS SANTOS

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DA PONTE SOBRE O RIO CHATOPAUÁ
UTILIZANDO O SOFTWARE COMERCIAL SAP2000®**

GOIANÉSIA DO PARÁ - PA

2024

DANIEL LAREDO CARDOSO
ROBSON ALHO DOS SANTOS

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DA PONTE SOBRE O RIO CHATOPAUÁ ATRAVÉS
DO SOFTWARE COMERCIAL SAP2000.**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia Civil da UFPA, Campus de Tucuruí, Polo de Goianésia do Pará, como requisito de avaliação para conclusão do curso de Engenharia Civil, a título de Bacharel.
Orientador: Prof. Dr. Manoel José Mangabeira Pereira Filho.

GOIANÉSIA DO PARÁ - PA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará

Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A397a Alho dos Santos, Robson.

ANÁLISE COMPUTACIONAL DA PONTE SOBRE O RIO
CHATOPAUÁ ATRAVÉS DO SOFTWARE COMERCIAL

SAP2000. / Robson Alho dos Santos, Daniel Laredo. — 2024.

60 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Manoel José Mangabeira Pereira
Filho Trabalho de Conclusão (Graduação) - Universidade
Federal do

Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de
Engenharia Civil, Tucuruí, 2024.

1. Ponte Chatopauá. 2. SAP2000. 3. Análise
computacional. 4. Prova de carga estática. 5. Engenharia
estrutural. I. Título.

CDD 620.00151825

DANIEL LAREDO CARDOSO
ROBSON ALHO DOS SANTOS

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DA PONTE SOBRE O RIO CHATOPAUÁ ATRAVÉS
DO SOFTWARE COMERCIAL SAP2000.**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia Civil da UFPA, Campus de Tucuruí, Polo de Goianésia do Pará, como requisito de avaliação para conclusão do curso de Engenharia Civil, a título de Bacharel.
Orientador: Prof. Dr. Manoel José Mangabeira Pereira Filho.

Data da aprovação: 28 / 11 / 2024

Conceito: EXCELENTE

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Manoel José Mangabeira Pereira Filho (UFPA – CAMTUC)
Doutor em Estruturas e Construção Civil (Orientador)

Prof. Me. Davi B. C. Silva (UFPA – CAMTUC)
(examinador interno)

Prof. Me. Jedson Henryque Correa Abrantes (UFPA – CAMTUC)
(examinador interno)

Eng. Civil Álvaro Araújo Castro (CONSÓRCIO MAGNA-ENECON)
(examinador externo)

DEDICATÓRIA

"Eu te agradeço, Senhor, de todo o coração; contarei todas as tuas maravilhas."

Salmos 9:1

AGRADECIMENTOS

Daniel Laredo Cardoso

Eu agradeço, primeiramente, à Deus Pai, Filho e Espírito Santo pelo dom da vida e por não me deixar desistir do curso mesmo com as dificuldades, lutas, problemas e frustrações.

Agradeço à minha mãe, Denilza Laredo, e à minha mãe, Vaneide Mendes, por nunca desacreditarem de mim, sonhar junto comigo e por me manterem financeiramente e espiritualmente de pé até o fim do curso.

Agradeço ao casal João Onorato, à sua esposa, Rosinelma Lobo, e ao seu filho, João Daniel, pelo acolhimento em sua residência, permitindo que eu pudesse morar, me alimentar e manter o diálogo durante o período do curso. Também sou grato aos meus tios-avós Otávio e Dalva por me acolherem durante um período em sua casa e acreditarem em mim.

Quero agradecer aos amigos de faculdade que, durante todo esse tempo, fizeram-me companhia: Alex, Alyne, Amanda, Eduarda, Jennisson, Matuzalem, Renata, Taiane e, em especial, ao meu irmão do coração e companheiro de TCC, Robson Alho agradeço pelo companheirismo, pelas longas horas de estudo e pela troca de ideias que enriqueceram nosso projeto. Obrigado por cada esforço e por tornar esta jornada acadêmica tão gratificante.

Agradeço também aos meus professores Aarão Neto, Carolina Coelho, Davi Silva, Marlon Santos, Grazielle Tigre, Raisia Neves e, em especial, ao professor Manoel José Mangabeira Pereira Filho, sua contribuição e paciência para esclarecer nossas dúvidas na orientação, foram fundamentais para o sucesso do nosso trabalho.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão ao professor Jedson Abrantes, que generosamente dedicou parte de seu tempo para nos auxiliarem durante o processo de construção deste trabalho.

Gostaria de manifestar minha imensa gratidão ao nosso amigo, Engenheiro Civil Mateus Leal Santos. Sua disponibilidade e dedicação ao nos auxiliar com o software SAP2000 foram de valor incalculável.

Por fim, agradeço aos meus familiares – tios, primos, primas, avós –, amigos e pastores por todo o apoio, orações e ajuda financeira que me proporcionaram ao longo dessa jornada não parar e nem desistir.

A todos, minha gratidão. Essa vitória é nossa!

AGRADECIMENTOS

Robson Alho dos Santos

Primeiramente agradeço à Deus pelo dom da vida, por cada uma das oportunidades que Ele me concedeu, e de ter me sustentado em todas as inúmeras vezes que pensei que não iria conseguir. Obrigado meu Deus.

Agradeço aos meus pais, Deuzarina Alho dos Santos e Raimundo Gomes dos Santos, obrigado por serem meu alicerce, meu porto seguro e minha maior inspiração. Cada palavra de incentivo, cada gesto de carinho e cada sacrifício feito em silêncio foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Agradeço aos meus irmãos, Deise Alho dos Santos e Ronaldo Alho dos Santos, pelo carinho e incentivo que nunca me faltou. Obrigado por acreditarem e investirem em mim para que eu pudesse estudar, nunca esqueci disso.

A minha esposa Glauciani Lima Silva Alho, agradeço por acreditar em mim, mesmo quando eu duvidei de mim mesmo, e por estar ao meu lado em todas as etapas desta jornada.

Meu querido filho Caleb Lima Silva Alho, quero te agradecer do fundo do meu coração. Você chegou em minha vida em meio a uma jornada muito difícil. Embora os desafios não tenham desaparecido, o seu amor foi essencial para me ajudar a superar todas as dificuldades. Sua presença trouxe luz e força aos meus dias.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao meu parceiro de TCC, Daniel Laredo. Sua dedicação, empenho e colaboração foram fundamentais para a realização deste trabalho. Agradeço pelo companheirismo, pelas longas horas de estudo e pela troca de ideias que enriqueceram nosso projeto. Sem sua parceria, este TCC não teria alcançado o mesmo nível de qualidade e profundidade. Obrigado por cada esforço e por tornar esta jornada acadêmica tão gratificante.

Quero expressar minha profunda gratidão ao nosso amigo, Engenheiro Civil Mateus Leal Santos. Sua generosidade em dedicar seu tempo para nos ajudar com o software SAP2000 foi inestimável.

Queridos colegas de turma, quero expressar minha mais sincera gratidão a cada um de vocês. Nossa jornada na Engenharia Civil foi repleta de desafios, noites em claro e momentos de intensa dedicação, mas também de muitas conquistas e aprendizados. A parceria, a

colaboração e o apoio mútuo fizeram toda a diferença nessa caminhada. Cada palavra de incentivo, cada gesto de ajuda e cada risada compartilhada contribuíram para que chegássemos até aqui com sucesso. Muito obrigado por fazerem parte dessa experiência inesquecível e por transformarem esses anos em algo verdadeiramente especial.

Agradeço ao professor Manoel José Mangabeira Pereira Filho, sua contribuição e paciência para esclarecer nossas dúvidas na orientação, foram fundamentais para o sucesso do nosso trabalho.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão ao professor Jedson Abrantes, que generosamente dedicou parte de seu tempo para nos auxiliar durante o processo de construção deste trabalho.

Aos professores, Aarão Neto, Carolina Coelho, Davi Silva, Marlon Santos, Grazielle Tigre, Fernanda Gouveia, Raisal Neves, Jefferson Costa, Vanessa Costa, Evanice Gomes, Regina Brabo, Marcelo Massulo, Débora Dias, Cleison Silva, Raynner Lopes, Ezequiel Belo, meu muito obrigado a todos.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que trabalharam incansavelmente para que este curso acontecesse em Goianésia do Pará. Meu sincero agradecimento à Professora Cristina, à Prefeitura Municipal de Goianésia do Pará, ao professor Maneschy, ao professor Wassim Raja e a Novax Sacramento. Um agradecimento especial à equipe do Polo UaB, que sempre nos acolheu com carinho e dedicação. Gratidão a todos vocês por tornarem essa jornada possível e especial.

Quero expressar minha profunda gratidão a todos que, de alguma forma, me ajudaram a chegar até aqui. Agradeço aos meus cunhados e cunhadas, sobrinhos e sobrinhas, tios e tias, primos e primas, sogra e sogro (*in memoriam*) e amigos. Cada palavra de incentivo foram fundamentais para o meu sucesso.

A todos, minha gratidão. Essa vitória é nossa!

Uma ponte é mais do que uma estrutura; é uma conexão entre duas realidades, erguida sobre cálculos precisos e imaginação sem limites (Petroski, 1995).

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise computacional detalhada da Ponte Chatopauá, situada na Rodovia Transamazônica (BR-230), utilizando o software SAP2000®. O objetivo é compreender o desempenho estrutural do modelo em diferentes condições de carregamento e configurações estruturais, combinando modelagem computacional com ensaios de prova de carga estática. Inicialmente, o estudo destaca a relevância da análise estrutural como uma ferramenta essencial para garantir a segurança, estabilidade e funcionalidade de obras de arte especiais. O uso de softwares avançados, como o SAP2000, permite cálculos mais precisos, otimizando recursos, reduzindo erros e aumentando a confiabilidade dos projetos. A análise segue normas técnicas reconhecidas, como a NBR 9607/2023, que estabelece os procedimentos para provas de carga em estruturas. Três modelos computacionais foram desenvolvidos, variando as configurações de longarinas e transversinas, e submetidos a ensaios estáticos simulados. Durante os testes, cargas foram aplicadas em diferentes posições para monitorar deslocamentos e deformações. Os resultados desses modelos foram comparados com os dados experimentais obtidos em campo, avaliando a capacidade de cada configuração de reproduzir o comportamento real da estrutura. Os resultados mostraram que cada modelo tem características específicas e vantagens próprias. O modelo 1 destacou-se pela alta rigidez estrutural, ideal para situações em que a redução de deformações é fundamental. O modelo 2 apresentou grande compatibilidade com o comportamento observado na ponte real, sendo indicado para projetos que priorizam estabilidade e fidelidade estrutural. Por fim, o modelo 3 foi o mais preciso na reprodução dos ensaios experimentais, oferecendo dados detalhados que enriquecem a validação teórica. Conclui-se que a análise computacional é indispensável na engenharia moderna, permitindo simulações precisas e seguras que minimizam riscos e otimizam os projetos. Este estudo reforça a importância de integrar modelagem computacional ao processo de análise e dimensionamento, recomendando o uso de ferramentas como o SAP2000 e sugerindo, para estudos futuros, a exploração de outros softwares avançados, como ANSYS e CSI Bridge, para ampliar as possibilidades de análise e validação estrutural.

Palavras-chave: Ponte Chatopauá, SAP2000, análise computacional, prova de carga estática, engenharia estrutural.

ABSTRACT

This work presents a detailed computational analysis of the Chatopauá Bridge, located on the Transamazonian Highway (BR-230), using the SAP2000® software. The objective is to understand the structural performance of the model under different loading conditions and structural configurations, combining computational modeling with static load test experiments. Initially, the study highlights the relevance of structural analysis as an essential tool for ensuring the safety, stability, and functionality of special structures. The use of advanced software, such as SAP2000, enables more accurate calculations, optimizing resources, reducing errors, and increasing project reliability. The analysis follows recognized technical standards, such as NBR 9607/2023, which outlines procedures for load tests on structures. Three computational models were developed, varying the configurations of longitudinal and transverse beams, and subjected to simulated static tests. During the tests, loads were applied at different positions to monitor displacements and deformations. The results of these models were compared with experimental data obtained in the field, assessing the ability of each configuration to replicate the real behavior of the structure. The results showed that each model has specific characteristics and advantages. Model 1 stood out for its high structural rigidity, ideal for situations where minimizing deformations is crucial. Model 2 demonstrated great compatibility with the behavior observed in the actual bridge, making it suitable for projects that prioritize stability and structural fidelity. Finally, Model 3 was the most accurate in reproducing experimental tests, providing detailed data that enrich theoretical validation. It is concluded that computational analysis is indispensable in modern engineering, allowing precise and safe simulations that minimize risks and optimize projects. This study reinforces the importance of integrating computational modeling into the analysis and design process, recommending the use of tools such as SAP2000 and suggesting, for future studies, the exploration of other advanced software, such as ANSYS and CSI Bridge, to expand the possibilities for structural analysis and validation.

Keywords: Chatopauá Bridge, SAP2000, computational analysis, static load test, structural engineering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ponte sobre o Rio Chatopauá.....	18
Figura 2 -Liana.....	20
Figura 3 - Instrumentos para testes de materiais.....	21
Figura 4 - Primeiros exemplos de carga de prova no Brasil.	22
Figura 5 - SAP2000 v22.....	25
Figura 6 – Normas disponíveis no SAP2000.....	26
Figura 7 – Gráficos de análises de momentos.	27
Figura 8 – Funcionalidade de automação (Templates).	27
Figura 9 – Templates para iniciar rapidamente um novo modelo no SAP2000.	28
Figura 10 – Sistema de aquisição de dados – ADS 2000.....	29
Figura 11 - Equipamentos utilizados para medição dos deslocamentos.....	30
Figura 12 - Extensômetro de Resistência Elétrica 30	30
Figura 13 – Disposição dos LVDT's 31	31
Figura 14 – Execução do ensaio de carga estática sobre a ponte do Rio Chatopauá.....	32
Figura 15 – Ensaio estático: (a) Ensaio 1; (b) Ensaio 2; (c) Ensaio 3.	33
Figura 16 - Localização da Ponte sobre o Rio Chatopauá.	34
Figura 17 - Imagem da Ponte sobre o Rio Chatopauá.	34
Figura 18 - Corte transversal dos pilares 35	35
Figura 19 – Perfil longitudinal no eixo da obra 36	36
Figura 20 - Corte da vista da transversina. 37	37
Figura 21 – Características geométricas das longarinas. 37	37
Figura 22 – Processo de modelagem de vigas e pilares..... 39	39
Figura 23 – Criando área de seção..... 40	40
Figura 24 – Processo de modelagem extrude. 40	40
Figura 25 – Editar área. 41	41
Figura 26 - Offset..... 41	41
Figura 27 – Renderização frontal dos protótipos. 42	42
Figura 28 – Frames em Shell..... 43	43
Figura 29 – Detalhamento da viga em Shell..... 43	43
Figura 30 – Editar áreas. 45	45
Figura 31 – Processamento de dados..... 46	46
Figura 32 – Gráficos de deflexão. 47	47
Figura 33 – Resultados da aplicação do Shell na ponte. 48	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – LVDT Ld Sensor	31
Quadro 2 - Valores de referência dos materiais utilizados.	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADS 2000	Análise e Dimensionamento de Estruturas de Aço.
BIM	Building Information Modeling - Modelagem da Informação da Construção
CSI	Computers and Structures, Inc. empresa de software especializada
DNIT	Departamento Nacional de infraestrutura de Transportes
LVDT	Transdutor de deslocamento
NBR	Normas Brasileira
NDAE	Núcleo de Desenvolvimento Amazônico
OAE	Obra de Arte Especial
UFPA	Universidade Federal do Pará
V2	Longarina central

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resultados do primeiro ensaio: (a) Perfil de Deslocamentos Verticais Transversais; (b) e (c) Perfis de Deslocamentos Verticais Longitudinais.	49
Gráfico 2 – Resultados do primeiro ensaio: (a) Perfil de Deslocamentos Verticais Transversais; (b) e (c) Perfis de Deslocamentos Verticais Longitudinais.	50
Gráfico 3 – Resultados do primeiro ensaio: (a) Perfil de Deslocamentos Verticais Transversais; (b) e (c) Perfis de Deslocamentos Verticais Longitudinais.	51

Sumário

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Justificativa	18
1.2 Objetivo	19
1.2.1 Objetivos Gerais.....	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Prova de carga	20
2.1.1 Ensaio de prova de carga.....	22
2.2 Modelo numérico	23
2.2.1 Modelador computacional.....	25
3 METODOLOGIA	29
3.1 Ensaio de prova de carga estática	29
3.2 Ponte	33
3.2.1 Localização da Ponte.....	33
3.2.2 Geometria da ponte.....	34
3.2.3 Detalhes do ensaio.....	37
3.3 Modelagem computacional	38
3.3.1. Modelo computacional 1.....	39
3.3.2 Modelo computacional 2.....	41
4 RESULTADOS	47
4.1 Ensaio 1	47
4.2 Ensaio 2	49
4.3 Ensaio 3	51
5 DISCURSÕES	52
5.1 Ensaio 1	52
5.2 Ensaio 2	53
5.3 Ensaio 3	54
6 CONCLUSÃO	56
6.1 – Sugestões para futuros trabalhos	57
REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

As pontes como obras grandiosas, geralmente têm seus projetos elegidos por meio de concursos, necessitando de maior análise do profissional com sua criação, o qual deve buscar em seu projeto o design mais eficaz, que produzirá o melhor resultado de estabilidade estrutural e que apresentará redução na utilização dos recursos (Vieira, 2016). O objetivo do projeto estrutural é criar uma estrutura que atenda às demandas para as quais foi planejada, garantindo segurança, funcionalidade, conforto, viabilidade econômica e estética, além de considerar o impacto ambiental, as condições de construção e as exigências legais.

De acordo com Billington (1983), a arte estrutural se caracteriza pela excelência em três aspectos fundamentais: eficiência, economia e elegância. Nesse contexto, a tecnologia, aliada aos cálculos manuais, desempenha um papel crucial na minimização de erros durante a execução de projetos arquitetônicos. Além disso, conforme aponta McCormac e Nelson (2016), a análise estrutural é indispensável para o desenvolvimento de estruturas seguras e funcionais. Ela possibilita que os engenheiros avaliem os efeitos das cargas e das condições de suporte, assegurando que a estrutura cumpra sua finalidade com risco mínimo de falhas.

