

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

Júlia Novais Silveira

**Análise de Viabilidade da Técnica de Impedância
Eletromecânica para Monitoramento da
Integridade Estrutural de Trilhos de Trem**

Ilha Solteira - SP
Novembro/2024

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

Júlia Novais Silveira

**Análise de Viabilidade da Técnica de Impedância
Eletromecânica para Monitoramento da
Integridade Estrutural de Trilhos de Trem**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Camila Gianini
Gonsalez-Bueno

Ilha Solteira - SP
Novembro/2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- S587a Silveira, Júlia Novais.
Análise de viabilidade da técnica de impedância eletromecânica para monitoramento da integridade estrutural de trilhos de trem / Júlia Novais Silveira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
69 f. : il.
- Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2024
- Orientadora: Camila Gianini Gonzalez-Bueno
- Inclui bibliografia
1. Monitoramento da integridade estrutural. 2. Impedância eletromecânica. 3. PZT. 4. Trilhos de trem. 5. Ferrovias.

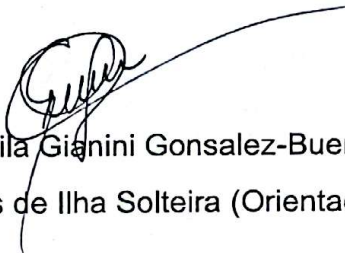
FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: Júlia Novals Silveira

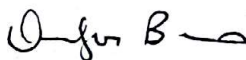
Título: "Análise de Viabilidade da Técnica de Impedância Eletromecânica para Monitoramento da Integridade Estrutural de Trilhos de Trem."

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Civil, junto ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Ilha Solteira

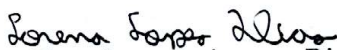
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof.ª Dr.ª. Camila Gianini Gonzalez-Bueno
UNESP – Campus de Ilha Solteira (Orientadora)



Prof. Dr. Douglas Domingues Bueno
UNESP – Campus de Ilha Solteira



Eng. Lorena Lopes Dias
UNESP – Campus de Ilha Solteira

Ilha Solteira

22/11/2024

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus pela minha vida e pela jornada que vivi até aqui. À minha orientadora Camila Gianini Gonsalez-Bueno pelo apoio, paciência, cuidado e por todos os ensinamentos. Aos meus pais por serem minha base e à minha irmã que é minha maior inspiração. Agradeço também ao meu namorado por ser minha paz e meu porto seguro. E aos professores e funcionários da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

"Faça tudo com Amor, por Amor e para o Amor, esse é o segredo."

(Santa Teresinha do Menino Jesus)

Resumo

Ferrovias são sistemas de transporte que utilizam trilhos de aço pelos quais os trens se deslocam. Monitorar a integridade estrutural desses trilhos é de extrema importância, a fim de detectar danos em seus estágios iniciais e intervir em sua propagação, evitando, assim, o colapso da estrutura e a ocorrência de acidentes. Pesquisas na área de Monitoramento da Integridade Estrutural (SHM, do inglês *Structural Health Monitoring*) vêm ganhando destaque atualmente, e dentre as técnicas utilizadas, a de Impedância Eletromecânica tem chamado a atenção devido aos seus relevantes resultados. Neste âmbito, o presente trabalho de graduação tem por objetivo avaliar, por meio de ensaios em um segmento de trilho, se a técnica de Impedância Eletromecânica (EMI) utilizando cerâmicas piezoelétricas (PZT) é viável para a detecção de danos em trilhos de trem, simulados com ímãs e massa adesiva (Durepoxi). Os resultados indicam que a técnica, apesar de embrionária, é viável para a detecção de danos simulados em laboratório, atendendo ao Nível 1 de SHM.

Palavras-chave: Monitoramento da Integridade Estrutural, Impedância Eletromecânica, PZT, Trilhos de Trem, Ferrovias.

Abstract

Railways are transportation systems that use steel tracks on which trains move. Monitoring the structural integrity of these tracks is highly important to detect damage in its early stages and intervene to prevent its propagation, thus avoiding structural collapse and accidents. Research in the field of Structural Health Monitoring (SHM) has gained prominence recently, and among the techniques used, Electromechanical Impedance (EMI) has attracted attention due to its significant results. In this context, the present undergraduate work aims to evaluate, through tests on a segment of track, whether the Electromechanical Impedance (EMI) technique using piezoelectric ceramics (PZT) is viable for detecting damage in train tracks, simulated with magnets and adhesive mass (Durepoxi). The results indicate that the technique, although still in its embryonic stage, is viable for the detection of simulated damage in the laboratory, meeting Level 1 of SHM.

Keywords: Structural Health Monitoring, Electromechanical Impedance, PZT, Train Track, Railway.

Lista de Figuras

1	Seção transversal esquemática da malha ferroviária.	12
2	Representação de um trilho Vignole.	12
3	Corrugação em trilho.	13
4	Fratura em trilho.	14
5	Equipamento de monitoramento ferroviário: (a) transdutores, (b) gabinete à beira da via, (c) eletrônica de monitoramento e computador de placa única e (d) ilustração do layout da via.	17
6	Fotografias de defeitos e características do trilho: (a) um defeito transversal que causou a quebra do trilho, (b) massa colada ao trilho e (c) solda aluminotérmica típica.	17
7	Sistema de monitoramento baseado em emissão acústica para detecção de trincas em desvios ferroviários.	18
8	Posição de implementação do sensor na área de desvio ferroviário. . .	19
9	Caso de estudo hipoteticamente dividido em segmentos.	21
10	Formas de deformação das primeiras 6 ondas próximas a 50 kHz para as ondas verticais e longitudinais. (a) A primeira onda a 48.740 Hz, (b) a segunda onda a 50.719 Hz, (c) a terceira onda a 50.398 Hz, (d) a quarta onda a 49.626 Hz, (e) a quinta onda a 49.870 Hz e (f) a sexta onda a 50.723 Hz.	22
11	Formas de deformação das primeiras 6 ondas próximas a 50 kHz para as ondas laterais e de torção. (a) A primeira onda a 51.139 Hz, (b) a segunda onda a 49.193 Hz, (c) a terceira onda a 48.793 Hz, (d) a quarta onda a 50.192 Hz, (e) a quinta onda a 49.020 Hz e (f) a sexta onda a 50.505 Hz.	22
12	Taxas de decaimento previstas do trilho sobre o pad rígido para (a) as ondas verticais e longitudinais simétricas, (b) as ondas laterais, torcionais e longitudinais antissimétricas.	23
13	Configuração experimental para a medição em campo.	24
14	Efeitos direto e inverso de um cristal piezoelétrico cilíndrico.	25

15	Setup experimental.	28
16	Danos simulados com ímãs: (A) Dano Tipo 1, (B) Dano Tipo 2, e (C) Buzzer Piezoelétrico da ATCP.	29
17	Danos simulados com massa adesiva (Durepoxi).	29
18	Danos no boleto a 80 cm do PZT (módulo da impedância).	32
19	Danos no boleto a 80 cm do PZT (parte real da impedância).	33
20	Danos no boleto a 80 cm do PZT (parte imaginária da impedância).	33
21	Danos no boleto a 80 cm do PZT (ângulo de fase).	34
22	Valores de RMSD para diferentes condições de dano (módulo da impedância).	35
23	Valores de CCDM para diferentes condições de dano (módulo da impedância).	35
24	Valores de RMSD para diferentes condições de dano (parte real da impedância).	36
25	Valores de CCDM para diferentes condições de dano (parte real da impedância).	36
26	Valores de RMSD para diferentes condições de dano (parte imaginária da impedância).	37
27	Valores de CCDM para diferentes condições de dano (parte imaginária da impedância).	37
28	Valores de RMSD para diferentes condições de dano (ângulo de fase).	38
29	Valores de CCDM para diferentes condições de dano (ângulo de fase).	38
30	Danos no boleto a 80 cm do PZT (módulo da impedância).	39
31	Valores de RMSD para diferentes condições de dano (módulo da impedância).	40
32	Valores de CCDM para diferentes condições de dano (módulo da impedância).	40
33	Danos no boleto a 80 cm do PZT (parte real da impedância).	41

34	Valores de RMSD para diferentes condições de dano (parte real da impedância).	41
35	Valores de CCDM para diferentes condições de dano (parte real da impedância).	42
36	Danos no boleto a 80 cm do PZT (parte imaginária da impedância). . .	42
37	Valores de RMSD para diferentes condições de dano (parte imaginária da impedância).	43
38	Valores de CCDM para diferentes condições de dano (parte imaginária da impedância).	43
39	Danos no boleto a 80 cm do PZT (ângulo de fase).	44
40	Valores de RMSD para diferentes condições de dano (ângulo de fase).	44
41	Valores de CCDM para diferentes condições de dano (ângulo de fase).	45
42	Danos no boleto a 80 cm do PZT (módulo da impedância).	46
43	Danos no boleto a 80 cm do PZT (parte real da impedância).	46
44	Danos no boleto a 80 cm do PZT (parte imaginária da impedância). . .	47
45	Danos no boleto a 80 cm do PZT (ângulo de fase).	47
46	Valores de RMSD para diferentes condições de dano (módulo da impedância).	48
47	Valores de CCDM para diferentes condições de dano (módulo da impedância).	48
48	Valores de RMSD para diferentes condições de dano (parte real da impedância).	49
49	Valores de CCDM para diferentes condições de dano (parte real da impedância).	49
50	Valores de RMSD para diferentes condições de dano (parte imaginária da impedância).	50
51	Valores de CCDM para diferentes condições de dano (parte imaginária da impedância).	50
52	Valores de RMSD para diferentes condições de dano (ângulo de fase).	51

53	Valores de CCDM para diferentes condições de dano (ângulo de fase).	51
54	Danos no boleto a 80 cm do PZT (módulo da impedância).	53
55	Valores de RMSD para diferentes condições de dano (módulo da impedância).	53
56	Valores de CCDM para diferentes condições de dano (módulo da impedância).	54
57	Danos no boleto a 80 cm do PZT (parte real da impedância).	54
58	Valores de RMSD para diferentes condições de dano (parte real da impedância).	55
59	Valores de CCDM para diferentes condições de dano (parte real da impedância).	55
60	Danos no boleto a 80 cm do PZT (parte imaginária da impedância). . .	56
61	Valores de RMSD para diferentes condições de dano (parte imaginária da impedância).	56
62	Valores de CCDM para diferentes condições de dano (parte imaginária da impedância).	57
63	Danos no boleto a 80 cm do PZT (ângulo de fase).	57
64	Valores de RMSD para diferentes condições de dano (ângulo de fase).	58
65	Valores de CCDM para diferentes condições de dano (ângulo de fase).	58

Lista de Símbolos

V Diferença de potencial

I Corrente elétrica

ω Frequência angular

m_{eq} Massa equivalente

k_{eq} Rigidez equivalente

c_{eq} Amortecimento equivalente

Z Impedância mecânica da estrutura

Z_A Impedância mecânica do PZT

Z_E Impedância elétrica do PZT

Z_{EM} Impedância eletromecânica

Z_R Impedância de referência

Z_D Impedância desconhecida

$\bar{Z}_R$ Valor médio da impedância de referência

$\bar{Z}_D$ Valor médio da impedância desconhecida

Sumário

1	Introdução	11
1.1	Trilhos de Trem	11
1.2	Monitoramento da Integridade Estrutural	15
1.3	Técnica de Impedância Eletromecânica	19
1.4	Transdutores Piezoelétricos	24
1.5	Objetivos	25
1.6	Organização do Trabalho	25
2	Metodologia	27
2.1	Setup Experimental	27
2.1.1	Danos Simulados	28
2.2	Índices Métricos	30
2.2.1	RMSD	30
2.2.2	CCDM	30
3	Resultados e Discussões	32
3.1	Danos Simulados com Ímãs	32
3.1.1	Análise da Faixa de Frequência entre 20 kHz e 40 kHz	39
3.2	Danos Simulados com Massa Adesiva	45
3.2.1	Análise da Faixa de Frequência entre 20 kHz e 40 kHz	52
4	Considerações Finais	59
4.1	Conclusões	59
4.2	Trabalhos Futuros	60
5	Referências	61

1 Introdução

Este capítulo apresenta uma breve revisão dos principais tópicos abordados neste trabalho de graduação, sendo eles: trilhos de trem, monitoramento da integridade estrutural, técnica de impedância eletromecânica e transdutores piezoelétricos.

1.1 Trilhos de Trem

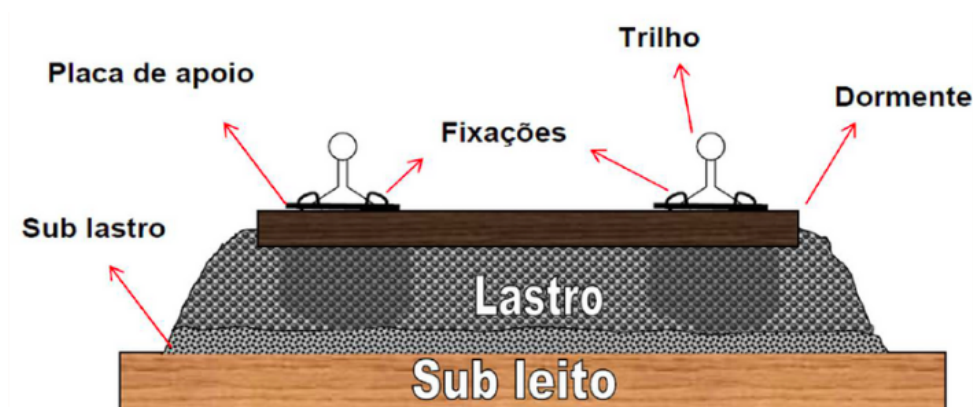
As ferrovias desempenham um papel fundamental no transporte de pessoas e, especialmente, de mercadorias em escala global. Como uma alternativa eficiente, segura e econômica, as ferrovias destacam-se por sua capacidade de transportar grandes volumes de carga em uma única viagem, além de oferecerem significativos benefícios ambientais. Por essas razões, merecem atenção especial em iniciativas voltadas ao aprimoramento dos sistemas de transporte.

Os investimentos nesse setor de transportes têm crescido intensamente, e as malhas ferroviárias estão aos poucos ganhando espaço pelo país novamente. Para garantir a logística e o bom funcionamento do sistema, os trilhos devem estar em constante manutenção. Isso porque, além da segurança, cada vagão parado gera prejuízos econômicos exorbitantes.

As ferrovias são sistemas de transporte formados por trilhos de aço, os quais são objeto deste estudo, por onde os trens se deslocam. Sua história remonta ao início do século XIX, quando, na Grã-Bretanha, as primeiras linhas ferroviárias foram construídas. Desde então, os "caminhos-de-ferro" desenvolveram-se rapidamente, podendo ser de carga, de passageiros, sistemas de metrô e trens de alta velocidade, cada qual projetado para atender necessidades específicas, conectando cidades e países e desempenhando um papel importante no desenvolvimento econômico e social.

A Figura 1 esquematiza a seção transversal de uma malha ferroviária, onde é possível identificar elementos da infraestrutura e superestrutura da via. Lastro, sublastro, subleito e camadas de reforço de subleito compõem a infraestrutura, a qual é responsável por suportar a superestrutura da via composta por trilhos, dormentes e fixações (Lobato 2020).

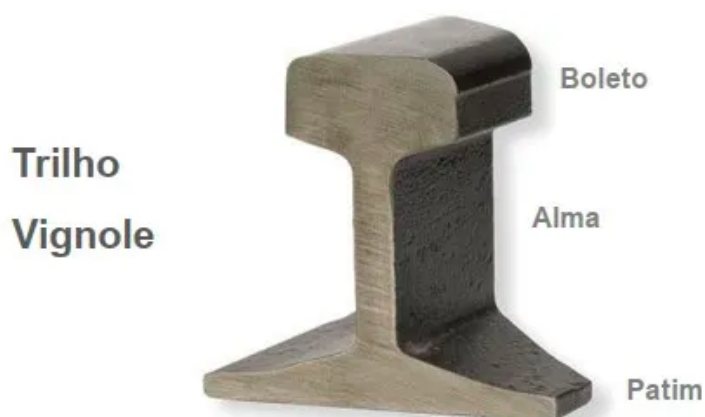
Figura 1: Seção transversal esquemática da malha ferroviária.



Fonte: Lobato (2020).

Os trilhos, foco deste estudo, são responsáveis pelo suporte do material rodante e pela pista de rolamento (a guia dos veículos), além de conferir sustentação aos veículos, transferindo as solicitações das rodas para os dormentes. A Figura 2 esquematiza um trilho em estilo Vignole (o mais utilizado), que é constituído por boleto (onde ocorre o contato da roda com o trilho, sendo assim, a parte que recebe primeiro toda a carga do veículo ferroviário e que sofre mais desgaste); alma (que é a parte mais estreita do trilho, ligando o patim ao boleto, é responsável pela resistência à flexão vertical, portanto, quanto maior sua altura, maior a capacidade de carga do trilho); e patim (que é a área inferior achatada do trilho e cuja função é distribuir a pressão ao dormente e receber a fixação) (Lobato 2022).

Figura 2: Representação de um trilho Vignole.



Fonte: Lobato (2020).

Segundo a Companhia Brasileira de Ferro e Aço - CBFA (2024), dentre os tipos de danos que os trilhos podem apresentar, podemos citar os desgastes late-

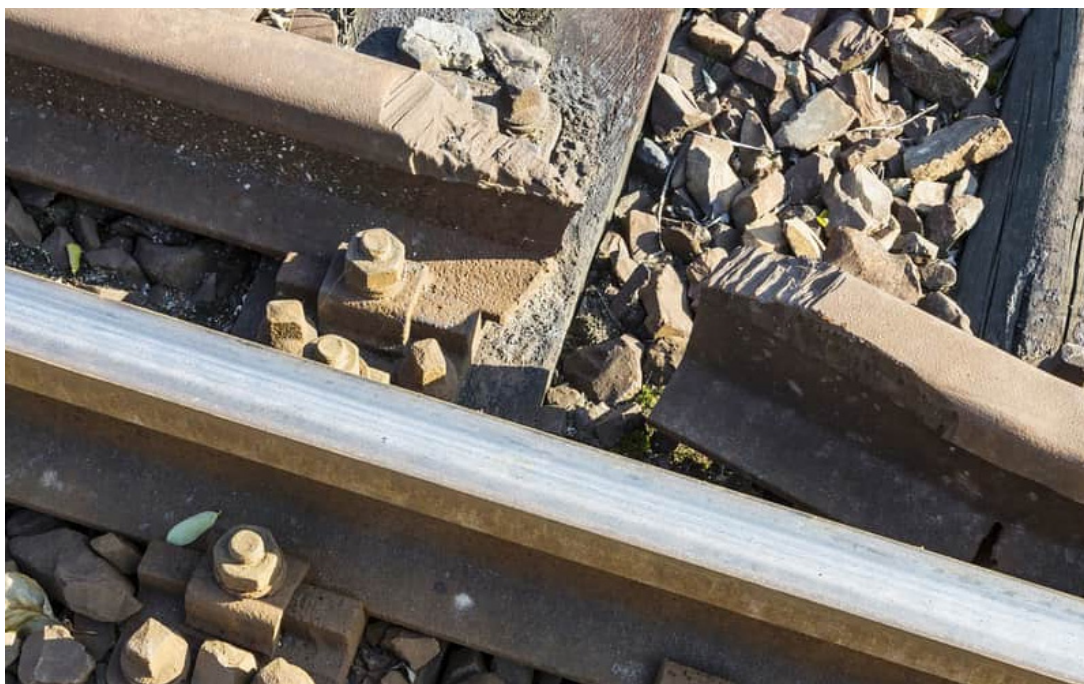
rais, caracterizados por anomalias que surgem na estrutura do trilho, principalmente em curvas, e que se originam devido a pressão exercida pela passagem das rodas. Há ainda os desgastes ondulatórios, também denominados corrugação, como observado na Figura 3, gerados pelo tráfego intenso e que se apresentam como pequenas ondulações nos trilhos do trem. Vale salientar que esses desgastes podem levar a outros problemas como deslocamento indevido dos dispositivos de fixação dos patins, danificação de materiais dos trilhos e dos trens, deformações na trilhagem, entre outros. Por fim, podemos citar também os desgastes verticais, os quais aparecem nos trechos retilíneos dos trilhos e podem levar à fratura da estrutura dos mesmos, impedindo a passagem de trens, conforme Figura 4. Esse tipo de defeito pode ser causado por diversos fatores, como o peso total das estruturas dos vagões e cargas, o atrito entre as rodas dos trens, além de processos naturais como a corrosão.

