



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

LUIS FARUK ENTRINGER DE CAMARGO

PAULO HENRIQUE MACIEL ARRAES ALBUQUERQUE

**ANÁLISE NORMATIVA DE ENSAIO DE PROVA DE CARGA ESTÁTICA E
ESTUDO DE CASO EM PONTE DE CONCRETO ARMADO**

TUCURUÍ
2022

LUIS FARUK ENTRINGER DE CAMARGO
PAULO HENRIQUE MACIEL ARRAES ALBUQUERQUE

**ANÁLISE NORMATIVA DE ENSAIO DE PROVA DE CARGA ESTÁTICA E
ESTUDO DE CASO EM PONTE DE CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Dr. Manoel José Mangabeira Pereira Filho.

LUIS FARUK ENTRINGER DE CAMARGO
PAULO HENRIQUE MACIEL ARRAES ALBUQUERQUE

**ANÁLISE NORMATIVA DE ENSAIO DE PROVA DE CARGA ESTÁTICA E
ESTUDO DE CASO EM PONTE DE CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Data da aprovação: 27/04/2022

Conceito: Excelente

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Carolina Coelho da Rosa (UFPA – CAMTUC)
Doutora em Engenharia Civil (Examinadora Interna)

Prof. Aarão Ferreira Lima Neto (UFPA – NDAE)
Doutor em Estruturas e Construção Civil (Examinador Externo)

Eng. Paulo Roberto Fontes da Silva (DNIT)
Especialista em Infraestrutura de Transportes (Examinador Externo)

Dedico este trabalho a todos que incentivam o
estudante brasileiro.

AGRADECIMENTOS DE LUIS DE CAMARGO

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, através do mérito e ética aqui presentes.

Ao Prof. Dr. Manoel Mangabeira pela oportunidade e apoio na elaboração deste trabalho. Declaro aqui minha eterna gratidão pelo compartilhamento de seu conhecimento e tempo, bem como sua amizade.

Ao Prof. Dr. Aarão Neto, juntamente ao NDAE, DNIT, Arteleste Construções, NUMEA e NICAIE, pelo fornecimento dos dados utilizados nesse trabalho.

Aos meus pais, Simone e Genésio, meus irmãos (Genésio, Hugo, Gustavo, Fernando, Henrique), e minha família, pelo amor, incentivo e apoio incondicional. Obrigado por me fazerem chegar à conclusão do meu curso e começo de uma nova carreira.

Quero agradecer aos meus melhores amigos, Kelwin, Hevilyn, Rafaela e Giuliano. Obrigado por todos os conselhos úteis, risadas, bem como palavras motivacionais e puxões de orelha.

Agradeço também a minha namorada, Vitória, pelo amor, apoio e incentivo que me proporcionou, além de estar comigo inúmeros momentos de ansiedade e estresse.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente fizeram parte de minha formação, obrigado por tudo. Este TCC também é de vocês!

AGRADECIMENTOS DE PAULO ALBUQUERQUE

O primeiro agradecimento vai para aqueles que estiveram ao meu lado em toda a minha vida, pois sem eles, eu não conseguiria realizar tal feito ou qualquer outro. Obrigado de todo o meu coração a meus pais, Clarisse Maciel e Francismar Albuquerque, a minha querida avó, Maria Neuma e aos meus irmãos, Pedro Wallace e Sarah Jéssica. Amo vocês!

Logo em seguida, gostaria de agradecer a minha segunda família, que mesmo tendo chegado em minha vida próximo ao fim desse curso, contribuíram com toda alegria para o meu desenvolvimento. Agradeço pelos conselhos e pelo carinho a Maria José, Joaquim Maciel e Fabíola Maciel.

Agradeço por todo carinho, dedicação, muita paciência e amor a Flávia Domingues Maciel, minha namorada. Eu amo você e sou grato por te ter em minha vida.

Quero agradecer a dois professores incríveis que inspiraram meu traçado ao longo deste curso. Aarão Ferreira Lima Neto, pela inspiração despropositadamente passada a mim na matéria “Concreto Armado 1”. Manoel José Mangabeira Pereira Filho, por ser mentor deste aluno (um pouco difícil) e também pela amizade construída ao longo desse convívio.

Gostaria de agradecer especialmente, também, a Marlon Braga dos Santos, pessoa que conheci dentro da faculdade como meu professor, mas que se tornou um amigo, um irmão, um pai e um filho para mim, sem você também, eu não seria capaz de conseguir.

E a três pessoas, com quem dividi uma casa por 3 anos e mesmo com todos os conflitos que existiram, sempre amarei vocês. Vitor lima, Meriely Gaia e Wallas Ximenes, Obrigado!

E a amigos e família, Fernando Lopes, Alexsandra Dantas, Monique Ribeiro, Mateus Vinhote, Ana Alice Vinhote, Melina Monteiro, Kleidiorrana Ketlen, Ingrid Luna, Manoel Arrais, Aldenir Saraiva, Wesley Carneiro, Higor Dias, Carlos Lobato, Márcio Vagner, Josielem Lins, Célio Roberto, Larissa Sousa, Agne Martins, Leonardo Fellipe, Fernanda Hillary, além do corpo docente dessa faculdade. Muito Obrigado!

Além disso, gostaria de agradecer ao NDAE, DNIT a Arteleste Construções, NUNEA e NICAIE pela disponibilização dos dados, tornando possível a elaboração deste trabalho.

“Educação não transforma o mundo. Educação muda pessoas. Pessoas transformam o mundo.”
(FREIRE, 1979, p.84)

RESUMO

Recentemente, houve alteração na malha rodoviária paraense, caracterizada pela substituição de pontes de madeira por pontes de concreto. Nesse contexto, provas de carga são definidas como um conjunto de atividades destinadas a analisar o desempenho de uma estrutura. Desse modo, este trabalho apresenta uma comparação entre normatizações brasileira (ABNT NBR 9607, 2019), Espanhola (Ministério de Fomento, 2009), Americana (ACI 318, 2019), Alemã (DAfStb, 2000) e Tcheca (CSN 73 6209, 1996), de ensaio de prova de carga estático, bem como a avaliação do ensaio de prova de carga estática realizado na ponte sobre o rio Jacaré. A comparação entre recomendações normativas foi realizada levando em consideração: motivações para realização de uma prova de carga; atividades realizadas pré-prova de carga; pontos de monitoração; intensidade e etapas de carregamento; e critérios de parada e aceitação. Esta comparação mostra que quanto às atividades realizadas antes da prova de carga, a norma brasileira apresenta tópicos mais detalhados que as demais recomendações, também tendo a maior quantidade de motivações para realização de uma prova de carga. Contudo, embora sejam mais detalhadas, estas não obrigam a aplicação de prova de carga em nenhuma de suas motivações, assim minimizando o uso dessa ferramenta. Os critérios adotados para a avaliação do ensaio de prova de carga realizado na ponte sobre o rio Jacaré foram: abertura de fissuras; deformações na armadura longitudinal e superfície do concreto, deformações no estribo; e deslocamentos verticais máximos e residuais. Em relação ao parâmetro para abertura de fissuras, as recomendações brasileiras mostraram-se condizentes com as demais normas, diferindo apenas da norma alemã, o que se deve a esta ser estabelecida em função de fissuras máximas e variação da abertura de fissuras residuais. Para deslocamentos máximos, as normatizações brasileiras e americanas aderem a limites de projeto, desse modo, divergindo das recomendações espanholas e tchecas que apresentam intervalos em função da previsão teórica. Em função dos deslocamentos residuais, a norma brasileira apresenta o menor deslocamento residual permitido (5%), sendo a mais rigorosa neste critério em comparação com as demais normas (média de 16%). Os resultados obtidos demonstram a aceitação da ponte sobre o rio Jacaré em função de: abertura de fissuras, para todas as recomendações normativas; deformação na longitudinal e face comprimida do concreto, apenas para a norma alemã; deslocamento máximo, apenas para a norma brasileira (com limites 25 vezes maiores que a média das demais normas); e deslocamentos residuais, para todas as recomendações.

Palavras-Chaves: Pontes, Avaliação estrutural, Recomendações normativas, Prova de carga, Prova de carga estática

ABSTRACT

Recently, there was a change in the road network in Pará, characterized by the replacement of wooden bridges with concrete bridges. In this context, load tests are defined as a set of activities designed to analyze the performance of a structure. Thus, this work presents a comparison between Brazilian (ABNT NBR 9607, 2019), Spanish (Ministerio de Fomento, 2009), American (ACI 318, 2019), German (DAfStb, 2000) and Czech (CSN 73 6209, 1996) standards of static load test, as well as the evaluation of the static load test carried out on the bridge over the Jacaré River. The comparison between normative recommendations was carried out taking into account: motivations for carrying out a load test; pre-load test activities; monitoring points; intensity and loading steps; stop and acceptance criteria. This comparison shows that regarding the activities carried out before the load test, the Brazilian standard presents more detailed topics than other recommendations, also having the greatest amount of motivations for carrying out a load test. However, although they are more detailed, they do not require the application of load proof in any of their motivations, thus minimizing the use of this tool. The criteria adopted for the evaluation of the load test carried out on the bridge over the Jacaré River were: opening of cracks; deformations in the spar reinforcement and concrete surface, deformations in the stirrup; and maximum and residual vertical displacements. Regarding the parameter for crack width, the Brazilian recommendations were consistent with the other standards, differing only from the German standard, which is due to the latter being established as a function of maximum cracks and variation of residual crack width. For maximum displacements, the Brazilian and American regulations adhere to design limits, thus, differing from the Spanish and Czech recommendations that present intervals as a function of the theoretical prediction. Due to residual displacements, the Brazilian standard has the lowest permitted residual displacement (5%), being the most rigorous in this criterion compared to the other standards (average of 16%). The results obtained demonstrate the acceptance of the bridge over the Jacaré River due to: opening of cracks, for all normative recommendations; deformation in the stringer and compressed face of the concrete, only for the German standard; maximum displacement, only for the Brazilian standard (with limits 25 times higher than the average of the other standards); and residual displacements, for all recommendations.

Keywords: Bridges, Structural evaluation, Code recommendations, Load test, Static load test

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Primeiros exemplos de carga de prova do Brasil	20
Figura 2.2 – LVDT Kyowa	32
Figura 2.3 – Extensômetros de resistência elétrica	33
Figura 3.1 – Ilustrações dos procedimentos de aplicação de cargas nas pontes	38
Figura 3.2 – Limites de abertura de fissura para cada ambiente de exposição	38
Figura 3.3 – Deslocamentos residuais permitidos	41
Figura 4.1 – Características geométricas e detalhamento dos elementos	44
Figura 4.2 – Imagem aérea da ponte sobre o rio Jacaré	45
Figura 4.3 – Características geométricas e detalhamento dos elementos	46
Figura 4.4 – Características geométricas e detalhamento dos elementos	47
Figura 4.5 – Detalhes da execução da prova de carga	48
Figura 5.1 – Abertura de fissura de flexão na viga de centro	50
Figura 5.2 – Deformação na armadura da longarina e superfície do concreto	51
Figura 5.3 – Deformação no estribo	51
Figura 5.4 – Deslocamentos verticais	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – LVDT Ld Sensor	32
Tabela 2.2 – Especificação dos extensômetros elétricos utilizados	33
Tabela 3.4 – Resumo dos procedimentos de aplicação de carga em pontes	37
Tabela 3.5 – Resumo dos critérios de aceitação para deformações máximas	39
Tabela 3.6 – Resumo dos critérios de aceitação para deslocamentos vertical máximo	40
Tabela 3.7 – Limites de abertura de fissura para as normas de prova de carga	41
Tabela 3.8 – Critérios de aceitação relacionados às deformações	42
Tabela 3.9 – Resumo dos Critérios de aceitação para deslocamentos vertical máximo	43
Tabela 3.10 – Resumo dos critérios de aceitação para deslocamento residuais	43
Tabela 6.1 – Resumo da avaliação normativa em função das aberturas de fissuras	53
Tabela 6.2 – Resumo da avaliação normativa em função da deformação na longarina central.....	54
Tabela 6.3 – Resumo da avaliação normativa em função da face comprimida do concreto	54
Tabela 6.4 – Avaliação normativa em função da deformação nos estribos	55
Tabela 6.5 – Resumo da avaliação normativa em função dos deslocamentos máximos	56
Tabela 6.6 – Resumo da avaliação normativa em função dos deslocamentos residuais	56

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Histórico dos testes de carga	20
Quadro 3.1 – resumo das motivações para realização de provas de carga	34
Quadro 3.2 – Resumo das atividades realizadas antes das provas de carga	35
Quadro 3.3 – Resumo dos pontos necessários para a monitoração	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

OAE	Obra de arte especial
NDAE	Núcleo de Desenvolvimento Amazônico
UFPA	Universidade Federal do Pará
DNIT	Departamento Nacional de infraestrutura de Transportes
NUMEA	Núcleo de Modelagem Estrutural Aplicada
NICAE	Núcleo de Modelagem Estrutural Aplicada
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite último
CAA	Classe de Agressividade Ambiental
LVDT	Transdutor de deslocamento
V2	Longarina central

LISTA DE SÍMBOLOS

Q	Carregamento gerado devido ao trem-tipo
G_1	Peso próprio da estrutura
G_2	Ações permanentes adicionais
F_{obj}	Carga aplicada durante a execução do ensaio
A	Carregamentos devido ao acúmulo de água da chuva
N	Carregamentos devido ao acúmulo de neve
C	Carregamento devido às cargas da chuva
w	Abertura de fissura
w_k	Limite de fissuração
\mathcal{E}	Deformação
δ	Deformação
l	Comprimento do vão da ponte
Δ	Variação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa	17
1.2	Objetivos	18
1.2.1	Objetivo geral	18
1.2.2	Objetivos específicos	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Histórico da prova de carga	19
2.2	Definições da prova de carga	21
2.3	Recomendações normativas	23
2.3.1	Recomendações brasileiras	23
2.3.2	Recomendações americanas	24
2.3.3	Recomendações espanholas	26
2.3.4	Recomendações alemãs	28
2.3.5	Recomendações tchecas	30
3	AVALIAÇÃO DAS RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS	34
3.1	Motivações para realização de prova de carga	34
3.2	Atividades pré-prova de carga	35
3.3	Pontos de monitoração	36
3.4	Intensidade e etapas de carregamento	36
3.5	Critérios de parada e aceitação	38
3.5.1	Abertura de fissuras	38
3.5.2	Deformações	39
3.5.3	Deslocamentos máximos	39
3.5.4	Deslocamentos residuais	40
3.6	Resumo dos critérios	41
3.6.1	Abertura de fissuras	41
3.6.2	Deformações	42
3.6.3	Deslocamentos verticais	42
4	PROVA DE CARGA NA PONTE SOBRE O RIO JACARÉ	44
4.1	Características gerais da ponte	44
4.2	Geometria da ponte	45

4.3	Instrumentação	46
4.4	Sistema de ensaio da prova de carga	48
5	RESULTADOS	50
5.1	Aberturas de fissuras	50
5.2	Deformações	50
5.3	Deslocamentos verticais	51
6	AVALIAÇÃO NORMATIVA DA PROVA DE CARGA	53
6.1	Abertura de fissuras	53
6.2	Deformações	54
6.3	Deslocamentos verticais	55
7	CONCLUSÃO	57
	REFERÊNCIAS	59

1. INTRODUÇÃO

Recentemente, houve alteração na malha rodoviária paraense, caracterizada pela substituição de pontes de madeira por pontes de concreto. Dentre essas, algumas, como a ponte sobre o rio Jacaré, localizada na rodovia Transamazônica (BR-230), situada dentro dos limites municipais de Pacajá, sofreram relevante intervalo de tempo entre a execução da fundação, pilares, travessa e encontros, em relação a construção das longarinas e tabuleiro. Ao longo desse intermédio, estudos mais atualizados demonstraram a necessidade de elevação dos encontros e travessas, sendo necessário um reforço destes elementos. Neste caso, tanto a intervenção dos elementos existentes, quanto a interação entre elementos de concreto de diferentes idades cria condições de incertezas relacionadas as considerações de projeto dessas novas pontes.

Nesse contexto, segundo a ABNT NBR 9607 (2019), provas de carga são definidas como um conjunto de atividades destinadas a analisar o desempenho de uma estrutura por meio de medição e controle de efeitos causados pela aplicação de ações externas de intensidade e natureza previamente estabelecidas. No caso de pontes, muitos países ainda exigem teste de prova de carga estática apenas para a avaliação de pontes novas onde os métodos de análise convencionais falham em representar seu desempenho em serviço. Além disto, Lantsoght (2019) indica que práticas de teste de carga, bem como os códigos e diretrizes disponíveis, diferem bastante entre os países, sendo determinados normalmente pelas demandas locais, desamparando e responsabilizando assim os profissionais da área na elaboração e execução da prova de carga.