Segundo Franco e Rocha (2021), a análise estrutural de pontes é essencial para garantir a segurança, estabilidade e funcionalidade dessas estruturas, contribuindo diretamente para o desenvolvimento econômico ao facilitar o transporte de pessoas e mercadorias.

A análise estrutural é, assim, uma investigação fundamental para assegurar que o equilíbrio das forças em uma edificação seja mantido, garantindo sua segurança e funcionalidade (Salvadori e Heller, 1986). O uso de *softwares* de análise estrutural durante o planejamento de estruturas ajuda os projetistas a otimizar o tempo e obter resultados mais precisos, essas ferramentas vem se tornando essenciais para projetos de engenharia, principalmente devido à crescente complexidade das obras e à busca por maior precisão e eficiência nos cálculos.

O uso de ferramentas computacionais não apenas facilita a análise de estruturas complexas, mas também melhora significativamente a confiabilidade dos resultados, permitindo que os engenheiros tomem decisões embasadas em dados robustos e precisos (Ghali; Neville, 2020). No caso de pontes, é comum o uso de programas como SAP2000, Ansys e FTOOL, que são utilizados tanto por profissionais quanto por acadêmicos para apoiar o processo de dimensionamento e análise estrutural.

A análise estrutural presente nesse trabalho foi realizada por meio do *software* comercial SAP 2000. Este, destaca-se pela precisão nos cálculos estruturais e modelagens complexas, sendo utilizado em projetos de infraestrutura crítica, como pontes e edifícios, devido à confiabilidade em análises estáticas e dinâmicas. O *software* também se destaca por atender a diversas normativas internacionais e permitir a geração automática de cargas como vento e sismos, facilitando a verificação precisa dos elementos estruturais em diferentes condições (Kulkarni, 2020).

Este estudo analisou computacionalmente o comportamento estrutural da Ponte sobre o Rio Chatopauá, mostrada na Figura 1, na BR-230 (Rodovia Transamazônica), construída em concreto armado. Utilizou-se o *software* comercial SAP2000 para a análise estática. Inaugurada em 1972, a BR-230 visa integrar o Norte ao Nordeste do Brasil e melhorar as condições de habitação na Amazônia. No total, são 4.997 quilômetros de rodovia, sendo o marco zero na cidade de Cabedelo, na Paraíba, e o final em Lábrea, no Amazonas (Brasil, 2022).

Figura 1 - Ponte sobre o Rio Chatopauá



Fonte: Google Earth, 2024.

1.1 Justificativa

Pontes rodoviárias enfrentam diversas cargas ao longo de sua vida útil, tornando essencial uma análise detalhada do comportamento estrutural para garantir segurança, durabilidade e eficiência. A análise computacional, utilizando o método dos elementos finitos, permite simular esforços e deformações, identificando pontos críticos e otimizando recursos. Diferentes modelagens estruturais ajudam a reduzir incertezas e a adaptar o projeto a condições variadas, resultando em soluções mais seguras, econômicas e sustentáveis (Chopra; Clough, 2004).

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivos Gerais

- a) Desenvolver modelos simplificados da ponte sobre o Rio Chatopauá com desempenho estrutural e durabilidade semelhantes aos resultados experimentais do projeto original;
- b) avaliar se a técnica de modelagem computacional adotada influencia a resistência do modelo, permitindo alcançar o valor experimental do resultado final.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Comparar os resultados dos modelos computacionais do *software* comercial SAP2000® com os ensaios de prova de carga, avaliando a proximidade entre os deslocamentos teóricos e os modelados;
- b) a abordagem visa otimizar o design estrutural, reduzindo complexidade dos modelos e o tempo de construção, mantendo a segurança e funcionalidade;
- c) verificar rigidez das longarinas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Prova de carga

A engenharia civil nasceu com o desenvolvimento das construções, onde a experimentação por tentativa e erro desempenhou um papel essencial. Essa abordagem de testar para verificar se algo realmente funciona deu origem ao conceito de prova de carga. De acordo com Lantsoght (2019), os testes de carga são tão antigos quanto a própria humanidade. Milênios atrás, por exemplo, já se realizavam experimentos para medir a resistência de materiais naturais ou para avaliar a capacidade de carga de uma árvore caída, como por exemplo, o experimento com a liana, planta de caule flexível, ilustrada na Figura 2.

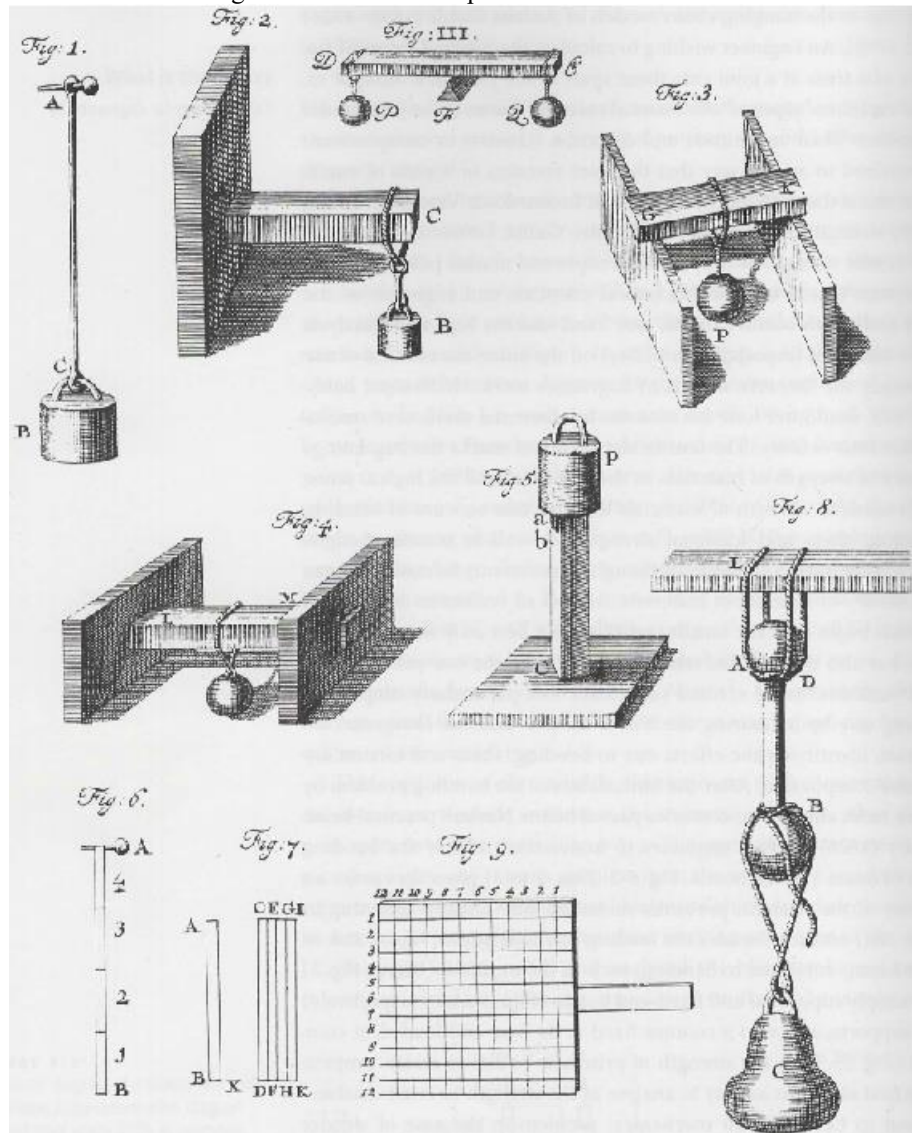
Figura 2 -Liana



Fonte: Beloni, 2012.

Embora esses experimentos tenham origens muito antigas, Almeida (2015) atribui a Leonardo da Vinci, no século XV, ilustrado na Figura 3, o primeiro teste de carregamento estrutural documentado. Em seu experimento, intitulado *Testando a resistência de barras de ferro de vários comprimentos*, Da Vinci buscava compreender as propriedades e limitações dos materiais utilizados na época.

Figura 3 - Instrumentos para testes de materiais.

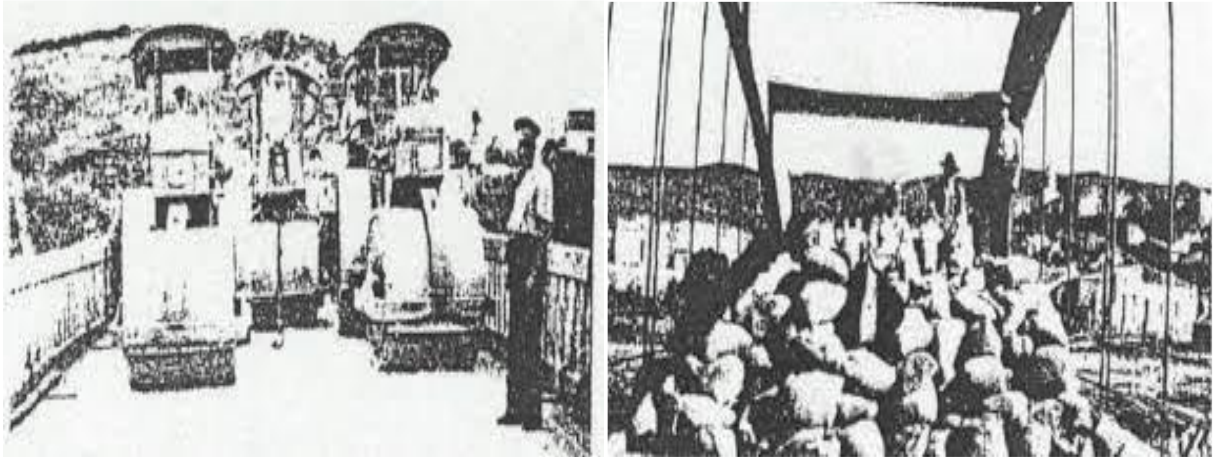


Fonte: Alves, 2019.

Com o passar dos séculos, os métodos de teste e dimensionamento se tornaram mais precisos e sofisticados. No século XX, surgiu um movimento global de normatização, estabelecendo regras mais rigorosas e padronizadas para os processos de dimensionamento e análise de propriedades mecânicas. Esse avanço foi crucial para o desenvolvimento da engenharia civil moderna, criando uma base sólida de normas e práticas amplamente aceitas e utilizadas ao redor do mundo (Salvadori; Heller, 1986).

No território brasileiro, os primeiros testes de prova de carga em pontes datam da década de 1930, conforme documentado por Lacerda (2015). Naquela época, esses ensaios foram conduzidos em duas pontes rodoviárias, empregando rolos compressores e sacos de areia como cargas de teste, ilustrado na Figura 4. Essas primeiras avaliações estruturais foram fundamentais para o desenvolvimento das práticas de engenharia de pontes no país.

Figura 4 - Primeiros exemplos de carga de prova no Brasil.



a) Rolos compressores sobre a ponte

b) Sacos de areia sobre a ponte

Fonte: Palazzo, 2002.

2.1.1 Ensaio de prova de carga

As provas de carga são uma ferramenta essencial para validar a integridade estrutural e a capacidade de carga de estruturas, permitindo a avaliação da conformidade entre o comportamento real e o projetado (Leonhardt, 1982). Ademais, Vazquez e Santos (2014), provas de carga estáticas são cruciais para assegurar que as estruturas atendam aos requisitos de segurança, especialmente em condições em que há dúvidas quanto à qualidade da execução ou quando se detectam anomalias durante inspeções de rotina.

Segundo a NBR 9607/2019 – O Ensaio de Carga em Estruturas que orienta acerca da velocidade do vento que deve ser monitorada durante a execução do ensaio, uma vez que ventos superiores a 10 m/s podem gerar esforços adicionais nas estruturas testadas, comprometendo os resultados. Com isso, os ensaios atenderam as condições ambientais de velocidade do vento, umidade e temperatura, dos quais foram monitorados durante toda a realização dos ensaios estáticos e durante 20 minutos anteriores a realização do primeiro ensaio.

De acordo com o ASHRAE (2020), os testes de carga devem ser realizados em condições ambientais controladas, de forma a garantir resultados confiáveis e consistentes. A norma enfatiza que a presença de ventos fortes pode influenciar significativamente a distribuição de forças nas estruturas, introduzindo cargas adicionais que não foram consideradas no projeto original. Essa abordagem visa evitar interpretações equivocadas sobre o desempenho estrutural, permitindo que os resultados reflitam exclusivamente as condições planejadas para o ensaio.

Em concordância a isso o Manual de Inspeção de Pontes, DNIT (2004) cita que o ensaio estático de carga é um método direto de verificação da capacidade estrutural de uma ponte. Durante o ensaio, é fundamental monitorar parâmetros como deslocamentos verticais e horizontais, fissuração e o comportamento do material sob carregamento.

O tempo de permanência do carregamento durante as provas de carga em pontes é fundamental para assegurar que a estrutura tenha atingido um comportamento estável sob ação da carga. Esse período de espera permite a avaliação de deformações permanentes e a verificação de possíveis anomalias, sendo uma prática essencial para garantir a segurança e a confiabilidade dos resultados obtidos (Santos; Oliveira, 2015).

2.2 Modelo numérico

Os modelos numéricos se tornaram uma verdadeira revolução na engenharia moderna, ajudando profissionais a enfrentar desafios cada vez mais complexos. Como destaca Santos (2022), esses modelos são ferramentas essenciais para simular o comportamento de estruturas e materiais sob diversas condições, permitindo que engenheiros avaliem a segurança e a eficiência de um projeto antes mesmo de sua construção. Essa abordagem economiza tempo, reduz custos e diminui riscos.

Na visão de Santos (2022), A capacidade de prever o desempenho de uma estrutura com base em modelos numéricos não apenas eleva a qualidade do projeto, mas também transforma a maneira como toma-se decisões, permitindo soluções mais inovadoras e sustentáveis. Esse avanço demonstra como a tecnologia continua a remodelar a prática da engenharia.

Segundo Bathe (2014), os métodos numéricos computacionais revolucionaram a prática da engenharia, permitindo análises precisas e confiáveis que antes seriam impossíveis. Essa abordagem garante que os engenheiros possam prever o comportamento estrutural de forma robusta, assegurando segurança, eficiência e o atendimento a padrões rigorosos de desempenho.

Para Costa (2021), A capacidade de simular cenários complexos com precisão nos dá não apenas confiança nos projetos, mas também a flexibilidade de explorar soluções mais

eficientes e sustentáveis, algo crucial num mundo cada vez mais exigente. Essa perspectiva destaca o papel transformador da tecnologia no setor da engenharia.

De acordo com Kulkarni et al. (2020), o uso de ferramentas computacionais como o SAP2000 tem sido crucial para a análise de estruturas complexas, permitindo aos engenheiros explorar diferentes cenários estruturais com maior precisão e confiabilidade. Isso não apenas otimiza os recursos do projeto, mas também assegura a segurança e a eficiência das construções, características fundamentais em projetos de infraestrutura crítica.

E para Pereira (2021) A integração de simulações numéricas ao processo de projeto revolucionou a prática da engenharia e da arquitetura, permitindo explorar soluções mais ousadas sem comprometer a segurança ou o orçamento. Esse avanço tecnológico continua a moldar o futuro da construção civil.

Com base nas citações mencionadas acima, é possível identificar diversos programas computacionais utilizados na engenharia estrutural, que trabalham com modelos numéricos e oferecem uma variedade de funcionalidades para otimizar o desenvolvimento de projetos. Entre os exemplos estão o MATLAB, Revit, SAP2000, TQS e Ftool. Cada um desses *softwares* tem características únicas que atendem às necessidades específicas dos engenheiros.

O MATLAB, por exemplo, é uma ferramenta poderosa para análise matemática e simulação, sendo utilizado para modelagem numérica e resolução de problemas complexos. O Revit, por sua vez, é essencial para o design de arquitetura e engenharia, permitindo a criação de modelos de informações de construção (BIM) altamente detalhados. O SAP2000 é reconhecido por sua capacidade de realizar análises estruturais avançadas, com integração a normas internacionais e versatilidade em diferentes tipos de estruturas.

Já o TQS é especializado em sistemas de concreto, sendo uma excelente escolha para o dimensionamento e análise de estruturas de concreto armado e protendido. O Ftool, embora mais simples em sua interface, é uma excelente opção para a análise e o cálculo de estruturas metálicas e de concreto de maneira rápida.

Os *softwares* de modelagem computacional, ao utilizarem modelos numéricos avançados, tornaram-se ferramentas indispensáveis para os engenheiros. Eles possibilitam a simulação, análise e otimização de projetos de maneira eficiente, economizando tempo e

recursos, além de garantir que as estruturas atendam aos requisitos de segurança e às normas regulamentadoras.

Os programas de modelagem computacional representam um avanço significativo na prática da engenharia, oferecendo soluções inovadoras para desafios complexos do dia a dia profissional. Como destaca Bathe (2014), o uso de métodos numéricos computacionais transformara as práticas da engenharia, permitindo análises precisas e confiáveis que antes seriam impossíveis.

2.2.1 Modelador computacional

O modelo numérico utilizado nesta monografia foi desenvolvido no programa comercial SAP2000 v.22, conforme ilustrado na Figura 5. Segundo o (COMPUTERS AND STRUCTURES, INC., 2020), este *software* é reconhecido entre profissionais de engenharia estrutural por sua eficiência e precisão na modelagem e análise de estruturas complexas. O SAP2000 permite que engenheiros explorem diferentes cenários e solucionem desafios estruturais com segurança e confiabilidade, destacando-se como uma excelente ferramenta para projetos exigentes.

