

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



CATEGORIA 3

AVALIAÇÃO ESTRUTURAL E SOBRE VIDA DE ESTRUTURAS DE CARROS DA
FROTA ASLTOM E MAFERSA DO METRÔ-RJ

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



1. INTRODUÇÃO

A frota Mafersa no Metrô do Rio de Janeiro iniciou a operação em 1979, num total de 144 carros. Devido a necessidades operacionais, foram adquiridos em 1998 mais 36 carros da fabricante Alstom, com tecnologia similar a frota adquirida em 1979. A frota Mafersa possui 44 anos de operação e a frota Alstom possui 25 anos de operação.

Visto a severa interação roda-trilho e os constantes carregamento e descarregamento de passageiros ao longo de décadas de operação comercial, é necessário que se realize avaliação precisa da integridade das caixas e de suas fragilidades estruturais, a fim de garantir a confiabilidade e o desempenho do equipamento. Além do conhecimento da condição atual das caixas, identificar seu período de sobrevida contribui para a gestão eficiente do ativo, agregando valor para a companhia, otimizando custos e maximizando a performance. O projeto realizado no Metrô do Rio de Janeiro, seus resultados e lições aprendidas, pode apoiar trabalhos correspondentes realizados em operadoras metroferroviárias com frotas similares.

2. DIAGNÓSTICO

Para um entendimento de maneira geral da atual situação das caixas da frota Alstom e Mafersa em operação no Metrô do Rio de Janeiro, foi necessário a divisão do trabalho, em duas etapas que consistem em:

- Avaliação da contra flecha de dez carros da frota Alstom (3) e Mafersa (7), para entendimento de possíveis problemas estruturais atuais, que possam comprometer a contra flecha das estruturas das caixas;
- Estudo de sobrevida das caixas da frota Alstom e Mafersa, com o objetivo de projeção de vida útil residual das estruturas em operação.

3. MEDIÇÃO DA CONTRA FLECHA DE DEZ CARROS

Para a medição da contra flecha, foram selecionados sete carros Mafersa e três carros Alstom em operação de maneira aleatória. Essas estruturas foram movimentadas para o Centro de Manutenção do Metrô Rio, onde foram retirados os truques desses carros, a fim de possibilitar o apoio das estruturas de maneira nivelada, nos pontos de apoio das bolsas de ar, localizadas nos carros.

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



Figura 1 - Local da medição da Contra flecha de carros da frota Alstom e Mafersa

A medição da contra flecha foi feita através do carregamento dos carros com sacos de areia, com o objetivo de simular a carga as quais as estruturas estão submetidas, com o embarque de passageiros.



Figura 2 - Carregamento dos carros com sacos de areia

As etapas de carregamento foram divididas em:

- AW0: Carro vazio (0%);

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



- AW1: 2 passageiros / m² (25%);
- AW2: 4 passageiros / m² (50%);
- AW3: 6 passageiros / m² (75%);
- AW4: 8 passageiros / m² (100%).

Para esse trabalho, também foi feito o acompanhamento do descarregamento da carga, desde AW4 até AW0, a fim de avaliar a resiliência da estrutura dos carros submetidos aos ensaios de medição da contra flecha.

Para a medição da Contra flecha, foram utilizados LVDT's (Transdutor para medição de deslocamento linear) em 3 pontos equidistantes da longarina principal, a fim de acompanhar a variação da Contra flecha dos carros ao longo do carregamento de AW0 até AW4 e descarregamento de AW4 até AW0, monitorados através do Sistema de Aquisição de dados de maneira contínua durante todo esse processo.

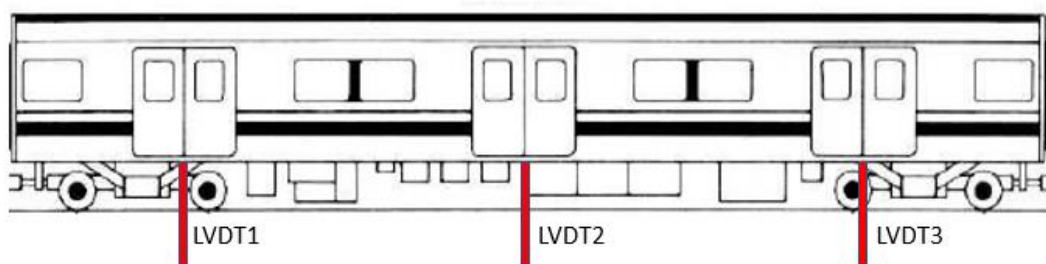


Figura 3 - Localização dos LVDT's para medição da contra flecha dos carros Alstom e Mafersa

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS

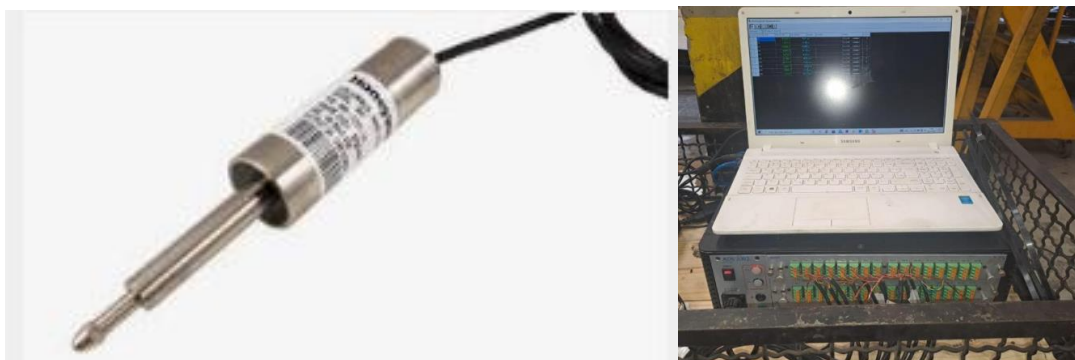


Figura 4 - LVDT e sistema de aquisição de dados utilizados

Com os LVDT's e o sistema de aquisição de dados foi possível a avaliação da variação da contra flecha dos dez carros submetidos aos ensaios de carregamento e descarregamento.

Abaixo seguem valores das medições das contra flechas dos carros que foram submetidos ao carregamento e descarregamento:

Tabela 1 - Valores das medições das contra flechas dos carros

Carro	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)
1035	9,9	12,0	8,6
1005	8,0	6,0	7,5
1051	7,4	6,8	5,7
2015	6,3	7,3	5,9
2026	7,5	6,1	7,9
2039	7,4	6,4	7,4
2066	6,5	6,0	6,5
2104	7,8	6,0	6,8
2106	4,2	6,3	6,9
2006	5,7	5,2	3,1

4. AVALIAÇÃO DE SOBREVIDA ÚTIL A FADIGA DOS CARROS DA FROTA

ALSTOM E MAFERSA

Neste tópico serão abordados todos os passos para a análise de sobrevida útil a fadiga das estruturas dos carros da frota Alstom e Mafersa

4.1. ANÁLISE DA DOCUMENTAÇÃO EXISTENTE / ANÁLISE DA ESTRUTURA PARA IDENTIFICAR PONTOS CRÍTICOS / PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO

Foi feita a análise de toda documentação disponível do sistema Caixa das frotas Alstom e Mafersa, para definição dos pontos críticos a serem instrumentados.

