

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS
ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Isabella Letícia Ataiades Vicentino

ESTUDO DE CASO: Ciclo de Inspeções e ensaios em Ponte ferroviária

Orientador: Dr. Hermes Carvalho

Belo Horizonte
2023

Isabella Letícia Ataide Vicentino

ESTUDO DE CASO: Ciclo de Inspeções e ensaios em Ponte ferroviária

Dissertação apresentada ao Programa de especialização em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Especialista em Engenharia de Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Hermes Carvalho

Belo Horizonte
2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA / TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

Aos **vinte** dias do mês de **julho de 2023**, às 18h, a estudante **Isabella Letícia Ataides Vicentino**, matrícula 2019703135, defendeu o Trabalho intitulado “**ESTUDO DE CASO: Ciclo de Inspeções e ensaios em Ponte ferroviária**”.

Participaram da banca examinadora os abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar; assinam eletronicamente a presente ata.

Nota: 90 (Noventa pontos)

Orientador(a): Prof. Hermes Carvalho

Nota: 90 (Noventa pontos)

Examinador(a): Prof. Sebastião Salvador Real Pereira



Documento assinado eletronicamente por **Hermes Carvalho, Professor do Magistério Superior**, em 20/07/2023, às 19:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sebastião Salvador Real Pereira, Professor do Magistério Superior**, em 20/07/2023, às 19:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2466035** e o código CRC **9DCD5EC5**.

Este documento deve ser editado apenas pelo Orientador e deve ser assinado eletronicamente por todos os membros da banca.

RESUMO

As obras de arte, estão sujeitas a processos de deterioração devido à exposição aos agentes agressivos do ambiente e às solicitações estruturais de distintas naturezas e magnitudes, por isso, os ciclos de inspeções são importantes na manutenção e acompanhamento do estado de conservação das estruturas, no que se refere à segurança estrutural, de funcionalidade e durabilidade. Este trabalho, dedicado ao estudo do histórico de inspeções de uma ponte ferroviária, apresenta a evolução gradativa das anomalias identificadas nos elementos da OAE, com suas respectivas classificações conforme NBR 9452:2019, tendo em vista a ação tardia de recuperação dos elementos em estado crítico, e com isso, a necessidade de ensaios e cálculos para projeto de reforço dos elementos principais. Os ensaios de extensometria, objeto principal de análise deste estudo, tiveram papel importante para análise das tensões e deformações dos elementos, visando concluir se a estrutura reúne condições de segurança estrutural.

Palavras Chaves: Obra de arte especial, patologias, extensometria, tensões.

ABSTRACT

Works of art are subject to deterioration processes due to exposure to aggressive environmental agents and structural demands of different natures and magnitudes, so inspection cycles are important in maintaining and monitoring the state of conservation of structures and in regarding their structural state, safety, functionality, and durability. This work, dedicated to the presentation of the inspection history of a railway bridge, presents the gradual evolution of the anomalies identified in the OAE elements, with their respective classifications according to NBR 9452: 2019, given the late recovery action of the elements in critical condition, and with that, the need for tests and calculations for the reinforcement design of the main elements. Extensometry tests, the main object of analysis in this study, played an important role in analyzing the stresses and deformations of the elements, aiming to conclude whether the structure meets structural safety conditions.

Keywords: Special artwork, pathologies, extensometry, tensions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Vista Superior da ponte.	13
Figura 2 – Vista inferior da ponte e mesoestrutura.	13
Figura 3 – Detalhe da viga caixão.	14
Figura 4 – Vista interna da viga caixão.	14
Figura 5 – Esquema do ensaio de Líquido Penetrante.	18
Figura 6 - Inspeção por ultrassom. Transmissão da onda ultrassônica e sua recepção.	18
Figura 7 – Tentativa de ensaio de líquido penetrante na alma da viga caixão.	20
Figura 8 - Ensaio de ultrassom na junta transversal de mesa superior de viga principal.	21
Figura 9 - Ensaio de ultrassom na junta transversal de mesa inferior da transversina, na extremidade.	21
Figura 10 - Ensaio de ultrassom na junta central na chapa de tabuleiro.	22
Figura 11 - Ensaio de ultrassom nas juntas transversais de alma das transversinas.	22
Figura 12 - Extensômetro Uniaxial.	26
Figura 13 - Fluxo do ensaio de extensometria.	26
Figura 14 - Esquema Ponte de Wheatstone.	27
Figura 15 - Transdutor de deslocamento linear.	28
Figura 16 - Sistema de aquisição de dados.	29
Figura 17 - Preparação da superfície para ensaio de extensometria.	30
Figura 18 - Extensômetro 4, colado e identificado na viga principal.	33
Figura 19 - Extensômetro E15, transversina intermediária.	34
Figura 20 - Transdutor de deslocamento.	36

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Extensômetro 4, Viga Principal Direita – Mesa Superior – Meio do Vão.....	33
Gráfico 2 - Extensômetro E4 – Evento 8 (M88) - Tensão Uniaxial (MPa).....	34
Gráfico 3 - Extensômetro 15, 2ª Transversina Intermediária – Mesa Inferior – Meio do Vão.....	35
Gráfico 4 - Extensômetro E15 – Evento 5 (I54) - Tensão Uniaxial (MPa).	35
Gráfico 5 - Comparativo de deslocamentos experimentais, teórico (estático e dinâmico) e admissível (L/640).	36
Gráfico 6 - Transdutor de Deslocamento – Evento 2 (X10) – Deslocamento (mm).	37
Gráfico 7 - Extensômetro 1: Viga Principal Esquerda – Mesa Inferior – Meio do Vão.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da condição de OAE segundo os parâmetros funcional e de Durabilidade.....	15
Tabela 2 – Patologias identificadas na OAE, nas inspeções de 2017.	16
Tabela 3 - Patologias identificadas na OAE, na inspeção de 2019.....	17
Tabela 4 - Patologias identificadas na OAE, nas inspeções de 2020.....	19
Tabela 5 - Patologias identificadas e estado de conservação da OAE, nas inspeções de 2021.	24
Tabela 6 - Pontos de instalação dos extensômetros na OAE.	29
Tabela 7 - Eventos considerados na OAE.....	31

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVO	11
3 DESENVOLVIMENTO	12
4 METODOLOGIA	25
4.1 INSTRUMENTAÇÃO.....	25
4.1.1 Definição de pontos de instrumentação	29
4.1.2 Eventos medidos	31
4.2 Parâmetros de Análise e ensaio	32
5 CONCLUSÃO	39
BIBLIOGRAFIA	41

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o escoamento de commodities para o mercado interno e para a exportação é realizado através das malhas ferroviárias e rodoviárias. Observando a economia de outros países e a logística utilizada nas atividades de exportação e importação ao longo dos anos, fica evidente a eficiência da malha ferroviária e o quanto ela influi no crescimento de um país, uma vez que tem baixo custo de manutenção, não dispõe de praças de pedágios, possui menor índice de roubos e acidentes, menor poluição do ar, além de transportar grandes quantidades a longas distâncias, fazendo com que o custo dos transportes fique reduzido consideravelmente e assim um preço mais competitivo chega ao consumidor final.

Conforme Dos Santos Castilho (2022), dos 29 mil quilômetros de extensão de linhas férreas brasileiras, mais de 10 mil quilômetros foram construídos no século passado, durante o Brasil Império, sendo que segundo Almeida (1990) apud Afonso (2007), existem aproximadamente 6.500 pontes metálicas na malha ferroviária brasileira.

Silva (2013) diz que o setor rodoviário expandiu-se amplamente devido a implantação da indústria automobilística na década de 50, e com a pavimentação das principais rodovias passou a dominar o transporte de cargas no país a partir dos anos 60, enfraquecendo os investimentos no setor ferroviário e, com isso, muitas linhas foram abandonadas ou sucateadas e a partir de então, poucas foram construídas.

A concentração de linhas férreas estão sobretudo nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste, devido principalmente por serem os principais polos produtores do país e terem mais facilidade de acesso ao litoral. Tanto no Agronegócio, como na Indústria, estados como São Paulo, Minas Gerais, Bahia e Paraná se destacam na produção de insumos importantes para a economia nacional, como minérios, grãos, gado, café, algodão, entre outros.

As ferrovias são formadas essencialmente pela sua infraestrutura que contempla obras de terraplenagem, obras de arte corrente (sarjetas, valetas e drenos) e obras de arte especiais (pontes, viadutos e túneis) e superestrutura ferroviária que é a plataforma ferroviária que depende da bitola adotada no projeto e via permanente, conjunto de lastro (superfície de assentamento formada por terra, areia, cascalho ou pedra britada), dormentes e trilhos.

As obras de arte especiais citadas acima, têm a finalidade de transpor obstáculos como vales, cursos d'água e vias. Elas são projetadas com uma determinada vida útil, podendo ser metálicas, de concreto ou mistas.

Estas estruturas estão sujeitas ao surgimento de anomalias podendo estar relacionado a idade, exposição aos agentes agressivos do ambiente, cargas de diferentes naturezas e magnitudes, mal uso e falta de atividades de manutenção. Para que se possibilite o prolongamento da vida útil das obras de arte, devem ser previstos monitoramento, inspeções, diagnósticos e manutenções corretivas e/ou preventivas.

As inspeções de acordo com a ABNT NBR 9452 (2019, p. 1), “são um conjunto de procedimentos técnicos e especializados que compreendem a coleta de dados necessários a formulação de um diagnóstico e prognóstico da estrutura, visando manter ou reestabelecer os requisitos de segurança estrutural, de funcionalidade e de durabilidade”.

