

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Breno Teixeira Silva Filho

Análise da fadiga em pontes ferroviárias de estrutura metálica

Juiz de Fora

2026

Breno Teixeira Silva Filho

Análise da fadiga em pontes ferroviárias de estrutura metálica

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do curso de
Engenharia Civil da Universidade Federal
de Juiz de Fora como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Data da aprovação: 03/07/2026

Orientadora: Profa. D.Sc. Paula de Oliveira Ribeiro

Juiz de Fora

2026

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Filho, Breno Teixeira Silva.

Análise da fadiga em pontes ferroviárias de estrutura metálica /
Breno Teixeira Silva Filho. -- 2026.
114 p. : il.

Orientadora: Paula de Oliveira Ribeiro

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade
Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2026.

1. Fadiga. 2. SAP2000. 3. Ponte. 4. Ferroviária. 5. Rainflow. I.
Ribeiro, Paula de Oliveira, orient. II. Título.

Breno Teixeira Silva Filho

Análise da fadiga em pontes ferroviárias de estrutura metálica

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do curso de
Engenharia Civil da Universidade Federal
de Juiz de Fora como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Aprovado em 03 de julho de 2026

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **PAULA DE OLIVEIRA RIBEIRO**
Data: 08/07/2026 17:54:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. D.Sc. Paula de Oliveira Ribeiro – Orientadora
Universidade Federal de Juiz de Fora

Documento assinado digitalmente
 **RODOLFO DE AZEVEDO PALHARES**
Data: 08/07/2026 11:16:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. D.Sc. Rodolfo de Azevedo Palhares
Universidade Federal de Juiz de Fora

Documento assinado digitalmente
 **WANDERSON FERNANDO MAIA**
Data: 08/07/2026 13:33:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. D.Sc. Wanderson Fernando Maia
Universidade Federal de Juiz de Fora

“O importante é não parar de questionar.
A curiosidade tem sua própria razão de existir.”
(Albert Einstein)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à minha família por todo o apoio ao longo dessa trajetória. À minha mãe, Vivianni, que sempre esteve ao meu lado, oferecendo o suporte necessário em todos os momentos, desde as caronas para a faculdade até as palavras de incentivo nos dias mais difíceis e cansativos. Ao meu pai, Breno, que, mesmo com a distância, sempre fez parte desse processo e fez questão de estar presente em cada etapa. Às minhas irmãs, Gia e Bruna, pelo carinho, apoio e incentivo constantes.

Ao meu namorado, Marcelo, por permanecer ao meu lado durante toda essa caminhada. Mesmo com nossas rotinas muitas vezes incompatíveis, esteve presente nos momentos mais corridos, oferecendo apoio, compreensão e incentivo.

Aos meus amigos, tanto aqueles que conheci durante a graduação e compartilharam comigo essa jornada quanto aqueles que fazem parte da minha vida desde o colégio ou por outros caminhos. Agradeço pela amizade, companheirismo e pelos momentos compartilhados ao longo desses anos. Saibam que todos foram muito importantes nessa caminhada.

À ENGETEC Projetos e Engenharia, pela oportunidade de estágio e pelos aprendizados proporcionados ao longo desse período. Em especial, aos meus supervisores Eduardo Toledo, Fernando Carvalho e Pedro Caldeira, pelos ensinamentos, pela confiança e por contribuírem significativamente para meu desenvolvimento profissional, permitindo que eu me encontrasse na área de projetos.

À minha orientadora, Paula Ribeiro, por toda a paciência, dedicação e pelos conhecimentos compartilhados, não apenas durante o desenvolvimento deste trabalho, mas também nas disciplinas ministradas ao longo da graduação, que foram fundamentais para minha formação acadêmica e profissional. Minha trajetória certamente não teria sido a mesma sem a oportunidade de ter sido seu aluno e orientando.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) e a todos os seus colaboradores por proporcionarem um ensino superior público, gratuito e de excelência acadêmica. Sou grato pela formação recebida e por todas as oportunidades de aprendizado e crescimento proporcionadas ao longo da graduação.

RESUMO

O modal ferroviário desempenha papel estratégico na logística brasileira, e as pontes metálicas ferroviárias, muitas projetadas no século XX e ainda em operação, estão sujeitas a elevada repetição de ciclos de carregamento que favorece o fenômeno da fadiga, um processo de degradação progressivo e silencioso de difícil detecção por inspeção visual convencional. Nesse contexto, identificou-se uma lacuna na ABNT NBR 17245 (2026) - Ações devidas ao tráfego de veículos ferroviários e metroferroviários em pontes, viadutos e outras estruturas, que se limita a indicar a Regra de Palmgren-Miner sem prescrever diretrizes metodológicas detalhadas para a obtenção das variações de tensão necessárias à sua aplicação em estruturas ferroviárias. Diante disso, o presente trabalho objetivou avaliar a vida útil remanescente à fadiga da ponte ferroviária em treliça metálica sobre o Rio Urussanga (SC), operada pela Ferrovia Tereza Cristina, por meio de modelagem numérica e métodos de contagem de ciclos. Para tanto, desenvolveu-se um modelo numérico tridimensional da estrutura no software SAP2000, baseado no Método dos Elementos Finitos, simulando a passagem de quatro trens-tipo (TB240, TB312, TB376 e TB416) para extração dos históricos de tensão nos elementos críticos, os quais foram processados pelo algoritmo *Rainflow* e avaliados pela Regra de Miner com curvas S-N estabelecidas pela AREMA (2010) – *American Railway Engineering and Maintenance-of-way*, norma técnica norte-americana de referência internacional para o projeto, dimensionamento e avaliação de estruturas metálicas ferroviárias, e pela ABNT NBR 17245 (2026). Os resultados indicaram o elemento mais solicitado, com estimativas de vida útil remanescente que variam expressivamente conforme o trem-tipo considerado: 469 anos para o TB240, 78 anos para o TB312, 53 anos para o TB376 e apenas 2 anos para o TB416. Conclui-se que a metodologia proposta oferece um roteiro técnico robusto para a avaliação da integridade de pontes ferroviárias metálicas antigas, preenchendo a lacuna normativa identificada por meio da integração entre a ABNT NBR 17245 (2026), a AREMA (2010) e o algoritmo *Rainflow*.

Palavras-chave: Fadiga; SAP2000; Ponte; Ferroviária; *Rainflow*.

ABSTRACT

Rail transportation plays a strategic role in the Brazilian logistics network, and steel railway bridges, many of which were designed during the twentieth century and remain in service, are subjected to a high number of repeated loading cycles that promote fatigue, a progressive and silent deterioration mechanism that is difficult to detect through conventional visual inspection. In this context, a gap was identified in the Brazilian standard ABNT NBR 17245 (2026) – Actions Due to Railway and Metro-Rail Vehicle Traffic on Bridges, Viaducts, and Other Structures, which is limited to recommending the Palmgren–Miner rule without providing detailed methodological guidelines for determining the stress ranges required for its application to railway structures. Accordingly, this study aimed to evaluate the remaining fatigue life of the steel truss railway bridge spanning the Urussanga River, located in the state of Santa Catarina, Brazil, and operated by Ferrovia Tereza Cristina, through numerical modeling and cycle-counting methods. To this end, a three-dimensional numerical model of the structure was developed in SAP2000 based on the Finite Element Method (FEM). The passage of four standard train load models (TB240, TB312, TB376, and TB416) was simulated to obtain the stress-time histories of the critical structural members. These data were subsequently processed using the Rainflow counting algorithm and evaluated according to the Palmgren–Miner cumulative damage rule in conjunction with the S–N curves established by AREMA (2010) – American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, an internationally recognized North American technical standard for the design, analysis, and assessment of steel railway structures, and by ABNT NBR 17245 (2026). The results identified the most fatigue-critical structural member, with estimated remaining fatigue lives varying considerably according to the train load model considered, namely 469 years for TB240, 78 years for TB312, 53 years for TB376, and only 2 years for TB416. It is concluded that the proposed methodology provides a robust technical framework for assessing the structural integrity of aging steel railway bridges by addressing the identified regulatory gap through the integration of the procedures established in ABNT NBR 17245 (2026), AREMA (2010), and the Rainflow counting algorithm.

Keywords: Fatigue; SAP2000; Bridge; Railway; Rainflow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pesquisas relacionadas à fadiga em pontes metálicas	18
Figura 2 – Curva de Wöhler genérica.....	22
Figura 3 – Faixa de tensão versus número de ciclos para várias categorias de detalhes	30
Figura 4 – Componentes de ponte rebitados	31
Figura 5 – Fluxograma das etapas metodológicas adotadas no desenvolvimento deste trabalho.	34
Figura 6 – Localização do município de Içara, SC	35
Figura 7 – Ponte em estudo	35
Figura 8 – Visão esquemática da ponte	36
Figura 9 – Esquema representativo da treliça	37
Figura 10 – Esquema representativo em planta da ponte	38
Figura 11 – Grade base da estrutura da ponte	40
Figura 12 – Nós, elementos e condições de apoio da estrutura.....	40
Figura 13 – Propriedades do aço A36 no SAP2000	41
Figura 14 – TB240 no SAP2000.....	45
Figura 15 – TB312 no SAP2000.....	45
Figura 16 – TB376 no SAP2000.....	46
Figura 17 – TB416 no SAP2000.....	46
Figura 18 – Características geométricas e cargas dos trens-tipo ferroviários	47
Figura 19 – Combinação utilizada no SAP2000	48
Figura 20 – Casos de carregamentos selecionados para análise	49
Figura 21 – Reações de apoio para o TB240.....	52
Figura 22 – Diagramas de momento fletor nos elementos da ponte	53
Figura 23 – Momento fletor para o elemento 133.....	53
Figura 24 – Momento fletor para o elemento 137.....	54
Figura 25 – Gráfico Tensões Normais – Borda comprimida (TB240).....	55
Figura 26 – Gráfico Tensões Normais – Borda tracionada (TB240).....	56
Figura 27 – Gráfico Tensões de cisalhamento (TB240).....	56
Figura 28 – Gráfico Tensões Normais – Borda comprimida (TB312).....	57
Figura 29 – Gráfico Tensões Normais – Borda tracionada (TB312).....	57

Figura 30 – Gráfico Tensões de cisalhamento (TB312)	58
Figura 31 – Gráfico Tensões Normais – Borda comprimida (TB376).....	58
Figura 32 – Gráfico Tensões Normais – Borda tracionada (TB376).....	59
Figura 33 – Gráfico Tensões de cisalhamento (TB376)	59
Figura 34 – Gráfico Tensões Normais – Borda comprimida (TB416).....	60
Figura 35 – Gráfico Tensões Normais – Borda tracionada (TB416).....	60
Figura 36 – Gráfico Tensões de cisalhamento (TB416)	61
Figura 37 – Resultados <i>Rainflow</i> Tensões Normais – Borda comprimida (TB240)...	62
Figura 38 – Resultados <i>Rainflow</i> Tensões Normais – Borda tracionada (TB240)....	62
Figura 39 – Resultados <i>Rainflow</i> Tensões de cisalhamento (TB240).....	63
Figura 40 – Resultados <i>Rainflow</i> Tensões Normais – Borda comprimida (TB312)...	63
Figura 41 – Resultados <i>Rainflow</i> Tensões Normais – Borda tracionada (TB312)....	64
Figura 42 – Resultados <i>Rainflow</i> Tensões de cisalhamento (TB312).....	64
Figura 43 – Resultados <i>Rainflow</i> Tensões Normais – Borda comprimida (TB376)...	65
Figura 44 – Resultados <i>Rainflow</i> Tensões Normais – Borda tracionada (TB376)....	65
Figura 45 – Resultados <i>Rainflow</i> Tensões de cisalhamento (TB376).....	66
Figura 46 – Resultados <i>Rainflow</i> Tensões Normais – Borda comprimida (TB416)...	66
Figura 47 – Resultados <i>Rainflow</i> Tensões Normais – Borda tracionada (TB416)....	67
Figura 48 – Resultados <i>Rainflow</i> Tensões de cisalhamento (TB416).....	67
Figura 49 – Dano acumulado por trem-tipo.....	70
Figura 50 – Dano acumulado por categoria da AREMA (2010)	72
Figura 51 – Modificações no modelo para o Caso 1	73
Figura 52 – Modificações no modelo para o Caso 2	74
Figura 53 – Dimensões da transversina com reforço	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores dos fatores de redução para combinação frequente de fadiga...	25
Tabela 2 – Número de ciclos de estresse, N.....	26
Tabela 3 – Faixa de tensão de fadiga admissível, S_{Rfat} (MPa).....	27
Tabela 4 – Faixa de tensão de fadiga admissível para membros com fratura crítica, S_{Rfat} (MPa).....	27
Tabela 5 – Constante A e Limiares para Categorias de Detalhe.....	30
Tabela 6 – Descrição das categorias	32
Tabela 7 – Descrição dos perfis da estrutura	38
Tabela 8 – Seções criadas no SAP2000	42
Tabela 9 – Tabela de carregamentos utilizados	43
Tabela 10 – Carga dos trens-tipo	47
Tabela 11 – Carga dos trens-tipo ferroviários	47
Tabela 12 – Descrição da categoria da transversina	68
Tabela 13 – Descrição de outras categorias da transversina.....	71
Tabela 14 – Vida Útil da ponte – trens-tipo isolados	75
Tabela 15 – Vida Útil da ponte - cenário de transição normativa	75
Tabela 16 – Comparativo dos cenários com e sem reforço	77
Tabela 17 – Vida Útil da ponte - cenário com reforço das longarinas	77

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
1.2	JUSTIFICATIVA	16
1.3	ESTRUTURA DO TEXTO	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE FADIGA	20
2.2	MÉTODOS DE ANÁLISE	21
2.2.1	Curva de Wöhler (S-N)	21
2.2.2	Método dos elementos finitos	23
2.3	NORMAS TÉCNICAS	24
2.3.1	ABNT NBR 17245 (2026)	24
2.3.2	AREMA (2010)	25
3	METODOLOGIA	33
3.1	DESCRIÇÃO DA PONTE	34
3.2	COLETA DE DADOS	36
3.3	MODELAGEM	39
3.4	EXTRAÇÃO DOS RESULTADOS	49
3.5	CÓDIGO RAINFLOW	50
3.6	ANÁLISES	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5	CONCLUSÃO	79
	REFERÊNCIAS	82
	APÊNDICE A – CÁLCULO DAS DIFERENÇAS DE TENSÕES	85
	APÊNDICE B – CÁLCULO DAS DIFERENÇAS DE TENSÕES	87
	APÊNDICE C – CÁLCULO DO DANO ACUMULADO	95
	APÊNDICE D – DANO ACUMULADO COM MUDANÇA DE CATEGORIA	103
	APÊNDICE E – DANO ACUMULADO COM MUDANÇA DE VELOCIDADE	107
	APÊNDICE F – DANO ACUMULADO (TRANSVERSINAS REFORÇADAS)	115

1 INTRODUÇÃO

O modal ferroviário desempenha papel estratégico na logística global, destacando-se pela elevada eficiência energética e pela capacidade de transportar grandes volumes de carga a longas distâncias, com menores custos operacionais e impactos ambientais quando comparado ao modal rodoviário (CNT, 2024). No contexto brasileiro, as ferrovias assumem relevância particular no escoamento de commodities agrícolas e minerais, sustentando parcela expressiva da economia nacional e da competitividade no comércio exterior (ANTF, 2025).

A infraestrutura que viabiliza esse sistema é composta por um amplo patrimônio técnico, no qual as pontes metálicas em aço se configuram como obras de arte especiais indispensáveis à continuidade da malha ferroviária (PFEIL; PFEIL, 2013). Muitas dessas estruturas, a exemplo da ponte sobre o Rio Urussanga analisada neste trabalho, foram projetadas e executadas ao longo do século XX, segundo critérios de dimensionamento compatíveis com as condições operacionais da época, permanecendo, entretanto, em plena utilização até os dias atuais.

A longevidade dessas pontes constitui um fator de preocupação do ponto de vista estrutural, pois, diferentemente das pontes rodoviárias, as pontes ferroviárias estão submetidas a um número significativamente maior e mais frequente de ciclos de carregamento ao longo de sua vida útil (UNSWORTH, 2016). A repetição contínua dessas solicitações favorece o desenvolvimento do fenômeno da fadiga no material, processo em que a aproximação ao número limite de ciclos admissíveis eleva progressivamente a probabilidade de iniciação e propagação de danos (AREMA, 2010). Trata-se de um mecanismo de degradação que não se manifesta de forma evidente, como ocorre com a corrosão ou com fissuras inicialmente visíveis, mas que evolui de maneira gradual e silenciosa até a ruptura (PFEIL; PFEIL, 2013).

Conforme discutido por Ye, Su e Han (2014), essa característica torna a fadiga particularmente crítica em pontes ferroviárias metálicas, uma vez que sua identificação por métodos convencionais de inspeção visual é limitada, podendo o dano tornar-se perceptível apenas em estágios avançados. Essa criticidade reflete-se na recente atualização do panorama normativo brasileiro, que busca inserir critérios mais rigorosos para a avaliação de fadiga em estruturas ferroviárias de aço existentes.

Diante das limitações de abordagens baseadas exclusivamente em inspeções visuais e verificações estáticas simplificadas, a modelagem numérica tem se

consolidado como ferramenta fundamental para a avaliação do comportamento real de pontes metálicas ferroviárias. Por meio de modelos computacionais detalhados, torna-se possível representar com maior fidelidade os elementos estruturais da superestrutura, como longarinas, transversinas, treliças e o sistema de apoio dos dormentes, permitindo a obtenção de estados de tensão mais condizentes com a resposta estrutural sob a passagem de cargas móveis. Nesse sentido, o emprego de softwares de análise estrutural baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF), como o SAP2000, permite a simulação de modelos dinâmicos, superando a limitação de análises baseadas apenas em esforços máximos estáticos e fornecendo informações essenciais para avaliações mais refinadas relacionadas à fadiga.

Para que os históricos de tensão obtidos por meio da modelagem numérica possam ser empregados na avaliação da fadiga, torna-se necessário converter essas variações de tensão em ciclos equivalentes, passíveis de comparação com a resistência à fadiga descrita pelas curvas S-N (amplitude de tensão por número de ciclos), conforme preconizado por normas internacionais como o *American Railway Engineering and Maintenance-of-way* (AREMA, 2010) ou a ABNT NBR 17245 (2026) - Ações devidas ao tráfego de veículos ferroviários e metroferroviários em pontes, viadutos e outras estruturas. Nesse cenário, o método de contagem de ciclos conhecido como *Rainflow* destaca-se como procedimento amplamente difundido e aceito na literatura técnica, por sua capacidade de decompor históricos complexos de tensão em faixas de variação e respectivas quantidades de ciclos. A aplicação desse algoritmo permite transformar a resposta temporal da estrutura em informações quantitativas sobre a repetição das faixas de tensão atuantes, constituindo etapa essencial para a estimativa da vida útil à fadiga de elementos metálicos submetidos a carregamentos variáveis. A ABNT NBR 17245 (2026) apresenta limitações em seu escopo quanto ao dimensionamento à fadiga. O texto técnico não prescreve as diretrizes metodológicas para a avaliação detalhada do fenômeno, limitando-se a recomendar a adoção da regra de acúmulo de dano linear de *Palmgren-Miner* e a especificar os coeficientes aplicáveis à combinação frequente de ações.

Diante desse contexto, o presente trabalho insere-se na busca por metodologias que permitam estimar, de forma mais realista, a vida útil à fadiga de pontes ferroviárias metálicas em operação. Para isso, propõe-se a modelagem numérica detalhada de uma ponte em treliça, a obtenção dos históricos de tensão em pontos estruturalmente

relevantes, a aplicação do método *Rainflow* para a contagem dos ciclos solicitantes e, por fim, a avaliação do dano acumulado com base em curvas S–N consagradas na literatura. A partir dessa abordagem, busca-se contribuir para a compreensão do comportamento à fadiga dessas estruturas, fornecendo subsídios técnicos que possam auxiliar na tomada de decisão quanto à manutenção e à preservação de pontes metálicas ferroviárias existentes.

1.1 OBJETIVOS

Considerando os desafios apresentados pela degradação por fadiga em estruturas ferroviárias metálicas centenárias e a necessidade de métodos de avaliação mais precisos, este trabalho propõe o estudo da integridade estrutural por meio de ferramentas computacionais. A seguir, detalham-se os propósitos deste estudo, subdivididos em objetivo geral e objetivos específicos.

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a vida útil remanescente à fadiga de uma ponte ferroviária em treliça metálica, por meio de modelagem numérica e métodos de contagem de ciclos, verificando sua integridade estrutural frente às solicitações atuais.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre o fenômeno da fadiga em estruturas de aço, com foco em pontes ferroviárias antigas e nas diretrizes das normas ABNT NBR 17245 (2026) e AREMA (2010);
- Desenvolver um modelo numérico tridimensional da ponte (estudo de caso) utilizando o software SAP2000, representando fielmente os elementos da treliça e do sistema de estrado;
- Simular a passagem de trens-tipo (carregamentos móveis) para a extração dos históricos de tensão nos pontos e conexões considerados críticos para a fadiga;
- Aplicar o algoritmo de contagem de ciclos *Rainflow* para converter os históricos de tensão complexos em faixas de variação de tensão e suas respectivas frequências;

- Calcular o dano acumulado e estimar a vida útil remanescente da estrutura utilizando a Regra de Miner e as curvas S-N apropriadas para cada detalhe construtivo;
- Analisar os resultados obtidos à luz das exigências normativas vigentes, discutindo a vida útil da ponte em função do trem-tipo adotado na análise.

1.2 JUSTIFICATIVA

O avanço das investigações sobre fadiga em pontes metálicas acompanha diretamente a trajetória de desenvolvimento das estruturas de aço ao longo da história. Conforme destacam Ye, Su e Han (2014), as primeiras pesquisas sistemáticas emergiram no final do século XIX, impulsionadas pelo aumento das falhas observadas em pontes ferroviárias. O crescimento dos carregamentos cíclicos mostrou que o comportamento do aço sob repetidas solicitações não poderia ser adequadamente explicado por critérios puramente estáticos. A partir desse marco histórico, consolidou-se, ao longo do século XX, um conjunto consistente de modelos teóricos, abrangendo tanto abordagens baseadas em curvas S–N quanto aplicações da mecânica da fratura para o estudo da propagação de trincas. Esses avanços evidenciam que, embora investigado há mais de cem anos, o fenômeno da fadiga continua essencial para a compreensão do desempenho de estruturas metálicas de longa durabilidade.

No Brasil, diversos estudos também reconhecem a relevância histórica da problemática da fadiga em pontes metálicas. Pesquisas desenvolvidas por Caixeta (2010) e Leal (2014), envolvendo pontes ferroviárias centenárias, demonstram que essas estruturas já foram submetidas a milhões de ciclos de carregamento ao longo de sua vida útil, tornando a fadiga um dos mecanismos de degradação mais relevantes. Tal constatação evidencia que a temática extrapola o campo estritamente teórico, assumindo papel fundamental na gestão, conservação e manutenção de ativos de infraestrutura, especialmente em países como o Brasil, que ainda possuem grande quantidade de obras antigas em operação.

Apesar dos avanços significativos observados nas últimas décadas, a literatura especializada ainda aponta importantes desafios relacionados à avaliação precisa da fadiga em pontes metálicas. Conforme discutido por Ye, Su e Han (2014), uma das principais dificuldades está associada à estimativa da vida residual de estruturas em

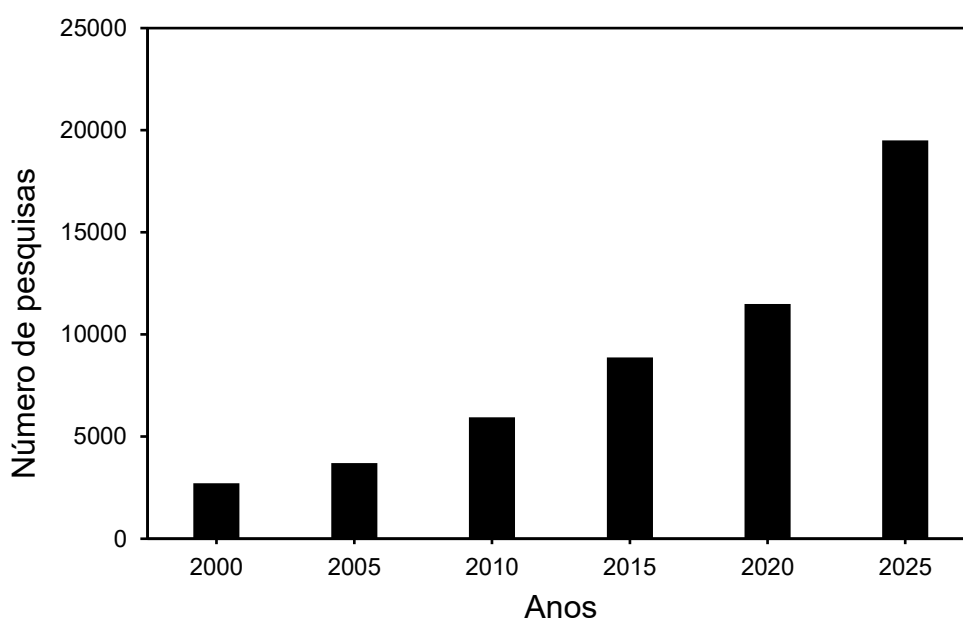
serviço. Pontes submetidas a históricos complexos de carregamento, intervenções estruturais sucessivas e diferentes condições ambientais apresentam elevado grau de incerteza, dificultando a formulação de modelos confiáveis de deterioração por fadiga. Mesmo métodos probabilísticos modernos apresentam limitações quando inexistem dados abrangentes de inspeção ou monitoramento contínuo das estruturas.

Outro aspecto amplamente discutido em pesquisas recentes refere-se à representação realista das ações de tráfego. Estudos conduzidos por Ye, Su e Han (2014), bem como por Junges (2017), demonstram que variações no peso, na frequência e na velocidade dos veículos influenciam significativamente a estimativa da vida útil de pontes metálicas, sobretudo em rodovias com elevado fluxo de cargas pesadas. Nesse contexto, a adoção de simplificações excessivas nos parâmetros de carregamento pode conduzir à superestimação da durabilidade estrutural, aumentando os riscos operacionais associados à estrutura. Essa problemática torna-se ainda mais crítica em regiões urbanas densamente ocupadas e em países em desenvolvimento, nos quais o crescimento do tráfego pesado nem sempre é acompanhado por adequadas intervenções de reforço ou modernização estrutural.

Os aspectos construtivos também figuram entre os fatores de maior sensibilidade na análise da fadiga. Regiões contendo soldas, ligações parafusadas, enrijecedores e descontinuidades geométricas são reconhecidas como zonas de elevada concentração de tensões e, conseqüentemente, classificadas como detalhes críticos à fadiga. Entretanto, a presente pesquisa não tem como foco a avaliação localizada desses detalhes, concentrando-se na análise global do comportamento estrutural, conforme estratégia metodológica apresentada no Capítulo 3. Estudos desenvolvidos por Fisher e Roy (2011), assim como por Haghani, Al-Emrani e Heshmati (2012), evidenciam que imperfeições construtivas, descontinuidades geométricas e processos localizados de degradação podem reduzir significativamente a resistência à fadiga de pontes metálicas. Esses efeitos tornam necessária a utilização de modelos analíticos mais refinados, aliados à implementação de programas rigorosos de inspeção e monitoramento estrutural. Diante dessa complexidade, os autores convergem ao afirmar que a avaliação da fadiga em pontes metálicas deve ser conduzida de forma integrada, contemplando simultaneamente o comportamento mecânico dos materiais, os detalhes construtivos, as ações reais de carregamento e os condicionantes ambientais.

A revisão da literatura recente confirma que a fadiga em pontes metálicas permanece como um campo de pesquisa dinâmico e em constante evolução, conforme pode ser observado no gráfico apresentado na Figura 1, elaborado com base em uma busca realizada no Google Scholar utilizando o termo 'fadiga em pontes metálicas', cujos resultados foram organizados em intervalos anuais de publicação. Ainda assim, persistem lacunas metodológicas e limitações relacionadas à obtenção de avaliações mais precisas e representativas das condições reais de operação. Segundo Ye, Su e Han (2014), as tendências atuais concentram-se na ampliação do uso de métodos probabilísticos e de sistemas de monitoramento estrutural contínuo, com o objetivo de aprimorar a previsão da vida útil residual das estruturas. Entretanto, a implementação dessas abordagens ainda enfrenta desafios significativos, relacionados principalmente à escassez de bancos de dados abrangentes, aos elevados custos de instrumentação e à necessidade de equipes com formação multidisciplinar especializada.

Figura 1 – Pesquisas relacionadas à fadiga em pontes metálicas



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

No contexto brasileiro, essas lacunas tornam-se ainda mais evidentes. O país possui um expressivo conjunto de pontes metálicas antigas, muitas delas submetidas a tráfego intenso, condições ambientais agressivas e regimes de manutenção frequentemente insuficientes ou descontínuos, fatores que contribuem para a

aceleração dos processos de deterioração estrutural (VITÓRIO, 2014). A escassez de estudos nacionais fundamentados em inspeções sistemáticas, históricos confiáveis de carregamento e programas de monitoramento estrutural contínuo dificulta a adequada calibração e aplicação dos modelos de avaliação de fadiga desenvolvidos a partir de pesquisas internacionais (YE; SU; HAN, 2014). Soma-se a esse cenário o fato de que diretrizes técnicas nacionais apontam deficiências recorrentes no cadastramento, na inspeção e no acompanhamento das Obras de Arte Especiais ao longo de sua vida útil (DNIT, 2010). Ademais, ao se examinar a ABNT NBR 17245 (2026), observa-se a falta de procedimentos explicitamente estabelecidos para a análise da fadiga em pontes metálicas, o que evidencia uma lacuna normativa relevante e reforça a necessidade de pesquisas aplicadas voltadas à realidade brasileira.