Após análise detalhada da documentação e físicas de pontos de maiores esforços das estruturas, foram identificados os pontos a serem instrumentados, que foram:

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS

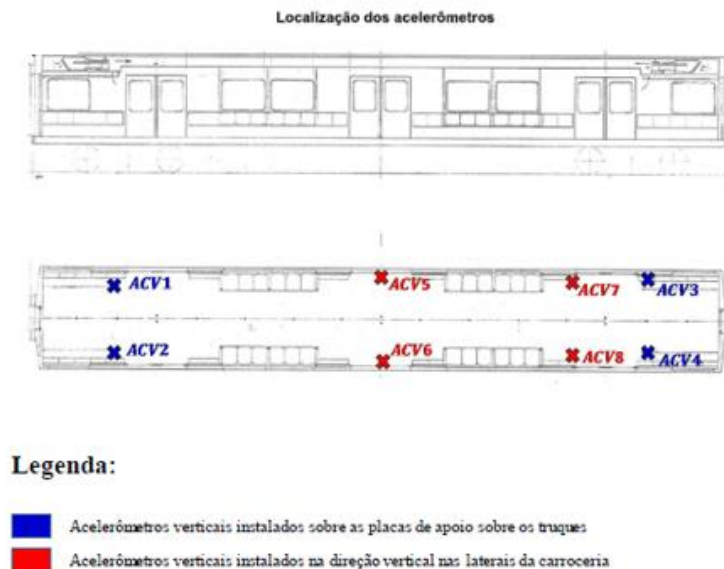


Figura 5 - Plano de instrumentação

A instrumentação foi planejada com sensores de aceleração de grande sensibilidade e precisão de medida (0 – 1g; e 0-2g) numa larga faixa de frequência (0 a 50 Hz). Os acelerômetros ACV1 a ACV4 foram instalados na direção vertical, por meio de colagem com resina epóxi, sobre as placas espessas de aço de apoio simples do carro sobre o apoio da suspensão mecânico-pneumática dos truques. Os acelerômetros AC5 a AC8 foram instalados nas direções vertical e horizontal nas laterais da carroceria, por meio de colagem sobre superfície de um componente metálico da caixa. Todos esses sensores de aceleração estavam ligados a um Sistema de Aquisição de Dados - SAD, por meio de cabos elétricos blindados com extremidades providas de conectores especiais.

Os registros dos sinais de todos os sensores serão feitos de modo contínuo e simultâneo durante a monitoração dos movimentos dos carros.

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

4.2. DEFINIÇÃO DOS CARROS E TRECHO DE INSTRUMENTAÇÃO

Após definido o plano de instrumentação, o monitoramento dinâmico deveria ser feito em trechos de altas e baixas velocidades e curvas severas, a fim de avaliar os esforços que as estruturas foram submetidas ao longo dos anos de operação e projeções futuras. Foi necessário a avaliação conjunta dos times de engenharia de Material Rodante e Via Permanente para determinação do trecho de instrumentação.



Figura 6 - Mapa das estações - Metrô do Rio de Janeiro

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Após análise do mapa e trechos das linhas operacionais do Metrô Rio, foi determinado o trecho entre Central a São Conrado (ida e volta), como o trecho ideal de instrumentação, para determinação de todos os esforços que as estruturas das frotas de trens Alstom e Mafersa estão submetidas.

Para a instrumentação, foi necessário a definição da escolha de dois carros para a instrumentação dinâmica. Um carro da frota Alstom e outro carro da frota Mafersa. Foram instrumentados os carros 1001 (Mafersa) e 2105 (Alstom).

4.3. DETERMINAÇÃO DA CARGA MÉDIA AO LONGO DOS ANOS DE OPERAÇÃO DOS CARROS ALSTOM E MAFERSA;

Além da definição dos carros, a determinação da carga média que os carros foram submetidos ao longo dos anos de operação foi de suma importância para execução do trabalho. Para essa definição, foi utilizado os dados de carregamento da frota de trens CRRC, que possui registro contínuo do peso dos carros. Para essa análise, foi selecionado o trem n° 70, que em 19.09.2022, operou em trechos da linha 1, 2 e 4.

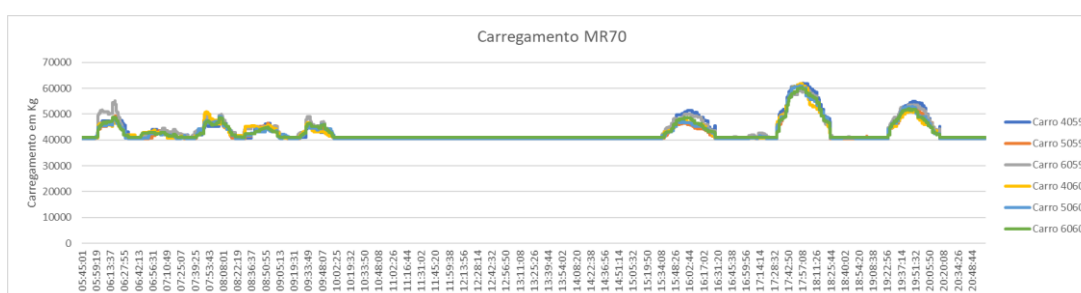


Figura 7 - Carregamento de passageiros do trem n° 70 em 19.09.2022

Com o gráfico acima, foi possível determinar a carga média diária que os carros estão submetidos, que é de 13,4 toneladas.

4.4. INSTRUMENTAÇÃO DOS PONTOS CRÍTICOS (ESFORÇOS E VIBRAÇÃO)

Para o monitoramento, foram carregados os carros 1001 e 2105 com aproximadamente 13,4 toneladas, no dia anterior ao monitoramento dinâmico no trecho entre Central e São Conrado (ida e volta) e recortados os pisos na direção do apoio das bolsas de ar, para permitir a leitura dos acelerômetros no apoio das bolsas de ar dos truques.



Figura 8 - Carregamento dos carros com 13,4 toneladas e preparação da superfície para instrumentação

Segue abaixo fotos dos acelerômetros montados nas posições de apoio da bolsa de ar (ACV1, ACV2, ACV3 e ACV4) e no piso do carro (ACV5, ACV6, ACV7 e ACV8).



Figura 9 - Acelerômetros instalados para o monitoramento dinâmico

Para a coleta de dados, foram utilizados Sistemas de Aquisição de Dados nos carros 1001 e 2105, compostos por equipamentos eletrônicos para registro contínuo e simultâneo dos sinais elétricos dos sensores, filtrados e digitalizados com alta frequência de aquisição.



Figura 10 - Sistema de aquisição de dados utilizado

4.5. MODELAGEM COMPUTACIONAL DOS ESFORÇOS

Foi feita modelagem computacional 3D da estrutura metálica típica dos carros através de elementos finitos, onde foram separadas em duas partes:

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



- A estrutura em forma de gaiola, composta por elementos barra de pórtico espacial;
- A chaparia corrugada de cobertura da gaiola.