Figura 3: Corrugação em trilho.



Fonte: RailDamage (2024).

Figura 4: Fratura em trilho.



Fonte: CBFA (2024).

Os danos descritos acima são alguns exemplos de defeitos originados em serviço, mas podemos encontrar muitos outros defeitos, como os citados por Macêdo (2009), dentre os quais temos os vazios ou bolsas de contração, as segregações, as inclusões, as fissuras transversais, e os defeitos de laminação, todos esses enquadrados como defeitos de fabricação.

Urge, portanto, que os danos e defeitos em trilhos sejam preferencialmente evitados, ou detectados em seus estágios iniciais, visando a segurança e a eficácia do sistema. Para a detecção desses danos, vários métodos não destrutivos de inspeção são utilizados, dentre os quais podemos citar o “batedor de carro”, que detecta fissuras em rodas através de ressonância acústica; “óleo e cal” cuja função é a detecção de fissuras ocasionadas por fadiga em pinos e eixos de locomotivas a vapor; e o teste de ultrassom (UT), que é hoje o método de ensaio não destrutivo favorito da indústria ferroviária (Graham 2017).

Existem ainda poucas pesquisas envolvendo a detecção de danos em trilhos de trem, no entanto, esta é uma área que vem ganhando destaque atualmente, como nos estudos de Sabato et al. (2017), onde foi desenvolvida uma técnica de investigação óptica com câmeras e medição 3D; ou de Chalouhi et al. (2017) com técnicas de vibração e *machine learning* compreendendo a influência da temperatura.

Também Kolakowski et al. (2013) desenvolveu um sistema personalizado com

testes de excitações dinâmicas utilizando um agitador hidráulico controlado e sensores piezoelétricos para monitoramento da integridade estrutural e previsão da vida útil restante de uma ponte ferroviária; e Luo et al. (2021) implementou um sistema de monitoramento para a Estação Ferroviária Hangzhou East, na China, usando uma rede de sensores sem fio.

1.2 Monitoramento da Integridade Estrutural

A crescente necessidade de garantir que estruturas mecânicas apresentem alto desempenho em exigentes condições de operação tem incentivado diversas pesquisas na área de Monitoramento da Integridade Estrutural, também conhecida por SHM - do inglês *Structural Health Monitoring* (Worden & Dulieu-Barton 2004, Farrar et al. 2005).

Segundo Gonzalez (2012), monitorar a integridade estrutural envolve identificar os danos em seus estágios iniciais e intervir em sua propagação, impedindo, assim, possíveis falhas na estrutura. Com relação aos sistemas estruturais e materiais onde podem ser empregadas as técnicas de Monitoramento de Integridade Estrutural podemos citar, de acordo com Tsuruta (2008), os diversos sistemas estruturais de engenharia envolvendo altos riscos e custos de manutenção, entre eles estruturas de construção civil, tais como pontes, edifícios, torres de telecomunicações, além de estruturas de aeronaves, estruturas off-shore, tubulações da indústria petroquímica e veículos de entretenimento, como as montanhas-russas.

De acordo com a capacidade do sistema SHM de detectar os danos e de caracterizá-los, Rytter (1993) estabelece uma classificação por níveis:

Nível 1: O método fornece uma indicação qualitativa de que pode haver dano na estrutura (detecção);

Nível 2: O método fornece também informações sobre a provável localização do dano na estrutura (localização);

Nível 3: O método fornece ainda informações sobre o tamanho do dano (avaliação/quantificação);

Nível 4: O método fornece informações sobre a segurança real da estrutura, considerando um determinado estado de dano (consequência).

Ainda, Doebling et al. (1998) aponta:

Nível 1: Determinação de que há dano na estrutura;

Nível 2: Nível 1 + determinação da localização geométrica do dano;

Nível 3: Nível 2 + quantificação da severidade do dano;

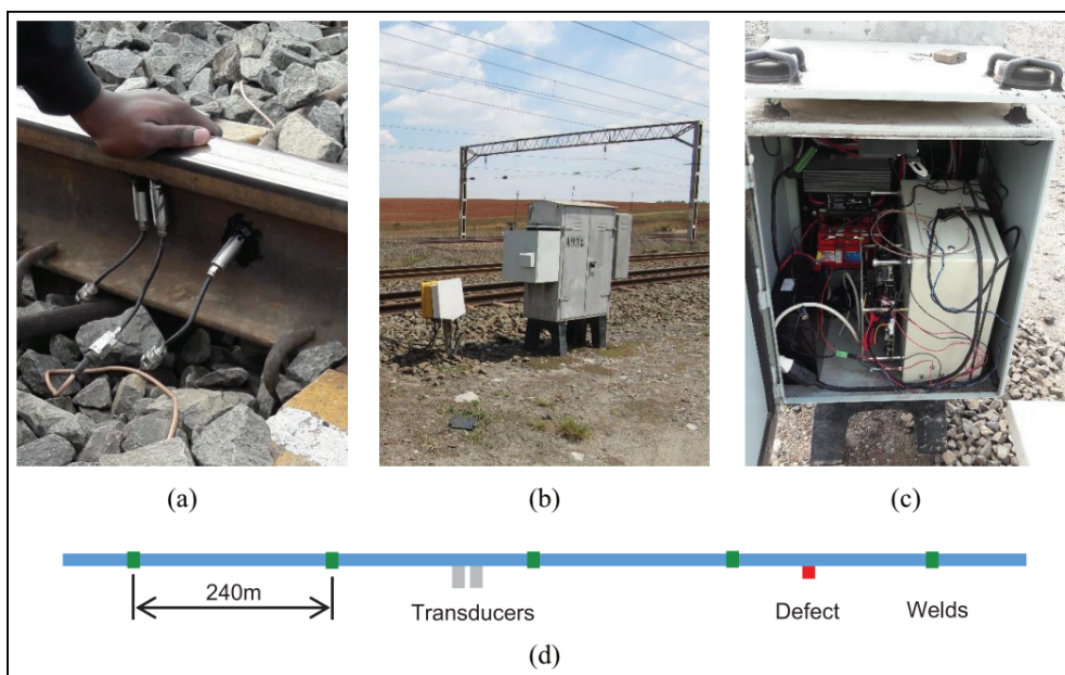
Nível 4: Nível 3 + previsão da vida útil remanescente da estrutura.

Muitos pesquisadores têm desenvolvido técnicas e métodos, especialmente com abordagens não-destrutivas, como por exemplo, utilizando fibra ótica (García et al. 2015, Antunes et al. 2012), emissão acústica (Tziavos et al. 2020, Han et al. 2015, Kral et al. 2013), análise da propagação de ondas (Salas & Cesnik 2010, Aranguren et al. 2013) e impedância eletromecânica (Yang et al. 2008, Yang & Divsholi 2010).

Existem outros trabalhos envolvendo Monitoramento da Integridade Estrutural e trilhos, como o de Ma et al. (2017), que avalia danos em reforços de trens de alta velocidade da EMU (do inglês, *Electric Multiple Units*) por meio da tecnologia SHM baseada em rede de sensores PZT; o de Wang et al. (2019) cujo estudo objetiva um sistema prático de monitoramento da integridade estrutural para carrocerias de trens de alta velocidade; ou o de Wang et al. (2020) que envolve SHM de trilhos ferroviários de alta velocidade usando contraste de condição baseado em ondas ultrassônicas difusas.

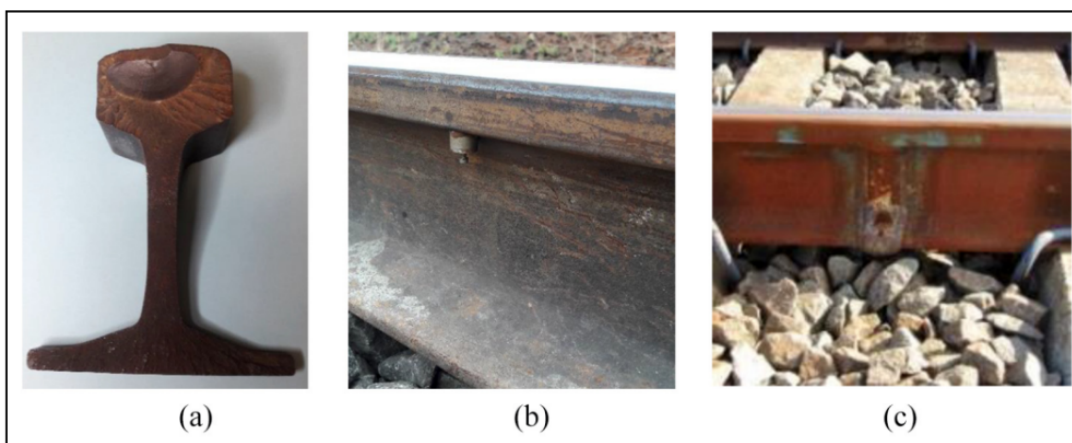
Ainda, os estudos de Loveday et al. (2019) comprovam a importância e a aplicabilidade do monitoramento de uma ferrovia operacional a partir de ondas guiadas por ultrassom. Um sistema experimental de monitoramento foi instalado em uma ferrovia de transporte pesado, usando dois transdutores piezoelétricos para transmitir e receber ondas ultrassônicas no modo pulso-eco. Os dados foram capturados por 2 semanas. Um defeito artificial foi criado colando uma pequena massa sob o boleto do trilho, a 370 metros dos transdutores, e o tamanho do sinal refletido pela massa variou conforme a junta adesiva se deteriorava. As Figuras 5 e 6 ilustram o experimento realizado.

Figura 5: Equipamento de monitoramento ferroviário: (a) transdutores, (b) gabinete à beira da via, (c) eletrônica de monitoramento e computador de placa única e (d) ilustração do layout da via.



Fonte: Loveday et al. (2019).

Figura 6: Fotografias de defeitos e características do trilho: (a) um defeito transversal que causou a quebra do trilho, (b) massa colada ao trilho e (c) solda aluminotérmica típica.

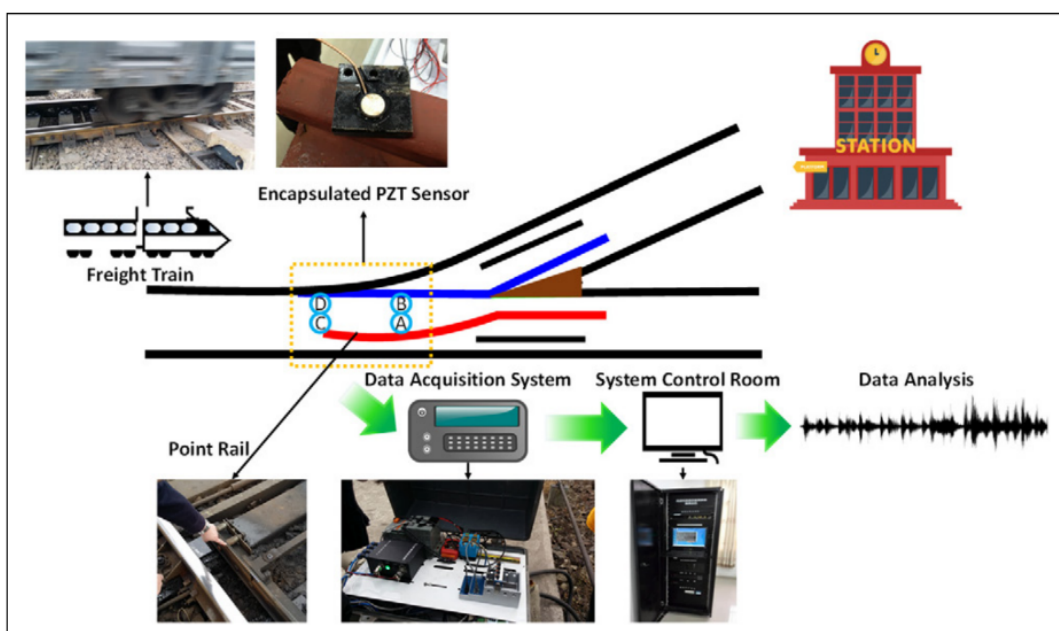


Fonte: Loveday et al. (2019).

Ressalta-se, também, os estudos de Chen et al. (2020), que utilizam abordagem de aprendizagem por transferência para avaliar as condições estruturais dos trilhos de maneira progressiva, usando dados de monitoramento de emissões acústicas. As Figuras 7 e 8 ilustram o aparato experimental utilizado, incluindo um conjunto de

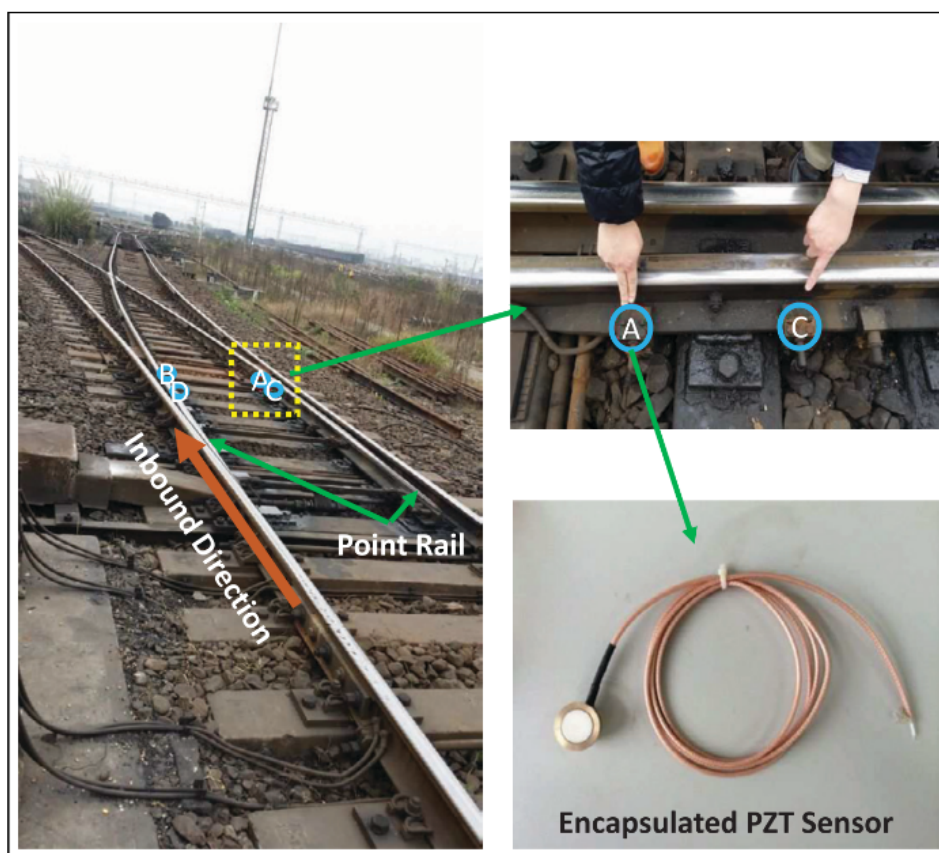
sensores piezoelétricos encapsulados (PZT), uma placa Pickering de quatro canais National Instrument 9223 (taxa de amostragem de 1 MHz), capaz de coletar dados de quatro sensores simultaneamente, e um computador para armazenamento de dados.

Figura 7: Sistema de monitoramento baseado em emissão acústica para detecção de trincas em desvios ferroviários.



Fonte: Chen et al. (2020).

Figura 8: Posição de implementação do sensor na área de desvio ferroviário.



Fonte: Chen et al. (2020).

No entanto, técnicas de impedância eletromecânica para o estudo da integridade estrutural de trilhos ainda são ferramentas novas e pouco aplicadas, e quase não se encontra trabalhos publicados e referências na literatura sobre a metodologia para aplicabilidade em ferrovias.

1.3 Técnica de Impedância Eletromecânica

A técnica de Impedância Eletromecânica (EMI, do inglês *Eletromechanical Impedance*) tipicamente compreende o uso de transdutores piezoelétricos (PZT) que atuam como atuador e sensor (Tebaldi 2004, Wang et al. 2014). É um parâmetro que descreve a relação entre as grandezas elétricas e mecânicas de um sistema, constituindo a relação entre a tensão elétrica aplicada ao sistema e a corrente elétrica que flui pelo mesmo, em função da velocidade mecânica e da força.

Segundo Liang et al. (1993), o método de impedância para analisar a resposta dinâmica de sistemas de materiais ativos dá-se pelas interações entre atuadores e estruturas. Tais interações são regidas pelas características dinâmicas de saída dos

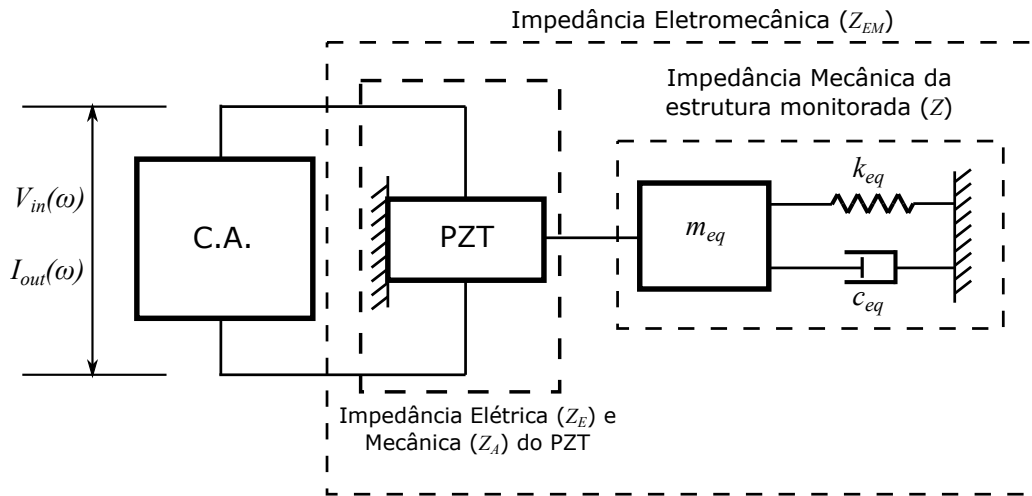
atuadores e pelas características dinâmicas da estrutura, ou seja, a impedância estrutural, que inclui massa, amortecimento, condições de contorno, rigidez, localização espacial e impedância acústica caso o efeito de acoplamento de fluido precisar ser incluído.