1.3 ESTRUTURA DO TEXTO

Este Trabalho de Conclusão de Curso está organizado em cinco capítulos fundamentais para a compreensão da pesquisa. O Capítulo 1 apresenta a introdução, a justificativa e a contextualização do tema, definindo o problema de pesquisa e os objetivos almejados. Na sequência, o Capítulo 2 dedica-se à fundamentação teórica, abordando conceitos essenciais sobre o fenômeno da fadiga, as propriedades do aço e a revisão das diretrizes normativas da ABNT NBR 17245 (2026) e do manual AREMA (2010). O Capítulo 3 descreve a metodologia, detalhando o estudo de caso da ponte sobre o Rio Urussanga, a elaboração do modelo computacional no software SAP2000 e os parâmetros de simulação adotados. Já o Capítulo 4 expõe a análise dos resultados obtidos, compreendendo o processamento via algoritmo Rainflow e o cálculo do dano acumulado para a estimativa da vida útil remanescente. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais, sintetizando as contribuições do estudo, suas limitações e sugestões para pesquisas futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE FADIGA

A fadiga em pontes metálicas é um fenômeno de dano progressivo causado por tensões cíclicas repetidas ao longo do tempo, que podem levar à formação e propagação de trincas mesmo quando as tensões máximas aplicadas estão bem abaixo da resistência estática do aço. Esse processo ocorre devido à repetição de cargas móveis e cíclicas no geral, que induzem variações de tensão nos elementos estruturais, resultando em nucleação de fissuras em descontinuidades como soldas, furos de parafusos e mudanças bruscas de geometria. A evolução dessas fissuras pode comprometer a integridade da estrutura se não houver controle e manutenção adequados. A literatura clássica (SURESH, 1998) e normas internacionais como a EN 1993-1-9 (CEN, 2005) e a AREMA (2010), tratam o fenômeno de fadiga considerando curvas de tensão por número de ciclos (S-N), classes de detalhe e limites de tensões admissíveis, fundamentais para o dimensionamento e a avaliação de durabilidade de pontes de aço.

Os carregamentos responsáveis pela fadiga em pontes metálicas são predominantemente cargas móveis e cíclicas, como o tráfego de veículos, trens ou pedestres, que produzem variações contínuas de esforço nos elementos estruturais. Cada passagem de carga gera ciclos de tensão, e a repetição desses ciclos ao longo da viga útil é o que gradualmente gera e propaga fissuras por fadiga. Além das cargas diretas de tráfego, efeitos dinâmicos (impactos, frenagens e irregularidades no pavimento), vibrações induzidas pelo vento e variações térmicas também contribuem para amplificar as tensões alternadas nos componentes metálicos. Segundo o *Steel Bridge Design Handbook – Design for Fatigue* (FHWA, 2015) e os estudos de Fisher et al. (2014), o comportamento à fadiga depende não apenas da intensidade das cargas, mas também da frequência e distribuição dos ciclos, da rigidez dos detalhes construtivos e da qualidade das ligações soldadas ou parafusadas, fatores decisivos na durabilidade estrutural.

A vida útil de uma ponte metálica está intimamente ligada ao seu comportamento à fadiga, pois a repetição de carregamentos cíclicos ao longo do tempo determina o número de ciclos que cada componente pode suportar antes da iniciação e propagação das trincas críticas. De acordo com Suresh (1998) e o Eurocode 3 – Parte 1-9 (CEN, 2025), a durabilidade estrutural pode ser estimada por meio de curvas S-

N, que relacionam a amplitude de tensão e o número de ciclos até a falha. Enquanto as normas como *AASSTO LRFD Bridge Design Specifications* (AASHTO, 2010) e os estudos da *Federal Highway Administration* (FHWA, 2015) estabelecem critérios de projeto e inspeção que buscam garantir que as tensões atuantes permaneçam abaixo dos limites de fadiga durante toda a vida de serviço prevista. Fisher et. al. (2014) destacam que detalhes construtivos inadequados, soldas mal executadas ou sobrecargas não previstas aceleram a degradação, reduzindo significativamente a vida útil da estrutura. Por isso, a avaliação da fadiga é essencial não apenas no projeto inicial, mas também nas fases de monitoramento, manutenção e reabilitação, sendo um fator determinante na estimativa da vida remanescente de pontes metálicas (FRANGOPOL; KIM, 2007).

2.2 MÉTODOS DE ANÁLISE

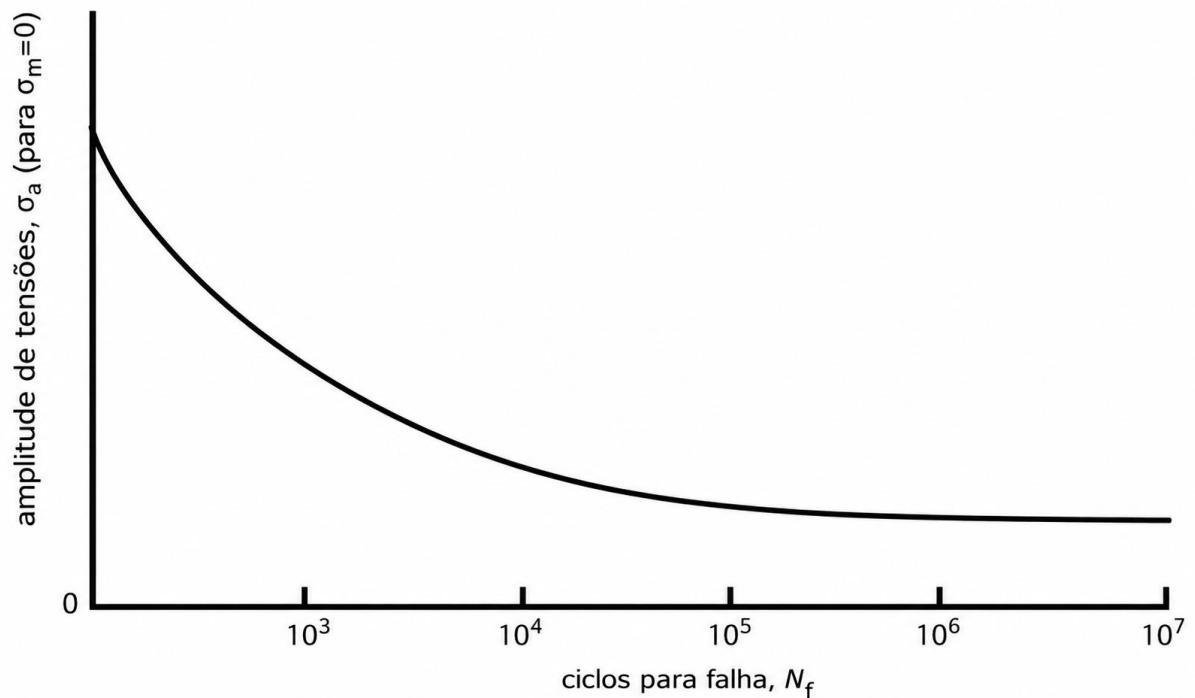
A análise da fadiga em pontes metálicas representa uma etapa fundamental na avaliação do desempenho estrutural, uma vez que possibilita compreender os mecanismos de deterioração decorrentes de carregamentos cíclicos ao longo do tempo. Os métodos de análise de fadiga permitem identificar regiões críticas de concentração de tensões, estimar a propagação das trincas e determinar a vida útil residual dos elementos estruturais. Com o avanço das ferramentas computacionais, dos métodos experimentais e das normas técnicas específicas, tornou possível realizar avaliações mais precisas e práticas de inspeção, manutenção e reabilitação de pontes metálicas em serviço.

2.2.1 Curva de Wöhler (S-N)

As curvas de Wöhler, também denominadas curvas S-N, representam a relação entre a variação de tensão aplicada a um material e o número de ciclos necessários para que ocorra sua falha por fadiga. Segundo Russo et al. (2016), essas curvas constituem uma das ferramentas fundamentais para a caracterização do comportamento à fadiga de elementos metálicos, sendo obtidas experimentalmente por meio de ensaios com carregamentos cíclicos controlados. O gráfico correspondente, usualmente apresentado em escala logarítmica, evidencia que amplitudes mais elevadas de tensão conduzem a um número reduzido de ciclos até a ruptura, ao passo que tensões menores resultam em maior durabilidade. Um exemplo

típico desse comportamento pode ser observado na Figura 2. Para ligas de aço, é possível notar na curva a existência de um limite de fadiga, abaixo do qual o componente tende a resistir a um número muito elevado de ciclos sem apresentar falha significativa.

Figura 2 – Curva de Wöhler genérica



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2002)

No contexto de pontes metálicas, as curvas de Wöhler são amplamente utilizadas como base para a análise da vida útil à fadiga dos elementos estruturais. Conforme salientam Russo et al. (2016), cada tipo de detalhe estrutural, como juntas soldadas, conexões parafusadas ou recortes geométricos, apresenta uma curva S-N específica, cuja posição e inclinação são influenciadas por fatores como geometria, acabamento superficial, qualidade de execução e presença de concentrações de tensões. Dessa forma, a comparação entre a variação de tensões atuantes em determinado detalhe da estrutura e a respectiva curva S-N permite estimar o número de ciclos até o surgimento de fissuras por fadiga, constituindo um parâmetro essencial para a avaliação da durabilidade e da confiabilidade estrutural das pontes.

Além disso, a aplicação das curvas de Wöhler na análise de fadiga é frequentemente associada a modelos de dano acumulativo, como a regra de

Palmgren-Miner, que possibilitam a consideração de múltiplas amplitudes de tensão ao longo do ciclo de vida operacional da estrutura. De acordo com Russo et al. (2016), esse tipo de abordagem permite quantificar de forma objetiva o consumo da vida à fadiga de um componente e identificar detalhes suscetíveis à fissuração prematura. Dessa maneira, a utilização das curvas S-N não se restringe ao dimensionamento inicial das estruturas, mas se estende às etapas de inspeção, manutenção preventiva, reforço e reabilitação de pontes metálicas, contribuindo para a segurança estrutural e para a extensão de sua vida em serviço.

A ABNT NBR 17245 (2026), estabelece a utilização da regra de *Palmgren-Miner* para a verificação da fadiga sob um único nível de carregamento, a qual está expressa na Equação 1, em que n_i representa o número de ciclos de tensão atuantes em determinada amplitude e N_i corresponde ao número de ciclos necessários para provocar a falha nesse mesmo nível de tensão (MORSCH, 2001 apud AFONSO, 2007). Dessa forma, a razão entre esses dois valores expressa a fração de dano acumulado referente a esse nível de solicitação. Assim, a ruptura por fadiga é prevista quando a soma de todas as frações de dano acumulado atinge a unidade.

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (1)$$

2.2.2 Método dos elementos finitos

O método de elementos finitos (MEF) constitui uma técnica numérica consolidada na engenharia estrutural, que permite a discretização de uma estrutura em elementos menores para a determinação de respostas mecânicas, tais como tensões, deformações e deslocamentos (AZEVEDO, 2022). Por meio dessa abordagem, torna-se possível representar de forma detalhada geometrias complexas, aplicar diferentes condições de contorno e carregar a estrutura de maneira precisa, oferecendo resultados mais confiáveis do que métodos simplificados. Ademais, o MEF possibilita a modelagem de regiões críticas por meio de submodelos locais, enquanto mantém uma representação global da estrutura, o que facilita a análise de componentes específicos sem comprometer a simulação do comportamento estrutural geral (AZEVEDO, 2022).

O MEF é amplamente utilizado na avaliação da fadiga em pontes metálicas, permitindo a identificação de pontos sujeitos a esforços cíclicos e à deterioração

progressiva do material (VICENTINI, 2019; FÉLIX, 2022). Por meio da simulação de carregamentos repetitivos, é possível determinar tensões alternativas em elementos críticos e estimar o dano acumulado ao longo da vida útil da estrutura, utilizando critérios como a regra de Miner ou modelos de dano contínuo (FÉLIX, 2022). Essa metodologia permite, ainda, a proposição de medidas de reforço ou manutenção preventiva, fornecendo informações essenciais para a gestão da durabilidade, segurança e confiabilidade das pontes metálicas (VICENTINI, 2019; MOREIRA et al., 2020).

2.3 NORMAS TÉCNICAS

Este capítulo introduz as principais normas técnicas aplicáveis à análise de fadiga em pontes, apresentando o embasamento necessário para orientar os critérios de verificação estrutural utilizados neste trabalho. São reunidas diretrizes nacionais e internacionais que abordam a avaliação da vida em fadiga, a identificação de detalhes críticos e a definição dos espectros de carregamento relevantes. Assim, estabelece-se um panorama normativo conciso, essencial para compreender as bases metodológicas que sustentam as práticas de segurança e durabilidade em obras de arte especiais.

2.3.1 ABNT NBR 17245 (2026)

A ABNT NBR 17245 (2026), estabelece critérios específicos para a verificação da fadiga em estruturas quando não há disponibilidade de um espectro de cargas detalhado que permita a aplicação direta da regra de *Palmgren-Miner*. Nessa situação, a norma admite a simplificação da análise por meio da consideração de um único nível de carregamento representativo, denominado carga frequente de fadiga. Esse nível é definido a partir da combinação frequente de ações, representada pela expressão $\psi_{1,fad} \cdot F_k$, à qual se associa um número característico de ciclos de carregamento ao longo da vida útil da estrutura.

Os fatores de redução para a combinação frequente de fadiga, $\psi_{1,fad}$, bem como o número de ciclos N correspondente a essa condição de carregamento, são apresentados na Tabela 1. Para pontes, viadutos e demais estruturas sujeitas a ações provenientes do tráfego ferroviário e metroferroviário, adota-se o valor unitário de $\psi_{1,fad}$ igual a 1,0. A verificação da segurança à fadiga baseia-se na comparação direta do

número de ciclos de carga previstos para a estrutura com o limite normativo estabelecido de 2×10^6 ciclos. Esses parâmetros visam representar, de forma simplificada e conservadora, os efeitos cumulativos das ações repetidas ao longo da vida útil da estrutura, permitindo a validação estrutural mesmo na ausência de informações detalhadas sobre a variabilidade das cargas.

Tabela 1 – Valores dos fatores de redução para combinação frequente de fadiga

Tipo de construção	Fatores de redução para combinação frequente de fadiga $\Psi_{1,fad}$	Condição de carregamento (ciclos) N
Pontes, viadutos e outras estruturas que possuem ações devidas ao tráfego de veículos ferroviários e metroferroviários	1,0	2×10^6

Fonte: ABNT NBR 17245 (2026).

2.3.2 AREMA (2010)

A norma AREMA (2010), em seu Volume 2, Capítulo 15, Parte 1, estabelece o procedimento a ser seguido para a verificação da fadiga no projeto de estruturas metálicas. Nesse contexto, o método apresentado é relativamente objetivo e, além disso, busca reduzir a probabilidade de falhas decorrentes do crescimento de trincas por fadiga. Ademais, o critério adotado fundamenta-se na estimativa de uma vida segura para o componente, admitindo-se, portanto, uma probabilidade de falha de 5%. Além disso, a leitura da norma deve ser realizada em paralelo com as Partes 7 e 9, uma vez que essas seções fornecem comentários complementares e tratam, de forma mais abrangente, de aspectos relacionados a pontes existentes.

Segundo a AREMA (2010), os principais fatores que influenciam a resistência à fadiga são o número de ciclos de tensão, o valor da faixa de tensão e o tipo e a localização do detalhe construtivo. Dessa forma, o número de ciclos de tensão a ser considerado, N, deve ser selecionado na Tabela 2, exceto quando levantamentos específicos de tráfego indicarem valores distintos. Ademais, o parâmetro N depende do tipo de elemento estrutural analisado, variando conforme o comprimento do vão

para membros longitudinais e, por outro lado, conforme o número de vias para transversinas e determinados membros de treliças.

Tabela 2 – Número de ciclos de estresse, N

Descrição	Comprimento do vão, L do membro fletido ou treliça ou condição de carregamento	Ciclo de tensão constante, N
Classificação I		
Elementos longitudinais submetidos a flexão e suas ligações. Elementos de treliça (banzos) e suas ligações	$L > 30,48 \text{ m}$	2000000
	$L \leq 30,48 \text{ m}$	>2000000
Classificação II		
Transversinas e suas ligações. Elementos de treliça (montantes e diagonais) que suportam apenas as cargas do tabuleiro e suas ligações.	Duas linhas	2000000
	Uma linha	>2000000

Fonte: Adaptado de AREMA (2010)

O intervalo de tensões, S_R , é definido como a diferença algébrica entre as tensões máxima e mínima obtidas a partir da combinação de carga morta, carga viva, carga média de impacto e força centrífuga. Assim, quando as tensões provenientes da carga viva, da carga de impacto e da força centrífuga forem de compressão e, simultaneamente, a tensão decorrente da carga morta também se encontrar em compressão, não há necessidade de considerar os efeitos de fadiga. Além disso, a norma apresenta e classifica os diversos tipos e localizações de detalhes construtivos, permitindo sua adequada categorização no processo de verificação.

Conforme a AREMA (2010), o intervalo de tensões, exceto no caso de membros classificados como de fratura crítica, não deve exceder a faixa de tensões admissível de fadiga, S_{Rfat} , indicada na Tabela 3. A norma define membros de fratura crítica como aqueles submetidos predominantemente à tração e cuja falha pode resultar no colapso da ponte ou na perda de sua funcionalidade prevista. Para esses elementos, portanto, deve-se adotar a faixa de tensões admissível específica apresentada na Tabela 4.

Além disso, de acordo com a AREMA (2010), os principais fatores que governam a resistência à fadiga em um ponto específico de um elemento ou de uma ligação são o número de ciclos de tensão, a magnitude da faixa de tensão e a respectiva categoria de detalhe de tensão. Essas categorias são ilustradas e classificadas na norma.

Tabela 3 – Faixa de tensão de fadiga admissível, S_{Rfat} (MPa)

Categoria de tensão	Número de ciclos de tensão constante, N	
	2000000	>2000000
A	165,47	165,47
B	124,11	110,32
B'	99,98	82,74
C	89,64	68,95
C'		82,74
D	68,95	48,26*
E	55,16	31,03
E'	39,99	17,93
F	62,06	55,16
*Para metal base em membros com conexões rebitadas ou parafusadas com baixa resistência ao deslizamento, usar o intervalo de tensões de 41,37 Mpa.		

Fonte: Adaptado de AREMA (2010)

Tabela 4 – Faixa de tensão de fadiga admissível para membros com fratura crítica, S_{Rfat} (MPa)

Categoria de tensão	Número de ciclos de tensão constante, N	
	2000000	>2000000
A	165,47	165,47
B	110,32	110,32
B'	75,84	75,84
C	68,95	62,06
C'		82,74
D	55,16	34,48
E	41,37	15,86
E'	27,58	8,96
F	48,26	41,37

Fonte: Adaptado de AREMA (2010)

Segundo a AREMA (2010), a faixa de tensões S_{Re} , correspondente ao número total de ciclos N_v , deve ser obtida por meio da Equação 2. Nessa expressão, S_{Rmc}

representa a faixa de tensão *root mean cube* (raiz média do cubo), cuja utilização é recomendada devido à sua maior correlação com os princípios da Mecânica da Fratura. Na Equação 2, n_i denota o número de ciclos associado a cada intervalo específico de tensões, enquanto S_{Ri} corresponde ao valor da faixa de tensões relativo a esses n_i ciclos. O valor de alfa deve ser adotado como igual a 1, a menos que um ensaio no elemento avaliado indique que um valor menor seja apropriado. Por fim, a combinação entre S_{Re} e N_v , para o detalhe estrutural considerado, deve situar-se abaixo da respectiva curva de resistência à fadiga, a fim de assegurar a adequação do componente às exigências normativas. Esses parâmetros são indicados na norma.

$$S_{Re} = S_{RMC} = \alpha \left(\frac{\sum n_i S_{Ri}^3}{\sum n_i} \right)^{1/3} \quad (2)$$

A norma dedica, em sua Parte 7, um capítulo específico à análise de pontes já existentes, no qual são apresentadas considerações complementares ao procedimento de verificação à fadiga anteriormente estabelecido. Nesse contexto, estabelece-se que estruturas que, ao longo de toda a vida útil de projeto, estejam submetidas a um fluxo inferior a 5 milhões de toneladas brutas anuais e que não contenham detalhes classificados com intervalos de tensão admissíveis inferiores à Categoria D dispensam a realização da verificação à fadiga. Adicionalmente, recomenda-se a adoção de valores reduzidos para o fator de impacto, de modo a refletir adequadamente a velocidade de operação da composição ferroviária.

Em síntese, membros soldados, bem como ligações soldadas ou executadas com parafusos de alta resistência, devem ser avaliados conforme o procedimento estabelecido para o projeto de novas pontes. Em contraste, elementos que possuem ligações rebitadas ou parafusadas com baixa pressão de contato, assim como membros de ferro fundido conectados por rebites, enquadram-se na Categoria D, cujo intervalo de tensão admissível é de 41,37 MPa para até 100 milhões de ciclos. Quando houver redução de espessura superior a 50% do valor original, o elemento passa a ser classificado como detalhe de Categoria E.

Por outro lado, destaca-se que estruturas soldadas não dispõem da redundância estrutural típica das construções rebitadas, as quais permitem uma redistribuição mais eficaz dos esforços internos. Em razão disso, os efeitos decorrentes da propagação

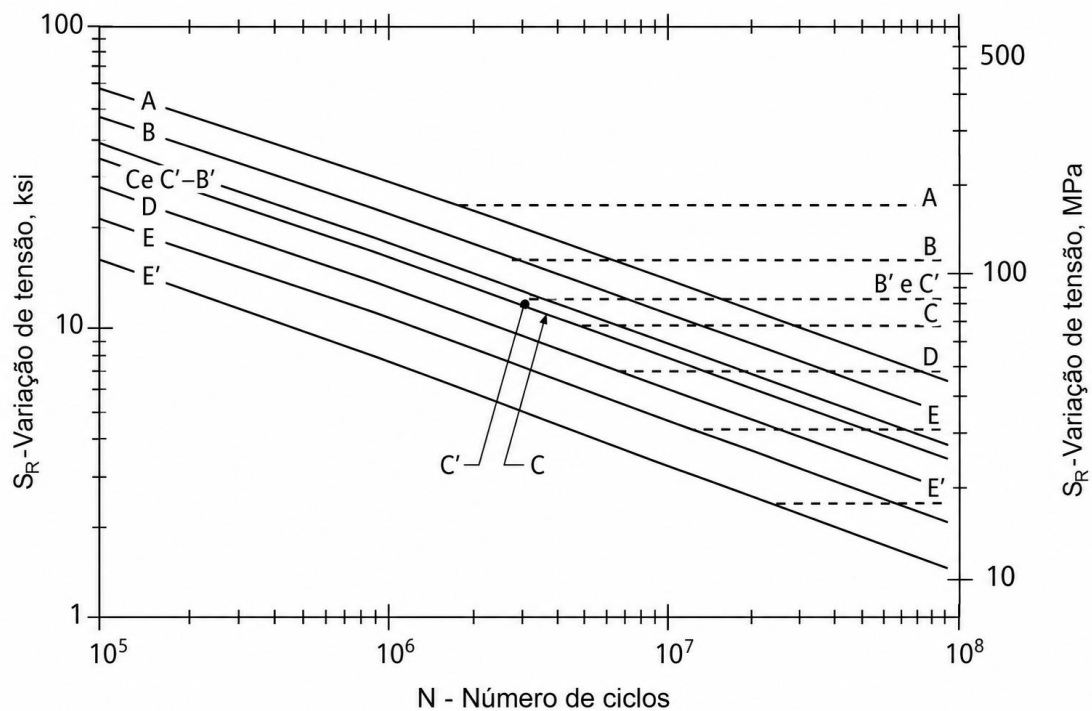
de fissuras por fadiga tendem a ser mais severos em ligações e membros soldados do que em sistemas rebitados. Evidências provenientes de pontes soldadas que apresentaram fissuração por fadiga indicam que a falha geralmente ocorre antes mesmo que a trinca seja detectada. Diante desse comportamento, torna-se recomendável aplicar, na avaliação de membros soldados, os mesmos requisitos prescritos para o dimensionamento de pontes novas. Por fim, ressalta-se que ligações parafusadas com parafusos de alta resistência proporcionam desempenho superior em termos de resistência à fadiga.

Nesse contexto, admite-se a utilização de um intervalo de tensão mais elevado quando a ligação ou o membro analisado apresenta rebites adequadamente apertados. Nessas condições, a curva S–N para membros rebitados (Figura 4) passa a incluir uma linha que se estende da Categoria C, em 52,74 MPa, até 41,37 MPa para 100 milhões de ciclos, em substituição à linha horizontal convencional em 41,37 MPa. Tal ajuste, entretanto, não é aplicável aos casos em que os furos foram executados por perfuração.

Por fim, conforme estabelecido pela AREMA (2010), as curvas S–N para as diferentes categorias são definidas por meio da Equação 3, cujos resultados são representados graficamente na Figura 3. Na referida equação, N corresponde ao número mínimo estimado de ciclos para a ocorrência de falha, A constitui uma constante fornecida e S_R representa o intervalo de tensão admissível. Adicionalmente, a norma AREMA (2010) apresenta uma tabela estruturada em seções específicas, contendo a classificação detalhada das diferentes categorias de elementos estruturais. Na Tabela 6, é apresentada uma adaptação de dois exemplos ilustrativos dessa classificação, com o objetivo de demonstrar a forma como as categorias são definidas e detalhadas pela norma.

$$(S_r) = (A/N)^{1/3} \quad (3)$$

Figura 3 – Faixa de tensão versus número de ciclos para várias categorias de detalhes



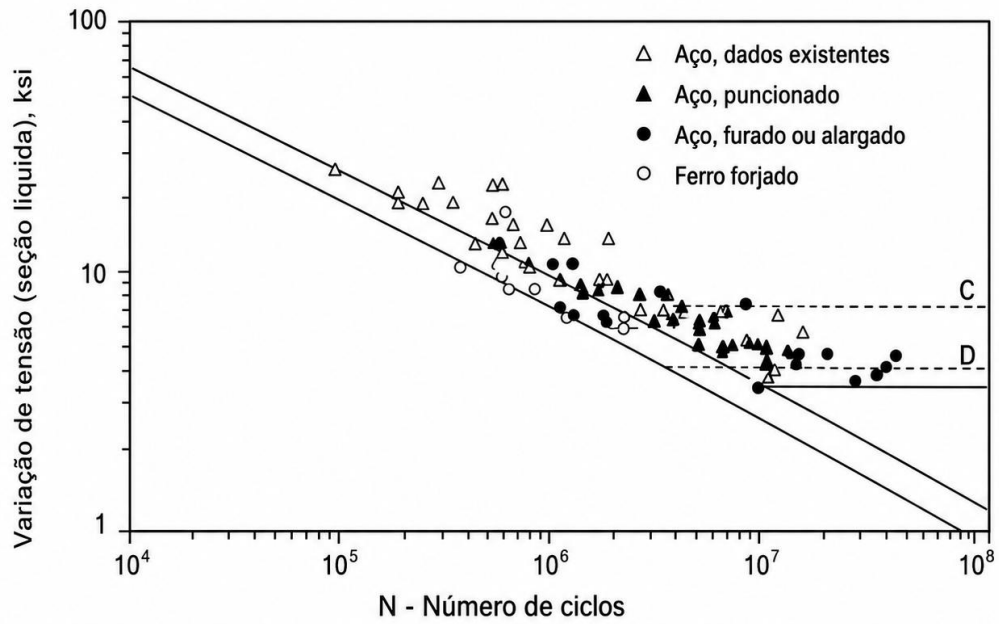
Fonte: Adaptado de AREMA (2010)

Tabela 5 – Constante A e Limiares para Categorias de Detalhe

Categoria	Constante A (Mpa ³) - x10 ⁸	Limite (Mpa)
A	1723,75	165,48
B	827,4	110,32
B'	420,595	82,74
C	303,38	68,74
C'	303,38	82,74
D	151,699	48,265
E	75,845	31,0275
E'	26,8905	17,927
F	62,055	55,16
Parafusos (A325) em tensão axial	117,9045	213,745
Parafusos (A490) em tensão axial	217,1925	262,01

Fonte: Adaptado de AREMA (2010)

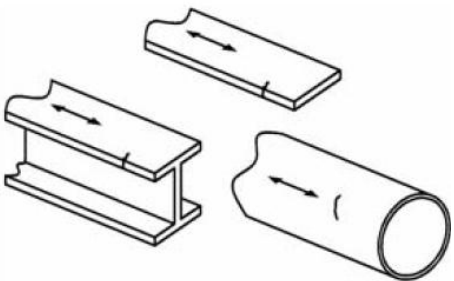
Figura 4 – Componentes de ponte rebitados



Componentes de pontes rebitadas Para projeto:	Análise alternativa de componentes de ponte com furos
$N = 2.183 \times 10^9 S_r^{-3} S_f > 9 \text{ ksi}$ Para verificação: $N = 2.183 \times 10^9 S_r^{-3} S_f > 9 \text{ ksi}$ $N = 4.446 \times 10^9 S_r^{-3} S_f > 9 \text{ ksi} > S_f > 6 \text{ ksi}$ Limite de fadiga $(S_F)n = 6 \text{ ksi}$	$N = 2.183 \times 10^9 S_r^{-3} S_f > 9 \text{ ksi}$ $N = 4.446 \times 10^9 S_r^{-3} S_f > 9 \text{ ksi} > S_f > 7.65 \text{ ksi}$ $N = 2.465 \times 10^{15} S_r^{-9.5} 7.65 \text{ ksi} > S_f > 6 \text{ ksi}$ Limite de fadiga $(S_F)n = 6 \text{ ksi}$

Fonte: Adaptado de AREMA (2010)

Tabela 6 – Descrição das categorias

Descrição	Categoria	Potencial Ponto de Trinca	Exemplos Ilustrativos
SEÇÃO 1 - MATERIAL LIVRE DE QUALQUER SOLDAGEM			
1.1 Metal base, exceto aço resistente às intempéries sem revestimento, com superfícies laminadas ou limpas. Bordas cortadas a chama com rugosidade superficial de 1.000 μ -pol ou menos, mas sem cantos reentrantes.	A	Afastar-se de todas as soldas ou conexões estruturais	
1.2 Aço intemperizável sem revestimento com superfícies laminadas ou limpas detalhadas de acordo com (Bibliografia 30). Bordas cortadas a chama com rugosidade superficial de 1.000 μ -pol ou menos, mas sem cantos reentrantes.	B	Afastar-se de todas as soldas ou conexões estruturais	

Fonte: Adaptado de AREMA (2010)

3 METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, com abordagem quantitativa e objetivo descritivo, uma vez que busca analisar o comportamento estrutural de pontes metálicas submetidas a carregamentos cíclicos, com foco na avaliação da vida útil à fadiga.