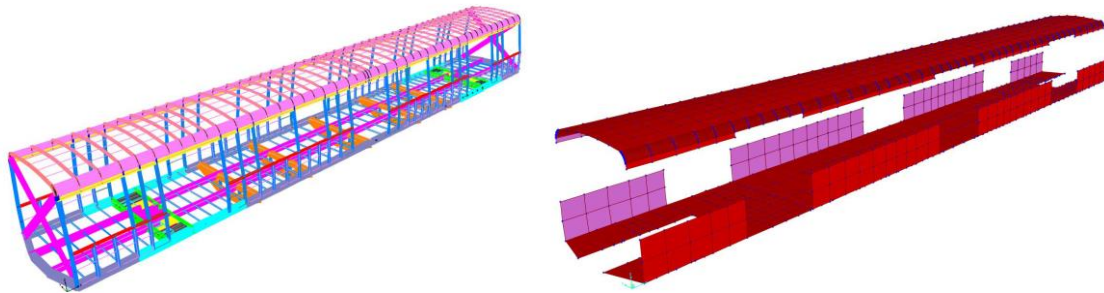


Figura 11 - Modelagem 3D dos carros Alstom e Mafersa

Inicialmente foi feita modelagem computacional 3D para identificação das conexões soldadas mais críticas das estruturas dos carros A e B. Esses resultados foram obtidos através da análise sob carregamento estático, onde foi levado em consideração:

- Material construtivo de toda estrutura dos carros, incluindo material das longarinas principal, secundária e soldas;
- Dados de peso, incluindo toda chaparia e equipamentos de um carro;

As conexões soldadas mais críticas das estruturas metálicas dos Carros A e B são as conexões denominadas tipo 1 e tipo 3 entre as longarinas principais (externas) e as travessas da estrutura do estrado, posicionadas, respectivamente, na seção do meio vão e próximas dos apoios dos carros sobre os truques.

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS

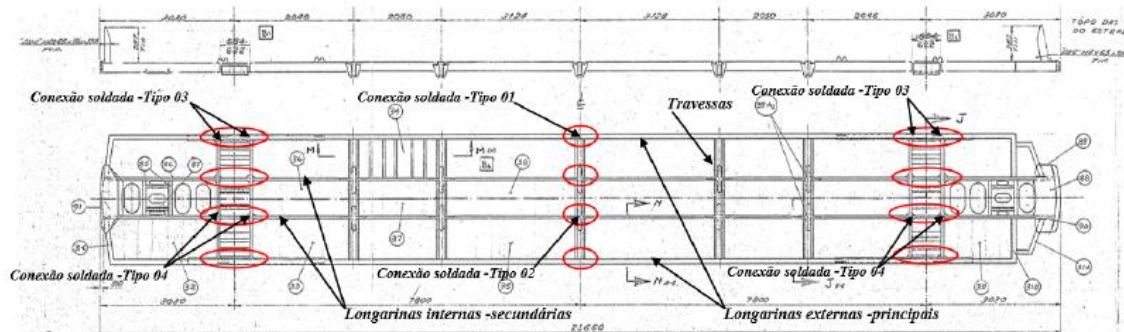


Figura 12 - Conexões críticas das estruturas dos carros Alstom e Mafersa

As conexões soldadas críticas dos tipos 01 e 03 da estrutura de aço do estrado são compostas por perfis de chapa fina dobrada e por chapas finas de ligação desses perfis.

Os elementos mais solicitados dessas conexões são as longarinas principais, as quais nessas conexões são reforçadas por chapas um pouco mais espessas soldadas na superfície interna da alma das longarinas (no caso da conexão tipo 01) e chapas dobradas na mesma conformação, justapostas e soldadas no interior das longarinas (no caso da conexão tipo 03). Trechos curtos da longarina com esses dois tipos de reforço foram modelados tridimensionalmente com elementos finitos de casca.

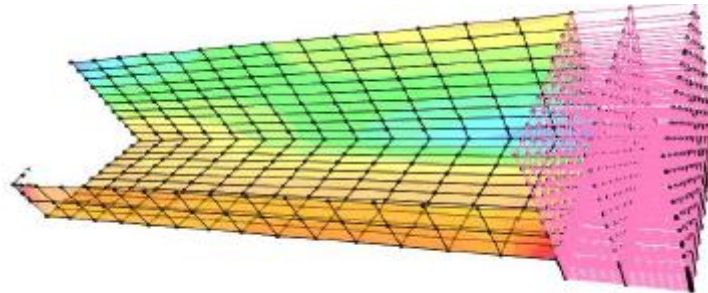


Figura 13 - Modelagem com elementos finitos de casca de um trecho curto de uma longarina principal (externa) para análise de tensões.

Os esforços solicitantes nas estruturas dos carros tipos A e B foram determinados com modelos computacionais 3D construídos com base nos desenhos de projeto e detalhamentos geométricos complementares, por meio do levantamento dimensional dos componentes da estrutura do estrado nas regiões das conexões soldadas críticas. Nesses modelos computacionais 3D das estruturas foram considerados os carregamentos estáticos, considerando os fatores já acima citados.

Os resultados obtidos com os modelos computacionais 3D das estruturas dos carros A e B são apresentados abaixo, por meio de diagramas de esforços cortantes e de momentos de flexão na estrutura de barras do estrado dos carros A e B. Nessas figuras estão indicados os valores dos cortantes e momentos nas seções mais solicitadas pela combinação de carregamentos estáticos.

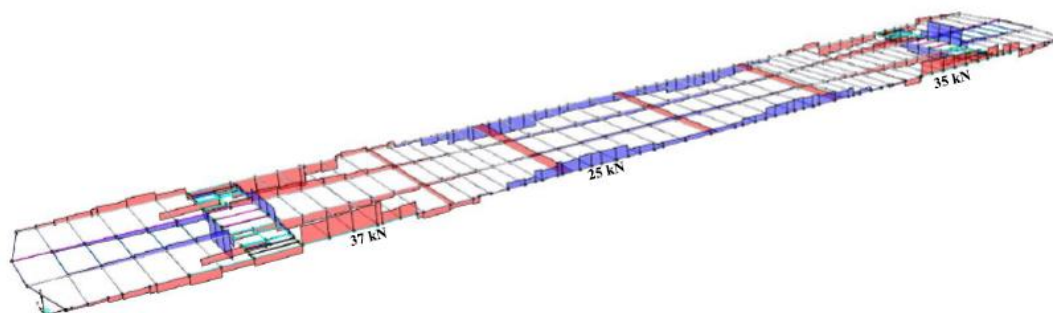


Figura 14 - Diagrama de esforço cortante na estrutura do estrado do carro A.