No caso do Brasil, prova de carga estática é sugerida em casos de aceitação da estrutura, mudanças nas condições de uso, solicitações excepcionais previstas durante a fase construtiva, após acidentes ou anomalias, desconhecimento das condições construtivas ou projetos, estudo do comportamento/desempenho da estrutura, qualidade e/ou quantidades dos materiais ou dimensões que não atendam aos requisitos de projeto e passagem de conjuntos transportadores de carga especiais indivisíveis. Alampalli *et al.* (2020) também retrata três outras aplicações como validação de modelos em elementos finitos, verificação de considerações de projeto de novas pontes e caso de utilização de novos materiais.

O ensaio de prova de carga estática realizado na ponte sobre o rio Jacaré foi realizado pelo Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia (NDAE) do campus de Tucuruí da Universidade Federal do Pará (UFPA), Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e a empresa de engenharia Arteleste Construções em parceria com os grupos de pesquisa: Núcleo de Modelagem Estrutural Aplicada (NUMEA) e Núcleo de

Instrumentação e Computação Aplicada a Engenharia (NICAE), sendo sintetizado no relatório de prova de carga Lima Neto *et al.* (2020). A Figura 1.1 apresenta uma foto do ensaio ocorrido na ponte sobre o rio Jacaré.

Figuras 1.1 – Ensaio de prova de carga estático na ponte sobre o rio Jacaré



1.1 JUSTIFICATIVA

A parada das obras na fase construtiva da estrutura da ponte sobre o rio Jacaré, deixando-a inacabada, e o posterior retorno da construção da estrutura favoreceu o surgimento de incertezas quando a seu comportamento estrutural. Devido a isso, fez-se necessário a realização de uma prova de carga estática a fim de avaliar o comportamento da estrutura. A norma brasileira indica monitoramento de parâmetros sem apresentação de critérios objetivos para a correta avaliação dos mesmos. Além disso, as demais normatizações apresentam critérios distintos para avaliação da instrumentação. Contudo, frente a inúmeros fatores e critérios a serem levados em consideração durante a execução de um ensaio, a realização de uma prova de carga estática necessita de grande experiência do responsável técnico. Neste sentido, este trabalho busca contribuir com a comparação de normas e avaliação de uma prova de carga pelos critérios destas normatizações.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho de conclusão de curso visa realizar um análise normativa de um ensaio de prova de carga estática e apresentar um estudo de caso em uma Obra de Arte Especial, a ponte sobre o rio Jacaré (situada na Rodovia Transamazônica, BR-230, Km 447, dentro dos limites municipais da cidade de Pacajá-PA), através de critérios de parada e aceitação das recomendações: brasileira (ABNT NBR 9607, 2019), Espanhola (Ministerio de Fomento, 2009), Americana (ACI 318, 2019), Alemã (DAfStb, 2000), e Tcheca (CSN 73 6209, 1996).

1.2.2 Objetivos específicos

- Comparação das motivações, procedimentos e critérios para as normas de prova de carga nacionais e internacionais;
- Tratar os resultados da prova de carga estática executada na ponte sobre o rio Jacaré;
- Comparar os resultados do ensaio de prova de carga estática em função dos critérios de aceitação normativos nacionais e internacionais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A construção de uma nova estrutura em concreto deve ser projetada para que atinja a segurança, funcionalidade e estética esperada em função dos esforços e influências ambientais que atuam sobre elas durante seu período de vida útil. Nesse âmbito, Lacerda (2015) afirmou ser notável a grande degradação de estruturas por causa de diversas manifestações patológicas, relacionadas ao uso ou ambiente em que estas estão inseridas. No entanto, muitas estruturas existentes, sobre as quais pairam dúvidas no comportamento, podem ser aproveitadas mediante uma avaliação estrutural. Dessa forma, Doebelin (1990) destacava a prova de carga como um tipo experimental de avaliação estrutural, em que se observa o comportamento real sob carga, consistindo no carregamento direto da estrutura, tendo como principal objetivo demonstrar a real capacidade resistente da estrutura.

Nas pontes, Gonçalves *et al.* (1993) avaliou que as provas de carga constituem um importante método de avaliação estrutural, permitindo aos projetistas obter desde informações gerais sobre a envoltória de esforços até informações localizadas sobre o comportamento de um nó ou de um elemento isolado.

2.1 Histórico da prova de carga

No desenvolvimento da construção civil surge a origem da engenharia civil, onde a experimentação por tentativa e erro era de grande importância para o seu surgimento, esta forma de provar que algo funciona como pretendido se mostra como a origem histórica do carregamento de prova. Segundo Lantsoght (2019), os testes de carga são tão antigos quanto a própria humanidade, onde por exemplo, milhões de anos atrás, foram realizados testes a fim de determinar a resistência à tração de uma liana (planta de caule flexível) ou a capacidade de carga de uma árvore caída.

Entretanto, apesar da antiga datação de tais experimentos, Timoshenko (1953) afirmou ter sido Leonardo da Vinci, no século XV, que realizou o primeiro teste de carregamento estrutural documentado com um experimento, de nome “Testando a resistência de barras de ferro de vários comprimentos”.

Com o passar dos anos os métodos de carregamentos para verificação das propriedades mecânicas e técnicas de dimensionamento passam a ser cada vez mais precisas. No século 20 iniciou-se o movimento mundial de normatização, criando ainda mais rigorosidade e padronização baseada nas normalizações de comportamento e de procedimentos de dimensionamento, levando ao estudo de engenharia civil difundida atualmente.

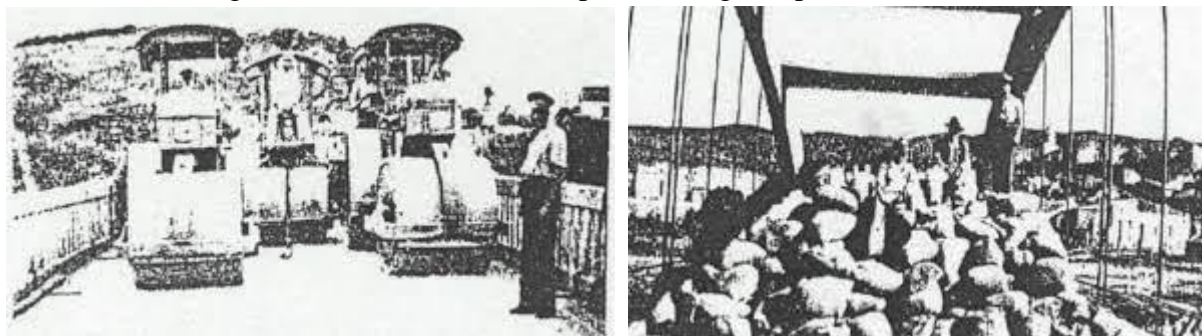
A Quadro 2.1, extraída de Hall e Tsai (1989), discorre sobre o histórico dos testes de carregamentos enfatizando a prática de engenharia empregada e os resultados previstos de acordo com procedimentos analíticos de dimensionamento.

Quadro 2.1 – Histórico dos testes de carga

Período	Prática de engenharia empregada	Teste de carregamento versus cálculos
Antiguidade	Uma arte passada através de experiência de construção para construção	Intuição, erros e acertos. Testes de carregamento e procedimentos de dimensionamento quase inexistentes.
Renascimento	Primeiras tentativas de padronização de testes e procedimentos de dimensionamento (compressão, tração, flexão)	Testes de carregamento utilizados para calibrar modelos teóricos de resistência.
Século XIX	Manuais que davam pequenas informações sobre a resistência dos materiais (elevados coeficientes de incerteza)	Torna-se usual o emprego de procedimentos padrão para testes de carregamento, principalmente destinados à caracterização de materiais. Procedimentos de dimensionamento pouco desenvolvidos.
Início do século XX	Primeiros equipamentos de ensaios para caracterização de materiais. Primeiros códigos de normalização (ASTM).	Grande incremento na utilização de testes de carregamento em elementos estruturais e estruturas. Grande desenvolvimento de procedimentos analíticos de dimensionamento.
Tempos atuais	Uma ciência baseada em normalizações de comportamento resistente de materiais e procedimentos de dimensionamento	Estruturas tipicamente projetadas mediante procedimentos analíticos padronizados. Testes de carregamento especificados e padronizados.

No Brasil, segundo Lacerda (2015), tem-se registro dos primeiros ensaios de provas de carga em pontes, realizados na década de 30, sendo executados em duas pontes rodoviárias com a utilização de rolos compressores e sacos de areia como carga de teste, como mostram as Figuras 2.1.

Figuras 2.1 – Primeiros exemplos de carga de prova no Brasil



a) Rolos compressores sobre ponte

b) Sacos de areia sobre ponte

Fonte: Palazzo (2002)

2.2 Definições da prova de carga

Alampalli *et al.* (2020) define prova de carga como dois tipos: teste de carga de diagnóstico e ensaio de prova de carga. Segundo Garnica *et al.* (2022), teste de carga de diagnóstico é mais comum dentre os tipos de prova de carga. teste de carga de diagnóstico são usadas para medir respostas estruturais sob níveis de carregamento próximos as condições de serviço, essas respostas podem ser interpretadas para obter informações sobre o comportamento da estrutura e desempenho. Schacht *et al.* (2018) classifica o teste de carga de diagnóstico em dois tipos, de longa duração e curta duração. Garnica *et al.* (2022) ainda define que para pontes existentes, testes de carga de diagnóstico são usados para atualizar modelos numéricos e melhor compreensão do comportamento da ponte.

O objetivo do ensaio de curta duração é determinar os deslocamentos e deformações tanto quanto o comportamento estrutural sob carga de serviço, calibração de modelos numéricos e verificação de considerações de análise de estruturas. Este modo de ensaio não considera influências de temperatura, extrapolação da resistência real da estrutura, além de efeitos dinâmicos. Além disso, segundo Olaszek *et al.* (2013), o ensaio pode ser classificado de acordo com três variações de tempo e duração de carregamento: estático (a carga, veículo ou massa é aplicado em uma posição fixa); pseudo-estático (um veículo se move pela ponte em velocidade lenta) e dinâmico (o veículo se move em velocidade máxima).

O ensaio de longa duração é capaz de determinar deformações e deslocamentos intrínsecos a estrutura, como as provocadas por retrações e fluências. Este também consegue avaliar considerações de análise de estruturas, assim como a avaliação de desenvolvimento de danos e a durabilidade da estrutura. O ensaio de longa duração leva em consideração como carregamento apenas o peso próprio da estrutura e as cargas variáveis devido ao seu uso comum diário. Como nesta prova de carga os dados são adquiridos de forma constante e ao longo de um grande intervalo de tempo, o tratamento destes dados não é trivial, devendo ser realizado através de técnicas de *big data*, segundo Schacht *et al.* (2018).

Para Lantsoght *et al.* (2017), o objetivo do ensaio de prova de carga é provar diretamente a capacidade de uma ponte existente de resistir a cargas variáveis ponderadas com fatores de segurança sem sinais de perda de tensão ou comportamento não linear. Para Garnica *et al.* (2022), o carregamento de ensaio de prova de carga é consideravelmente maior que para a prova de carga de diagnóstico e aplicadas em uma posição fixa, como um ensaio de estático. Para Schacht *et al.* (2018) ensaios de prova de carga são divididos em dois tipos, sendo eles: ensaio de prova de carga com carregamento objetivo e com carregamento limite.

Ensaio de prova de carga com carregamento objetivo tem o foco de provar a segurança estrutural sob carregamento previamente definido, sem a ocorrência de deslocamentos críticos. Já o ensaio de prova de carga com carregamento limite tem o foco de determinar a carga máxima em que ocorre os deslocamentos e deformações críticas. Schacht *et al.* (2018) salienta que para o carregamento limite, há perigo de dano irreversível na estrutura. Para esta prova de carga, pode ser perigoso utilizar o carregamento de massa (caminhões, vagões, areia, água, etc.) devido a impossibilidade da interrupção do ensaio em velocidade suficiente para cessar os esforços garantindo a segurança. Segundo Alampalli *et al.* (2020), para estes ensaios onde a aplicação de carga é próxima do carregamento do Estado Limite Último, faz-se necessário um sistema autoportante com vigas de reação, e cargas aplicadas por macacos hidráulicos ancorados próximos a estrutura testada para que os elementos vizinhos não sejam carregados involuntariamente.

Schacht *et al.* (2018) ainda indica um terceiro tipo de prova carga, sendo chamada de prova de carga de ruptura. Esta é utilizada para medir a capacidade estrutural da OAE, sendo útil para a avaliação da segurança estrutural. Bagge *et al.* (2017) também salienta que esse tipo de ensaio pode ser usado para aumentar o conhecimento sobre o real comportamento de um tipo de estrutura e o quanto as normas podem prever a capacidade resistente. Lantsoght *et al.* (2017) diz que esse conhecimento pode aprimorar os critérios de parada em ensaios de prova de carga. Contudo Elfgren *et al.* (2018) afirma que provas de carga de ruptura são mais caras que teste de carga de diagnóstico e ensaio de prova de carga.

Para a realização dos testes de carga são indicados parâmetros de execução pelos códigos normativos de cada país, tais como: situações das quais o teste se mostra obrigatório ou recomendado; o procedimento de realização do ensaio, em que se coloca o tempo e as etapas de carga e descarga; a intensidade do carregamento; os métodos de monitoramento durante a prova; e os critérios de parada e aceitação da estrutura. Os critérios geralmente são definidos com base na deformação, deflexão, rigidez, fissuração máxima e outras respostas que podem ser monitoradas em tempo real durante o teste de carga de prova. Se um destes for excedido, não é permitido carregamentos adicionais, a estrutura é aprovada para o maior nível de carregamento alcançado antes de exceder qualquer critério de parada. Alguns destes parâmetros mostram-se dependentes do tipo de ponte (armada, protendida ou de estrutura mista) e ao tipo de ambiente em que a estrutura está localizada (úmido ou seco). (LANTSOGHT, 2019)

Além disso, Lantsoght (2019) afirma ainda que em alguns países, as diretrizes são aplicáveis apenas a estruturas de um determinado material; por exemplo, as diretrizes alemãs foram originalmente desenvolvidas para testes de prova de carga de edifícios de concreto, e as

diretrizes da norma americana (ACI 318, 2019) são aplicáveis também apenas para este fim, contudo tais normas são consideradas na execução de testes de carga em pontes, uma vez que poucos códigos de ponte lidam em detalhes com o tema.

2.3 Recomendações normativas

Nesta seção serão descritos os principais pontos abordados pelas recomendações normativas, alvo desse estudo. Vale salientar que a ponte sobre o rio Jacaré está localizada em ambiente rural, parcialmente submerso, externo e com umidade relativa do ar acima de 65%, desse modo, apenas os critérios para este tipo de estrutura serão apresentados.

2.3.1 Recomendações brasileiras

A norma brasileira (ABNT NBR 9607, 2019) apresenta requisitos e procedimentos para provas de carga estática em estruturas de concreto. Esta recomenda que provas de carga estáticas devem ser realizadas nas seguintes situações: aceitação de estruturas; alteração das condições de uso da estrutura; fases construtivas que acarretem solicitações excepcionais; após acidentes ou anomalias; falta total ou parcial de elementos de projeto; desconhecimento das condições construtivas; estudo do comportamento da estrutura; uso materiais que não atendam aos requisitos de projeto; ou passagem de conjuntos transportadores de cargas especiais indivisíveis.

Antes da prova de carga propriamente dita, a norma brasileira indica a realização de estudos prévios que determinem critérios de ensaio, tais como: capacidade portante da estrutura; dimensionamento do carregamento; escolha dos efeitos e pontos da estrutura a serem controlados; previsão teórica destes efeitos; tolerâncias dos desvios entre as medidas realizadas e as previsões teóricas; e requisitos de aceitação.

Quanto às medições realizadas durante a prova de carga, a norma indica quais medidas devem ser realizadas para comparar com as previsões teóricas. As medições a serem realizadas são: deslocamentos lineares; rotações; deformações; influência das condições ambientais; e aberturas de fissuras. Vale ressaltar que as medições de deslocamentos lineares e aberturas de fissuras devem respeitar os limites da ABNT NBR 6118 (2014) e não apresenta limites quantitativos em relação a deformações, rotações e influência das condições ambientais, dando a liberdade para o executor do ensaio determinar as tolerâncias da diferença entre o teórico e o experimental.

A carga aplicada durante o ensaio de prova de carga de pontes e viadutos deve ser conforme a Equação 2.1 para pontes novas ou segundo a Equação 2.2 para demais casos. Sendo Q o carregamento gerado devido ao trem-tipo, G_2 as ações permanentes adicionais, previstas ao longo da vida útil da estrutura e F_{obj} a carga aplicada durante a execução do ensaio. A norma indica ainda que as cargas devem ser aferidas durante o ensaio por meio de procedimento que proporcione precisão de $\pm 5\%$ em relação ao previsto no projeto da prova de carga

$$F_{obj} = 0,7 \times Q \quad 2.1$$

$$F_{obj} = 0,78 \times (1,35 \times G_2 + 1,5 \times Q) \quad 2.2$$

Antes do ensaio devem ser medidas o gradiente térmico no ambiente da estrutura, a umidade relativa do ar e a velocidade e direção do vento por um período compatível com o tempo dispendido no ensaio para caracterizar as condições ambientais e avaliar seus efeitos na estrutura. Logo após essa caracterização o carregamento é aplicado em 4 etapas, cada uma com duração até a estabilização dos deslocamentos, sendo o tempo máximo de 15 minutos por etapa. Após a última etapa e a estabilização dos deslocamentos, o carregamento total da prova de carga deve ser mantido por no mínimo 10 min. O descarregamento deve ser realizado em 2 etapas com tempo máximo de 15 min cada. Para a análise dos deslocamentos residuais, a última leitura deve ser realizada 5 minutos após a completa retirada dos carregamentos.