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica acerca do fenômeno de fadiga em estruturas metálicas, abordando conceitos fundamentais, métodos de avaliação da fadiga e recomendações presentes em normas e publicações técnicas da área.

Posteriormente, desenvolveu-se um estudo de caso de uma ponte metálica real, com o objetivo de avaliar o comportamento estrutural da estrutura frente a carregamentos repetitivos. Para o desenvolvimento da modelagem estrutural, utilizaram-se os dados do projeto estrutural apresentado por COLOMBO (2017). Com base nesse material, foi possível realizar a coleta das informações geométricas, estruturais e construtivas necessárias para a adequada representação da estrutura no modelo numérico adotado.

Com base nesses dados, foi realizada a modelagem estrutural da ponte no software SAP2000, permitindo a simulação do comportamento da estrutura sob ações representativas do tráfego. A partir do modelo estrutural desenvolvido, foram obtidos os esforços solicitantes nos elementos estruturais de interesse, especialmente os momentos fletores críticos associados às regiões mais solicitadas da estrutura.

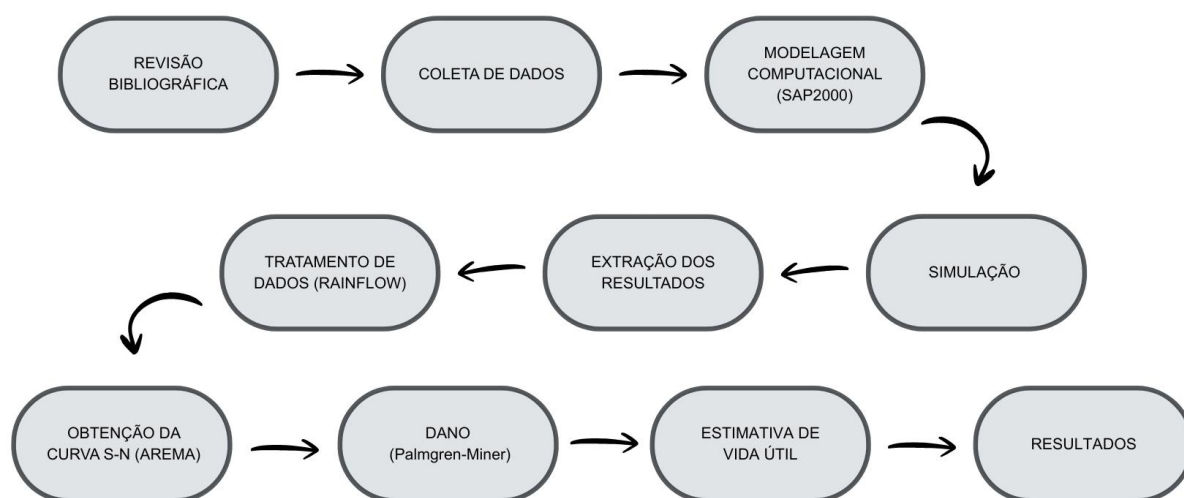
Na sequência, os resultados obtidos foram submetidos a um processo de tratamento de dados utilizando o método Rainflow. Para isso, os esforços mecânicos calculados no SAP2000 para cada *step* da análise, correspondentes às sucessivas posições do trem-tipo durante sua passagem pela ponte, foram convertidos em valores de tensão, formando um histórico de tensões. O algoritmo utiliza esse histórico para identificar e contabilizar os ciclos de carregamento, convertendo os valores de tensão em pares de amplitude de tensão e número de ciclos equivalentes, os quais são empregados nas análises de fadiga estrutural.

Posteriormente, com base nas recomendações da AREMA (2010), foi definida a curva S–N (curva de Wöhler) correspondente ao detalhe estrutural analisado, permitindo relacionar a amplitude de tensão obtida com o número de ciclos de carregamento que o elemento estrutural é capaz de suportar até a ocorrência da falha por fadiga.

Por fim, foi realizada a estimativa do número de ciclos efetivamente aplicados à estrutura ao longo de sua vida em serviço, possibilitando a aplicação da regra de acumulação de danos de *Palmgren-Miner*, a partir da qual foi possível avaliar o nível de dano acumulado e estimar a vida útil à fadiga do elemento estrutural analisado.

A Figura 5 apresenta o fluxograma das etapas metodológicas adotadas no desenvolvimento deste trabalho.

Figura 5 – Fluxograma das etapas metodológicas adotadas no desenvolvimento deste trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

3.1 DESCRIÇÃO DA PONTE

A estrutura analisada está localizada sobre o rio Urussanga, no município de Içara, no estado de Santa Catarina, conforme ilustrado na Figura 6, especificamente no km 84+041 da linha tronco da Ferrovia Tereza Cristina. A ponte não possui pilares intermediários, sendo apoiada apenas em dois encontros localizados em suas extremidades. A Figura 7 apresenta a visualização geral da estrutura, cujo vão central possui comprimento de 24 m. A ponte é composta por oito painéis treliçados, nove transversinas, duas longarinas e oito conjuntos de contraventamentos. De acordo com Colombo (2017), a estrutura foi construída na década de 1950 e o material empregado em sua fabricação corresponde ao aço estrutural ASTM A36.

Figura 6 – Localização do município de Içara, SC



Fonte: Wikipédia (2026)

Figura 7 – Ponte em estudo

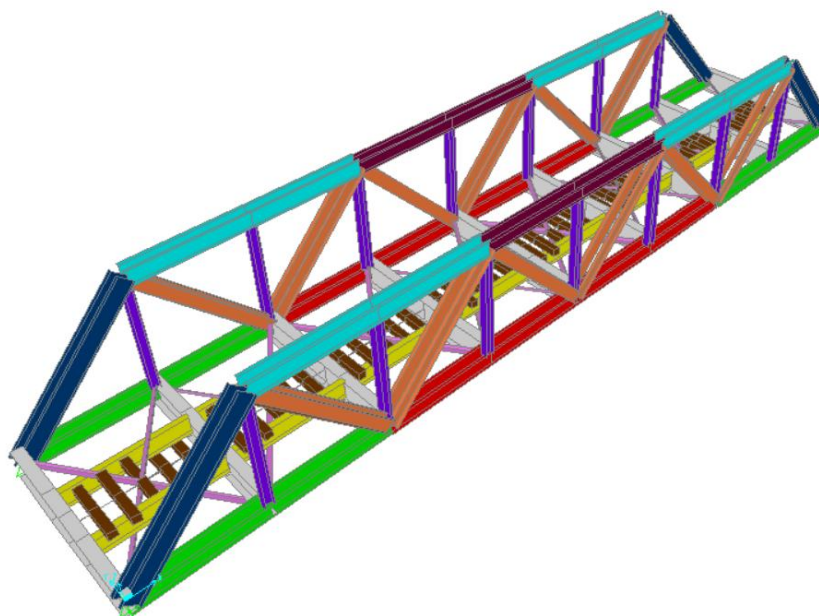


Fonte: COLOMBO (2017)

De acordo com COLOMBO (2017), as seções metálicas da ponte apresentam repetição simétrica nos sentidos longitudinal e transversal. A Figura 8 apresenta a representação da ponte metálica com a identificação dos principais elementos estruturais por meio de diferentes cores. A associação entre os perfis estruturais e suas respectivas cores é apresentada na Tabela 7. Nesse contexto, o contraventamento, destacado na cor rosa, tem a função de aumentar a rigidez

estrutural do sistema. As longarinas, representadas em amarelo e com comprimento de 24,00 m, são responsáveis por receber as cargas provenientes da via permanente (dormentes, em marrom), bem como as cargas móveis. Essas cargas são transferidas para as transversinas, indicadas em branco e com comprimento de 4,50 m, que realizam a distribuição dos esforços para os nós das treliças laterais. Os nós, representados por pontos em preto, correspondem a regiões metálicas consideradas rígidas e são responsáveis pela ligação entre os elementos estruturais. Por fim, os banzos, montantes e diagonais, com comprimentos de 3,00 m, 3,20 m e 4,39 m, respectivamente, constituem os elementos laterais da treliça, responsáveis pela resistência e estabilidade da estrutura.

Figura 8 – Visão esquemática da ponte



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

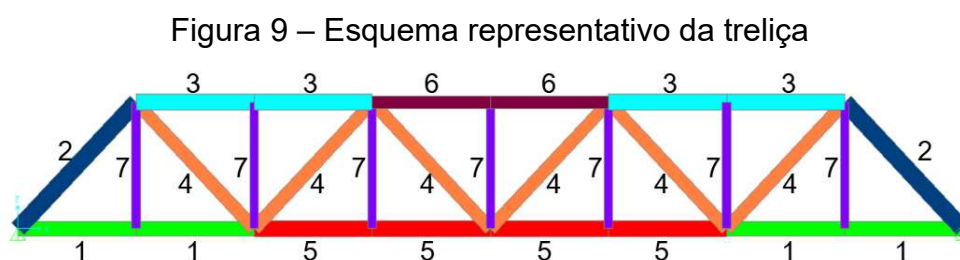
3.2 COLETA DE DADOS

A coleta de dados referente aos perfis estruturais da ponte foi realizada com base nas informações apresentadas por COLOMBO (2017). No trabalho de referência, alguns perfis presentes no projeto estrutural original da ponte foram simplificados para seções equivalentes, de modo a possibilitar sua adequada representação e

modelagem no software SAP2000. Essa simplificação foi necessária porque o software não permite a modelagem direta de perfis reforçados por chapas de reforço. Dessa forma, foram adotadas seções equivalentes cujas dimensões e distribuição de área fossem semelhantes às dos perfis reais da ponte, de modo que suas propriedades geométricas, como área, momentos de inércia e demais características da seção transversal, permanecessem as mais próximas possíveis das originais.

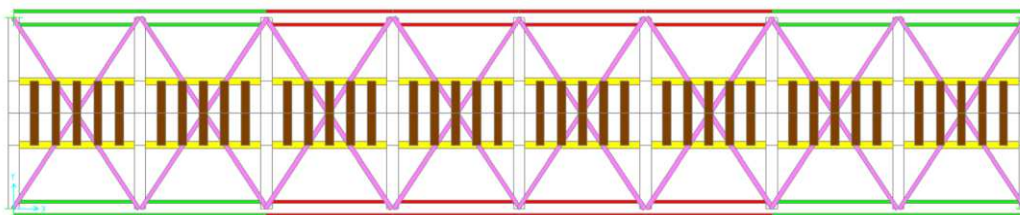
Além disso, no estudo de COLOMBO (2017), foi adotada uma simplificação na região central da ponte, na qual as duas longarinas existentes na estrutura real foram representadas por uma única longarina equivalente, com o objetivo de simplificar a modelagem estrutural. Entretanto, para a análise de fadiga desenvolvida no presente trabalho, optou-se por manter a configuração original da ponte, modelando as duas longarinas. Em razão dessa escolha, tornou-se necessária a modelagem dos dormentes com espaçamento de 0,50 m ao longo da estrutura, bem como de uma barra imaginária do tipo *Path*, posicionada no eixo central dos dormentes. Essa barra tem a função de receber o carregamento dos trens-tipo e definir a trajetória de deslocamento dos veículos sobre a ponte, permitindo que as cargas sejam transferidas aos dormentes e, conseqüentemente, distribuídas para os demais elementos estruturais do modelo.

Na Figura 9 e Figura 10 são apresentadas, de forma esquemática, as seções dos perfis adotados na modelagem da ponte. Já na Tabela 7 encontram-se listados os perfis estruturais considerados no modelo, bem como suas respectivas seções associadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 10 – Esquema representativo em planta da ponte



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Tabela 7 – Descrição dos perfis da estrutura

Perfil	Informações do perfil	Cor
1	Perfil Duplo C de 14,18x3" Espessuras da alma de 7/16" e da mesa 7/16" Espaçamentos entre os perfis de 9,5"	Verde
2	Perfil Duplo C de 17x3" Espessuras da alma de 7/16" e da mesa 1,02" Espaçamentos entre os perfis de 9"	Azul escuro
3	Perfil Duplo C de 12,5x3,75" Espessuras da alma de 7/16" e da mesa 0,96" Espaçamentos entre os perfis de 9"	Azul claro
4	Perfil Duplo C de 12,5x3,75" Espessuras da alma de 0,60" e da mesa 1,04" Espaçamentos entre os perfis de 9"	Laranja
5	Perfil Duplo C de 16x3" Espessuras da alma de 0,81" e da mesa 0,92" Espaçamentos entre os perfis de 9,5"	Vermelho
6	Perfil Duplo C de 12,75x3" Espessuras da alma de 7/16" e da mesa 1,55" Espaçamentos entre os perfis de 9,5"	Vinho
7	Perfil I, com altura de 8,5", largura de 8,37", espessuras da alma de 0,57" e da mesa 0,39"	Violeta

continua

continuação

Transversinas	Perfil I, com altura de 30", largura de 10,56", espessuras da alma de 0,9" e da mesa 0,47"	Branco
Longarinas	Perfil I, com altura de 18", largura de 6", espessuras da alma de 1,18" e da mesa 0,5"	Amarelo
Contraventamentos	Cantoneira simples de 4" e espessura de 3/8"	Rosa
Dormentes	Seção quadrada de concreto, com 20 cm de largura	Marrom

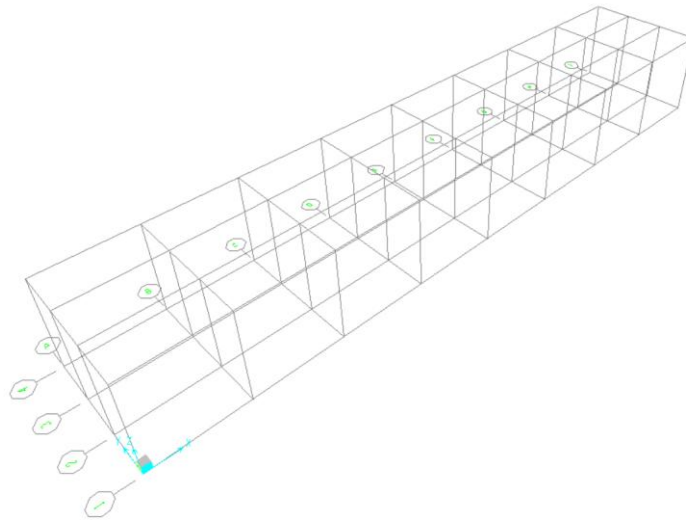
Fonte: Adaptado de COLOMBO (2017)

3.3 MODELAGEM

Neste tópico, apresenta-se a linha de raciocínio adotada para a modelagem da ponte em estudo no software SAP2000, contemplando desde a associação de perfis estruturais aos elementos até a definição das condições de apoio e dos carregamentos.

Inicialmente, procedeu-se à construção da grade base da estrutura, conforme ilustrado na Figura 11. Essa grade foi definida pela inserção de nove planos ao longo do eixo X, espaçados entre si em três metros, quatro planos no eixo Y, com espaçamento de um metro e meio, e dois planos no eixo Z, sendo um localizado na origem e o outro a uma altura de 3,2 metros.

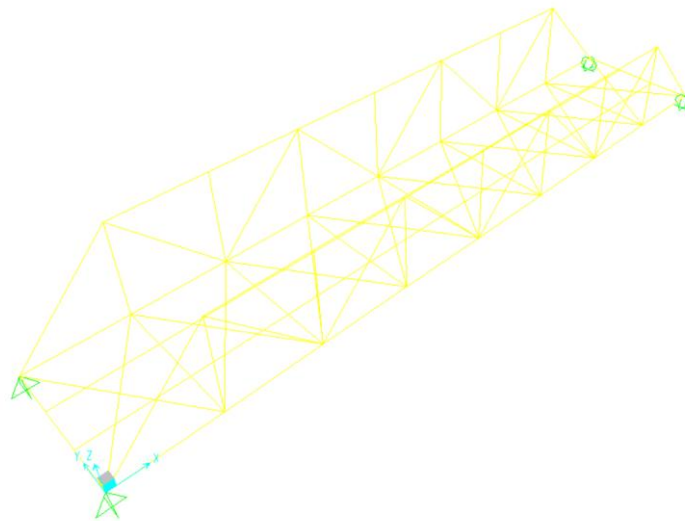
Figura 11 – Grade base da estrutura da ponte



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A partir da definição da base geométrica, iniciou-se o lançamento dos nós e, consequentemente, dos elementos do tipo *frame*, de modo a configurar o esqueleto estrutural da ponte, conforme apresentado na Figura 12. Com a estrutura inicial estabelecida, foram definidas as condições de contorno responsáveis pela sustentação da ponte. Nos nós localizados no plano X correspondente à origem, foram restringidas as translações nas três direções globais (X, Y e Z). Já nos nós situados no plano $X = 24,00$ m, foram restringidas apenas as translações nas direções Y e Z, permanecendo livre a translação na direção longitudinal (X).

Figura 12 – Nós, elementos e condições de apoio da estrutura



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Na sequência, procedeu-se à criação dos perfis estruturais no software SAP2000. Previamente a essa etapa, tornou-se indispensável o cadastramento do material aço e de suas respectivas propriedades mecânicas no programa, visto que esse material não se encontrava disponível nas configurações iniciais do software. A Figura 13 apresenta os parâmetros inseridos para a definição desse material.

Figura 13 – Propriedades do aço A36 no SAP2000

Material Property Data	
General Data	
Material Name and Display Color	A36
Material Type	Steel
Material Notes	Modify/Show Notes...
Weight and Mass	
Weight per Unit Volume	76,9729
Mass per Unit Volume	7,849
Units	
KN, m, C	
Isotropic Property Data	
Modulus of Elasticity, E	1,999E+08
Poisson's Ratio, U	0,3
Coefficient of Thermal Expansion, A	1,170E-05
Shear Modulus, G	76903069
Other Properties for Steel Materials	
Minimum Yield Stress, Fy	248211,28
Minimum Tensile Stress, Fu	399896,
Effective Yield Stress, Fye	372316,9
Effective Tensile Stress, Fue	439885,6
☐ Switch To Advanced Property Display	
OK Cancel	

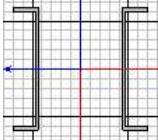
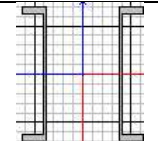
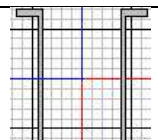
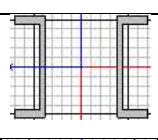
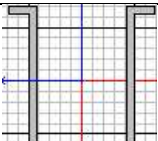
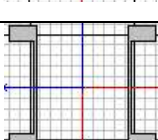
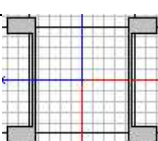
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Por fim, com o esqueleto estrutural e as condições de apoio devidamente estabelecidos, bem como com o material aço previamente inserido, procedeu-se à criação e à associação dos perfis estruturais aos elementos, em conformidade com as especificações apresentadas na Tabela 7 e nas Figura 9 e Figura 10.

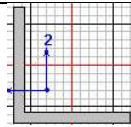
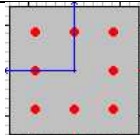
A Tabela 8 apresenta as imagens dos elementos listados na Tabela 7 que foram modelados no SAP2000. Os espaçamentos e as configurações geométricas dos perfis seguiram as simplificações adotadas por COLOMBO (2017), apresentadas na Tabela 7. Adicionalmente, foi inserido um elemento denominado *Path*, cuja função consiste

em definir a trajetória do trem-tipo e receber seu carregamento, etapa que será detalhada posteriormente.

Tabela 8 – Seções criadas no SAP2000

Perfil	Seção criada
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
Transversinas	
Longarinas	

continua

Contraventamentos	
Dormentes	
Path	

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Com os perfis já associados às barras, deu-se início à etapa de definição dos carregamentos, os quais foram posteriormente vinculados manualmente às barras e aos nós correspondentes. De modo análogo ao procedimento adotado para a coleta dos dados dos perfis estruturais, os valores dos carregamentos foram obtidos a partir de Colombo (2017), com exceção do trem-tipo. As cargas permanentes foram aplicadas na direção vertical (eixo global Z), com sentido para baixo, representando o peso próprio e as demais ações permanentes. As cargas de vento foram aplicadas na direção transversal da ponte (eixo global Y), enquanto as cargas de impacto foram consideradas nos extremos inicial e final da ponte, atuando na direção vertical (eixo global Z). Por sua vez, as cargas de frenagem e aceleração foram aplicadas na direção longitudinal da estrutura, correspondente ao eixo global X, coincidindo com o sentido de tráfego da ferrovia. A Tabela 9 apresenta os valores atribuídos a cada carregamento aplicado ao modelo da ponte.

Tabela 9 – Tabela de carregamentos utilizados

Carregamento	Peso
Cargas permanentes	3,81 kN/m + peso próprio dos elementos
Cargas de vento	7,57 kN/nó
Carga de impacto	20% do peso do eixo mais carregado - TB240
Carga de frenagem e aceleração	25% do peso dos eixos motores ou 15% da carga móvel para frenagem - TB240

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Na sequência, procedeu-se à modelagem dos trens-tipo. Diferentemente do estudo de Colombo (2017), que não contemplou a avaliação da fadiga estrutural, o presente trabalho considerou quatro trens-tipo distintos, permitindo uma análise mais abrangente e representativa do dano por fadiga sob diferentes condições de carregamento.

Para viabilizar a aplicação dos carregamentos móveis no SAP2000, foi necessário definir a trajetória de deslocamento dos veículos ao longo da ponte. Para isso, utilizou-se o elemento denominado *Path*, mencionado anteriormente, cujo conjunto de *frames* representa o caminho percorrido pelos trens durante a análise.

Definida a trajetória de deslocamento, os trens-tipo foram modelados no SAP2000 de acordo com as prescrições da ABNT NBR 7189 (1985), para o TB240, e da ABNT NBR 17245 (2025), para os trens-tipo TB312, TB376 e TB416. Na Figura 14, Figura 15, Figura 16 e Figura 17 apresenta a modelagem de cada trem-tipo no software. A Figura 18 ilustra a distribuição das forças concentradas que compõem esses carregamentos móveis. Os valores das cargas concentradas, das cargas distribuídas e de seus respectivos espaçamentos, estabelecidos pela ABNT NBR 7189 (1985), são apresentados na Tabela 10, enquanto os correspondentes aos trens-tipo definidos pela ABNT NBR 17245 (2025) encontram-se na Tabela 11.

Para a simulação dos carregamentos móveis no SAP2000, adotou-se uma velocidade de deslocamento de 60 km/h para a travessia dos veículos sobre a ponte. A mesma velocidade foi empregada para os quatro trens-tipo avaliados, de modo a garantir a uniformidade das análises e possibilitar a comparação direta entre os resultados obtidos.

Figura 14 – TB240 no SAP2000

General Vehicle Data

Vehicle name: TB240 Units: KN, m, C

Floating Axle Loads

	Value	Width Type	Axle Width
For Lane Moments	0,	One Point	
For Other Responses	0,	One Point	

☐ Double the Lane Moment Load when Calculating Negative Span Moments

Usage

☒ Lane Negative Moments at Supports
☒ Interior Vertical Support Forces
☒ All other Responses

Min Dist Allowed From Axle Load

Lane Exterior Edge: 0.3048
Lane Interior Edge: 0.6096

Length Effects

Axle: None Modify/Show...
Uniform: None Modify/Show...

Loads

Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Uniform Width Type	Uniform Width	Axle Load	Axle Width Type	Axle Width
Leading Load	Infinite		80,	Zero Width		0,	One Point	
Leading Load	Infinite		80,	Zero Width		0,	One Point	
Fixed Length	1,	0,	0,	Zero Width		240,	One Point	
Fixed Length	2,	0,	0,	Zero Width		240,	One Point	
Fixed Length	2,	0,	0,	Zero Width		240,	One Point	
Fixed Length	2,	0,	0,	Zero Width		240,	One Point	
Fixed Length	1,	0,	0,	Zero Width		240,	One Point	
Trailing Load	Infinite		80,	Zero Width		0,	One Point	

Add Insert Modify Delete

☐ Vehicle Applies To Straddle (Adjacent) Lanes Only Straddle Reduction Factor
☐ Vehicle Remains Fully In Lane (In Lane Longitudinal Direction)

OK Cancel

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 15 – TB312 no SAP2000

General Vehicle Data

Vehicle name: TB312 Units: KN, m, C

Floating Axle Loads

	Value	Width Type	Axle Width
For Lane Moments	0,	One Point	
For Other Responses	0,	One Point	

☐ Double the Lane Moment Load when Calculating Negative Span Moments

Usage

☒ Lane Negative Moments at Supports
☒ Interior Vertical Support Forces
☒ All other Responses

Min Dist Allowed From Axle Load

Lane Exterior Edge: 0.3048
Lane Interior Edge: 0.6096

Length Effects

Axle: None Modify/Show...
Uniform: None Modify/Show...

Loads

Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Uniform Width Type	Uniform Width	Axle Load	Axle Width Type	Axle Width
Leading Load	Infinite		145,92	Zero Width		0,	One Point	
Leading Load	Infinite		145,92	Zero Width		0,	One Point	
Fixed Length	2,2	0	0	Zero Width		360,96	One Point	
Fixed Length	2	0	0	Zero Width		360,96	One Point	
Fixed Length	2	0	0	Zero Width		360,96	One Point	
Fixed Length	2	0	0	Zero Width		360,96	One Point	
Fixed Length	2,2	0	0	Zero Width		360,96	One Point	
Trailing Load	Infinite		145,92	Zero Width		0	One Point	

Add Insert Modify Delete

☐ Vehicle Applies To Straddle (Adjacent) Lanes Only Straddle Reduction Factor
☐ Vehicle Remains Fully In Lane (In Lane Longitudinal Direction)

OK Cancel

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 16 – TB376 no SAP2000

General Vehicle Data

Vehicle name: TB376 Units: KN, m, C

Floating Axle Loads:

	Value	Width Type	Axle Width
For Lane Moments	0.	One Point	
For Other Responses	0.	One Point	

☐ Double the Lane Moment Load when Calculating Negative Span Moments

Usage:

☒ Lane Negative Moments at Supports
☒ Interior Vertical Support Forces
☒ All other Responses

Min Dist Allowed From Axle Load:

Lane Exterior Edge	0,3048
Lane Interior Edge	0,6096

Length Effects:

Axle: None Modify/Show...
 Uniform: None Modify/Show...

Load Plan

Load Elevation

Loads

Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Uniform Width Type	Uniform Width	Axle Load	Axle Width Type	Axle Width
Leading Load	Infinite		152	Zero Width		0.	One Point	
Leading Load	Infinite		152	Zero Width		0.	One Point	
Fixed Length	2,2		0	Zero Width		376	One Point	
Fixed Length	2,2		0	Zero Width		376	One Point	
Fixed Length	2,2		0	Zero Width		376	One Point	
Fixed Length	2,2		0	Zero Width		376	One Point	
Fixed Length	2,2		0	Zero Width		376	One Point	
Trailing Load	Infinite		152	Zero Width		0	One Point	

Add Insert Modify Delete

☐ Vehicle Applies To Straddle (Adjacent) Lanes Only Straddle Reduction Factor
☐ Vehicle Remains Fully In Lane (In Lane Longitudinal Direction)

OK Cancel

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 17 – TB416 no SAP2000

General Vehicle Data

Vehicle name: TB416 Units: KN, m, C

Floating Axle Loads:

	Value	Width Type	Axle Width
For Lane Moments	0.	One Point	
For Other Responses	0.	One Point	

☐ Double the Lane Moment Load when Calculating Negative Span Moments

Usage:

☒ Lane Negative Moments at Supports
☒ Interior Vertical Support Forces
☒ All other Responses

Min Dist Allowed From Axle Load:

Lane Exterior Edge	0,3048
Lane Interior Edge	0,6096

Length Effects:

Axle: None Modify/Show...
 Uniform: None Modify/Show...