A técnica de EMI foi inicialmente apresentada por Liang et al. (1993), seguido por Sun et al. (1995), Zhou et al. (1996), Giurgiutiu et al. (1999), Park et al. (2000a), entre outros autores. Desde o início se tem engajamento de pesquisadores brasileiros para o desenvolvimento da técnica (Lopes Jr et al. 1999), com importante esforço para análises de sinais experimentais (Baptista et al. 2011, Vieira Filho et al. 2011, Baptista et al. 2014).

A técnica tem contado também com relevante esforço da comunidade internacional, com diferentes trabalhos apresentando estratégias de avaliar a influência da temperatura ambiente na capacidade de se detectar os danos (Baptista et al. 2011, 2014, Abbas et al. 2021). De maneira geral, os trabalhos predominantemente se concentram em avaliação de sinais experimentais (Divsholi & Yang 2012, Luo et al. 2013, Ai et al. 2014). Nos últimos anos tem se observado um esforço da comunidade científica para ampliar o entendimento da técnica de EMI considerando simulações numérico-computacionais. No entanto, trata-se de um modelo complexo por abordar diferentes meios físicos (grandezas elétricas e mecânicas).

Simplificadamente, a técnica consiste em acoplar cerâmicas piezoelétricas na estrutura de estudo, a fim de determinar, por meio de excitações e aquisição de sinais, a impedância eletromecânica do conjunto (Z_{EM}) a partir da relação entre a impedância mecânica da estrutura (Z) e as impedâncias elétrica (Z_E) e mecânica (Z_A) do transdutor piezoelétrico (PZT). O PZT é submetido a uma diferença de potencial (V_{in}) que excita a estrutura, cuja impedância mecânica depende de massa (m_{eq}), rigidez (k_{eq}) e amortecimento (c_{eq}) equivalentes. Como resposta, o PZT deformado gera um sinal de corrente alternada (I_{out}), conforme representado esquematicamente na Figura 9.

Figura 9: Caso de estudo hipoteticamente dividido em segmentos.

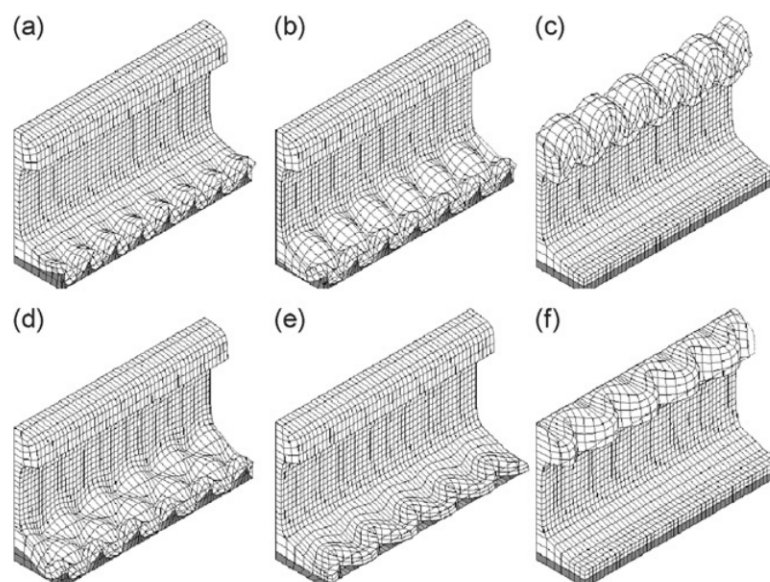


Fonte: Adaptado de Liang et al. (1996).

Os trabalhos de Ryue et al. (2008) e Ryue et al. (2009) apresentam algumas abordagens interessantes para o estudo da aplicabilidade da técnica de EMI, apesar de utilizarem a metodologia de propagação de ondas. O primeiro trata-se de investigações sobre tipos de ondas que se propagam através de regiões separadas da seção transversal do trilho para frequências de até 80 kHz.

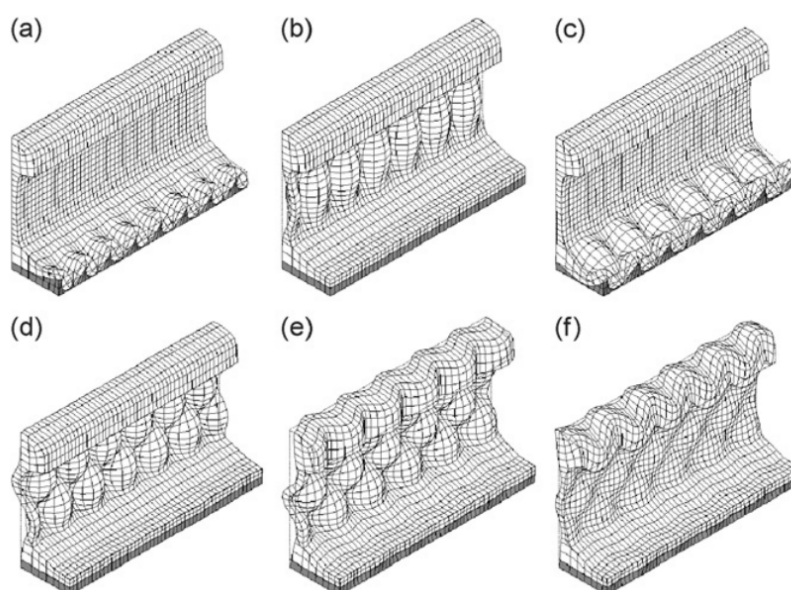
Nessa pesquisa, Ryue et al. (2008) utilizou dois métodos numéricos para obter as propriedades de dispersão para um modelo de trilho ferroviário, incluindo pads de trilho como uma fundação contínua: o método convencional de elementos finitos (FE) e o método de elementos finitos de número de onda (WFE). Para validar os resultados previstos, foram realizados experimentos em uma curta pista de teste usando um martelo de impacto e acelerômetros, e para excitar o trilho em frequências mais altas, foram feitas medições adicionais utilizando transdutores piezo-cerâmicos. As Figuras 10 e 11 ilustram algumas configurações de deformação do trilho para diferentes frequências de ondas.

Figura 10: Formas de deformação das primeiras 6 ondas próximas a 50 kHz para as ondas verticais e longitudinais. (a) A primeira onda a 48.740 Hz, (b) a segunda onda a 50.719 Hz, (c) a terceira onda a 50.398 Hz, (d) a quarta onda a 49.626 Hz, (e) a quinta onda a 49.870 Hz e (f) a sexta onda a 50.723 Hz.



Fonte: Ryue et al. (2008).

Figura 11: Formas de deformação das primeiras 6 ondas próximas a 50 kHz para as ondas laterais e de torção. (a) A primeira onda a 51.139 Hz, (b) a segunda onda a 49.193 Hz, (c) a terceira onda a 48.793 Hz, (d) a quarta onda a 50.192 Hz, (e) a quinta onda a 49.020 Hz e (f) a sexta onda a 50.505 Hz.



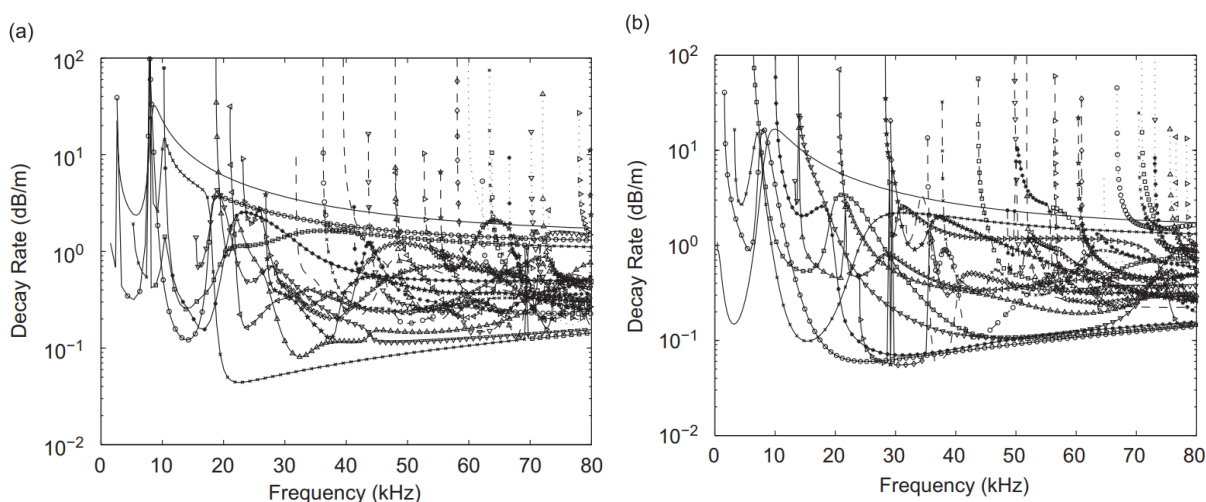
Fonte: Ryue et al. (2008).

Dentre as conclusões, tem-se que os resultados comparados com simulações em termos da velocidade de grupo apresentaram uma concordância muito boa; além disso, a partir dessa comparação foram identificados quais tipos de onda se propagam predominantemente em várias regiões da seção transversal do trilho, e, por fim, confirmou-se a partir deste estudo que o método WFE é uma ferramenta mais eficaz do que o método FE para investigar a propagação de ondas em trilhos ferroviários.

Já no trabalho de Ryue et al. (2009) foram investigadas as taxas de decaimento das ondas de propagação em trilhos ferroviários para frequências de até 80 kHz, considerando que, para entender a propagação de ondas de longo alcance é necessário identificar até que ponto as vibrações podem viajar a partir das características de atenuação das principais ondas de propagação em função da distância. O método WFE foi novamente utilizado para prever as taxas de decaimento para um trilho sobre uma fundação contínua.

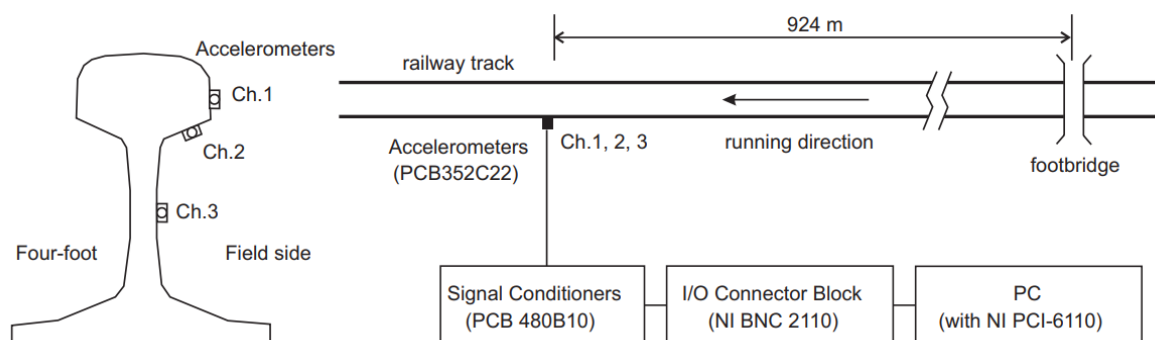
Para validar os resultados simulados, foi realizada uma medição de campo em uma via ferroviária operacional. A partir deste experimento, as vibrações do trilho induzidas por trens foram adquiridas para vários trens em movimento percorrendo uma longa seção de trilho. Na Figura 12 são apresentadas as taxas de decaimento previstas do trilho sobre o pad rígido para diferentes configurações de ondas, e a Figura 13 ilustra o setup experimental utilizado para as medições em campo.

Figura 12: Taxas de decaimento previstas do trilho sobre o pad rígido para (a) as ondas verticais e longitudinais simétricas, (b) as ondas laterais, torcionais e longitudinais antissimétricas.



Fonte: Ryue et al. (2009).

Figura 13: Configuração experimental para a medição em campo.



Fonte: Ryue et al. (2009).

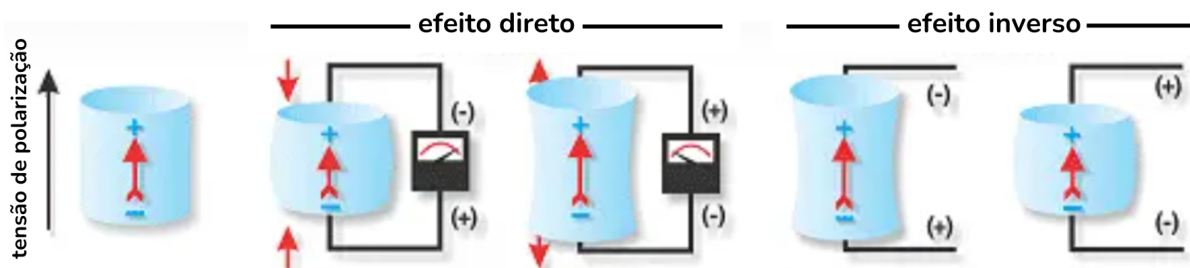
Concluiu-se que as taxas de decaimento das ondas que se propagam mais longe são predominantemente influenciadas pelo amortecimento do trilho, não pelo amortecimento dos pads do trilho. Os resultados indicaram que a faixa de frequência mais eficaz para a propagação de ondas ao longo dos trilhos ferroviários é entre 20 e 40 kHz, podendo variar de acordo com o local e as condições dos trilhos e dos trens ferroviários. Por esse motivo, essa faixa de frequência recebeu uma atenção especial neste trabalho.

1.4 Transdutores Piezoelétricos

Desenvolvido por cientistas do Instituto de Tecnologia de Tóquio por volta de 1952, os materiais piezoelétricos (PZT) são constituídos à base de óxido metálico, e apresentam propriedades únicas (APC-International 2024).

A piezoeletricidade é um fenômeno exibido por cristais não centrossimétricos (Tressler et al. 1998), baseado na capacidade de gerar uma carga elétrica em resposta a uma pressão mecânica (tensão) aplicada. Esse efeito ocorre porque a pressão mecânica altera a estrutura do material, gerando uma polarização elétrica, e a esse caso dá-se o nome de efeito direto. Existe também o efeito reverso, chamado efeito indireto, nos casos em que são geradas deformações no material em função da aplicação de um campo elétrico. O efeito direto dos PZTs possibilita sua utilização como sensores, enquanto o efeito indireto se relaciona aos atuadores (Gonsalez 2012). A Figura 14 apresenta os efeitos direto e inverso de uma cerâmica piezoelétrica cilíndrica.

Figura 14: Efeitos direto e inverso de um cristal piezoelétrico cilíndrico.



Fonte: Adaptado de APC-International (2024).

O efeito piezoelétrico é observado em vários tipos de materiais, incluindo cristais, cerâmicas, polímeros e até mesmo em ossos humanos, sendo utilizado em diversas áreas, de acordo com Armendani et al. (2016), como na medicina, com aparelhos de ultrassom e eletroterapia; na música, com microfones e auto-falantes; além de transformadores, detonadores de impacto, geradores de faíscas, e na geração de energia.

Segundo Leo (2007), entre as vantagens das cerâmicas piezoelétricas estão sua alta rigidez mecânica e sua massa desprezível, o que leva a uma resposta de detecção mais rápida. Além disso, os elementos piezoelétricos oferecem excelente desempenho devido a sua fácil integração, excelente resistência mecânica, amplas respostas de frequência, baixo consumo de energia e impedância acústica, além do baixo custo (Su et al. 2006).

1.5 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho de graduação é avaliar, experimentalmente, a viabilidade da técnica de Impedância Eletromecânica na detecção de danos simulados em trilhos de trem, a partir de ensaios com cerâmicas piezoelétricas em diferentes configurações de danos.

1.6 Organização do Trabalho

Este trabalho de graduação está estruturado em cinco capítulos e referências bibliográficas. Em detalhes, tem-se:

- Capítulo 1 – **Introdução**: revisão dos princípios básicos relacionados aos prin-

cipais temas envolvidos no trabalho: trilhos de trem, monitoramento da integridade estrutural (SHM), a técnica de impedância eletromecânica e transdutores piezoelétricos;

- Capítulo 2 – **Metodologia:** apresenta a metodologia utilizada para a avaliação da técnica na detecção de danos simulados em trilhos e o setup experimental com descrição dos ensaios realizados para coleta dos sinais, além de apresentar as equações de dois índices métricos: RMSD e CCDM;
- Capítulo 4 – **Resultados e Discussões:** análise dos dados obtidos nos ensaios e caracterização a partir dos índices métricos;
- Capítulo 5 – **Considerações Finais:** conclusões e sugestões para trabalhos futuros;
- **Referências Bibliográficas.**

2 Metodologia

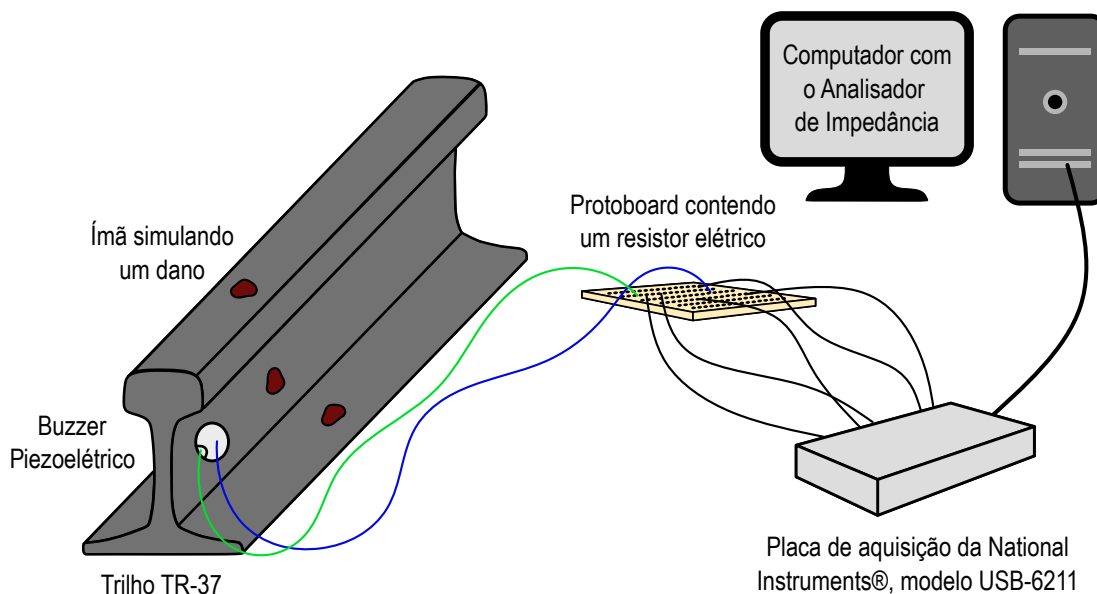
Este capítulo descreve os métodos e procedimentos empregados para o desenvolvimento deste trabalho de graduação, com a apresentação do setup experimental utilizado para coleta dos sinais de impedância.