A norma indica critérios para parada do ensaio e imediato descarregamento da estrutura caso sejam observados deslocamentos contínuos, sem estabilização das leituras, ou leituras superiores aos limites aceitáveis. Por fim, a Obra de Arte Especial (OAE) de concreto é considerada aceita pela norma brasileira caso o ensaio seja finalizado sem atingir os critérios de parada, não apresentar deslocamentos verticais nem aberturas de fissuras superiores aos limites da ABNT NBR 6118 (2014), não apresentar deformações ou rotações superiores aos estipulados previamente pelo executor da prova de carga e não apresentar deslocamento residual superior à 5% do deslocamento máximo após 5 min do total descarregamento da OAE.

2.3.2 Recomendações americanas

O ACI 318 (2019) é a norma norte americana para edificações novas em concreto e apresenta recomendações para a prova de carga estática em estruturas de concreto. A recomendação indica a necessidade de prova de carga quando existem dúvidas quanto à segurança de um elemento estrutural ou de toda estrutura. A prova de carga deve ser realizada

em estruturas com pelo menos 56 dias de construção finalizada. A única atividade pré-ensaio determinada pela norma americana é o *As Built* dos elementos estruturais para a confirmação da geometria dos elementos estruturais, posição e diâmetro das barras de aço para confirmação das informações de projeto e se necessário, determinação da resistência do concreto através de extrações de testemunhos.

A monitoração da estrutura deve ser capaz de medir deslocamentos, deformações, deslizamentos e aberturas de fissura na posição onde se espera a máxima intensidade da resposta experimental. Assim como a norma brasileira, a norma americana não apresenta parâmetros quantitativos para a avaliação de alguns parâmetros medidos durante o ensaio, como deformações e deslizamentos.

O carregamento aplicado durante o ensaio deve ser o maior entre as Equações 2.3, 2.4 e 2.5. Onde Q é o carregamento gerado devido ao trem-tipo, G_1 é o peso próprio da estrutura, G_2 são as ações permanentes adicionais, A são carregamentos devido ao acúmulo de água da chuva, N são carregamentos devido ao acúmulo de neve e C é o carregamento devido às cargas da chuva.

$$F_{obj} = 0,3 \times G_1 + 0,3 \times G_2 \quad 2.3$$

$$F_{obj} = 0,1 \times G_2 + 1,6 \times Q + 0,5 \times (A \text{ ou } N \text{ ou } C) \quad 2.4$$

$$F_{obj} = 0,1 \times G_2 + Q + 1,6 \times (A \text{ ou } N \text{ ou } C) \quad 2.5$$

Para o caso de estruturas novas, o ACI 318 (2019) indica o ensaio de prova de carga com carregamento monotônico, o qual consiste em aplicar quatro etapas de carregamento aproximadamente iguais, iniciando pelo menos 1 hora após o início da aquisição de dados. O carregamento máximo deve ser mantido por pelo menos 24 horas após o término da quarta etapa de carregamento e a última leitura deve ser realizada após 24 horas do total descarregamento da estrutura, em caso de não aceitação da estrutura, é permitido que o ensaio seja reiniciado 72 horas após o descarregamento da estrutura.

A estrutura de concreto pode ser considerada aceita caso: não apresente sinais de deslocamento, esmagamento ou qualquer indício de ruptura do concreto; não apresente fissuras que indiquem uma eminente falha por cisalhamento; não apresente fissuras de cisalhamento com projeção horizontal maior que a altura do elemento estrutural para membros sem armadura de cisalhamento; não apresente fissuras devido à falha de ancoragem em região de ancoragens e transpasses de barras; não apresente aberturas de fissura superiores aos limites

da norma ACI 224R-01 (2001); deslocamento máximo durante o ensaio não superior a 1,3 mm ou $l/2000$; e deslocamento residual inferior à 25% do deslocamento máximo, onde l é o vão do elemento estrutural. Caso a estrutura supere os limites de deslocamento vertical máximo e deslocamento residual, é permitido o segundo ensaio e este não pode apresentar um deslocamento residual superior à 20% do deslocamento máximo.

2.3.3 Recomendações espanholas

Os documentos que apresentam as instruções para prova de carga em estruturas de pontes rodoviárias e ferroviárias são: EHE-08 (2010), Ministerio de fomento-direction general de carreteras (1999), Ministerio de fomento (2005), Ministerio de fomento (2009), Ministerio de fomento (2010) e Ministerio de fomento (2012). Estas determinam quais provas de carga estáticas de recebimento de obras novas são obrigatórias para OAEs de vão maior ou igual à 10 m ou 12 m para pontes ferroviárias e rodoviárias, respectivamente. Para vãos inferiores, os responsáveis pela obra ou pela realização do projeto poderão indicar a realização da prova de carga em função das características ou circunstâncias da estrutura. A norma espanhola para estruturas de concreto armado EHE-08 (2010) ainda recomenda a realização da prova de carga quando se tem dúvidas em relação à segurança, funcionalidade ou durabilidade da estrutura.

Segundo a EHE-08 (2010), provas de carga de recebimento dinâmicas são obrigatórias para casos de pontes com passagem de pedestres, áreas de trânsito onde esperasse que as vibrações causem desconforto aos usuários, pontes com vãos superiores à 60 m, projetos incomuns ou utilizados novos materiais, vale ressaltar que o Ministerio de fomento-direction general de carreteras (1999) ainda extrapola estes critérios para pontes de estruturas metálicas ou mistas, além disso, as provas de carga devem acontecer somente depois de atingida a resistência à compressão do concreto de projeto.

Além da prova de carga de recebimento da estrutura, esta última recomendação impõe a realização de prova de carga após ações importantes de ampliação e/ou reabilitação da OAEs em serviço. A Ministerio de fomento (2005) ainda indica obrigatoriedade de provas de carga periódicas para pontes ferroviárias de estruturas metálicas e mistas, já para pontes com ligações arrebitadas e parafusadas o período entre as provas de carga não pode superar 15 anos, e 30 anos para pontes com ligações soldadas.

De modo a evitar grandes estudos prévios, as recomendações espanholas indicam que o projeto de prova de carga deve ser realizado pelos projetistas das OAEs, neste deve conter

informações relativas aos carregamentos, instrumentação, valores teóricos previstos para as medições experimentais e abertura de fissura.

Além das condições ambientais de temperatura e umidade em cima e embaixo do tabuleiro, também deverão ser monitoradas aberturas de fissuras antes, durante e ao fim do teste de carga, além de deslocamentos verticais no meio dos vãos e nas linhas dos apoios, sendo os valores das flechas a diferença entre os dois últimos. Para pontes de estruturas metálicas, estruturas mistas ou estruturas especiais também devem ser previstas a leitura de deformações nas seções críticas.

A quantidade de pontos de medições de flecha varia com o tipo da estrutura. Em caso de tabuleiros apoiados sobre longarinas deve ser adotado o mínimo de 3 pontos de medição, um na longarina central e uma em cada longarina de borda, já para o caso de seções caixão, deve-se utilizar mais de um ponto de modo a monitorar a resposta à torção prevista na estrutura.

A carga aplicada durante o ensaio de prova de carga de pontes e viadutos deve ser mantida dentro dos limites pré-estipulados, como mostra a Equação 2.6. Onde Q é o carregamento gerado devido ao trem-tipo. A norma indica ainda que as cargas devem ser aferidas durante o ensaio, por meio de procedimento que proporcione precisão de $\pm 5\%$ em relação ao previsto no projeto da prova de carga

$$F_{obj} @ 0,6 \times Q \text{ e } 0,7 \times Q \quad 2.6$$

As recomendações apontam que o carregamento deve ser aplicado em no mínimo duas etapas no meio do tabuleiro para casos normais ou aplicada na metade direita ou esquerda para avaliar efeitos da torção em OAEs curvas ou com seção assimétrica. O processo de descarregamento deve ser realizado de forma análoga ao carregamento e com mesmo número de etapas. A menos que determinado pelo projetista da prova de carga, não são necessários adotar critérios de parada ou mesmo esperar a estabilização das leituras entre as etapas de carregamento e descarregamento.

Para a aquisição dos dados dos pontos de monitoramento as normas espanholas estabelecem um critério de estabilização de todos os efeitos monitorados, as leituras serão consideradas estáveis caso os valores da diferença das leituras (10 minutos após a aplicação da carga máxima) e os valores instantâneos (após o término da aplicação de carga) sejam no máximo 5% dos valores instantâneos. Caso as leituras superem o primeiro critério adotado, é permitido a espera de outro período de 10 minutos, a diferença entre as leituras nesse período e os valores das leituras do primeiro intervalo de 10 min não podem superar 20% dos valores da

diferença entre os valores nos intervalos e os instantâneos, de forma semelhante, deve ser avaliado as leituras após a total retirada do carregamento a fim de obter os valores residuais das leituras.

Após o ensaio devem ser avaliadas os deslocamentos residuais da OAE e comparadas com os limites estipulados. Para pontes de concreto armado o deslocamento residual limite é de 20% do deslocamento máximo, 15% para pontes de concreto protendido e estruturas mistas, e 10% para pontes de estruturas metálicas. Caso os deslocamentos residuais sejam maiores que o dobro do deslocamento residual limite então a prova de carga deve ser aceita, caso sejam superiores ao limite, porém menor ou igual ao dobro do limite então a prova de carga deve ser refeita com novos limites para deslocamento residual. Os novos deslocamentos residuais aceitáveis devem ser inferiores à um terço dos deslocamentos residuais obtidos na prova de carga anterior.

Por fim, segundo as recomendações espanholas, a obra de arte especial é considerada aceita caso o ensaio não apresente deslocamentos verticais nem aberturas de fissuras superiores aos limites da EHE-08 (2010), não apresente qualquer sinal de esgotamento ou perda da capacidade portante em nenhuma parte da estrutura e não apresente deslocamentos verticais inferiores à 60% ao previsto teoricamente, nem 15% superiores para pontes de concreto armado ou estruturas mistas ou 10% superiores para pontes de concreto protendido ou estruturas metálicas.

2.3.4 Recomendações alemãs

A recomendação alemã para provas de carga em estruturas de concreto armado é intitulada como DAfStb (2000). Como não foi possível ter acesso ao documento original, o resumo desta norma aqui apresentado foi escrito com base na leitura dos trabalhos de Schacht, Wedel e Marx (2016), Schacht, Bolle e Marx (2018) e Lantsoght (2019). Segundo o anexo nacional alemão a Eurocode 2 (DIN EN 1992-1, 2012), provas de carga devem ser realizadas quando não existirem modelos estruturais suficiente para avaliação da estrutura, avaliação de elementos estruturais produzidos em série e para checar suposições adotadas durante a análise estrutural da construção. A monitoração da estrutura deve ser realizada de modo a obter os dados de deformações na zona comprimida de concreto e na armadura nas seções críticas à flexão, deformações na biela de concreto e nos estribos em seções críticas ao cisalhamento, deslocamentos nos apoios, abertura de fissura e deslocamento verticais.

A intensidade dos carregamentos deve seguir as combinações de carregamento de projeto da ponte, considerando o peso próprio dos elementos estruturais. O teste de prova de carga, segundo as recomendações alemãs podem ser realizados nos três seguintes níveis de avaliação: prova de carga para diagnóstico; prova de carga; e prova de carga até a ruptura. Na prova de carga para diagnóstico são aplicados os carregamentos da combinação de carregamento característicos, sem fatores de segurança, com a finalidade de avaliar a estrutura sob carregamentos de serviço. O objetivo é determinar deslocamentos, deformações assim como o comportamento estrutural da ponte sob carregamentos de serviço, calibração de modelos numéricos, verificação de suposições da análise estrutural e avaliar desenvolvimento de danos e efeitos de durabilidade. conforme a Equação 2.7

$$F_{obj} = 0,35 \times G_2 + 1,5 \times Q_1 + \sum_{i>1} 1,5 \times Y_{0,i} \times Q_i \quad 2.7$$

A prova de carga é utilizada para avaliar a estrutura em situações de projeto, com os carregamentos majorados pelos fatores de segurança. Vale ressaltar que apenas o adicional dos pesos próprios ou de cargas variáveis devem ser considerados com fator de segurança. O objetivo deste ensaio é provar a segurança estrutural sob o determinado carregamento sem ocorrência de deformações críticas. Por fim, a prova de carga até a ruptura é útil para avaliação de segurança estrutural ou controle de qualidade de elementos estruturais ou estruturas.

Na prova de carga de diagnóstico, o carregamento deve ser aplicado em uma etapa correspondente a 10% do carregamento de serviço, depois deve ser aplicado 50% da carga de serviço e em seguida descarregar até 10%, logo em seguida o carregamento deve ser elevado até uma carga intermediária, descarregada e depois seguir três ciclos de carga e descarga com o carregamento de serviço. Na prova de carga onde os carregamentos alcançam os níveis de projeto deve seguir os mesmos procedimentos da prova de diagnóstico acrescentando um ciclo de carga e descarga de um carregamento intermediário entre a carga de serviço e a de projeto, depois um ciclo até a carga de projeto, depois um ciclo na carga de serviço e por fim um ciclo na carga de serviço com duração de 15 minutos na carga máxima.

Ao contrário das demais recomendações, a prática alemã adota apenas critérios de parada do ensaio ao invés de critérios de aceitação. A estrutura será considerada aceita caso nenhuma medição supere os critérios de parada em nenhum ciclo de carregamento. Caso algum critério de parada seja alcançado o ensaio deve ser interrompido e a estrutura imediatamente descarregada. O primeiro critério de parada é relacionado a deformação da superfície do concreto na região comprimida, onde a variação de deformação medida somada com uma estimativa de deformação do concreto devido às cargas permanentes aplicadas da estrutura

antes da prova de carga devem estar entre 0,6 % e 0,8 % para concreto de resistência superior à 25 MPa. O segundo corresponde à deformação nas barras de flexão tracionadas, onde a variação de deformação somada com a deformação estimada nestas barras devido às cargas permanentes aplicadas antes da prova de carga deve ser inferior à 70% da deformação de escoamento da barra. Este limite pode ser substituído por 90% caso se conheça o comportamento tensão-deformação da barra monitorada.

O terceiro critério está relacionado à abertura de fissuras. Fissuras novas não podem apresentar abertura superior a 0,5 mm e fissuras existentes não podem apresentar variação de abertura superior a 0,3 mm. Após a prova de carga, as fissuras existentes não podem apresentar uma abertura residual superior 30% da abertura máxima observada e as existentes não podem apresentar uma abertura residual superior à 20%. O quarto critério é relacionado com o deslocamento vertical no meio do vão. Este critério é associado tanto a observação de um incremento de deslocamento não linear quanto a um deslocamento residual superior a 10% após as retiradas de carregamento. O último critério está relacionado ao cisalhamento do elemento estrutural. A variação de deformação medida na biela comprimida somada com uma estimativa de deformação do concreto, devido às cargas permanentes aplicadas da estrutura antes da prova de carga, devem estar entre 0,36 % e 0,48 %. E a variação de deformação nos estribos somado com a deformação estimada devido às cargas permanentes aplicadas antes da prova de carga deve ser inferior à 35% da deformação de escoamento da barra. Este limite pode ser substituído por 45% caso se conheça o comportamento carga deformação da barra monitorada.

2.3.5 Recomendações tchecas

Assim como a norma alemã, não foi possível ter acesso aos documentos originais da norma CSN 73 6209 (1996), sendo assim as informações a respeito da norma foram obtidas através do trabalho de Frýba e Pirner (2001) e confirmadas em Lantsoght (2019). Estes indicam que a prova de carga estática deva ser obrigatória em qualquer ponte nova com vão superior à 18 m. Antes da prova de carga é necessário medir os deslocamentos verticais dos elementos através de métodos geodésicos.

Durante a prova de carga devem ser monitorados deslocamentos verticais nos pontos onde apresentem maior intensidade, acomodações nos suportes e encurtamento dos apoios. É recomendado também a medição de temperatura do ar e da estrutura, deformações, desenvolvimento de fissuras e estabilidade de elementos comprimidos.

O carregamento deve ser aplicado na maior intensidade possível, não superando os valores de projeto, de modo que os efeitos relativos ao carregamento do ensaio sejam maiores que 50% dos efeitos esperados pelo carregamento de projeto, mas nunca superando os efeitos provocados pelo carregamento esperado em projeto. O carregamento deve ser posicionado de modo que cause a maior intensidade nos pontos de medição. A prova de carga deve iniciar pelo menos 72 horas após a aplicação total do peso próprio para pontes de concreto e após 3 horas para pontes de metálicas. Vale salientar que provas de carga em pontes de concreto só podem ser realizadas após 3 meses da concretagem dos elementos estruturais da ponte.