Load Plan

Load Elevation

Loads

Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Uniform Width Type	Uniform Width	Axle Load	Axle Width Type	Axle Width
Leading Load	Infinite		168	Zero Width		0.	One Point	
Leading Load	Infinite		168	Zero Width		0.	One Point	
Fixed Length	2,2		0	Zero Width		416	One Point	
Fixed Length	2,2		0	Zero Width		416	One Point	
Fixed Length	2,2		0	Zero Width		416	One Point	
Fixed Length	2,2		0	Zero Width		416	One Point	
Fixed Length	2,2		0	Zero Width		416	One Point	
Trailing Load	Infinite		168	Zero Width		0	One Point	

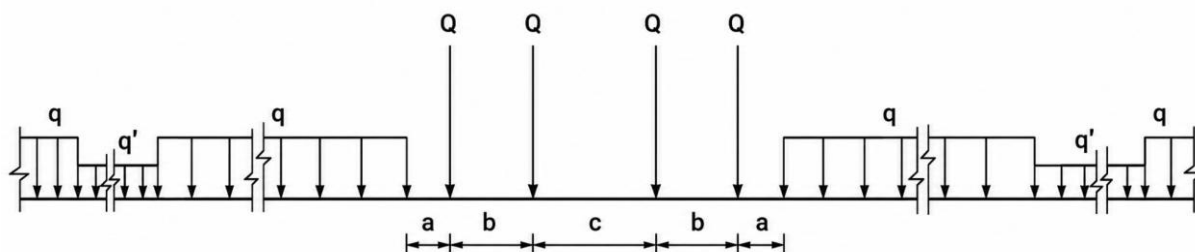
Add Insert Modify Delete

☐ Vehicle Applies To Straddle (Adjacent) Lanes Only Straddle Reduction Factor
☐ Vehicle Remains Fully In Lane (In Lane Longitudinal Direction)

OK Cancel

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 18 – Características geométricas e cargas dos trens-tipo ferroviários



Fonte: ABNT NBR 17245 (2026)

Tabela 10 – Carga dos trens-tipo

TB	Q (kN)	Q (kN/m)	q' (kN/m)	a (m)	b (m)	c (m)
360	360	120	20	1,00	2,00	2,00
270	270	90	15	1,00	2,00	2,00
240	240	80	15	1,00	2,00	2,00
170	170	25	15	1,00	2,50	5,00

Fonte: ABNT NBR 7185 (1985)

Tabela 11 – Carga dos trens-tipo ferroviários

Trem-tipo	Q kN	q kN/m	q' kN/m	a m	b m	c m
TB-416	416	168	28	2,2	2,0	2,0
TB-376	376	152	28	2,2	2,0	2,0
TB-312 a 376 ^a	376.α	152.α	19	2,2	2,0	2,0

^a Nos TB-312 a 376, a carga por eixo (Q) e as cargas distribuídas na via, simulando vagões carregados (q), são calculadas de acordo com a seguinte equação:

$$\alpha = \frac{\text{Peso máximo operacional por eixo [kN]}}{325}$$

Fonte: ABNT NBR 17245 (2026)

Por fim, após a definição de todos os carregamentos, foi estabelecida uma única combinação de esforços, correspondente à combinação crítica apresentada por Colombo (2017), com o objetivo de verificar a consistência do modelo estrutural, em conformidade com os coeficientes de ponderação estabelecidos na ABNT NBR 8681 (2025) – Ações e segurança nas estruturas. A adoção de apenas essa combinação,

representada na Figura 19, buscou tornar o modelo estrutural mais completo e possibilitar sua validação por meio da comparação com o estudo de referência. Não se fez necessária a criação de combinações específicas para cada trem-tipo, uma vez que a análise de fadiga foi realizada considerando a atuação isolada de cada carregamento móvel. Além disso, conforme apresentado na Tabela 1, o coeficiente de ponderação das ações variáveis para a combinação frequente utilizada nas verificações de fadiga é igual a 1,0, não havendo necessidade de combinar os diferentes trens-tipo para esse tipo de avaliação.

Assim, com o modelo integralmente configurado, foi executado o comando de análise do software, selecionando-se todos os carregamentos definidos e a combinação adotada, conforme demonstrado na Figura 20.

Figura 19 – Combinação utilizada no SAP2000

Load Combination Data

Load Combination Name (User-Generated)

Notes

Load Combination Type

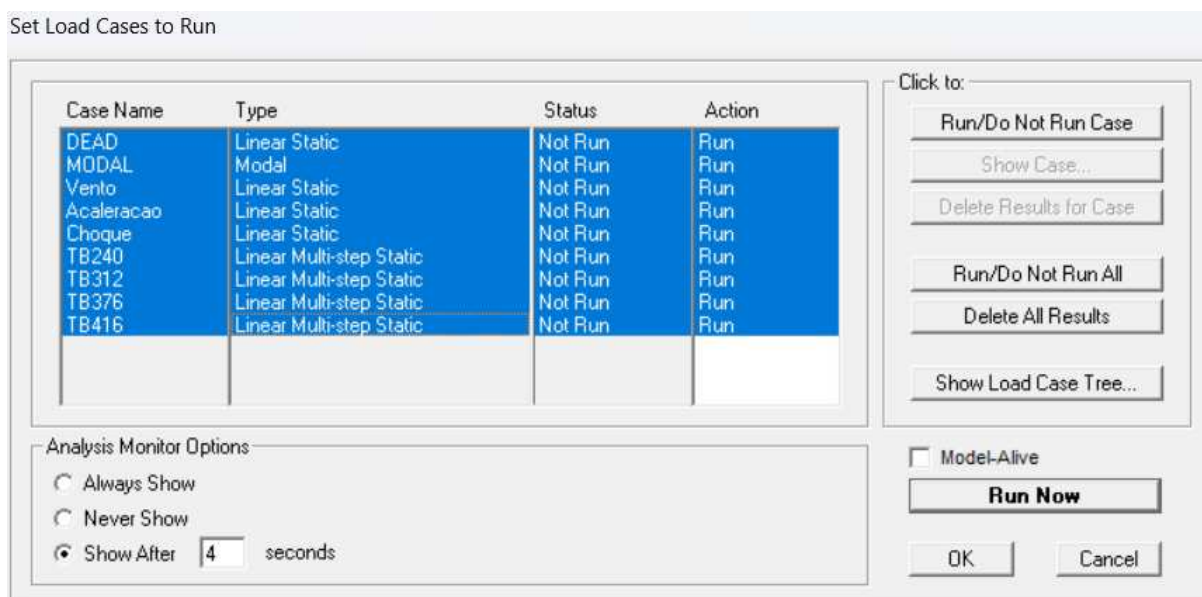
Options:

Define Combination of Load Case Results:

Load Case Name	Load Case Type	Scale Factor
DEAD	Linear Static	1,35
DEAD	Linear Static	1,35
Acaleração	Linear Static	1,5
Choque	Linear Static	1,5
Vento	Linear Static	1,5
TB240	Linear Multi-step Static	1,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 20 – Casos de carregamentos selecionados para análise



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

3.4 EXTRAÇÃO DOS RESULTADOS

Para a obtenção dos resultados necessários à análise de fadiga, realizou-se inicialmente uma avaliação gráfica do modelo, com o objetivo de identificar os elementos submetidos aos maiores valores de momento fletor. A partir dessa verificação, foi gerada uma tabela contendo a envoltória dos esforços nesses elementos, permitindo, em uma análise preliminar, identificar qual elemento e qual região apresentavam maior solicitação. Considerando que a fadiga está associada à variação de tensões, verificou-se, então, qual elemento e qual posição apresentavam as maiores diferenças de tensão, contemplando as tensões normais na borda comprimida, na borda tracionada e as tensões de cisalhamento.

Diferentemente da análise global anteriormente realizada, procedeu-se a uma avaliação *step by step*, de modo a representar a passagem do trem-tipo ao longo da estrutura. Ressalta-se que as análises realizadas no SAP2000 foram do tipo linear, não sendo efetuada uma análise dinâmica propriamente dita. Nesse contexto, a discretização em *steps* consiste na representação sucessiva das posições ocupadas pelo trem-tipo durante sua travessia da ponte, sendo cada *step* associado a um instante de tempo determinado em função da velocidade de deslocamento adotada. Dessa forma, obtém-se uma sequência de estados de carregamento que reproduz o

efeito da movimentação do veículo sobre a estrutura por meio de análises lineares sucessivas. Cabe destacar ainda que as propriedades plásticas cadastradas no material, apresentadas na Figura 13, foram inseridas apenas para possibilitar o correto cadastro do material no software, não sendo utilizadas nas análises desenvolvidas neste trabalho. A partir dos resultados obtidos para cada *step*, calcularam-se as tensões correspondentes à posição crítica de cada trem-tipo modelado, possibilitando a construção de gráficos para visualização da variação das tensões em função do avanço do carregamento.

3.5 CÓDIGO *RAINFLOW*

Com os valores de tensão organizados por *step*, utilizou-se o código *Rainflow*, disponível em biblioteca da linguagem Python, para a contagem dos ciclos associados às respectivas amplitudes de tensão. Esse procedimento foi aplicado individualmente para cada trem-tipo analisado.

3.6 ANÁLISES

De posse dos dados obtidos, procedeu-se ao cálculo do dano acumulado com base na regra de *Palmgren-Miner*. Para cada trem-tipo, determinou-se inicialmente o número de ciclos limite, a partir da escolha da categoria de detalhe da AREMA (2010) na qual o elemento se enquadra, aplicando-se, na sequência, a Equação 3 com a constante *A* correspondente a cada variação de tensão. Dessa forma, foi possível determinar o número de ciclos limite associado a cada amplitude de tensão.

Em seguida, estimou-se o tempo de funcionamento da ponte, com a finalidade de avaliar a quantidade de passagens do trem-tipo ao longo de sua vida em serviço, permitindo a adoção de um valor estimado de ciclos totais atuantes na estrutura. Assim, para cada amplitude de tensão, foram determinados o número de ciclos limite e o número de ciclos totais. Aplicando-se a Equação 1 (Regra de *Palmgren-Miner*), calculou-se o dano correspondente a cada variação de tensão, sendo o dano acumulado obtido pela soma de todas as parcelas individuais.

Com os valores de dano acumulado determinados para cada trem-tipo, tornou-se possível a comparação entre os diferentes cenários analisados.

Inicialmente, refinou-se o cálculo do dano acumulado para o trem-tipo TB240, levando em consideração outras categorias de detalhe do perfil estrutural

estabelecidas pela AREMA (2010). Adicionalmente, realizou-se uma análise de sensibilidade do dano acumulado ao se aumentar a velocidade de tráfego do TB240, a qual havia sido modelada previamente a 60 km/h.

No que tange à durabilidade da estrutura, foram elaboradas estimativas de vida útil sob diferentes premissas operacionais, sendo essas análises realizadas para todos os trens-tipo. A primeira delas considerou um cenário estático no futuro da ponte, no qual não haveria mudança de trem-tipo.

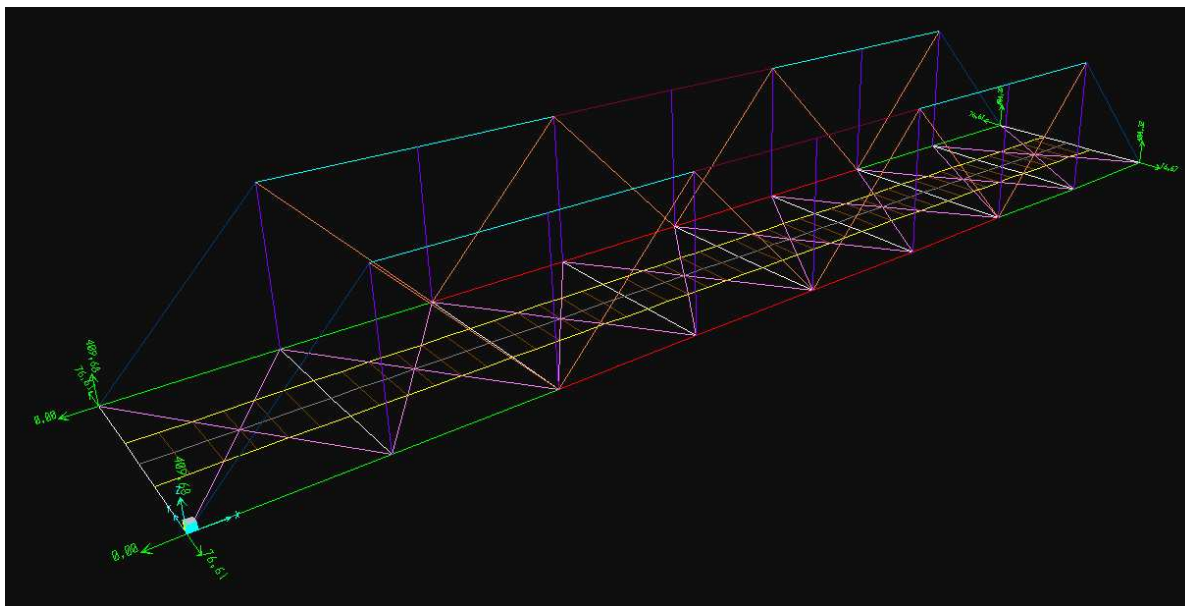
Posteriormente, realizou-se a última estimativa da vida útil da ponte, adotando-se que, até o presente momento, tenha predominado a passagem do trem-tipo TB240 e que, a partir de então, passe a prevalecer o TB312. A escolha desses trens-tipo para essa análise específica está diretamente relacionada à atualização normativa quanto às classes de trem-tipo, uma vez que ambos representam as configurações mais semelhantes previstas, respectivamente, na ABNT NBR 7189 (1985) e na ABNT NBR 17245 (2026). Para essa análise, avaliou-se quanto ainda resta para que o dano acumulado atinja o valor unitário associado ao colapso por fadiga para o TB240. Em seguida, estimou-se o dano diário correspondente ao TB312 com base nos resultados previamente obtidos, permitindo, assim, a estimativa da vida útil remanescente da estrutura.

Por fim, realizou-se uma análise de reforço para o elemento crítico selecionado, com o objetivo de ampliar sua área de seção transversal e seu momento de inércia para mitigar as tensões atuantes. Desse modo, alteraram-se as dimensões desse elemento no modelo numérico, simulando a incorporação de chapas metálicas de reforço. A partir dessa modificação, estimou-se a nova vida útil sob a ação do trem-tipo. Os cálculos de dano acumulado e a estimativa da vida útil seguiram os procedimentos metodológicos previamente estabelecidas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, realizou-se a validação do modelo estrutural para garantir a acurácia da modelagem perante a análise numérica do *software*. Para confirmar a consistência dos dados, selecionou-se um dos cenários simulados (Figura 20) para avaliar as reações de apoio correspondentes, conforme ilustrado na Figura 21.

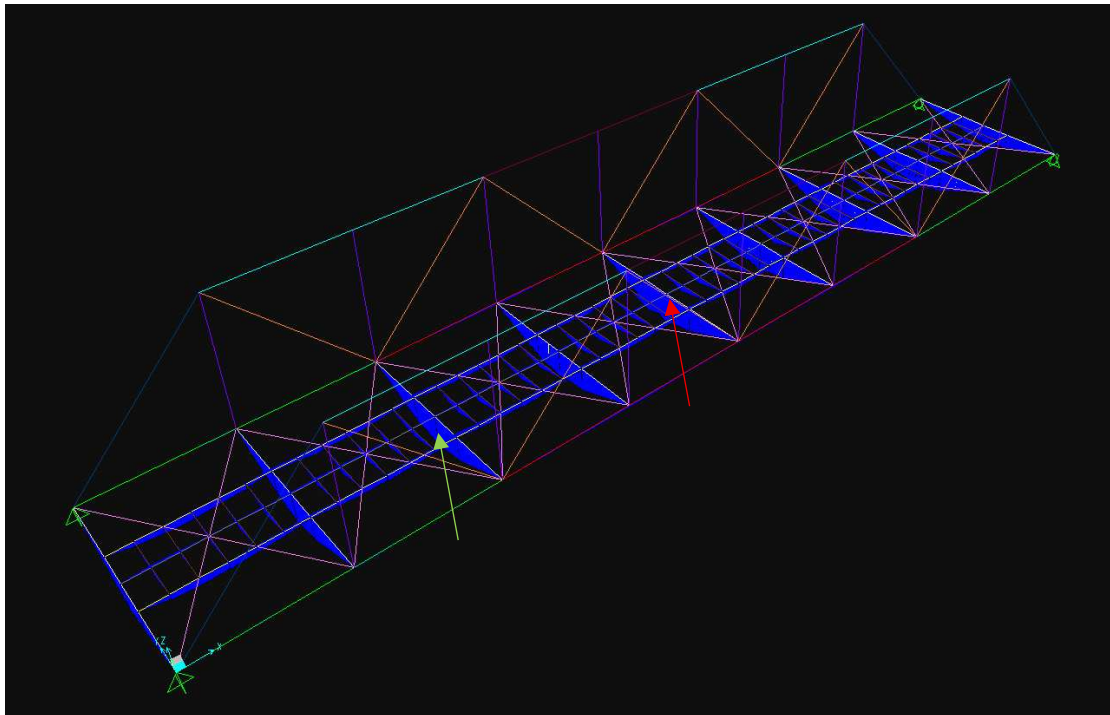
Figura 21 – Reações de apoio para o TB240



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

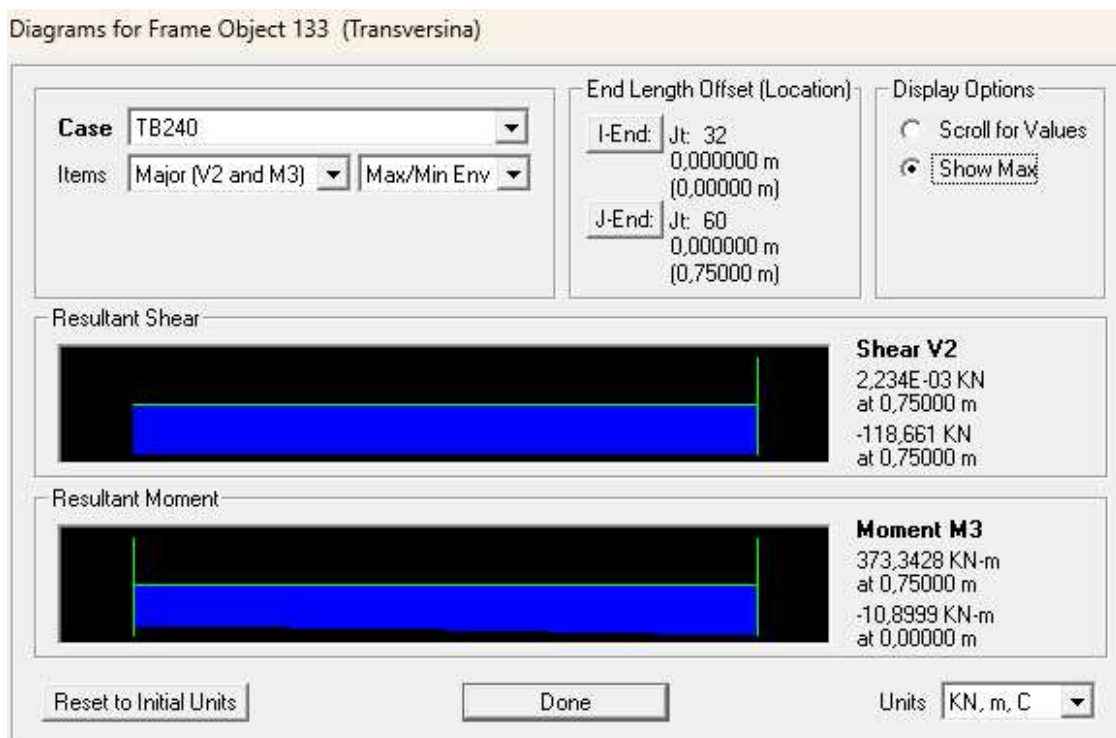
Uma vez verificada a consistência e a integridade do modelo numérico, procedeu-se à identificação dos elementos críticos para a análise de fadiga. A partir da avaliação gráfica da distribuição dos momentos fletores nos componentes da ponte, conforme apresentado na Figura 22, constatou-se que os elementos mais solicitados correspondiam às transversinas 133 (Figura 23) e 137 (Figura 24). Na Figura 22, a transversina 133 está destacada por uma seta vermelha, enquanto a transversina 137 é indicada por uma seta verde, facilitando a identificação de ambas na estrutura. Dessa forma, tais elementos foram selecionados como críticos para o desenvolvimento das análises de fadiga, por apresentarem os maiores níveis de solicitação estrutural.

Figura 22 – Diagramas de momento fletor nos elementos da ponte



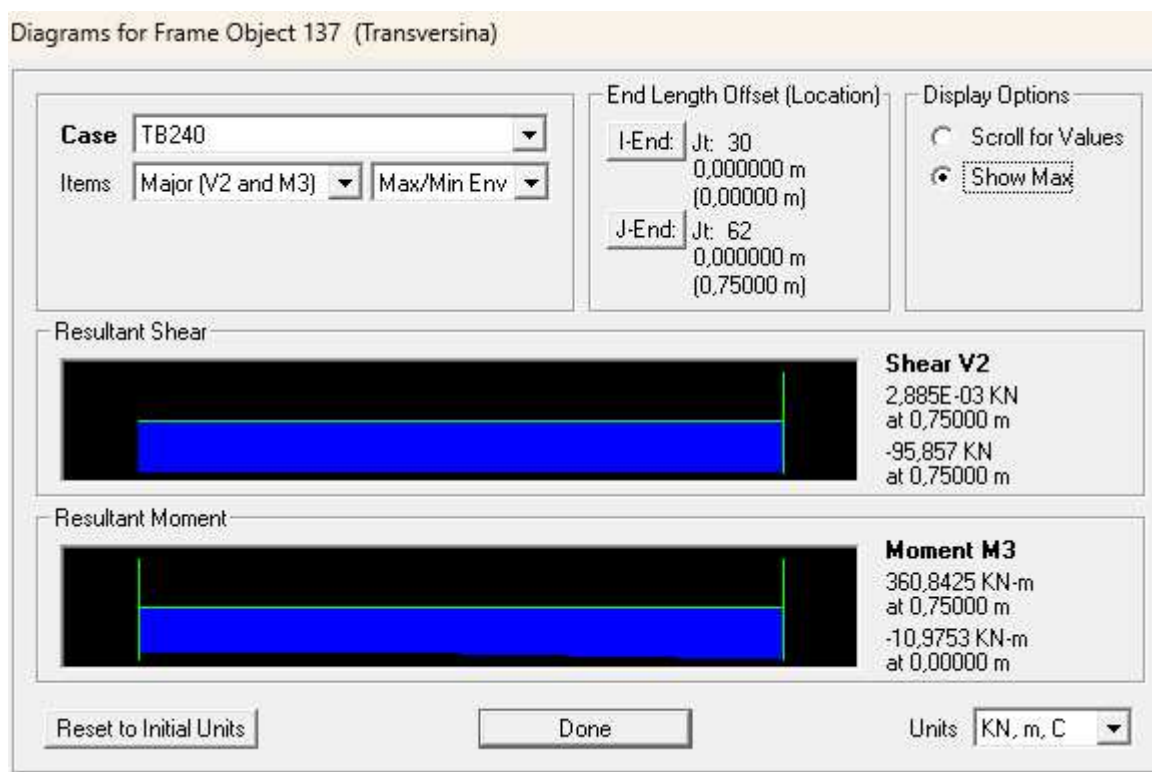
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 23 – Momento fletor para o elemento 133



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 24 – Momento fletor para o elemento 137



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Na sequência, gerou-se a envoltória de esforços desses componentes. O cálculo preliminar das variações de tensões foi realizado com o auxílio de planilhas eletrônicas, nas quais foram programadas as formulações analíticas para a determinação das tensões normais e de cisalhamento, integrando as propriedades geométricas e os dados de esforços dos elementos escolhidos. Os resultados dessa etapa são apresentados nas tabelas no Apêndice A, fundamentando a escolha da transversina 133, na posição 0,75 metros, que apresentou a maior amplitude de tensões para a continuidade das análises.

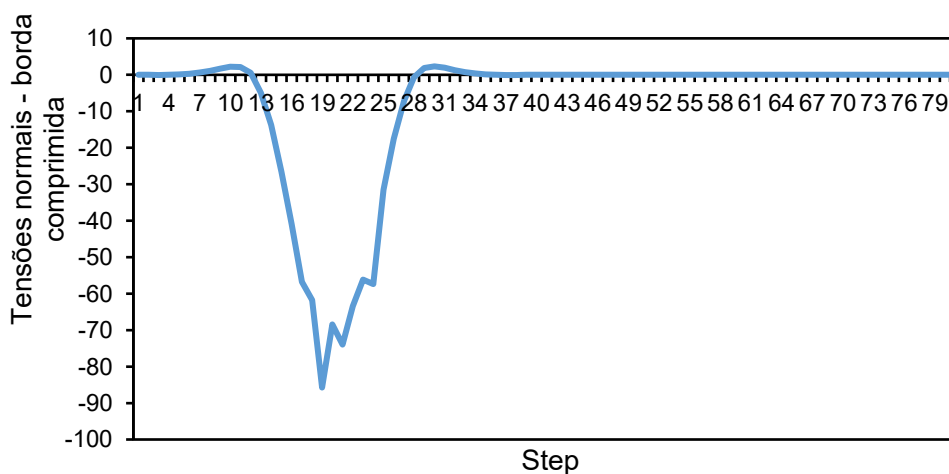
Definidos o elemento crítico e a seção transversal correspondente à maior amplitude de tensões, foram calculadas as tensões para cada passo de carga (step) em cada trem-tipo modelado. Os dados numéricos detalhados desse mapeamento encontram-se compilados no Apêndice B.

A fim de avaliar a variação das tensões ao longo da passagem dos trens-tipo pela estrutura, geraram-se gráficos da evolução das tensões em função dos *steps* da análise. Esses *steps* representam posições sucessivas e discretizadas do trem-tipo durante sua travessia da ponte, definidas em função da velocidade de deslocamento

adotada, possibilitando a avaliação da resposta estrutural por meio de análises lineares para cada posição do carregamento móvel. Essas representações gráficas, que ilustram a variação das tensões normais e de cisalhamento ao longo do tempo de tráfego, são apresentadas nas Figuras Figura 25 a Figura 36.

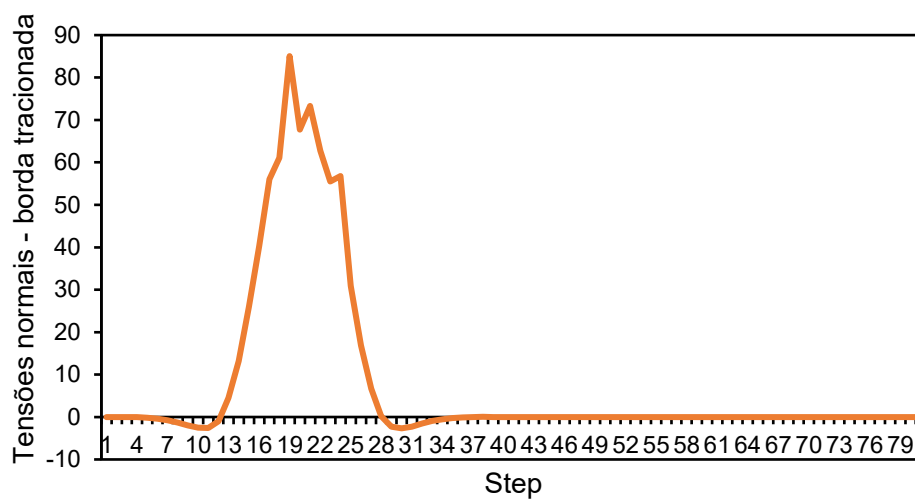
Observa-se que os picos das tensões normais ocorrem, para todos os trens-tipo, aproximadamente na mesma faixa de *steps*, correspondente à situação em que o veículo se encontra sobre a transversina crítica selecionada para a análise. Nessa condição, a incidência direta das cargas móveis sobre o elemento resulta nos maiores esforços solicitantes e, conseqüentemente, nos maiores níveis de tensão desenvolvidos na seção analisada. De modo semelhante, as maiores tensões de cisalhamento também se concentram na mesma região em que se verificam os picos das tensões normais. Entretanto, os gráficos de cisalhamento apresentam um número maior de picos ao longo da passagem do carregamento, em comparação com as tensões normais. Esse comportamento decorre do fato de que a tensão de cisalhamento não depende exclusivamente dos esforços internos atuantes na estrutura, mas também da distribuição geométrica da seção transversal, por meio do momento estático da área. Em razão dessa característica, embora os maiores valores de cisalhamento ocorram na mesma região crítica observada para as tensões normais, sua evolução ao longo dos *steps* apresenta maior variação e um número mais elevado de máximos locais.