O estudo de caso que será analisado no decorrer deste trabalho, tem por finalidade apresentar o histórico de uma ponte metálica ferroviária, os tipos de inspeções a qual ela foi submetida, o que cada uma delas contemplava, os ensaios, as anomalias identificadas e alguns diagnósticos. Enfatizando a necessidade de manutenção nas obras de arte especiais com prevenção, ou seja, a identificação das patologias antecipadamente, evitando assim, perdas expressivas de desempenho, estabilidade estrutural e durabilidade, e conseqüentemente evitando grandes impactos e transtornos na dinâmica de cidades e altos custos de recuperação das OAEs, que teriam sua funcionalidade perdida em parte ou por completo. E a importância dos ensaios, para auxiliar na identificação de patologias durante as inspeções, como a extensometria, ensaio não destrutivo, que será utilizado para análise das tensões experimentais e comparação com valores teóricos, auxiliando nos estudos de integridade estrutural da ponte.

2 OBJETIVO

A proposta deste trabalho é apresentar o histórico detalhado de inspeção de uma ponte de aço. Serão analisados em detalhes os dados obtidos sobretudo no ensaio de extensometria que tem por objetivo identificar as tensões e deformações presentes na estrutura, possibilitando assim a avaliação da estrutura em sua situação atual de operação.

Desta forma o trabalho foi dividido em três partes, a saber:

- Características geométricas e estruturais da OAE.
- Histórico de inspeções e manifestações patológicas identificadas.
- Ensaio realizado e análise dos mesmos afim de diagnosticar as patologias e indicar as condições de segurança da OAE.

3 DESENVOLVIMENTO

A Obra de Arte Especial ferroviária, apresenta bitola mista (larga e métrica), e via duplicada, transpondo um rio, através de duas pontes independentes, entre as quais, uma delas passou pelo ciclo de inspeções e será analisada neste trabalho.

Conforme DNIT (2003, p.88), a bitola é a distância entre as faces internas dos boletos dos trilhos. A bitola larga se refere às bitolas superiores a internacional - Standart – que mede 1,435m e no Brasil a bitola larga é de 1,60 m. A métrica é igual a 1,0 m. Já a bitola estreita é inferior a 1,435m. Tem-se ainda no Brasil a bitola mista, que ocorre quando a via férrea tem três ou mais trilhos e permite assim a passagem de veículos de bitolas diferentes (Figura 1).

A ponte da via 1, mais nova, é constituída integralmente em concreto armado. A via é lastreada, existindo laje apoiada sobre duas vigas contínuas com 2 vãos (hiperestáticas). As vigas apoiam-se em dois encontros, nas extremidades, e em um pilar central de seção circular.

Já a ponte da via 2 (Figura 1), mais antiga, com via igualmente lastreada e em tangente, possui superestrutura metálica, sendo 2 vãos isostáticos, e mesoestrutura em concreto armado. A mesoestrutura é formada por dois encontros, nas extremidades, e dois pilares centrais com seções circulares (Figura 2). Os aparelhos de apoio são em neoprene.

A infraestrutura das pontes compõe-se de tubulões em concreto armado. Ambas as pontes possuem passeios laterais para tráfego de pedestres.

A OAE objeto de estudo deste trabalho é a ponte metálica, da via 2. Sua superestrutura é formada por dois vãos isostáticos independentes, com comprimento de 16,17 m cada. Os vãos são formados por duas vigas principais, em seção caixão (Figuras 3 e 4), com enrijecedores transversais internos, e estrado inferior.

O estrado é formado por transversinas metálicas em perfil soldado, e uma chapa de tabuleiro sobre a qual encontra-se o lastro ferroviário. A chapa de tabuleiro também atua como mesa superior das transversinas.

Existem juntas transversais soldadas nas vigas principais (mesas e almas), nas transversinas (mesas, na região central do vão e nas duas extremidades, e almas na região central do vão), e nas chapas de tabuleiro (no eixo da ponte). Todas as ligações e juntas são soldadas.

A estrutura metálica não possui nenhuma pintura de proteção e a especificação dos materiais utilizados na fabricação da ponte não é conhecida.

Figura 1– Vista Superior da ponte.



Fonte: Recuperação Engenharia Ltda, 2020.

Figura 2 – Vista inferior da ponte e mesoestrutura.



Fonte: Recuperação Engenharia Ltda, 2020.

Figura 3 – Detalhe da viga caixão.



Fonte: Recuperação Engenharia Ltda, 2020.

Figura 4 – Vista interna da viga caixão.



Fonte: Recuperação Engenharia Ltda, 2020.

As inspeções nas obras de arte especiais, acontecem conforme padronizações sobretudo da ABNT NBR 9452:2019 – Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto, que define parâmetros de classificação estrutural, de durabilidade e funcionalidade, além de requisitos e fichas para realização das vistorias/inspeções.

Ao longo deste estudo, será tratado sobre a classificação da OAE, em função dos seus parâmetros de durabilidade e funcionalidade, relacionados respectivamente aos seus estados de conservação e aos fim a que elas se destinam. Esta classificação foi realizada a partir dos critérios apresentados na Tabela 1 extraída da NBR 9452:2019. Atribuindo-se notas de 1 a 5, sendo 5 condição excelente e 1, crítica.

Tabela 1 - Classificação da condição de OAE segundo os parâmetros funcional e de Durabilidade.






Nota de classificação	Condição	Caracterização estrutural	Caracterização funcional	Caracterização de durabilidade
5	Excelente	A estrutura apresenta-se em condições satisfatórias, apresentando defeitos irrelevantes e isolados.	A OAE apresenta segurança e conforto aos usuários.	A OAE apresenta-se em perfeitas condições, devendo ser prevista manutenção de rotina.
4	Boa	A estrutura apresenta danos pequenos e em áreas, sem comprometer a segurança estrutural.	A OAE apresenta pequenos danos que não chegam a causar desconforto ou insegurança ao usuário.	A OAE apresenta pequenas e poucas anomalias, que comprometem sua vida útil, em região de baixa agressividade ambiental.
3	Regular	Há danos que podem vir a gerar alguma deficiência estrutural, mas não há sinais de comprometimento da estabilidade da obra. Recomenda-se acompanhamento dos problemas. Intervenções podem ser necessárias a médio prazo.	A OAE apresenta desconforto ao usuário, com defeitos que requerem ações de médio prazo.	A OAE apresenta pequenas e poucas anomalias, que comprometem sua vida útil, em região moderada a alta agressividade ambiental ou a OAE apresenta moderadas a muitas anomalias, que comprometem sua vida útil, em baixa agressividade ambiental.
2	Ruim	Há danos que comprometem a segurança da OAE, sem risco iminente. Sua evolução pode levar ao colapso estrutural. A OAE necessita de intervenções significativas a curto prazo.	OAE com funcionalidade visivelmente comprometida, com riscos de segurança ao usuário, requerendo intervenções de curto prazo.	A OAE apresenta anomalias moderadas e abundantes, que comprometem sua vida útil, em região de alta agressividade ambiental.
1	Crítica	Há danos que geram grave insuficiência estrutural na OAE. Há elementos estruturais em estado crítico com risco tangível de colapso estrutural. A OAE necessita intervenção imediata, podendo ser necessária restrição de carga, interdição total ou parcial ao tráfego, escormento provisório e associada instrumentação, ou não.	A OAE não apresenta condições funcionais de utilização.	A OAE encontra-se em elevado grau de deterioração, apontando problema já de risco estrutural e/ou funcional.

Fonte: ABNT NBR 9452 (2019).

A inspeção cadastral é a primeira inspeção realizada na OAE, preferencialmente após sua construção. Tendo como objetivo, identificar e localizar a obra, detalhar características estruturais e funcionais, através da coleta e registro de informações a partir de documentos iniciais e de serviço de campo. Esta inspeção aconteceu no ano de 2017 juntamente com a primeira inspeção rotineira, que segundo a NBR 9452:2019, são inspeções periódicas realizadas anualmente onde são analisadas a evolução das anomalias identificadas nas inspeções anteriores e mapeadas as novas patologias e ocorrências.

Foram identificadas, nesta estrutura, conforme imagens da Tabela 2, corrosão severa na superestrutura, aparelhos de apoio deformados e deformação permanente exagerada e na mesoestrutura presença de fissuras, umidade e deslocamento de concreto. Em decorrência da corrosão severa observado na superestrutura, com esfoliação das camadas do aço, a estrutura foi classificada conforme os parâmetros da ABNT NBR 9452:2016, com nota 2, indicando condição “ruim” nos aspectos estruturais e de durabilidade, necessitando de intervenções a curto prazo.

Tabela 2 – Patologias identificadas na OAE, nas inspeções de 2017.

Vista inferior da laje com pontos de corrosão severa	Detalhe de corrosão severa na laje.
	
Aparelho de apoio deformado e com bojamento.	Detalhe de corrosão com esfoliação na laje.
	
Fissura no pilar.	Percolação de água no pilar.
	

Fonte: Recuperação Engenharia Ltda (2017).

Após as inspeções descritas acima, a próxima inspeção rotineira ocorreu em 2019, onde devido à ausência de obras de reparo, as mesmas patologias foram identificadas em grau mais acentuado e novos pontos de corrosão no interior das vigas caixão foram assinalados, como é possível observar nas fotos da Tabela 3.

Tabela 3 - Patologias identificadas na OAE, na inspeção de 2019.

Corrosão severa na face inferior da laje.	Viga transversina com corrosão média.
	
Aparelho de apoio obstruído e com bojamento.	Área interna da viga longarina com corrosão.
	