Figura 5 - SAP2000 v22

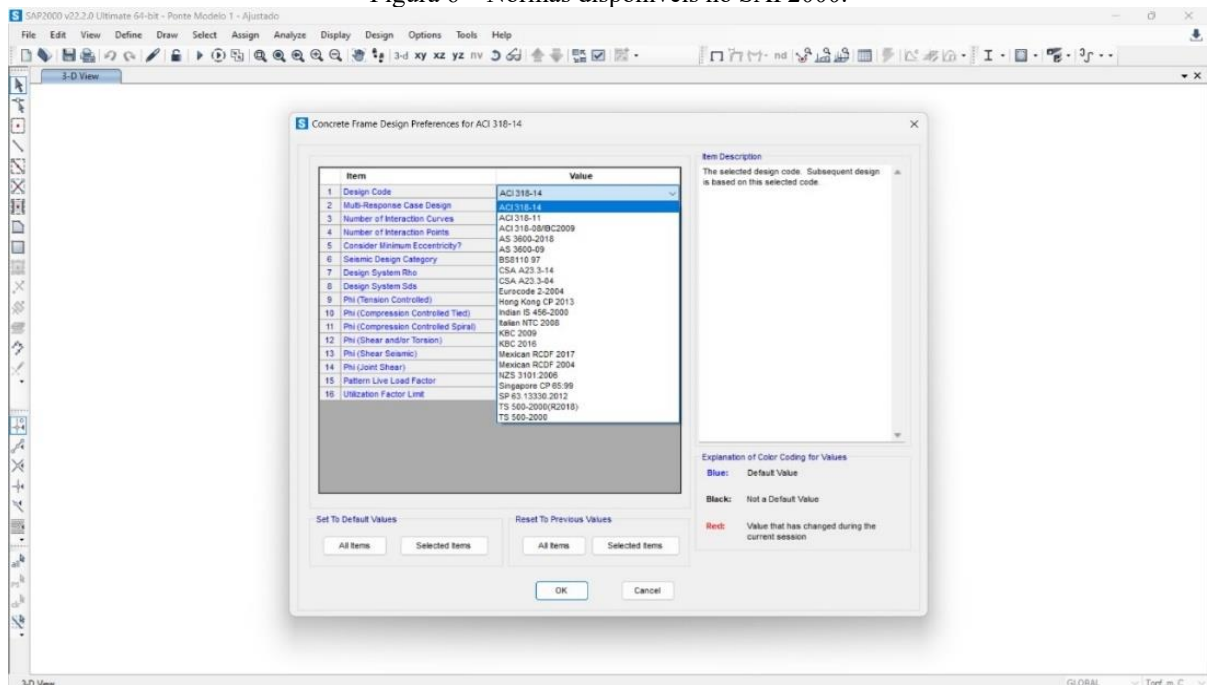


Fonte: Dos autores, 2014.

A escolha do SAP2000 para esta monografia baseou-se em várias características que o tornam uma ferramenta ideal para análise estrutural. Entre seus principais benefícios, destaca-se a integração com normas internacionais (Figura 6), uma característica amplamente

reconhecida (Elfgren; Johansson; Andersson 2018). Essa integração é essencial para engenheiros que, ao trabalhar em diferentes regiões, precisam garantir que seus projetos atendam aos requisitos e condições regulamentares específicas de cada local. Assim, o SAP2000 facilita a conformidade com as normas internacionais, proporcionando maior segurança e eficiência no desenvolvimento de projetos estruturais.

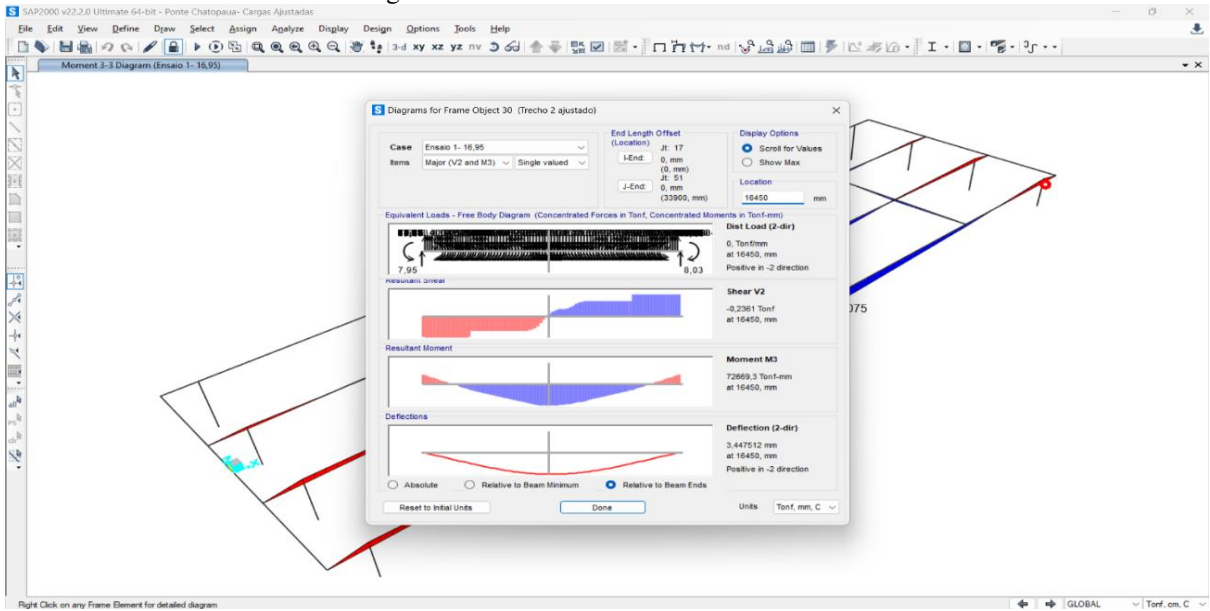
Figura 6 – Normas disponíveis no SAP2000.



Fonte: Dos autores, 2024.

Uma das grandes vantagens do SAP2000 é sua capacidade de realizar análises avançadas (Figura 7). Segundo Oliveira (2021) O SAP2000 revolucionou a forma como analisamos estruturas. Sua capacidade de modelar e prever comportamentos extremos nos dá a confiança necessária para inovar, sem comprometer a segurança ou a funcionalidade. Essa confiança impulsiona a adoção de tecnologias avançadas no setor de engenharia civil.

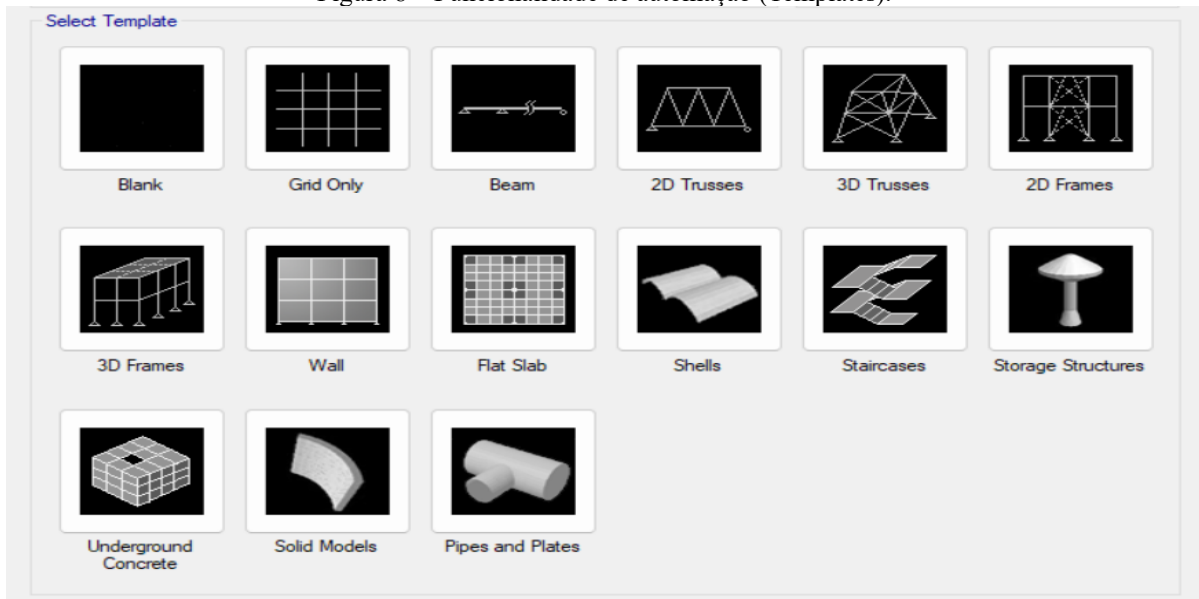
Figura 7 – Gráficos de análises de momentos.



Fonte: Dos autores, 2024.

O SAP2000 se destaca por sua automação e personalização (Figura 8), o que torna o processo de análise estrutural mais ágil e eficiente. Como apontado no Mendes (2021), A flexibilidade do SAP2000 em adaptar-se a diferentes demandas é um divisor de águas na engenharia estrutural moderna. Ele permite que os engenheiros se concentrem no que realmente importa: a qualidade e a segurança dos projetos, enquanto o *software* cuida das tarefas repetitivas e da análise.

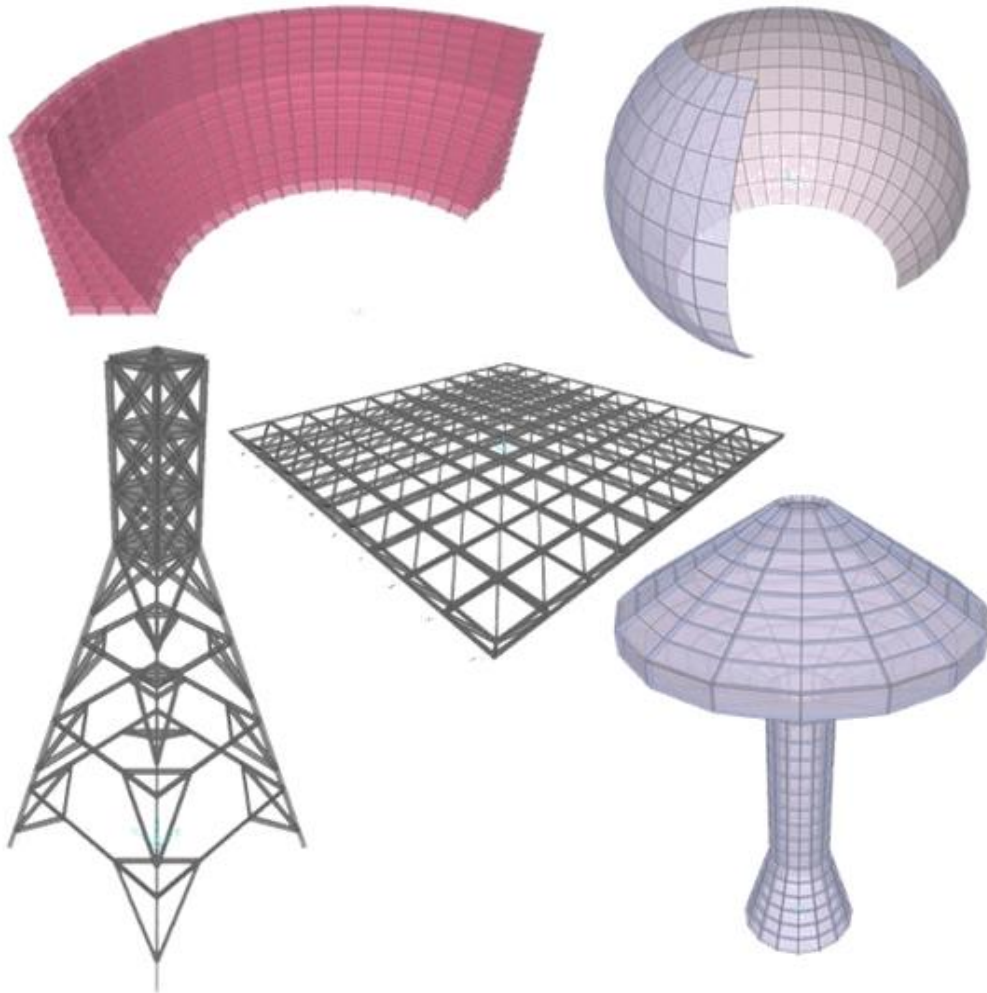
Figura 8 – Funcionalidade de automação (Templates).



Fonte: Dos autores, 2024.

O SAP2000 é reconhecido por sua versatilidade e aplicabilidade em diversos tipos de projetos de engenharia estrutural (Figura 9). Segundo Lima (2021) O SAP2000 é uma ferramenta essencial para projetos que exigem precisão e adaptabilidade. Sua versatilidade nos permite abordar desde pequenos edifícios até grandes infraestruturas com a mesma eficiência, entregando resultados de alta qualidade e confiabilidade.

Figura 9 – Templates para iniciar rapidamente um novo modelo no SAP2000.



Fonte: CSI Portugal, 2024.

3 METODOLOGIA

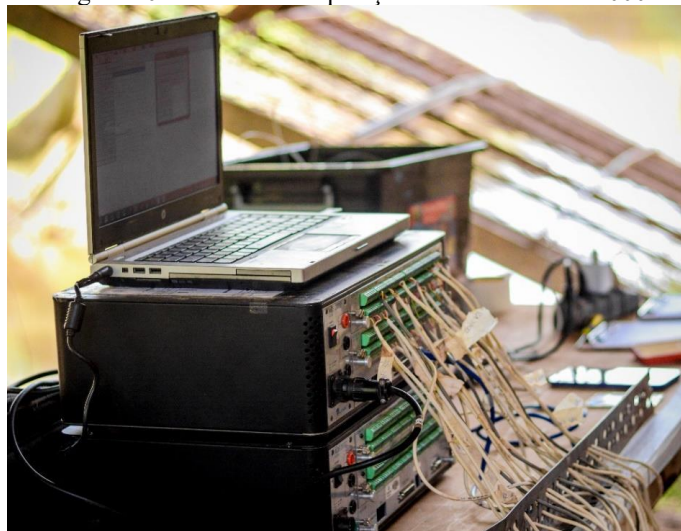
3.1 Ensaios de prova de carga estática

O ensaio estático realizado na ponte sobre o Rio Chatopauá teve como principal objetivo monitorar o comportamento estrutural da ponte, coletando dados precisos sobre deslocamentos e deformações nos elementos estruturais. Além disso, foram monitoradas as condições ambientais antes e durante os ensaios, incluindo medições de vento nas direções de 0°, 45° e 90°, bem como temperatura e umidade relativa do ar, procedimentos esses realizados pela equipe do NDAE.

Para garantir a precisão dos dados, uma série de instrumentos especializados foi utilizada (Figura 2). Entre eles, destacam-se os transdutores de deslocamento (LVDT's), extensômetros elétricos específicos para concreto e aço, além do conjunto de lupa e régua fissurômetro, utilizado para inspeção detalhada de fissuras. A combinação desses equipamentos permitiu uma análise abrangente, possibilitando a avaliação das respostas da ponte às cargas aplicadas e a verificação de seu desempenho em condições controladas.

O ADS 2000 refere-se à norma ABNT NBR 8800:2008, que trata de projetos de estruturas de aço e mistas de aço e concreto em edificações. O termo ADS é uma sigla frequentemente utilizada no contexto acadêmico ou profissional para se referir a Análise e Dimensionamento de Estruturas de Aço, ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Sistema de aquisição de dados – ADS 2000



Fonte: NDAE, 2023.

O LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) é essencial em ensaios estáticos de pontes para medir deslocamentos verticais com alta precisão, ilustrados junto as suas

características na Figura 11. Ele monitora flechas durante o carregamento, registra dados continuamente e detecta pequenas variações, garantindo uma análise detalhada do comportamento estrutural. Além de validar modelos computacionais, sua utilização ajuda a identificar anomalias, contribuindo para a segurança da ponte e a conformidade com critérios de projeto.

Figura 11 - Equipamentos utilizados para medição dos deslocamentos



Fonte: NDAE, 2023.

O extensômetro, ilustrado na Figura 12, mede com precisão as deformações locais de materiais e estruturas durante ensaios, permitindo calcular a deformação específica. Ele fornece dados em tempo real para validar modelos teóricos, identificar limites de elasticidade e avaliar o desempenho estrutural, sendo essencial para projetos seguros e eficientes.

Figura 12 - Extensômetro de Resistência Elétrica

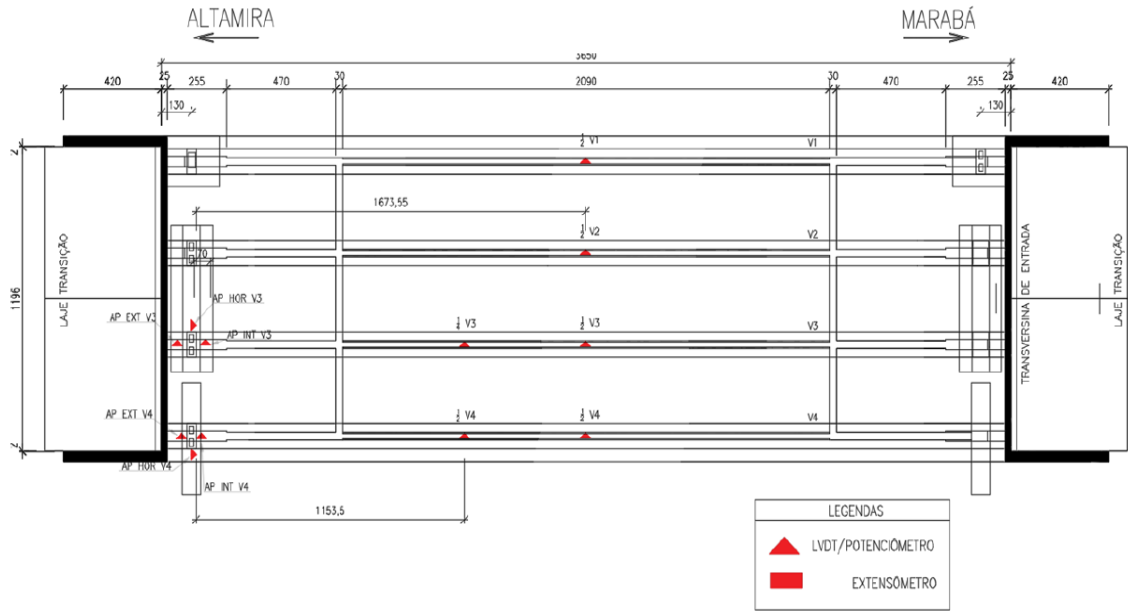


Fonte: Excel Sensores, 2024.

Os LVDT's foram utilizados para o monitoramento de deslocamento da estrutura posicionados de acordo com a Figura 13, sendo 1 transdutor de deslocamento no meio do vão de cada longarina, dois LVDT's posicionados na posição 1/4 do vão das longarinas 3 e 4,

também foram monitorados os deslocamentos no aparelho de apoio com o uso de 3 potenciômetros em cada local apoio, sendo um no pilar interno e um no pilar de borda (NDAE, 2023).