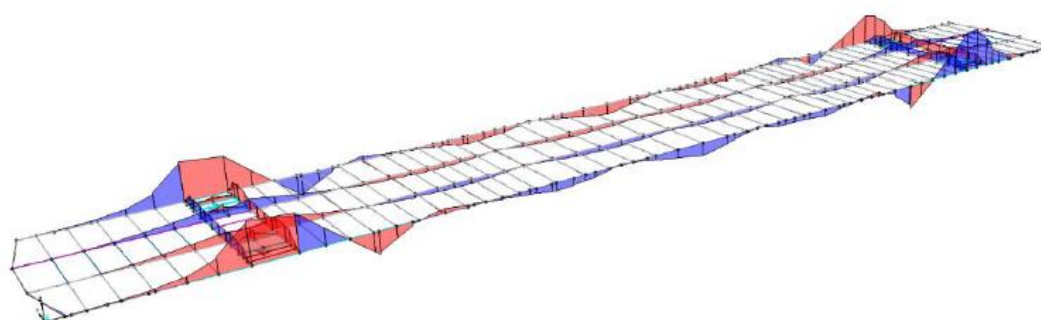


Figura 15 - Diagrama de momentos fletores na estrutura do estrado do carro A

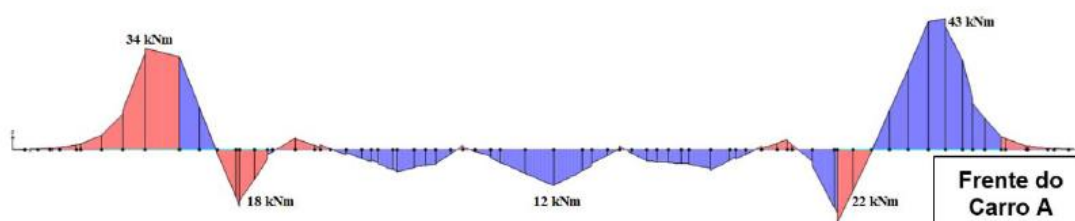


Figura 16 - Diagrama de momentos fletores na longarina do estrado do carro A

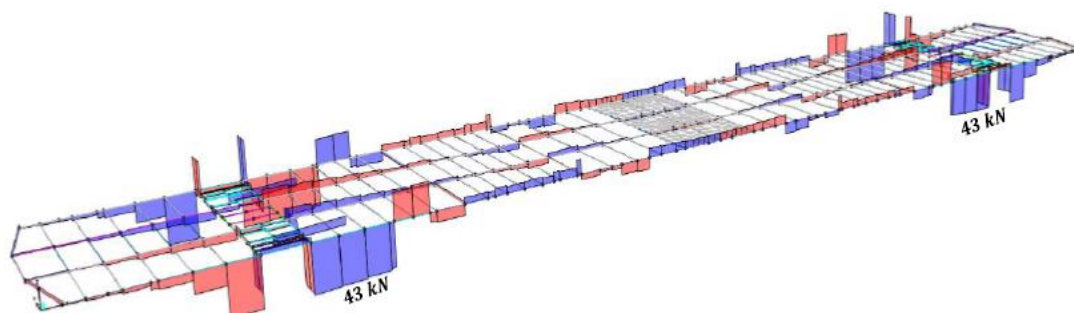


Figura 17 - Diagrama de esforço cortante na estrutura do estrado do carro B.

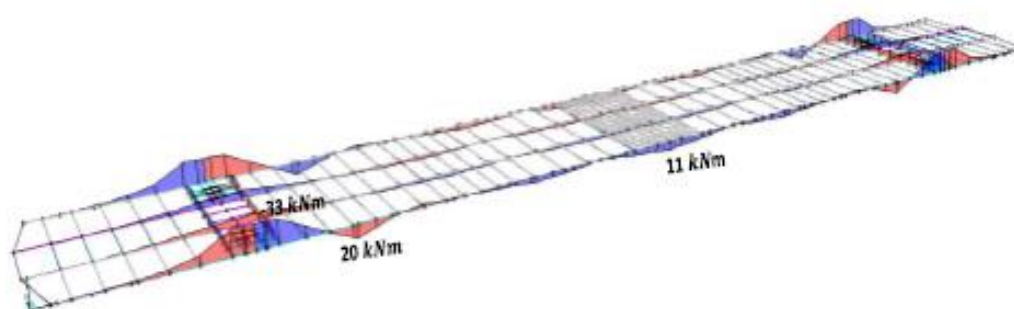


Figura 18 - Diagrama de momentos fletores na estrutura do estrado do carro B

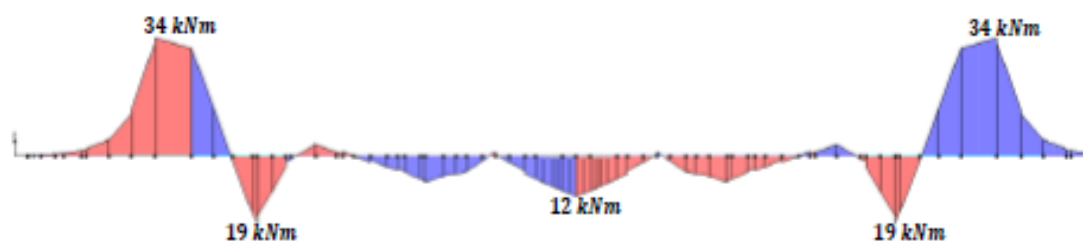


Figura 19 - Diagrama de momentos fletores na longarina do estrado do carro B

Pode-se notar nos diagramas mostrados do carro A, a assimetria na distribuição dos esforços ao longo do comprimento. Isso é atribuído pela grande diferença entre os

valores dos momentos nas extremidades esquerda e direita do diagrama. Esta assimetria de esforços seccionais se deve a própria assimetria da estrutura do carro A, que em uma das extremidades tem a cabine do condutor com uma subestrutura reforçada frontal do carro.

4.6. CÁLCULO DOS DANOS ACUMULADOS À ESTRUTURA POR VIAGEM

Para os cálculos dos danos acumulados à estrutura, serão necessários:

- Análise das vibrações livres;
- Análise dinâmica e da resistência à fadiga das estruturas;
- Taxa de amortecimento para a análise dinâmica;

4.6.1. ANÁLISE DE VIBRAÇÕES LIVRES

Na tabela abaixo serão apresentados os resultados obtidos através da instrumentação dos carros das frequências de vibração associadas aos movimentos de corpo rígido das estruturas monoblocos.

Tabela 2 - Frequências de vibração associadas aos movimentos de corpo rígido

Carro instrumentado	Medições experimentais (Hz \pm 0,05Hz)	
	Sobre os apoios	Meio do carro
Carro Mafersa	1,65 Hz	1,20 Hz
Carro Alstom	1,40 Hz	1,20 Hz

4.6.2. ANÁLISE DINÂMICA E DA RESISTÊNCIA À FADIGA DAS ESTRUTURAS

Apresentam-se nesta Seção a descrição sumária da metodologia empregada para as análises dinâmicas das estruturas e, também, um resumo dos resultados mais relevantes para as amplitudes das respostas dinâmicas em termos das acelerações obtidas com os modelos computacionais 3D dos carros, impostas nos pontos de apoio sobre os truques.

Apresentam-se também de maneira sumária a descrição da metodologia empregada para as estimativas da vida e da sobrevida útil à fadiga das conexões soldadas consideradas mais críticas, as dos tipos 01 e 03 indicadas na figura abaixo.

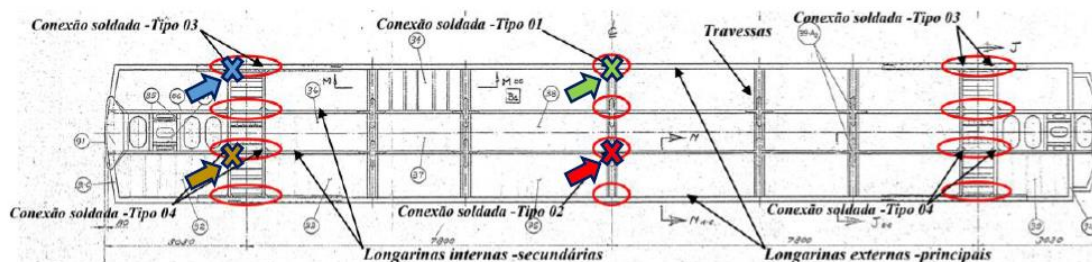


Figura 20 - Conexões críticas do tipo 1 e 3 das estruturas

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



As respostas dinâmicas das estruturas obtidas *com* os modelos computacionais 3D completos dessas estruturas aplicando-se nos pontos de apoio dos carros sobre os truques com o histórico de acelerações verticais registradas durante o trajeto completo da composição nas viagens de ida entre as estações Central – São Conrado e de volta São Conrado – Central.