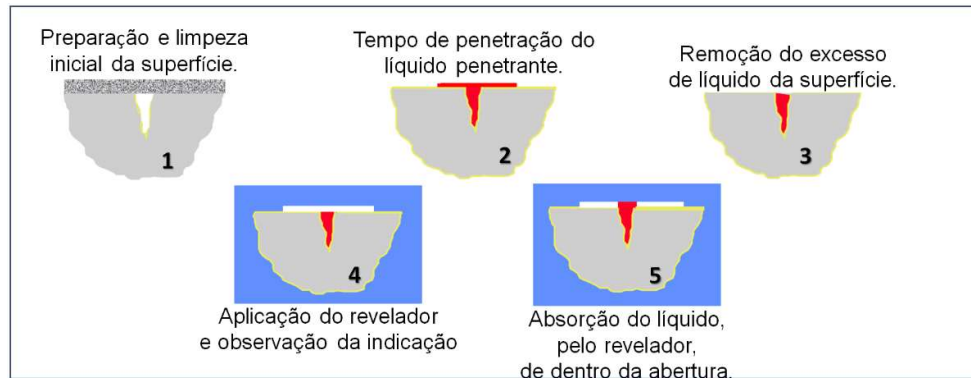
Fonte: Recuperação Engenharia Ltda (2019).

Desta forma, como não foram realizados reparos e as mesmas patologias foram identificadas em grau mais acentuado, a classificação da OAE conforme os parâmetros da ABNT NBR 9452:2016, permanece sendo nota 2, indicando condição “ruim” e necessitando de intervenções a curto prazo.

Em 2020 foi realizada inspeção especial, contando com a execução de ensaios não destrutivos nas soldas e chapas da estrutura, associada a inspeção visual. Importante citar que os ensaios não destrutivos, como o próprio nome indica, não alteram as propriedades físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais da estrutura e permite identificar anomalias que não são visualmente percebidas. As metodologias de ensaios não destrutivos utilizadas foram: Líquido Penetrante e Ultrassom.

O método de ensaio por líquidos penetrantes (Figura 5), conforme Andreucci (2013), consiste na aplicação de um líquido com coloração, sobre a superfície da peça de interesse, de forma que, este líquido penetre em discontinuidades presentes no material. Após um determinado tempo, o excesso de líquido é removido e um produto chamado revelador é aplicado, tendo como função, extrair o líquido penetrante contido dentro das discontinuidades trazendo-o para a superfície da peça que está em análise, tornando a indicação visível a olho nu.

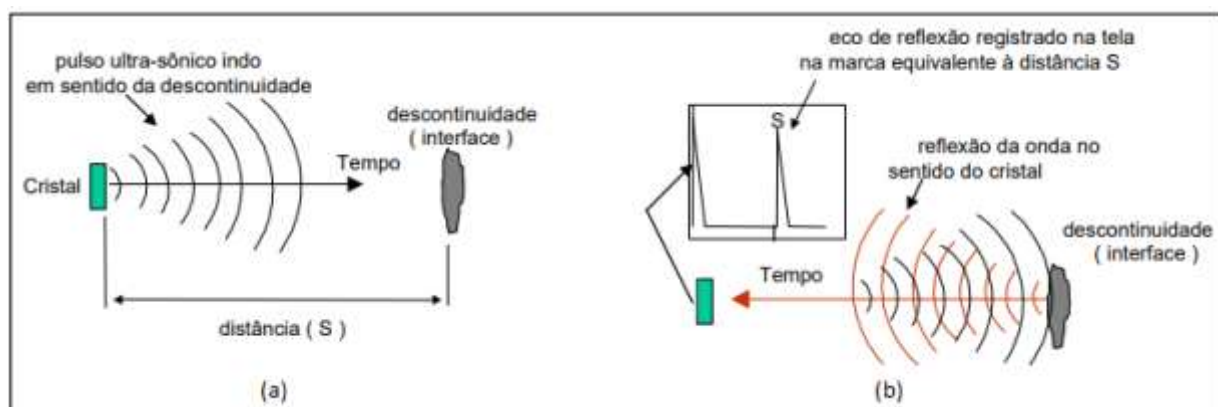
Figura 5 – Esquema do ensaio de Líquido Penetrante.



Fonte: ANDREUCCI (2013, p. 5).

Enquanto que no ensaio de ultrassom, uma onda ultrassônica ao incidir numa discontinuidade ou falha interna do meio elástico (superfície, solda a ser analisada) irá refletir. As ondas refletidas advindas do interior da peça examinada serão detectadas pelo transdutor (aparelho de ultrassom), possibilitando dessa forma a localização e/ou a profundidade das discontinuidades, como ilustra a Figura 6 (ANDREUCCI, 2008).

Figura 6 - Inspeção por ultrassom. Transmissão da onda ultrassônica e sua recepção.



Fonte: ANDREUCCI (2008), adaptada.

Ou seja, enquanto a técnica do Líquido Penetrante é capaz de identificar discontinuidades superficiais, a do Ultrassom consegue identificar discontinuidades superficiais e internas.

Desta forma, o objetivo dos ensaios foi detectar e avaliar a existência de descontinuidades nas soldas e chapas, que pudessem comprometer o desempenho estrutural da ponte, e assim servir de subsídio para planos de manutenção futuros.

A inspeção especial, é realizada com uma periodicidade maior que as rotineiras, a cada 5 anos, podendo ser postergada até 8 anos, de acordo com a classificação da condição da estrutura descrita na ABNT NBR 9452:2019. Ela deve contemplar mapeamento gráfico e quantitativo das anomalias de todos os elementos aparentes da OAE.

As patologias identificadas através da inspeção visual, conforme Tabela 4, segue sendo as mesmas já identificadas anteriormente nas inspeções cadastral e rotineiras, com destaque para a existência de corrosão superficial generalizada e pontos de corrosão severa, com perda de seção de aço, em muitos elementos de grande importância estrutural.

As perdas de material por corrosão se encontram em nível mais avançado naqueles elementos com acúmulo de detritos e umidade, em especial: chapa de tabuleiro, almas internas do caixão (elementos estes em contato direto com o lastro ferroviário), e transversinas extremas (onde há infiltração de água e a ventilação é menor).

Tabela 4 - Patologias identificadas na OAE, nas inspeções de 2020.

Corrosão severa com perda de seção na lateral da viga caixão.	Detalhe de corrosão severa com perda de seção na lateral da viga caixão.
	

Interior da viga caixão com pontos de umidade, corrosão e acúmulo de detritos.	Face inferior da laje, com corrosão severa, e formação de camadas expansivas e perda de seção.
	
Corrosão severa na mesa inferior da transversina.	Corrosão na face inferior da laje, na região do dreno.
	

Fonte: Recuperação Engenharia Ltda (2020).

Com relação aos ensaios não destrutivos, foram várias as tentativas de realização de ensaio de Líquido Penetrante nos pontos de solda de ligação entre a chapa de tabuleiro e a alma da viga principal (seta vermelha indicada na Figura 7 abaixo), entretanto as condições locais de corrosão e umidade não permitiram o seu êxito.

Figura 7 – Tentativa de ensaio de líquido penetrante na alma da viga caixão.



Fonte: Recuperação Engenharia Ltda, 2020.

O ensaio de Ultrassom foi realizado em um total de 46 pontos, das seguintes tipologias:

- Juntas soldadas na mesa superior das vigas principais (Figura 8), em 4 pontos distintos, onde não foi identificado defeitos.

Figura 8 - Ensaio de ultrassom na junta transversal de mesa superior de viga principal.



Fonte: Recuperação Engenharia Ltda, 2020.

- Junta soldada de extremidade da mesa inferior das transversinas (Figura 9), em 24 pontos distintos.

Figura 9 - Ensaio de ultrassom na junta transversal de mesa inferior da transversina, na extremidade.



Fonte: Recuperação Engenharia Ltda, 2020.

- Junta central soldada da chapa de tabuleiro e mesa superior das transversinas (Figura 10), em 6 pontos distintos.

Figura 10 - Ensaio de ultrassom na junta central na chapa de tabuleiro.



Fonte: Recuperação Engenharia Ltda, 2020.

- Junta central soldada de alma das transversinas (Figura 11), em 12 pontos distintos.

Figura 11 - Ensaio de ultrassom nas juntas transversais de alma das transversinas.



Fonte: Recuperação Engenharia Ltda, 2020.

As 3 últimas tipologias apresentaram defeitos em metade dos pontos, sendo descontinuidades internas. Falhas que podem levar ao colapso da estrutura e que as normas técnicas (AREMA, AASHTO e AWS) são categóricas em reprovar todo e qualquer defeito e recomendar a sua correção. As descontinuidades podem ter sido formadas na fabricação da estrutura ou serem trincas que surgiram com a sua utilização.

Desta forma, a estrutura foi classificada segundo os parâmetros da ABNT NBR 9452:2019 com nota 2 em estrutural e 1 em durabilidade, associadas a degradação avançada do aço pelo mecanismo de corrosão e a inadequação da estrutura aos critérios de fadiga, que levam a crer que, mantidas as condições atuais, a durabilidade da ponte é bastante baixa, comprometendo também sua função estrutural, devendo medidas serem adotadas a curto prazo.

Importante frisar que durante todas as inspeções citadas, são utilizados equipamentos básicos para auxiliar no levantamento das manifestações patológicas, como: Paquímetro, trena laser, trena de fita, fissurômetro, máquina fotográfica, drone e escadas de acesso.