Figura 13 – Disposição dos LVDT's



Fonte: NDAE, 2023.

Foram utilizados dois LVDT's da marca KYOWA, sendo suas especificações mostradas no Quadro 1. Foram utilizados ainda dois LVDT's da marca LD Sensor, sendo um LDS-50 com capacidade nominal de 51 mm e um LDS-100, com capacidade nominal de 100 mm. A Tabela 1 apresenta informações sobre estes transdutores de deslocamento.

Quadro 1 – LVDT Ld Sensor

Faixa de Modelo	Elementos	Tipo do Modelo	
		LDS - XX	
Descrição	Unidade	50	100
Deslocamento	Mm	51	101
Peso	g	180/200	320
Força de uso	gf	50 – 250	120 – 400
Sensibilidade (nominal)	mV/mm	0.9/0.96	0.38
Saída FS (nominal)	mV/V	9.0/9.6	7.5

Fonte: NDAE, 2023.

Os ensaios realizados na ponte tiveram como objetivo avaliar as respostas estruturais das longarinas sob diferentes condições de carregamento, com única carga considerada, a do trem-tipo do caminhão de teste em relação à faixa de tráfego (Figura 14). Para tanto, foram

seguidas as orientações da NBR 9607 (2019). As etapas foram conduzidas conforme descrito a seguir:

Figura 14 – Execução do ensaio de carga estática sobre a ponte do Rio Chatopauá

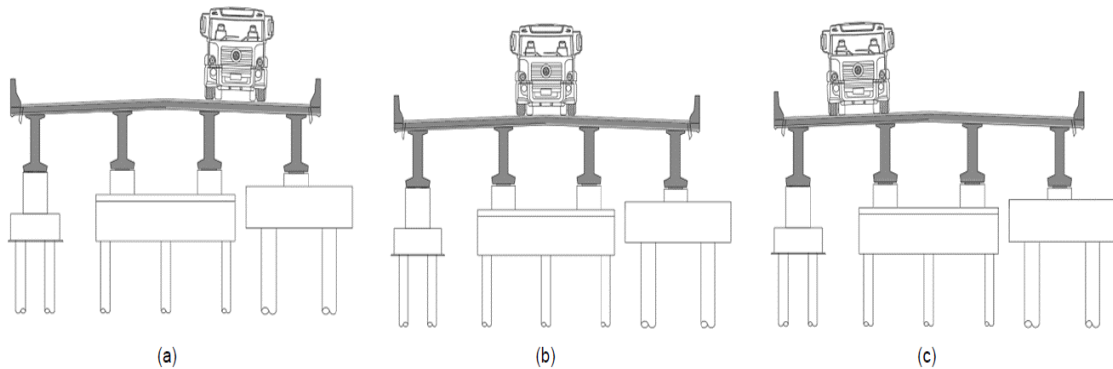


Fonte: NDAE, 2023.

- a) **Ensaio 01:** O caminhão percorreu todos os pontos no sentido Marabá-Altamira utilizando a faixa da contramão. Esse procedimento teve como foco a solicitação das longarinas monitoradas pelos instrumentos de medição instalados previamente.
- b) **Ensaio 02:** O caminhão transitou por todos os pontos no sentido Marabá-Altamira posicionando-se no eixo central da ponte. Essa configuração teve como objetivo a análise específica das longarinas centrais, permitindo uma avaliação do comportamento estrutural nessa região crítica.
- c) **Ensaio 03:** No último ensaio, o caminhão percorreu todos os pontos no sentido Marabá-Altamira, mas trafegando exclusivamente em sua pista de mão. Esse lado da ponte, no entanto, não foi monitorado pelos extensômetros, oferecendo uma comparação indireta com as demais condições avaliadas.

Esses ensaios foram fundamentais para compreender o desempenho estrutural das longarinas em diferentes cenários de carregamento (Figura 15), proporcionando dados valiosos para análise do comportamento da ponte e validação do modelo estrutural.

Figura 15 – Ensaio estático: (a) Ensaio 1; (b) Ensaio 2; (c) Ensaio 3.



Fonte: NDAE, 2023.

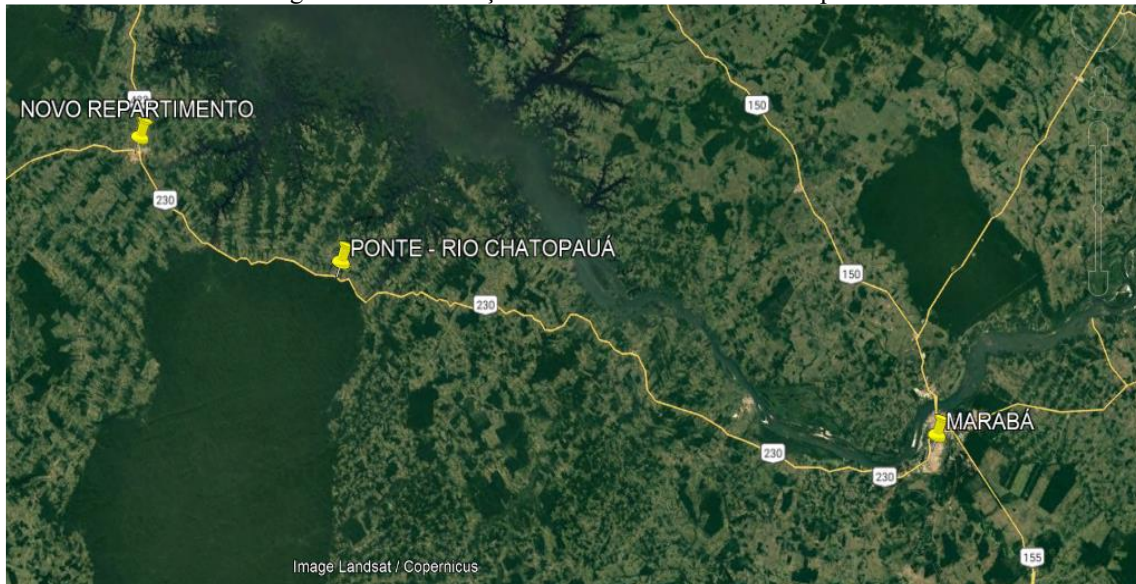
3.2 Ponte

Este capítulo apresentará análises computacionais modeladas no programa SAP2000 para obtermos os deslocamentos verticais teórico, realizada em Obras de Arte Especiais (OAEs) executada pelo Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia (NDAE) da Universidade Federal do Pará (UFPA-Tucuruí). As dimensões adotadas nos novos modelos estruturais computacionais são as mesmas descrita no projeto original da obra, bem como os coeficientes de segurança recomendado pela ABNT NBR 8681 (2003), utilizou-se 1,00 para as cargas permanentes (NDAE, 2023).

3.2.1 Localização da Ponte

A ponte sobre o rio Chatopauá está localizada na Rodovia BR-230 no estado do Pará, km 251, a 40 km da sede do município de Novo Repartimento com coordenadas geográficas $4^{\circ}35'32''\text{S } 49^{\circ}47'03''\text{W}$, como representado na Figura 16. A ponte é uma Obra de Arte Especial (OAE), da qual foi concebida para garantir segurança e eficiência no tráfego de veículos ao longo da rodovia. Sua localização é em uma região de clima quente, com temperaturas médias superiores a 30°C e variações térmicas mínimas. Além disso, o local apresenta alta umidade relativa do ar e é marcado por períodos de chuvas intensas, concentradas principalmente entre os meses de outubro e abril.

Figura 16 - Localização da Ponte sobre o Rio Chatopauá.



Fonte: NDAE, 2023.

A ponte foi executada em concreto armado e possui um comprimento total de aproximadamente 44,90 m, tendo apenas um vão principal de 33,90 m (Figura 17), e dois vãos menores nas suas extremidades, cada um com 1,30 m, as suas extremidades, onde se situam os encontros com a rodovia, possuem largura interna de 12,8 m; e guarda-corpos com base de 40 cm cada (NDAE, 2023).

Figura 17 - Imagem da Ponte sobre o Rio Chatopauá.

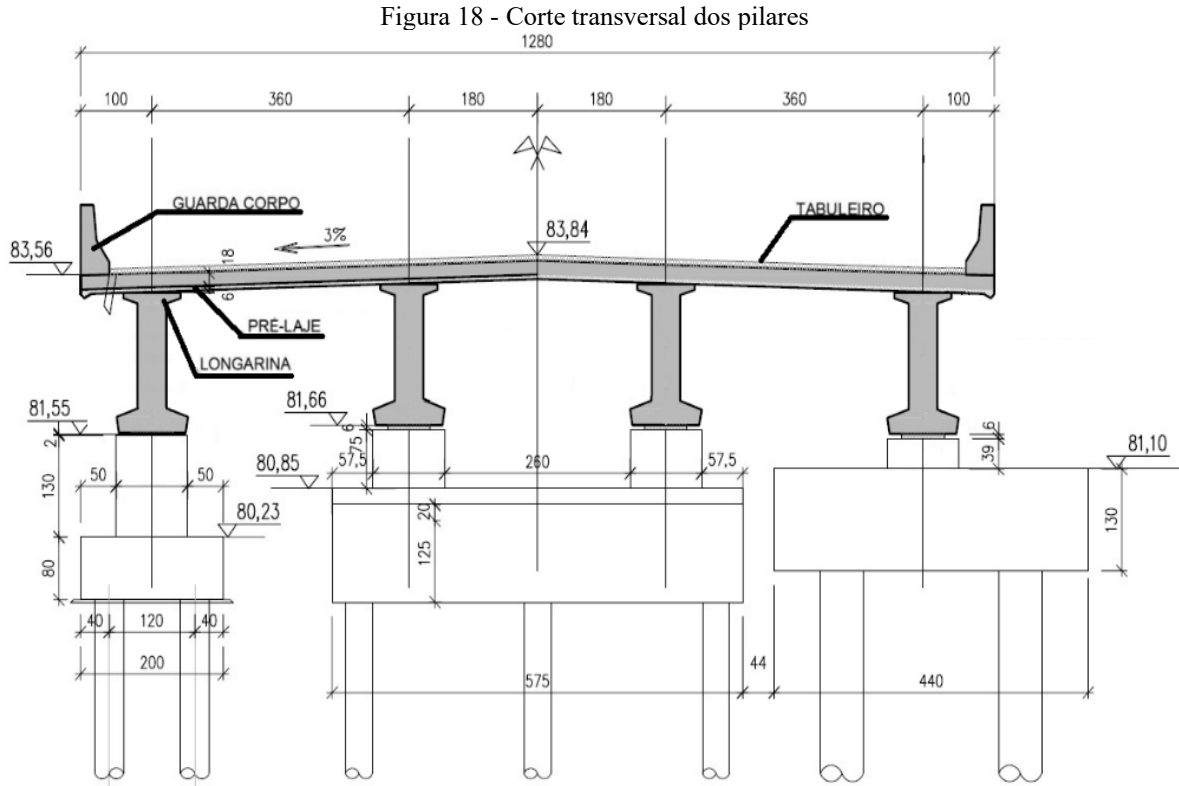


Fonte: NDAE, 2023.

3.2.2 Geometria da ponte

A Obra de Arte Especial sobre o rio Chatopauá foi construída em concreto armado composta por quatro longarinas e quatro transversinas, sendo duas de entrada e duas

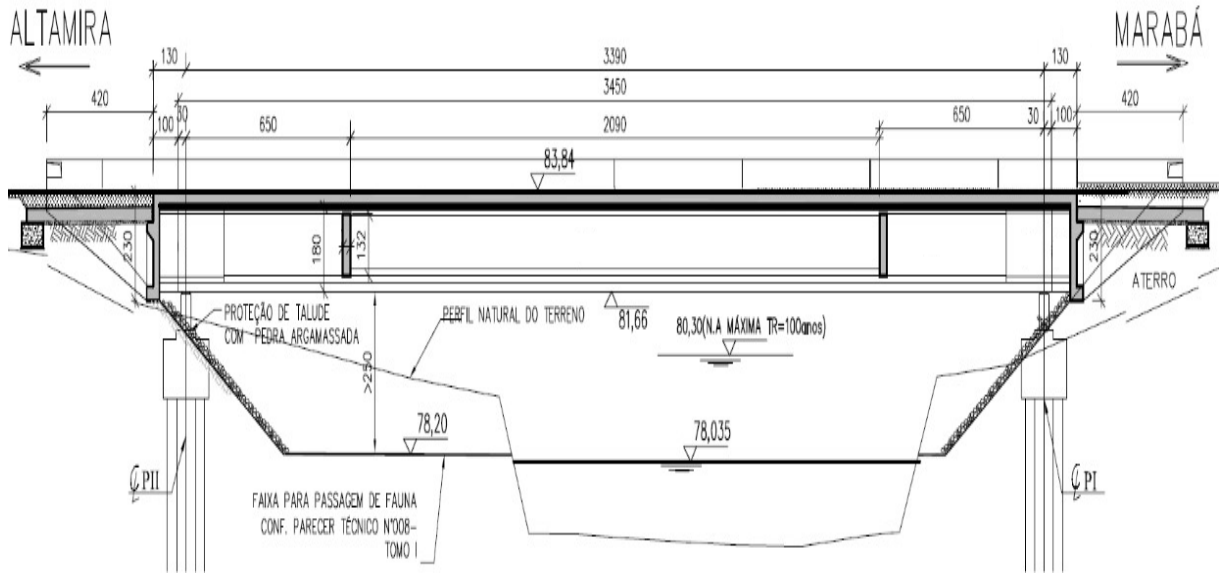
intermediárias, que por sua vez são apoiadas sobre oito pilares de seção quadrada. No caso da ligação dos pilares com as fundações, assumiu-se ligações engastadas, com restrição tanto de translações quanto de rotações. Já as fundações são do tipo estacas coroadas por blocos, apresentado nas Figuras 18.



Fonte: DELTACON, 2022

O perfil longitudinal de uma ponte, ilustrado pela Figura 19, é crucial para sua funcionalidade, segurança e eficiência estrutural. Ele define a inclinação e altimetria, garantindo acessibilidade e conformidade com normas de tráfego. Também influencia a drenagem, reduzindo acúmulo de água e deterioração. Além disso, ajusta a ponte ao terreno, atendendo a gabaritos e evitando obstáculos, enquanto afeta a distribuição de cargas e o dimensionamento estrutural. Um bom perfil melhora a estética, facilita a construção e garante harmonia com o ambiente.

Figura 19 – Perfil longitudinal no eixo da obra

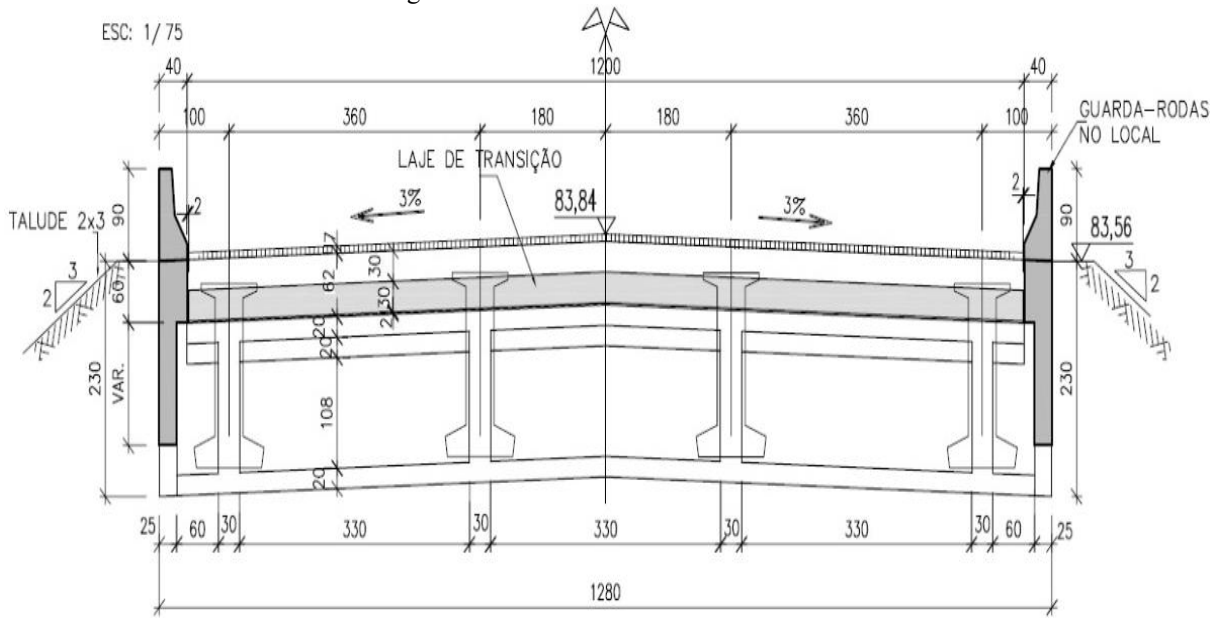


Fonte: DELTACON, 2022

O corte transversal de uma ponte, ilustrado pela Figura 20, é essencial para detalhar sua geometria, estrutura e funcionalidade. Ele mostra dimensões, materiais e elementos como vigas, lajes, pistas, calçadas e barreiras, destaca inclinações para drenagem, segurança para pedestres e ciclistas, e integração com o terreno ou obstáculos. Facilita calcular as quantidades necessárias de materiais, como concreto, aço, e outros componentes essenciais, garantindo a precisão no orçamento e na execução.

Facilita a coordenação entre diferentes equipes de trabalho, como engenheiros, arquitetos e construtores, garantindo que todos estejam alinhados com o mesmo plano de construção. Serve como referência para futuras inspeções e manutenções, permitindo que os engenheiros identifiquem e abordem problemas estruturais de maneira mais eficaz.