O carregamento deve durar no mínimo 30 minutos em pontes de concreto e 15 min em pontes de estrutura metálica. As medições devem ser realizadas antes do início do carregamento, imediatamente após o carregamento, 10 minutos após o carregamento total aplicado, imediatamente depois do descarregamento e após um intervalo de 10 minutos do término do descarregamento. Esse procedimento usualmente é realizado duas vezes. Após a prova estática, os efeitos totais na estrutura serão entendidos como uma soma dos efeitos elásticos somados a efeitos permanentes.

Para a aceitação da prova de carga, Frýba e Pirner (2001) apontam 3 critérios para aceitação da estrutura. O primeiro é relacionado aos efeitos elásticos na estrutura, onde a razão entre os valores do efeito elástico e os valores da previsão teórica não podem ser inferiores à 0,6, 0,7 e 0,8 e devem ser menores ou iguais à 1,1, 1,05 e 1,05 para pontes de concreto armado, concreto protendido e estruturas metálicas, respectivamente. O segundo critério está relacionado à abertura de fissuras, onde, as fissuras não podem apresentar abertura superior aos limites normativos durante a prova de carga em pontes de concreto.

O último critério é relacionado aos efeitos permanentes na estrutura. Os efeitos permanentes do primeiro ensaio não podem superar 25% dos efeitos totais medidos na estrutura para estruturas de concreto armado, 20% para concreto protendido e 10% para pontes com estruturas metálicas. Para pontes novas, caso os efeitos residuais superem o critério de aceitação, mas não superiores à 50% para pontes de concreto armado e protendido ou 30% para pontes de estrutura metálica, o ensaio pode ser repetido, mas dessa vez, com valores limites de 12,5% para pontes de concreto armado, 10% para pontes de concreto protendido e 5% para pontes de estrutura metálica. Se ainda assim a prova de carga não atender aos critérios para efeitos residuais, o ensaio pode ser repetido por uma terceira vez com os seguintes critérios de aceitação: 4,16% dos efeitos totais para pontes de concreto armado; 3,33% para pontes de concreto protendido; e 0,83% para pontes de estrutura metálica.

2.4 Instrumentação

Dentre o plano de instrumentação existente no ensaio de prova de carga executado na ponte sobre o rio Jacaré por LIMA NETO et al. (2020), para este trabalho foi utilizado parte desta instrumentação, a fim de concentrar a análise em critérios relevantes para este estudo.

Nesse ensaio foram utilizados transdutores de deslocamento (LVDT's), extensômetros elétricos para concreto, extensômetros elétricos para aço e conjunto de lupa e régua, fissurômetro. Todos os dados dos instrumentos de medição foram captados por um módulo de aquisição de dados, com exceção das informações obtidas por meio dos fissurômetros, cujo registro é feito, manualmente, por um engenheiro especializado.

Foi utilizado um LVDT da marca Kyowa, sendo suas especificações mostradas na Figura 2.2.

Figuras 2.2 – LVDT Kyowa



Fonte: Kyowa, 2022.

Utilizaram-se ainda 2 LVDTs da marca LD Sensor, sendo um LDS50l, com capacidade nominal de 51 mm e um LDS-100, com capacidade nominal de 100 mm, conforme especificado na Tabela 2.1

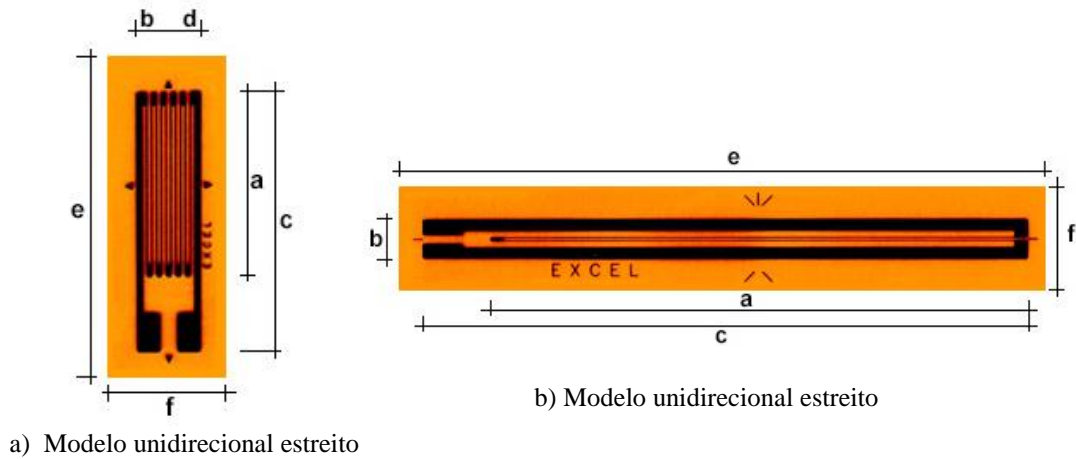
Tabela 2.1 – LVDT Ld Sensor

Faixa de Modelo	Elementos	Tipo do modelo	
Descrição	Unidade	50	100
Deslocamento	mm	51	101
Peso	grama	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: Adaptado de Ld Sensor, 2022.

Para o registro das deformações nos elementos estruturais, foram utilizados extensômetros de resistência elétrica da marca EXCEL Sensores, específicos para cada tipo de material. Para o aço, foram utilizados modelos unidirecionais estreitos (Figura 2.3), enquanto para o concreto foram utilizados modelos unidirecionais estreitos (Figura 2.3b).

Figuras 2.3 – Extensômetros de resistência elétrica



Fonte: Excel Sensores, 2022.

A Tabela 2.2 apresenta as características dos extensômetros elétricos utilizados nestes ensaios.

Tabela 2.2 – Especificação dos extensômetros elétricos utilizados

Identificação					Dimensões						Superfície de colagem
Base metal	Compensação da temperatura	Tamanho e forma	Resistência elétrica	Opção	Espaço da grelha		Espaço da grelha com seus terminais		Espaço da base		
					comprimento (a)	largura (b)	comprimento (c)	largura (d)	comprimento (e)	largura (f)	
PA	06	125 BA	120	L	3mm	1,5mm	4,5mm	1,5mm	8mm	5mm	Aço
PA	06	1500 BA	120	L	40mm	3mm	45mm	3mm	49mm	9mm	Concreto

Fonte: Adaptado de Excel Sensores, 2022.

3. AVALIAÇÃO DAS RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS

Este capítulo apresenta uma comparação entre as normas brasileira (ABNT NBR 9607, 2019), Espanhola (Ministerio de Fomento, 2009), Americana (ACI 318, 2019), Alemã (DAfStb, 2000), e Tcheca (CSN 73 6209, 1996) para prova de carga estática com foco em Obras de Arte Especiais. A avaliação entre as normas será realizada através de comparações de motivação para realização de prova de carga, atividades pré-prova de carga, pontos de monitoração, intensidade e etapas de carregamento, critérios de parada e aceitação.

3.1 Motivações para realização de prova de carga

O Quadro 3.1 apresenta um resumo dos principais motivos para execução de provas de carga em pontes segundo as recomendações estudadas neste trabalho. Dentre estas recomendações, a norma brasileira é a única que não apresenta motivações para a realização de uma prova de carga, apresentando indicações de quando a norma pode ser utilizada, sem a obrigação da execução da prova de carga. Embora as outras recomendações tenham motivações pontuais, a execução de prova de carga é obrigatória quando a obra de arte transcorre em uma dessas motivações. Vale ressaltar que as recomendações brasileiras podem aumentar a segurança de suas obras de arte se tornarem compulsórias algumas de suas motivações.

Quadro 3.1 – Resumo das motivações para realização de provas de carga.

Norma	Motivação
Brasileira	Aceitação de estruturas; Alteração das condições de uso da estrutura; Fases construtivas que acarretem solicitações excepcionais; Após acidentes ou anomalias; Falta total ou parcial de elementos de projeto; Desconhecimento das condições construtivas; Estudo do comportamento da estrutura; Uso materiais que não atendam aos requisitos de projeto; Passagem de conjuntos transportadores de cargas especiais indivisíveis.
Americana	Existência de dúvidas quanto à segurança de elementos estruturais ou toda estrutura.
Espanhola	Aceitação de OAEs com vão \geq a 10 m (OAE ferroviária) ou 12 m (OAE rodoviária); Existência de dúvidas quanto à segurança, funcionalidade ou durabilidade da estrutura; Após ampliações na estrutura; Após reabilitações na estrutura; A cada 15 anos para OAEs metálicas ou mistas com ligação aparafusadas ou rebitadas; A cada 30 anos para OAEs metálicas ou mistas com ligação soldadas.
Alemã	Ausência modelos estruturais suficiente para avaliação da estrutura; Para avaliação de elementos estruturais produzidos em série; Para checar suposições adotadas durante a análise estrutural da construção.
Tcheca	Aceitação de OAEs com vão superior a 18 m.

3.2 Atividades pré-prova de carga

O Quadro 3.2 apresenta um resumo das atividades realizadas antes da execução de provas de carga para todas as normas citadas neste trabalho. É notório que a norma brasileira, é a que apresenta mais atividades antes de uma execução de prova de carga, sendo a mais detalhada dentre as recomendações em relação aos estudos prévios tanto para obras de arte em que se conhecem os projetos originais quanto para obras de arte com ausência dos projetos. Vale salientar que a incorporação de poucas atividades como: *As Built*, ensaios de pacometria e caracterização dos materiais nas seções críticas, conforme indicado pela norma americana, poderia aumentar a precisão das análises estruturais.

Quadro 3.2 – Resumo das atividades realizadas antes das provas de carga.

Norma	Atividades
Brasileira	<p>Análise dos projetos originais</p> <p>Inspeção da estrutura com foco em detecção de anomalias em: vinculações, aparelhos de apoio, restrições, sinais de deterioração dos materiais, fissuração, deformações e movimentações de juntas ou recalques;</p> <p>Determinar capacidade portante da estrutura;</p> <p>Dimensionamento do carregamento;</p> <p>Escolha dos efeitos e pontos da estrutura a serem controlados;</p> <p>Previsão teórica destes efeitos;</p> <p>Determinar tolerâncias dos desvios entre as medidas realizadas e as previsões teóricas;</p> <p>E requisitos de aceitação.</p> <p>Na falta ausência dos projetos originais, a ABNT NBR 9607 (2019) ainda recomenda:</p> <p><i>As built</i> das formas, vinculações e juntas;</p> <p>Identificação da função original da estrutura;</p> <p>Determinar intensidade e frequência das cargas atuantes;</p> <p>Determinar a idade da estrutura;</p> <p>Identificação das normas vigentes;</p> <p>Análise de obras similares da mesma época;</p> <p>Determinar a resistência à compressão e modulo de elasticidade do concreto através de extração de testemunho;</p> <p>Avaliar a homogeneidade do concreto através de ensaios de esclerometria ou ultrassom;</p> <p>Ensaio de Pacometria;</p> <p>E avaliação da conservação da estrutura através da inspeção.</p>
Americana	<p><i>As built</i> das seções críticas de todos os elementos estruturais;</p> <p>Realização de ensaios de Pacometria das seções críticas;</p> <p>Extração de testemunhos para determinar a resistência à compressão do concreto.</p>
Espanhola	<p>Determinar posição e intensidade dos carregamentos;</p> <p>Determinar valores teóricos para as medições experimentais;</p> <p>Determinar o modulo de elasticidade do concreto através de extração de testemunhos.</p>
Alemã	Não há detalhes sobre isso nos trabalhos estudados.
Tcheca	<p>Determinar como será aplicado o carregamento e sua distribuição;</p> <p>Determinar os pontos de medição;</p> <p>Medir os deslocamentos verticais dos elementos através de métodos geodésicos.</p>

3.3 Pontos de monitoração

O Quadro 3.3 apresenta o resumo de pontos monitorados por cada norma deste trabalho, é possível perceber que os principais critérios analisados foram “deslocamentos lineares no vão” e “abertura de fissuras”, abordados por todas as normas. Os critérios menos abordados foram “velocidade e direção do vento”, “rotações”, “deformações na diagonal comprimida”, “deformações nos estribos”, “deslizamentos” e “estabilidade em elementos comprimidos”.

Quadro 3.3 – Resumo dos pontos necessários para a monitoração

Medições	Brasileira	Americana	Espanhola	Alemã	Tcheca
Temperatura	X		X ¹		X ²
Umidade	X		X		
Velocidade e direção do vento	X				
Deslocamentos lineares no vão	X	X	X ³	X	X
Deslocamentos nos apoios			X		X
Rotações	X				
Deformações na face comprimida	X	X	X ⁴		X
Deformações nas barras tracionadas	X	X	X ⁴		X
Deformações na diagonal comprimida				X	
Deformações nos estribos				X	
Deslizamentos		X			
Abertura de fissuras	X	X	X	X	X
Estabilidade em elementos comprimidos					X

¹ Temperatura e umidade devem ser medidas em cima e embaixo do tabuleiro.

² Temperatura do ar e da estrutura.

³ Os deslocamentos devem ser monitorados no mínimo nas longarinas das extremidades e na centra em pontes de tabuleiro apoiados em longarinas. Em pontes de vigas caixão, os deslocamentos devem ser medidos em vários pontos da seção.

⁴ As deformações nas seções críticas são medidas em pontes de estrutura metálicas, mistas e materiais novos.

3.4 Intensidade e etapas de carregamento

A Tabela 3.1 apresenta as intensidades de carregamento, número de etapas de carregamento e descarregamento além do número de repetições da prova de carga conforme as normas estudadas. Vale ressaltar que na intensidade de carregamento está apresentado apenas o carregamento que deve ser adicionado além do peso próprio (G_1) e todos os demais carregamentos permanentes (G_2).

Tabela 3.1 – Resumo dos procedimentos de aplicação de carga nas pontes

Norma	Intensidade	Nº de etapas de carregamento	Nº de etapas de descarregamento	Nº de repetições
Brasileira	$0,7 \times Q$ para OAEs novas	4	2	1*
	$1,17 \times Q$ para demais casos			
Americana	Maior valor entre: $0,3 \times G_1 + 0,3 \times G_2$;	4	1	1*
	$0,1 \times G_2 + 1,6 \times Q + 0,5 \times (A \text{ ou } N \text{ ou } C)$; $0,1 \times G_2 + Q + 1,6 \times (A \text{ ou } N \text{ ou } C)$.			
Espanhola	@ $0,6 \times Q$ £ $0,7 \times Q$	≥ 2	≥ 2	1*
Alemã	$0,35 \times G_2 + 1,5 \times Q_1 + \sum_{i>1} 1,5 \times Y_{0,i} \times Q_i$	***	***	***
Tcheca	$Y_{0,i} = 0,4 \dots 0,8$ conforme o DIN EC2	1	1	1**
	Entre $> 0,5 \times Q_e$ £ $1 \times Q$			

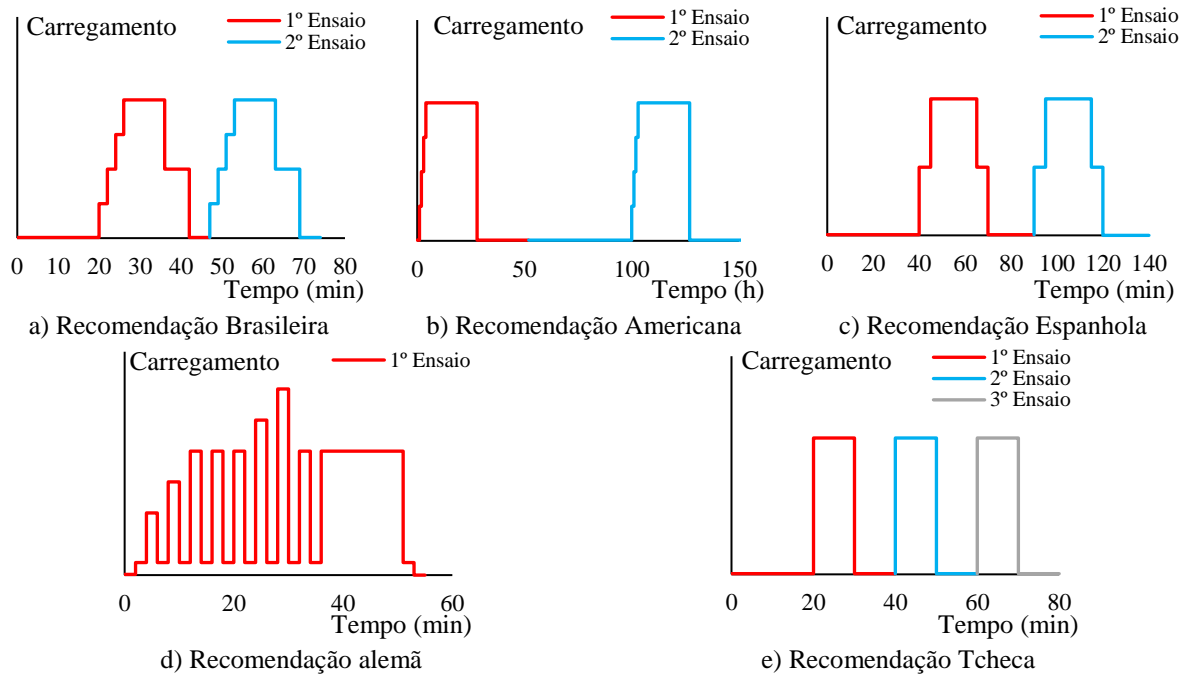
* o procedimento deve ser repetido mais uma vez caso as leituras residuais superem valores admissíveis

** o procedimento pode ser repetido até duas vezes se as leituras residuais superem valores admissíveis

*** o procedimento de carregamento e descarregamento não pode ser simplificado, ver Figura 3.1

Em relação a intensidade do carregamento, a ABNT NBR 9607 (2019) apresenta valores percentuais da carga do Estado Limite de Serviço (ELS) assim como as recomendações espanhola e tcheca. Ademais, a divisão em 4 etapas aplicada no Brasil mostra-se bem coerente ao aplicado pelos outros países, exceto à utilizada pela República Tcheca, de apenas 1 etapa, o que ocasiona um risco maior ao procedimento. As recomendações alemãs consideram uma intensidade de carregamento semelhante às cargas de projeto avaliando o Estado Limite Último (ELU) da estrutura. Esse nível de carregamento só pode ser alcançado devido às suas complexas etapas de aplicação de carregamento e devido a sua forma de aplicação de carga, executada com estruturas de reação e carregamento controlado por macaco hidráulico, o que parece distante de ser aplicado em OAEs brasileiras. Assim como as recomendações alemãs, as recomendações americanas apresentam combinações de carga próximas aos carregamentos no ELU para estruturas novas, porém com um tempo de permanência de carregamento elevado. A Figura 3.1 ilustra as etapas de carregamento, descarregamento e o número de repetições.