2.1 Setup Experimental

O setup experimental utilizado neste trabalho de graduação consiste em uma placa de aquisição da National Instruments®, modelo USB-6211 (National-Instruments 2006); um computador Dell XPS 8300 contendo o software analisador de impedância ("VI Impedance Analyzer 4.0") desenvolvido por Baptista & Filho (2009) em um ambiente LabVIEW®; uma protoboard contendo um resistor de $10k\Omega$, cuja função é limitar a corrente no transdutor piezoelétrico, evitando, assim, potenciais danos ao dispositivo; um Buzzer Piezoelétrico da ATCP, de 25 mm de diâmetro; e uma seção de trilho de 1 m de comprimento.

Para a realização do experimento, o analisador de impedância "VI Impedance Analyzer 4.0" (Baptista & Filho 2009) gera o sinal de excitação (diferença de potencial), mede o sinal de resposta (corrente que passa pelo PZT) e determina a Impedância Eletromecânica (EMI) do sistema monitorado (a partir do PZT acoplado ao trilho apoiado), como ilustra a Figura 15.

Figura 15: Setup experimental.



Fonte: Própria autora.

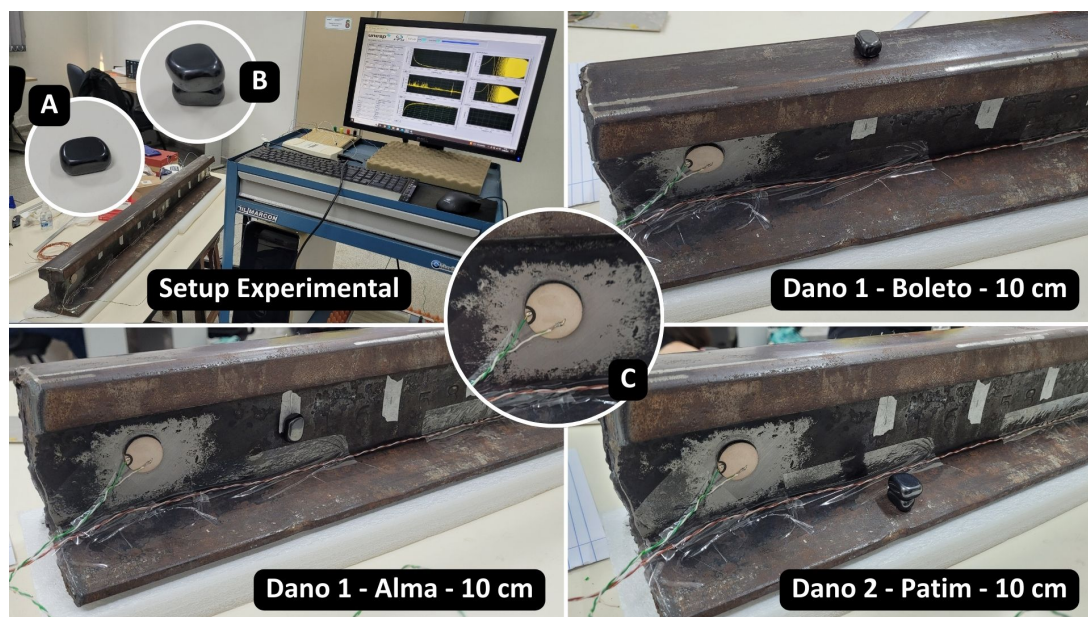
A aquisição dos sinais foi realizada considerando uma curva de referência (baseline) representando o trilho sem a presença de danos, e curvas de danos simulados em diferentes configurações, posições e intensidades de dano, a fim de avaliar a efetividade da técnica para distintas situações. A metodologia utilizada para simulação dos danos é apresentada a seguir.

2.1.1 Danos Simulados

Simulando os danos foram utilizadas duas técnicas: a primeira com ímãs acoplados ao trilho, e a outra com massa adesiva (Durepoxi).

Inicialmente, foram adicionados ao trilho ímãs na alma, no boleto e no patim, a distâncias de 10 a 80 cm do PZT (de 10 em 10 cm). A intensidade dos danos foi definida como Dano Tipo 1 (um ímã de 13 g), e Dano Tipo 2 (dois ímãs, um de 13 g e outro de 17 g). A Figura 16 apresenta a simulação de danos com ímã.

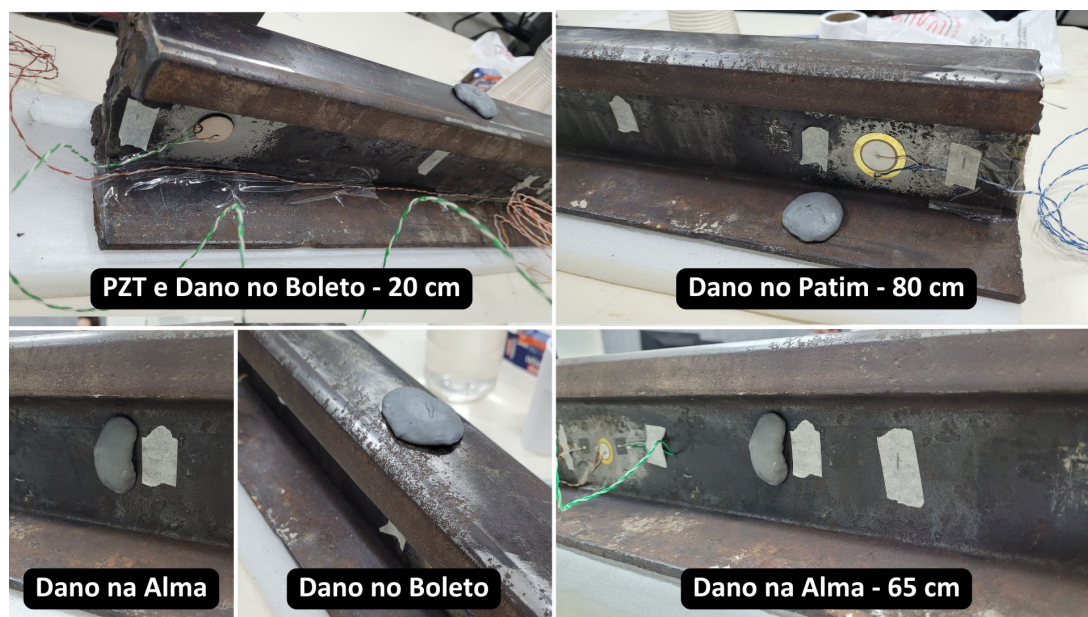
Figura 16: Danos simulados com ímãs: (A) Dano Tipo 1, (B) Dano Tipo 2, e (C) Buzzer Piezoelétrico da ATPC.



Fonte: Própria autora.

Com Durepoxi foi fixada ao trilho uma massa de aproximadamente 20 g na alma, boleto e patim, a distâncias de 20, 65 e 80 cm do PZT, conforme Figura 17.

Figura 17: Danos simulados com massa adesiva (Durepoxi).



Fonte: Própria autora.

Ressalta-se que todos os sinais de impedância foram processados e ana-

lisados em ambiente Python, e a caracterização dos danos baseou-se nos índices métricos descritos no item subsequente.

2.2 Índices Métricos

Os índices métricos são uma importante ferramenta para a caracterização quantitativa dos danos. O desvio médio quadrático (RMSD, do inglês *Root Mean Square Deviation*) e a métrica do desvio do coeficiente de correlação (CCDM, do inglês *Correlation Coefficient Deviation Metric*) são os mais comumente utilizados e consistem na comparação de dois sinais de impedância: um para a estrutura saudável, sem danos (impedância de referência), e o outro para a estrutura com dano (impedância desconhecida) (Dias 2021).

É importante ressaltar que, quanto maior os valores dos índices, mais se diferenciam os sinais, ou seja, maior a probabilidade de existência de dano na estrutura.

Segundo Vieira Filho et al. (2011), os índices podem variar entre 0 e 1, sendo que, se tende a zero, não há dano. No entanto, se este aumenta em direção à unidade, há uma alta probabilidade de existência de dano. O valor máximo esperado é 1, mas o dano pode ser facilmente detectado mesmo com pequenos coeficientes.

2.2.1 RMSD

O cálculo do RMSD é dado pela Equação 1, segundo Vieira Filho et al. (2011). Destaca-se que tal índice apresenta maior sensibilidade às variações na amplitude das curvas de impedância (Koo et al. 2009, Baptista et al. 2014, Dias 2021).

$$RMSD = \sqrt{\sum_k \frac{(Z_{k,D} - Z_{k,R})^2}{(Z_{k,R})^2}} \quad (1)$$

Sendo Z_R a impedância de referência da estrutura saudável (baseline) e Z_D a impedância desconhecida, que nesse caso representa a estrutura com dano.

2.2.2 CCDM

Para o cálculo do CCDM utiliza-se a Equação 2, também apresentada por Vieira Filho et al. (2011). Ao contrário do RMSD, este índice é mais sensível às mudanças no eixo da frequência (Baptista et al. 2014, Dias 2021).

$$CCDM = 1 - \left| \frac{\sum_k (Z_{k,R} - \overline{Z_R})(Z_{k,D} - \overline{Z_D})}{\sqrt{\sum_k (Z_{k,R} - \overline{Z_R})^2} \sqrt{\sum_k (Z_{k,D} - \overline{Z_D})^2}} \right| \quad (2)$$

Novamente, Z_R é a impedância da estrutura saudável de referência (baseline) e Z_D a impedância com dano (impedância desconhecida).

Ressalta-se que $\overline{Z_R}$ e $\overline{Z_D}$ são os valores médios, dados por:

$$\overline{Z_R} = \frac{1}{N} \sum_k Z_{k,R} \quad (3)$$

$$\overline{Z_D} = \frac{1}{N} \sum_k Z_{k,D} \quad (4)$$

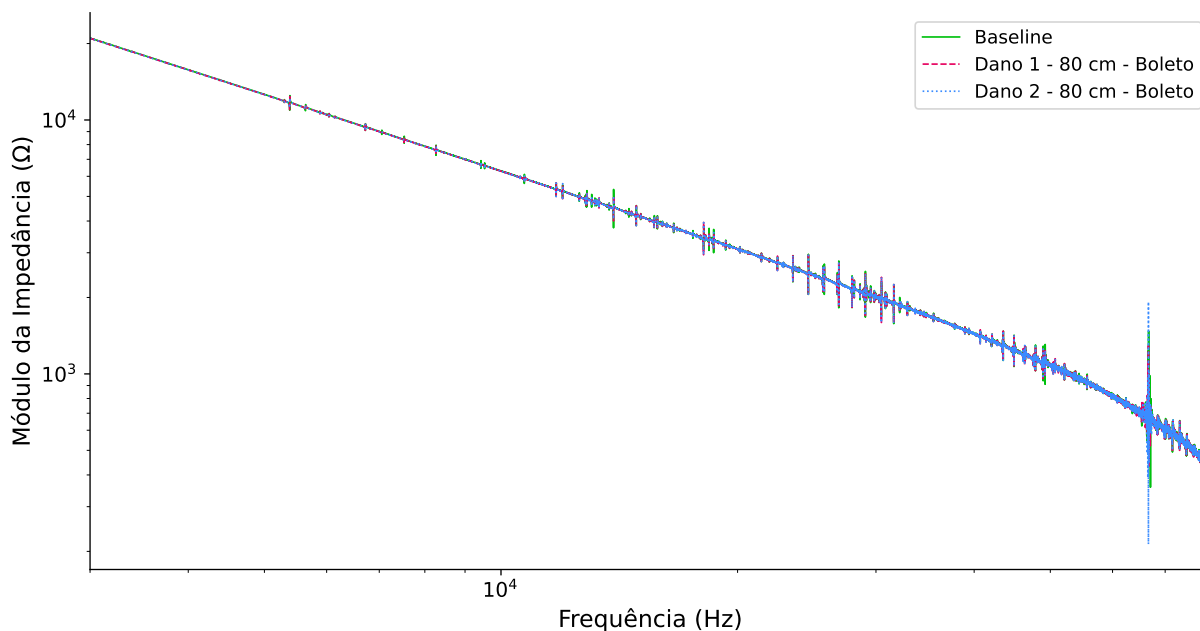
3 Resultados e Discussões

Este capítulo apresenta os sinais obtidos experimentalmente, assim como sua caracterização a partir dos índices métricos. Os resultados foram separados pelas técnicas de simulação de danos utilizadas e analisou-se duas faixas de frequência distintas: uma variando de 3 a 80 kHz e outra variando entre 20 e 40 kHz.

3.1 Danos Simulados com Ímãs

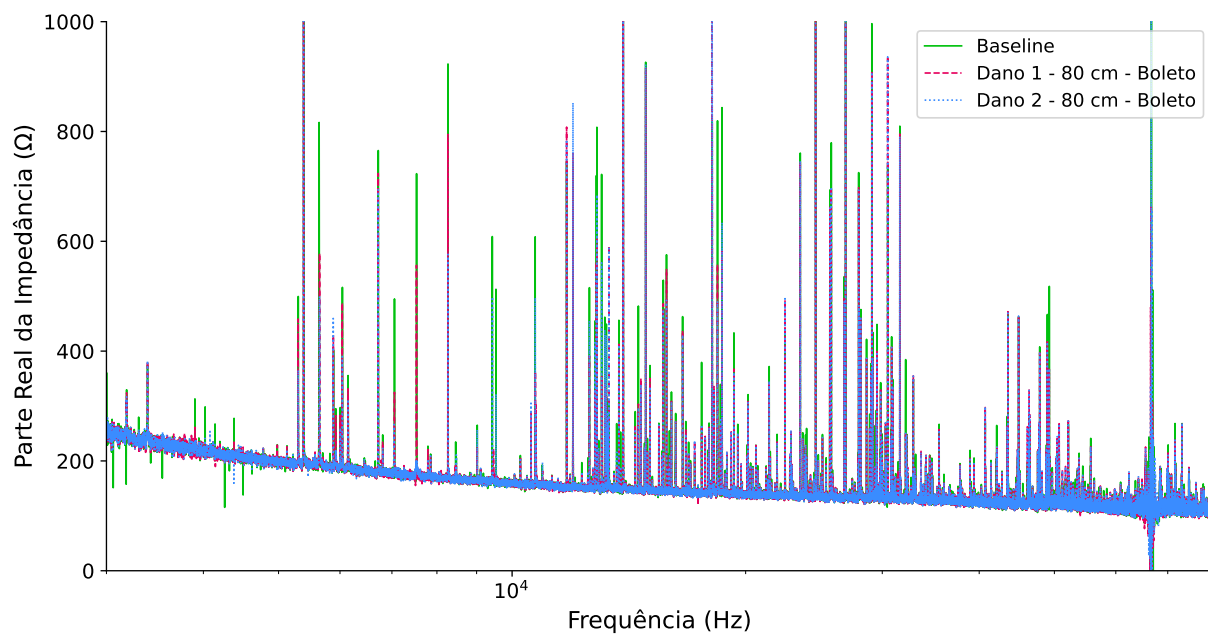
Os ímãs foram posicionados na alma, patim e boleto, a distâncias de 10 a 80 cm do PZT, conforme já descrito no Item 2.1.1. As Figuras 18 a 21 exemplificam as curvas do módulo, parte real, parte imaginária e ângulo de fase da impedância para os danos no boleto, a 80 cm do PZT, sendo a estrutura saudável representada pela curva baseline, e os danos tipo 1 e tipo 2 dispostos na mesma posição do trilho. A faixa de frequência varia entre 3 kHz e 80 kHz.

Figura 18: Danos no boleto a 80 cm do PZT (módulo da impedância).



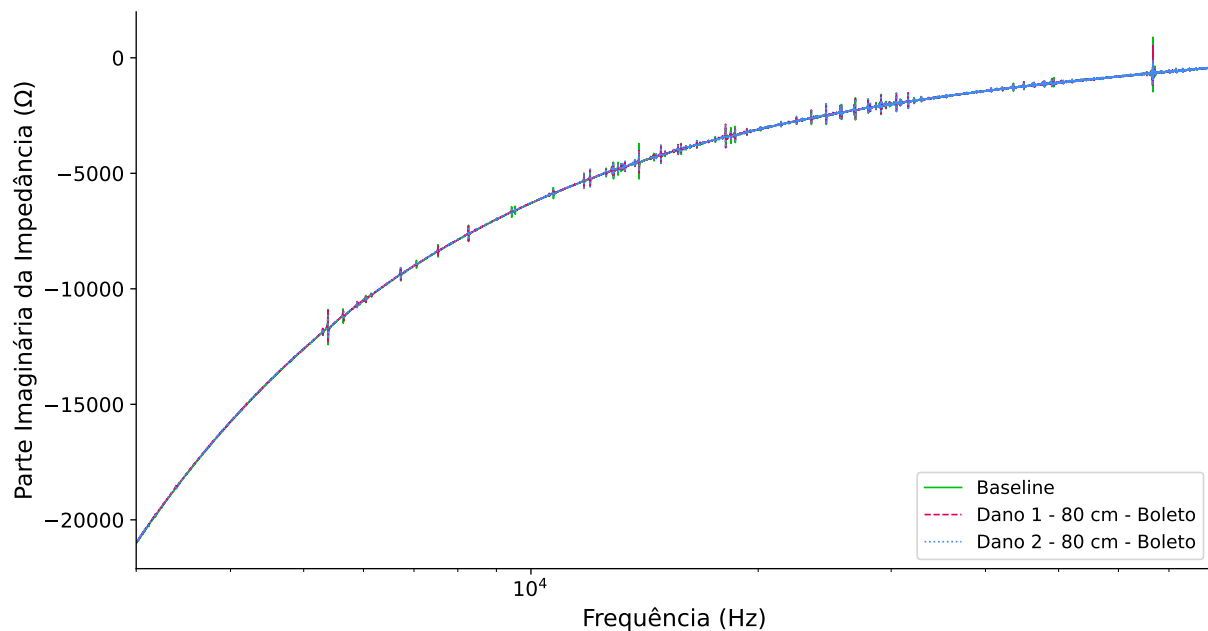
Fonte: Própria autora.

Figura 19: Danos no boleto a 80 cm do PZT (parte real da impedância).