Após o levantamento detalhado das patologias e o diagnóstico, na inspeção citada acima em 2020, foi realizada a verificação estrutural da mesma e projeto de reforço, prevendo as seguintes intervenções:

- Chapas laterais instaladas na face das vigas principais que ficam em contato com o lastro ferroviário, com o objetivo de recompor a seção da viga principal perdida por corrosão, e dar ganho de vida útil às vigas.
- Substituição das 4 transversinas de extremidade (duas de cada vão), devido a presença de grau de corrosão severo e perda de seção de aço bastante relevantes.
- Desobstrução dos drenos e colocação de buzinotes nos drenos existentes e em novos pontos, a fim de evitar o acúmulo de água na face inferior da estrutura. Os buzinotes deverão conter filtro para evitar a passagem de lastro.
- Esmerilhamento de soldas críticas, que não apresentam acabamento, para ganho de durabilidade à fadiga.
- Pintura de proteção em toda a estrutura metálica, a fim de protegê-la contra corrosão atmosférica.

Em 2021 foi realizado o novo ciclo de inspeção rotineira, onde a OAE se encontrava em obras, e foi possível observar que as chapas laterais de reforço das vigas principais já haviam sido instaladas e os buzinotes também. Os aparelhos de apoio continuam apresentando deformação, a ponte apresenta corrosão superficial generalizada e presença de fissuras e deslocamento de concreto nos pilares (Tabela 5).

Visto a condição da OAE no momento da inspeção e que a mesma se encontrava em obras, ela foi classificada conforme os parâmetros da ABNT NBR 9452:2019, com nota 3, indicando condição “regular” nos aspectos estruturais e de durabilidade, sendo recomendado acompanhar a evolução das ocorrências e necessitando de intervenções a médio prazo.

Tabela 5 - Patologias identificadas e estado de conservação da OAE, nas inspeções de 2021.

<p>Vista superior da OAE.</p>	<p>Detalhe da chapa de reforço lateral da viga longarina.</p>
 <p>13/04/2021</p>	 <p>13/04/2021</p>
<p>Vista do interior da viga longarina com pontos de corrosão e umidade.</p>	<p>Face inferior da laje, com corrosão severa, e formação de camadas expansivas e perda de seção.</p>
 <p>13/04/2021</p>	 <p>13/04/2021</p>
<p>Corrosão severa na mesa inferior da transversina.</p>	<p>Detalhe da face inferior da laje, com corrosão severa e percolação de água.</p>
 <p>13/04/2021</p>	 <p>13/04/2021</p>



Fonte: Recuperação Engenharia Ltda; 2021.

Em 2021 foi realizada ainda instrumentação da superestrutura em aço, com o objetivo de:

- Conhecer o comportamento estrutural real da ponte.
- Comparar o comportamento experimental com o comportamento teórico esperado (calculado);
- Analisar os níveis de tensão e deformação da estrutura sob a ótica de parâmetros recomendados e admissíveis pelas normas e pela literatura;

4 METODOLOGIA

4.1 INSTRUMENTAÇÃO

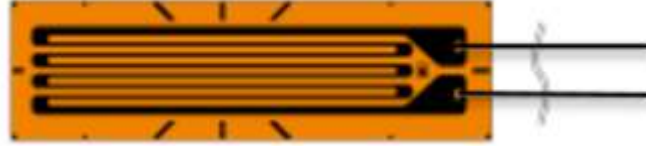
Baseado nas peculiaridades estruturais desta OAE, foram adotadas as metodologias e planos de instrumentação abaixo.

- Extensômetros (*strain gauges*): sensor para medição de deformações na superfície da estrutura; através de suas medições é possível determinar as tensões atuantes em cada ponto.
- Transdutor de deslocamentos: sensor para medição de deslocamentos;

O extensômetro, também conhecido como *strain gauges*, são sensores que constitui-se essencialmente de fios metálicos dispostos como serpentina ou grelha, em uma fina película de material similar a plástico, que serve de base para aderir à estrutura que se deseja monitorar. Estes dispositivos são capazes de medir deformação quando submetidos a um carregamento, sem comprometer as condições de serviço. (VALIDO; SILVA, 1997).

Entre os tipos de extensômetros disponíveis no mercado que atendem a requisitos diferentes de estados de deformação, o que será empregado nesta estrutura é o uniaxial (Figura 12), que é capaz de medir a deformação em apenas 01 direção.

Figura 12 - Extensômetro Uniaxial

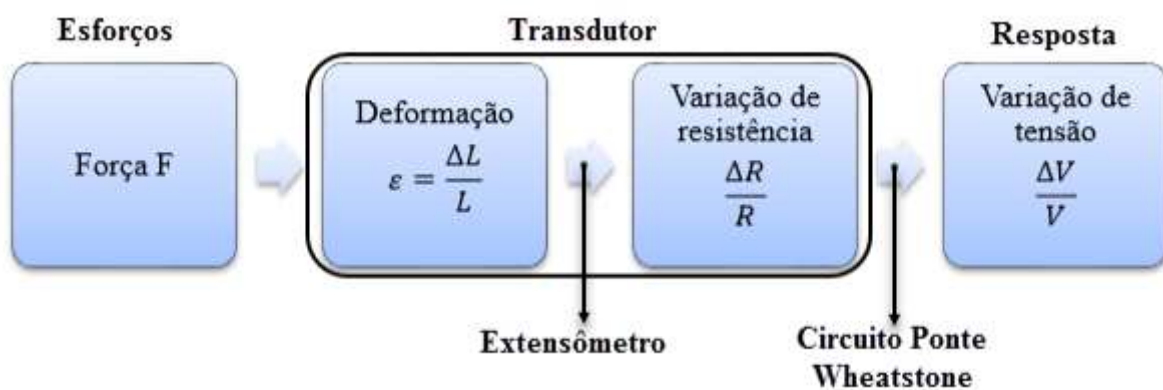


Fonte:Kyowa (2022).

O ensaio por extensômetros elétricos pode ser dividido em 2 etapas. Sendo a primeira de medição, onde, uma força ou um carregamento é imposto sobre a peça, deformando-a elasticamente. Estas deformações são transformadas em variações de resistências elétricas nos extensômetros, os quais estão fixos na superfície da peça a ser analisada. A segunda etapa, é caracterizada pelo processamento de sinal, em um sistema de aquisição de dados, no qual as tensões são lidas.

Na segunda etapa, ocorre ainda a amplificação dos sinais elétricos medidos. Uma vez que as deformações nas estruturas analisadas são muito pequenas, os sinais e suas variações também serão pequenos, sendo assim, se faz necessário o uso de amplificadores de sinais. A Figura 13 apresenta o fluxo desde o processo de esforços ou carregamentos a qual a peça está sujeita, a amplificação e análise de sinais e resposta de medição.

Figura 13 - Fluxo do ensaio de extensometria



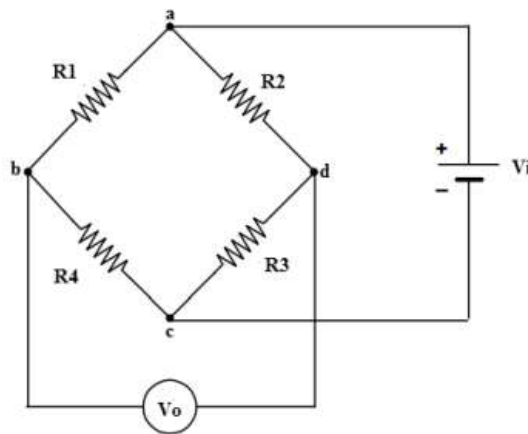
Fonte: Adaptado de Weber (2008).

Os extensômetros permanecem ligados a um circuito tipo ponte de Wheatstone, alimentado por uma dada tensão elétrica (V), a qual fornece a variação ocorrida no sinal elétrico (ΔV), conforme ilustra

a Figura 14. A razão entre a variação de tensão elétrica ($\Delta V / V$) é igualmente proporcional à razão existente entre a variação de resistência elétrica ($\Delta R / R$). (WEBER, 2008).

A ponte de Wheatstone (Figura 14) formada pelos resistores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 é energizada pela tensão “ V_i ” nos terminais centrais “ac” e seu sinal de saída, representado por “ V_o ”, é obtido nos terminais centrais “bd”. A resistência de cada braço tem função de manter o equilíbrio da ponte. (HOFFMANN, 1989).

Figura 14 - Esquema Ponte de Wheatstone



Fonte: Adaptado de Adolfato, Camacho e Brito (2004).

Para utilização da ponte de Wheatstone na medição com extensômetro, há diferentes configurações que podem ser adotadas, variando conforme sensibilidade, amplificação, compensação de temperatura necessária e o tipo de medição a ser realizada, apresentando as três seguintes configurações: $\frac{1}{4}$ de ponte, $\frac{1}{2}$ ponte e/ou ponte completa.

Para o cálculo de tensões nos locais especificados para análise, a lei de Hooke é o princípio aplicado. Desta forma, as Equações (1) e (2) expressam a relação para o cálculo de tensão e deformação uniaxial, obtidas a partir da lei de Hooke. (HIBBELER, 2009).

$$\sigma_x = E \cdot \varepsilon_x \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (2)$$

Nas equações acima é apresentado o formato simplificado da lei de Hooke, onde o coeficiente σ representa a tensão, E o módulo de elasticidade e ε a deformação. A deformação existente em solicitações unidimensionais é medida por um extensômetro unidirecional, colado na direção da solicitação mecânica (tração, compressão ou flexão pura).

A partir disso, o sistema de aquisição de dados capta os sinais medidos pelo extensômetro e os envia ao programa que realiza todo o processamento dos sinais e elaboração de relatórios de análise a partir dos dados adquiridos, avaliando a qualidade do sinal e variações ocorridas durante a medição.