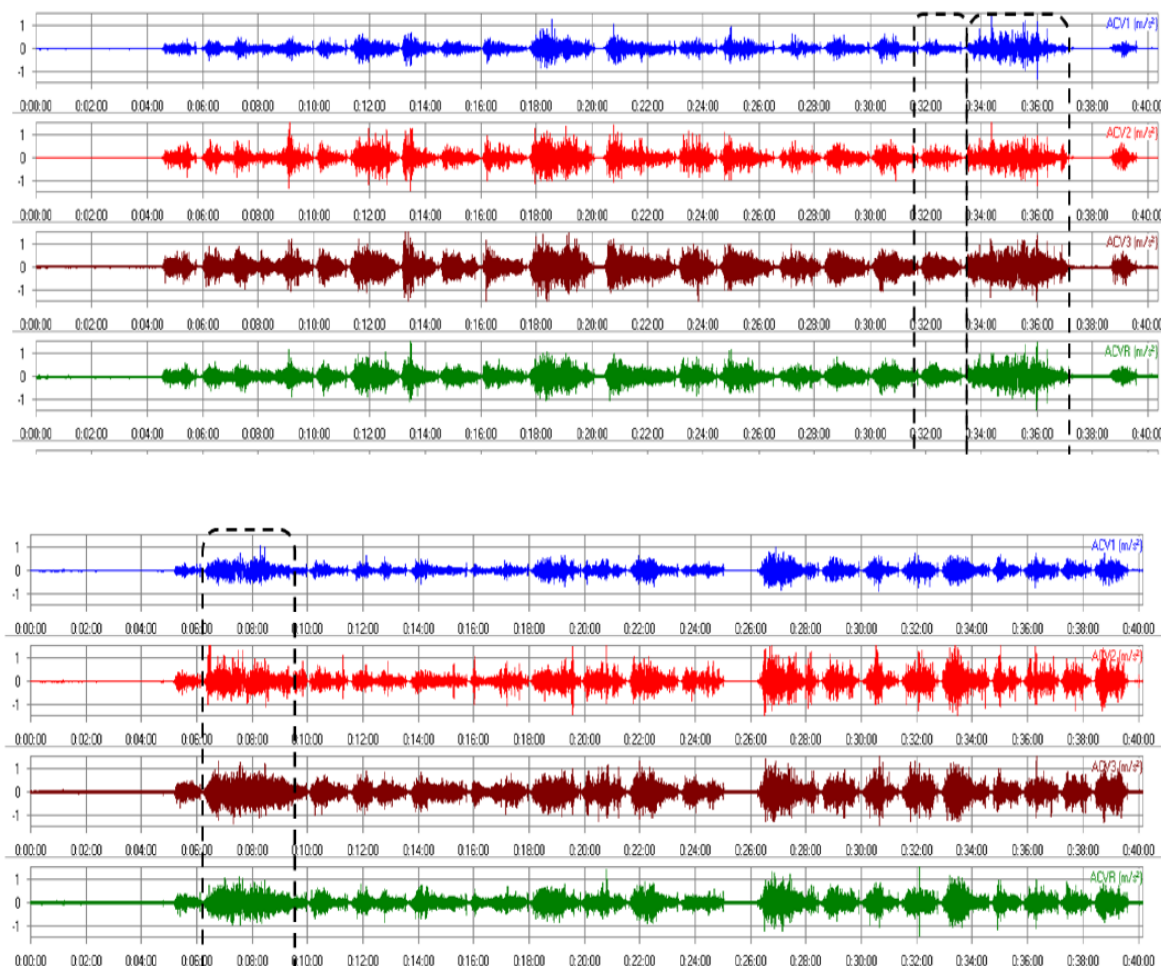


Figura 21 - Acelerações verticais registradas durante o trajeto completo da composição nas viagens de ida entre as estações Central – São Conrado e de volta São Conrado – Central.

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



A Figura abaixo mostra a estimativa do número de viagens de uma composição no trajeto considerado. O número de horas por dia de operação contínua de uma composição foi estimado em 13,6 horas; e o tempo máximo gasto nas viagens de ida e volta no trajeto considerado é estimado em 1 hora e 15 minutos (ou, 1,25 horas).

Por dia útil	Por sábado	Por domingo/feriado
6,5 viagens completas	3,3 viagens completas	4,9 viagens completas
x 252 dias úteis	x 52 sábados	x 61 domingos/feriados
= 1.641 viagens em dias úteis	= 172 viagens em sábados	= 300 viagens em domingos/feriados
Total no ano = 2.113 viagens completas		

Figura 22 - Estimativas de viagens dos trens das frotas Alstom e Mafersa

As respostas dinâmicas das estruturas dos carros A e B ao longo do trajeto completo da viagem de ida e volta entre as referidas estações foram obtidas levando em conta uma taxa de amortecimento do sistema com maior contribuição das suspensões pneumáticas (bolsas de ar).

Para a estimativa das taxas de amortecimento, foram utilizados os sinais de aceleração vertical nos 4 pontos de apoio, registrados durante o teste de frenagem em manobras da composição no pátio de estacionamento até próximo a cabeça da linha na estação Central do Brasil.

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



Os sinais foram devidamente filtrados com cortes para frequências superiores à 2,5 Hz. Os “melhores” trechos foram selecionados para o cálculo da taxa de amortecimento pelo método do decaimento logarítmico, descrito abaixo:

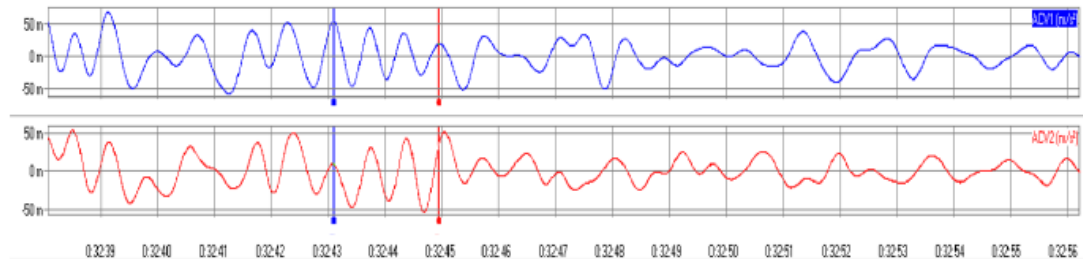
Equação 1 – Taxa de amortecimento

$$\xi = \frac{1}{2\pi m} \ln \left(\frac{v_n}{v_{n+m}} \right)$$

Onde, v_n é a amplitude da resposta num certo instante de tempo t_n e v_{n+m} é a amplitude da resposta no instante de tempo t_m , após m ciclos harmônicos de amplitudes decrescentes.