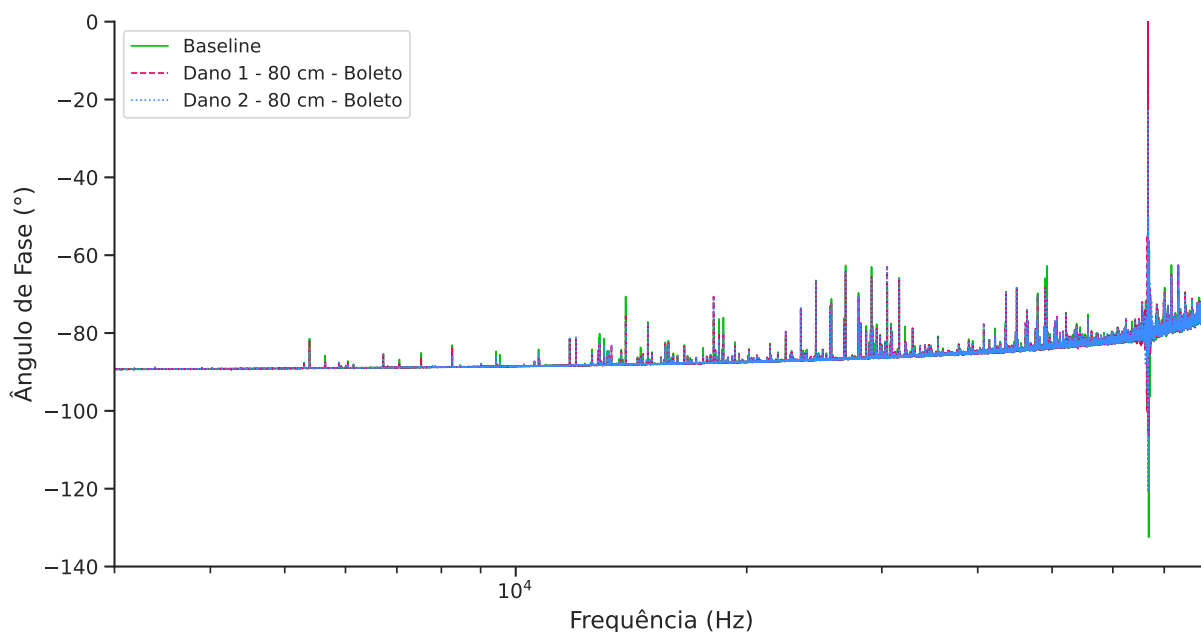
Fonte: Própria autora.

Figura 20: Danos no boleto a 80 cm do PZT (parte imaginária da impedância).



Fonte: Própria autora.

Figura 21: Danos no boleto a 80 cm do PZT (ângulo de fase).

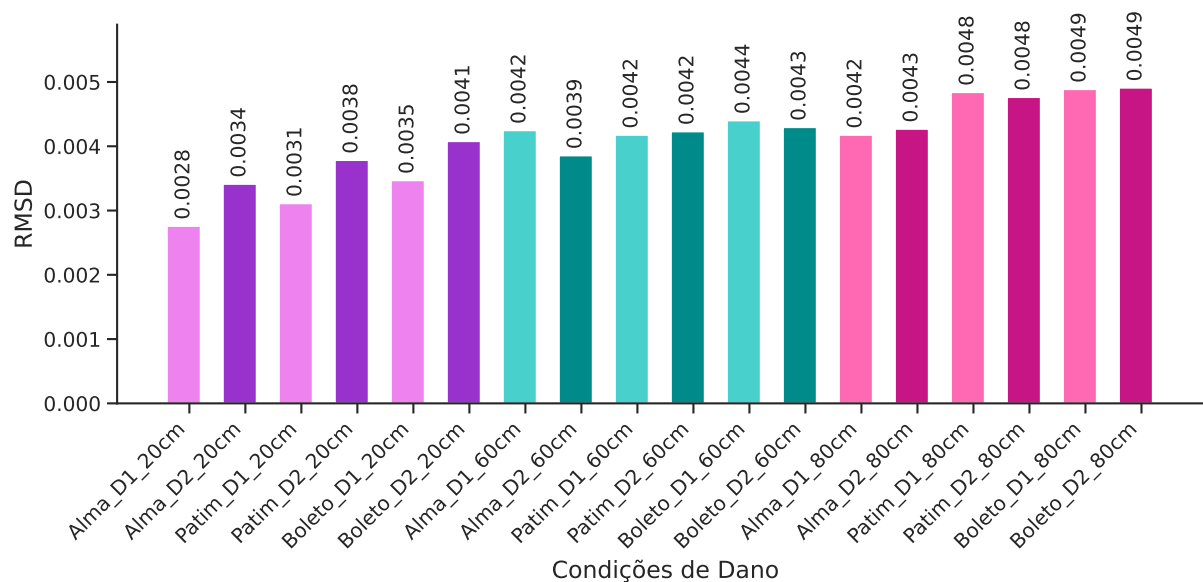


Fonte: Própria autora.

A partir dos gráficos, especialmente para a parte real da impedância, é possível perceber que existem diferenças entre as curvas, porém somente com o cálculo dos índices essas diferenças podem ser quantificadas e qualificadas. Desse modo, nas Figuras 22 a 29 são apresentados os índices RMSD e CCDM para danos tipo 1 e 2 localizados na alma, patim e boleto do trilho, a distâncias de 20, 60 e 80 cm do PZT, considerando o módulo, a parte real, a parte imaginária e o ângulo de fase da impedância.

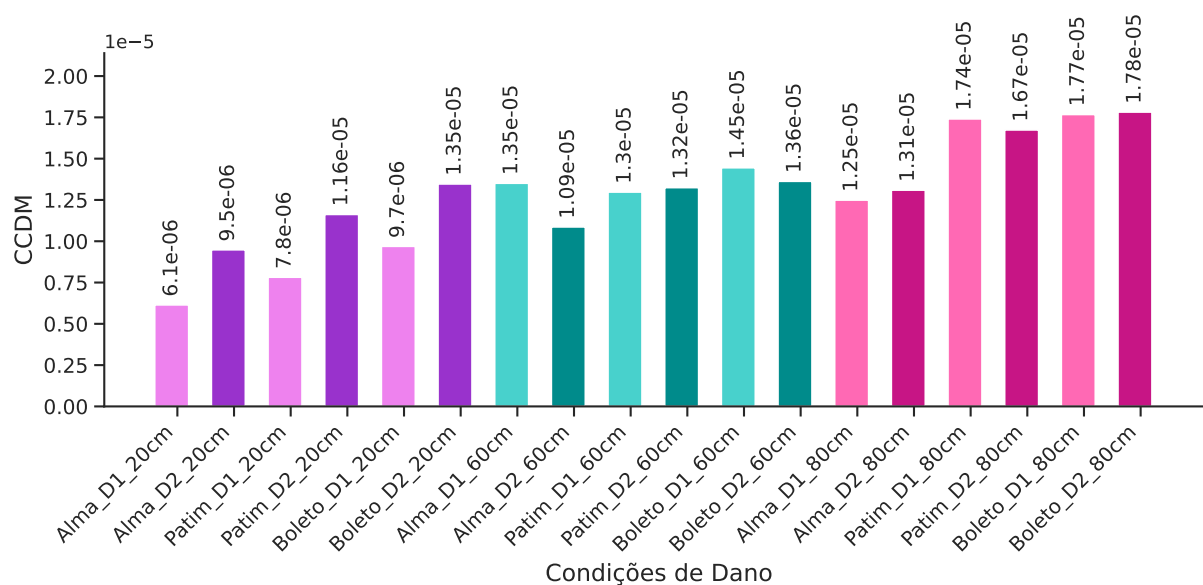
• Módulo da Impedância

Figura 22: Valores de RMSD para diferentes condições de dano (módulo da impedância).



Fonte: Própria autora.

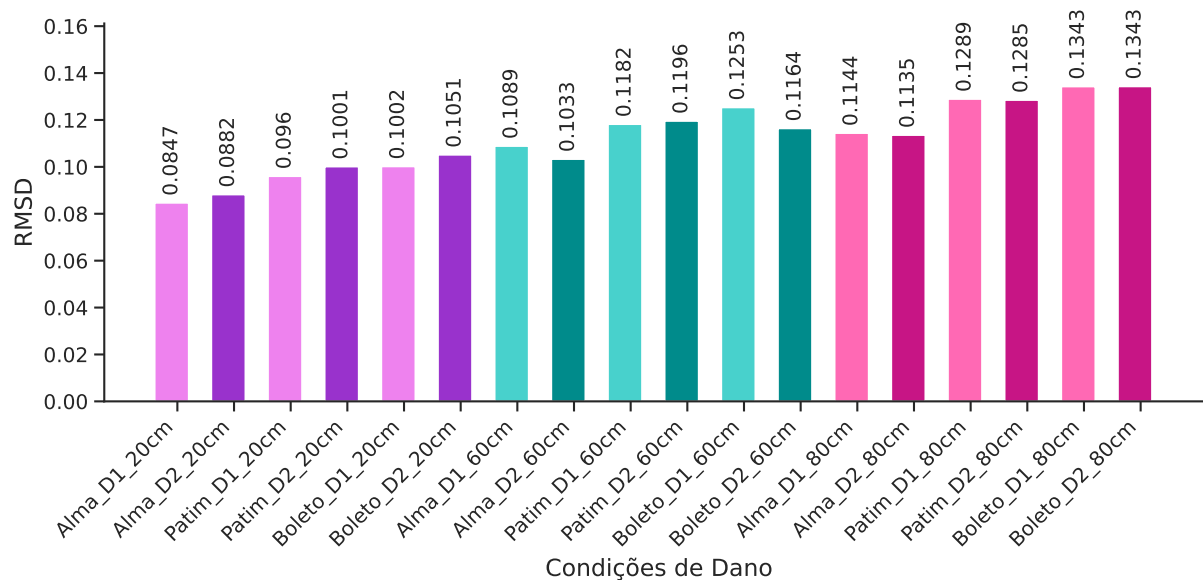
Figura 23: Valores de CCDDM para diferentes condições de dano (módulo da impedância).



Fonte: Própria autora.

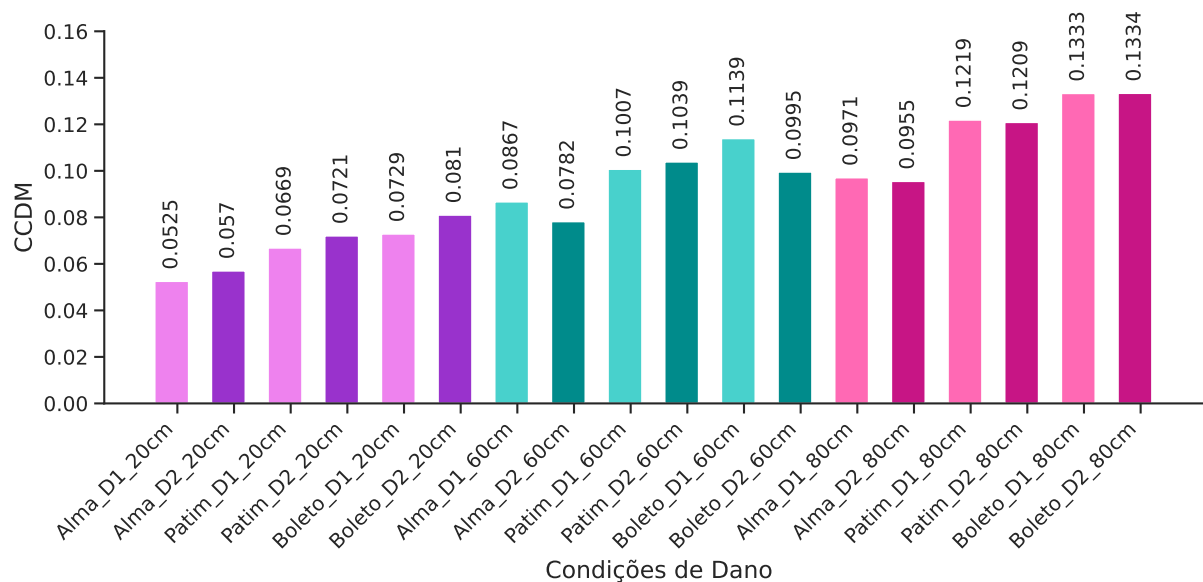
• Parte Real da Impedância

Figura 24: Valores de RMSD para diferentes condições de dano (parte real da impedância).



Fonte: Própria autora.

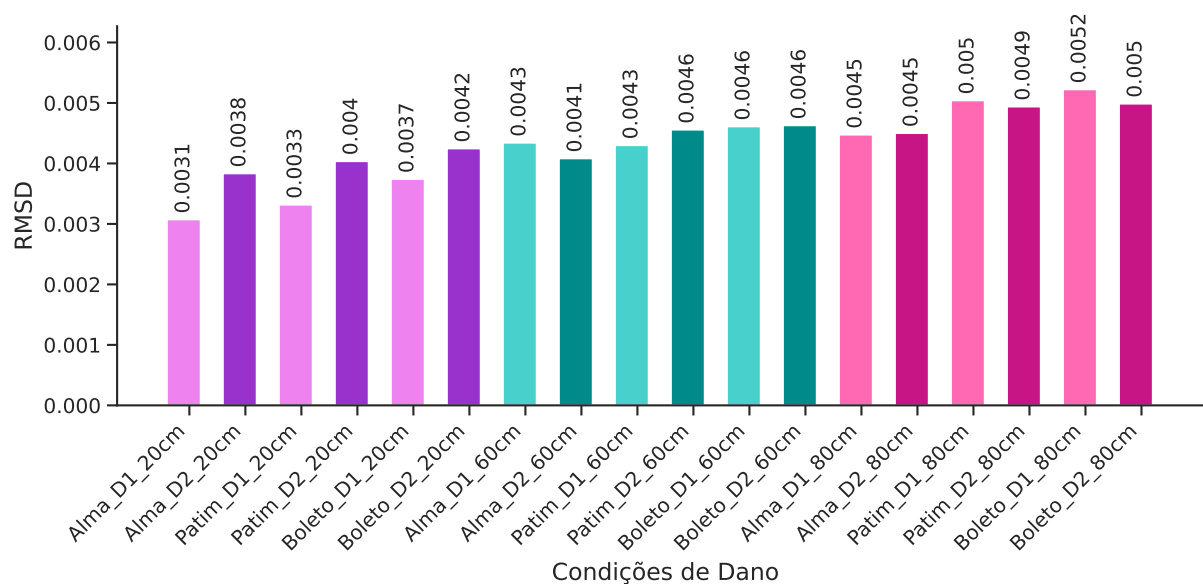
Figura 25: Valores de CCDM para diferentes condições de dano (parte real da impedância).



Fonte: Própria autora.

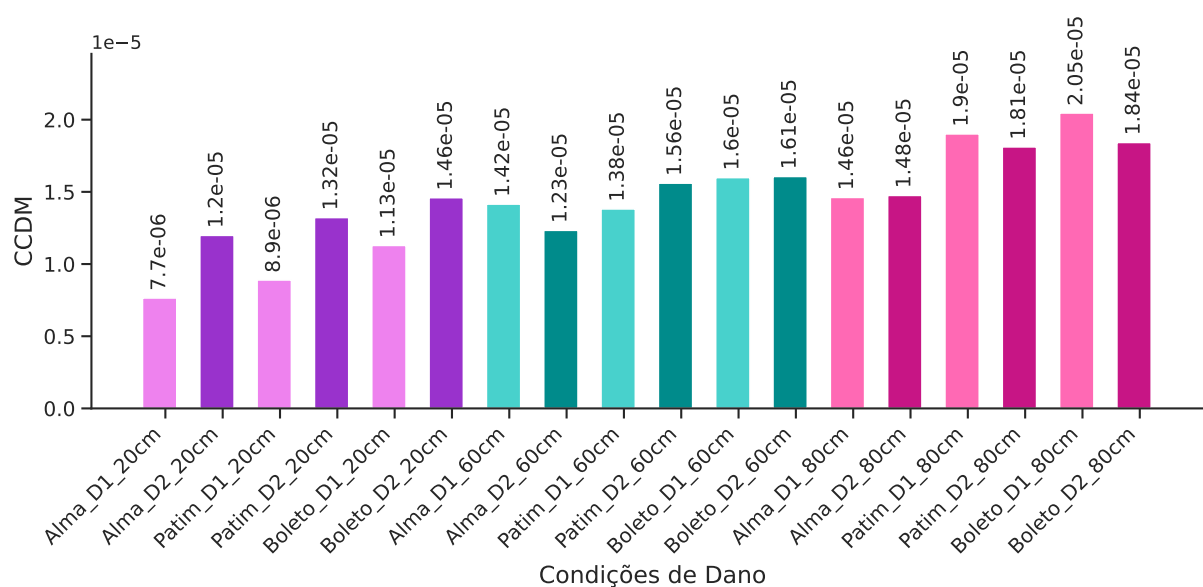
• Parte Imaginária da Impedância

Figura 26: Valores de RMSD para diferentes condições de dano (parte imaginária da impedância).



Fonte: Própria autora.

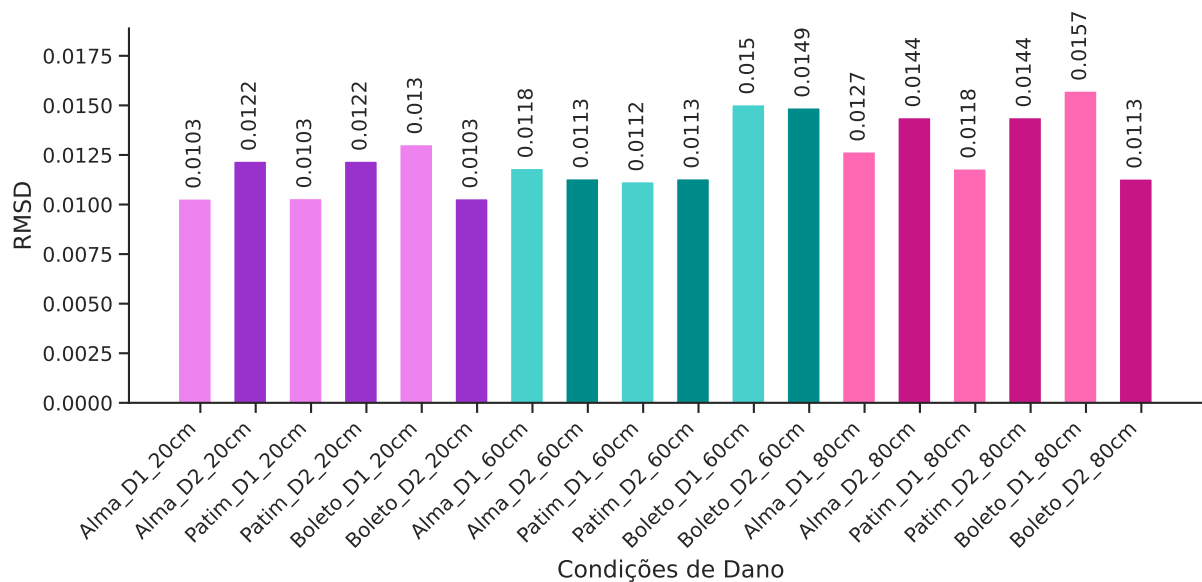
Figura 27: Valores de CCDM para diferentes condições de dano (parte imaginária da impedância).



Fonte: Própria autora.