Será utilizado também um transdutor de deslocamento variável linear (Figura 15), que é um sistema de medição elétrico usado para medir deslocamento linear, ou seja, movimento de um determinado elemento em uma direção ao longo de um eixo, em unidade de milímetros (mm), ou polegadas (in.), e pode ter um valor positivo ou negativo. A medição consiste na utilização de três componentes: um transdutor, responsável por converter alterações físicas (deslocamento) em sinal elétrico de saída, um sistema de aquisição de dados, que vão desde simples unidades portáteis até complexos sistemas automatizados e um sistema de ligação entre estes dois componentes.

Uma das grandes vantagens de se utilizar os transdutores de deslocamentos consiste na possibilidade de leitura automática dos dados através de um sistema de aquisição de dados, e a possibilidade de monitoração contínua à distância.

Figura 15 - Transdutor de deslocamento linear.



Fonte: Recuperação Engenharia Ltda; 2021.

Figura 16 - Sistema de aquisição de dados.



Fonte: Recuperação Engenharia Ltda; 2021.

4.1.1 Definição de pontos de instrumentação

Para a avaliação dos pontos e definição do plano de instrumentação, foram levados em conta os seguintes aspectos:

- Importância estrutural: foram priorizados elementos de importância estrutural primária, responsáveis pela resistência das cargas gravitacionais (permanentes e móveis);
- Detalhes de fadiga: foram priorizados os pontos com detalhamento mais propício a falha por fadiga;

Toda a instrumentação foi realizada no vão 1, por estar fora do leito do rio e, portanto, com acesso inferior mais fácil.

Extensômetros:

Nesta OAE, o extensômetro sempre foi instalado para obtenção de deformações no sentido longitudinal da peça, conforme Tabela 6 abaixo.

Tabela 6 - Pontos de instalação dos extensômetros na OAE.

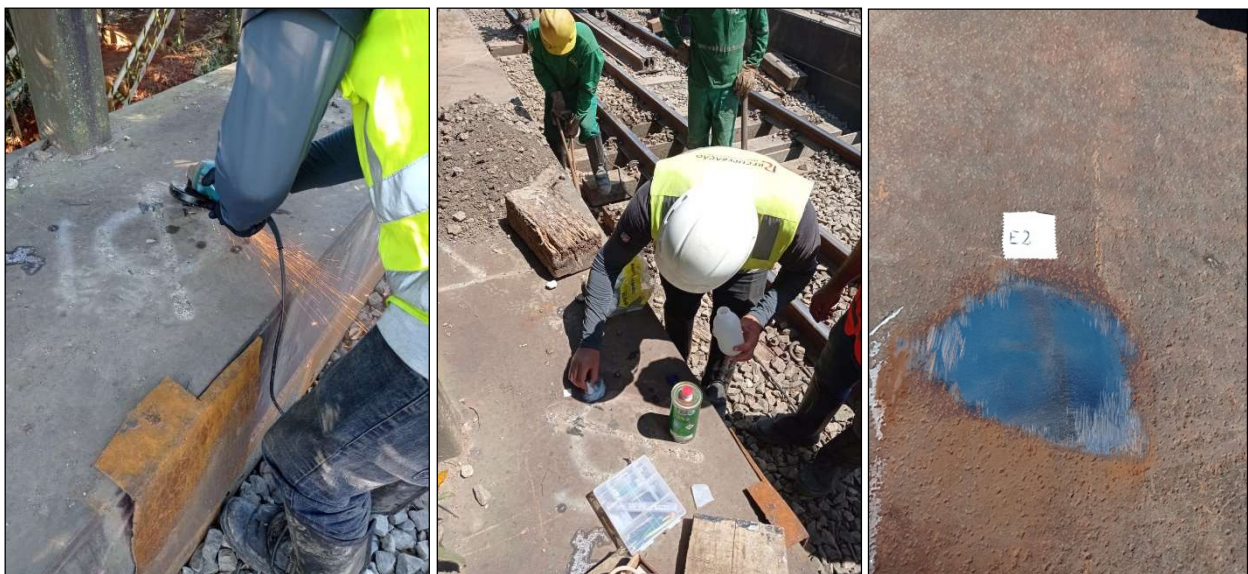
Extensômetro	Elemento	Posição	Direção
E1	Viga principal esquerda.	Mesa inferior, meio do vão.	Longitudinal à via.
E2		Mesa superior, meio do vão.	Longitudinal à via.
E3		Mesa inferior, meio do vão.	Longitudinal à via.

Extensômetro	Elemento	Posição	Direção
E4	Viga principal direita.	Mesa superior, meio do vão.	Longitudinal à via.
E5	Transversina Extrema	Mesa inferior, extremidade.	Transversal à via.
E6		Mesa superior, extremidade.	Transversal à via.
E7		Mesa inferior, meio do vão.	Transversal à via.
E8		Mesa superior, meio do vão.	Transversal à via.
E9	1ª Transv. Intermediária	Mesa inferior, extremidade.	Transversal à via.
E10		Mesa superior, extremidade.	Transversal à via.
E11		Mesa inferior, meio do vão.	Transversal à via.
E12		Mesa superior, meio do vão.	Transversal à via.
E13	2ª Transv. Intermediária	Mesa inferior, extremidade.	Transversal à via.
E14		Mesa superior, extremidade.	Transversal à via.
E15		Mesa inferior, meio do vão.	Transversal à via.
E16		Mesa superior, meio do vão.	Transversal à via.
E17	Transversina Central (15ª int.)	Mesa inferior, extremidade.	Transversal à via.
E18		Mesa superior, extremidade.	Transversal à via.
E19		Mesa inferior, meio do vão.	Transversal à via.
E20		Mesa superior, meio do vão.	Transversal à via.
E21	Tabuleiro.	Meio do vão, sob trilho 1.	Transversal à via.
E22		Extremidade, sob trilho 1.	Transversal à via.

Fonte: Recuperação Engenharia Ltda, 2021.

Nos pontos onde foram instalados os extensômetros, foram realizados o polimento da superfície, a fixação e a proteção dos sensores, conforme Figura 17 abaixo. Todos foram devidamente identificados e registrados.

Figura 17 - Preparação da superfície para ensaio de extensometria.



Fonte: Recuperação Engenharia Ltda, (2021).

Transdutor de deslocamentos:

Foi instalado um transdutor de deslocamento, no sentido vertical, no meio do vão da viga principal esquerda, para determinação de sua flecha.

4.1.2 Eventos medidos

As atividades de instrumentação ocorreram entre os dias 22 e 24 de março de 2021. Nos dias 24 e 25, houve a realização dos ensaios (medições), com a passagem de 9 composições ferroviárias (eventos).

Abaixo, é possível observar na Tabela 7 o registro dos eventos medidos (passagens de composições ferroviárias), com as informações relevantes.

Tabela 7 - Eventos considerados na OAE.

Evento	1	2	3	4	5
Data	24/03/20	24/03/20	24/03/20	25/03/20	25/03/20
Horário	14:27	16:53	17:32	08:00	08:37
Prefixo Trem	U60	X10	U62	U70	I54
Composição	Carregada	Carregada	Carregada	Carregada	Carregada
Vel. Circul. (km/h)	23	30	28	24	52
Nº Locomotivas	2 (cab.)	3 (2 cab. +1 dist.)	2 (cab.)	2 (cab.)	4 (2 cab.+1 dist.+1 cauda)
Modelo Locomot.	AC44	AC44	AC44	GT46	AC44
Modelo Vagões	HFE	HPT/HFT	HFE	GFD/GDD	HPT/HFT
Quant. Vagões	79	83	77	89	120
Bitola Vagões	Métrica	Larga	Métrica	Métrica	Larga
Condição de Vento	Fraco	Calmaria	Fraco	Calmaria	Fraco
Vento	SO 5 km/h	NNE 8 km/h	NNO 8 km/h	SE 11 km/h	SE 14 km/h
Observações					

Evento	6	7	8	9
Data	25/03/20	25/03/20	25/03/20	25/03/20
Horário	09:35	11:13	14:06	14:40
Prefixo Trem	U50	I56	M88	U52
Composição	Carregada	Carregada	Carregada	Carregada
Vel. Circul. (km/h)	18	43	35	35
Nº Locomotivas	2 (1 cab. +1 dist.)	4 (2 cab.+1 dist.+1 cauda)	4 (2 cab.+1 dist.+1 cauda)	2 (cab.)
Modelo Locomot.	ES43	AC44	AC44	ES43
Modelo Vagões	HFE	HPT/HFT	HPT	HFE
Quant. Vagões	84	123	84	78

Evento	6	7	8	9
Bitola Vagões	Métrica	Larga	Larga	Métrica
Condição de Vento	Fraco	Calmaria	Fraco	Fraco
Vento	SE 18 km/h	SE 16 km/h	SE 5 km/h	SSE 5 km/h
Observações	Parou sobre OAE.		Parou sobre OAE.	

Fonte: Recuperação Engenharia Ltda; 2021.

4.2 PARÂMETROS DE ANÁLISE E ENSAIO

As estruturas foram analisadas pelos métodos convencionais das Teorias das Estruturas, Resistência dos Materiais e Teoria da Elasticidade. Nesta ponte, o modelo adotado para as vigas principais é o de uma viga biapoiada isostática, com vão teórico de 15,77 metros. As transversinas são vigas apoiadas nas vigas principais, com vinculações rotuladas ou engastadas (cenário menos favorável para cada situação), com vão teórico de 4,39 metros. Os apoios promovem restrições verticais, e restrições elásticas horizontais (transversais e longitudinais).