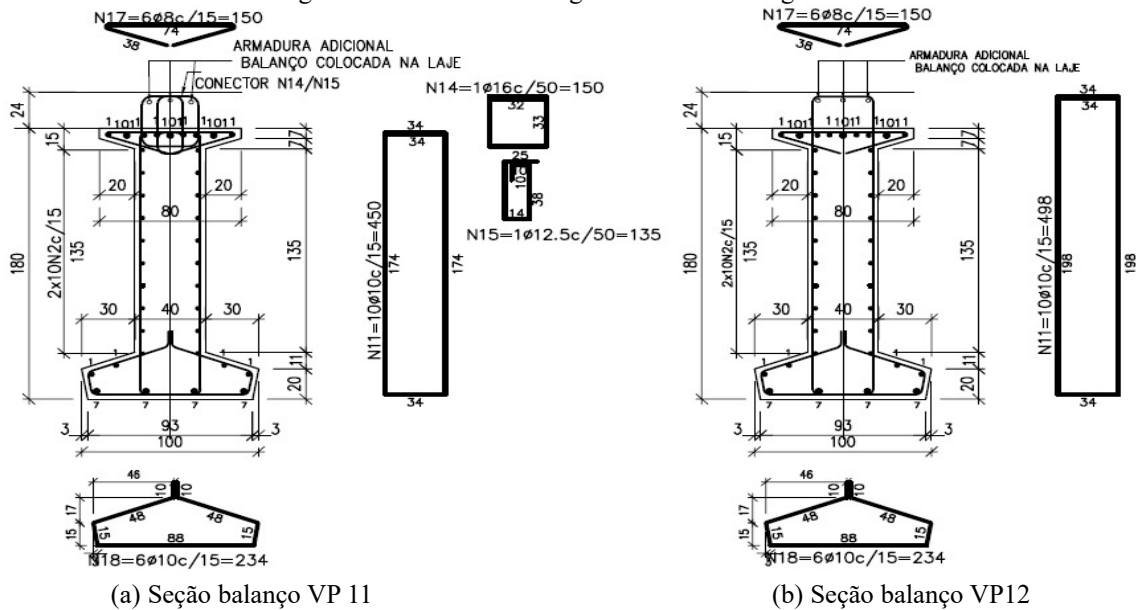
Figura 20 - Corte da vista da transversina.



Fonte: DELTACON, 2022

Nas extremidades do tabuleiro da ponte, as condições de apoio das longarinas (VP11 e VP12) foram representadas de maneira aproximada com apoios de segundo gênero inseridos pontualmente no eixo de cada viga (Figura 21), impedindo, assim, apenas as translações nas direções X, Y e Z (NDAE, 2023).

Figura 21 – Características geométricas das longarinas.



Fonte: DELTACON, 2022

3.2.3 Detalhes do ensaio

O ensaio estático realizado pelo Núcleo de Desenvolvimento Amazônico - NDAE, consistiu em posicionar o caminhão carregado com, aproximadamente, 36.4 tf, carga

equivalente aproximadamente 80% da projetada, em pontos específicos, pré-determinados, sobre a ponte, servindo como carregamento estático ao longo de seu comprimento. Esta condição de ensaio baseia-se na NBR 9607/2019 - Ensaio de Carga em Estruturas, que orienta sobre o ensaio estático de pontes consiste na aplicação gradual de cargas conhecidas, com o objetivo de avaliar os deslocamentos e deformações da estrutura, comparando-os com os valores teóricos previstos no projeto. Esse ensaio deve ser realizado sob condições controladas, para garantir a precisão dos resultados.

3.3 Modelagem computacional

Buscando analisar o comportamento dos esforços de momento fletor nas vigas, criaram-se três modelos computacionais, sendo que as cargas foram configuradas de acordo com as cargas do projeto do NDAE (2023), um trem-tipo com 75% da carga padrão, onde foi estacionado em pontos diverso da ponte. A seleção de materiais foi feita fazendo-se uso das recomendações das normas ABNT NBR 6118 (2014), ABNT NBR 7480 (2008) e ABNT NBR 8800 (2008), mostrado no Quadro 2.

Quadro 2 - Valores de referência dos materiais utilizados.

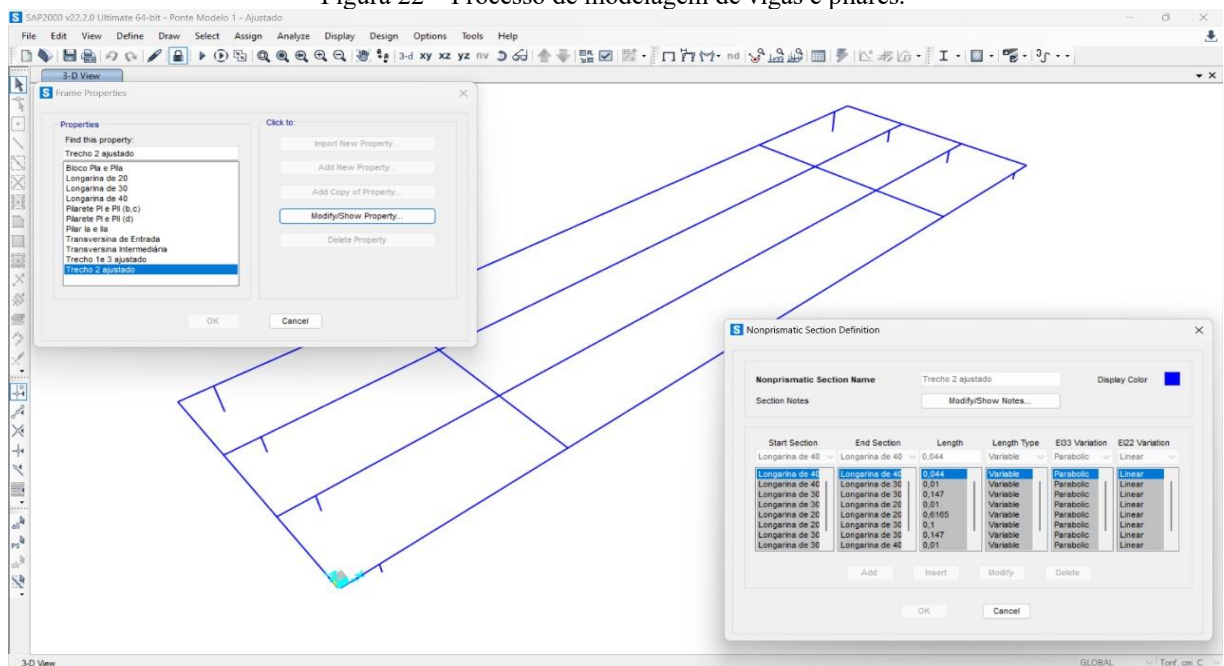
MATERIAL	REFERÊNCIA	VALOR
Resistência característica à compressão do concreto	f_{ck}	30 MPa
Peso específico do concreto	γ_{conc}	25 kN/m ³
Módulo de elasticidade secante do concreto	E_{cs}	30 GPa
Coefficiente de Poisson do concreto	ν_c	0,20
Tensão de escoamento característica do aço CA50	$f_{yk,CA50}$	500 MPa
Tensão de escoamento característica do aço CA60	$f_{yk,CA60}$	600 MPa
Módulo de elasticidade do aço para concreto armado	E_s	210 GPa
Módulo de elasticidade do aço	E_{ss}	200 GPa
Coefficiente de Poisson do aço	ν_s	0,30

Fonte: Dos autores, 2024.

3.3.1. Modelo computacional 1

O primeiro modelo computacional foi concebido como uma representação simplificada e rudimentar da ponte, projetado para capturar os elementos essenciais de sua estrutura. Neste modelo, optou-se pelo uso de Elementos *Frame*, que foram empregados para modelar as transversinas de entrada e de saída, além das longarinas, configuradas com resistências características de 20 MPa, 30 MPa e 40 MPa. Também foi aplicada a função *Nonprismatic*, com a finalidade de unir os *Frames*, criando seções semelhantes ao modelo principal. Além disso, foram incorporados os blocos de fundação e os pilares estruturais, formando a base necessária para o suporte da ponte, conforme ilustrado na Figura 22.

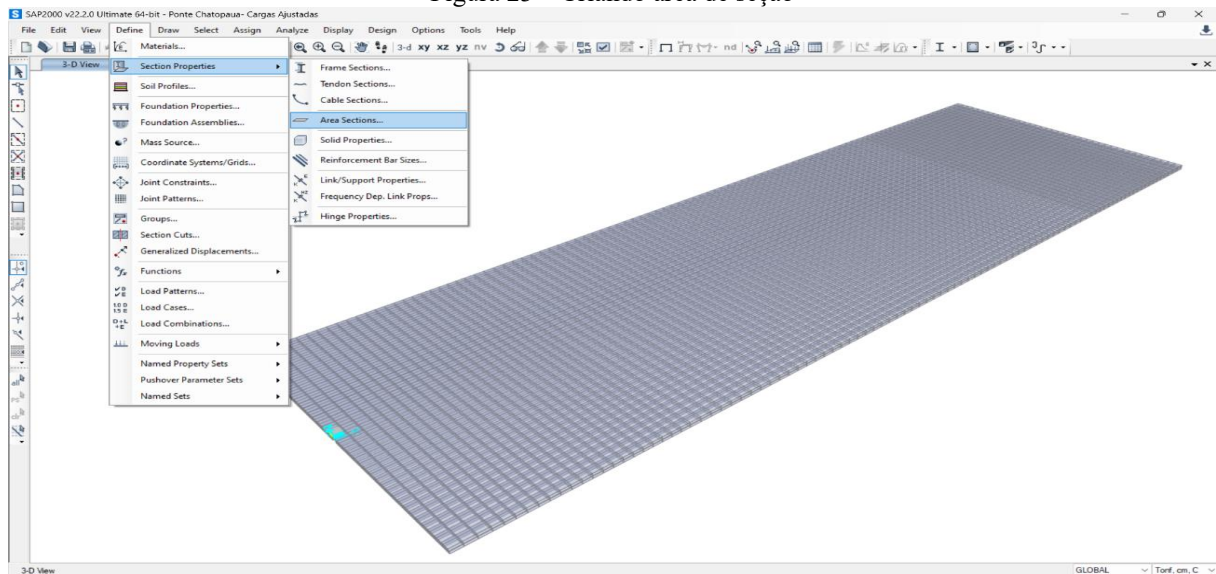
Figura 22 – Processo de modelagem de vigas e pilares.



Fonte: Dos autores, 2024.

Na sequência, definimos com maior precisão a área do protótipo, incorporando elementos do tipo *Shell* (casca) para a modelagem das superfícies. Essa abordagem permitiu representar a membrana estrutural com uma espessura uniforme de 24 cm. Especificamente, os parâmetros foram configurados com o valor de *Bending* (momento de flexão) de 24 cm e *Membrane* (comportamento de membrana) também de 24 cm. Para o material utilizado nesse modelo, adotamos concreto com resistência característica de 30 MPa, garantindo uma boa correlação com as especificações do projeto real, como ilustrado pela Figura 23.

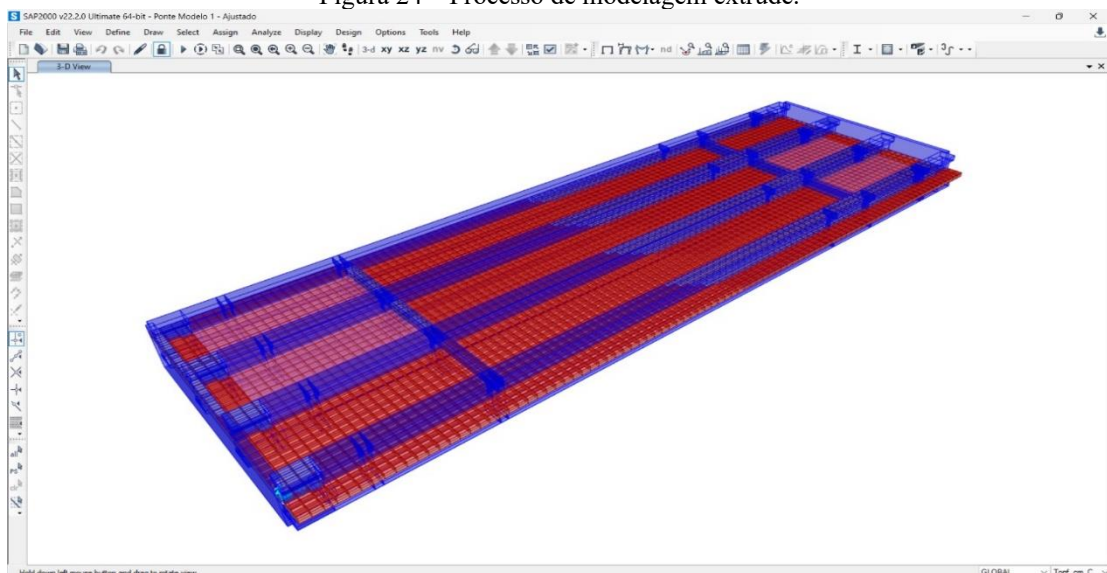
Figura 23 – Criando área de seção



Fonte: Dos autores, 2024.

Por fim, buscando uma melhor compreensão visual e espacial do modelo computacional, aplicamos a ferramenta *Extrude*, que possibilitou transformar as superfícies planas em formas tridimensionais, permitindo uma visualização mais clara da estrutura finalizada. Essa configuração, ilustrada na Figura 24, reflete fielmente as características básicas do projeto original, servindo como base para análises futuras e estudos mais aprofundados.

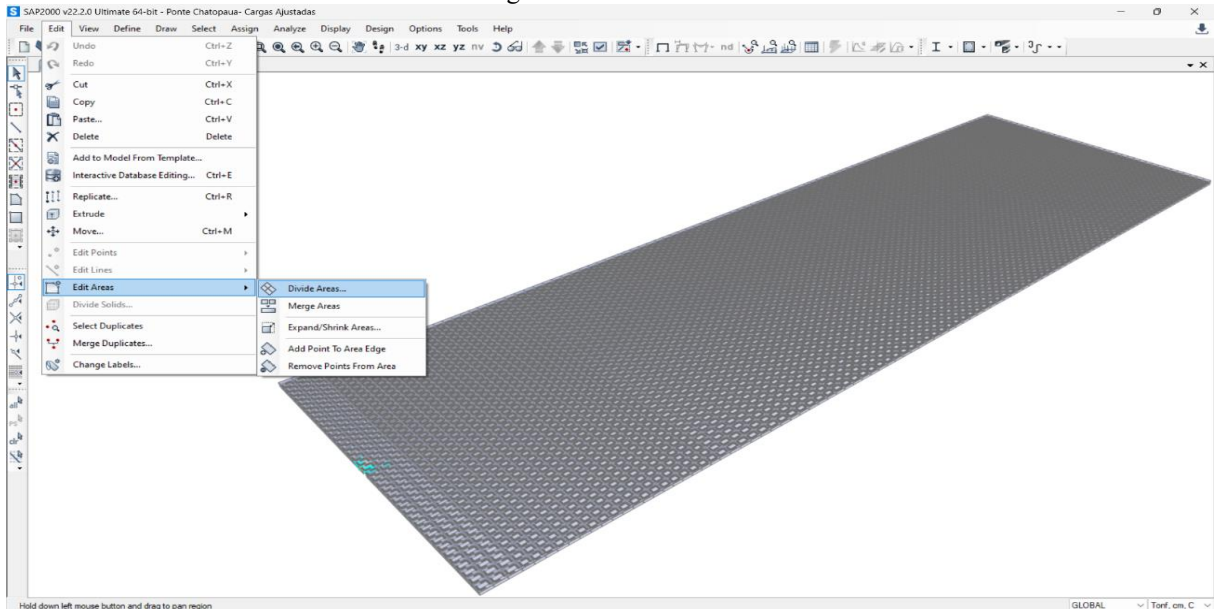
Figura 24 – Processo de modelagem extrude.



Fonte: Dos autores, 2024.

Após a definição da estrutura principal, realizamos a subdivisão da área da laje em malhas menores, com o objetivo de aumentar a precisão da análise numérica e melhorar a representação do comportamento estrutural. Essa etapa foi fundamental para obter-se resultados confiáveis e detalhados, como ilustrado na Figura 25.

Figura 25 – Editar área.

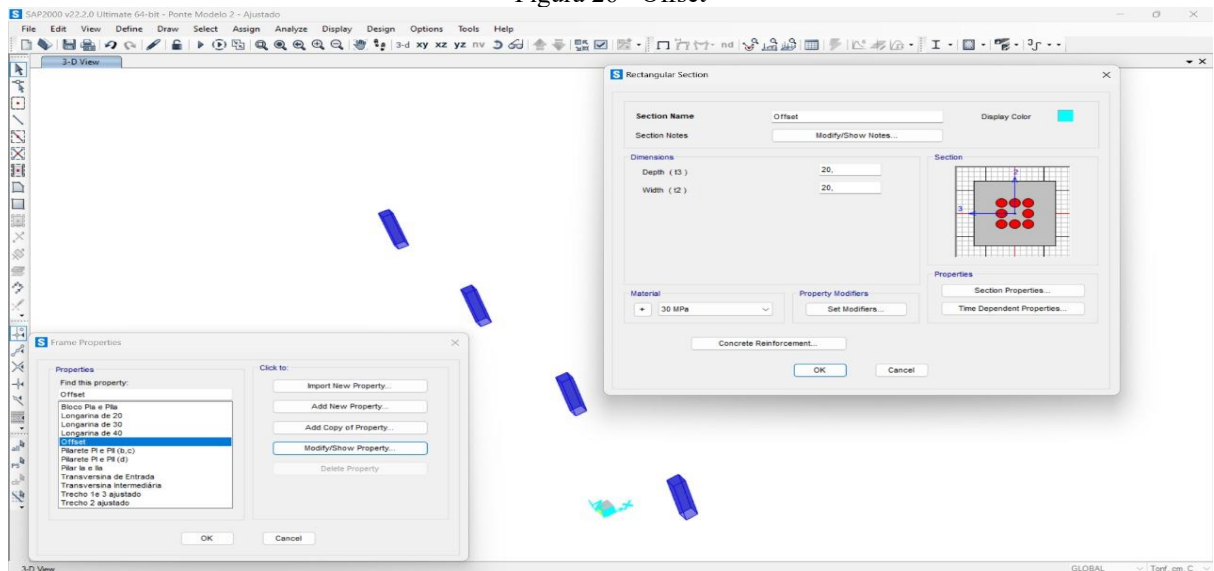


Fonte: Dos autores, 2024.