Figura 3.1 – Ilustrações dos procedimentos de aplicação de carga nas pontes

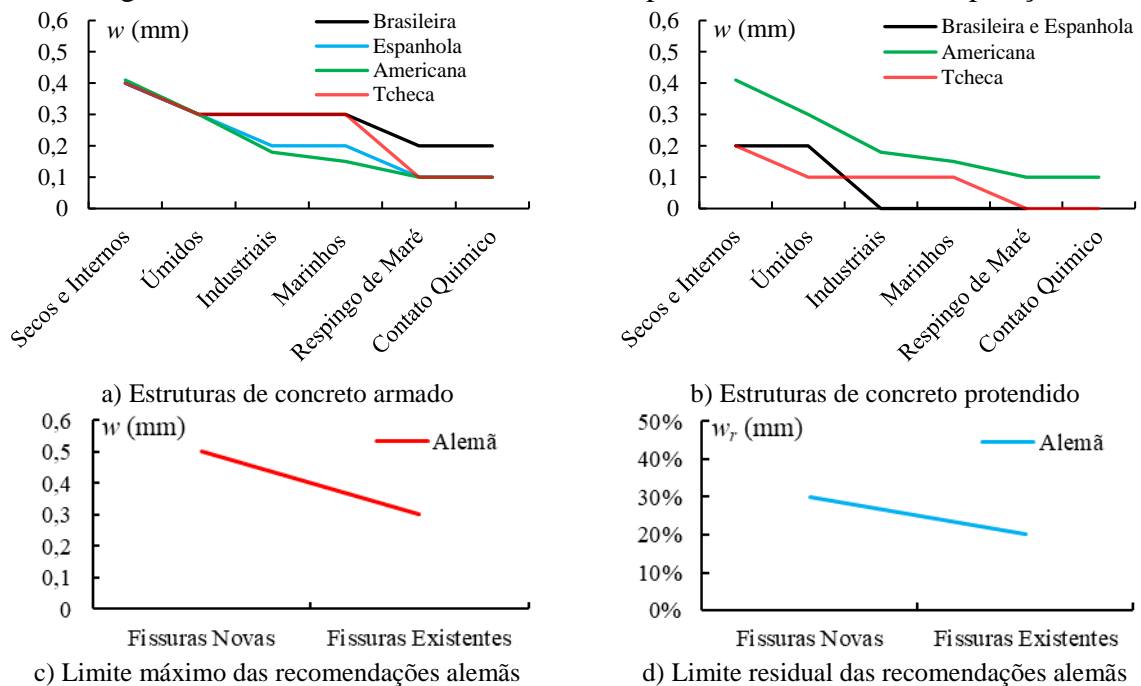


3.5 Critérios de parada e aceitação

3.5.1 Abertura de fissuras

A Figura 3.2 apresenta os limites de abertura de fissura para cada ambiente de exposição, é possível notar que as normas determinam seus critérios em função de estruturas executadas em concreto armado ou concreto protendido, além disso, a norma DAfStb (2000) define limites de abertura de fissura também em função de estruturas novas e existentes.

Figura 3.2 – Limites de abertura de fissura para cada ambiente de exposição



3.5.2 Deformações

A Tabela 3.2 apresenta os critérios de aceitação para deformações máximas para as normas espanhola, alemã e tcheca, dentre elas, a norma espanhola dita seus critérios apenas para estruturas metálicas, abdicando de deformações em estruturas de concreto. A norma brasileira e a norma americana, aconselham o acompanhamento de deformações, contudo, não apresentam critérios de aceitação para estes.

Tabela 3.2 – Resumo dos critérios de aceitação para deformações máximas.

Tipo de OAE	Espanhola	Alemã	Tcheca
Deformações na armadura tracionada	X	$De_s < 0,7 \times e_{ys} - e_{s0}$; ou $De_s < 0,9 \times e_{ys} - e_{s0}$ caso se conheça o comportamento tensão deformação da barra	$0,6 \times e_{s,calc} < e_{s,máx} < 1,1 \times e_{s,calc}$ para concreto armado e $0,7 \times e_{s,calc} < e_{s,máx} < 1,05 \times e_{s,calc}$ para concreto protendido
Deformações na face comprimida do concreto	X	$De_c < e_{c,lim} - e_{c0}$; onde $e_{c,lim} = 0,6\%$ para $f_{ck} < 25\text{MPa}$ $e_{c,lim} = 0,8\%$ para $f_{ck} > 25\text{MPa}$	$0,6 \times e_{c,calc} < e_{c,máx} < 1,1 \times e_{c,calc}$ para concreto armado e $0,7 \times e_{c,calc} < e_{c,máx} < 1,05 \times e_{c,calc}$ para concreto protendido
Deformações nos estribos	X	$De_{sw} < 0,35 \times e_{ysw} - e_{sw0}$; ou $De_{sw} < 0,45 \times e_{ysw} - e_{sw0}$ caso se conheça o comportamento tensão deformação da barra	X
Deformações diagonal de concreto	X	$De_{cw,lim} = 0,36\%$ para $f_{ck} < 25\text{MPa}$ $De_{cw,lim} = 0,48\%$ para $f_{ck} > 25\text{MPa}$	X
Deformações em longarinas metálicas	$6 \times e_{calc} < e_{máx} < 1,1 \times e_{calc}$	X	$0,8 \times e_{calc} < e_{máx} < 1,05 \times e_{calc}$

3.5.3 Deslocamentos máximos

A Tabela 3.3 apresenta o resumo dos critérios de aceitação para deslocamentos máximos para as recomendações normativas. Foram utilizadas as recomendações americanas para estrutura de concreto armado e concreto protendido, em que não são apresentados critérios específicos para OAEs de estruturas metálicas e estruturas mistas. Nota-se que as recomendações brasileiras e americanas aplicam critérios de projeto para avaliar o deslocamento máximo, o que mostra incompatibilidade com os carregamentos próximos ao

Estado de Limite Último das recomendações americanas. Em contraste, as recomendações tchecas e espanholas não se limitam apenas a critérios fixos de deslocamento máximo em função do Estado Limite de Serviço apresentando intervalos em função da previsão teórica. As recomendações alemãs não apresentam critérios de deslocamento máximo devido a prova de carga ser realizada em função do estado de limite último.

Tabela 3.3 – Resumo dos critérios de aceitação para deslocamento vertical máximo.

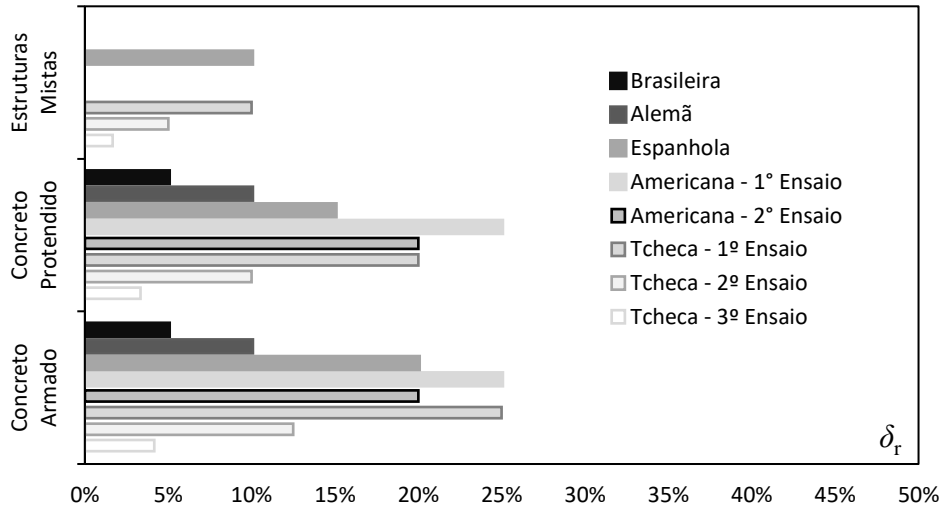
Tipo de OAE	Brasileira	Americana	Espanhola	Tcheca
Concreto armado	$d_{m\acute{a}x} \text{ £ } l/350$	$d_{m\acute{a}x} \text{ £ } l/2000$ ou $d_{m\acute{a}x} \text{ £ } 1,3mm$	$d_{m\acute{a}x} \text{ £ } l^2 / (20000 \times h)$ ou $0,6 \times d_{calc} < d_{m\acute{a}x} < 1,15 \times d_{calc}$	$0,6 \times d_{calc} < d_{m\acute{a}x} < 1,1 \times d_{calc}$
Concreto protendido	$d_{m\acute{a}x} \text{ £ } l/350$	$d_{m\acute{a}x} \text{ £ } l/2000$ Ou $d_{m\acute{a}x} \text{ £ } 1,3mm$	$0,6 \times d_{calc} < d_{m\acute{a}x} < 1,1 \times d_{calc}$	$0,7 \times d_{calc} < d_{m\acute{a}x} < 1,05 \times d_{calc}$
Estruturas mistas	$d_{m\acute{a}x} \text{ £ } l/800$ ou $d_{m\acute{a}x} \text{ £ } l/1000$ para pontes com passeio	X	$0,6 \times d_{calc} < d_{m\acute{a}x} < 1,15 \times d_{calc}$	$0,8 \times d_{calc} < d_{m\acute{a}x} < 1,05 \times d_{calc}$
Estruturas metálicas	$d_{m\acute{a}x} \text{ £ } l/800$ ou $d_{m\acute{a}x} \text{ £ } l/1000$ para pontes com passeio	X	$0,6 \times d_{calc} < d_{m\acute{a}x} < 1,1 \times d_{calc}$	$0,8 \times d_{calc} < d_{m\acute{a}x} < 1,05 \times d_{calc}$

3.5.4 Deslocamentos residuais

A Figura 3.3 apresenta os critérios normativos para deslocamentos residuais variados por tipos de ponte (estruturas mistas, concreto armado e concreto protendido). As recomendações existentes no parâmetro para estruturas metálicas são equivalentes às estruturas mistas. As recomendações americanas e tcheca apresentam possibilidade de reteste em casos de não-aceitação com critérios mais rigorosos.

É notório que a norma brasileira apresenta o menor deslocamento residual máximo permitido (5%), sendo três vezes menor que a média das demais orientações normativas (16%), se mostrando a mais rigorosa entre as demais.

Figura 3.3 – Deslocamentos residuais permitidos



3.6 Resumo dos critérios

3.6.1 Abertura de fissuras

Todas as normas apresentam limitações de aberturas de fissuras em função da classe de agressividade ambiental, com exceção das recomendações alemãs, que apresentam limites de abertura de fissuras máximos para fissuras novas e variações de aberturas de fissuras máximas para fissuras existentes. Além disso, também aplicam critérios para abertura de fissura residual após a prova de carga. As recomendações americanas determinam os limites de abertura de fissura a partir da ACI 224R-01 (2001), mas o ACI 318 (2019) ainda impõe outros critérios de aceitação baseados na fissuração, como: não apresentar lascamento ou esmagamento do concreto; não apresentar fissuras devido a falhas de ancoragem; e não exibir fissuras de cisalhamento. A Tabela 3.4 apresenta os limites de abertura de fissura das normas utilizadas neste trabalho.

Tabela 3.4 – Limites de abertura de fissura para as normas de prova de carga

Norma	Classe de agressividade ambiental	Limite de fissuração (w_k)	
Brasileira	CAA I	$w_k \leq 0,4$ mm	
Espanhola	IIa	$w_k \leq 0,3$ mm	
Americana	<i>Humidity, moist air, soil</i> *	$w_k \leq 0,3$ mm	
	Durante prova de carga	$w_k \leq 0,5$ mm	Fissuras novas
Alemã	Após prova de carga	$\Delta w_k \leq 0,3$ mm	Fissuras existentes
		$\leq 0,3 * w_k$	Fissuras novas
		$\leq 0,2 * \Delta w_k$	Fissuras Existentes
Tcheca	<i>Humid</i>	$w_k \leq 0,3$ mm	

3.6.2 Deformações

A Tabela 3.5 apresenta os resumos dos critérios de aceitação relacionados a deformações na armadura tracionada, deformações na face comprimida do concreto, deformações nos estribos e deformações diagonal de concreto. As recomendações brasileiras e americanas recomendam o monitoramento da deformação durante provas de carga, contudo não definem critérios objetivos para aceitação de estruturas, deixando para o responsável pela prova de carga a definição de critérios de aceitação em função do nível de deformação.

Tabela 3.5 – Critérios de aceitação relacionados às deformações

Tipo de OAE	Alemã	Tcheca
Deformações na armadura tracionada	$D_e < 0,7 \times e_{ys} - e_{s0}; \text{ ou}$ $D_e < 0,9 \times e_{ys} - e_{s0}$ caso se conheça o comportamento tensão deformação da barra	$0,6 \times D_{e,s,calc} < D_{e,s,el} < 1,1 \times D_{e,s,calc}$ $D_{e,s,el} = D_e - D_{e,s,r}$ para concreto armado
Deformações na face comprimida do concreto	$D_e < e_{c,lim} - e_{c0}$ $e_{c,lim} = 0,6\% \text{ @ } f_{ck} < 25\text{MPa}$ $e_{c,lim} = 0,8\% \text{ @ } f_{ck} > 25\text{MPa}$ $D_{sw} < 0,5 \times (0,7 \times e_{ys} - e_{s0}); \text{ ou}$ $D_{sw} < 0,5 \times (0,9 \times e_{ys} - e_{s0})$ caso se conheça o comportamento tensão deformação da barra	$0,6 \times D_{e,c,calc} < D_{e,c,el} < 1,1 \times D_{e,c,calc}$ $D_{e,c,el} = D_e - D_{e,c,r}$
Deformações nos estribos	Onde \mathcal{E}_{ys} e \mathcal{E}_{s0} são as deformações na barra tracionada de flexão	-
Deformações diagonal de concreto	$D_{cw} < 0,6 \times (e_{c,lim} - e_{c0})$ Onde $\mathcal{E}_{c,lim}$ e \mathcal{E}_{c0} são as deformações na superfície comprimida	-

3.6.3 Deslocamentos verticais

A Tabela 3.6 apresenta o resumo dos critérios de aceitação para deslocamentos máximos para as recomendações normativas. Vale salientar que como os carregamentos das recomendações americanas são próximas dos Estado de Limite Último, logo seus valores de limites para deslocamento máximos são limites diferentes das limitações do Estado Limite de Serviço. As recomendações alemãs não apresentam critérios de deslocamento máximo devido a prova de carga ser realizada em função do estado de limite último. As recomendações tchecas e espanholas não se limitam apenas a critérios fixos de deslocamento máximo em função do Estado Limite de Serviço. Estas recomendações apresentam intervalos em função da previsão teórica. Para o limite de deslocamento máximo da recomendação brasileira foi adotado 1/600,

utilizado para evitar efeitos estruturais em serviço considerando apenas os carregamentos após a construção do piso, segundo a ABNT NBR 6118 (2014).

Tabela 3.6 – Resumo dos critérios de aceitação para deslocamento vertical máximo.