Figura 25 – Gráfico Tensões Normais – Borda comprimida (TB240)



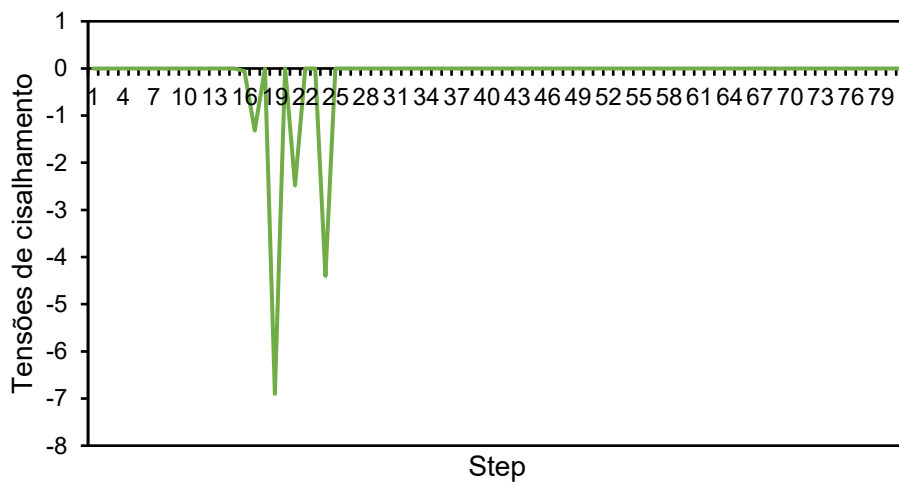
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 26 – Gráfico Tensões Normais – Borda tracionada (TB240)



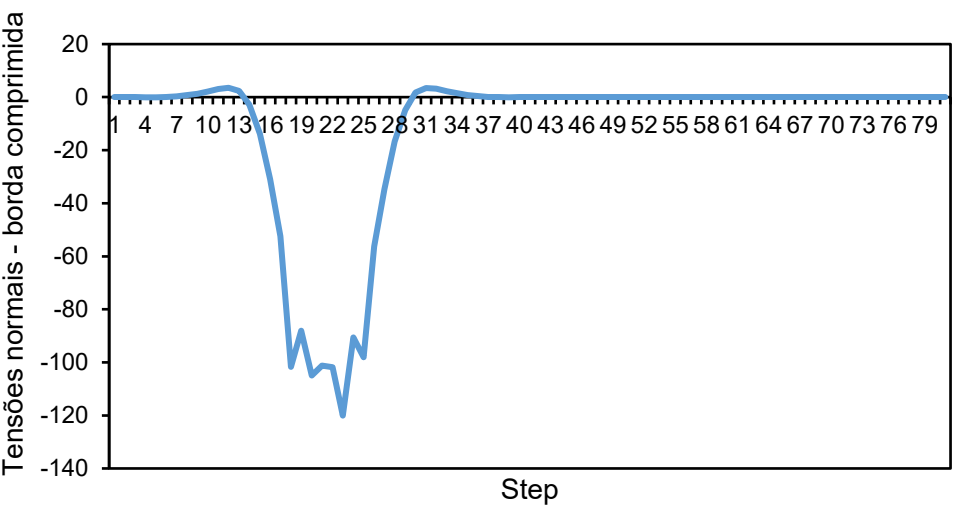
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 27 – Gráfico Tensões de cisalhamento (TB240)



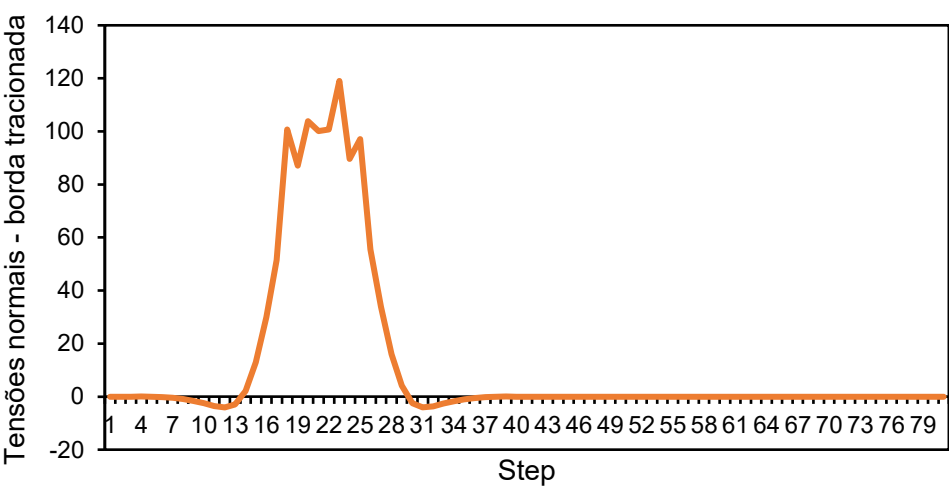
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 28 – Gráfico Tensões Normais – Borda comprimida (TB312)



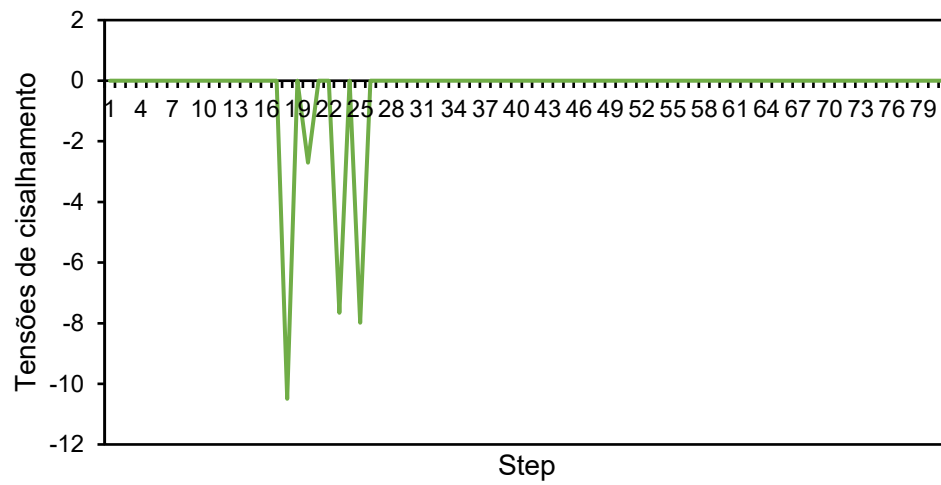
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 29 – Gráfico Tensões Normais – Borda tracionada (TB312)



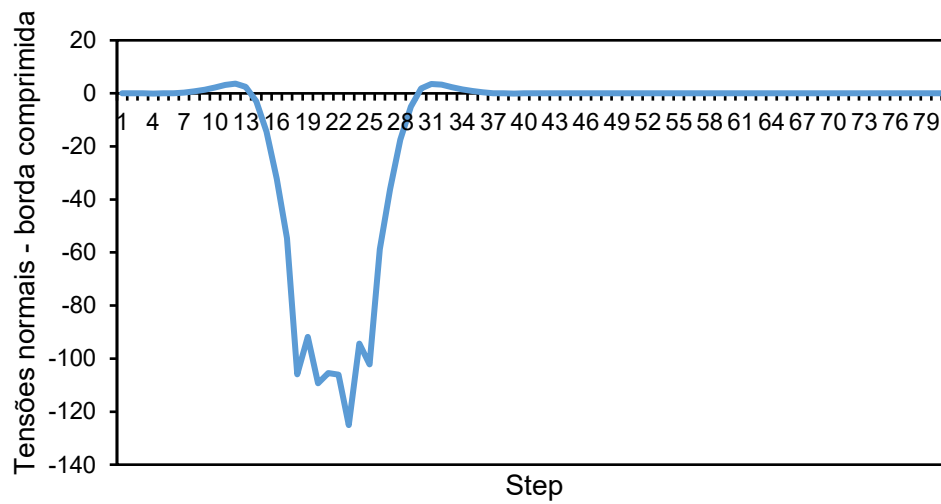
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 30 – Gráfico Tensões de cisalhamento (TB312)



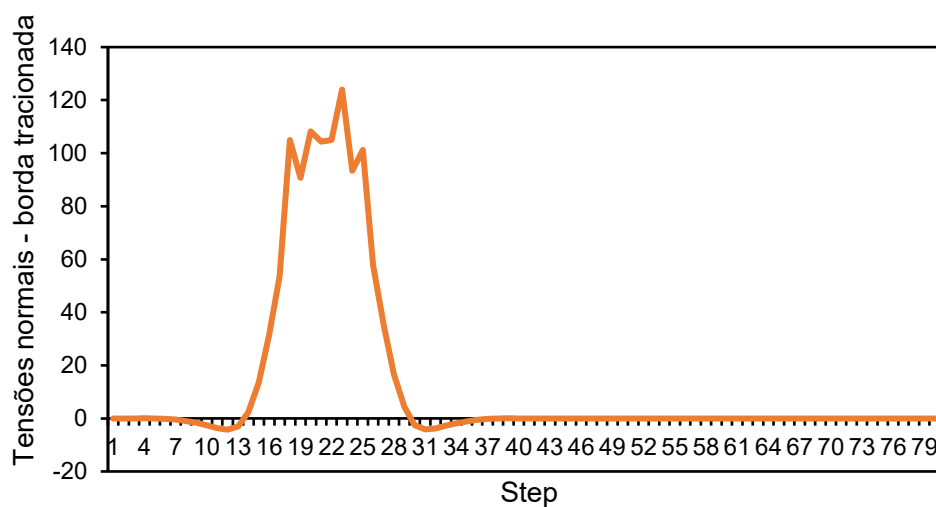
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 31 – Gráfico Tensões Normais – Borda comprimida (TB376)



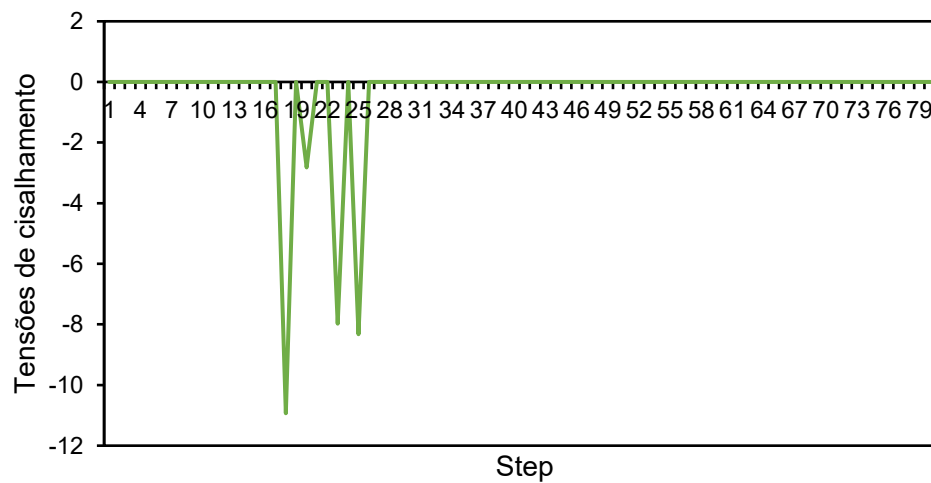
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 32 – Gráfico Tensões Normais – Borda tracionada (TB376)



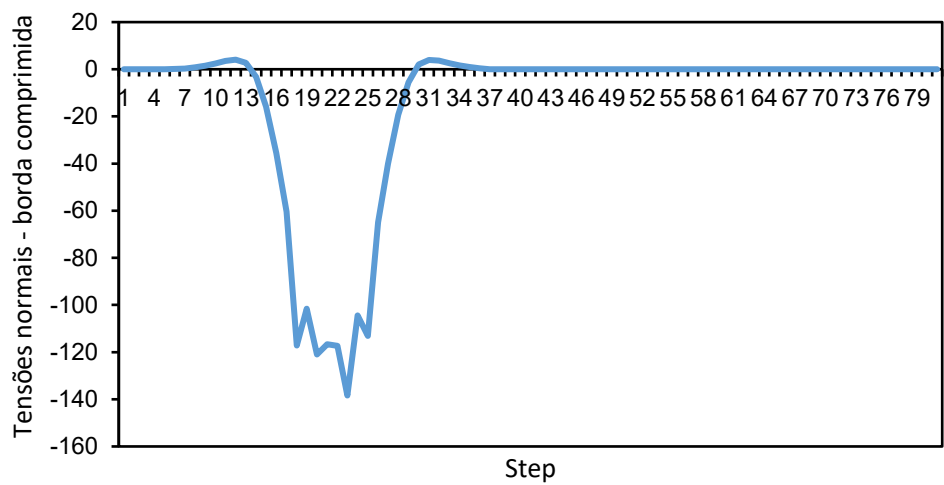
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 33 – Gráfico Tensões de cisalhamento (TB376)



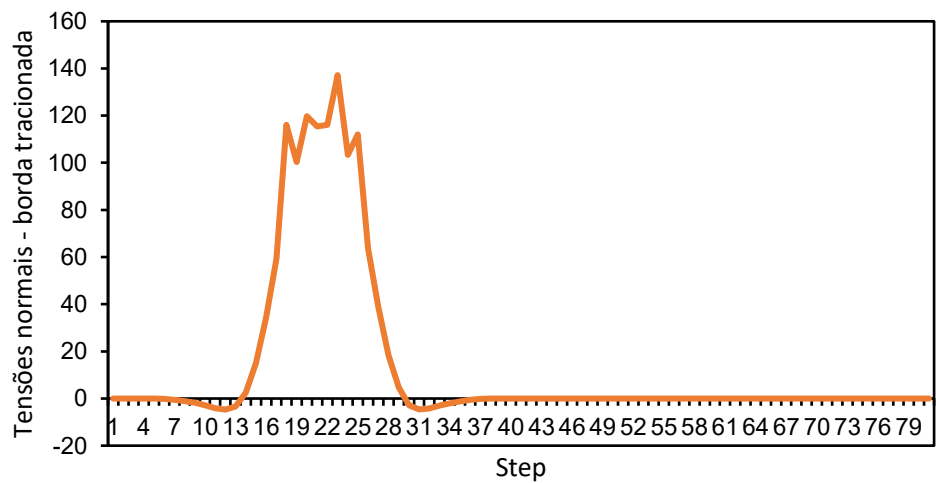
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 34 – Gráfico Tensões Normais – Borda comprimida (TB416)



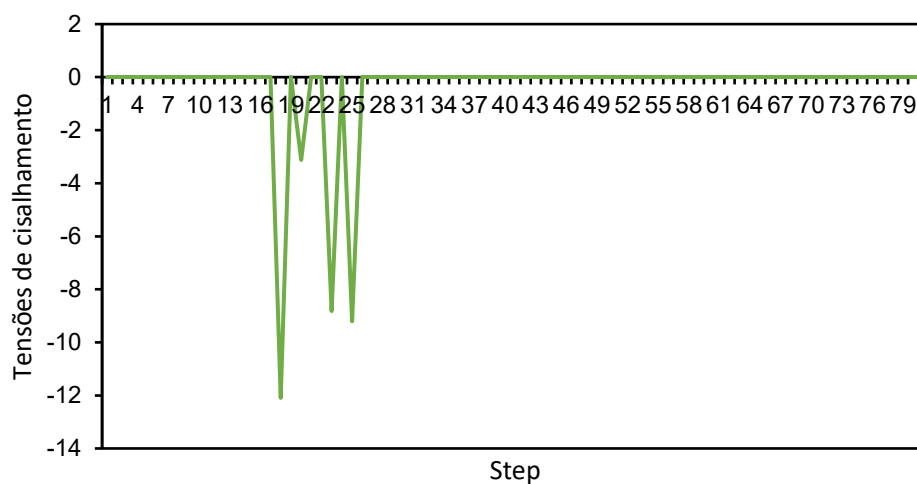
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 35 – Gráfico Tensões Normais – Borda tracionada (TB416)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 36 – Gráfico Tensões de cisalhamento (TB416)

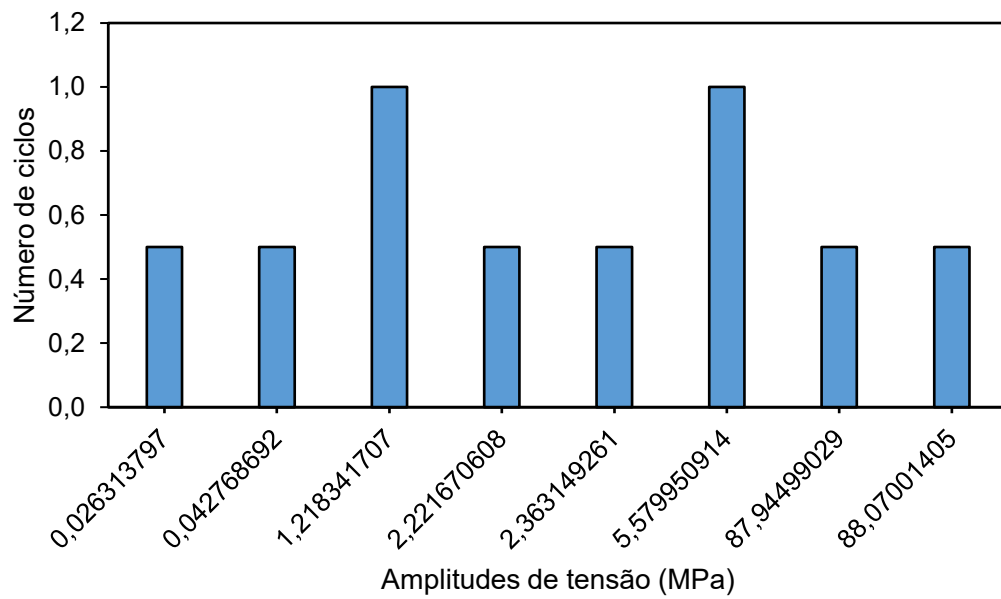


Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A aplicação do algoritmo *Rainflow* sobre os históricos de tensões permitiu a discretização e a contagem dos ciclos de fadiga para cada um dos trens-tipos modelados, mostrados nas Figuras Figura 37 a Figura 48.

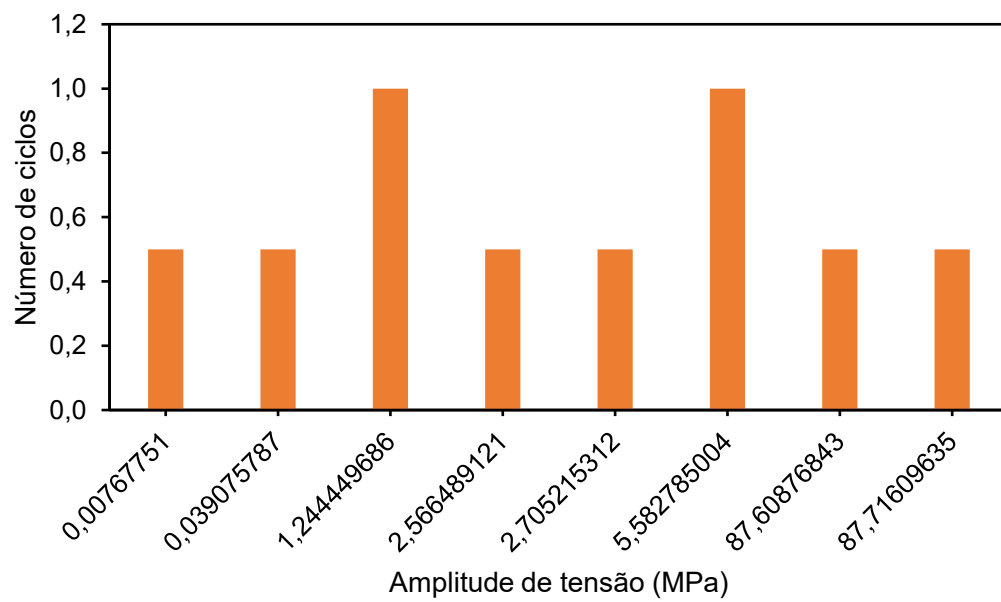
Ressalta-se que, para os históricos de tensões analisados, as amplitudes que não retornaram ao seu ponto inicial ao término da passagem do trem-tipo foram contabilizadas como 0,5 ciclo. Esse procedimento é inerente ao método *Rainflow* e garante a correta contabilização dos ciclos de tensão presentes no histórico de carregamento.

Figura 37 – Resultados *Rainflow* Tensões Normais – Borda comprimida (TB240)



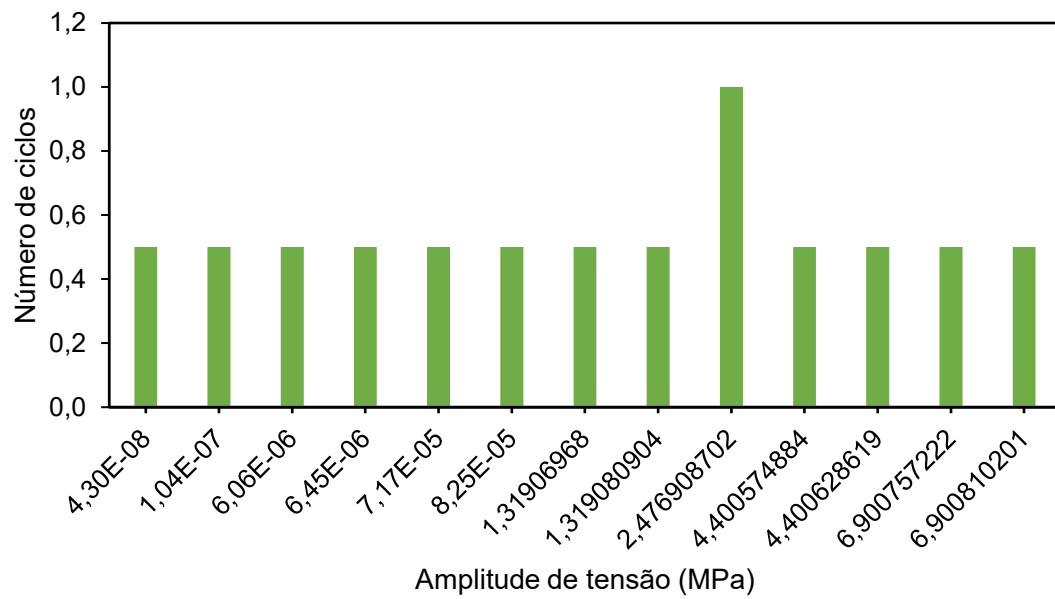
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 38 – Resultados *Rainflow* Tensões Normais – Borda tracionada (TB240)



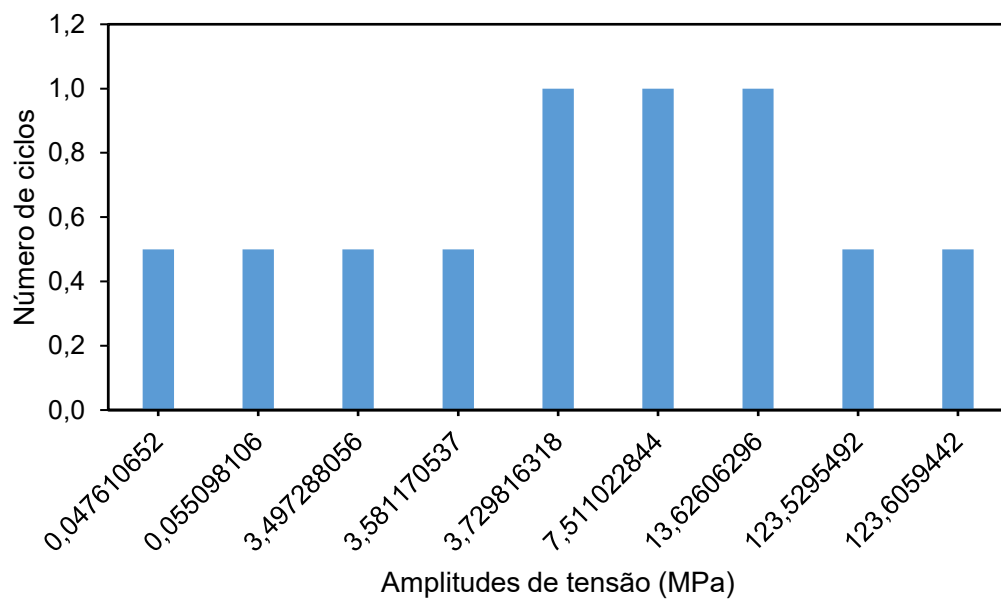
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 39 – Resultados *Rainflow* Tensões de cisalhamento (TB240)



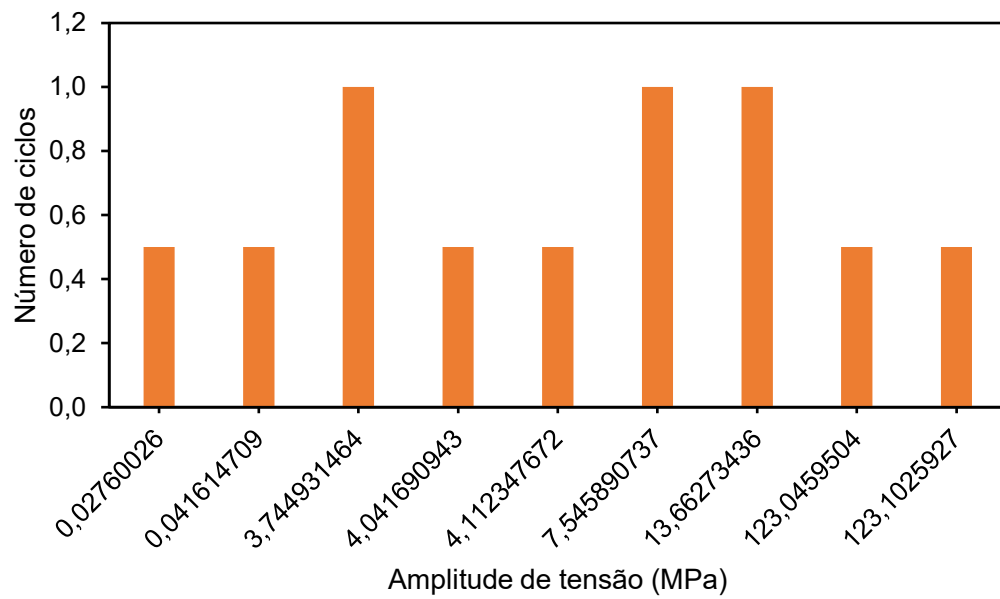
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 40 – Resultados *Rainflow* Tensões Normais – Borda comprimida (TB312)



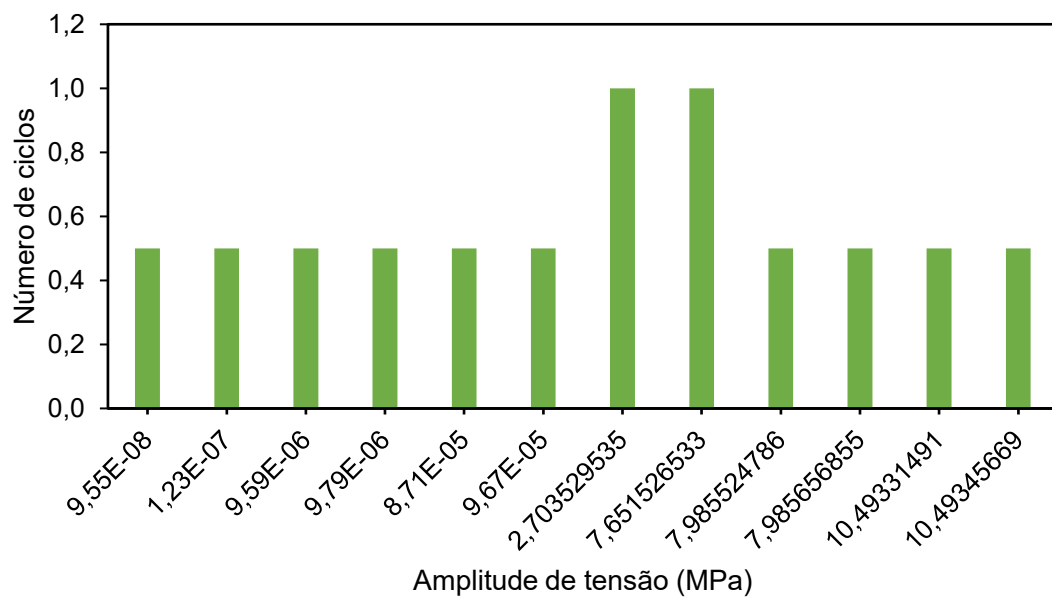
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 41 – Resultados *Rainflow* Tensões Normais – Borda tracionada (TB312)



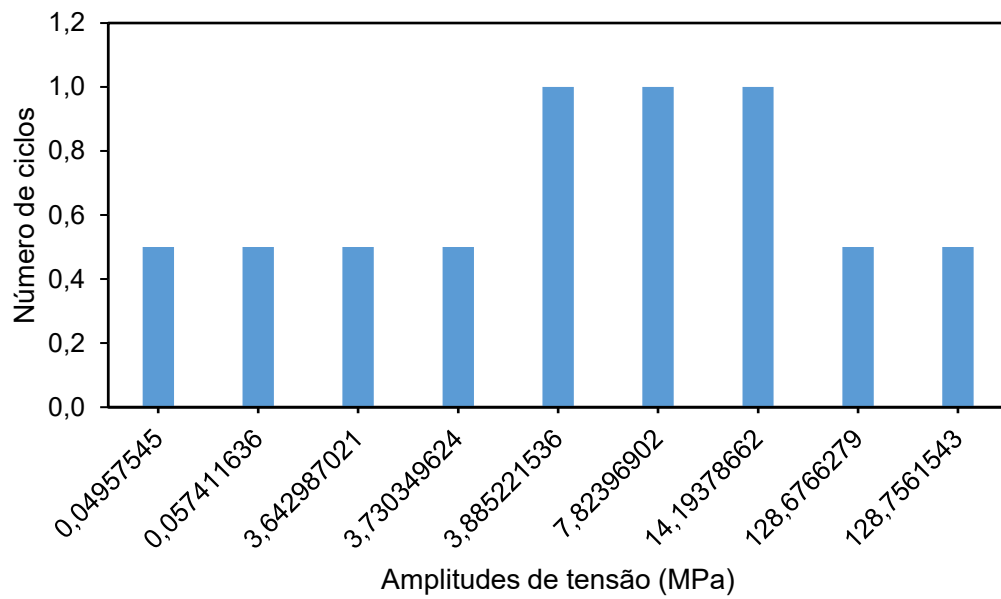
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 42 – Resultados *Rainflow* Tensões de cisalhamento (TB312)



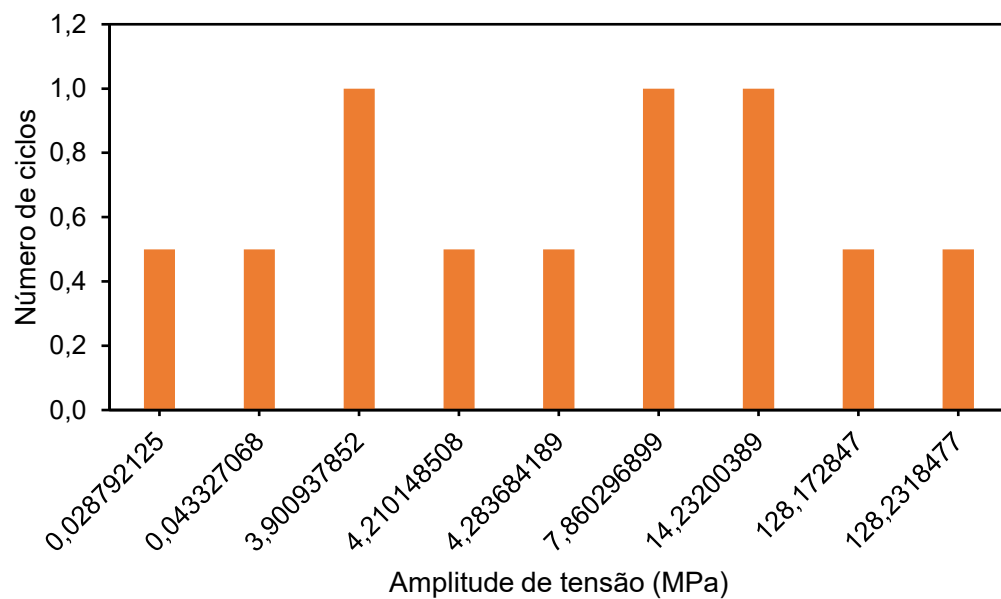
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 43 – Resultados *Rainflow* Tensões Normais – Borda comprimida (TB376)