3.3.2 Modelo computacional 2

No desenvolvimento do segundo modelo computacional, avançamos em relação ao modelo inicial, criando um novo elemento estrutural, usando um *Frame* com configuração em *Offset* de 20cm x 20cm e resistência característica de 30 MPa. Essa modificação teve como principal objetivo promover o alinhamento preciso entre os pilares e as vigas, otimizando a distribuição de esforços na estrutura. Essa configuração está representada na Figuras 26, que ilustra a organização geométrica e estrutural utilizada.

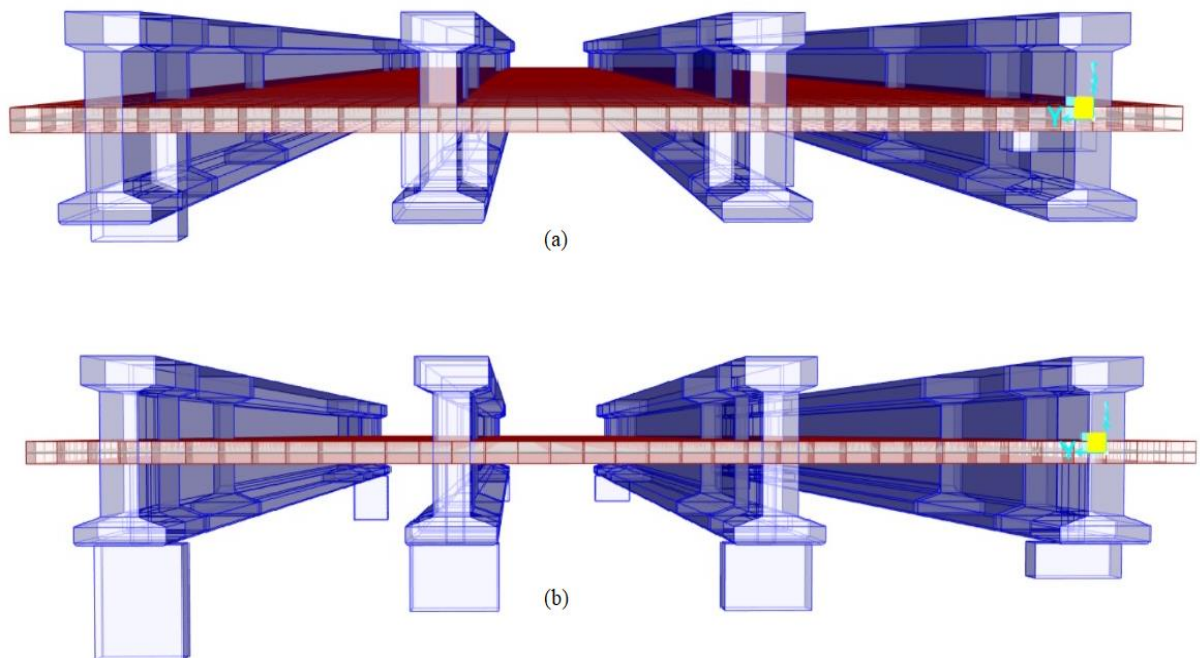
Figura 26 - Offset



Fonte: Dos autores, 2024.

O *Offset* como ilustrado na Figura 27 (b) representa o deslocamento ou ajuste de elementos em um modelo para representar com mais precisão a geometria ou comportamento real de uma estrutura, comparado a Figura 27 (a). Ele pode ser usado para deslocar nós, ajustar posições de cargas, ou modificar conexões, garantindo que o modelo reflita melhor as condições reais, como desalinhos ou descontinuidades. Essa técnica é comum em modelagens estruturais, como em pontes e edifícios, para melhorar a precisão das simulações.

Figura 27 – Renderização frontal dos protótipos.

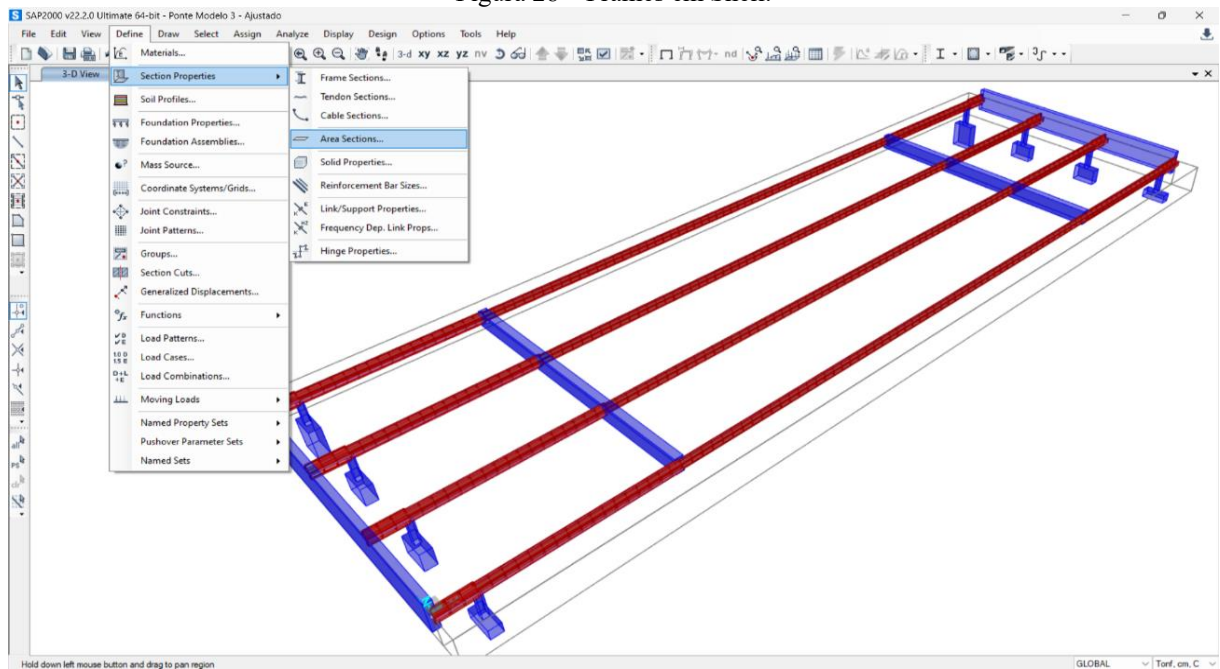


Fonte: Dos autores, 2024.

3.3.3 Modelo computacional 3

No terceiro modelo computacional da ponte, adotamos uma abordagem distinta em relação aos dois modelos anteriores, buscando refinar ainda mais a precisão e a representatividade da análise estrutural. Nesse modelo, as longarinas foram configuradas como elementos do tipo *Shell*, no *Software* SAP2000®, utilizando resistências características de 20 MPa, 30 MPa e 40 MPa. Essa escolha foi motivada pela necessidade de representar com maior fidelidade o comportamento estrutural das longarinas, considerando sua interação com os demais elementos do modelo (Figura 28).

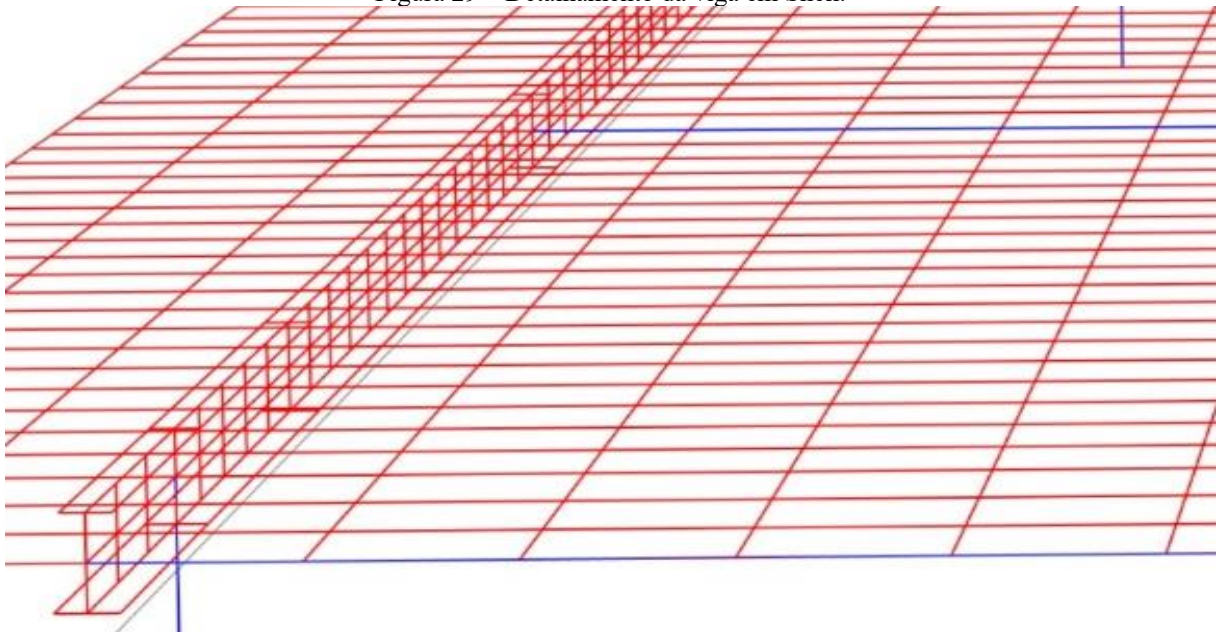
Figura 28 – Frames em Shell.



Fonte: Dos autores, 2024.

Além disso, realizamos a subdivisão das malhas das longarinas em unidades menores, um processo essencial para aumentar a resolução da análise numérica e, conseqüentemente, melhorar a precisão dos resultados obtidos. Essa técnica permite captar de maneira mais detalhada os efeitos de tensões e deformações em diferentes regiões das longarinas, como destacado na Figura 29.

Figura 29 – Detalhamento da viga em Shell.



Fonte: Dos autores, 2024.

Após o preparo do modelo, avançamos para a etapa de aplicação das cargas, utilizando a função *Run Analysis* disponível no *Software* SAP2000. Essa ferramenta nos permitiu executar

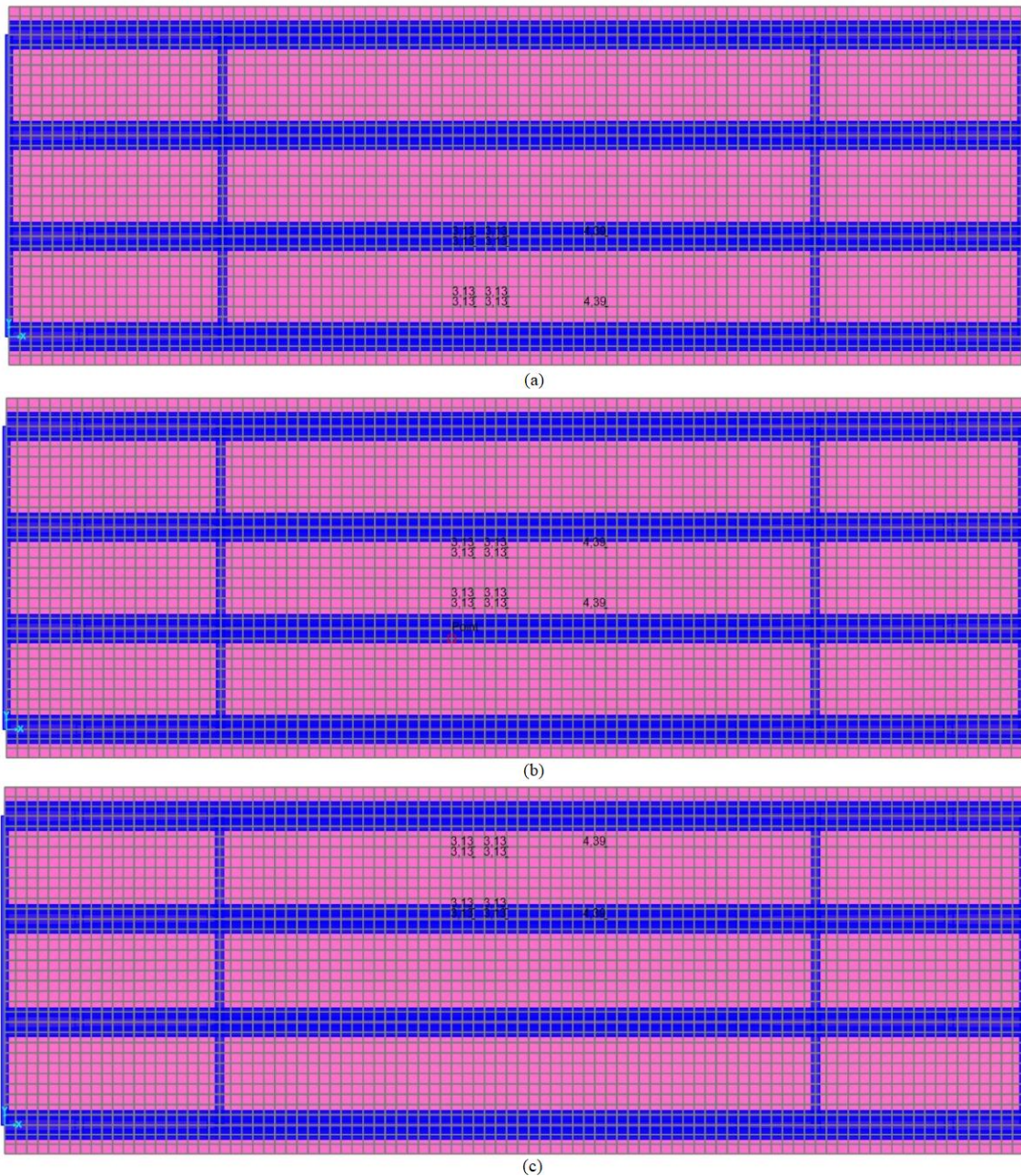
a modelagem e realizar uma análise detalhada do comportamento estrutural da ponte sob diferentes condições de carregamento.

Através dessa simulação, foi possível observar como a estrutura reagiria a diferentes esforços, fornecendo informações cruciais para entender sua performance. Os ensaios foram organizados em três séries distintas, cada uma com variações específicas nas distâncias de aplicação das cargas, permitindo avaliar a influência de cada configuração sobre a resposta estrutural.

Um dos ensaios mais relevantes foi realizado a uma distância de 16,95 m do início da ponte, conforme ilustrado na Figura 30. Essa posição foi escolhida estrategicamente para investigar áreas críticas da estrutura, levando em consideração os pontos de maior solicitação previstos pelo projeto.

O uso dessa abordagem não apenas garantiu uma análise abrangente, mas também contribuiu para validar a capacidade do modelo computacional de replicar com precisão o comportamento real da ponte em situações de carga simulada.

Figura 30 – Editar áreas.



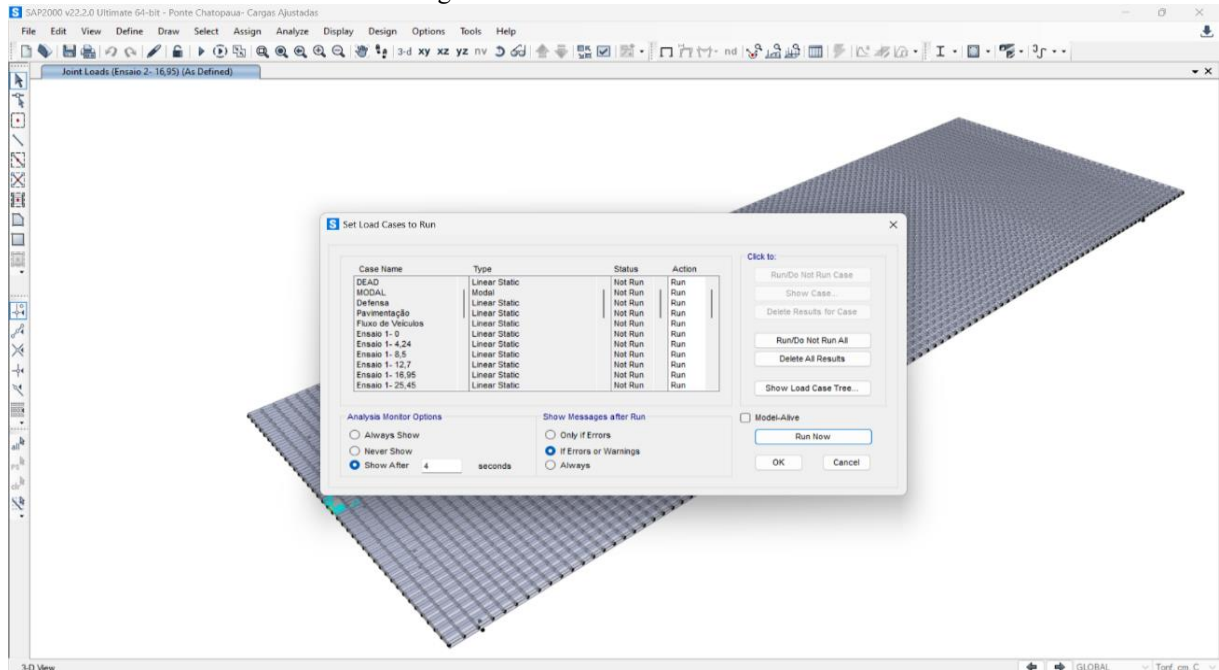
Fonte: Dos autores, 2024.

Esses ensaios foram projetados para avaliar o comportamento estrutural em diferentes situações, como variações no comprimento efetivo e nas condições de apoio. Por meio da análise computacional, foi possível obter informações detalhadas sobre deslocamentos, tensões, deformações e reações nos apoios, permitindo a validação do modelo e a identificação de possíveis pontos críticos na estrutura.

A função *Run Analysis* permitiu simular as condições de carregamento e avaliar o comportamento da estrutura frente às modificações realizadas. Por meio desse processo, foi possível obter uma série de dados relevantes, como deslocamentos, tensões e reações nos

apoios, que servem para validar e ajustar o desempenho do modelo em relação às expectativas do projeto (Figura 31).

Figura 31 – Processamento de dados.



Fonte: Dos autores, 2024.

Os dados obtidos durante o término dos ensaios em cada um dos três modelos computacionais, nos forneceram valores dos quais foram registrados em tabelas utilizando uma planilha eletrônica, dos quais serão gerados os gráficos de deformações e dessa forma poderemos compará-los com os resultados do gráfico de deformação do modelo original do projeto do que foi executado na construção da ponte sobre o rio Chatopauá.