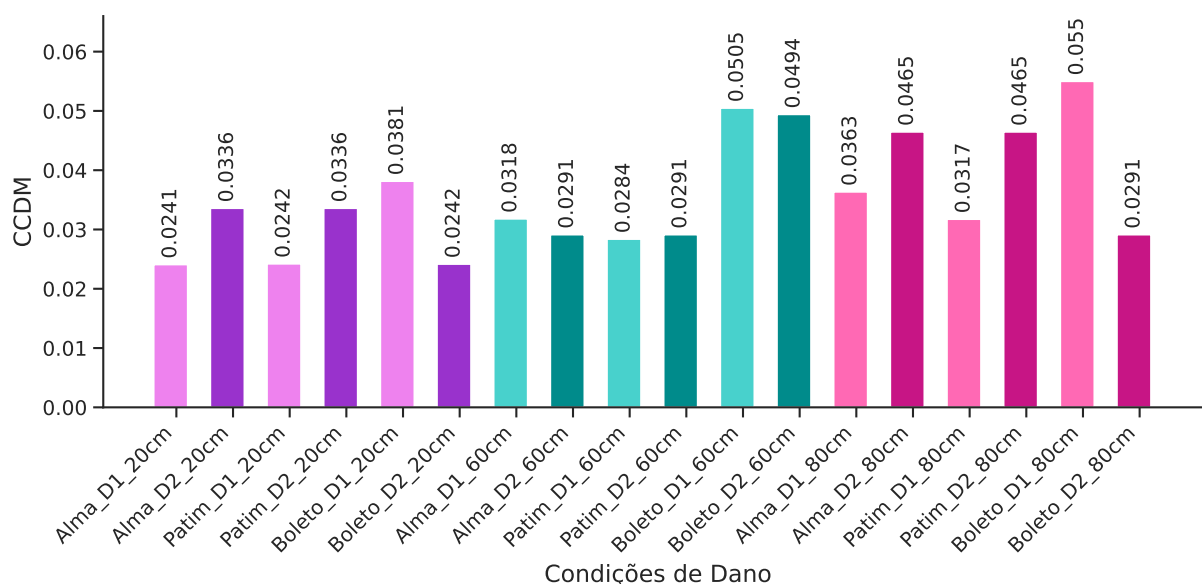
• Ângulo de Fase

Figura 28: Valores de RMSD para diferentes condições de dano (ângulo de fase).



Fonte: Própria autora.

Figura 29: Valores de CCDM para diferentes condições de dano (ângulo de fase).



Fonte: Própria autora.

A partir dos gráficos, constatou-se que os danos são melhor percebidos na parte real da impedância, sendo esta, portanto, o foco principal das discussões deste trabalho. Ainda assim, ressalta-se que as tendências observadas são praticamente

as mesmas para todas as situações, com exceção do ângulo de fase, que apresentou algumas disparidades.

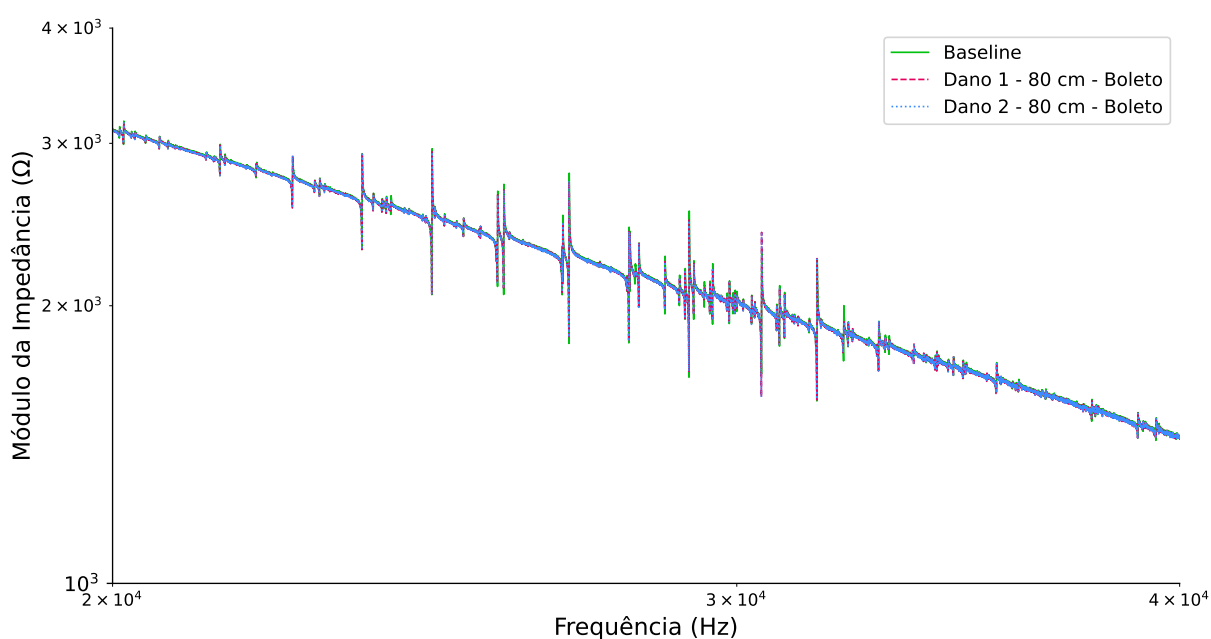
Dentre as tendências observadas tem-se que, quanto maior a distância entre o dano e o PZT, maior sua facilidade de detecção. Ademais, os danos no boleto são os que mais se destacam para todas as configurações estudadas. Desse modo, conclui-se que foi possível identificar a presença de danos, ficou sugerida uma diferenciação dos danos proporcional a sua distância, no entanto, com relação a quantificação dos danos, não foi possível observar alguma tendência nos dados.

3.1.1 Análise da Faixa de Frequência entre 20 kHz e 40 kHz

Considerando o trabalho de Ryue et al. (2009), verificou-se que a faixa de frequência mais eficaz para a propagação de ondas ao longo dos trilhos ferroviários é entre 20 kHz e 40 kHz, podendo variar de acordo com o local e as condições dos trilhos e dos trens. Desse modo, nas Figuras 30 a 41 são apresentadas as curvas do módulo, parte real, parte imaginária e ângulo de fase da impedância para os danos no boleto, a 80 cm do PZT, além dos gráficos de RMSD e CCDM obtidos para essa faixa de frequência, com danos tipo 1 e 2 localizados a 20, 60 e 80 cm do PZT.

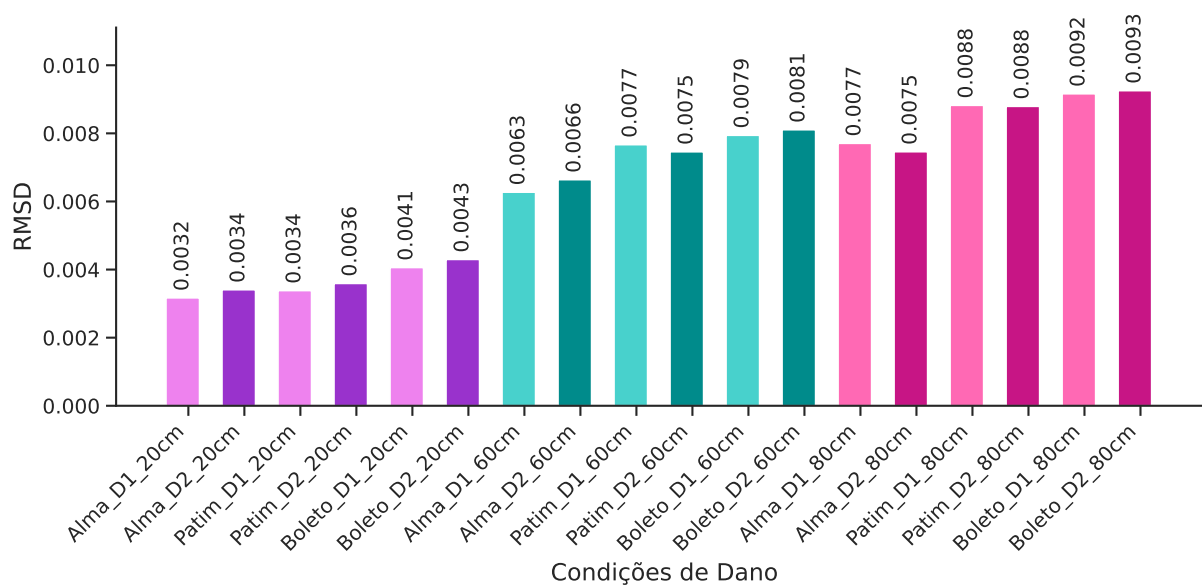
• Módulo da Impedância

Figura 30: Danos no boleto a 80 cm do PZT (módulo da impedância).



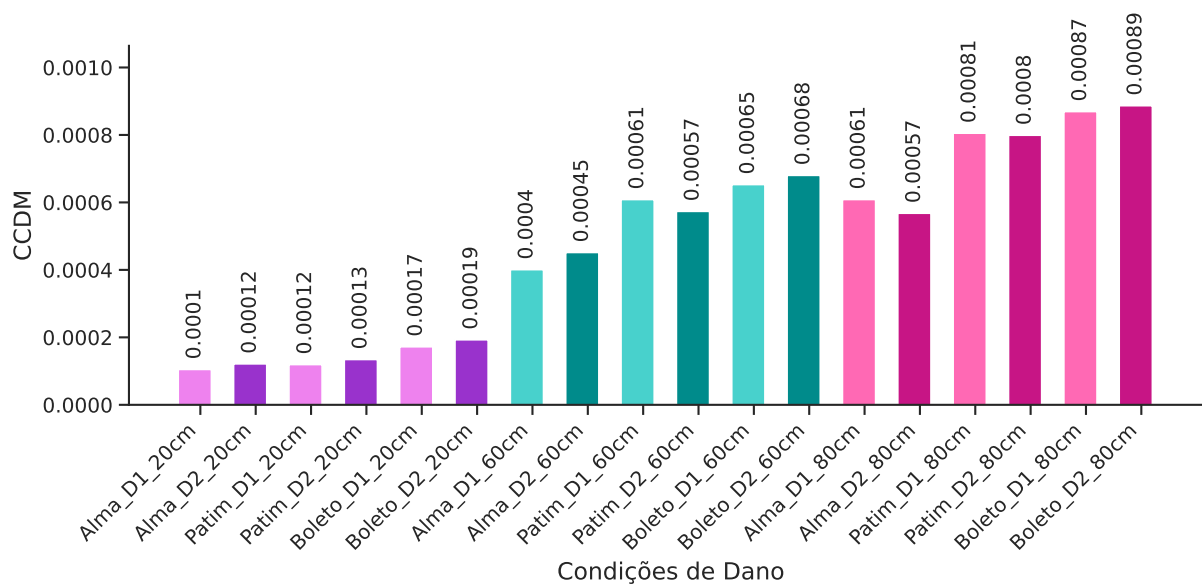
Fonte: Própria autora.

Figura 31: Valores de RMSD para diferentes condições de dano (módulo da impedância).



Fonte: Própria autora.

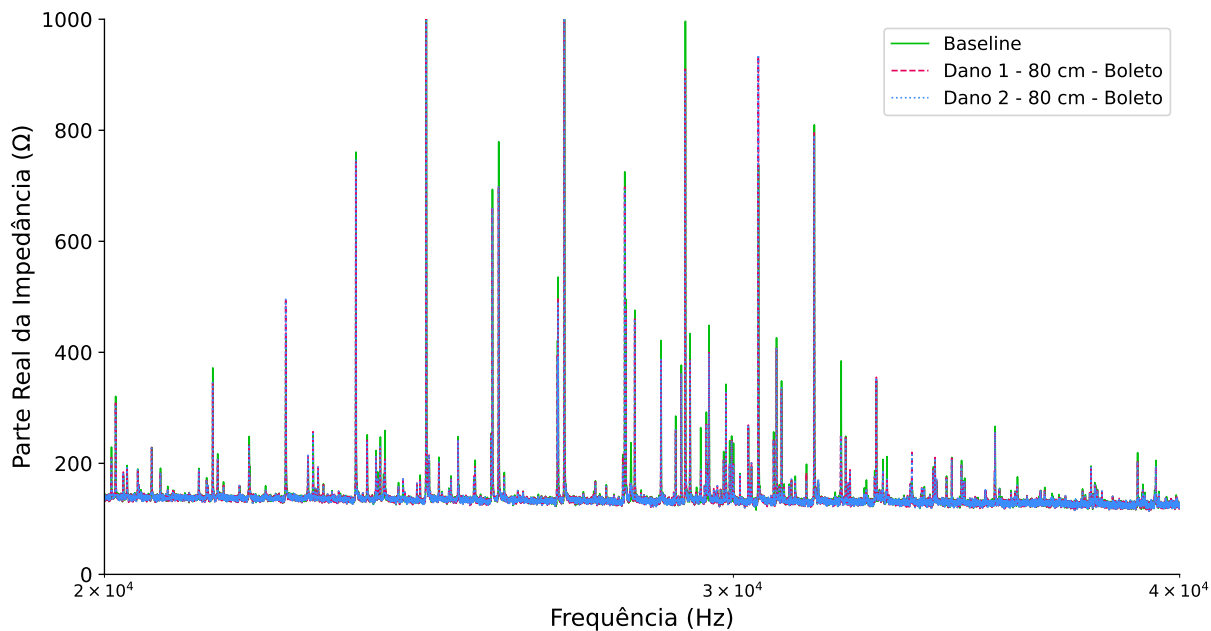
Figura 32: Valores de CCDM para diferentes condições de dano (módulo da impedância).



Fonte: Própria autora.

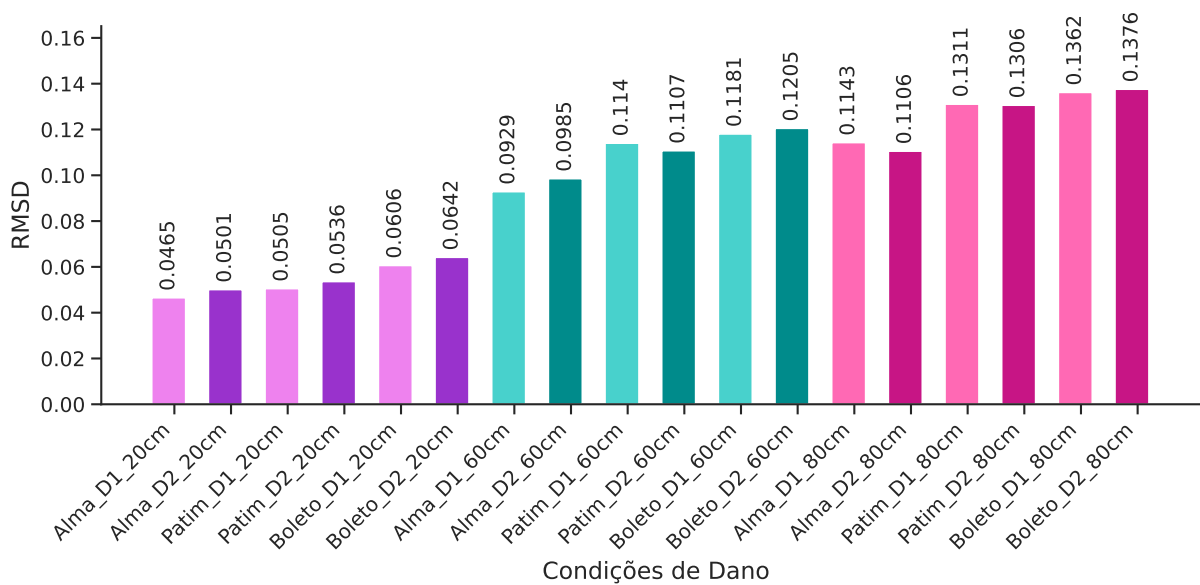
• Parte Real da Impedância

Figura 33: Danos no boleto a 80 cm do PZT (parte real da impedância).



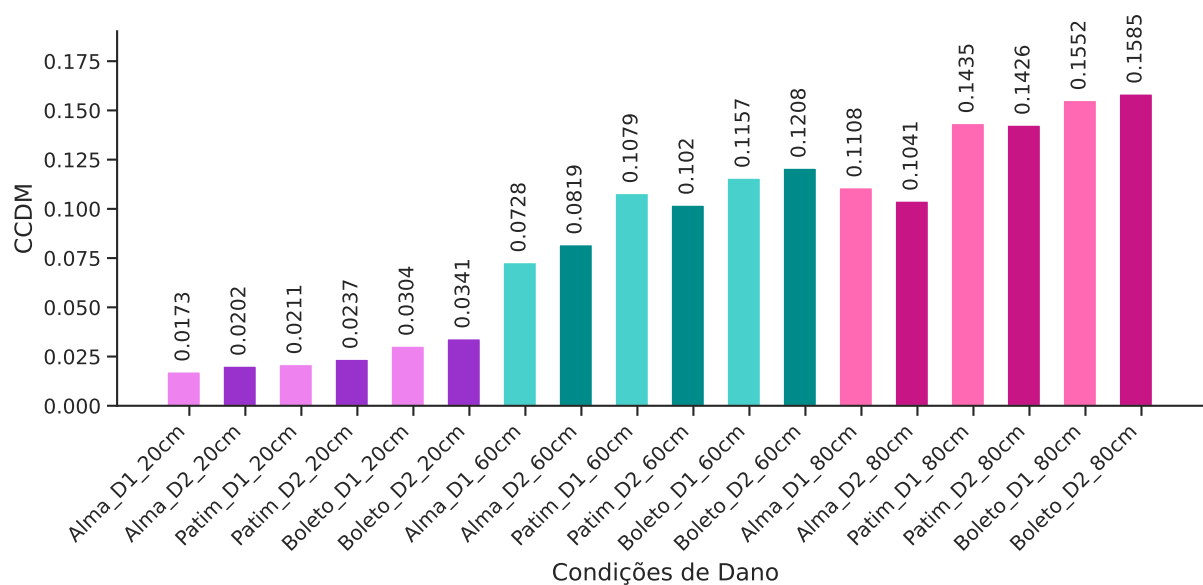
Fonte: Própria autora.

Figura 34: Valores de RMSD para diferentes condições de dano (parte real da impedância).



Fonte: Própria autora.

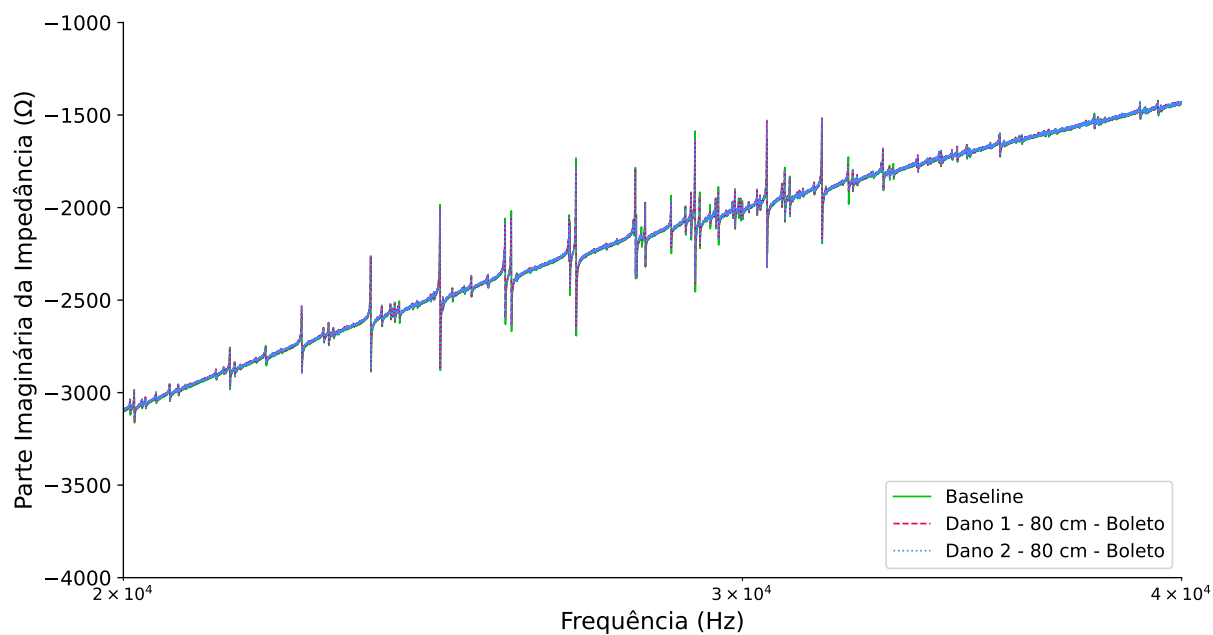
Figura 35: Valores de CCDM para diferentes condições de dano (parte real da impedância).