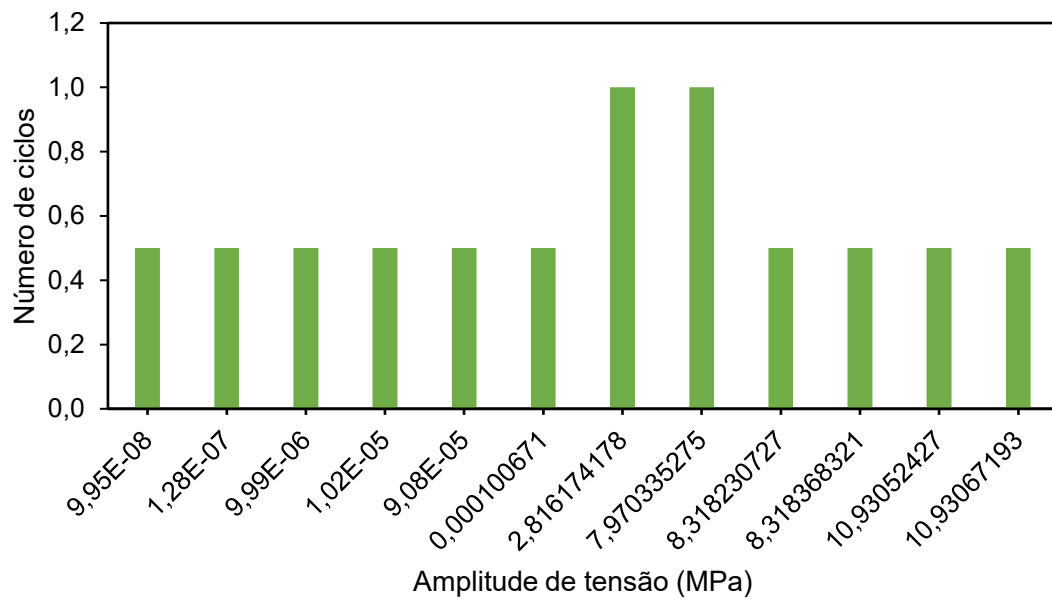
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 44 – Resultados *Rainflow* Tensões Normais – Borda tracionada (TB376)



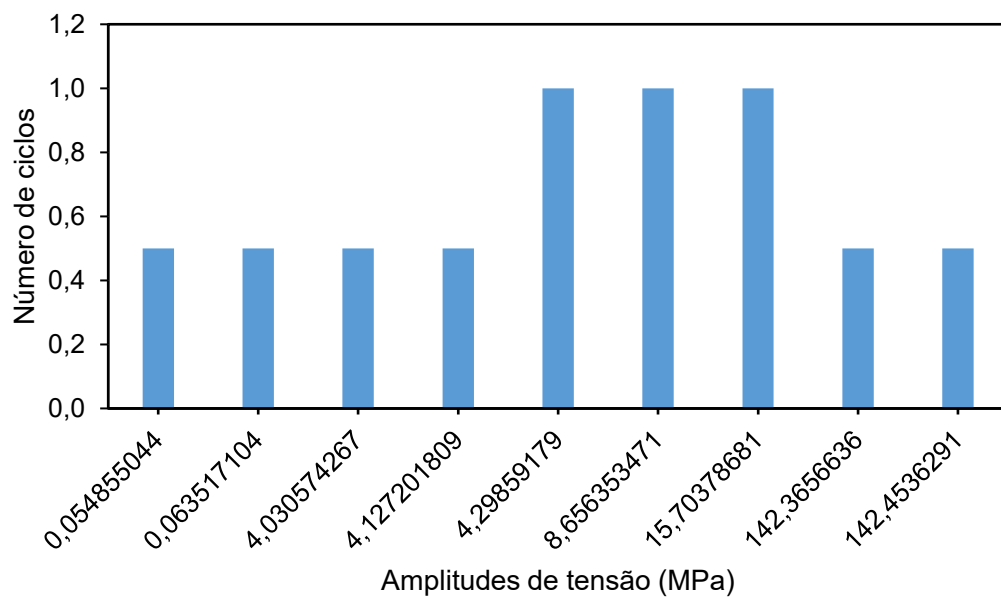
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 45 – Resultados *Rainflow* Tensões de cisalhamento (TB376)



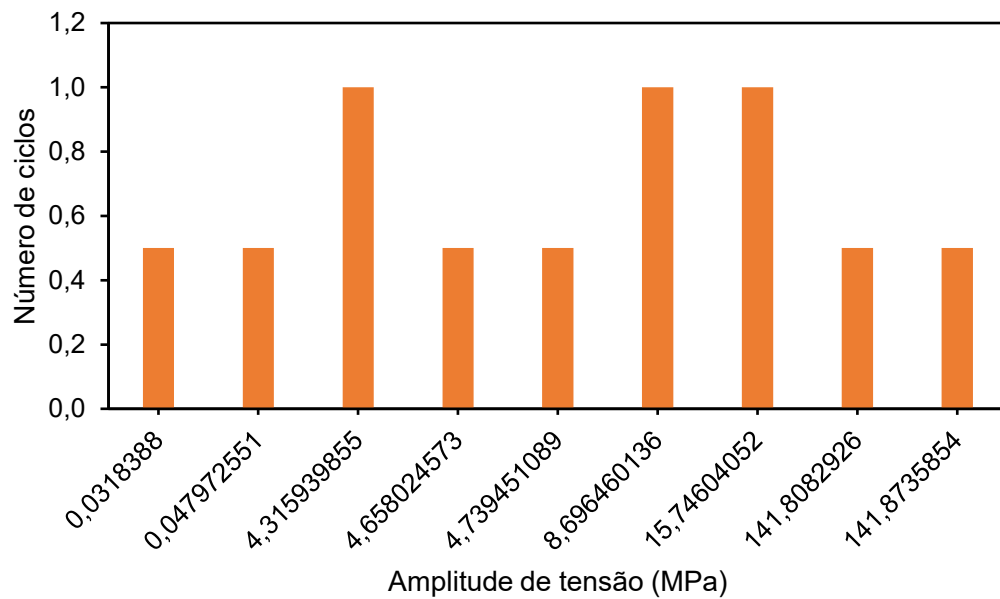
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 46 – Resultados *Rainflow* Tensões Normais – Borda comprimida (TB416)



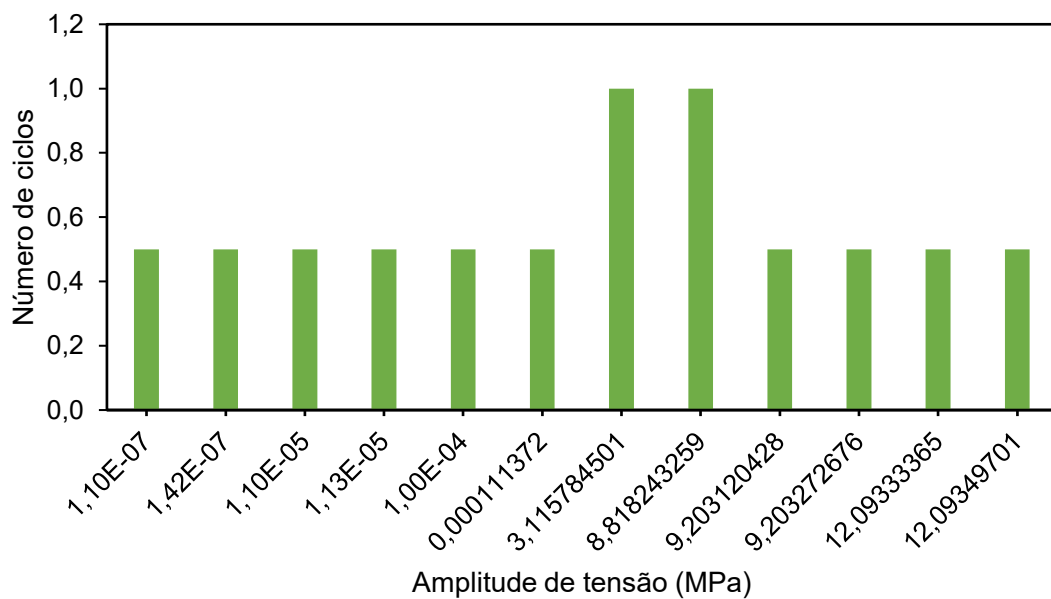
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 47 – Resultados *Rainflow* Tensões Normais – Borda tracionada (TB416)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 48 – Resultados *Rainflow* Tensões de cisalhamento (TB416)

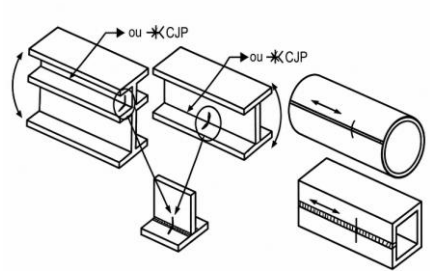


Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Como resultado, obtiveram-se os espectros de amplitude de tensões e suas respectivas frequências de ocorrência, os quais fundamentam a avaliação do dano acumulado na estrutura. Na sequência, consultou-se a norma AREMA (2010) para a

classificação do elemento estrutural. Para a escolha da categoria de detalhe, adotou-se a caracterização da transversina proposta por Colombo (2017), a qual consiste em uma chapa de 30 polegadas de altura e espessura de 9/16 polegadas, unida por meio de rebites a quatro perfis em cantoneira ("L") de abas iguais de 5 polegadas e espessura de 1/2 polegada, dispostos em pares nas extremidades superior e inferior. Com base nessa configuração de ligação rebitada, constatou-se que o componente se enquadra na Categoria B, conforme os critérios descritos na Tabela 12. Posteriormente, determinou-se a constante A correspondente por meio da Tabela 5, viabilizando o cálculo do número de ciclos limite admissíveis (N_i) para cada amplitude de tensão.

Tabela 12 – Descrição da categoria da transversina

Descrição	Categoria	Potencial Ponto de Trinca	Exemplos Ilustrativos
SEÇÃO 3 - JUNTAS SOLDADAS QUE UNEM COMPONENTES DE ELEMENTOS COMPOSTOS			
3.1 Metal base e metal de solda em elementos sem fixações, compostos por chapas ou perfis conectados por soldas longitudinais contínuas com penetração total em juntas de topo com goivagem traseira e soldadas pelo segundo lado, ou por soldas de filete contínuas paralelas à direção da tensão aplicada.	B	A partir da superfície ou descontinuidades internas na solda a partir da extremidade da solda	

Fonte: Adaptado de AREMA (2010)

Para a determinação do volume de ciclos totais acumulados na estrutura, estimou-se o tempo histórico de operação da ponte com base na longevidade da própria linha férrea. De acordo com os registros da concessionária Ferrovia Tereza Cristina (FTC),

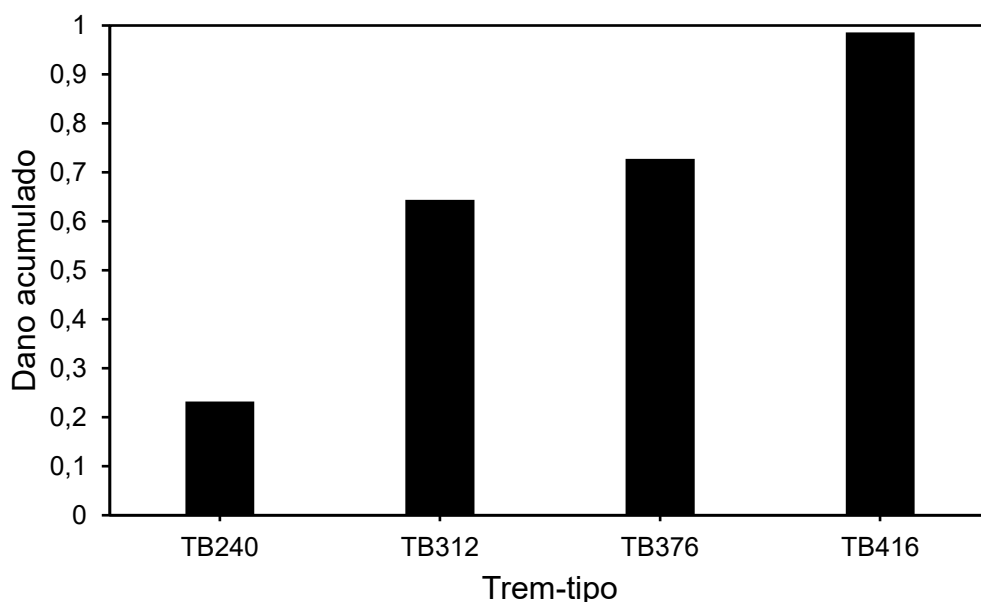
a ferrovia iniciou suas atividades operacionais no ano de 1884, totalizando 142 anos de funcionamento até o presente estudo. Adicionalmente, considerando o cenário operacional reportado pela FTC, que aponta uma frota atual de 13 locomotivas em atividade, estabeleceu-se uma estimativa de tráfego retroativa. Em virtude da impossibilidade de obtenção de informações históricas mais precisas, uma vez que não foi possível estabelecer contato com a administração da ferrovia para acesso aos registros operacionais, adotou-se uma hipótese simplificadora para a caracterização do tráfego ao longo da vida útil da estrutura. Dessa forma, para fins de cálculo do histórico de fadiga, admitiu-se que, ao longo desse período de 142 anos, cada uma das 13 locomotivas realizou uma passagem diária sobre a ponte. Essa premissa permitiu quantificar o número global de ciclos de carregamento atuantes na transversina desde a inauguração da obra, servindo como dado de entrada para a extrapolação do dano acumulado.

Na sequência, aplicou-se a regra de *Palmgren-Miner* para confrontar o número de ciclos atuantes (n_i) com o N_i obtido. Por fim, os valores de dano parcial calculados e o somatório do dano total acumulado por trem-tipo foram compilados no Apêndice C. O referido apêndice apresenta ainda a contribuição percentual de cada faixa de tensão no dano final, permitindo quantificar o consumo da vida útil do elemento estrutural frente aos diferentes modelos de carregamento analisados.

A partir dos resultados compilados no Apêndice C, constatou-se empiricamente a correlação direta entre o peso operacional dos modelos de tráfego e o comportamento à fadiga da estrutura. Observou-se que, quanto maior o peso do trem-tipo analisado, mais elevadas são as suas respectivas amplitudes de tensão e, conseqüentemente, menor é o número de ciclos limites admissíveis N_i , conforme preconizado pela formulação matemática da Equação 3. Ademais, esses dados confirmaram a coerência na escolha do elemento estrutural para a análise de fadiga, visto que as maiores amplitudes de tensão geraram as maiores parcelas de dano. Essa comparação entre o trem-tipo e o dano acumulado resultante está representada no gráfico da Figura 49. Verifica-se um comportamento coerente com o esperado, no qual o aumento da carga do trem-tipo resulta em maiores amplitudes de tensão na estrutura e, conseqüentemente, em maior dano acumulado por fadiga. Esse comportamento decorre da relação direta entre a magnitude das tensões cíclicas e o processo de degradação por fadiga, evidenciando que trens-tipo com maior capacidade de carga

impõem solicitações mais severas aos elementos estruturais, acelerando o acúmulo de dano ao longo da vida útil da ponte.

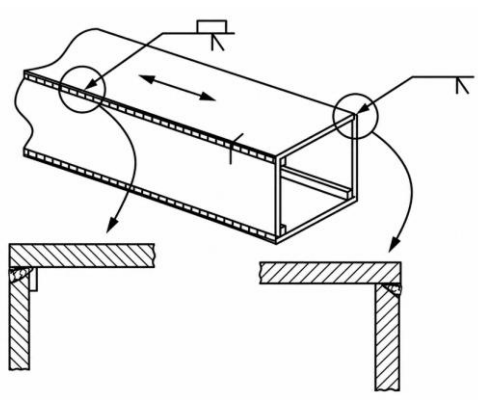
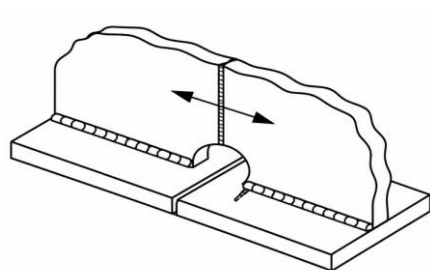
Figura 49 – Dano acumulado por trem-tipo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

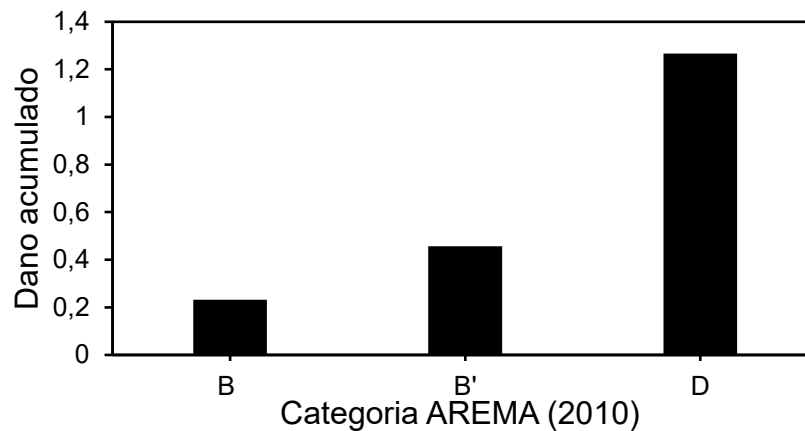
Em seguida, realizou-se uma análise de sensibilidade com o objetivo de avaliar a influência da categoria de detalhe da AREMA (2010) sobre o dano acumulado por fadiga. Para isso, foi selecionado o trem-tipo que apresentou o menor dano acumulado na análise anterior (TB240), considerando inicialmente a categoria B. Posteriormente, a categoria de detalhe foi alterada para as demais categorias apresentadas na Tabela 13, mantendo-se inalterados os demais parâmetros de cálculo, de modo a permitir a avaliação da influência da constante A na estimativa do dano acumulado. O procedimento detalhado encontra-se descrito no Apêndice D, enquanto a Figura 50 apresenta o gráfico comparativo entre o dano acumulado e as diferentes categorias de detalhe consideradas.

Tabela 13 – Descrição de outras categorias da transversina

Descrição	Categoria	Potencial Ponto de Trinca	Exemplos Ilustrativos
SEÇÃO 3 - JUNTAS SOLDADAS QUE UNEM COMPONENTES DE ELEMENTOS COMPOSTOS			
3.2 Metal base e metal de solda em elementos sem fixações, compostos por placas ou perfis conectados por soldas longitudinais contínuas com penetração total com barras de reforço não removidas, ou por soldas parciais contínuas com penetração paralelas à direção da tensão aplicada.	B'	A partir da superfície ou descontinuidades internas na solda a partir da extremidade da solda	 Diagrama 3D mostrando a conexão entre duas placas metálicas por meio de soldas longitudinais contínuas. As placas possuem barras de reforço internas. Setas indicam a direção da tensão aplicada ao longo do eixo longitudinal da junta.
3.3 Metal base e metal de solda na terminação das soldas longitudinais nos furos de acesso para solda feitos de acordo com os requisitos da AASHTO/AWS D1.5, Artigo 3.2.4 em elementos compostos. (Nota: não inclui a emenda de topo da flange).	D	Da terminação da solda para a alma ou flange.	 Diagrama 3D mostrando a terminação de uma solda longitudinal em uma flange de uma placa. A solda se conecta à alma da placa. Setas indicam a direção da tensão aplicada.

Fonte: Adaptado de AREMA (2010)

Figura 50 – Dano acumulado por categoria da AREMA (2010)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Conforme observado na Figura 50, verifica-se que o aumento da constante A resulta em um acréscimo do dano acumulado estimado. Esse comportamento evidencia a significativa influência da categoria de detalhe adotada nos resultados da análise de fadiga, ressaltando a importância da correta classificação do elemento estrutural de acordo com as recomendações da AREMA (2010). Dessa forma, a definição adequada da categoria de detalhe constitui uma etapa fundamental para a obtenção de estimativas representativas da vida à fadiga da estrutura.

Posteriormente, a fim de analisar a sensibilidade da estrutura frente ao aumento da velocidade, a velocidade de deslocamento do trem-tipo TB240 foi alterada para 70 km/h (19,4 m/s). Nessa etapa inicial, mantiveram-se os parâmetros de discretização temporal da ponte, preservando o intervalo de 0,05 segundos entre os passos de carga (steps). As modificações implementadas para essa primeira configuração (Caso 1) estão ilustradas na Figura 51. Após a alteração, exportaram-se os esforços solicitantes referentes à mesma seção (frame) avaliada previamente. Na sequência, calcularam-se as tensões normais (nas bordas comprimida e tracionada) e a tensão de cisalhamento. Analogamente ao procedimento anterior, aplicou-se o algoritmo *Rainflow* para a determinação do novo dano acumulado correspondente ao Caso 1, cujos cálculos detalhados constam no Apêndice E.

Figura 51 – Modificações no modelo para o Caso 1

Vehicle	Lane	Start Dist	Start Time	Direction	Speed
TB240	LANE1	0.	0.	Forward	19.4
TB240	LANE1	0.	0.	Forward	19.4

Note: Vehicles that are defined using a uniform load will not be included in the program generated multi-step load case. Click this note to see a list of vehicles defined using uniform loads.

Load Pattern Discretization Information

Duration of Loading is seconds

Discretize Load every seconds

Units:

OK Cancel

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Constatou-se, contudo, uma redução expressiva no valor do dano acumulado, um comportamento divergente do esperado teoricamente. Verificou-se que a elevação da velocidade, associada à manutenção da discretização temporal prévia, fez com que o trem-tipo saltasse pontos nodais nos quais as tensões haviam sido calculadas anteriormente, comprometendo a captura integral dos picos de tensão. Para corrigir essa inconsistência, realizou-se uma nova simulação (Caso 2) com o TB240 mantido a 70 km/h, porém aplicando-se um refino na discretização temporal. O objetivo dessa estratégia foi assegurar que, ao longo de um mesmo trecho geométrico, mesmo com o menor tempo de percurso decorrente da maior velocidade, o software computasse a mesma quantidade de passos de carga adotada no modelo de referência. Desse modo, o intervalo de tempo foi reduzido de 0,05 segundos para 0,042 segundos, conforme evidenciado na Figura 52. Sob essa nova configuração, replicou-se o procedimento de cálculo do dano acumulado (Apêndice E).

Figura 52 – Modificações no modelo para o Caso 2

Vehicle	Lane	Start Dist	Start Time	Direction	Speed
TB240	LANE1	0.	0.	Forward	19.4
TB240	LANE1	0.	0.	Forward	19.4

Note: Vehicles that are defined using a uniform load will not be included in the program generated multi-step load case. Click this note to see a list of vehicles defined using uniform loads.

Load Pattern Discretization Information

Duration of Loading is seconds

Discretize Load every seconds

Units:

OK Cancel

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A análise comparativa entre os dois cenários permite concluir que a discretização adequada do carregamento (Caso 2) resultou em um valor de dano acumulado significativamente próximo ao obtido no modelo base. Esse comportamento corrobora as predições teóricas, visto que a velocidade escalar isolada do trem-tipo não altera a magnitude do carregamento dinâmico da estrutura, cuja variação está estritamente associada à carga de impacto. Evidencia-se, portanto, a necessidade de rigor no refinamento do modelo, a transição do Caso 1 para o Caso 2 demonstra que malhas temporais mais discretizadas propiciam a convergência dos valores numéricos para resultados mais precisos e condizentes com a realidade física do problema.

No que concerne ao primeiro cenário operacional analisado, que pressupõe uma condição estática futura sem alteração na frota circulante, as estimativas de vida útil foram obtidas de forma individual para os quatro trens-tipo modelados, permitindo mapear o potencial de degradação isolado de cada configuração. Para o trem-tipo TB240, a vida útil estimada foi de 469 anos, ao passo que para os modelos TB312 e TB376, os valores encontrados foram de 78 e 53 anos, respectivamente. Por fim, sob a ação exclusiva do TB416, a estrutura apresentou uma expectativa de 2 anos. Essa variação inicial evidencia como as diferentes distribuições de eixos e magnitudes de carga de cada trem-tipo impactam de forma distinta a amplitude de tensões e, consequentemente, o acúmulo de dano por fadiga na estrutura. Os resultados

detalhados dessas estimativas de vida útil para cada modelo isolado estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Vida Útil da ponte – trens-tipo isolados

TREM TIPO	DANO ACUMULADO	DANO ESTIMADO POR DIA	DANO PARA A FADIGA	VIDA ÚTIL - REMANESCENTE (DIAS)	VIDA ÚTIL - REMANESCENTE (ANOS)
TB240	0,232318769	4,48232E-06	0,767681231	171268,6338	469
TB312	0,644006571	1,24254E-05	0,355993429	28650,54534	78
TB376	0,727907914	1,40441E-05	0,272092086	19374,06172	53
TB416	0,985809958	1,90201E-05	0,014190042	746,0564409	2

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Na sequência, os dados foram confrontados com o cenário de transição normativa, o qual considera a dominância histórica do trem-tipo TB240, ABNT NBR 7189 (1985), até o presente momento, seguida pela introdução predominante do TB312, ABNT NBR 17245 (2026). Constatou-se que, durante o período de operação sob o TB240, a estrutura já havia consumido 23,23% de sua capacidade total de resistência à fadiga. Desse modo, a margem de dano residual disponível até que a estrutura atinja o limite crítico de colapso, estipulado pelo critério de Miner ($D = 1,0$), era de 0,7677. Com a mudança de diretriz e o cálculo do dano diário associado ao TB312, estimado em 1,2425E-05, a vida útil remanescente da ponte foi projetada em apenas 169 anos a partir da transição, o que representa uma redução expressiva quando comparada às projeções estáticas isoladas. Os dados correspondentes a essa análise de transição e à projeção da vida útil remanescente encontram-se sintetizados na Tabela 15.

Tabela 15 – Vida Útil da ponte - cenário de transição normativa

TREM-TIPO	DANO ACUMULADO	DANO ESTIMADO POR DIA	DANO PARA A FADIGA	VIDA ÚTIL - REMANESCENTE (DIAS)	VIDA ÚTIL - REMANESCENTE (ANOS)
TB240	0,232318769	4,48232E-06	0,767681231	61783,40411	169
TB312	0,644006571	1,24254E-05			

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Finalmente, o modelo numérico no *software* SAP2000 foi modificado para simular o reforço estrutural no grupo das transversinas. A alteração consistiu no aumento da altura do perfil em 2 polegadas, simulando a incorporação de duas chapas metálicas

de 1 polegada em cada extremidade, com o objetivo de incrementar a área da seção transversal e o momento de inércia para mitigar as tensões atuantes. As dimensões (em metros) do novo perfil estão ilustradas na Figura 53.

Figura 53 – Dimensões da transversina com reforço

I/Wide Flange Section

Section Name Transversina

Section Notes

Properties

Property Modifiers

Material + A36

Dimensions

Outside height (t3)	0,8128
Top flange width (t2)	0,2682
Top flange thickness (tf)	0,0373
Web thickness (tw)	0,0229
Bottom flange width (t2b)	0,2682
Bottom flange thickness (tfb)	0,0373

☐ Display Color

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A partir dessa nova configuração geométrica, replicaram-se os procedimentos analíticos para o cálculo das tensões e do dano acumulado, cujos resultados detalhados constam no Apêndice F. Adicionalmente, a Tabela 16 apresenta um comparativo entre as propriedades do perfil original e do perfil reforçado.

Tabela 16 – Comparativo dos cenários com e sem reforço

Parâmetro Analisado	Cenário Original (sem reforço)	Cenário Modificado (com reforço)	Variação (%)
Área da seção (m ²)	0,00166562	0,00369125	122%
Tensão Normal Máxima (borda comprimida) (MPa)	-138,340	-66,661	-52%
Tensão Normal Máxima (borda tracionada) (MPa)	137,182	65,878	-52%
Tensão de Cisalhamento Máxima (MPa)	-12,093	-9,014	-25%
Dano acumulado anual	0,006942324	0,000778409	-89%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Com a atualização da geometria e a obtenção das novas estimativas de dano diário, foi possível avaliar o comportamento da estrutura considerando a aplicação do reforço após os 142 anos de operação da ponte. Os dados compilados dessa análise são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Vida Útil da ponte - cenário com reforço das longarinas

TREM TIPO	DANO ACUMULADO	DANO ESTIMADO POR DIA	DANO PARA A FADIGA	VIDA ÚTIL - REMANESCENTE (DIAS)	VIDA ÚTIL - REMANESCENTE (ANOS)
TB416	0,985809958	1,90201E-05	0,014190042	6653,785846	18
TB416 Reforçado	0,110534046	2,13263E-06			

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Conforme exposto na Tabela 14 e Tabela 17, a intervenção estrutural promoveu um incremento de 16 anos na vida útil da ponte para o TB416, demonstrando ser uma solução eficaz para a extensão da vida útil operacional da estrutura.

Em suma, as análises numéricas e analíticas realizadas permitiram mapear com precisão o comportamento estrutural da ponte frente ao histórico de carregamento ferroviário e às projeções futuras de tráfego. A identificação da transversina 133 como o elemento mais crítico, atrelada à aplicação dos critérios normativos e da regra de

Palmgren-Miner, fundamentou a estimativa cronológica da capacidade da obra. Os resultados obtidos evidenciam o impacto direto da modernização da frota sobre o consumo da vida útil da estrutura, fornecendo dados essenciais para a gestão de ativos e tomada de decisões de manutenção, os quais serão sintetizados e consolidados nas conclusões a seguir.