As Figuras abaixo mostram, respectivamente para as medições realizadas nos carros Alstom e Mafersa, trechos dos registros das acelerações verticais (em dois pontos de apoio dos carros sobre um dos truques) selecionados para estimativa do valor médio da taxa modal de amortecimento estrutural. Tem-se como resultado a média dos valores médios a taxa modal de amortecimento adotada nas análises dinâmicas: $\xi=6,0\%$

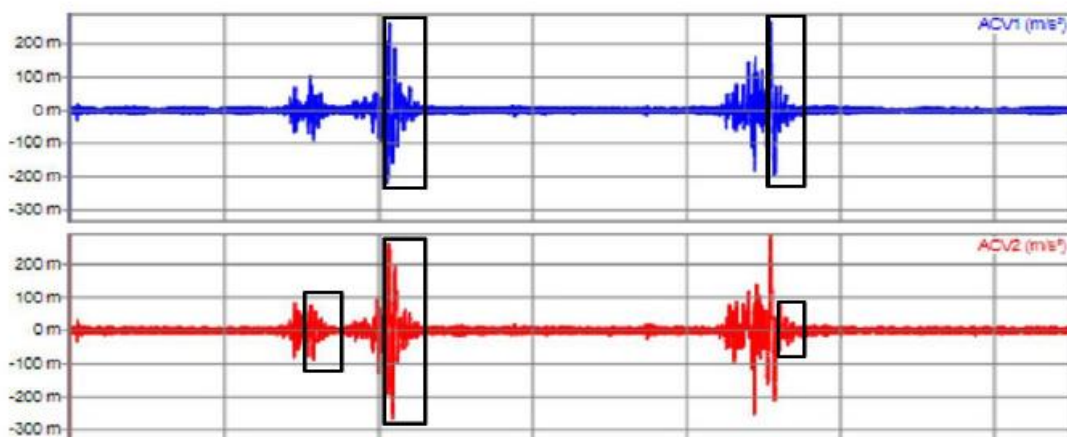
29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



$$v_n = 0,0552 \text{ m/s}^2; v_m = 0,0196 \text{ m/s}^2; m = 3 \text{ ciclos};$$

$$\Delta t = 1,843 \text{ s} \Rightarrow f = 1,7 \text{ Hz} \quad \xi = 5,5\%.$$

Figura 23 - Trecho selecionado dos registros de acelerações verticais x tempo nos pontos de apoio do carro sobre um dos truques. Estimativa da taxa modal de amortecimento do Carro A em movimento no pátio do Metrô Rio.



Estimativa do amortecimento para o Carro B - Valor médio: $\xi = 6,5\%$

Figura 24 - Vários trechos selecionados dos registros de acelerações verticais x tempo nos pontos de apoio do carro sobre um dos truques. Estimativa da taxa modal de amortecimento do Carro B nos testes de frenagem no pátio do Metrô Rio.

4.6.3. ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL À FADIGA DAS CONEXÕES

SOLDADAS CRÍTICAS

As estimativas da vida e da sobrevida útil à fadiga das conexões soldadas críticas da estrutura do estrado dos Carros A e B foram feitas de acordo com os seguintes passos, descritos abaixo:

- A. Selecionar as conexões soldadas mais críticas, que foram as conexões denominadas dos tipos 01 e 03.
- B. Construir um modelo 3D com malha refinada de elementos finitos de casca de um tramo engastado-livre da longarina principal, onde a seção do engaste representa a seção soldada na conexão sob análise de fadiga.
- C. Calcular as coordenadas do centro de gravidade da seção transversal da longarina e aplicar no centro de gravidade da extremidade livre do modelo 3D os valores máximos (positivos e referidos ao mesmo instante de tempo t) dos esforços axial, cortante e momento fletor, encontrados para a conexão em foco ao longo da resposta dinâmica da estrutura do carro.
- D. Determinar, para o carregamento estático composto pelos esforços seccionais, as tensões principais (máximas e mínimas) e tensões de Von Mises na seção do engaste e numa seção transversal distante 50 mm do engaste do modelo 3D em elementos finitos de casca.
- E. Selecionar o maior valor absoluto dessas tensões.

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



- F. Normalizar o sinal resposta de momento fletor; isto é, dividir pelo maior valor do momento no instante de tempo t .
- G. Criar um histórico da variação da tensão x tempo, multiplicando o maior valor absoluto da tensão pelo sinal normalizado do momento x tempo.
- H. Aplicar o Método *Rain Flow* para contagem de ciclos e a Regra de *Palgren-Miner* para cálculo dos danos acumulados e estimativa da vida útil à fadiga, como se os carros fossem novos e postos em pleno serviço a partir deste ano. A estimativa da sobrevida útil a fadiga, deve ser feita levando em conta os danos anteriormente acumulados durante os anos de serviço de cada carro (tipos A e B) dos fabricantes Mafersa e Alstom.
- I. A estimativa da vida útil à fadiga foi feita de maneira bastante conservadora, porque, até onde se sabe, não há na literatura técnica recomendações nem normas específicas para análise de fadiga de conexões soldadas em estruturas constituídas de perfis de chapa dobrada com pequena espessura.
- J. Assim sendo, devem ser adotadas para estimativa de vida útil à fadiga as Classes E e F de conexão soldada (Ref.: Gurney T. R.) para o cálculo de danos acumulados durante um ano de operação ao longo dos trajetos de ida e volta entre as estações Central-São Conrado-Central.

A estimativa da vida útil a fadiga desta conexão é feita a partir dos históricos dos esforços seccionais obtidos com a análise dinâmica da estrutura.

A partir dos esforços seccionais atuantes nos elementos barra da conexão soldada, é possível determinar as tensões principais (máximas e mínimas) e o histórico da variação de tensões x tempo, tal como na sequência de passos B a G descritos anteriormente.

Aplicando o algoritmo de RainFlow ao histórico da variação de tensão x tempo, pode-se calcular os números de ciclos das faixas de tensão com valor constante e construir o histograma do número de ciclos para as várias faixas de valor constante de tensão, tal como ilustrado abaixo:

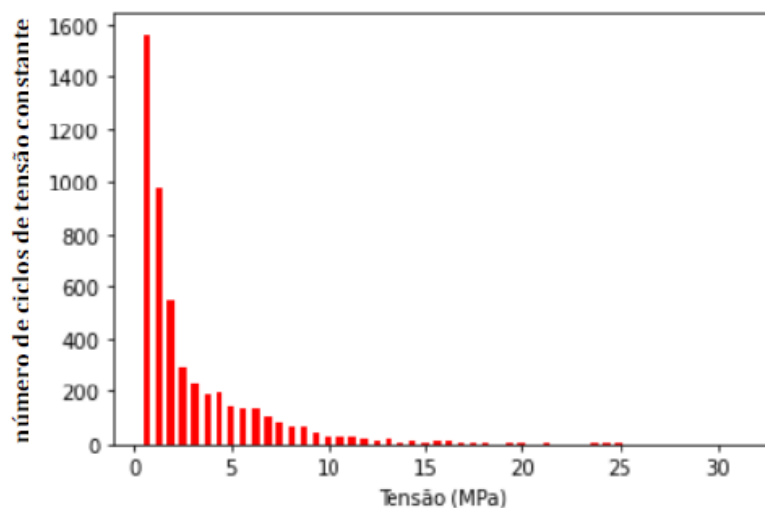


Figura 25 - Histograma típico de tensões numa conexão soldada crítica

A partir da contagem do número de ciclos de cada faixa de tensão de valor constante, é possível fazer a estimativa do tempo de vida útil à fadiga aplicando o método de Palmgren-Miner. Esta estimativa é realizada acumulando-se os danos (D)

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



causados para os diferentes valores de tensão pelo qual a conexão está submetida. Os danos acumulados são calculados pela expressão:

Equação 2 - Danos acumulados

$$D = \sum_{1}^{N_{cte}} \frac{n}{N}$$

Onde:

- ***n*** é o número de ciclos para um dado valor (constante) de tensão (obtido do histograma).
- ***N*** é o número de ciclos que causam a iniciação da fratura por fadiga numa junta soldada.
- ***N*** é obtido da curva S-N (curva obtida de ensaios experimentais de distintas junta soldadas
- ***N_{cte}*** é o número de faixas de valores constantes de *N* ciclos de tensão do histograma.