Não foram consideradas para efeito dos cálculos teóricos: As cargas permanentes, uma vez que, as medições dos ensaios tiveram início com a estrutura já em estado deformado para as cargas permanentes. O vento no trem e na ponte, já que as condições de vento observadas durante os ensaios foram bastante brandas, gerando carregamentos baixos e que poderiam ser desconsiderados e esforços horizontais e longitudinais.

Para os elementos principais, em que predominam esforços gravitacionais, a tensão teórica foi discriminada em “Estatica” (carga móvel, sem impacto vertical) e “Dinâmica” (carga móvel, com impacto vertical).

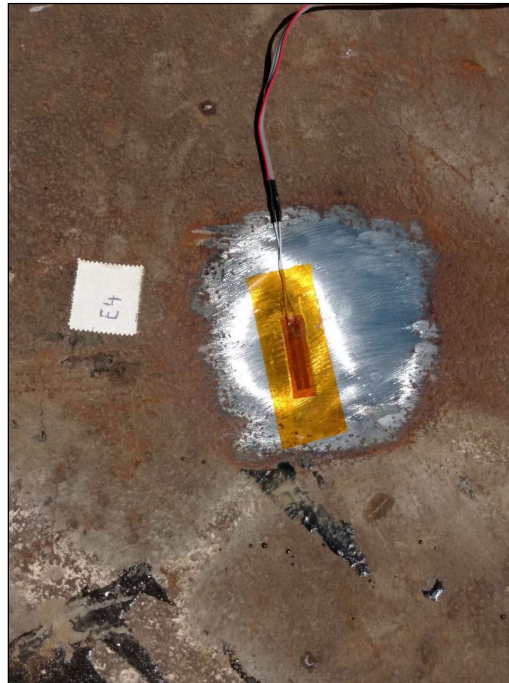
Com base nesses critérios, será possível concluir que a estrutura reúne condições de segurança sempre que a tensão experimental for menor do que a tensão admissível. As tensões admissíveis adotadas partiram da premissa de se tratar de aço estrutural típico de média resistência mecânica (tensão de escoamento $f_y = 250$ MPa).

Para análise dos dados apresentados a seguir, adotou-se para a convenção de sinais, valores positivos correspondentes a tensões de tração, enquanto valores negativos correspondentes a tensões de compressão.

A seguir foi reunido os pontos que apresentaram maiores tensões e comportamentos relevantes para este trabalho (Figuras 18 e 19), todos os demais pontos onde foram realizados os ensaios, tiveram resultados inferiores, tensões menores, e por consequência análises mais favoráveis.

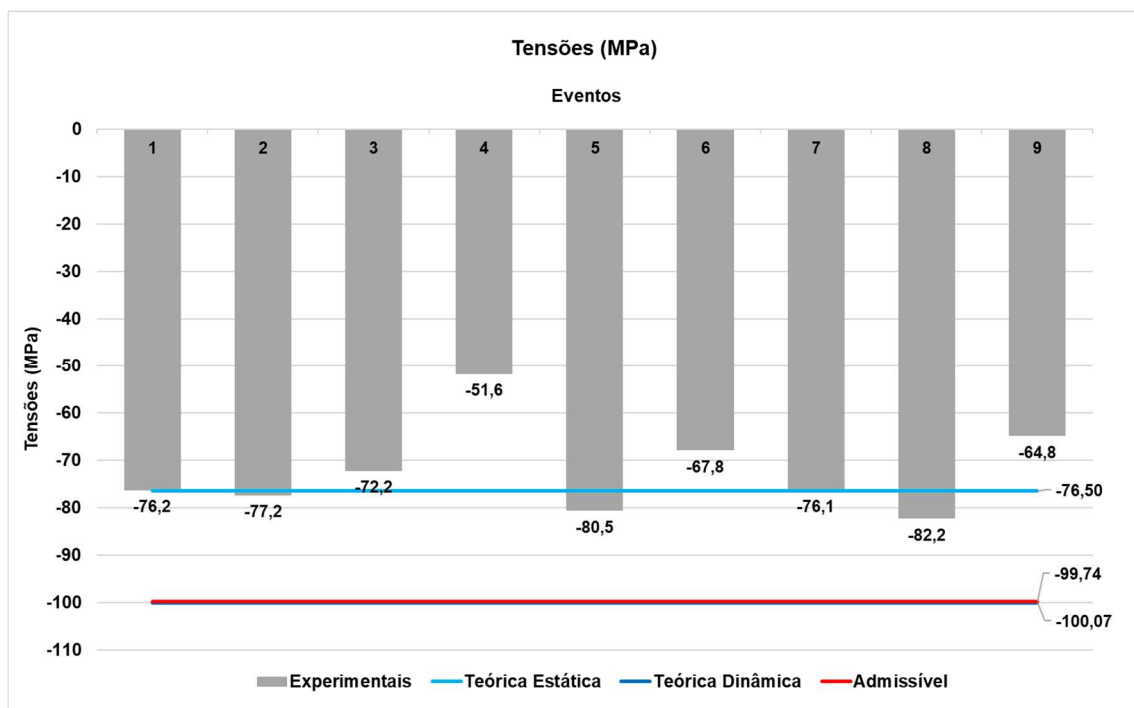
Nos Gráficos 1 e 3 observa-se um comparativo das tensões experimentais obtidas por evento, as tensões teóricas e admissíveis para a viga longarina direita e segunda viga transversina. Já os Gráficos 2 e 4, apresentam o espectro de tensões para o evento mais significativo obtido em cada sensor.

Figura 18 - Extensômetro 4, colado e identificado na viga principal.



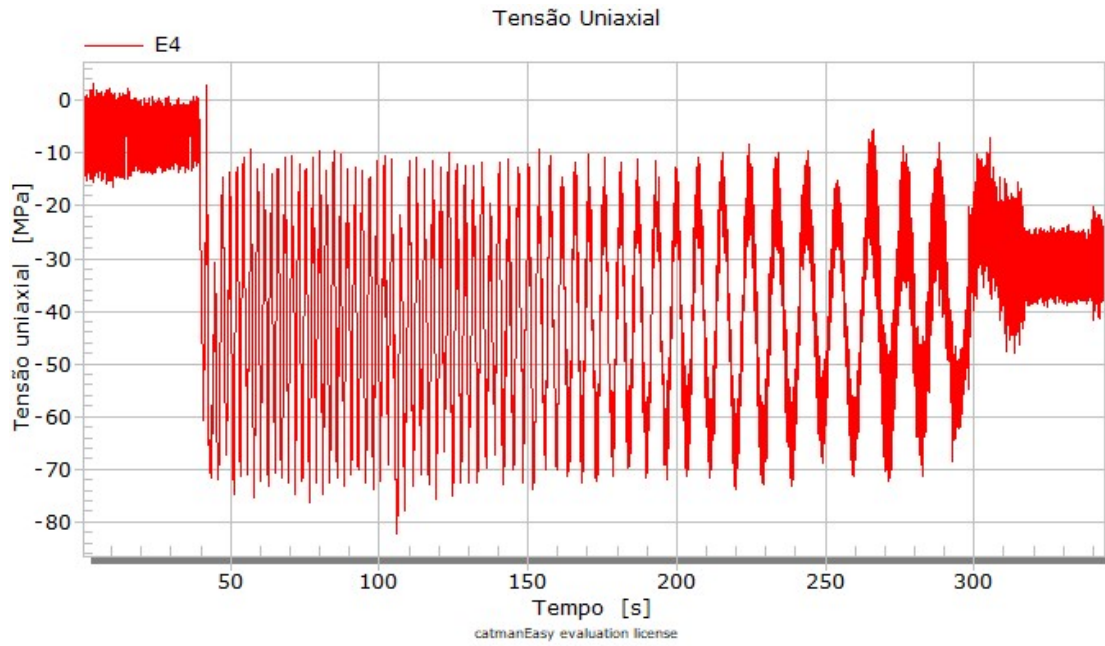
Fonte: Recuperação Engenharia Ltda, 2021.

Gráfico 1 - Extensômetro 4, Viga Principal Direita – Mesa Superior – Meio do Vão



Fonte: Recuperação Engenharia Ltda, 2021.

Gráfico 2 - Extensômetro E4 – Evento 8 - Tensão Uniaxial (MPa).