5 CONCLUSÃO

Este estudo buscou avaliar a vida útil remanescente à fadiga de uma ponte ferroviária em treliça metálica e propor uma metodologia consistente para análise da fadiga. A partir das análises numéricas e computacionais realizadas, constatou-se que a estrutura em estudo, levando-se em consideração as simplificações de carregamento adotadas e o histórico operacional levantado, apresentou variações na estimativa de sua vida útil remanescente a depender dos diferentes cenários operacionais analisados.

Do ponto de vista prático, as contribuições deste trabalho residem no fornecimento de um roteiro metodológico claro para que concessionárias e empresas do setor ferroviário possam avaliar, de forma técnica e adequada, a integridade e a durabilidade de pontes metálicas antigas em operação. Já no âmbito acadêmico, a pesquisa avança ao preencher uma lacuna identificada na ABNT NBR 17245 (2026), a qual não explicita detalhadamente os procedimentos para a definição da variação de tensão necessária à aplicação da regra de Palmgren-Miner. Tal lacuna foi contornada neste estudo por meio da associação com as diretrizes internacionais da AREMA (2010) e do emprego do algoritmo de contagem de ciclos *Rainflow*.

Apesar dos resultados satisfatórios, o estudo apresenta limitações intrínsecas. A principal delas refere-se à escassez de dados históricos detalhados por parte da concessionária Ferrovia Tereza Cristina no que tange ao espectro real de carregamentos passados e ao tempo exato de operação fidedigna da estrutura. Essa ausência de dados de tráfego retroativos exigiu a adoção de premissas simplificadas, o que restringe uma estimativa de vida útil ainda mais precisa.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação desta metodologia a partir de uma amostragem de dados de tráfego mais robusta, buscando monitorar ou obter registros detalhados das cargas passadas e das projeções de demanda futura da ferrovia. Além disso, para uma avaliação de integridade ainda mais abrangente, sugere-se estender a análise para os demais elementos constituintes da ponte metálica, mapeando não apenas o componente considerado mais crítico (como a transversina), mas também as regiões geometricamente frágeis com potencial para a nucleação e propagação de rupturas por fadiga. Recomenda-se, ainda, a investigação de soluções de reforço estrutural para a transversina crítica identificada neste estudo, avaliando sua eficiência frente aos diferentes cenários de carregamento considerados,

incluindo a atuação isolada dos demais trens-tipo e o cenário de transição normativa entre a ABNT NBR 7189 (1985) e a ABNT NBR 17245 (2026). Adicionalmente, propõe-se a avaliação de cenários de degradação por corrosão mediante a simulação da redução escalonada da área da seção transversal dos elementos críticos em patamares de 10%, 20%, 30% e 50%. Por fim, recomenda-se a confrontação dos resultados obtidos neste trabalho com estudos semelhantes reportados na literatura técnica, ainda escassos, buscando consolidar o procedimento aqui proposto de aplicação conjunta das diretrizes da AREMA (2010) e da ABNT NBR 17245 (2026).

Declaração sobre o uso de Inteligência Artificial: O ChatGPT (OpenAI) foi utilizado exclusivamente para auxiliar na elaboração das figuras esquemáticas 2, 3 e 4, bem como na revisão textual do manuscrito. Todo o conteúdo técnico, a metodologia, as análises, os resultados e as conclusões foram desenvolvidos, produzidos e validados pelo autor.

REFERÊNCIAS

- AFONSO, D. F. Verificação à fadiga de pontes metálicas ferroviárias. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE-OF-WAY ASSOCIATION. Manual of Railway Engineering. Lanham: AREMA, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7189:1985: Cargas móveis para projeto estrutural de obras ferroviárias. Rio de Janeiro: ABNT, 1985.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8681:2025: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 17245:2026: Ações devido ao tráfego de veículos ferroviários e metroferroviários em pontes, viadutos e outras estruturas. Rio de Janeiro: ABNT, 2026.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS. Anuário Estatístico ANTF 2025. Brasília: ANTF, 2025.
- AZEVEDO, Henrique F. de. Estudo de métodos clássicos e numéricos para obtenção de esforços solicitantes em longarinas de pontes. Universidade Federal do Ceará, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/70436>. Acesso em: 2 nov. 2025.
- ÁVILA, G. C. Análise da vida remanescente por fadiga de uma viga de rolamento. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- CAIXETA, Edielce Cristina. Investigação experimental da fadiga em lajes de pontes com ou sem pré-lajes. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- COLOMBO, Pablo Diedri Krenkel. Análise estrutural da ponte ferroviária em treliça metálica danificada pela oxidação na Ferrovia Tereza Cristina. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Painel CNT do Transporte: Ferroviário. Brasília: CNT, 2024.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.

Manual de inspeção de pontes rodoviárias. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

FÉLIX, Emerson Felipe. Estudo numérico-experimental da fadiga em concretos submetidos à compressão cíclica: proposição de um modelo de dano acumulado. Universidade de São Paulo, 2022. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/003085503>. Acesso em: 2 nov. 2025.

FERROVIA TEREZA CRISTINA. História. Disponível em: <https://www.ftc.com.br/historia>. Acesso em: 2 nov. 2025.

FERROVIA TEREZA CRISTINA. Operacional. Disponível em: <https://www.ftc.com.br/operacional>. Acesso em: 2 nov. 2025.

FISHER, John W.; ROY, S. Fatigue of steel bridge infrastructure. Structure and Infrastructure Engineering, v. 7, n. 7-8, p. 457-475, 2011.

HAGHANI, Reza; AL-EMRANI, Mohammad; HESHMATI, Mohsen. Fatigue-prone details in steel bridges. Buildings, v. 2, n. 4, p. 456-476, 2012.

JUNGES, P. Análise de fadiga em pontes curtas de concreto armado: vida útil à fadiga e confiabilidade de carregamento. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

JUNGES, Paulo. Análise de fadiga em pontes curtas de concreto armado a partir de dados de sistemas B-WIM. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

LEAL, Anderson Couto. Dimensionamento de armaduras longitudinais sujeitas à fadiga em vigas de pontes ferroviárias de concreto armado. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

MAKITA, F. K.; SANTA MARIA, V. A. Estudo sobre a curva S-N e o gráfico de Weibull para análise de resistência à fadiga de contato de engrenagens. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.

MARTINS, P. M. P. Avaliação do comportamento à fadiga de uma ponte ferroviária metálica. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Porto, 2020.

MOREIRA, Amacin Rodrigues et al. Determinação de esforços em lajes de pontes: método simplificado versus método dos elementos finitos. 2020. Disponível em: <https://educapes.capes.gov.br/handle/capes/1084171>. Acesso em: 2 nov. 2025.

- OLIVEIRA, Paula Campos. Previsão da vida em fadiga de alto ciclo em aço ABNT 4140 – Parte II: $R = 0,3$. 2002. Relatório final (Iniciação Científica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Universitário da FEI, Laboratório de Materiais (LabMat), 2002.
- OPENAI. ChatGPT. Imagens geradas em 16 maio 2026.
- PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. Pontes de aço. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- RUSO, F. M.; CONNOR, R. J.; FISHER, J. W.; MERTZ, D. R. Design and Evaluation of Steel Bridges for Fatigue and Fracture. Washington, D.C.: Federal Highway Administration, 2016. (FHWA-NHI-16-016).
- TEIXEIRA, R. M. Metodologias para modelagem e análise da fadiga em ligações rebitadas com aplicação em pontes metálicas ferroviárias. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- UNSWORTH, John F. Design of Modern Steel Railway Bridges. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- VICENTINI, Daniane Franciesca. Avaliação do comportamento mecânico da via férrea utilizando elementos finitos considerando fadiga: estudo paramétrico. Universidade Federal do Paraná, 2019. Disponível em: <https://educapes.capes.gov.br/handle/1884/65859>. Acesso em: 2 nov. 2025.
- VITÓRIO, J. A. P. Pontes rodoviárias: fundamentos, conservação e gestão. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2014.
- YE, Xiaoming; SU, Ying; HAN, Xiaoming. A State-of-the-Art Review on Fatigue Life Assessment of Steel Bridges. Mathematical Problems in Engineering, v. 2014, p. 1-13, 2014. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2014/956473>. Acesso em: 2 nov. 2025.

APÊNDICE A – CÁLCULO DAS DIFERENÇAS DE TENSÕES

A.1 TABELA PARA CÁLCULO DAS TENSÕES NOS ELEMENTOS 131 E 133

Frame	Station m	StepType	P - normal KN	V2 - cortante KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 - fletor KN-m
133	0	Max	0	0,002234	0,513	8,5112	0,6458	297,4965
133	0,375	Max	0	0,002234	0,513	8,5112	0,4534	328,8451
133	0,75	Max	0	0,002234	0,513	8,5112	0,2611	373,3428
133	0	Min	-8,213	-118,661	-0,516	-5,7776	-0,6498	-10,8999
133	0,375	Min	-8,213	-118,661	-0,516	-5,7776	-0,4562	-10,8999
133	0,75	Min	-8,213	-118,661	-0,516	-5,7776	-0,2627	-10,8998
137	0	Max	0	0,002885	0,019	8,7652	0,0239	301,2886
137	0,375	Max	0	0,002885	0,019	8,7652	0,0167	324,8962
137	0,75	Max	0	0,002885	0,019	8,7652	0,0096	360,8425
137	0	Min	-6,847	-95,857	-1,412	-8,7215	-1,7776	-10,9753
137	0,375	Min	-6,847	-95,857	-1,412	-8,7215	-1,2481	-10,9753
137	0,75	Min	-6,847	-95,857	-1,412	-8,7215	-0,7187	-10,9752

Frame	Station m	StepType	Tensões normais (comp.) MPa	Tensões normais (trac.) MPa	Tensões de cisalhamento MPa
133	0	Max	-68,05043557	68,05043557	0,000129917
133	0,375	Max	-75,22122879	75,22122879	0,000129917
133	0,75	Max	-85,39979515	85,39979515	0,000129917
133	0	Min	2,140610504	-2,84595534	-6,900680284
133	0,375	Min	2,140610504	-2,84595534	-6,900680284
133	0,75	Min	2,140587629	-2,845932465	-6,900680284
137	0	Max	-68,91785437	68,91785437	0,000167776
137	0,375	Max	-74,31794299	74,31794299	0,000167776
137	0,75	Max	-82,54043089	82,54043089	0,000167776
137	0	Min	2,216514846	-2,80454554	-5,574523306
137	0,375	Min	2,216514846	-2,80454554	-5,574523306
137	0,75	Min	2,216491972	-2,804522666	-5,574523306

A.2 TABELA PARA AS DIFERENÇAS DE TENSÕES NOS ELEMENTOS 131 E 133

Frame	Station m	Diferença de tensões		
		normais (trac.)	normais (comp.)	cisalhamento
133	0	70,89639091	70,19104608	6,900810201
133	0,375	78,06718413	77,3618393	6,900810201
133	0,75	88,24572762	87,54038278	6,900810201
137	0	71,72239991	71,13436922	5,574691081
137	0,375	77,12248853	76,53445783	5,574691081
137	0,75	85,34495356	84,75692286	5,574691081

APÊNDICE B – CÁLCULO DAS DISFERENÇAS DE TENSÕES

B.1 TABELA PARA AS TENSÕES PARA CADA STEP PARA O TB240

Step	Tensões normais (comp.) - MPa	Tensões normais (trac.) - Mpa	Tensões de cisalhamento - Mpa
1	0	0	0
2	0	0	0
3	-0,026313797	0,00767751	4,3046E-08
4	0,015064434	-0,055342862	-9,01396E-08
5	0,077338881	-0,148019364	-2,87691E-07
6	0,306421491	-0,417552164	-9,22913E-07
7	0,606249717	-0,756284714	-1,73591E-06
8	1,100027845	-1,306401112	-3,06533E-06
9	1,693159817	-1,952693739	-4,6419E-06
10	2,195356811	-2,518958338	-6,00155E-06
11	2,167535455	-2,558811611	-6,01318E-06
12	0,521324343	-0,975208119	-1,89409E-06
13	-4,983287628	4,473752633	1,20554E-05
14	-13,74297504	13,18431582	3,42938E-05
15	-26,57355411	25,97375765	6,57147E-05
16	-40,92906026	40,29465355	-0,055246848
17	-56,729239	56,06640551	-1,319003965
18	-61,79427986	61,10954658	7,69385E-05
19	-85,74963348	85,04995682	-6,900680284
20	-68,40271913	67,69737429	0,000129917
21	-73,98267004	73,2801593	-2,476977906
22	-63,44555507	62,75515362	-0,000119508
23	-56,18718407	55,51662124	-6,92039E-05
24	-57,40552577	56,76107093	-4,400498701
25	-31,5178551	30,90637876	7,61825E-05
26	-17,48295639	16,91029849	4,37788E-05
27	-7,191628821	6,665432814	1,76557E-05
28	-0,661949159	0,189343213	1,0968E-06
29	1,850487246	-2,262460846	-5,2281E-06
30	2,320380569	-2,666139525	-6,34466E-06
31	1,981181161	-2,257118451	-5,395E-06
32	1,274008426	-1,497815639	-3,52998E-06
33	0,750710314	-0,919209836	-2,12729E-06
34	0,39604148	-0,519710853	-1,16716E-06
35	0,135872197	-0,219778432	-4,53722E-07
36	0,038912675	-0,085889861	-1,59402E-07
37	-0,017597154	-0,008081418	1,1817E-08

38	-0,042768692	0,039075787	1,04155E-07
39	0	0	0
40	0	0	0
41	0	0	0
42	0	0	0
43	0	0	0
44	0	0	0
45	0	0	0
46	0	0	0
47	0	0	0
48	0	0	0
49	0	0	0
50	0	0	0
51	0	0	0
52	0	0	0
53	0	0	0
54	0	0	0
55	0	0	0
56	0	0	0
57	0	0	0
58	0	0	0
59	0	0	0
60	0	0	0
61	0	0	0
62	0	0	0
63	0	0	0
64	0	0	0
65	0	0	0
66	0	0	0
67	0	0	0
68	0	0	0
69	0	0	0
70	0	0	0
71	0	0	0
72	0	0	0
73	0	0	0
74	0	0	0
75	0	0	0
76	0	0	0
77	0	0	0
78	0	0	0
79	0	0	0
80	0	0	0
81	0	0	0

B.2 TABELA PARA AS TENSÕES PARA CADA STEP PARA O TB312

Step	Tensões normais (comp.) - MPa	Tensões normais (trac.) - Mpa	Tensões de cisalhamento - Mpa
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	-0,055098106	0,041614709	1,22939E-07
5	-0,012114007	-0,03434789	-2,88447E-08
6	0,092291392	-0,170443565	-3,35377E-07
7	0,291887039	-0,432818596	-9,24076E-07
8	0,721992935	-0,921667444	-2,09473E-06
9	1,302459848	-1,576507744	-3,66723E-06
10	2,108626413	-2,46469115	-5,82127E-06
11	3,094915729	-3,53540199	-8,43823E-06
12	3,526072431	-4,070732963	-9,66529E-06
13	2,352161503	-2,994812837	-6,79245E-06
14	-2,871964644	2,140769474	6,40282E-06
15	-13,82874364	13,01931042	3,42065E-05
16	-30,91965149	30,04323068	7,74619E-05
17	-52,42615158	51,49373603	4,89894E-05
18	-101,7206855	100,7407775	-10,49323744
19	-88,09462255	87,07804312	0,000128812
20	-104,9211877	103,8772979	-2,703548139
21	-101,1913714	100,1323665	-0,000198947
22	-101,8012084	100,7410011	-1,86036E-05
23	-120,0798718	119,0318597	-7,651397721
24	-90,62435084	89,60167383	0,000219243
25	-98,13537368	97,14756456	-7,985437612
26	-56,36433404	55,42195623	-0,000118286
27	-34,74626245	33,85807588	8,71737E-05
28	-16,75910972	15,93567781	4,16503E-05
29	-4,877298244	4,130214995	1,14913E-05
30	1,801824902	-2,462597235	-5,41361E-06
31	3,449677404	-4,014090683	-9,49664E-06
32	3,187687453	-3,64895704	-8,69992E-06
33	2,269089476	-2,640527003	-6,25162E-06
34	1,45202266	-1,742473924	-4,06908E-06
35	0,833724831	-1,044306292	-2,39306E-06
36	0,36844056	-0,521052002	-1,13401E-06
37	0,061626326	-0,152660726	-2,7385E-07
38	0,001383789	-0,054200918	-7,14138E-08
39	-0,047610652	0,02760026	9,5548E-08
40	0	0	0

41	0	0	0
42	0	0	0
43	0	0	0
44	0	0	0
45	0	0	0
46	0	0	0
47	0	0	0
48	0	0	0
49	0	0	0
50	0	0	0
51	0	0	0
52	0	0	0
53	0	0	0
54	0	0	0
55	0	0	0
56	0	0	0
57	0	0	0
58	0	0	0
59	0	0	0
60	0	0	0
61	0	0	0
62	0	0	0
63	0	0	0
64	0	0	0
65	0	0	0
66	0	0	0
67	0	0	0
68	0	0	0
69	0	0	0
70	0	0	0
71	0	0	0
72	0	0	0
73	0	0	0
74	0	0	0
75	0	0	0
76	0	0	0
77	0	0	0
78	0	0	0
79	0	0	0
80	0	0	0
81	0	0	0

B.3 TABELA PARA AS TENSÕES PARA CADA STEP PARA O TB376

Step	Tensões normais (comp.) - MPa	Tensões normais (trac.) - Mpa	Tensões de cisalhamento - Mpa
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	-0,057411636	0,043327068	1,28115E-07
5	-0,012644157	-0,035793014	-3,00427E-08
6	0,096126617	-0,177542287	-3,49335E-07
7	0,304064149	-0,450835648	-9,6304E-07
8	0,752070606	-0,960075622	-2,18196E-06
9	1,356725313	-1,64219545	-3,82017E-06
10	2,196535208	-2,567371565	-6,06552E-06
11	3,223864699	-3,682729603	-8,79297E-06
12	3,672937989	-4,240357121	-1,00666E-05
13	2,450162146	-3,11960851	-7,07741E-06
14	-2,991630088	2,229946982	6,67033E-06
15	-14,40494333	13,56175868	3,56313E-05
16	-32,20797755	31,29505711	8,07186E-05
17	-54,61059377	53,6392739	5,10306E-05
18	-105,9590238	104,9383221	-10,93044356
19	-91,76523717	90,70631816	0,000134163
20	-109,2929309	108,2054992	-2,816193555
21	-105,4077094	104,3045614	-0,000207205
22	-106,0429341	104,9384979	-1,93771E-05
23	-125,0832164	123,9914906	-7,970201113
24	-94,40036211	93,33508787	0,000228373
25	-102,2243311	101,1953848	-8,318139948
26	-58,71288576	57,73117423	-0,00012323
27	-36,19402887	35,26882737	9,07793E-05
28	-17,45737305	16,59967442	4,33833E-05
29	-5,080547029	4,302288792	1,19682E-05
30	1,876884954	-2,565225251	-5,63925E-06
31	3,593411571	-4,181356383	-9,89209E-06
32	3,320550336	-3,800971499	-9,0663E-06
33	2,36361136	-2,750593441	-6,51331E-06
34	1,512532416	-1,815092973	-4,23889E-06
35	0,868460039	-1,087801413	-2,49251E-06
36	0,38379118	-0,542757853	-1,1817E-06
37	0,064197434	-0,15901062	-2,85248E-07
38	0,001476863	-0,056441029	-7,43797E-08
39	-0,04957545	0,028792125	9,95025E-08
40	0	0	0

41	0	0	0
42	0	0	0
43	0	0	0
44	0	0	0
45	0	0	0
46	0	0	0
47	0	0	0
48	0	0	0
49	0	0	0
50	0	0	0
51	0	0	0
52	0	0	0
53	0	0	0
54	0	0	0
55	0	0	0
56	0	0	0
57	0	0	0
58	0	0	0
59	0	0	0
60	0	0	0
61	0	0	0
62	0	0	0
63	0	0	0
64	0	0	0
65	0	0	0
66	0	0	0
67	0	0	0
68	0	0	0
69	0	0	0
70	0	0	0
71	0	0	0
72	0	0	0
73	0	0	0
74	0	0	0
75	0	0	0
76	0	0	0
77	0	0	0
78	0	0	0
79	0	0	0
80	0	0	0
81	0	0	0

B.4 TABELA PARA AS TENSÕES PARA CADA STEP PARA O TB416

Step	Tensões normais (comp.) - MPa	Tensões normais (trac.) - Mpa	Tensões de cisalhamento - Mpa
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	-0,063517104	0,047972551	1,41723E-07
5	-0,013985386	-0,039604675	-3,32412E-08
6	0,106360571	-0,196450274	-3,86495E-07
7	0,336416317	-0,498818251	-1,06539E-06
8	0,832054739	-1,062217184	-2,414E-06
9	1,501050108	-1,816922299	-4,22667E-06
10	2,430184678	-2,840526529	-6,71104E-06
11	3,566836653	-4,074482255	-9,72345E-06
12	4,063684705	-4,691478538	-1,11366E-05
13	2,710833037	-3,451475173	-7,82761E-06
14	-3,309906702	2,467151451	7,37982E-06
15	-15,93740501	15,00447417	3,9423E-05
16	-35,63435529	34,62430286	8,93254E-05
17	-60,42023243	59,34559711	5,64623E-05
18	-117,2312756	116,1019338	-12,09324433
19	-101,5274888	100,3558932	0,00014841
20	-120,9198482	119,7167342	-3,115805937
21	-116,6212564	115,4007943	-0,000229245
22	-117,3240922	116,1021701	-2,14358E-05
23	-138,3899444	137,1821069	-8,818094848
24	-104,4429194	103,2643675	0,000252682
25	-113,0992729	111,9608276	-9,203019995
26	-64,9589308	63,87278736	-0,000136314
27	-40,04445522	39,02083351	0,000100433
28	-19,31457729	18,36558661	4,80008E-05
29	-5,621014814	4,759966802	1,32418E-05
30	2,076525808	-2,838123032	-6,23999E-06
31	3,975719223	-4,626185774	-1,09389E-05
32	3,673800073	-4,205320734	-1,00258E-05
33	2,615064688	-3,043184012	-7,20535E-06
34	1,67343147	-2,008197593	-4,68959E-06
35	0,960858515	-1,20355966	-2,75827E-06
36	0,424626108	-0,600511439	-1,30731E-06
37	0,071002221	-0,175949425	-3,15605E-07
38	0,00160199	-0,062491981	-8,22887E-08
39	-0,054855044	0,0318388	1,10087E-07
40	0	0	0

41	0	0	0
42	0	0	0
43	0	0	0
44	0	0	0
45	0	0	0
46	0	0	0
47	0	0	0
48	0	0	0
49	0	0	0
50	0	0	0
51	0	0	0
52	0	0	0
53	0	0	0
54	0	0	0
55	0	0	0
56	0	0	0
57	0	0	0
58	0	0	0
59	0	0	0
60	0	0	0
61	0	0	0
62	0	0	0
63	0	0	0
64	0	0	0
65	0	0	0
66	0	0	0
67	0	0	0
68	0	0	0
69	0	0	0
70	0	0	0
71	0	0	0
72	0	0	0
73	0	0	0
74	0	0	0
75	0	0	0
76	0	0	0
77	0	0	0
78	0	0	0
79	0	0	0
80	0	0	0
81	0	0	0

APÊNDICE C – CÁLCULO DO DANO ACUMULADO

Trem-tipo	Elemento	Categoria (AREMA)	Categoria da tensão	Amplitude de tensão (Mpa)	Número de ciclos limite	Número de ciclos rainflow	Número de ciclos totais estimados
TB240	Transversina	B	Normal (borda comprimida)	0,026313797	2,15868E+17	0,5	336895
				0,042768692	5,0276E+16	0,5	336895
				1,218341707	2,17486E+12	1,0	673790
				2,221670608	3,58674E+11	0,5	336895
				2,363149261	2,98034E+11	0,5	336895
				5,579950914	22638495985	1,0	673790
				87,94499029	5782363,512	0,5	336895
				88,07001405	5757772,61	0,5	336895
			Normal (borda tracionada)	0,00767751	8,69116E+18	0,5	336895
				0,039075787	6,59197E+16	0,5	336895
				1,244449686	2,04083E+12	1,0	673790
				2,566489121	2,32659E+11	0,5	336895
				2,705215312	1,9867E+11	0,5	336895
				5,582785004	22604036321	1,0	673790
				87,60876843	5849193,389	0,5	336895
				87,71609635	5827748,731	0,5	336895
			Tangencial	4,30E-08	4,93105E+34	0,5	336895
				1,04E-07	3,48097E+33	0,5	336895
				6,06E-06	1,77065E+28	0,5	336895
				6,45E-06	1,46655E+28	0,5	336895
				7,17E-05	1,0658E+25	0,5	336895
				8,25E-05	6,99758E+24	0,5	336895
				1,31906968	1,7137E+12	0,5	336895
				1,319080904	1,71366E+12	0,5	336895
				2,476908702	2,58826E+11	1,0	673790
				4,400574884	46154118329	0,5	336895
				4,400628619	46152427625	0,5	336895
				6,900757222	11968740761	0,5	336895
				6,900810201	11968465104	0,5	336895

Trem-tipo	Elemento	Categoria (AREMA)	Categoria da tensão	Cálculo do dano	DANO ACUMULADO	Percentual da contribuição (%)
TB240	Transversina	B	Normal (borda comprimida)	1,56065E-12	0,232318769	6,71772E-10
				6,70091E-12		2,88436E-09
				3,09808E-07		0,000133355
				9,3928E-07		0,000404306
				1,13039E-06		0,00048657
				2,9763E-05		0,012811285
				0,058262508		25,07869173
				0,058511342		25,18580045
			Normal (borda tracionada)	3,8763E-14		1,66852E-11
				5,11068E-12		2,19986E-09
				3,30155E-07		0,000142113
				1,44802E-06		0,00062329
				1,69575E-06		0,000729923
				2,98084E-05		0,012830816
				0,05759683		24,79215549
				0,057808772		24,88338442
			Tangencial	6,83211E-30		2,94083E-27
				9,67819E-29		4,16591E-26
				1,90267E-23		8,1899E-21
				2,29719E-23		9,88808E-21
				3,16096E-20		1,36061E-17
				4,81445E-20		2,07235E-17
				1,96589E-07		8,46203E-05
				1,96594E-07		8,46225E-05
				2,60325E-06		0,001120551
				7,29935E-06		0,003141954
				7,29962E-06		0,003142069
				2,81479E-05		0,012116071
				2,81486E-05		0,01211635

Trem-tipo	Elemento	Categoria (AREMA)	Categoria da tensão	Amplitude de tensão (Mpa)	Número de ciclos limite	Número de ciclos rainflow	Número de ciclos totais estimados
TB312	Transversina	B	Normal (borda comprimida)	0,047610652	3,6444E+16	0,5	336895
				0,055098106	2,35141E+16	0,5	336895
				3,497288056	91948466872	0,5	336895
				3,581170537	85637444235	0,5	336895
				3,729816318	75801250843	1,0	673790
				7,511022844	9281997725	1,0	673790
				13,62606296	1554631748	1,0	673790
				123,5295492	2086537,224	0,5	336895
				123,6059442	2082670,842	0,5	336895
			Normal (borda tracionada)	0,02760026	1,87068E+17	0,5	336895
				0,041614709	5,45755E+16	0,5	336895
				3,744931464	74887112286	1,0	673790
				4,041690943	59572990641	0,5	336895
				4,112347672	56554769065	0,5	336895
				7,545890737	9153921188	1,0	673790
				13,66273436	1542147209	1,0	673790
				123,0459504	2111235,749	0,5	336895
				123,1025927	2108322,808	0,5	336895
			Tangencial	9,55E-08	4,50894E+33	0,5	336895
				1,23E-07	2,11676E+33	0,5	336895
				9,59E-06	4,45641E+27	0,5	336895
				9,79E-06	4,19398E+27	0,5	336895
				8,71E-05	5,94672E+24	0,5	336895
				9,67E-05	4,3537E+24	0,5	336895
				2,703529535	1,99042E+11	1,0	673790
				7,651526533	8779998476	1,0	673790
				7,985524786	7723751993	0,5	336895
				7,985656855	7723368786	0,5	336895
				10,49331491	3404086501	0,5	336895
				10,49345669	3403948521	0,5	336895

Trem-tipo	Elemento	Categoria (AREMA)	Categoria da tensão	Cálculo do dano	DANO ACUMULADO	Percentual da contribuição (%)
TB312	Transversina	B	Normal (borda comprimida)	9,24418E-12	0,644006571	1,43542E-09
				1,43274E-11		2,22472E-09
				3,66395E-06		0,000568931
				3,93397E-06		0,000610858
				8,8889E-06		0,00138025
				7,25911E-05		0,011271788
				0,000433408		0,067298709
				0,161461294		25,0713737
				0,161761039		25,11791753
			Normal (borda tracionada)	1,80092E-12		2,79644E-10
				6,173E-12		9,58531E-10
				8,99741E-06		0,001397099
				5,65516E-06		0,000878122
				5,95697E-06		0,000924986
				7,36067E-05		0,011429496
				0,000436917		0,067843529
				0,159572421		24,77807346
				0,159792893		24,81230781
			Tangencial	7,47171E-29		1,16019E-26
				1,59156E-28		2,47134E-26
				7,55978E-23		1,17387E-20
				8,03282E-23		1,24732E-20
				5,66522E-20		8,79684E-18
				7,73813E-20		1,20156E-17
				3,38516E-06		0,000525641
				7,67415E-05		0,011916256
				4,3618E-05		0,00677292
				4,36202E-05		0,006773256
				9,89678E-05		0,015367516
				9,89718E-05		0,015368139