Tipo de OAE	Brasileira	Americana	Espanhola	Tcheca
Concreto armado	$Dl_{máx} \leq l / 600$	$d_{máx} \leq l / 2000$ ou $Dl_{máx} \leq 1,3mm$	$d_{máx} \leq l^2 / (20000 \times h)$ ou $0,6 \times d_{calc} < d_{máx} < 1,15 \times d_{calc}$	$0,6 \times d_{calc} < d_{el} < 1,1 \times d_{calc}$ $d_{el} = d_{máx} - d_r$

A Tabela 3.7 apresenta os critérios para deslocamentos residuais segundo as recomendações normativas abordadas. As recomendações americanas e tcheca apresentam possibilidade de repetição de prova de carga em casos de não-aceitação do ensaio anterior, contudo, com critérios mais rigorosos. O critério adotado para as recomendações americanas é a redução de 5% para o segundo ensaio, já para as orientações tchecas, é nítido uma redução gradativa do padrão de aceitação, começando com 25%, no segundo ensaio 12,5% metade do valor anterior, e no terceiro ensaio sendo 1/3 do critério anterior (4,2%). É notório que a norma brasileira apresenta o menor deslocamento residual máximo permitido (5%), sendo três vezes menor que a média das demais orientações normativas (16 %), se mostrando a mais rigorosa entre as demais.

Tabela 3.7 – Resumo dos critérios de aceitação para deslocamento residuais

Norma	Etapa	Deslocamento residual (%)
Brasileira	Etapa única	$d_r \leq 0,05 \times d_{máx}$
Alemã	Etapa única	$d_r \leq 0,10 \times d_{máx}$
Espanhola	Etapa única	$d_r \leq 0,20 \times d_{máx}$
Americana	1º Ensaio	$d_r \leq 0,25 \times d_{máx}$
Americana	2º Ensaio	$d_r \leq 0,20 \times d_{máx}$
Tcheca	1º Ensaio	$d_r \leq 0,25 \times d_{máx}$
Tcheca	2º Ensaio	$d_r \leq 0,125 \times d_{máx}$
Tcheca	3º Ensaio	$d_r \leq 0,042 \times d_{máx}$

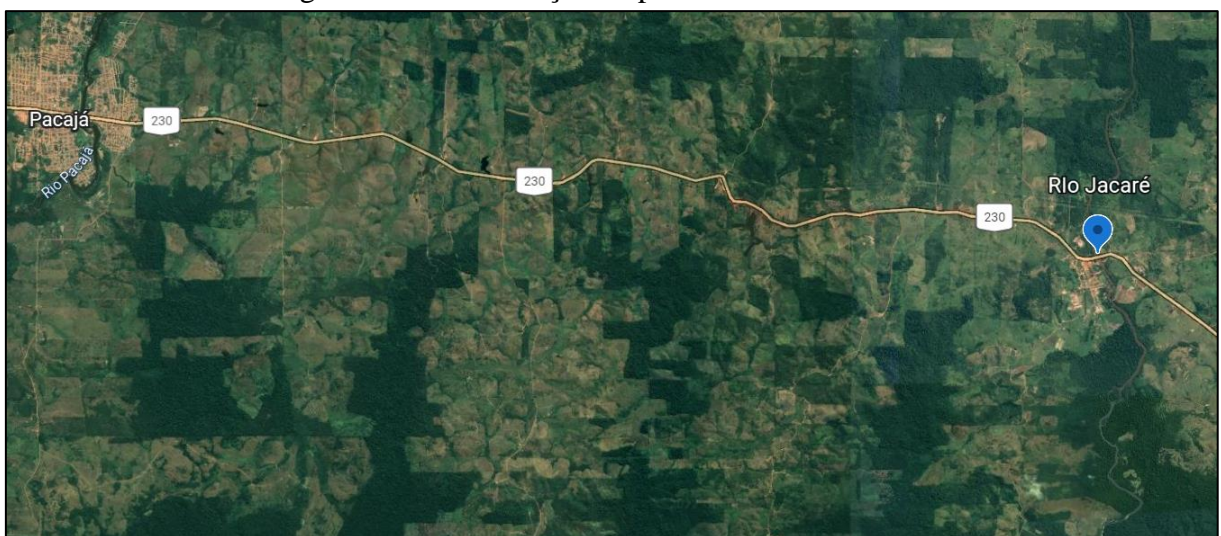
4. PROVA DE CARGA NA PONTE SOBRE O RIO JACARÉ

Este capítulo apresenta um ensaio de prova de carga estática de uma série de provas de carga estáticas e dinâmicas realizadas em sete Obras de Arte Especiais (OAEs) realizadas pelo Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia (NDAE) da Universidade Federal do Pará (UFPA-Tucuruí), Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e a empresa de engenharia Arteleste Construções em parceria com os grupos de pesquisa Núcleo de Modelagem Estrutural Aplicada (NUMEA) e Núcleo de Instrumentação e Computação Aplicada a Engenharia (NICAE). O ensaio apresentado neste capítulo é um dos trabalhos que compõe o relatório da prova de carga da ponte sobre o rio Jacaré (LIMA NETO *et al.*, 2020).

4.1 Localização da ponte

A ponte foi construída para permitir o fluxo de veículos rodoviários sobre o rio Jacaré, está situada em uma região caracterizada por temperaturas médias elevadas, sendo acima dos 30 °C, com pequenas variações de amplitudes térmicas, umidade do ar elevada e chuvas abundantes no período de outubro a abril predominantemente. Situada na altura do quilômetro 447 da Rodovia BR230/PA em direção à cidade de Altamira, é abrangida pelo município de Pacajá e fica distante cerca de 30 km da sua sede. A Figura 4.1 mostra a localização da ponte sobre o rio Jacaré.

Figura 4.1 – Localização da ponte sobre o rio Jacaré



Fonte: Adaptado de Google Earth, 2022

A Ponte sobre o Rio Jacaré é uma obra de arte especial executada em concreto armado, com comprimento total de aproximadamente 41 m, tendo dois vãos simétricos de

aproximadamente 20 metros cada. As extremidades, onde se situam os encontros com a rodovia, possuem largura de 12,8 m; e, suas arestas, destinadas ao acostamento, possuem guarda-corpos com base de 40 cm cada. A Figura 4.2 apresenta imagem aérea da ponte

Figura 4.2 – Imagem aérea da ponte sobre o rio Jacaré

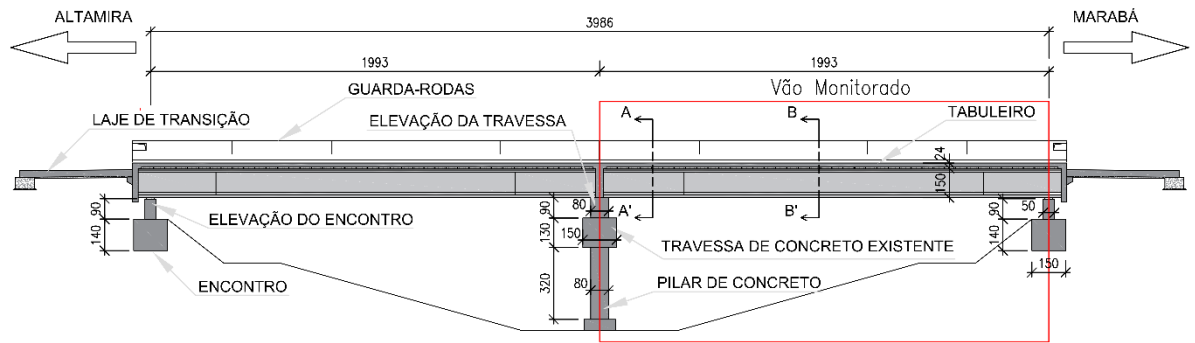


Fonte: Lima Neto *et al.*, 2020

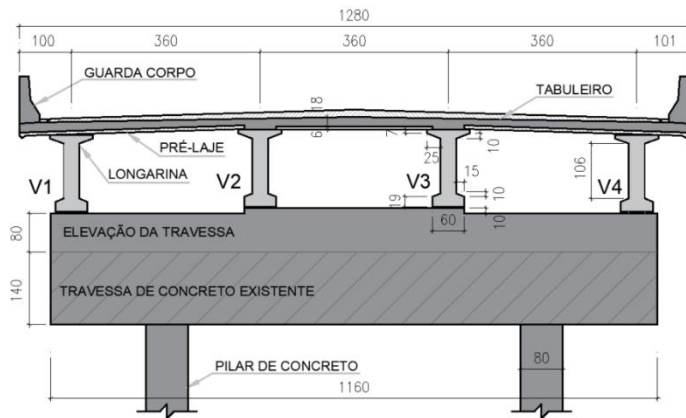
4.2 Geometria da ponte

A ponte sobre o rio Jacaré apresenta uma estrutura totalmente em concreto armado composta por 4 longarinas, 1 travessa, 2 encontros e 2 pilares, que a divide em dois vãos de mesma dimensão, conferindo simetria à estrutura. A ligação das longarinas e seus respectivos apoios foi através de elastômero fretado. Dentre as longarinas, duas se posicionam na borda da estrutura (V1 e V4) e duas internas (V2 e V3). Vale ressaltar que as longarinas recebem um incremento de seção nos pontos de apoio. As longarinas têm sua seção executada em dois estágios de concretagem distintos. Em um primeiro estágio de concretagem, as longarinas foram projetadas para serem executadas com uma seção “I” com 1,50 m de altura. Em um segundo momento, o restante da seção foi executado de forma monolítica com a laje de tabuleiro. A continuidade dos estribos ajuda a garantir o comportamento monolítico entre os concretos de diferentes idades. A Figura 4.3 apresenta as características geométricas e detalhamento dos elementos de interesse da ponte sobre o rio Jacaré.

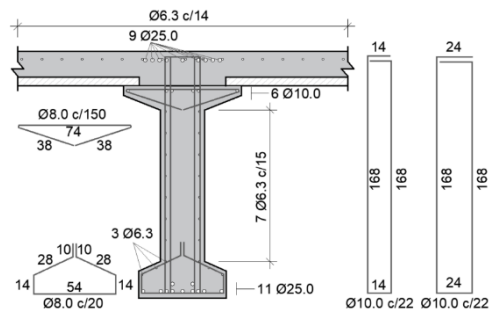
Figura 4.3 – Características geométricas e detalhamento dos elementos



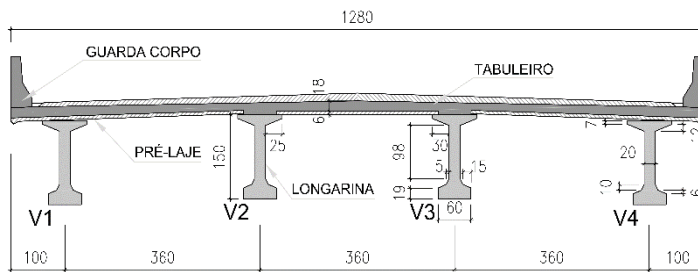
a) Perfil longitudinal da ponte sobre o rio Jacaré



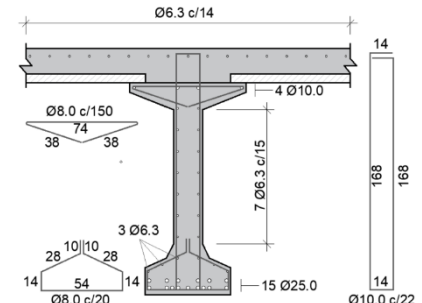
b) Corte transversal A-A'



c) Detalhamento da V2 no corte A-A'



d) Corte transversal B-B'



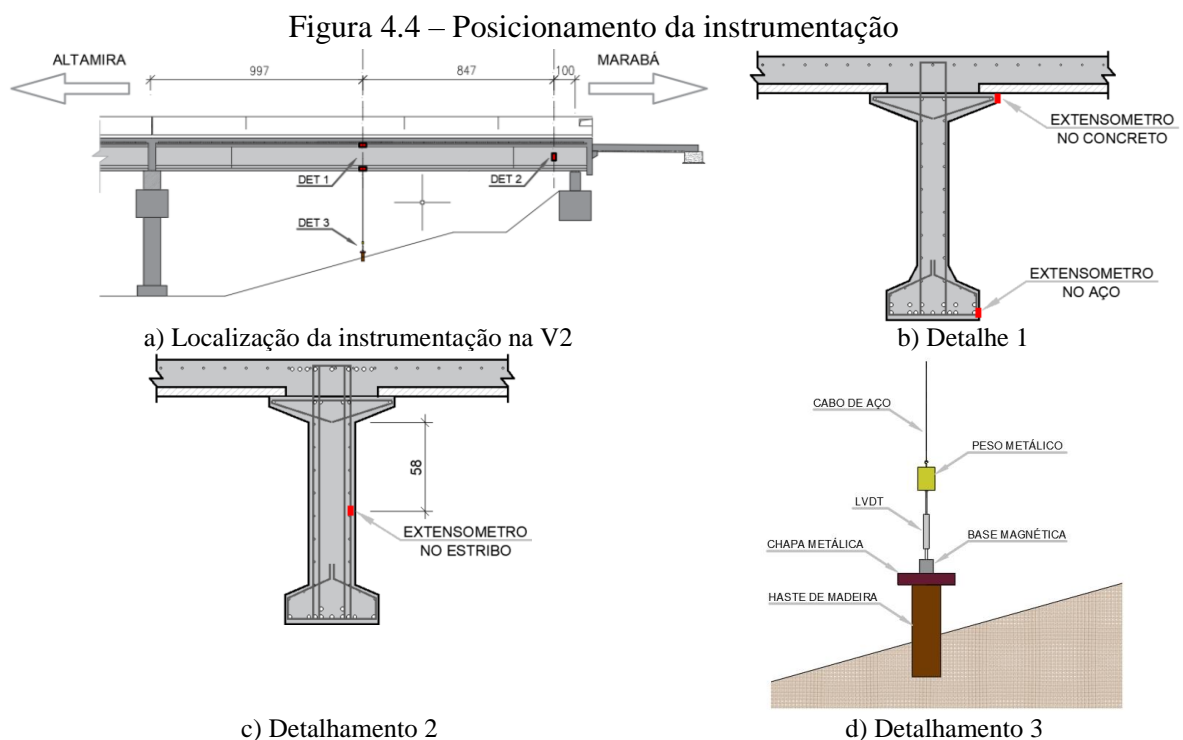
e) Detalhamento da V2 no corte B-B'

4.3 Instrumentação

Durante o ensaio estático foram monitorados as deformações e deslocamentos verticais na longarina central (V2). A Figura 4.4 apresenta o posicionamento da instrumentação durante a prova de carga. Os deslocamentos verticais foram monitorados através de transdutores de deslocamentos (LVDT's) posicionados embaixo do cento do vão da viga V2. O sistema para monitoramento de deslocamentos verticais utilizado contou com um cabo de aço fixo a um ganho atarraxado a ponte em uma extremidade e na outra ponta um LVDT sob um peso metálico fixo ao cabo. O LVDT foi posicionado sobre uma base magnética apoiada em uma chapa de

aço sobre um piquete de madeira engastado no solo para garantir que o único deslocamento medido tenha sido em função da deflexão da longarina.

Além disso, foram medidas deformações na superfície do concreto e na armadura de flexão tracionada no centro do vão da V2. As deformações na superfície do concreto foram medidas através de extensômetros elétricos de resistência posicionados na face lateral da mesa superior do perfil I. As deformações na barra tracionada foram monitoradas por um extensômetro colado na barra de aço por meio de uma abertura realizada na mesma seção transversal que se mediram as deformações na superfície do concreto.



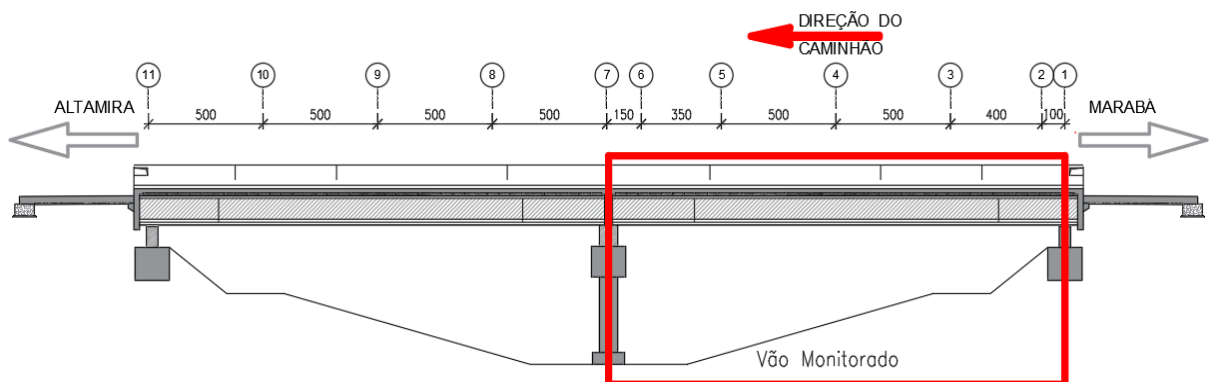
As deformações nos estribos foram monitoradas por um extensômetro colado na barra de aço por meio de uma abertura realizada na seção transversal posicionada a um metro de distância do primeiro apoio da ponte no sentido Marabá para Altamira. Durante o ensaio, também foram monitoradas as aberturas de fissuras na fissura de flexão com maior abertura inicial no centro do vão e na fissura de cisalhamento próximo ao mesmo apoio onde foram posicionados o extensômetro no estribo. As aberturas de fissuras foram medidas através de régua fissurômetros com as leituras sendo realizadas após a estabilização da fissura em cada ponto de parada do caminhão.