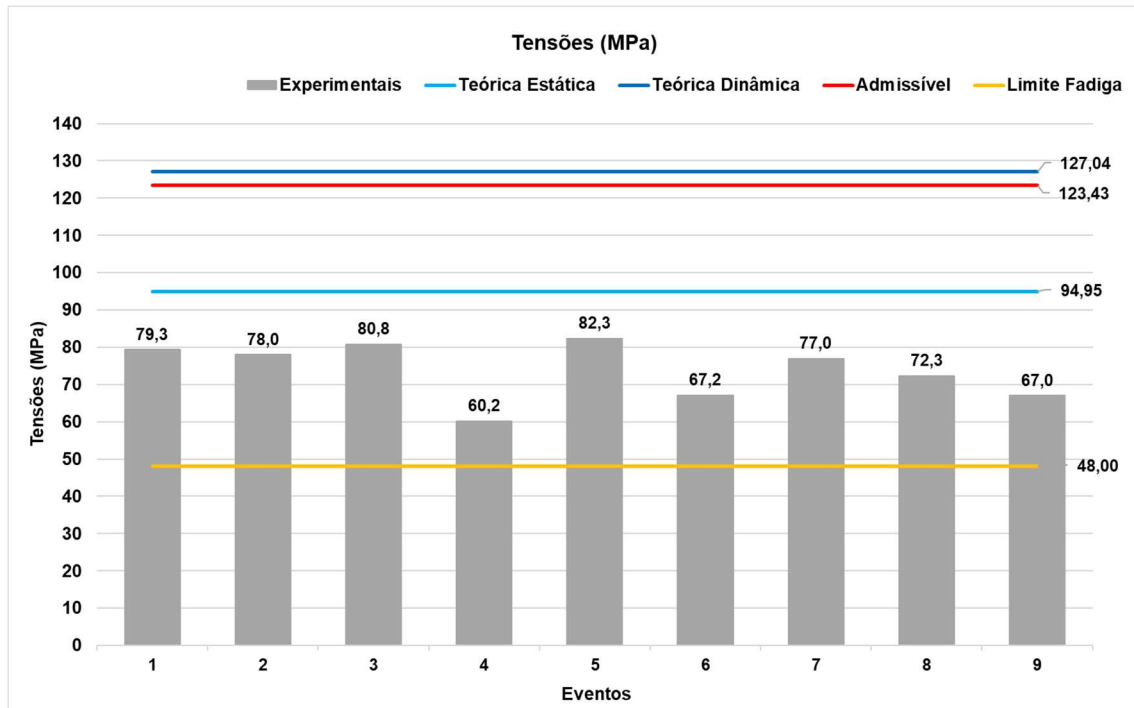
Fonte: Recuperação Engenharia Ltda, 2021.

Figura 19 - Extensômetro E15, transversina intermediária.



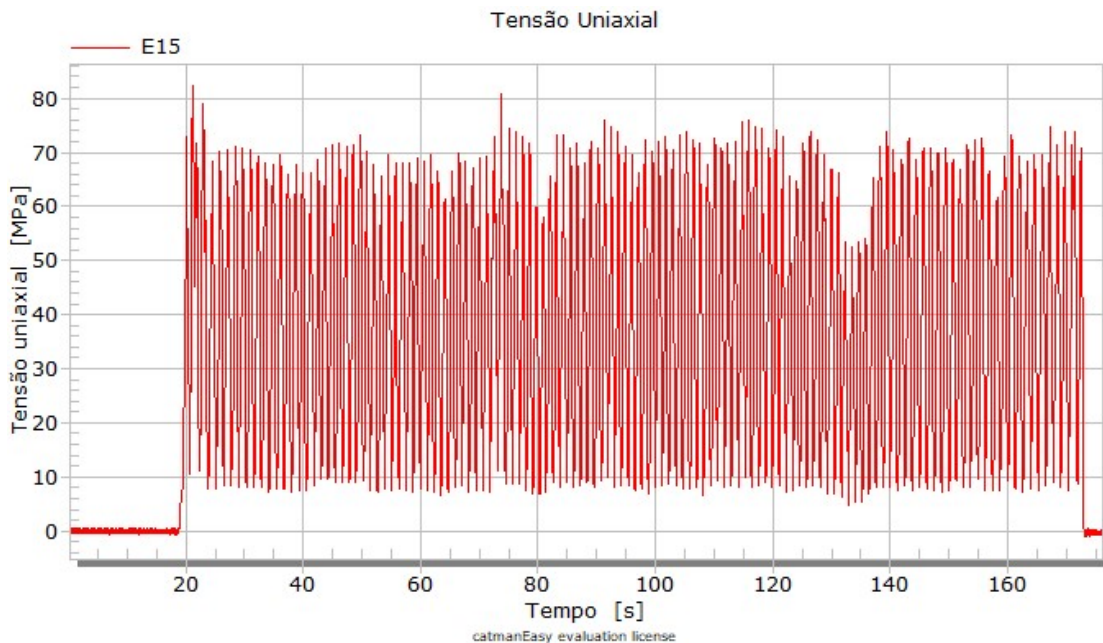
Fonte: Recuperação Engenharia Ltda, 2021.

Gráfico 3 - Extensômetro 15, 2ª Transversina Intermediária – Mesa Inferior – Meio do Vão.



Fonte: Recuperação Engenharia Ltda, 2021.

Gráfico 4 - Extensômetro E15 – Evento 5 - Tensão Uniaxial (MPa).



Fonte: Recuperação Engenharia Ltda, 2021.

As flechas experimentais, obtidas através da instalação do transdutor de deslocamento no meio do vão da viga principal esquerda (Figura 20), serão comparadas com o limite admissível. Onde, de acordo com a AREMA, a flecha máxima admissível é de $L / 640$, onde L é o vão teórico sob análise. No Gráfico 5 observa-se um comparativo dos deslocamentos experimentais obtidas por evento e os

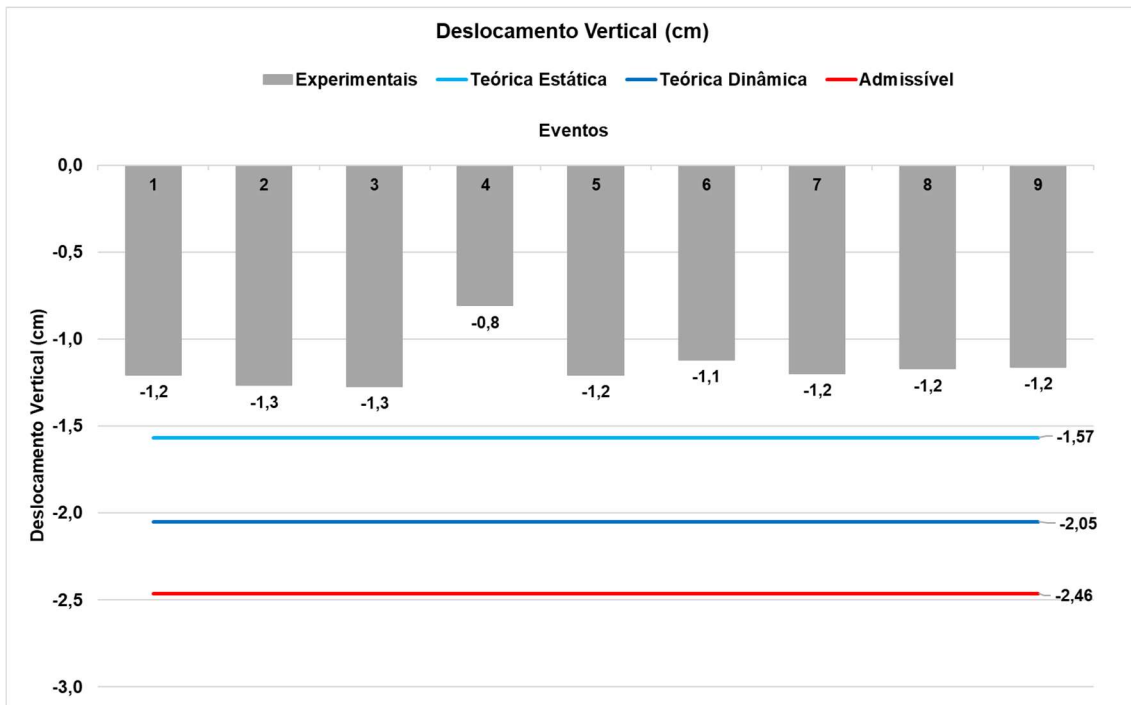
deslocamentos teóricos e admissíveis. Já o Gráfico 6, apresenta o espectro de deslocamentos para o evento 2.

Figura 20 - Transdutor de deslocamento.



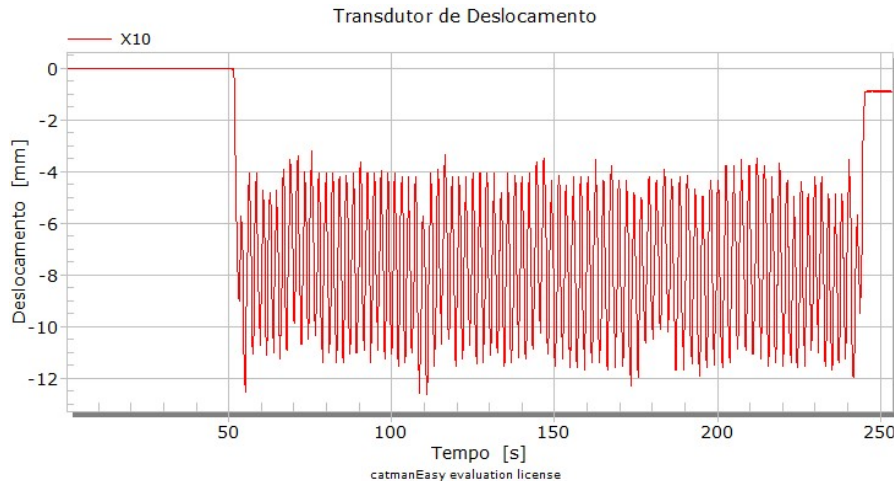
Fonte: Recuperação Engenharia Ltda, 2021.

Gráfico 5 - Comparativo de deslocamentos experimentais, teórico (estático e dinâmico) e admissível (L/640).



Fonte: Recuperação Engenharia Ltda, 2021.

Gráfico 6 - Transdutor de Deslocamento – Evento 2 – Deslocamento (mm).



Fonte: Recuperação Engenharia Ltda, 2021.

Os extensômetros 5, 6, 9, 10, 13, 14, 17 e 18 apresentaram resultados menos relevantes para a avaliação da estrutura, com tensões significativamente inferiores àquelas observadas nos respectivos sensores centrais. Deste modo, esses sensores extremos não se mostram predominantes para a análise estrutural.