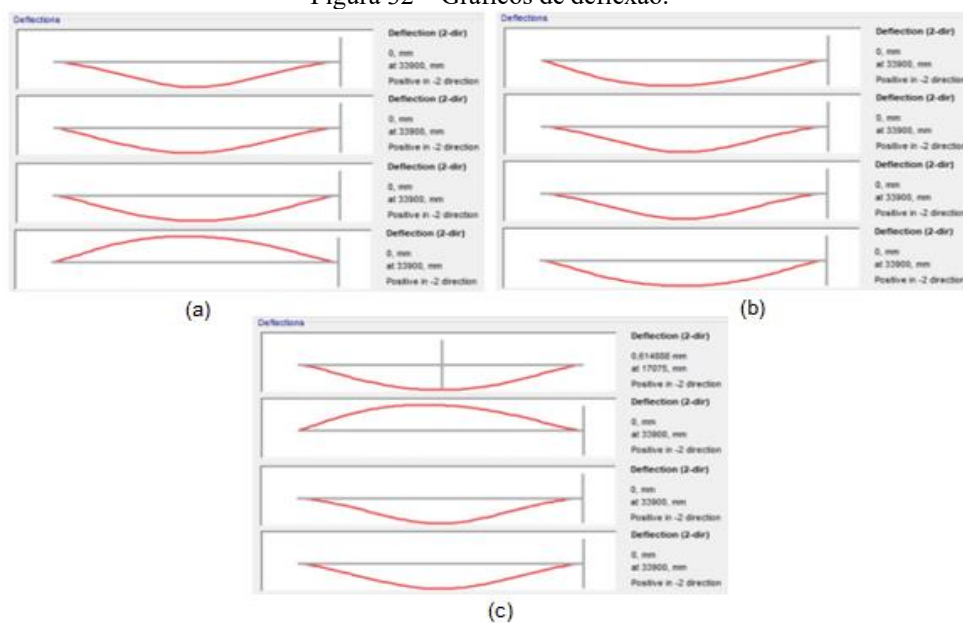
4 RESULTADOS

4.1 Ensaio 1

A análise teórica da ponte base foi feita em uma longarina ao qual utilizou-se da função *Nonprismatic*, que segundo o (COMPUTERS AND STRUCTURES, INC., 2022) o recurso de seções não prismáticas no SAP2000 permite a modelagem de elementos estruturais com variações de seção ao longo do comprimento. Essa funcionalidade é crucial para representar com precisão estruturas que possuem mudanças na geometria, como vigas que variam de largura ou altura, melhorando a precisão dos resultados de análise e o comportamento estrutural simulado.

A análise teórica das vigas para encontrar o momento fletor através do gráfico de deflexão, ilustrado na Figura 32, foi realizado na longarina de 33.900 mm que se constitui da longarina de 20 MPa e mais da metade da longarina de 30 MPa, com isto, verificou-se o valor no centro da viga sendo este 16.900 mm e 1/4 da viga 3 e 4 estes de 8.475 mm. A análise do momento fletor no meio da viga é crucial, pois é nesta região que frequentemente se observa o momento fletor máximo para muitas configurações de carga, como vigas simplesmente apoiadas com carga distribuída uniformemente. A identificação e a análise precisam desse ponto crítico são fundamentais para garantir a integridade estrutural e o dimensionamento adequado dos elementos (Flemming et al., 2019).

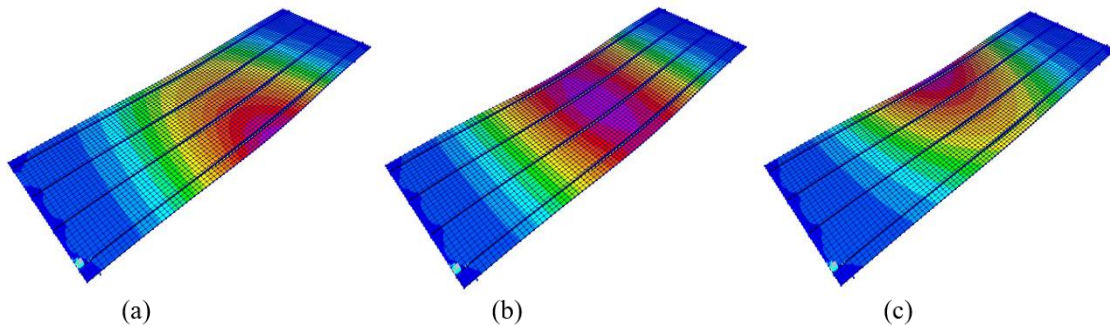
Figura 32 – Gráficos de deflexão.



Fonte: Dos autores, 2024.

A Figura 33 apresenta os resultados obtidos com a aplicação do *Shell* na modelagem da ponte, ilustrando-os por meio de uma régua de cores que representa a distribuição do momento fletor. De acordo com a disposição do caminhão de teste, na posição (a), ele está na contramão da pista de rolamento. Já na posição (b), o caminhão encontra-se posicionado no centro da ponte. Finalmente, na posição (c), ele está na mão correta da pista de rolamento.

Figura 33 – Resultados da aplicação do Shell na ponte.



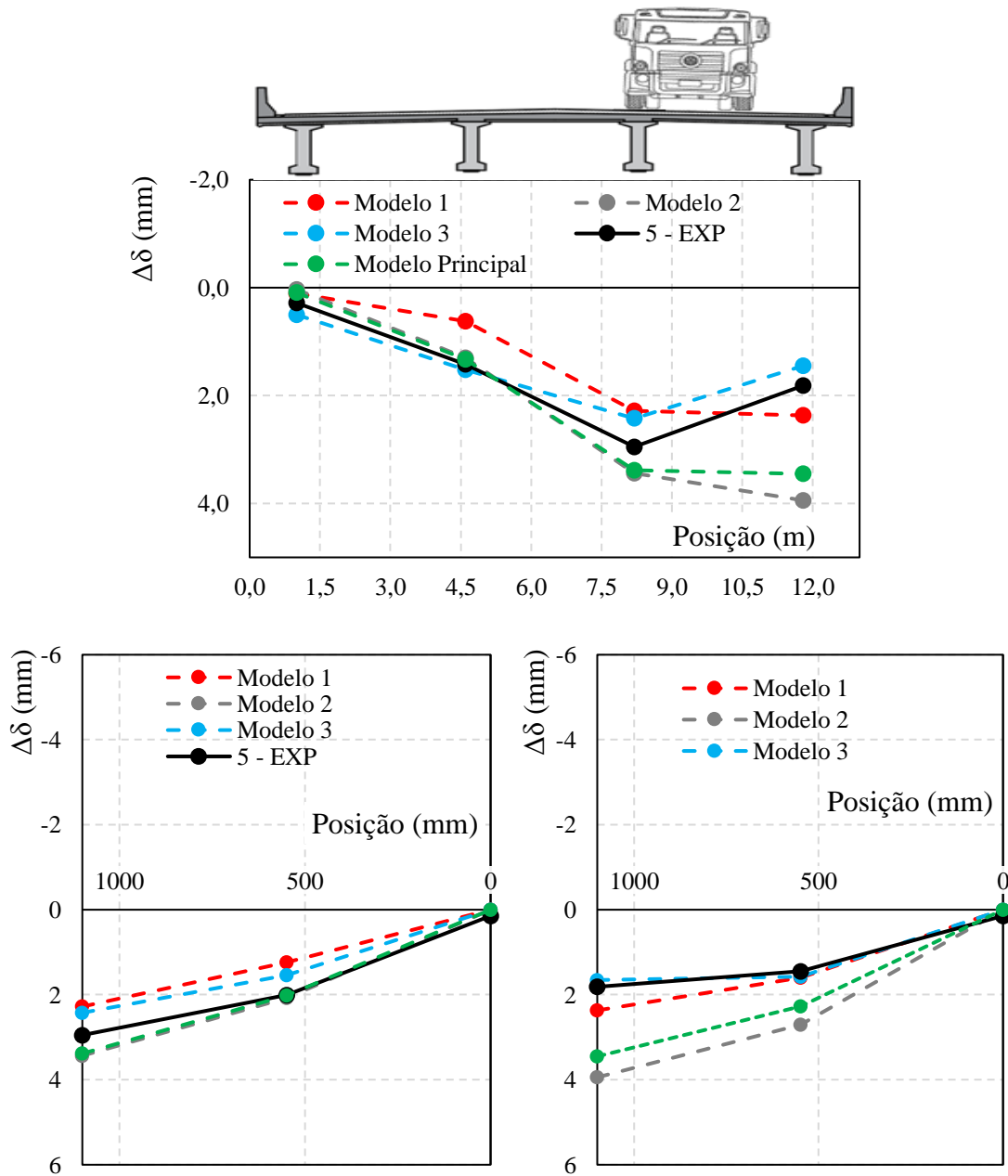
Fonte: Dos autores, 2024.

O Gráfico 1 (a) permite uma visualização detalhada de como as forças se distribuem ao longo da estrutura, oferecendo uma compreensão mais profunda do comportamento da ponte sob as condições de carregamento simuladas. A utilização do *Shell* contribui significativamente para a precisão do modelo, possibilitando uma análise mais realista das deformações e esforços internos, o que é fundamental para projetar levando sempre em consideração a segurança e a performance da ponte em condições reais.

A aplicação da carga foi realizada nas vigas 3 e 4, conforme as orientações e procedimentos estabelecidos pelo ensaio prescrito pela NBR 9607/2019. Esse ensaio, que visa garantir a confiabilidade e a segurança das estruturas de concreto, exige uma metodologia rigorosa para a distribuição da carga, de forma a simular condições reais de carregamento que a ponte enfrentará ao longo de sua vida útil.

Durante a execução, foram seguidos todos os parâmetros definidos pela norma, como a distribuição uniforme da carga e a medição contínua das deformações nas vigas, para assegurar que os resultados obtidos refletissem fielmente o comportamento estrutural esperado. A precisão no posicionamento e na aplicação das cargas foi fundamental para obter dados precisos e válidos, permitindo uma avaliação detalhada do desempenho das vigas 3 representada pelo Gráfico 1 (b) e 4 representada pelo Gráfico 1 (c) sob condições de carga controladas.

Gráfico 1 – Resultados do primeiro ensaio: (a) Perfil de Deslocamentos Verticais Transversais; (b) e (c) Perfis de Deslocamentos Verticais Longitudinais.



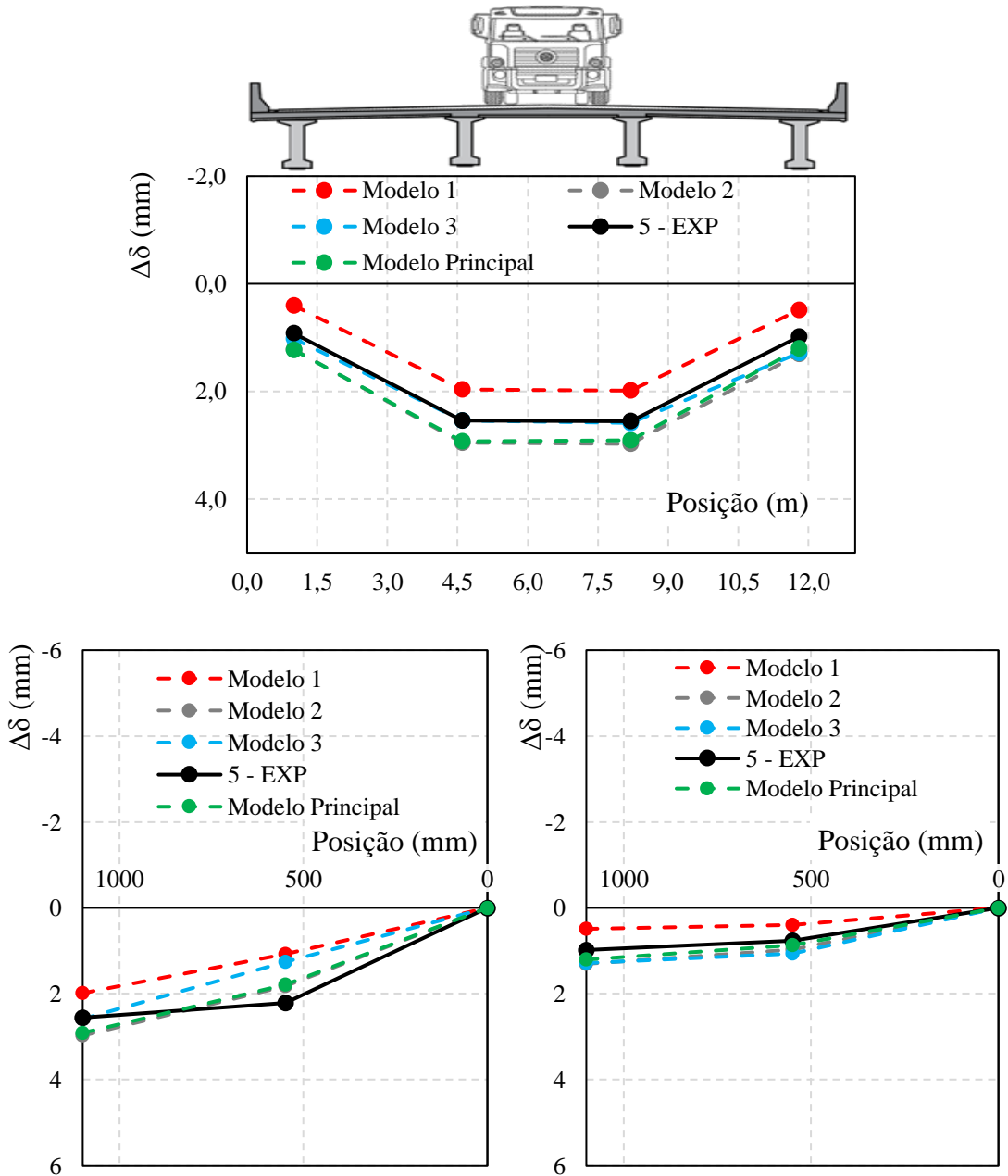
Fonte: Dos autores, 2024.

4.2 Ensaio 2

No decorrer deste ensaio, a carga foi aplicada nas vigas 2 e 3, seguindo rigorosamente os parâmetros estabelecidos pelo ensaio descrito na NBR 9607/2019. A norma, que orienta os procedimentos para a realização de provas de carga estática em estruturas de concreto, especifica as condições ideais para simular os efeitos de cargas reais nas estruturas, com foco

na precisão e confiabilidade dos resultados. A aplicação da carga foi feita de forma controlada e monitorada, garantindo que as vigas 2 e 3 fossem submetidas às condições projetadas. A metodologia adotada durante o ensaio permitiu uma avaliação detalhada das respostas estruturais dessas vigas, considerando não apenas as deformações, mas também outros parâmetros essenciais para garantir a integridade da estrutura e sua conformidade com as exigências da norma.

Gráfico 2 – Resultados do primeiro ensaio: (a) Perfil de Deslocamentos Verticais Transversais; (b) e (c) Perfis de Deslocamentos Verticais Longitudinais.

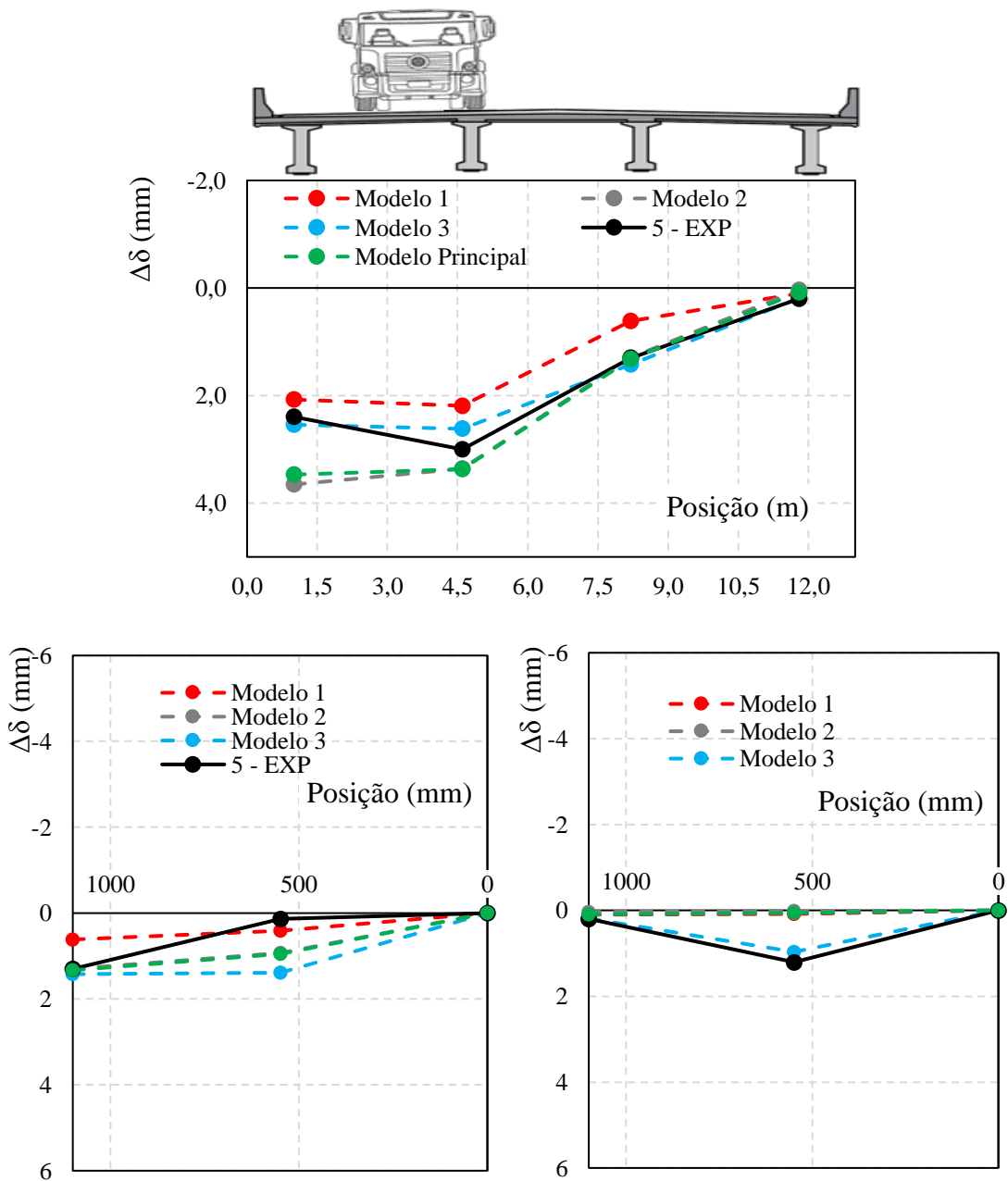


Fonte: Dos autores, 2024.