4.4 Sistema de ensaio da prova de carga

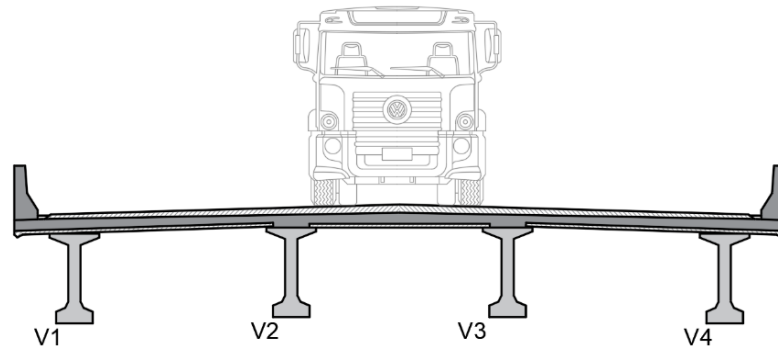
A Figura 4.5 ilustra os pontos monitorados e suas respectivas distâncias, assim como a posição do caminhão na seção transversal da ponte. O ensaio estático consistiu em posicionar o caminhão carregado com aproximadamente 33 toneladas, carga equivalente a 73% da projetada, em pontos específicos pré-determinados, sobre a ponte, servindo como carregamento estático ao longo de seu comprimento.

A Figura 4.5b mostra o caminhão posicionado durante a realização do ensaio estático e seu comprovante de pesagem. Os pontos de posicionamento do carregamento foram determinados conforme os vãos da ponte, sendo eles: pontos de apoio da ponte, $1/2 \cdot L$ e $1/4 \cdot L$ dos vãos não monitorados, e, no vão monitorado adotou-se as seções onde se tinham instrumentos de medição posicionados. Os pontos foram nomeados de P1 a P11, no sentido adotado de realização, sentido de Marabá para Altamira. Estes pontos representam a posição do ponto médio entre os eixos traseiros do caminhão. A Figura 4.5a ilustra os pontos monitorados e suas respectivas distâncias, assim como sua seção transversal com a posição do caminhão em cada ensaio realizado.

Figura 4.5 – Detalhes da execução da prova de carga



a) Pontos de parada do caminhão durante a prova de carga



b) Posicionamento do caminhão na seção transversal

Foram realizados 3 ensaios de prova de carga estática, sendo eles denominados em: Ensaio 01: caminhão percorreu todos os pontos, no sentido Marabá para Altamira, na faixa da contra mão, solicitando as longarinas monitoradas pelos instrumentos de medição; Ensaio 02: caminhão percorreu todos os pontos, no sentido Marabá para Altamira no centro da ponte, solicitando as longarinas centrais da ponte; Ensaio 03: caminhão percorreu todos os pontos, no sentido Marabá para Altamira, em sua pista de mão; lado este que não estava sendo monitorado pela extensometria.

Neste trabalho, foi adotado para estudo o Ensaio 02. Isso se deve ao fato de que nesta situação encontram-se esforços mais acentuados, além disso, levou-se em consideração a simetria proposta por este ensaio.

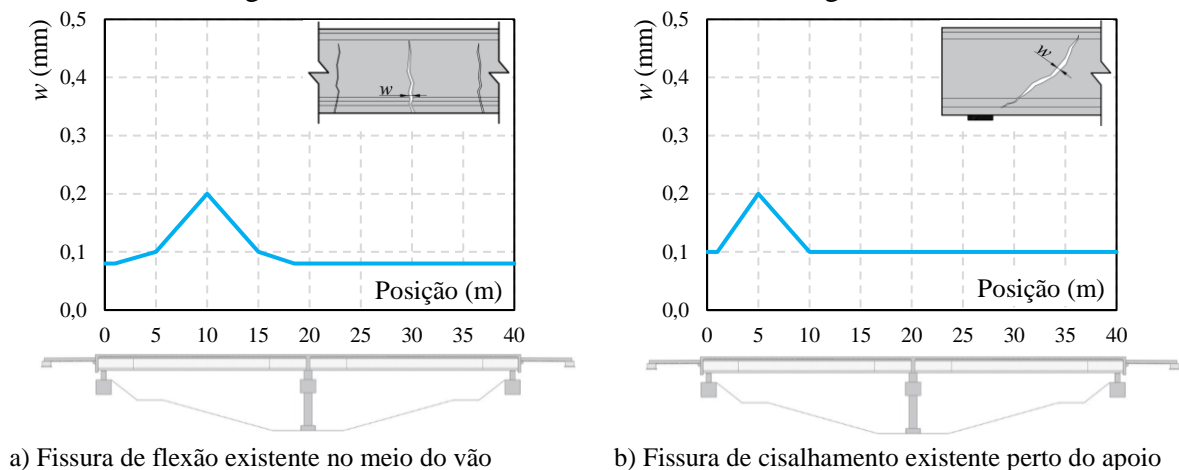
5. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados alguns resultados do ensaio descritas no Capítulo 4 e que fazem parte do relatório técnico de Lima Neto *et al.* (2020). Dentre os resultados apresentados, temos: os deslocamentos verticais, abertura de fissuras, deformação no estribo, deformação na barra de flexão e deformação na superfície do concreto na longarina.

5.1 Aberturas de fissuras

Antes da realização da prova de carga foi possível observar fissuras existentes tanto de cisalhamento quanto de flexão, porém não foi observada a formação de novas fissuras nos elementos estruturais da OAE durante a execução da prova de carga. As leituras experimentais a seguir demonstram que nenhuma fissura monitorada apresentou abertura superior ao limite estabelecido pela norma brasileira, que é de 4,0 mm para estruturas de concreto armado localizadas em Classe de Agressividade Ambiental I. A Figura 5.1 demonstra os resultados experimentais obtidos com o teste de carga realizado na ponte sobre o rio Jacaré onde as aberturas de fissuras se mantiveram em no máximo 0,2 mm, com uma variação de 0,1 mm.

Figura 5.1 – Abertura de fissura de flexão na viga de centro

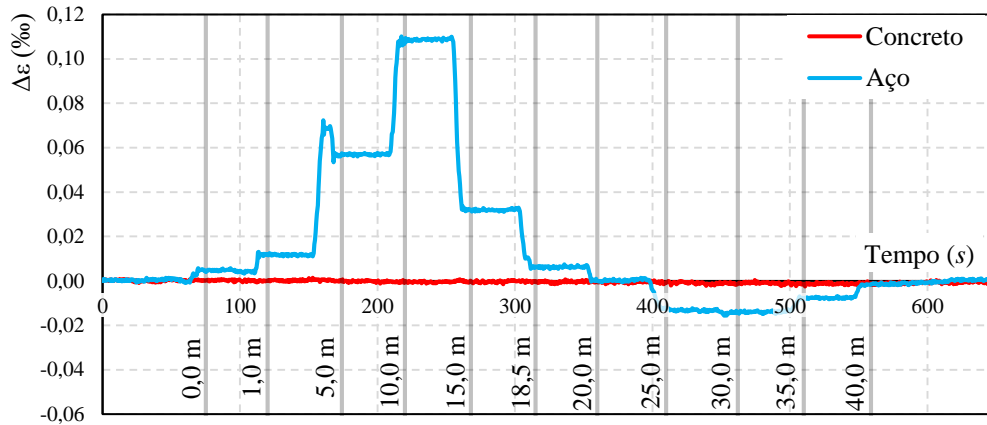


5.2 Deformações

A Figura 5.2 apresenta as variações de deformações medidas tanto no concreto, quanto na armadura da longarina, medidas no centro da viga interna. As variações de deformações no concreto foram próximas a zero na viga interna. Em relação as variações de deformação no aço,

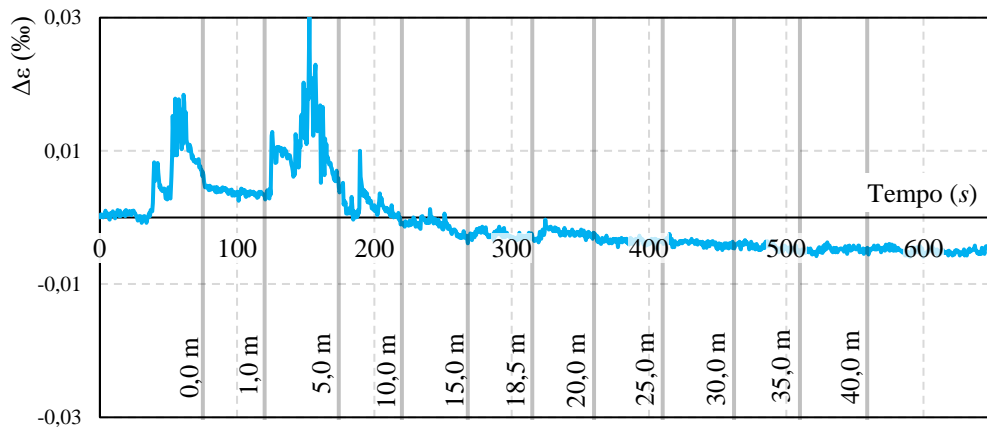
estas foram mais intensas que no concreto, chegando a valores máximos de 0,11‰, ambas ao meio do vão (Posição 4).

Figura 5.2 – Deformação na armadura da longarina e superfície do concreto



A Figura 5.3 apresenta as deformações medidas no estribo da longarina, próximo ao apoio da viga interna. A variação máxima foi obtida quando o caminhão estava situado próxima ao apoio, visto que essa posição causa maior esforço cortante na longarina. Vale ressaltar que as variações de deformações nos estribos chegaram ao valor máximo de 0,03‰ no centro da longarina.

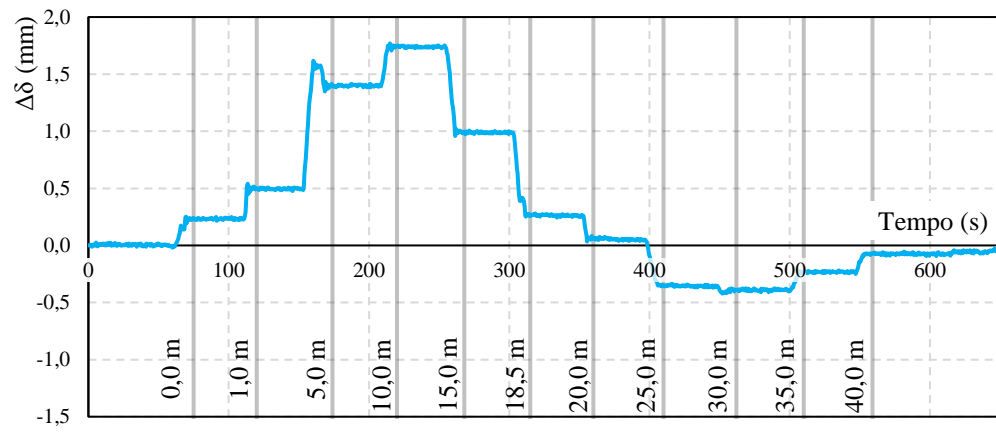
Figura 5.3. Deformação no estribo



5.3 Deslocamentos verticais

A Figura 5.4 apresenta os deslocamentos verticais para uma longarina central com medição no centro da viga. Os valores máximos (1,68 mm) foram obtidos quando o caminhão se posicionava no meio do vão da viga. Após a total retirada do carregamento e a estabilização de resultados, o deslocamento residual apresentado foi de 3,57%.

Figura 5.4. Deslocamentos verticais



6. AVALIAÇÃO NORMATIVA DA PROVA DE CARGA

Este capítulo apresentará uma avaliação da prova de carga executada na ponte sobre o rio Jacaré, apresentada nos Capítulos 4 e 5 deste trabalho. A prova de carga foi avaliada pelos critérios encontrados nas normatizações brasileiras, americanas, espanholas, alemãs e tchecas. Os critérios de aceitação das diversas normas foram adotados para o estudo mesmo levando em consideração a diferença dos processos iniciais de cada uma, como: intensidade de carregamento, número de etapas de carregamento e descarregamento, instante de aquisição de dados, tempo de permanência do carregamento e número de repetições do ensaio.

6.1 Abertura de fissuras

A Tabela 6.1 apresenta o resultado das avaliações segundo as recomendações normativas para aberturas de fissuras. Na coluna “Tipo” da Tabela 6.1, as fissuras são classificadas em “Flexão” ou “Cisalhamento”, as quais indicam fissuras no meio do vão e próximo ao apoio, respectivamente. Para as recomendações brasileiras, espanholas, americanas e tchecas, tanto as fissuras de flexão quanto as fissuras de cisalhamento apresentaram aberturas de fissuras máximas (w_k) inferiores ao limite normativo ($w_{k.lim}$).

Para as recomendações alemãs, a fissuração é avaliada tanto em função da variação máxima de abertura de fissura (Δw_k) quanto em função da variação residual ($\Delta w_{k.res}$). Os valores de Δw_k e $w_{k.lim}$ observados na ponte sobre o rio Jacaré mantiveram se dentro dos limites estipulados pelas recomendações alemãs. Em relação a abertura de fissuras a estrutura da ponte sobre o rio Jacaré foi considerada aceita por todas as recomendações normativas.

Tabela 6.1 – Resumo da avaliação normativa em função das aberturas de fissuras

Normas	Tipo	w_k	$w_{k.lim}$	$w_k / w_{k.lim}$	Status
Brasileira	Flexão	0,20 mm	$w_k \leq 0,40$ mm	0,50	Aceito
	Cisalhamento	0,20 mm		0,50	Aceito
Espanhola	Flexão	0,20 mm	$w_k \leq 0,30$ mm	0,66	Aceito
	Cisalhamento	0,20 mm		0,66	Aceito
Americana	Flexão	0,20 mm	$w_k \leq 0,30$ mm	0,66	Aceito
	Cisalhamento	0,20 mm		0,66	Aceito
Tcheca	Flexão	0,20 mm	$w_k \leq 0,30$ mm	0,66	Aceito
	Cisalhamento	0,20 mm		0,66	Aceito

Normas	Tipo	Δw_k	$\Delta w_{k.res}$	$\Delta w_{k.lim}$	$\Delta w_{k.res.lim}$	$\frac{\Delta w_k}{\Delta w_{k.lim}}$	$\frac{\Delta w_k}{\Delta w_{k.res.lim}}$	Status
Alemã	Flexão	0,12 mm	0,00 mm	0,30	0,024 mm	0,40	0,00	Aceito
	Cisalhamento	0,10 mm	0,00 mm	0,30	0,020 mm	0,33	0,00	Aceito

6.2 Deformações

Nas avaliações de deformações na barras de aço e na superfície do concreto apresentadas nas Tabelas 6.2 e 6.3, as deformações teóricas devido ao peso próprio ($\mathcal{E}_{s0.teo}$ e $\mathcal{E}_{c0.teo}$) e a estimativa de variação de deformação ($\Delta\mathcal{E}_{s.teo}$ e $\Delta\mathcal{E}_{c.teo}$) foram retiradas do relatório de prova de carga Lima Neto *et al.* (2020), onde foram estimadas através do software de análise não-linear de seções Response-2000 com os momentos solicitantes na longarina obtidos em modelos computacionais do software SAP2000, com o carregamento devido ao caminhão posicionado no centro do vão.

A Tabela 6.2 apresenta a avaliação normativa em função da deformação na longarina central. Para as recomendações alemãs a estrutura da ponte sobre o rio Jacaré pode ser considerada aceita pois as deformações observadas foram aproximadamente 10% da variação de deformação limite, o que caracteriza uma aprovação com folga, o que pode ser explicado levando-se em consideração que os carregamentos desta recomendação são pensados para o ELU. Por outro lado, as recomendações tchecas levam em consideração as deformações teóricas e apresentam limites inferiores e superiores de variação de deformação. O que torna não aceito o modelo teórico, devido a deformação observada ser menor que a deformação teórica, dessa forma, não respeitando o limite inferior da norma tcheca.