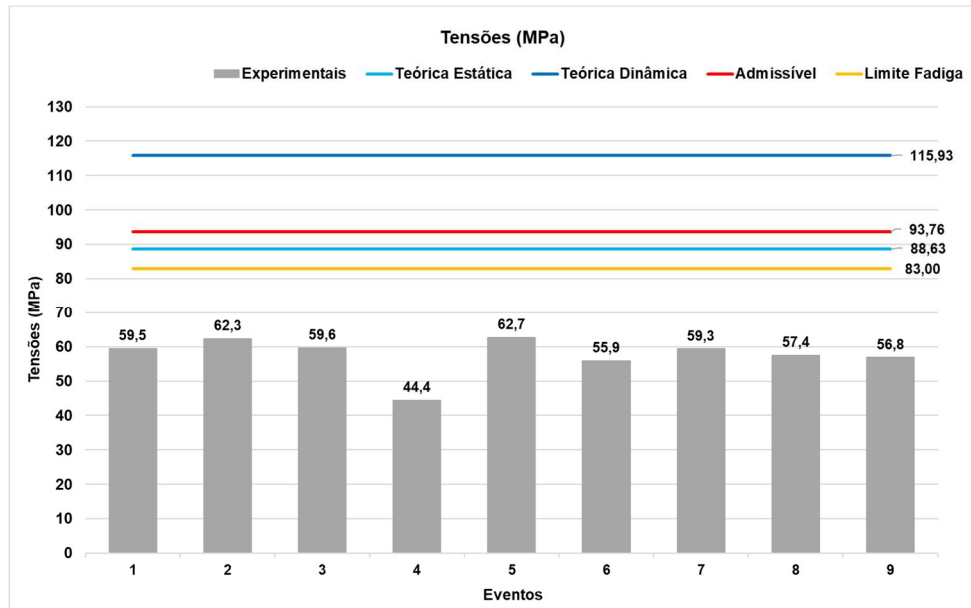
Outro aspecto analisado e observado nos Gráficos 3 e 7 é quanto a fadiga, sendo relevante para esta ponte os elementos: vigas principais e transversinas intermediárias.

Vigas Principais:

As vigas principais possuem detalhes construtivos mais críticos localizados nas soldas transversais entre enrijecedores e mesas inferiores das vigas-caixão, com limite admissível de fadiga de 83 MPa (σ_{TH}), conforme norma americana de projeto de estruturas ferroviárias AREMA.

O extensômetro correspondente a esse ponto que apresenta valor máximo de variação de tensão igual a 62,71 MPa (σ_{SR}) é o Extensômetro 1, conforme indicado no Gráfico 7. Observa-se que a tensão máxima experimental, evento 5, não supera o limite.

Gráfico 7 - Extensômetro 1: Viga Principal Esquerda – Mesa Inferior – Meio do Vão.



Fonte: Recuperação Engenharia Ltda, 2021.

Portanto, pode-se afirmar que, para as condições atuais de tráfego, danos por fadiga não são esperados para esses elementos.

Transversinas Intermediárias:

As transversinas intermediárias possuem detalhes construtivos mais críticos localizados na transposição da alma sobre a junta central de mesa inferior, com limite admissível de fadiga de 48 MPa (σ_{TH}), conforme norma americana de projeto de estruturas ferroviárias AREMA.

O extensômetro correspondente a esse ponto que apresentou situação mais desfavorável é o extensômetro 15, Gráfico 3, que supera frequentemente esse limite, conforme foi observado nos resultados apresentados da extensometria, com tensão mínima de 60,2 MPa e máxima de 82,3 MPa.

Portanto, foi realizada uma estimativa de vida útil teórica, para os níveis de tensão experimentadas durante os ensaios.

Esta estimativa levou a uma vida útil teórica de 6,9 anos, considerando-se um fluxo de 15 composições diárias (quantidade de trens por dia).

5 CONCLUSÃO

Ao longo deste estudo foram apresentados o ciclo de inspeções, ensaios, metodologias e os resultados obtidos na instrumentação da estrutura da ponte ferroviária.

De forma geral, foi possível observar a importância das inspeções para uma obra de arte especial, sobretudo a realização dos reparos afim de evitar o progresso das patologias e futuras perdas significativas de função estrutural e de durabilidade dos elementos, o que pode culminar na necessidade de trocas dos mesmos e/ou reforços, que são atividades mais onerosas e que demandam cronograma específico, com possível utilização de estruturas secundárias para apoio e interrupção do fluxo de passagem dos trens. Um exemplo seriam as corrosões que a cada novo ciclo de inspeção se mostravam mais avançadas, comprometendo elementos de grande importância estrutural, levando a necessidade de projeto de reforço com a colocação de chapas de reforço e troca de algumas peças.

Os dados obtidos nas medições experimentais dos ensaios de instrumentação permitiram conhecer o comportamento real da estrutura durante sua operação, ou seja, durante o tráfego ferroviário. Sendo importante ressaltar que os ensaios ocorreram após parte da obra de reforço ter sido concluída.

Na análise de extensometria, observaram-se tensões experimentais na estrutura durante os ensaios inferiores àquelas teóricas calculadas e às tensões admissíveis do aço, para todos os 22 extensômetros instalados. Como consta nos Gráficos 3 e 7, que são os casos em que houveram as maiores tensões de tração experimentais, extensômetros 1 e 15, e Gráfico 1, extensômetro 4, maior tensão de compressão. Isso significa que no aspecto de tensões, a operação da ponte encontra-se em condições adequadas de segurança estrutural, e abaixo dos valores esperados, tanto para as vigas principais quanto para as transversinas. Também é possível afirmar que as tensões observadas experimentalmente foram inferiores aos resultados previstos em modelos de cálculo.

Para efeito de deslocamentos verticais da estrutura, identificou-se que as flechas experimentais foram inferiores às teóricas calculadas e ao limite recomendado ($L/640$). Isso significa que no aspecto de deslocabilidade, a operação da ponte encontra-se em condições adequadas, dentro do limite de serviço.

Em relação à fadiga, nas condições atuais de tráfego operacional, este estudo conduziu a duas conclusões importantes: as vigas principais apresentam níveis seguros de variação de tensão; e não representam risco; já nas transversinas intermediárias, as variações experimentais superam as admissíveis, e representam um ponto de atenção.

Nas vigas principais, todas as variações de tensões experimentais foram inferiores ao limite de fadiga do detalhe correspondente. Como observado no Gráfico 7, que apresentou a maior variação de tensão de 62,71 MPa, e não superou o limite em nenhum evento medido.

Assim, pode-se afirmar que, se mantidas as condições atuais de tráfego, danos por fadiga não são esperados para esses elementos.

Nas transversinas intermediárias as variações de tensões experimentais superaram frequentemente o limite de fadiga do detalhe correspondente. Sobretudo no extensômetro E15, que apresentou as maiores variações.

A partir desta constatação, foi realizada uma estimativa de vida útil teórica, para os níveis de tensão experimentadas durante o ensaio. Chegou-se a uma vida útil de 6,9 anos. Como a estrutura já possui idade superior a esse período, esse resultado é um sinal de alerta. Portanto, em teoria, já se espera o surgimento de falhas por fadiga nos detalhes críticos das transversinas intermediárias.

Uma análise mais apurada, deve ser realizada com o intuito de se obter previsões mais precisas e planos de ações serem elaborados para tratamento da anomalia.

BIBLIOGRAFIA

- ADOLFATO, Rodrigo Piernas; CAMACHO, Jefferson Sidney; BRITO, Gilberto Antonio de. Extensometria básica. Ilha Solteira: UNESP, 2004.
- AFONSO, Daniel Fabre. Verificação à fadiga de pontes metálicas ferroviárias. 2007.
- ANDREUCCI, Ricardo. Líquidos Penetrantes. Abende, 2013.
- The Manual of Railway Engineering - American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA, 2019);
- VALIDO, Aníbal; SILVA, José Duarte. Introdução à extensometria eléctrica de resistência. 1997. Científica de Mecânica dos Meios Sólidos, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Superior Tecnologia. Setúbal, 1997.
- ANDREUCCI, Ricardo. Aplicação Industrial: Ensaio por Ultra-som, ed. Jul./2008, LTDA, 2008.
- ALMEIDA, R.O. Ruptura de longarinas metálicas nas pontes da superintendência regional de Curitiba no trecho Paranaguá-Curitiba – Um caso de colapso devido à fadiga. Joinville, XXXIIª Reunião dos Residentes – RFFSA. 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9452: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2019.
- DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. (2003) Glossário dos Termos Ferroviários. Versão 1, Brasília 2003. 88 p.
- DOS SANTOS CASTILHO, Amanda Gabriela. A matriz ferroviária e o impacto no transporte de cargas pelo Porto de Santos. Logística e Gestão da Cadeia de Suprimentos na Área Portuária Volume, p. 56. 2022.
- HIBBELER, Russell Charles. Resistência dos materiais. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2009.
- HOFFMANN, Karl. An introduction to measurements using strain gauges. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989.
- RECUPERAÇÃO ENGENHARIA, Relatórios de Inspeções, 2017 a 2021;
- SILVA, Carlos Eduardo; CAMARGO, José Claudineis. DEFICIÊNCIAS E PROBLEMAS NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS. 2013.
- KYOWA. General-purpose foil strain gages. Disponível em: < https://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/strain_gages/kfrb/index.html>. Acesso em: 15 dez. 2022.

- WEBER, Albano Luiz. Metrologia e instrumentação: Extensometria (Instrumentação). 2008,15 p. Trabalho acadêmico (Artigo) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, 2008.