Fonte: Própria autora.

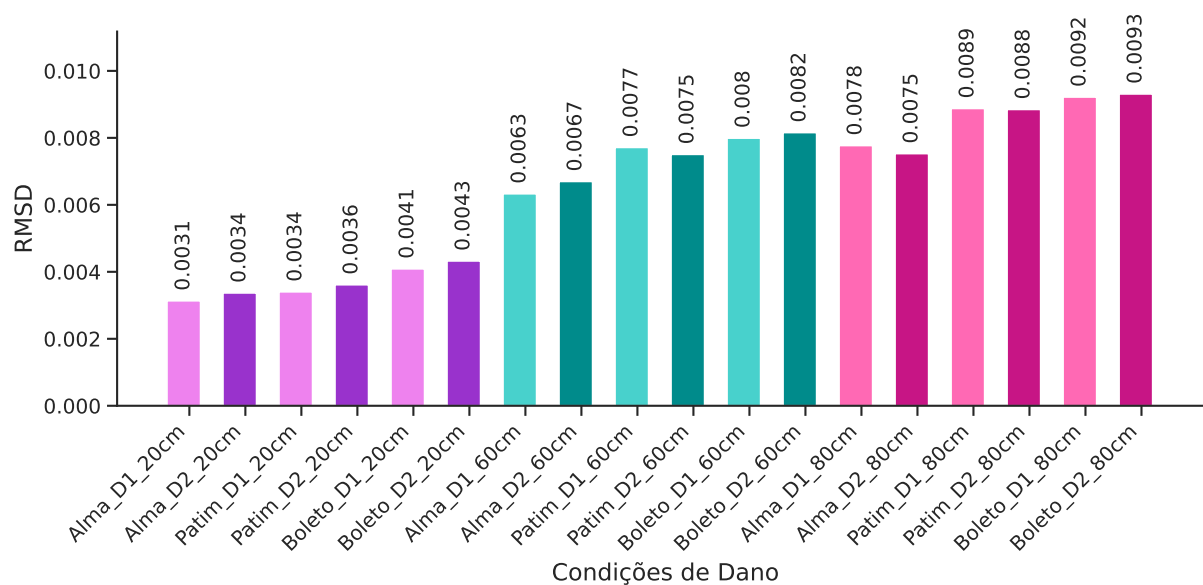
• Parte Imaginária da Impedância

Figura 36: Danos no boleto a 80 cm do PZT (parte imaginária da impedância).



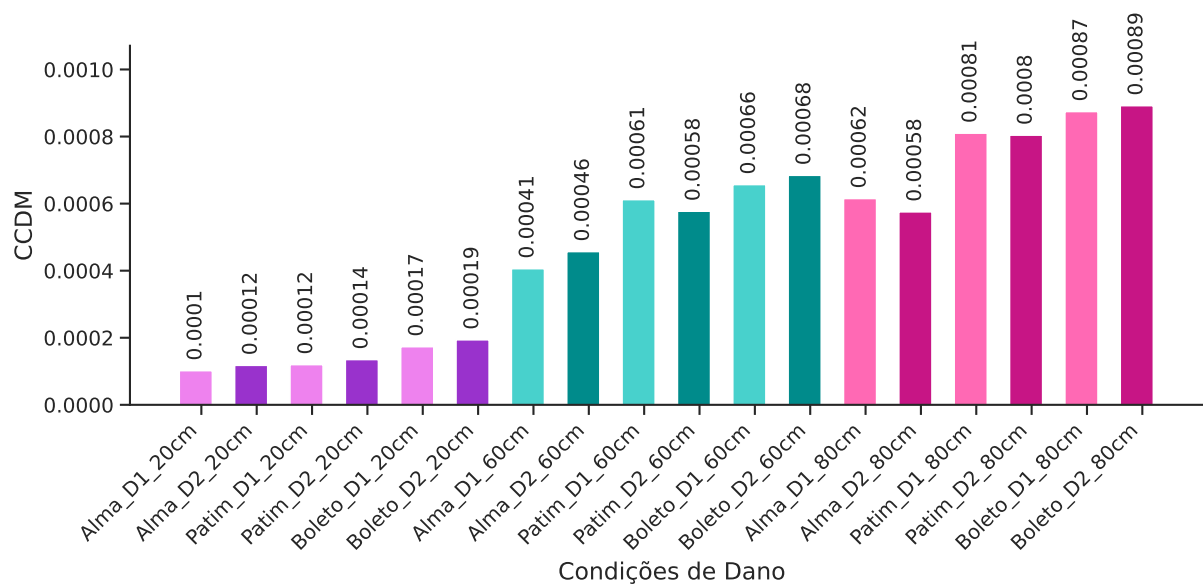
Fonte: Própria autora.

Figura 37: Valores de RMSD para diferentes condições de dano (parte imaginária da impedância).



Fonte: Própria autora.

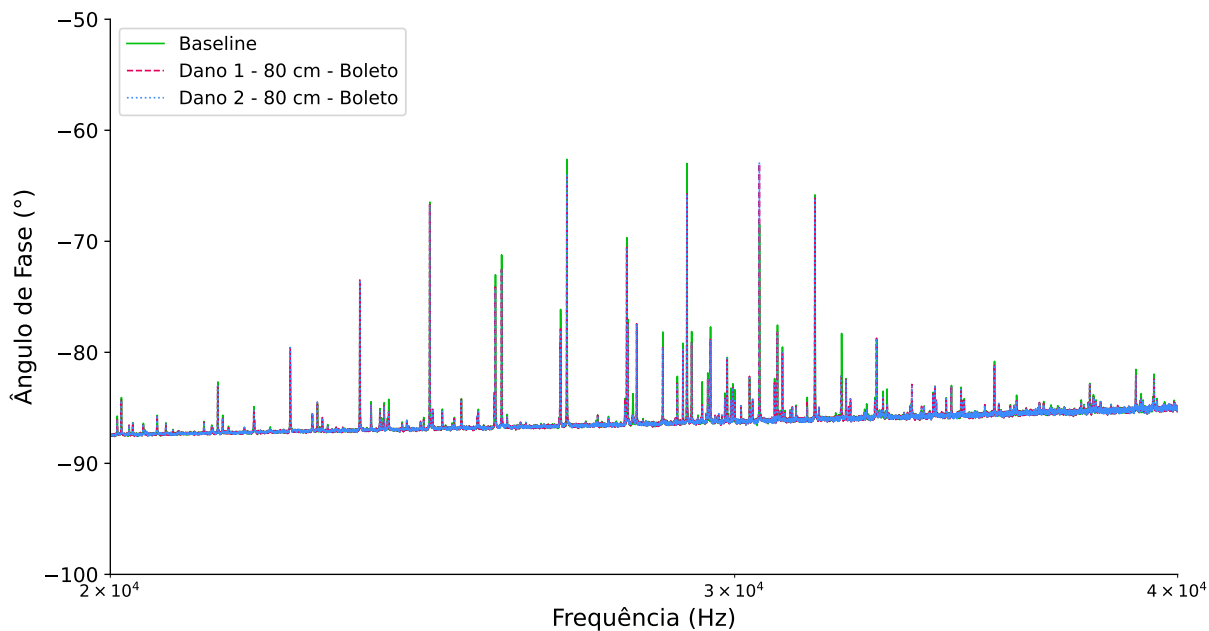
Figura 38: Valores de CCDM para diferentes condições de dano (parte imaginária da impedância).



Fonte: Própria autora.

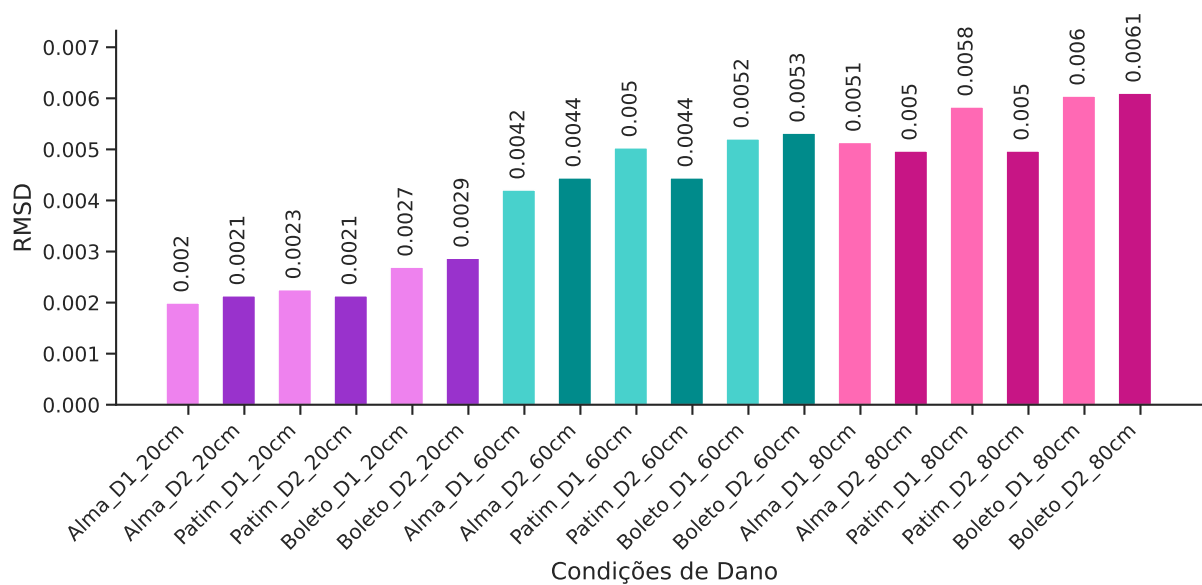
• Ângulo de Fase

Figura 39: Danos no boleto a 80 cm do PZT (ângulo de fase).



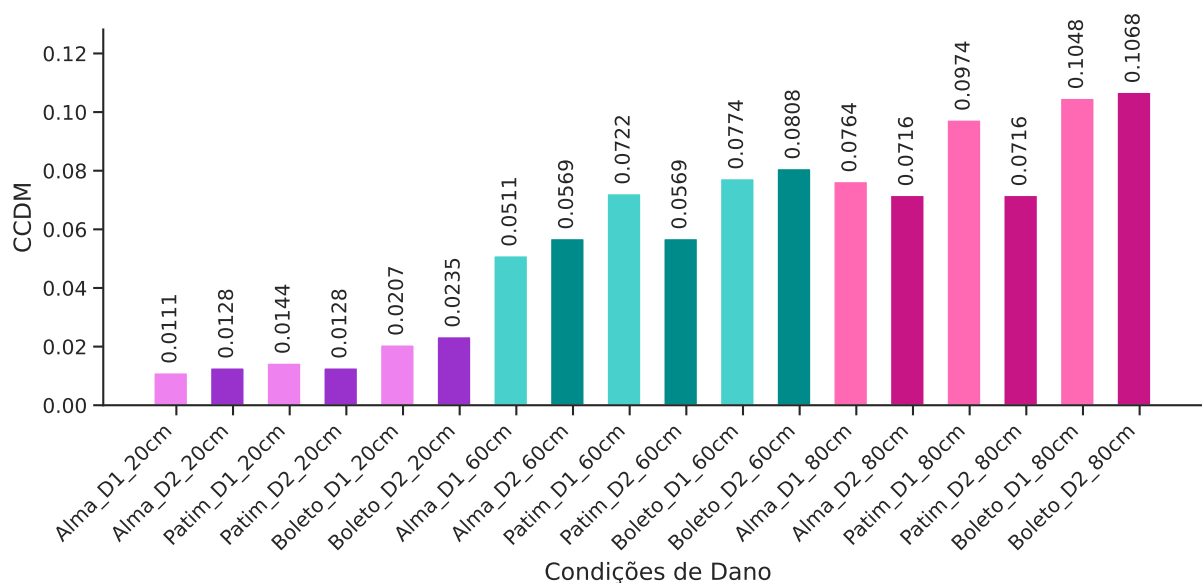
Fonte: Própria autora.

Figura 40: Valores de RMSD para diferentes condições de dano (ângulo de fase).



Fonte: Própria autora.

Figura 41: Valores de CCDM para diferentes condições de dano (ângulo de fase).



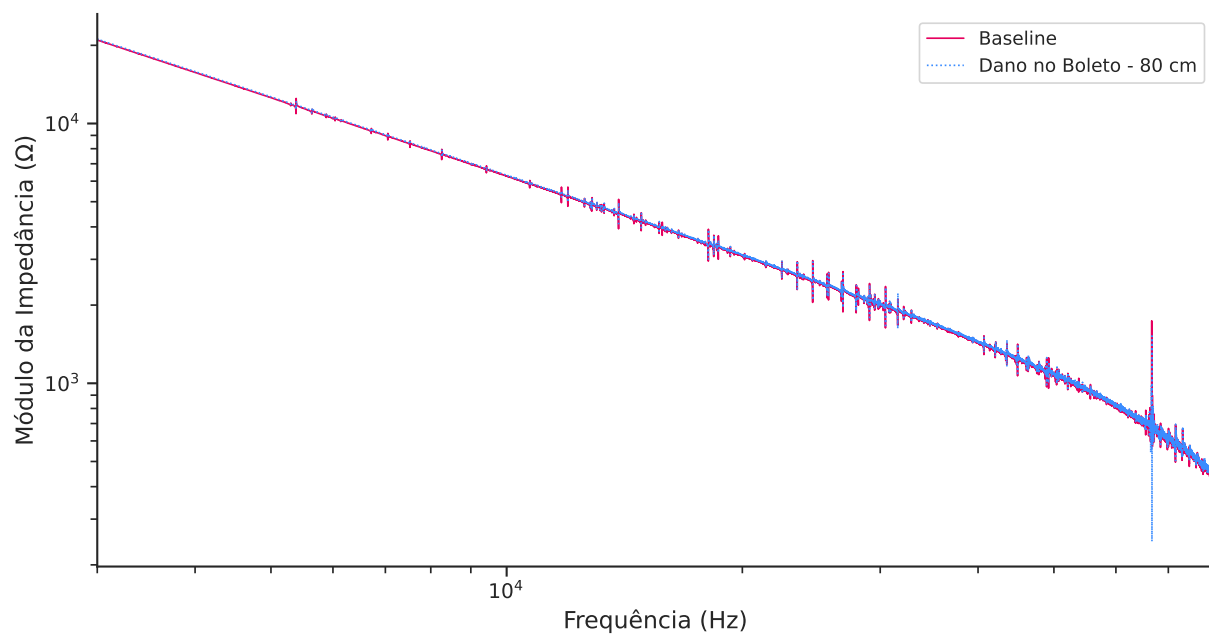
Fonte: Própria autora.

Nota-se que as tendências comportamentais obtidas para a nova faixa de frequência se mantêm as mesmas quando comparadas a faixa completa evidenciada no Item 3.1 (3 kHz a 80 kHz), porém, com maiores valores para os índices RMSD e CCDM. Assim, é possível concluir que nessa faixa de frequência entre 20 kHz e 40 kHz, os danos são mais facilmente detectados, já que quanto maiores os índices, mais se diferenciam as curvas sem dano e com dano. Além disso, observa-se também que a distinção entre as distâncias foi intensificada, indicando novas sugestões para a localização dos danos no trilho.

3.2 Danos Simulados com Massa Adesiva

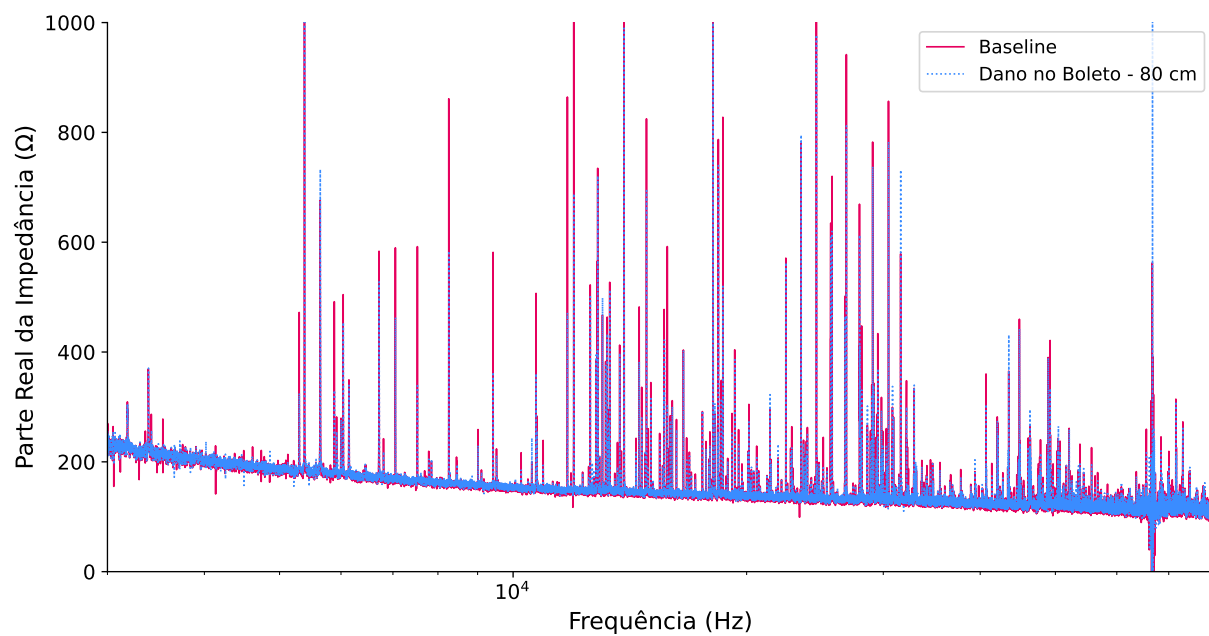
As massas adesivas foram fixadas na alma, patim e boleto do trilho, conforme descrito no Item 2.1.1, a distâncias de 20, 65 e 80 cm do PZT. Os comparativos entre a baseline e a curva com dano no boleto a 80 cm do PZT para o módulo, parte real, parte imaginária e ângulo de fase da impedância são apresentados nas Figuras 42 a 45, para a faixa de frequência variando entre 3 kHz e 80 kHz.

Figura 42: Danos no boleto a 80 cm do PZT (módulo da impedância).