Trem-tipo	Elemento	Categoria (AREMA)	Categoria da tensão	Amplitude de tensão (Mpa)	Número de ciclos limite	Número de ciclos rainflow	Número de ciclos totais estimados
TB376	Transversina	B	Normal (borda comprimida)	0,04957545	3,22804E+16	0,5	336895
				0,057411636	2,07845E+16	0,5	336895
				3,642987021	81351550443	0,5	336895
				3,730349624	75768744894	0,5	336895
				3,885221536	67064292002	1,0	673790
				7,82396902	8212158818	1,0	673790
				14,19378662	1375447093	1,0	673790
				128,6766279	1846033,986	0,5	336895
				128,7561543	1842615,482	0,5	336895
			Normal (borda tracionada)	0,028792125	1,64785E+17	0,5	336895
				0,043327068	4,83572E+16	0,5	336895
				3,900937852	66256976223	1,0	673790
				4,210148508	52704349833	0,5	336895
				4,283684189	50036436245	0,5	336895
				7,860296899	8098822015	1,0	673790
				14,23200389	1364396336	1,0	673790
				128,172847	1867887,059	0,5	336895
				128,2318477	1865309,945	0,5	336895
			Tangencial	9,95E-08	3,99243E+33	0,5	336895
				1,28E-07	1,87044E+33	0,5	336895
				9,99E-06	3,94307E+27	0,5	336895
				1,02E-05	3,71209E+27	0,5	336895
				9,08E-05	5,25648E+24	0,5	336895
				0,000100671	3,85497E+24	0,5	336895
				2,816174178	1,761E+11	1,0	673790
				7,970335275	7767994950	1,0	673790
				8,318230727	6833541227	0,5	336895
				8,318368321	6833202132	0,5	336895
				10,93052427	3011727865	0,5	336895
				10,93067193	3011605817	0,5	336895

Trem-tipo	Elemento	Categoria (AREMA)	Categoria da tensão	Cálculo do dano	DANO ACUMULADO	Percentual da contribuição (%)
TB376	Transversina	B	Normal (borda comprimida)	1,04365E-11	0,727907914	1,43377E-09
				1,6209E-11		2,22679E-09
				4,14122E-06		0,000568921
				4,44636E-06		0,000610841
				1,00469E-05		0,001380247
				8,20479E-05		0,011271735
				0,00048987		0,067298321
				0,18249664		25,07139114
				0,182835216		25,11790472
			Normal (borda tracionada)	2,04445E-12		2,80867E-10
				6,96681E-12		9,571E-10
				1,01693E-05		0,001397065
				6,39217E-06		0,000878156
				6,73299E-06		0,000924979
				8,3196E-05		0,011429475
				0,000493837		0,067843395
				0,180361547		24,77807205
				0,180610735		24,81230545
			Tangencial	8,43835E-29		1,15926E-26
				1,80115E-28		2,47443E-26
				8,54398E-23		1,17377E-20
				9,07561E-23		1,24681E-20
				6,40914E-20		8,80488E-18
				8,73925E-20		1,2006E-17
				3,82617E-06		0,000525639
				8,67392E-05		0,011916238
				4,93002E-05		0,006772863
				4,93027E-05		0,006773199
				0,000111861		0,015367471
				0,000111866		0,015368094

Trem-tipo	Elemento	Categoria (AREMA)	Categoria da tensão	Amplitude de tensão (Mpa)	Número de ciclos limite	Número de ciclos rainflow	Número de ciclos totais estimados
TB416	Transversina	B	Normal (borda comprimida)	0,054855044	2,38281E+16	0,5	336895
				0,063517104	1,53485E+16	0,5	336895
				4,030574267	60067273975	0,5	336895
				4,127201809	55946328432	0,5	336895
				4,29859179	49517657482	1,0	673790
				8,656353471	6063644902	1,0	673790
				15,70378681	1015606645	1,0	673790
				142,3656636	1363084,991	0,5	336895
				142,4536291	1360561,424	0,5	336895
			Normal (borda tracionada)	0,0318388	1,21862E+17	0,5	336895
				0,047972551	3,56254E+16	0,5	336895
				4,315939855	48922940733	1,0	673790
				4,658024573	38916464666	0,5	336895
				4,739451089	36944906274	0,5	336895
				8,696460136	5980137568	1,0	673790
				15,74604052	1007452578	1,0	673790
				141,8082926	1379220,875	0,5	336895
				141,8735854	1377317,525	0,5	336895
			Tangencial	1,10E-07	2,94805E+33	0,5	336895
				1,42E-07	1,38172E+33	0,5	336895
				1,10E-05	2,91591E+27	0,5	336895
				1,13E-05	2,74161E+27	0,5	336895
				1,00E-04	3,87912E+24	0,5	336895
				0,000111372	2,84716E+24	0,5	336895
				3,115784501	1,30028E+11	1,0	673790
				8,818243259	5735779945	1,0	673790
				9,203120428	5045839023	0,5	336895
				9,203272676	5045588609	0,5	336895
				12,09333365	2223824963	0,5	336895
				12,09349701	2223734847	0,5	336895

Trem-tipo	Elemento	Categoria (AREMA)	Categoria da tensão	Cálculo do dano	DANO ACUMULADO	Percentual da contribuição (%)
TB416	Transversina	B	Normal (borda comprimida)	1,41386E-11	0,985809958	1,43421E-09
				2,19497E-11		2,22656E-09
				5,60863E-06		0,000568936
				6,02175E-06		0,000610843
				1,36071E-05		0,001380293
				0,00011112		0,011271912
				0,000663436		0,067298569
				0,247156269		25,07139094
				0,247614693		25,11789331
			Normal (borda tracionada)	2,76456E-12		2,80435E-10
				9,45658E-12		9,59271E-10
				1,37725E-05		0,001397072
				8,65688E-06		0,000878149
				9,11885E-06		0,000925011
				0,000112671		0,011429315
				0,000668806		0,067843266
				0,244264719		24,77807384
				0,244602275		24,81231529
			Tangencial	1,14277E-28		1,15922E-26
				2,43823E-28		2,47332E-26
				1,15537E-22		1,172E-20
				1,22882E-22		1,24651E-20
				8,68484E-20		8,80985E-18
				1,18326E-19		1,2003E-17
				5,18189E-06		0,000525648
				0,000117471		0,01191623
				6,67669E-05		0,006772796
				6,67702E-05		0,006773132
				0,000151493		0,015367413
				0,0001515		0,015368036

APÊNDICE D – DANO ACUMULADO COM MUDANÇA DE CATEGORIA

Trem-tipo	Elemento	Categoria (AREMA)	Categoria da tensão	Amplitude de tensão (Mpa)	Número de ciclos limite	Número de ciclos rainflow	Número de ciclos totais estimados
TB240	Transversina	B'	Normal (borda comprimida)	0,026313797	1,09733E+17	0,5	336895
				0,042768692	2,5557E+16	0,5	336895
				1,218341707	1,10555E+12	1,0	673790
				2,221670608	1,82326E+11	0,5	336895
				2,363149261	1,515E+11	0,5	336895
				5,579950914	11507902126	1,0	673790
				87,94499029	2939368,118	0,5	336895
				88,07001405	2926867,743	0,5	336895
			Normal (borda tracionada)	0,00767751	4,41801E+18	0,5	336895
				0,039075787	3,35092E+16	0,5	336895
				1,244449686	1,03742E+12	1,0	673790
				2,566489121	1,18268E+11	0,5	336895
				2,705215312	1,00991E+11	0,5	336895
				5,582785004	11490385130	1,0	673790
				87,60876843	2973339,973	0,5	336895
				87,71609635	2962438,938	0,5	336895
			Tangencial	4,30E-08	2,50662E+34	0,5	336895
				1,04E-07	1,76949E+33	0,5	336895
				6,06E-06	9,00078E+27	0,5	336895
				6,45E-06	7,45498E+27	0,5	336895
				7,17E-05	5,41781E+24	0,5	336895
				8,25E-05	3,5571E+24	0,5	336895
				1,31906968	8,71132E+11	0,5	336895
				1,319080904	8,7111E+11	0,5	336895
				2,476908702	1,3157E+11	1,0	673790
				4,400574884	23461676817	0,5	336895
				4,400628619	23460817376	0,5	336895
				6,900757222	6084109887	0,5	336895
				6,900810201	6083969761	0,5	336895

Trem-tipo	Elemento	Categoria (AREMA)	Categoria da tensão	Cálculo do dano	DANO ACUMULADO
TB240	Transversina	B'	Normal (borda comprimida)	3,07014E-12	0,457020529
				1,31821E-11	
				6,09459E-07	
				1,84776E-06	
				2,22372E-06	
				5,85502E-05	
				0,11461477	
				0,115104279	
			Normal (borda tracionada)	7,6255E-14	
				1,00538E-11	
				6,49485E-07	
				2,84856E-06	
				3,3359E-06	
				5,86395E-05	
				0,11330524	
				0,113722175	
			Tangencial	1,34402E-29	
				1,90391E-28	
				3,74295E-23	
				4,51906E-23	
				6,21829E-20	
				9,47105E-20	
				3,86732E-07	
				3,86742E-07	
				5,12115E-06	
				1,43594E-05	
				1,43599E-05	
				5,53729E-05	
				5,53742E-05	

Trem-tipo	Elemento	Categoria (AREMA)	Categoria da tensão	Amplitude de tensão (Mpa)	Número de ciclos limite	Número de ciclos rainflow	Número de ciclos totais estimados
TB240	Transversina	D	Normal (borda comprimida)	0,026313797	3,95758E+16	0,5	336895
				0,042768692	9,21727E+15	0,5	336895
				1,218341707	3,98724E+11	1,0	673790
				2,221670608	65756869922	0,5	336895
				2,363149261	54639495541	0,5	336895
				5,579950914	4150390931	1,0	673790
				87,94499029	1060099,977	0,5	336895
				88,07001405	1055591,645	0,5	336895
			Normal (borda tracionada)	0,00767751	1,59338E+18	0,5	336895
				0,039075787	1,20853E+16	0,5	336895
				1,244449686	3,74152E+11	1,0	673790
				2,566489121	42654205616	0,5	336895
				2,705215312	36422909110	0,5	336895
				5,582785004	4144073325	1,0	673790
				87,60876843	1072352,121	0,5	336895
				87,71609635	1068420,601	0,5	336895
			Tangencial	4,30E-08	9,04027E+33	0,5	336895
				1,04E-07	6,38178E+32	0,5	336895
				6,06E-06	3,24618E+27	0,5	336895
				6,45E-06	2,68868E+27	0,5	336895
				7,17E-05	1,95396E+24	0,5	336895
				8,25E-05	1,28289E+24	0,5	336895
				1,31906968	3,14179E+11	0,5	336895
				1,319080904	3,14171E+11	0,5	336895
				2,476908702	47451521692	1,0	673790
				4,400574884	8461588360	0,5	336895
				4,400628619	8461278398	0,5	336895
				6,900757222	2194269139	0,5	336895
				6,900810201	2194218602	0,5	336895

Trem-tipo	Elemento	Categoria (AREMA)	Categoria da tensão	Cálculo do dano	DANO ACUMULADO
TB240	Transversina	D	Normal (borda comprimida)	8,51265E-12	1,267193286
				3,65504E-11	
				1,68986E-06	
				5,12334E-06	
				6,16578E-06	
				0,000162344	
				0,317795498	
				0,319152772	
			Normal (borda tracionada)	2,11434E-13	
				2,78765E-11	
				1,80085E-06	
				7,89828E-06	
				9,24954E-06	
				0,000162591	
				0,31416453	
				0,315320577	
			Tangencial	3,72661E-29	
				5,27901E-28	
				1,03782E-22	
				1,25301E-22	
				1,72416E-19	
				2,62606E-19	
				1,0723E-06	
				1,07233E-06	
				1,41995E-05	
				3,98146E-05	
				3,98161E-05	
				0,000153534	
				0,000153538	

APÊNDICE E – DANO ACUMULADO COM MUDANÇA DE VELOCIDADE

E.1 TABELA PARA AS TENSÕES PARA CADA STEP PARA O TB240 – CASO 1

Step	Tensões normais (comp.) - MPa	Tensões normais (trac.) - Mpa	Tensões de cisalhamento - Mpa
1	0	0	0
2	0	0	0
3	-0,017482782	-0,00819579	1,15437E-08
4	0,05357309	-0,103985536	-2,01157E-07
5	0,215858859	-0,312904965	-6,74012E-07
6	0,574141844	-0,716018097	-1,64403E-06
7	1,08318471	-1,287926228	-3,01997E-06
8	1,819282153	-2,085600713	-4,97105E-06
9	2,311695158	-2,655564721	-6,3214E-06
10	1,70484966	-2,12532553	-4,86754E-06
11	-2,257811968	1,768716772	5,14086E-06
12	-11,35435624	10,80591693	2,82282E-05
13	-25,66057396	25,06301041	6,37956E-05
14	-44,63464926	43,99706494	-0,880111371
15	-55,61687677	54,94760217	-0,000107353
16	-64,59109567	63,89906247	-0,203773638
17	-67,30567821	66,60144983	-0,000119624
18	-67,29003495	66,58589245	-0,0001273
19	-64,28232304	63,59054748	-0,121426757
20	-55,47582179	54,80689071	-0,000116542
21	-43,97231318	43,33515827	-0,713440353
22	-25,44534303	24,84829478	6,33303E-05
23	-11,2050091	10,65725684	2,78502E-05
24	-2,163068745	1,674746483	4,9001E-06
25	1,721542741	-2,141159796	-4,90883E-06
26	2,306814905	-2,649739771	-6,30396E-06
27	1,805512196	-2,071143704	-4,935E-06
28	1,075084787	-1,279053372	-2,99845E-06
29	0,568495094	-0,709770177	-1,62891E-06
30	0,212110682	-0,308555617	-6,64125E-07
31	0,052212271	-0,102281191	-1,9726E-07
32	-0,018017316	-0,007403611	1,31953E-08
33	0	0	0
34	0	0	0
35	0	0	0
36	0	0	0
37	0	0	0
38	0	0	0

39	0	0	0
40	0	0	0
41	0	0	0
42	0	0	0
43	0	0	0
44	0	0	0
45	0	0	0
46	0	0	0
47	0	0	0
48	0	0	0
49	0	0	0
50	0	0	0
51	0	0	0
52	0	0	0
53	0	0	0
54	0	0	0
55	0	0	0
56	0	0	0
57	0	0	0
58	0	0	0
59	0	0	0
60	0	0	0
61	0	0	0
62	0	0	0
63	0	0	0
64	0	0	0
65	0	0	0
66	0	0	0
67	0	0	0
68	0	0	0
69	0	0	0
70	0	0	0
71	0	0	0
72	0	0	0
73	0	0	0
74	0	0	0
75	0	0	0
76	0	0	0
77	0	0	0
78	0	0	0
79	0	0	0
80	0	0	0
81	0	0	0

E.2 TABELA PARA O CÁLCULO DO DANO ACUMULADO PARA O TB240 – CASO

1

Trem-tipo	Elemento	Categoria (AREMA)	Categoria da tensão	Amplitude de tensão (Mpa)	Número de ciclos limite	Número de ciclos rainflow	Número de ciclos totais estimados
TB240 70 km/h caso 1	Transversina	B	Normal (borda comprimida)	0,017482782	7,3605E+17	0,5	336895
				0,018017316	6,72463E+17	0,5	336895
				2,324832221	3,13014E+11	0,5	336895
				2,32917794	3,11265E+11	0,5	336895
				69,61249311	11659425,25	0,5	336895
				69,61737336	11656973,41	0,5	336895
			Normal (borda tracionada)	2,649739771	2,11412E+11	0,5	336895
				2,655564721	2,10024E+11	0,5	336895
				69,2511896	11842870,81	0,5	336895
				69,25701455	11839882,88	0,5	336895
			Tangencial	1,15E-08	2,55685E+36	0,5	336895
				1,32E-08	1,71192E+36	0,5	336895
				6,32E-06	1,56018E+28	0,5	336895
				6,33E-06	1,54854E+28	0,5	336895
				6,96E-05	1,16485E+25	0,5	336895
				7,01E-05	1,14096E+25	0,5	336895
				0,121307133	2,20333E+15	1,0	673790
				0,203657097	4,65629E+14	1,0	673790
				0,713333	1,08358E+13	1,0	673790
				0,880174701	5,76809E+12	0,5	336895
				0,880175167	5,76808E+12	0,5	336895

Trem-tipo	Elemento	Categoria (AREMA)	Categoria da tensão	Cálculo do dano	DANO ACUMULADO	Percentual da contribuição (%)
TB240 70 km/h caso 1	Transversina	B	Normal (borda comprimida)	4,57707E-13	0,114702236	3,99039E-10
				5,00987E-13		4,36771E-10
				1,07629E-06		0,000938337
				1,08234E-06		0,000943609
				0,028894649		25,19100768
				0,028900726		25,19630617
			Normal (borda tracionada)	1,59355E-06		0,001389292
				1,60408E-06		0,001398475
				0,028447072		24,80080005
				0,028454251		24,80705881
			Tangencial	1,31762E-31		1,14873E-28
				1,96794E-31		1,71569E-28
				2,15933E-23		1,88256E-20
				2,17557E-23		1,89671E-20
				2,89218E-20		2,52147E-17
				2,95274E-20		2,57427E-17
				3,05805E-10		2,66608E-07
				1,44705E-09		1,26157E-06
				6,21817E-08		5,42114E-05
				5,84067E-08		5,09203E-05
				5,84068E-08		5,09203E-05

E.3 TABELA PARA AS TENSÕES PARA CADA STEP PARA O TB240 – CASO 2

Step	Tensões normais (comp.) - MPa	Tensões normais (trac.) - Mpa	Tensões de cisalhamento - Mpa
1	0	0	0
2	0	0	0
3	-0,026339479	0,007789073	4,32147E-08
4	0,014901505	-0,055094052	-8,9558E-08
5	0,076738532	-0,147247251	-2,85946E-07
6	0,305246475	-0,416119503	-9,19424E-07
7	0,603813803	-0,753505274	-1,72952E-06
8	1,096242343	-1,302272084	-3,05486E-06
9	1,685988909	-1,945179304	-4,62329E-06
10	2,192134745	-2,515135101	-5,98992E-06
11	2,174400983	-2,565075969	-6,02481E-06
12	0,554609763	-1,007892369	-1,97784E-06
13	-4,903498624	4,3945648	1,18519E-05
14	-13,60460479	13,04654674	3,39448E-05

15	-26,367127	25,76775995	6,53076E-05
16	-40,62196307	39,98798577	-0,0165159
17	-57,187927	56,52543704	-1,539991359
18	-61,70510394	61,02071419	8,54291E-05
19	-85,8538547	85,15434981	-6,955403741
20	-68,35802543	67,65276647	0,000121834
21	-73,11755594	72,41487343	-2,159686533
22	-63,55524929	62,86450431	-0,000130324
23	-56,39797737	55,72689925	-5,48223E-05
24	-58,71870054	58,07364453	-4,76791932
25	-31,84952819	31,23719303	7,69967E-05
26	-17,77946597	17,20577749	4,4529E-05
27	-7,375771089	6,848286859	1,81268E-05
28	-0,771835622	0,29776969	1,37477E-06
29	1,82263668	-2,23632791	-5,15947E-06
30	2,328265377	-2,675913727	-6,36793E-06
31	2,000489112	-2,277886387	-5,44618E-06
32	1,289705035	-1,515058116	-3,57185E-06
33	0,765154449	-0,935371601	-2,16626E-06
34	0,406214135	-0,531085849	-1,1945E-06
35	0,143053927	-0,228334265	-4,73785E-07
36	0,041748686	-0,089412924	-1,67543E-07
37	-0,016339474	-0,010026149	7,73456E-09
38	-0,041942817	0,037476979	1,01073E-07
39	0	0	0
40	0	0	0
41	0	0	0
42	0	0	0
43	0	0	0
44	0	0	0
45	0	0	0
46	0	0	0
47	0	0	0
48	0	0	0
49	0	0	0
50	0	0	0
51	0	0	0
52	0	0	0
53	0	0	0
54	0	0	0
55	0	0	0
56	0	0	0
57	0	0	0
58	0	0	0

59	0	0	0
60	0	0	0
61	0	0	0
62	0	0	0
63	0	0	0
64	0	0	0
65	0	0	0
66	0	0	0
67	0	0	0
68	0	0	0
69	0	0	0
70	0	0	0
71	0	0	0
72	0	0	0
73	0	0	0
74	0	0	0
75	0	0	0
76	0	0	0
77	0	0	0
78	0	0	0
79	0	0	0
80	0	0	0
81	0	0	0
82	0	0	0
83	0	0	0
84	0	0	0
85	0	0	0
86	0	0	0
87	0	0	0
88	0	0	0
89	0	0	0
90	0	0	0
91	0	0	0
92	0	0	0
93	0	0	0
94	0	0	0

E.4 TABELA PARA O CÁLCULO DO DANO ACUMULADO PARA O TB240 – CASO

1

Trem-Tipo	Elemento	Categoria (AREMA)	Categoria da tensão	Amplitude de tensão (Mpa)	Número de ciclos limite	Número de ciclos rainflow	Número de ciclos totais estimados
TB240 70 km/h caso 2	Transversina	B	Normal (borda comprimida)	0,026339479	2,15237E+17	0,5	336895
				0,041942817	5,33048E+16	0,5	336895
				2,218474224	3,60226E+11	0,5	336895
				2,320723176	3,1468E+11	1,0	673790
				2,370208195	2,95379E+11	0,5	336895
				4,759530512	36479288609	1,0	673790
				88,04598945	5762487,166	0,5	336895
				88,18212008	5735840,926	0,5	336895
			Normal (borda tracionada)	0,007789073	8,32303E+18	0,5	336895
				0,037476979	7,47214E+16	0,5	336895
				2,346745274	3,04327E+11	1,0	673790
				2,572865042	2,30934E+11	0,5	336895
				2,713390706	1,9688E+11	0,5	336895
				4,762106957	36420111410	1,0	673790
				87,71942578	5827085,172	0,5	336895
				87,83026354	5805052,458	0,5	336895
			Tangencial	4,32E-08	4,87355E+34	0,5	336895
				1,01E-07	3,80923E+33	0,5	336895
				6,07E-06	1,76034E+28	0,5	336895
				6,47E-06	1,45287E+28	0,5	336895
				7,13E-05	1,08362E+25	0,5	336895
				8,34E-05	6,78881E+24	0,5	336895
				1,540056666	1,07678E+12	0,5	336895
				1,540076788	1,07674E+12	0,5	336895
				2,159631711	3,90481E+11	1,0	673790
				4,767996317	36285321261	0,5	336895
				4,768041154	36284297623	0,5	336895
				6,95548917	11688416268	0,5	336895
				6,955525575	11688232740	0,5	336895

Trem tipo	Elemento	Categoria (AREMA)	Categoria da tensão	Cálculo do dano	DANO ACUMULADO	Percentual da contribuição (%)
TB240 70 km/h caso 2	Transversina	B	Normal (borda comprimida)	1,56523E-12	0,233173822	6,71271E-10
				6,32017E-12		2,7105E-09
				9,35231E-07		0,000401088
				2,14119E-06		0,000918282
				1,14055E-06		0,000489143
				1,84705E-05		0,007921336
				0,058463471		25,07291352
				0,058735067		25,18939145
			Normal (borda tracionada)	4,04775E-14		1,73593E-11
				4,50868E-12		1,93361E-09
				2,21403E-06		0,00094952
				1,45884E-06		0,000625644
				1,71117E-06		0,00073386
				1,85005E-05		0,007934207
				0,057815355		24,79495977
				0,05803479		24,88906749
			Tangencial	6,91273E-30		2,96462E-27
				8,84417E-29		3,79295E-26
				1,91381E-23		8,20765E-21
				2,31882E-23		9,9446E-21
				3,10897E-20		1,33333E-17
				4,9625E-20		2,12824E-17
				3,12871E-07		0,00013418
				3,12884E-07		0,000134185
				1,72554E-06		0,000740023
				9,28461E-06		0,00398184
				9,28487E-06		0,003981952
				2,8823E-05		0,012361156
				2,88234E-05		0,012361351

APÊNDICE F – DANO ACUMULADO (TRANSVERSINAS REFORÇADAS)

F.1 TABELA PARA AS TENSÕES PARA CADA STEP PARA O TB416 – COM REFORÇO

Step	Tensões normais (comp.) - MPa	Tensões normais (trac.) - Mpa	Tensões de cisalhamento - Mpa
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	-0,009515281	-0,000996064	4,42133E-09
5	-0,013490248	-0,023407822	-5,40529E-09
6	-0,004423441	-0,057560982	-2,82488E-08
7	0,012164818	-0,123346667	-7,18249E-08
8	0,081873121	-0,238242915	-1,69007E-07
9	0,234999863	-0,44793586	-3,59515E-07
10	0,562255389	-0,837284174	-7,35154E-07
11	1,238607981	-1,576433921	-1,47551E-06
12	1,967682859	-2,384668975	-2,27872E-06
13	1,918756141	-2,408834028	-2,26268E-06
14	-0,295358381	-0,260442499	2,58821E-08
15	-6,329803465	5,71716547	6,3199E-06
16	-16,22939583	15,56896915	1,65366E-05
17	-28,58079403	27,88048925	-4,20026E-05
18	-56,86736302	56,13389874	-9,014045953
19	-48,98300232	48,22255532	-3,0039E-05
20	-58,28804522	57,50771336	-2,32258389
21	-55,81138812	55,01973217	-0,00033303
22	-55,94932901	55,1566436	-0,00017928
23	-66,66120938	65,87795168	-6,572866462
24	-50,26844162	49,50355168	4,34764E-05
25	-54,89726145	54,15805386	-6,859775923
26	-31,04814404	30,34090395	-0,000191721
27	-18,44463297	17,77580804	1,87906E-05
28	-8,019054653	7,396447135	8,08409E-06
29	-1,209673966	0,64211555	9,7876E-07
30	1,725491237	-2,229060488	-2,06632E-06
31	2,041235887	-2,472959558	-2,36281E-06
32	1,380074108	-1,733721247	-1,63156E-06
33	0,654832463	-0,941402054	-8,37885E-07
34	0,283234691	-0,508686773	-4,16645E-07
35	0,103318105	-0,267977773	-1,95925E-07
36	0,020289953	-0,140628592	-8,52189E-08
37	-0,008337323	-0,063454076	-2,93368E-08

38	-0,013159224	-0,028777789	-8,42653E-09
39	-0,010739183	-0,004973652	2,93975E-09
40	0	0	0
41	0	0	0
42	0	0	0
43	0	0	0
44	0	0	0
45	0	0	0
46	0	0	0
47	0	0	0
48	0	0	0
49	0	0	0
50	0	0	0
51	0	0	0
52	0	0	0
53	0	0	0
54	0	0	0
55	0	0	0
56	0	0	0
57	0	0	0
58	0	0	0
59	0	0	0
60	0	0	0
61	0	0	0
62	0	0	0
63	0	0	0
64	0	0	0
65	0	0	0
66	0	0	0
67	0	0	0
68	0	0	0
69	0	0	0
70	0	0	0
71	0	0	0
72	0	0	0
73	0	0	0
74	0	0	0
75	0	0	0
76	0	0	0
77	0	0	0
78	0	0	0
79	0	0	0
80	0	0	0
81	0	0	0

F.2 TABELA PARA O CÁLCULO DO DANO ACUMULADO PARA O TB416 – COM REFORÇO

Trem-tipo	Elemento	Categoria (AREMA)	Categoria da tensão	Amplitude de tensão (Mpa)	Número de ciclos rainflow	Número de ciclos totais estimados
TB416	Transversina Reforçada	B	Normal (borda comprimida)	0,013159224	0,5	336895
				0,013490248	0,5	336895
				1,981173107	0,5	336895
				2,054395111	0,5	336895
				2,476657107	1,0	673790
				4,628819825	1,0	673790
				7,884360695	1,0	673790
				68,62889224	0,5	336895
				68,70244527	0,5	336895
			Normal (borda tracionada)	2,408834028	0,5	336895
				2,472959558	0,5	336895
				2,487981184	1,0	673790
				4,654502182	1,0	673790
				7,911343425	1,0	673790
				68,28678571	0,5	336895
				68,35091124	0,5	336895
			Tangencial	2,94E-09	0,5	336895
				4,42E-09	0,5	336895
				2,28E-06	0,5	336895
				2,37E-06	0,5	336895
				1,88E-05	0,5	336895
				2,12E-05	0,5	336895
				2,32240461	1,0	673790
				6,572836423	1,0	673790
				6,859794714	0,5	336895
				6,8598194	0,5	336895
				9,01406249	0,5	336895
				9,01408943	0,5	336895

Trem-tipo	Elemento	Categoria (AREMA)	Categoria da tensão	Cálculo do dano	DANO ACUMULADO	Percentual da contribuição (%)
TB416	Transversina Reforçada	B	Normal (borda comprimida)	1,95185E-13	0,110534046	1,97995E-11
				2,10289E-13		2,13316E-11
				6,66075E-07		6,75663E-05
				7,4269E-07		7,53381E-05
				2,60246E-06		0,000263992
				1,69901E-05		0,001723469
				8,39625E-05		0,008517107
				0,027687059		2,808559474
				0,027776175		2,817599378
			Normal (borda tracionada)	1,19723E-06		0,000121446
				1,29541E-06		0,000131406
				2,63832E-06		0,000267629
				1,72745E-05		0,001752316
				8,48275E-05		0,008604851
				0,02727507		2,766767532
				0,027351981		2,774569353
			Tangencial	2,17614E-33		2,20746E-31
				7,4031E-33		7,50967E-31
				1,01942E-24		1,03409E-22
				1,13413E-24		1,15045E-22
				5,70549E-22		5,78761E-20
				8,10773E-22		8,22444E-20
				2,14585E-06		0,000217674
				4,86457E-05		0,004934591
				2,76496E-05		0,002804762
				2,76499E-05		0,002804792
				6,27361E-05		0,006363915
				6,27367E-05		0,006363972