Segue abaixo resultados obtidos com a sequência dos passos para análise de fadiga das conexões soldadas críticas tipos 01 e 03.

Tabela 3 - Valores máximos dos esforços dinâmicos atuantes nas conexões soldadas críticas tipos 01 e 03

Esforço	Direção (eixo global)	Conexão soldada	
		<i>Tipo 01</i>	<i>Tipo 03</i>
Normal (N)	Z	1,87 kN	4,09 kN
Cortante (V)	X	0,17 kN	1,84 kN
	Y	2,17 kN	13,63 kN
Momento Fletor (M)	X	3,97 kNm	10,11 kNm
	Y	0,20 kNm	0,29 kNm

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



Tabela 4 - Tensões máximas atuantes na seção da solda ($z=0,0$ mm) das longarinas

Seção	Máximo (Mpa)		Mínimo (Mpa)		Maior valor absoluto (Mpa)	
	<i>Tipo 01</i>	<i>Tipo 03</i>	<i>Tipo 01</i>	<i>Tipo 03</i>	<i>Tipo 01</i>	<i>Tipo 03</i>
$z = 0,0$ mm	22,0	51,0	-36,0	-54	36,0	54,0
$z = 50$ mm	17,0	39,0	-31,0	-49		

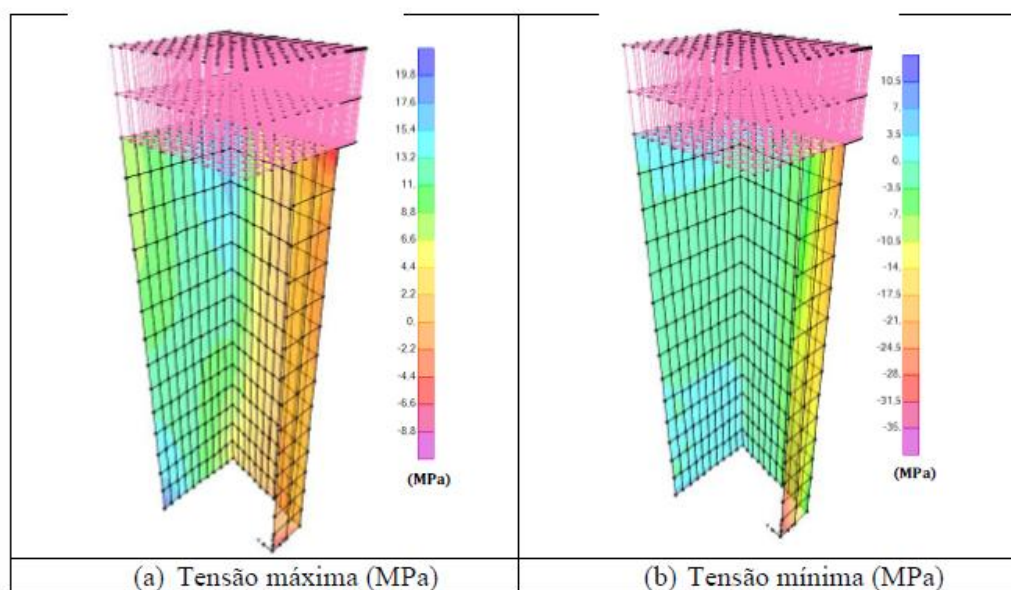


Figura 26 - Tensões atuantes na conexão soldada crítica Tipo 01

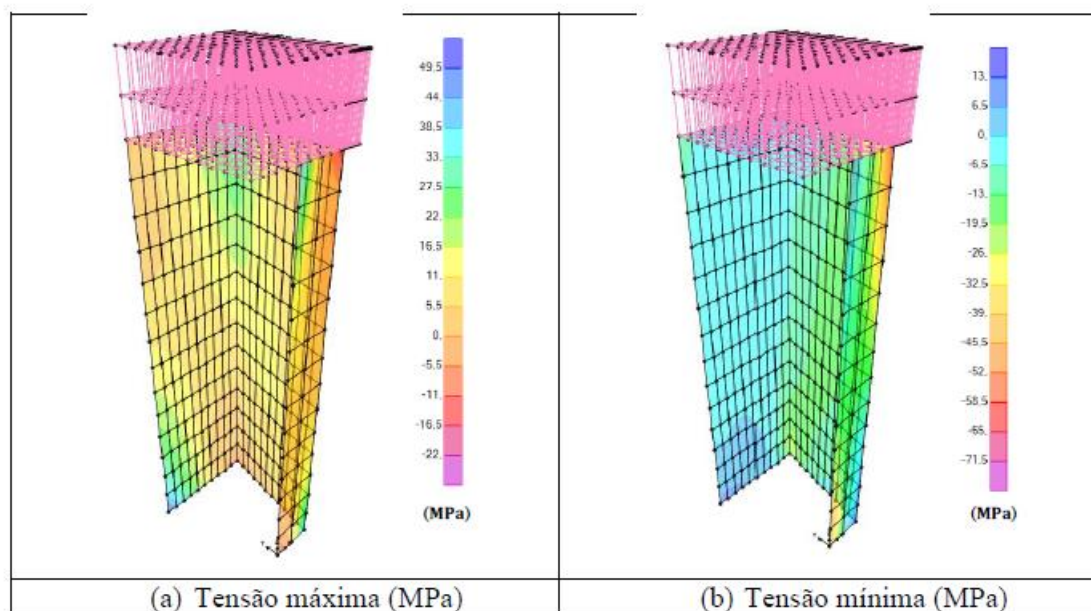


Figura 27 - Tensões atuantes na conexão soldada crítica Tipo 03

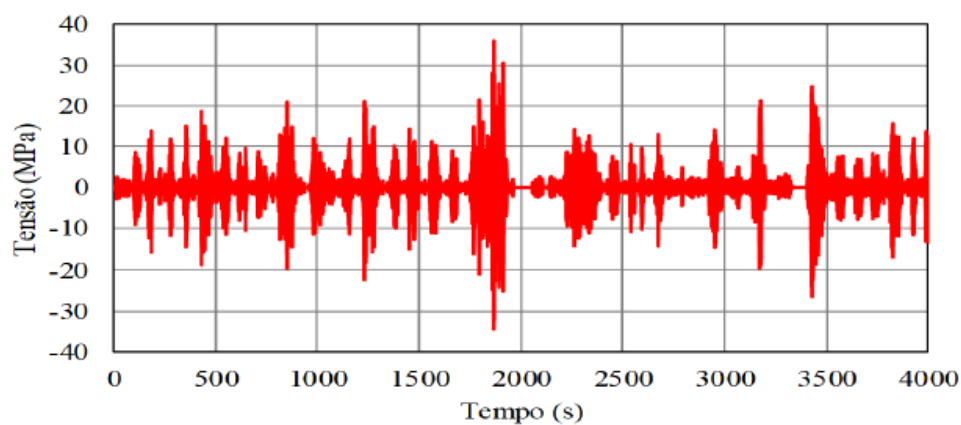


Figura 28 - Gráfico Tensão (MPa) vs Tempo (segundos) - Conexão Tipo 01

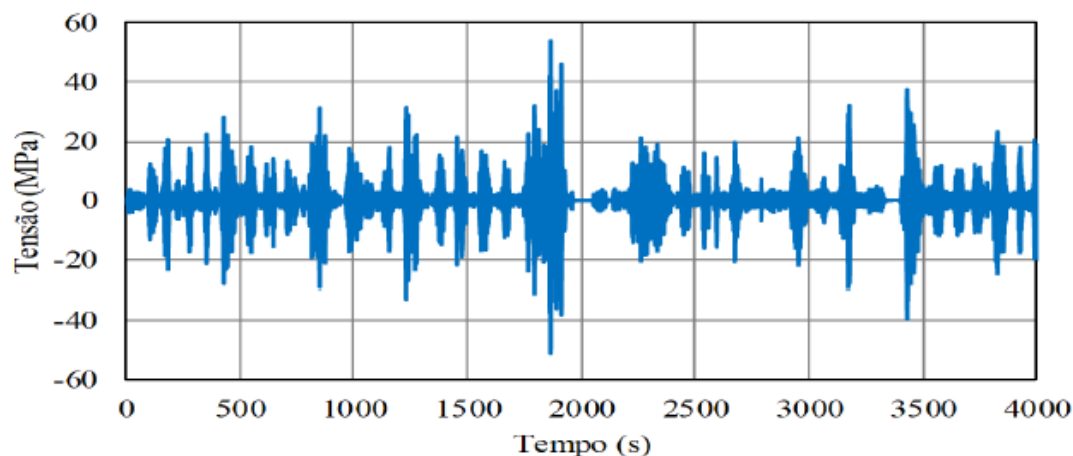


Figura 29 - Gráfico Tensão (MPa) vs Tempo (segundos) - Conexão Tipo 03

A estimativa de vida útil à fadiga (T) foi feita considerando que os carros tipos A e B são partes de composições metroviárias que, anualmente, fazem 2.113 viagens completas (ida e volta) no trajeto Est. Central – Est. São Conrado – Est. Central.

Tabela 5 - Cálculo dos tempos de vida útil à fadiga das conexões soldadas críticas 01 e 03

Junta	Classe	Dano acumulado	Tempo de vida útil (anos)
Tipo 01	$E (m = 3; \log_{10} a = 12,52)$	$5.1287E-03$	≈ 195
	$F (m = 3; \log_{10} a = 12,24)$	$9.7703E-03$	≈ 102
Tipo 03	$E (m = 3; \log_{10} a = 12,52)$	$1.7258E-02$	≈ 58
	$F (m = 3; \log_{10} a = 12,24)$	$3.2878E-02$	≈ 30

Em face das incertezas ainda existentes sobre a precisa geometria tanto dos componentes mais solicitados da estrutura do estrado quanto dos detalhes das soldas das conexões críticas e, por consequência, incertezas também sobre a classe da junta soldada dentre as descritas nos artigos técnicos clássicos e nas normas vigentes de

projeto de estruturas metálicas (nacionais e internacionais), conclui-se pelos seguintes valores médios para vida das conexões soldadas críticas tipo 1 e 3, mostradas pela tabela acima.

Com isso, A vida útil da conexão crítica tipo 1 com esse trabalho foi estimada em 148 anos e a tipo 3 em 44 anos, com uma sobrevida útil a fadiga para os carros Mafersa em mais 1 ano e para os carros Alstom em mais 25 anos.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. AVALIAÇÃO ESTRUTURAL – MEDIÇÃO DA CONTRA FLECHA

A medição da contra flecha dos dez carros da frota Alstom e Mafersa demonstraram valores satisfatórios, dentro de limites operacionais.