Tabela 6.2 – Resumo da avaliação normativa em função da deformação na longarina central

Normas	$\Delta\mathcal{E}_s$	$\mathcal{E}_{s0.teo}$	$\Delta\mathcal{E}_{s.lim}$		$\Delta\mathcal{E}_s / \Delta\mathcal{E}_{s.lim}$	Status
Alemã	0,11 ‰	0,56 ‰	1,11 ‰		0,099	Aceito
Normas	$\Delta\mathcal{E}_s$	$\Delta\mathcal{E}_{s.teo}$	$\Delta\mathcal{E}_{s.lim}$	$\Delta\mathcal{E}_{s,r}$	Limites	Status
Tcheca	0,11 ‰	0,27 ‰	$\Delta\mathcal{E}_{s.lim.inf} = 0,16 \text{ ‰}$	0,00 ‰	$\Delta\mathcal{E}_{s.lim.inf} / \Delta\mathcal{E}_s$	1,455
			$\Delta\mathcal{E}_{s.lim.sup} = 0,30 \text{ ‰}$	0,00 ‰	$\Delta\mathcal{E}_s / \Delta\mathcal{E}_{s.lim.sup}$	0,367

A Tabela 6.3 apresenta a avaliação normativa em função da deformação na superfície do concreto na mesa superior. Para as recomendações alemãs a ponte sobre o rio Jacaré pode ser considerada aceita pois as deformações observadas foram aproximadamente 0,2% da variação de deformação limite, aceitando a estrutura também com folga. Por outro lado, as recomendações tchecas apresentam limites inferiores e superiores de variação de deformação. Desse modo, devido a deformação teórica ser novamente maior que a deformação real, o modelo teórico não foi aceito, pois esta condição não respeita o limite inferior normativo.

Tabela 6.3 – Resumo da avaliação normativa em função da face comprimida do concreto

Normas	$\Delta\mathcal{E}_c$	$\mathcal{E}_{c,teo}$	$\Delta\mathcal{E}_{c,lim}$	$\Delta\mathcal{E}_c / \Delta\mathcal{E}_{c,lim}$	Status		
Alemã	-0,00133 ‰	-0,13 ‰	-0,67 ‰	0,002	Aceito		
Normas	$\Delta\mathcal{E}_c$	$\Delta\mathcal{E}_{c,teo}$	$\Delta\mathcal{E}_{c,lim}$	$\Delta\mathcal{E}_{c,r}$	Limites	Status	
Tcheca	-0,00133 ‰	-0,01034 ‰	$\Delta\mathcal{E}_{c,lim,inf} = -0,006 ‰$	0,00 ‰	$\Delta\mathcal{E}_{c,lim,inf} / \Delta\mathcal{E}_{c,el}$	2,25	Não
			$\Delta\mathcal{E}_{c,lim,sup} = -0,011 ‰$	0,00 ‰	$\Delta\mathcal{E}_{c,el} / \Delta\mathcal{E}_{c,lim,sup}$	0,94	Aceito

A Tabela 6.4 apresenta a avaliação normativa em função da deformação nos estribos. A norma alemã é a única que apresenta parâmetros para a avaliação das deformações relacionadas ao cisalhamento. Apesar da norma avaliar deformações tanto nos estribos quanto na diagonal comprimida de concreto, a última análise não foi realizada neste trabalho. As deformações apresentaram 5% do valor limite estipulado pela norma, caracterizando a aceitação da prova de carga com base nesse critério.

Tabela 6.4 – Avaliação normativa em função da deformação nos estribos

Normas	$\Delta\mathcal{E}_{sw}$	$\Delta\mathcal{E}_{sw,lim}$	$\Delta\mathcal{E}_{sw} / \Delta\mathcal{E}_{sw,lim}$	Status
Alemã	0,03 ‰	0,55 ‰	0,0545	Aceito

Vale ressaltar que as deformações limites da norma alemã são usuais para combinações de carregamento próximos ao Estado Limite Último, já o carregamento utilizado nesta prova de carga foi com intensidade compatível com o Estado Limite de Serviço, conforme orienta a ABNT NBR 9607 (2019). Além disto, salienta-se que tanto os limites inferiores e superiores da recomendação tcheca são dependentes da estimativa de deformação teórica, o que exige muita experiência do engenheiro responsável. Neste estudo não foram avaliados os estribos devido a dependência de estimativas teóricas que não foram realizadas. Em relação a compressão diametral, não foram posicionados extensômetros para monitorar esta deformação durante a prova de carga.

6.3 Deslocamentos verticais

Os deslocamentos máximos e residuais foram obtidos através de medições no centro da longarina. A Tabela 6.5 apresenta a avaliação normativa em função dos deslocamentos máximos. A norma alemã não apresenta critério em função do deslocamento vertical máximo pois apresenta recomendações para intensidade de carregamento próximos ao Estado Limite Último. O deslocamento máximo foi na ordem de 25% superior as limitações normativas americana, espanhola e tcheca, sendo assim, esta ponte não foi aceita devido a este critério. A única recomendação que aceitou esta ponte com base no critério de deslocamentos verticais

máximo foram as recomendações brasileiras, com 5% do deslocamento permitido. Vale ressaltar que os deslocamentos limites das recomendações brasileiras gerou resultados discrepantes quando comparado às demais recomendações, levando a resultados 25 vezes maiores que a média das demais recomendações. Além disso, a norma americana teve um limite de deformação máxima bem menor que o esperado, visto que seus carregamentos são pensados para o ELU, o que pode caracterizar que as estruturas americanas são mais rígidas que estruturas brasileiras.

Tabela 6.5 – Resumo da avaliação normativa em função dos deslocamentos máximos

Norma	$\Delta\delta_{\text{máx.teo}}$	$\delta_{\text{máx}}$	$\Delta\delta_{\text{máx.lim}}$	$\Delta\delta_{\text{máx}} / \Delta\delta_{\text{máx.lim}}$	Status
Brasileira	1,21 mm	1,68	33,21 mm	0,05	Aceito
Americana	1,21 mm	1,68	1,30 mm	1,29	Não Aceito
Norma	$\Delta\delta_{\text{máx.teo}}$	$\delta_{\text{máx}}$	$\Delta\delta_{\text{máx.lim}}$	Limites	Status
Espanhola	1,21 mm	1,68	$\Delta\delta_{\text{máx.lim.inf}} = 0,73$ mm	$\Delta\delta_{\text{máx.lim.inf}} / \Delta\delta_{\text{máx.teo}}$	0,60
			$\Delta\delta_{\text{máx.lim.sup}} = 1,39$ mm	$\delta_{\text{máx}} / \Delta\delta_{\text{máx.lim.sup}}$	1,21
Tcheca	1,21 mm	1,68	$\Delta\delta_{\text{máx.lim.inf}} = 0,73$ mm	$\Delta\delta_{\text{máx.lim.inf}} / \Delta\delta_{\text{máx.teo}}$	0,60
			$\Delta\delta_{\text{máx.lim.sup}} = 1,33$ mm	$\delta_{\text{máx}} / \Delta\delta_{\text{máx.lim.sup}}$	1,26

A Tabela 6.6 apresenta a avaliação normativa em função dos deslocamentos residuais. Em contrapartida, por mais que a norma brasileira apresente o maior limite de deslocamentos verticais máximos, esta apresenta o critério mais rígido dentre as demais recomendações normativas. Diferente dos deslocamentos verticais máximos, todas as recomendações normativas aprovaram a ponte sobre o rio Jacaré em função do critério para deslocamentos residuais. A razão entre deslocamento residual (δ_r) observado e deslocamento residual limite ($\Delta\delta_r.lim$) foi de 71% para a recomendação brasileira e na ordem de 16% para as demais.

Tabela 6.6 – Resumo da avaliação normativa em função dos deslocamentos residuais

Norma	δ_r	$\Delta\delta_{\text{máx}}$	$\Delta\delta_r.lim$	$\Delta\delta_r / \Delta\delta_r.lim$	Status
Brasileira	0,06 mm	1,68 mm	0,084 mm	0,71	Aceito
Alemã	0,06 mm	1,68 mm	0,336 mm	0,18	Aceito
Espanhola	0,06 mm	1,68 mm	0,336 mm	0,18	Aceito
Americana	0,06 mm	1,68 mm	0,420 mm	0,14	Aceito
Tcheca	0,06 mm	1,68 mm	0,420 mm	0,14	Aceito

7. CONCLUSÃO

Provas de carga são recomendadas em situações em que se tem questionamentos em relação ao desempenho estrutural de uma obra, além de ser o mais eficaz em ocorrência de eventos inesperados para quais a estrutura não estava projetada. Essa análise experimental permite avaliar o comportamento da estrutura em serviço e decisões a serem tomadas em eventuais medidas de reparo. Estas são realizadas por meio de medição e controle de efeitos causados pela aplicação de esforços externos de intensidade e natureza previamente estabelecidas.

Para este trabalho, foi realizado a comparação entre as motivações, procedimentos e critérios de aceitação e parada para ensaio de prova de carga estática das normas nacionais e internacionais. Além disso, foi realizado um ensaio de prova de carga estática na ponte sobre o rio Jacaré. Os resultados deste ensaio foram tratados e comparados em função dos critérios de aceitação das recomendações: brasileira (ABNT NBR 9607, 2019), espanhola (EHE-08:2010), americana (ACI 318:2019), alemã (DAfStb:2000) e tcheca (CSN 73 6209:1996).

Notou-se que, embora as recomendações brasileiras sejam mais detalhadas que as demais, não há obrigatoriedade nas motivações que levam à realização obrigatória de provas de carga. Quanto às atividades realizadas antes da prova de carga, a norma brasileira apresenta tópicos mais detalhados que as demais recomendações. No entanto, tendo como base as recomendações americanas, há ainda uma possibilidade de aperfeiçoamento da norma brasileira incorporando a norma, atividades como: *As Built* das seções críticas de todos os elementos estruturais; ensaios de pacometria das seções críticas; e caracterização dos materiais nas seções críticas, mesmo na presença dos projetos originais.

Em relação a intensidade do carregamento, a ABNT NBR 9607 (2019) apresenta valores percentuais da carga do Estado Limite de Serviço (ELS) assim como as recomendações espanhola e tcheca. As recomendações alemã e americana apresentam intensidade de carregamento próximo ao Estado Limite Último (ELU) da estrutura. A segurança destes ensaios é garantida devido ao alto grau de complexidade dos ciclos de aplicação de carregamento ou tempo de execução do ensaio, o que se mostra distante do aplicado em Obras de Arte Especiais (OAEs) brasileiras. Ademais, a divisão em 4 etapas aplicada no Brasil mostra-se bem coerente ao aplicado pelos outros países, exceto à utilizada pela República Tcheca, de apenas 1 etapa, o que ocasiona um risco maior ao procedimento.

Nos critérios de parada e aceitação, o parâmetro brasileiro para abertura de fissura mostrou-se próxima as demais normas, divergindo apenas da norma alemã, que é estabelecida

em função de aberturas de fissuras máximas e variação da abertura de fissuras residuais após retirada de carregamento. Para as deformações na seção crítica, a norma brasileira não apresenta critérios de aceitação, apenas aconselham o acompanhamento de deformações e determina que tais critérios sejam determinados pelos responsáveis pela prova de carga, o que aumenta o grau de incerteza da avaliação. Em relação a deslocamentos máximos observados durante a prova de carga, as recomendações brasileiras e americanas aplicam limites de projeto enquanto as recomendações tchecas e espanholas apresentam intervalos em função da previsão teórica. Sobre os deslocamentos residuais, a norma brasileira apresenta o menor deslocamento residual máximo permitido (5%), sendo três vezes menor que a média das demais orientações normativas (16 %), se mostrando a mais rigorosa dentre às recomendações estudadas.

Os resultados observados, com relação a abertura de fissuras, demonstram a aceitação da ponte sobre o rio Jacaré por todas as recomendações normativas. Contudo, para as avaliações de deformações na longarina e na face comprimida do concreto, a estrutura foi considerada aceita para as recomendações alemãs apresentando 10% e 0,2% da variação de deformação limite, respectivamente. Contudo, a estrutura foi não aceita pelas recomendações tchecas devido a variação de deformação observada ser menor que o limite mínimo normativo em ambos os critérios de avaliação.

Para o deslocamento máximo, as limitações normativas americana, espanhola e tcheca foram ultrapassadas cerca de 25%, não estando, portanto, aceita neste critério. Apenas a norma brasileira aceitou a estrutura, apresentando resultados discrepantes quando comparado às demais recomendações (25 vezes maiores que a média das demais). Já nos deslocamentos residuais, apesar de todas as recomendações aprovarem a ponte, vê-se uma maior rigorosidade da norma brasileira, uma vez que a razão entre deslocamento residual (δ_r) observado e deslocamento residual limite ($\Delta\delta_{r,lim}$) ser na ordem de 16% para as normas internacionais, e 71% para a recomendação brasileira (cerca de 4 vezes maior).

REFERÊNCIAS

ALAMPALLI, S., FRANGOPOL, D. M., GRIMSON, J., HALLING, M. W., KOSNIK, D. E., LANTSOGHT, E. O. L., YANG, D., and ZHOU, Y. E. **Bridge Load Testing: State-of-the-Practice**. American Society of Civil Engineers. 2020.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI Committee 318. **Building Code Requirements for Structural Concrete** (ACI 318-19). Farmington Hills, Michigan, 2019.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI Committee 224. **Control of Cracking in Concrete Structures** (ACI 224R-01). 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto-procedimento**. ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9607: **Prova de carga em estruturas de concreto armado e protendido – Requisitos e procedimentos**. 3 ed. 2019. 22p

BAGGE, N., POPESCU, C. and ELFGREN, L. **Failure tests on concrete bridges: Have we learnt the lessons?** Structure and infrastructure engineering. 2017.

CSN 73 6209: **Load Testing of Bridges (Em tcheco)**. Czech Republic, Prague. 1996

DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON DAFSTB-Guideline: **Load tests on concrete structures (Em alemão)**. 2000

DOEBELIN, E. O. **Measurement Systems — Applications and Design**. 4th Edition, McGraw-Hill, Inc. New York, 1990.

ELFGREN, L., TALJSTEN, B., BLANKSVARD, T., SAS, G., NILIMAA, J., BAGGE, N., TU, Y., PUURULA, A., HAGGSTROM, J. e PAULSSON, B. **Load testing used for quality control of bridges**. quality specifications for roadway bridges, standardization at a european level. 2018.

EHE-08: **Code on Structural concrete – articles and annexes**. Espanha, 2010.

Eurocode 2 für Deutschland: **DIN EN 1992-1-1** Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken-Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau mit Nationalem Anhang Kommentierte Fassung. Beuth Verlag. 2012

FRÝBA, L. & PIRNER, M. **Load tests and modal analysis of bridges.** Engineering Structures. Czech Republic, Prague, 2001.

GARNICA, G. I. Z., LANTSOGHT, E. O. L. and YANG, Y. **Monitoring structural responses during load testing of reinforced concrete bridges: a review.** Structure and infrastructure engineering. 2022.

GONÇALVES, R. M.; TAKEYA, T.; NIMIR, W.A. **Prova de carga e aspectos gerais da recuperação de uma ponte ferroviária da rede Ferroviária Federal.** Brasil, 1993.

HALL, W. B.; TSAI, M. **Load testing, structural reliability and test evaluation.** Structural Safety, Elsevier Science Publishers, v.6, p. 285-302, (1989).

LACERDA, E. de et al. **Evolução histórica dos ensaios de prova de carga.** 2015.

LANTSOGHT, E. O. L.. **Load testing of bridges: current practice and diagnostic load testing.** CRC Press, 2019.

LANTSOGHT, E. O. L., VAN DER VEEN, C., HORDIJK, D. A. & De BOER, A. **Stop Criteria for Flexure for Proof Load Testing of Reinforced Concrete Structures.** Frontiers in Built Environment, 5, 47. 2019.

LANTSOGHT, E. O. L., VEEN, C. V. D., BOER, A. and HORDIJK, D. **State-of-the-art on load testing of concrete bridges.** ENGINEERING STRUCTURES. 2017

MINISTERIO DE FOMENTO. **Instrucción Sobre Las Inspecciones Técnicas En Los Puentes De Ferrocarril (Itpf-05).** Madrid, 2005.

MINISTERIO DE FOMENTO. **Instrucciones Para la Puesta en Carga de Estructuras (Pruebas de Carga Provisionales).** Madrid, 2009.

MINISTERIO DE FOMENTO. **Instrucción de Acciones a Considerar en Puentes de Ferrocarril (IAPF).** Madrid, 2010.

MINISTERIO DE FOMENTO. **Instrucción Sobre Las Acciones A Considerar En El Proyecto De Puentes De Carretera.** Madrid, 2012.

MINISTERIO DE FOMENTO - DIRECCION GENERAL DE CARRETERAS **Recomendaciones Para la Realizacion de Pruebas de Carga de Recepcion en Puentesde Carretera.** Madrid, 1999.

OLASZEK, P., LAGODA, M. and CASAS, J. R. **Diagnostic load testing and assessment of existing bridges: examples of application.** Structure and infrastructure engineering. V.10, No. 6, p. 834-842, 2014. 2013

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

SCHACHT, G.; BOLLE, G.; MARX, S.: **Load Testing of Concrete Structures in Germany – General practice and recente developments.** Springer International Publishing. 2018.

SCHACHT, G., WEDEL, F., e MARX, S.. **Bridge load testing in Germany.** ACI Special Publication 323, 2018

TIMOSHENKO, S. **History of strength of materials.** New York, McGraw-Hill, 1953