4.3 Ensaio 3

No terceiro ensaio, a carga foi aplicada nas vigas 1 e 2, em conformidade com os procedimentos estabelecidos pelo ensaio prescrito na NBR 9607/2019. A norma exige um controle minucioso da aplicação de carga para garantir que as estruturas sejam submetidas a condições reais de utilização, permitindo uma avaliação precisa de seu comportamento sob esforço.

Gráfico 3 – Resultados do primeiro ensaio: (a) Perfil de Deslocamentos Verticais Transversais; (b) e (c) Perfis de Deslocamentos Verticais Longitudinais.



5 DISCUSSÕES

Nos gráficos gerados pelo resultado dos ensaios nos modelos computacionais de pontes, observa-se que quanto mais próximo do zero mais resistentes é o modelo. Quando o gráfico dos modelos computacionais está mais próximo do modelo experimental, é dito que se aproxima do modelo principal, que é o modelo do projeto original da ponte usado na construção.

5.1 Ensaio 1

Os resultados do primeiro ensaio, apresentados no Gráfico 1, mostram como os deslocamentos verticais variaram entre a ponte e o modelo experimental. Nas vigas 3 e 4, os deslocamentos ficaram entre 0,5 e 2, enquanto nas vigas 1 e 2 os valores permaneceram estáveis, indicando condições favoráveis à segurança estrutural e uma boa distribuição dos esforços.

O modelo 1 destacou-se por apresentar uma resistência semelhante à resistência do modelo original, além de manter uma boa coerência com os resultados experimentais. Esse desempenho sugere que o modelo 1 pode suportar mais carga com menor deformação, o que é desejável em cenários onde a rigidez é essencial. O modelo 2 apresentou valores muito próximos aos do modelo original, com uma leve diferença de 0,2 na viga 4, enquanto nas vigas 1, 2 e 3 praticamente não houve variações, indicando que o comportamento do modelo 2 está alinhado com o projeto de referência. Por outro lado, o modelo 3 demonstrou um desempenho mais alinhado com os valores experimentais, ao contrário dos modelos 1 e 2, que se aproximaram mais dos valores do modelo principal.

Além disso, os Gráficos de Perfis de Deslocamentos Verticais Longitudinais da viga 3 revelaram que os modelos 1 e 3 apresentaram deslocamentos menores do que os valores experimentais. Isso sugere que esses modelos possuem uma boa rigidez estrutural, o que pode ser vantajoso em situações onde é necessário minimizar deformações para evitar comprometimentos ao longo do tempo. Em contrapartida, o modelo 2 teve um comportamento idêntico ao do modelo principal, indicando que sua estrutura responde de forma bastante consistente com a configuração original do projeto.

Na viga 4, o comportamento foi um pouco diferente: o modelo 2 apresentou um deslocamento maior do que o do modelo principal, sugerindo que, em alguns pontos, essa estrutura pode ser mais suscetível a deformações a determinados tipos de cargas. Por outro lado,

tanto o modelo 1 quanto o modelo 3 tiveram deslocamentos muito próximos dos valores experimentais, confirmando sua confiabilidade e precisão.

Esses resultados indicam que os modelos 1 e 3 conseguem reproduzir resultados semelhantes ao modelo experimental, ou seja, o comportamento estrutural esperado, o que pode ser interessante para aplicações onde uma estrutura mais rígida seja necessária. O modelo 2, embora tenha uma leve flexibilidade adicional na viga 4, se mostrou bastante confiável e estável, mantendo um desempenho muito próximo ao do modelo principal. Isso sugere que cada um dos três modelos possui características particulares que podem ser vantajosas dependendo da necessidade específica: o modelo 1 se destaca pela rigidez e resistência superior, o modelo 3 pela precisão ao replicar o comportamento experimental, e o modelo 2 pela estabilidade consistente com a estrutura original.

5.2 Ensaio 2

No segundo ensaio, conforme mostrado no Gráfico 2, o comportamento das vigas foi analisado detalhadamente. Nas vigas 2 e 3, que estão entre as mais solicitadas pela carga do caminhão-tipo, o deslocamento foi de 2,5 nos resultados experimentais e 2,9 no modelo principal, sugerindo um leve acréscimo em relação ao modelo teórico. Em contraste, as vigas 1 e 4 destacam-se pela resistência, com deslocamentos próximos de 0,9, indicando um desempenho mais rígido nessas posições.

O modelo 1 manteve sua superioridade em relação aos modelos 2 e 3, apresentando uma resistência maior que a dos resultados experimentais e deslocamentos de 2 nas vigas 2 e 3, o que confirma sua eficiência nas regiões mais exigidas estruturalmente. O modelo 2 mostrou-se consistente com o modelo principal, mantendo praticamente os mesmos resultados. Já o modelo 3 teve um desempenho que espelhou quase perfeitamente o comportamento dos ensaios experimentais, com apenas um leve deslocamento adicional.

Nos Gráficos de Perfis de Deslocamentos Verticais Longitudinais da viga 3, foi observado que todos os modelos produzidos apresentaram deslocamentos menores do que os experimentais, evidenciando uma maior rigidez estrutural nos modelos construídos. Dentre eles, o modelo 1 apresentou o menor deslocamento, destacando-se como o mais rígido, o que sugere uma maior capacidade de suportar cargas sem deformação significativa.

Na análise da viga 4, tanto o modelo 2 quanto o modelo principal apresentaram deslocamentos leves em comparação com os valores experimentais, sugerindo um comportamento próximo, mas com um pouco mais de flexibilidade do que o esperado. Em contrapartida, o modelo 1 exibiu um deslocamento menor que o valor experimental, reforçando mais uma vez sua maior rigidez. O modelo 3 teve desempenho praticamente idêntico ao dos ensaios experimentais, o que indica uma correspondência precisa com o comportamento previsto.

Esses resultados sugerem que, embora os três modelos apresentem características estruturais diferentes, cada um oferece vantagens específicas. O modelo 1 destaca-se pela rigidez e resistência superiores aos demais modelos, enquanto o modelo 3 reproduz de forma mais fiel o comportamento esperado no modelo experimental. O modelo 2, por sua vez, demonstra uma estabilidade consistente com o modelo principal, confirmando sua eficiência estrutural nas condições avaliadas.

5.3 Ensaio 3

No terceiro ensaio, como mostrado no Gráfico 3, as vigas 1 e 2 apresentaram deslocamentos de 0,5 e 2, respectivamente, quando comparados aos valores experimentais e ao do modelo principal. Já nas vigas 3 e 4, os valores se mantiveram praticamente iguais, indicando um comportamento estável nessas posições.

O modelo 1 novamente se destacou, demonstrando a maior resistência entre as estruturas modeladas. Isso reforça sua capacidade de suportar as cargas aplicadas com menor deformação. O modelo 2 manteve um desempenho bastante próximo ao do modelo principal, com apenas um leve deslocamento adicional de 0,2 na viga 1, sugerindo um comportamento estável, mas um pouco mais flexível. Por fim, o modelo 3 teve resultados muito próximos aos experimentais, com um pequeno deslocamento de 0,5 na viga 2, confirmando sua boa correspondência com o modelo teórico.

Nos Gráficos de Perfis de Deslocamentos Verticais Longitudinais da viga 3, foi observado que todos os modelos apresentaram um deslocamento maior do que o esperado nos ensaios experimentais. No entanto, o modelo 1 foi o que mais se aproximou dos valores experimentais, seguido de perto pelo modelo 3. Em contrapartida, o modelo 2 registrou a maior

amplitude de deslocamento, superando até mesmo os valores do modelo principal, o que pode indicar uma maior flexibilidade estrutural nessa seção específica.

Na viga 4, tanto o modelo 1 quanto o modelo 3 apresentaram resultados idênticos aos do modelo principal, com deslocamentos mínimos, sugerindo um comportamento consistente e eficiente sob carga. O modelo 3, além disso, registrou um deslocamento praticamente idêntico aos valores experimentais, reforçando sua capacidade de replicar com precisão o comportamento estrutural do modelo teórico.

Esses resultados destacam as particularidades de cada modelo em diferentes situações. O modelo 1 destaca-se em termos de resistência e menor deformação, especialmente nas regiões mais críticas. O modelo 3 se mostrou bastante fiel ao comportamento experimental, o que pode ser útil para aplicações onde a precisão do modelo teórico seja essencial. Por outro lado, o modelo 2, embora ligeiramente mais flexível, apresentou um desempenho consistente com o modelo principal, sugerindo que pode ser uma opção viável em cenários que exijam estabilidade moderada e economia de recursos.

6 CONCLUSÃO

Com base nos ensaios realizados nos modelos computacionais e experimentais das pontes, é possível concluir que cada uma das estruturas apresentou comportamentos distintos que refletem diferentes níveis de rigidez, resistência e proximidade com o modelo teórico utilizado para a construção da modelagem principal.

O modelo 1 se destacou em todos os testes, mostrando uma rigidez estrutural maior e deslocamentos verticais menores. Isso indica que ele é resistente e suporta cargas sem se deformar de forma significativa. Esse bom desempenho aconteceu devido o modelo ser construído de maneira simples, mas com uma certa complexidade devido à inclusão de elementos *Nonprismatic*, o que acabou deixando sua estrutura mais sofisticada e eficiente.

O modelo 2 mostrou um comportamento muito consistente em relação ao modelo principal, com deslocamentos praticamente iguais aos do modelo principal. Apesar de apresentar uma leve flexibilidade extra em algumas vigas devido à aplicação do *Frame* e do *Offset*, seu desempenho estável comprova sua adequação para projetos que buscam maior fidelidade à estrutura original, além de garantir um resultado esteticamente mais realista.

Por fim, o modelo 3 se destacou como o mais preciso na reprodução dos resultados experimentais, demonstrando grande eficácia em replicar o comportamento estrutural teórico com fidelidade. Essa precisão se deve à substituição de *Frames* por elementos *Shell*, o que pode ser uma vantagem em situações onde a precisão do modelo computacional é essencial para avaliar com exatidão o desempenho real da estrutura sob carga.

Portanto, o modelo 1 se destacou por sua rigidez e resistência, mesmo sua construção sendo mais simples em comparação aos demais modelos. O modelo 2, por sua vez, apresentou grande semelhança com a estrutura original, embora tenha exigido mais tempo devido à adição de um novo *Frame*, especialmente pela aplicação do *Frame* e *Offset*. Já o modelo 3 foi o mais fiel aos resultados experimentais, destacando a importância da substituição de *Frames* por elementos *Shell*. No entanto, sua execução é mais complexa e exige maior conhecimento técnico. Assim, a escolha do modelo depende do critério do projetista, que deve considerar o tempo disponível para a execução e os recursos necessários.

6.1 – Sugestões para futuros trabalhos

Para projetos futuros, recomendamos a adoção de *Softwares* de análise estrutural, que podem proporcionar maior precisão e eficiência na avaliação das estruturas.

- **ANSYS:** é um software de simulação multipropósito usado para análises estruturais, térmicas, fluidodinâmicas;
- **MIDAS Civil:** é um software especializado para análise e design de pontes, sendo altamente recomendado para engenharia de pontes;
- **LUSAS:** é um software de modelagem e análise estrutural utilizado em pontes e outras infraestruturas complexas;
- **CSI Bridge:** é uma ferramenta específica para o design e análise de pontes, desenvolvida pela mesma empresa que criou o SAP2000.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, João. Análise histórica dos testes de carga em estruturas. *Revista Brasileira de Engenharia*, v. 45, n. 2, p. 123-135, 2015.
- ALVES, Marcílio. REVIEW OF THE BOOK *The History of the Theory of Structures: Searching for Equilibrium* by KARL-EUGEN KURRER. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2019.
- ASHRAE. *ASHRAE Standard 55 - 2020: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9607**: Prova de carga estática em estruturas de concreto – Requisitos e Procedimentos. Rio de Janeiro, 2023.
- BATHE, K. J. *Finite Element Procedures*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- BELONI, Patrícia. Pesquisador estuda lianas e produz um Guia de Identificação. Agência Universitária de Notícias – USP. São Paulo, 2012. Disponível em: <https://www.usp.br/aunantigo/exibir?id=4995&ed=882&f=18>. Acesso em: 23 set. 2024.
- BILLINGTON, David P. *The Tower and the Bridge: The New Art of Structural Engineering*. Princeton University Press, 1983.
- BRASIL. Ministério da Infraestrutura. Rodovias: Quatro novas pontes na BR-230/PA fortalecem integração e segurança na Transamazônica. Brasília, 16 dez. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/transito-e-transportes/2022/12/quatro-novas-pontes-na-br-230-pa-fortalecem-integracao-e-seguranca-na-transamazonica>. Acesso em: 14 abr. 2024.
- CHOPRA, A. K.; CLOUGH, R. W. *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hall, 2004.
- COMPUTERS AND STRUCTURES, INC. *SAP2000 v22: Integrated Software for Structural Analysis and Design*. Berkeley: Computers and Structures, Inc., 2020.
- COSTA, Ana. *Modelos numéricos e a evolução da engenharia estrutural*. Rio de Janeiro: Editora Engenharia Moderna, 2021.
- CSI (Computers and Structures, Inc.). *SAP2000: Integrated Structural Analysis and Design. Version 22*. Berkeley, CA: Computers and Structures, Inc., 2022.

CSI PORTUGAL. Templates para iniciar rapidamente um novo modelo no SAP2000. 2024. Disponível em: <https://www.csiportugal.com/software-features/2/sap2000#>. Acesso em: 29 nov. 2024.

DELTACON, ENGENHARIA. Projeto de execução da ponte sobre o Rio Chatopauá. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, pg. 17, 2022.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias. Rio de Janeiro: IPR/DNIT, 2004.

ELFGREN, Lars; JOHANSSON, Maria; ANDERSSON, Peter. Comparação de custos entre diferentes tipos de ensaios de carga. *Journal of Structural Engineering*, v. 22, n. 3, p. 145-159, 2018.

EXCEL Sensores. Extensômetros elétricos. 2024. Disponível em: <https://excelsensor.com.br/extensometros-colaveis-de-resistencia-eletrica/>. Acesso em: 29 nov. 2024.

FLEMMING, N. S.; SMITH, J. R.; WILSON, T. D. Analysis of bending moments in structural beams. *Journal of Structural Engineering*, v. 45, n. 2, p. 189-200, 2019.

Ghali, A.; Neville, A. M. (2020). *Structural Analysis: A Unified Classical and Matrix Approach*.

GOOGLE. Google Earth. Ponte sobre o Rio Chatopauá. Disponível em: <https://earth.google.com/web/@-4.59259013,-49.78429557,90.49915684a,141.52888824d,30.00000026y,0h,0t,0r/data=CgRCAggBMikKJwolCiExLUplRU5TMnRIZFpFbmd2ZkR3ZUF4M2N1RFItMzgwTlkgAToDCgEwSgcIkJnsFRAB>. Acessado em: 20 ago 2024.

KULKARNI, A. et al. An Overview of SAP2000 and its Applications in Civil Engineering. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, vol. 11, no. 3, 2020.

LACERDA, João. Análise histórica das provas de carga em pontes brasileiras. *Revista Brasileira de Engenharia*, v. 12, n. 1, p. 45-58, 2015.

LANTSOGHT, Eva O.L. *Load Testing of Structures: Historical Perspectives and Modern Practices*. Boca Raton: CRC Press, 2019.

LEONHARDT, *Concrete Structures: Load Testing*, 1982.

LIMA, Rafael. *Versatilidade no uso do SAP2000 em projetos de engenharia estrutural*. Curitiba: Editora Engenharia Aplicada, 2021.

MCCORMAC, J. C.; NELSON, J. K. *Análise Estrutural*. Pearson. *Design of Structural Elements: Concrete, Steel, Composites, and Timber Design*, 2016.

MENDES, Carolina. *Automação e eficiência na análise estrutural: o papel do SAP2000*. Recife: Editora Técnica Avançada, 2021.

NDAE. Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia. Do parecer técnico que apresenta os resultados da prova de carga executada na ponte sobre o Rio Chatopauá. Parecer de maio de 2023. Responsáveis técnicos: Dr. Aarão Ferreira Lima Neto e Dr. Maurício de Pina Ferreira. Tucuruí, Pará 2023.

OLIVEIRA, Pedro. O impacto do SAP2000 na engenharia estrutural moderna. Belo Horizonte: Editora Engenharia Digital, 2020.

PALAZZO, D. Monitoramento de pontes por meio de levantamentos topográficos – um estudo de caso. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Paraná. Curitiba, (2002).

PEREIRA, João. A revolução das simulações numéricas na engenharia e arquitetura. Porto Alegre: Editora Técnica, 2021.

PETROSKI, H. *Engineers of Dreams: Great Bridge Builders and the Spanning of America*. New York: Alfred A. Knopf, 1995.

SALVADORI, M.; HELLER, R. Por que as edificações ficam de pé? São Paulo: Edições 70, 1986.

SANTOS, P. R.; OLIVEIRA, M. J. Provas de carga em pontes: tempo de permanência e análise de comportamento. Revista de Engenharia Estrutural, São Paulo, v. 18, n. 2, p. 35-48, 2015.

SANTOS, Ricardo. O impacto dos modelos numéricos na engenharia moderna. São Paulo: Editora Engenharia Avançada, 2022.

SILVA, Maria. Desenho de um cavalo. 2023. Disponível em: <https://www.exemplo.com/imagem>. Acesso em: 05 dez. 2024.

VAZQUEZ, A.; SANTOS, R. *Provas de carga em estruturas de edifícios*. 1. ed. São Paulo: Editora SENAI-SP, 2014.

VIEIRA, Patrícia Caroline Souza da Rocha. Análise estrutural e arquitetônica das pontes de Robert Maillart com base no software Ansys. 2016. 74 f. Monografia (Graduação) - Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2016.