Outro ponto importante dessa avaliação, foi quanto a resiliência das estruturas avaliadas, já que não houve deformações permanentes.

5.2. AVALIAÇÃO DE SOBREVIDA ÚTIL A FADIGA DOS CARROS

A sobrevida útil à fadiga dos carros Alstom e Mafersa apresentaram resultados preocupantes, visto que, segundo análises feitas, os carros da frota Mafersa possuem apenas mais um ano de vida útil, visto a limitação da conexão soldada crítica do tipo 3.

6. CONCLUSÕES

A avaliação estrutural por medição da contra flecha dos dez carros se mostrou satisfatória e importante, para identificar as atuais condições estruturais dos carros da frota Alstom e Mafersa em operação no Metrô do Rio de Janeiro.

A avaliação de sobrevida à vida útil ainda necessitará de mais esforços da equipe técnica do Metrô Rio, visto o resultado preocupante de apenas mais um ano de sobrevida da conexão tipo 3 dos carros Mafersa, que iniciou a operação em 1979.

Em andamento o refino do estudo, visto algumas incertezas referente aos perfis das estruturas dos carros, principalmente nas conexões identificadas como críticas. Para isso, foi desmontado um carro Mafersa, para toda avaliação de todas as conexões denominadas como críticas, sinalizadas ao longo do artigo.

Outro ponto importante é quanto ao refino necessário da quantidade de viagens feita ao longo dos anos, visto que para o estudo, adotou-se uma quantidade mais conservadora, de 2113 viagens de 1979 até 2023. Essa quantidade de viagens é a média estimada atual da frota Alstom e Mafersa. Essa quantidade de viagens tenderá a ser menor do que considerada nesse estudo, visto que ao longo dos anos, o Metrô Rio passou por diversas expansões de trecho.

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

a) Desenhos de projeto das estruturas das caixas da frota Alstom e Mafersa

- 06-ED-XXX-CAX-RIO-00048 - VISTA GERAL 3 PORTAS
- 06-ED-XXX-CAX-RIO-00063 - DIAGRAMA ESTRUTURAL CARROS A E B
- 06-ED-XXX-CAX-RIO-00065 - SEÇÃO TRANSVERSAL

b) Documento Técnico: Curso de Treinamento – Estrutura e Isolamento da Caixa;
Companhia do Metropolitano do Rio de Janeiro, Material Ferroviário S.A – MAFERSA

c) Relatório Técnico I – CL-1708 A2/22-RT01; Apreciação da documentação técnica,
Plano de instrumentação e Metodologia de monitoração dinâmica, outubro 2022.

d) Relatório Técnico II – CL-1708 A2/22-RT02; Instrumentação e monitoração dinâmica
dos carros tipo A e tipo B, dezembro 2022.

e) Relatório Técnico III – CL-1708 A2/22-RT03; Modelagem computacional 3D dos carros
e Correlação entre resultados teóricos do modelo 3D e resultados experimentais da
interação dinâmica carros – truques – trilhos, dezembro 2022.

f) Relatório Técnico IV – CL-1708 A2/22-RT04; Estimativa da vida útil à fadiga das
conexões soldadas, abril 2023.

g) EN 12663-1 - Requisitos estruturais das caixas de veículos ferroviários