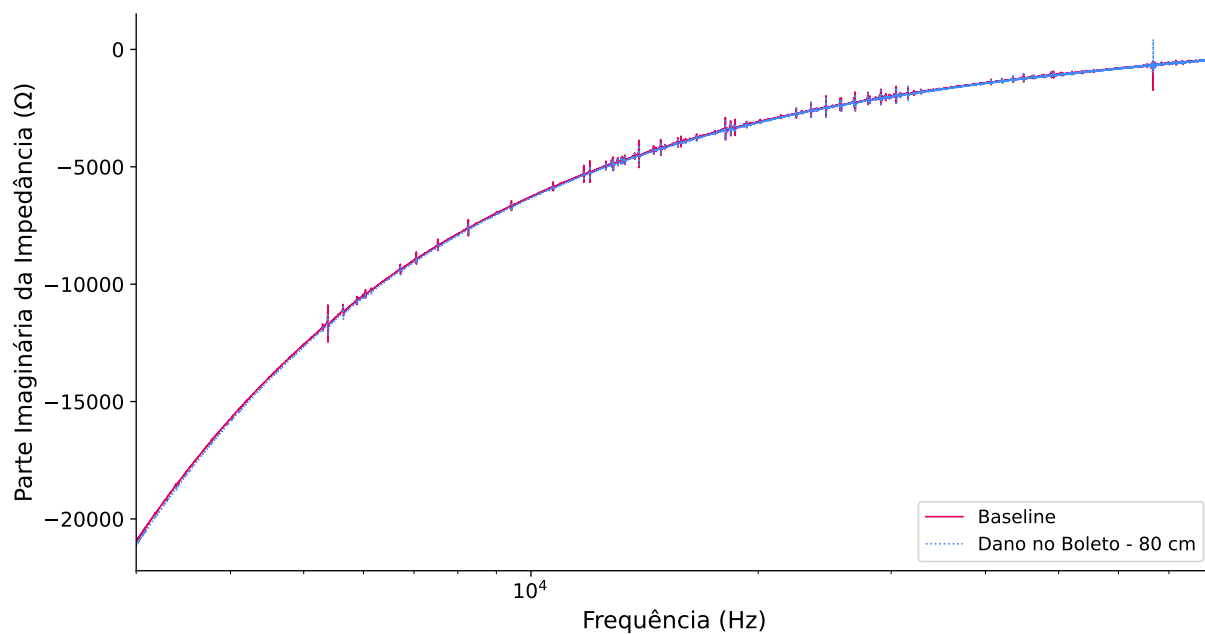
Fonte: Própria autora.

Figura 43: Danos no boleto a 80 cm do PZT (parte real da impedância).



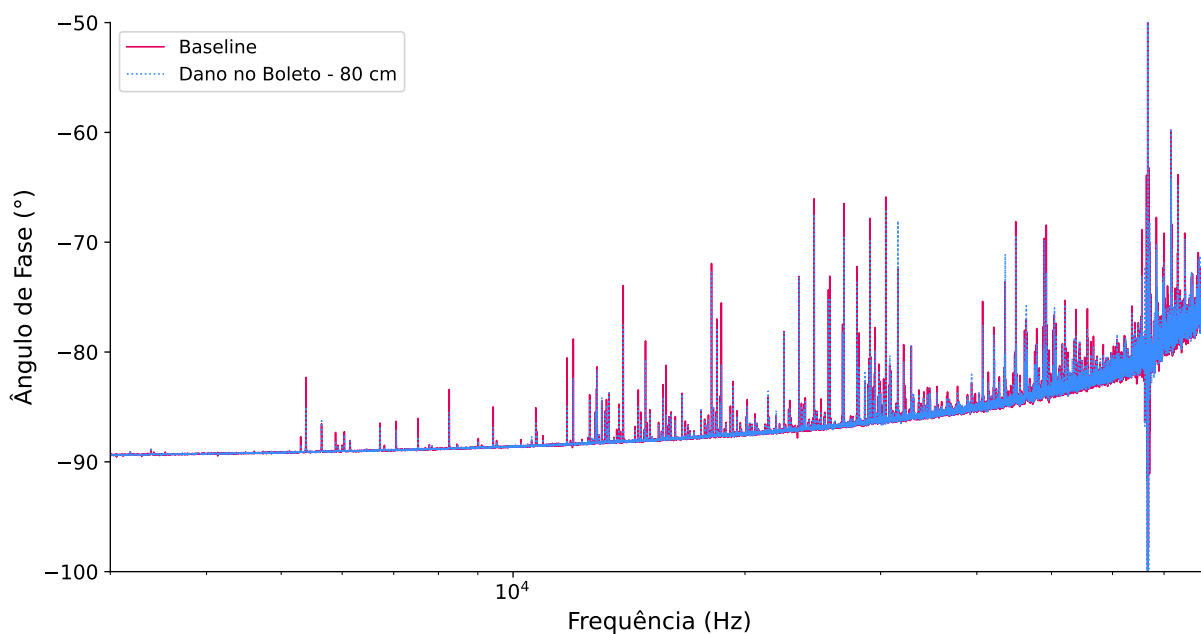
Fonte: Própria autora.

Figura 44: Danos no boleto a 80 cm do PZT (parte imaginária da impedância).



Fonte: Própria autora.

Figura 45: Danos no boleto a 80 cm do PZT (ângulo de fase).

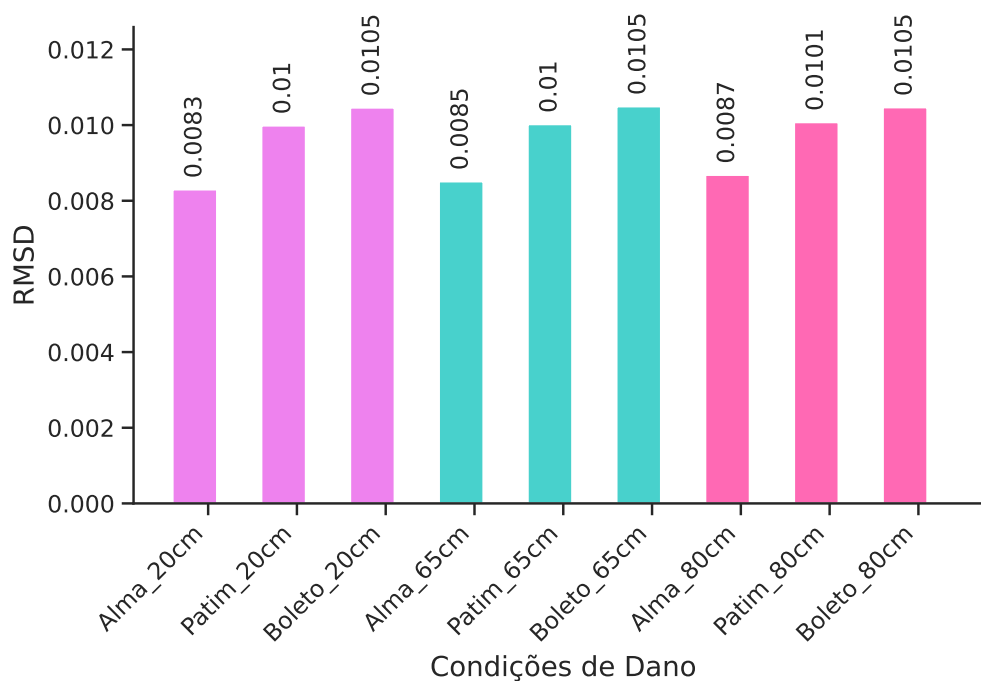


Fonte: Própria autora.

Novamente, a caracterização foi realizada a partir do cálculo dos índices RMSD e CCDM, estando estes evidenciados nas Figuras 46 a 53.

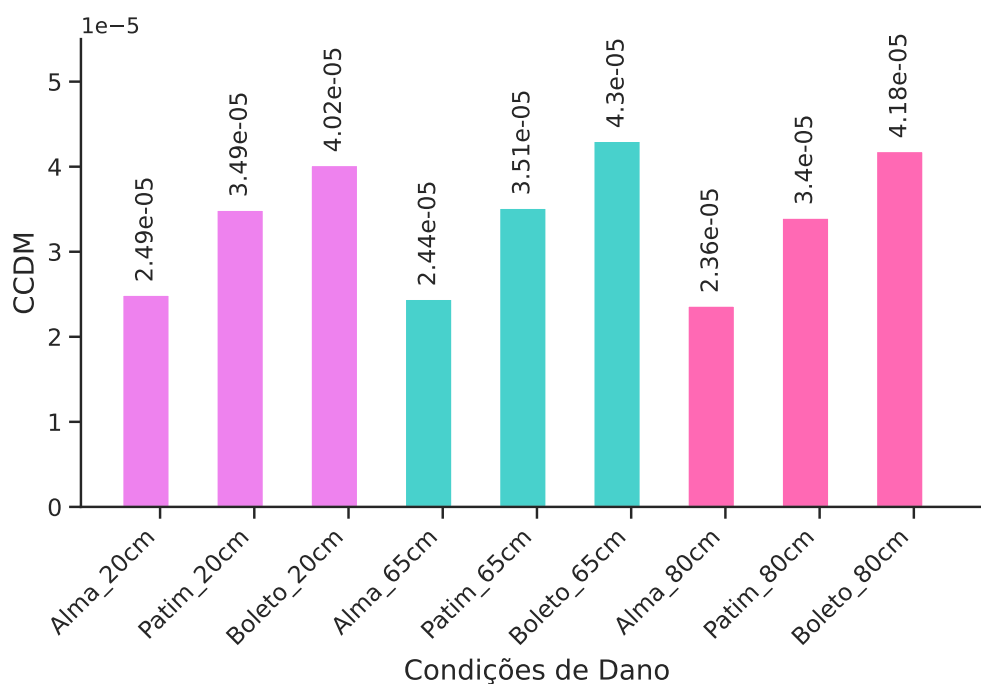
• Módulo da Impedância

Figura 46: Valores de RMSD para diferentes condições de dano (módulo da impedância).



Fonte: Própria autora.

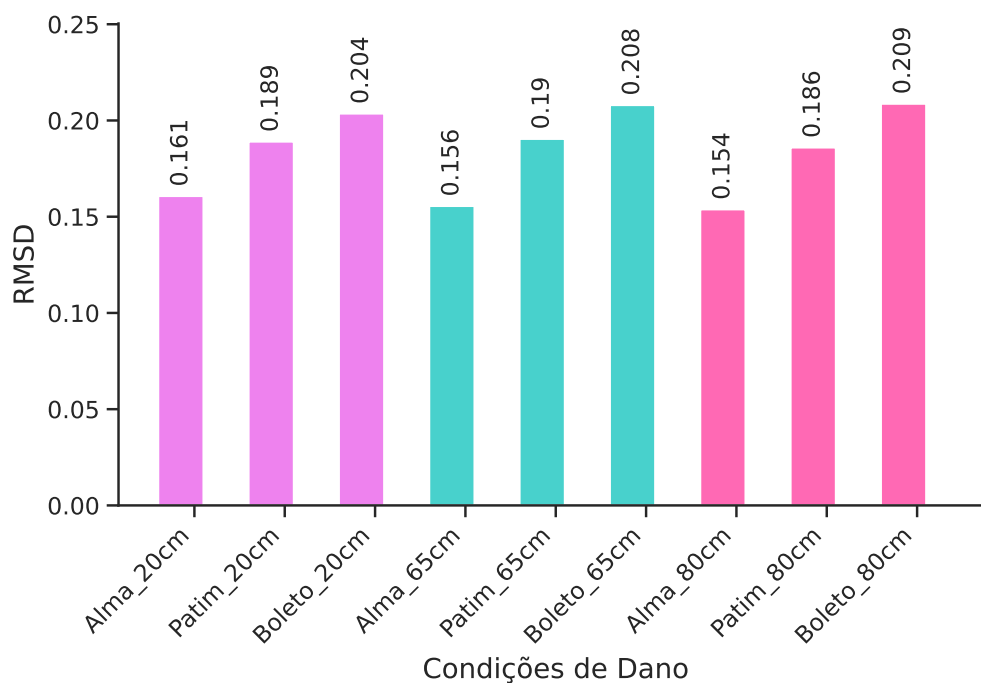
Figura 47: Valores de CCDM para diferentes condições de dano (módulo da impedância).



Fonte: Própria autora.

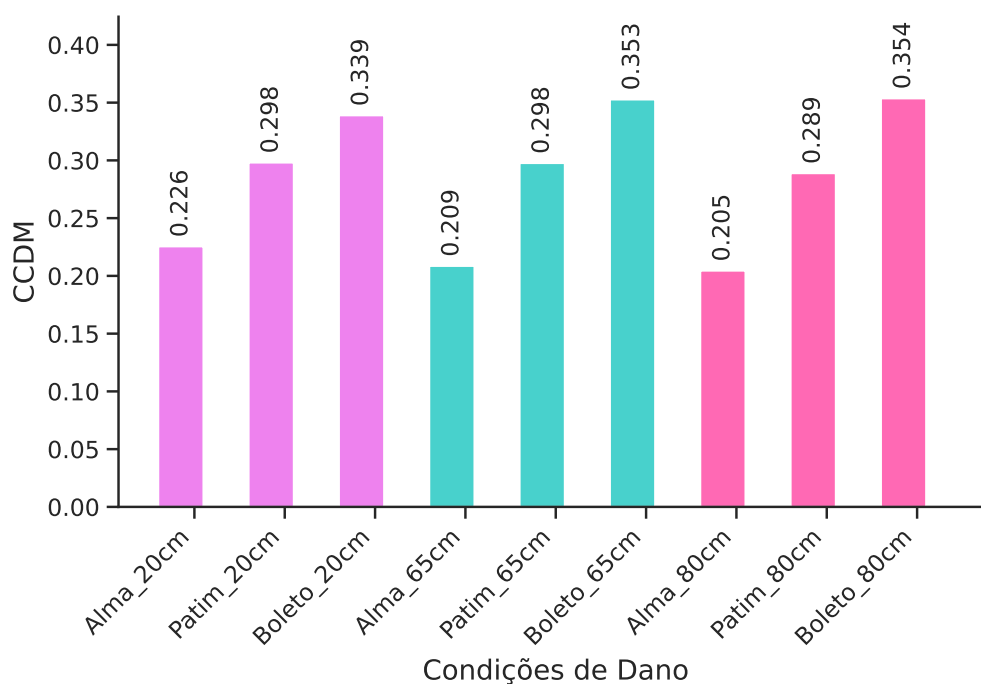
• Parte Real da Impedância

Figura 48: Valores de RMSD para diferentes condições de dano (parte real da impedância).



Fonte: Própria autora.

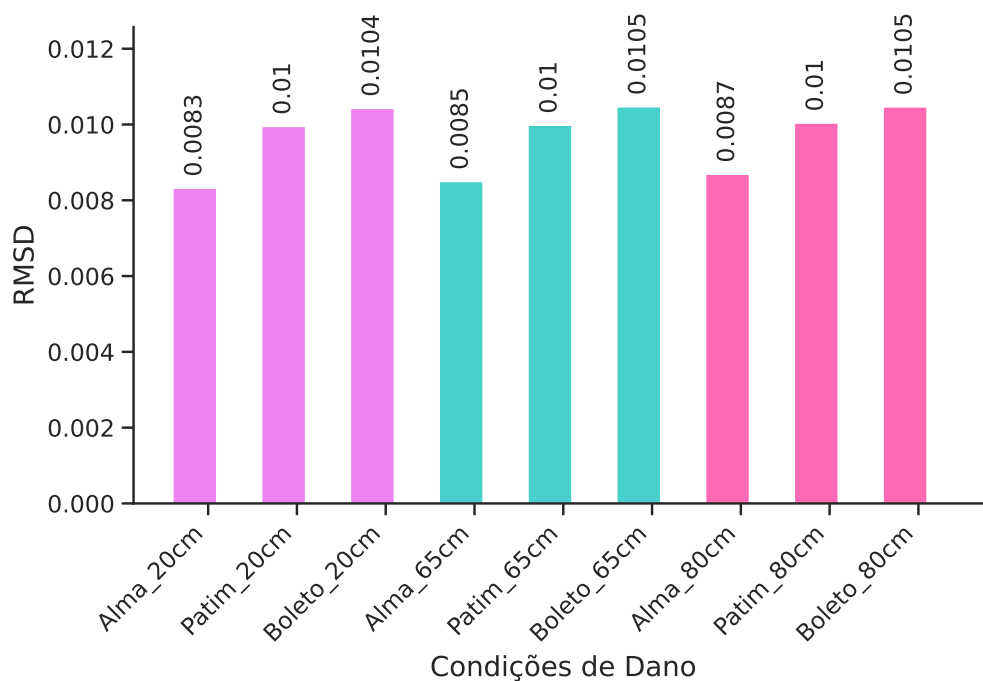
Figura 49: Valores de CCDM para diferentes condições de dano (parte real da impedância).



Fonte: Própria autora.

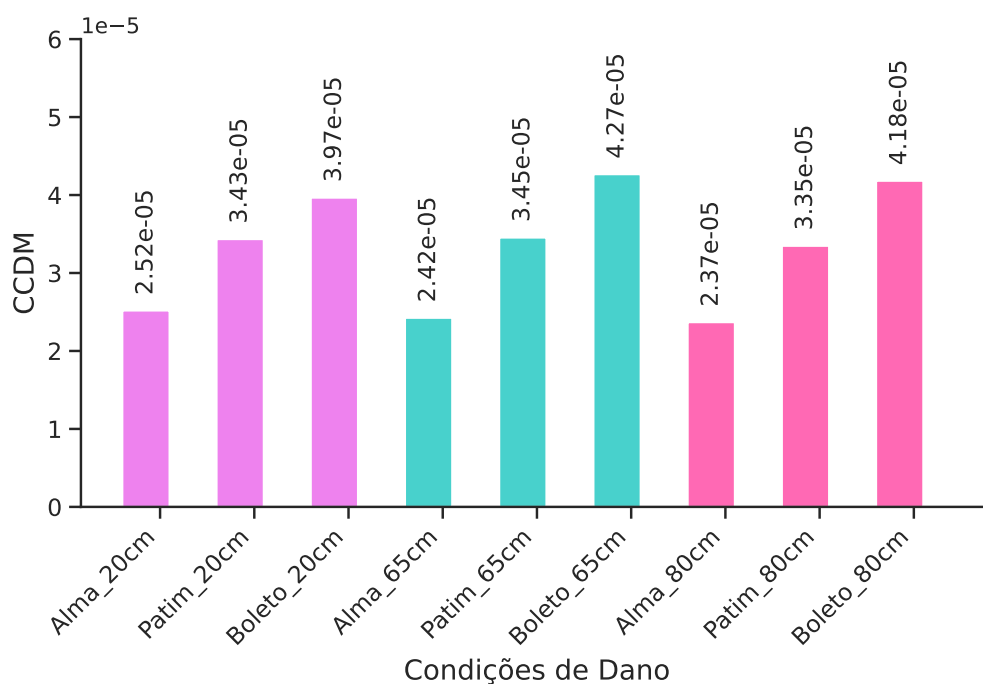
• Parte Imaginária da Impedância

Figura 50: Valores de RMSD para diferentes condições de dano (parte imaginária da impedância).



Fonte: Própria autora.

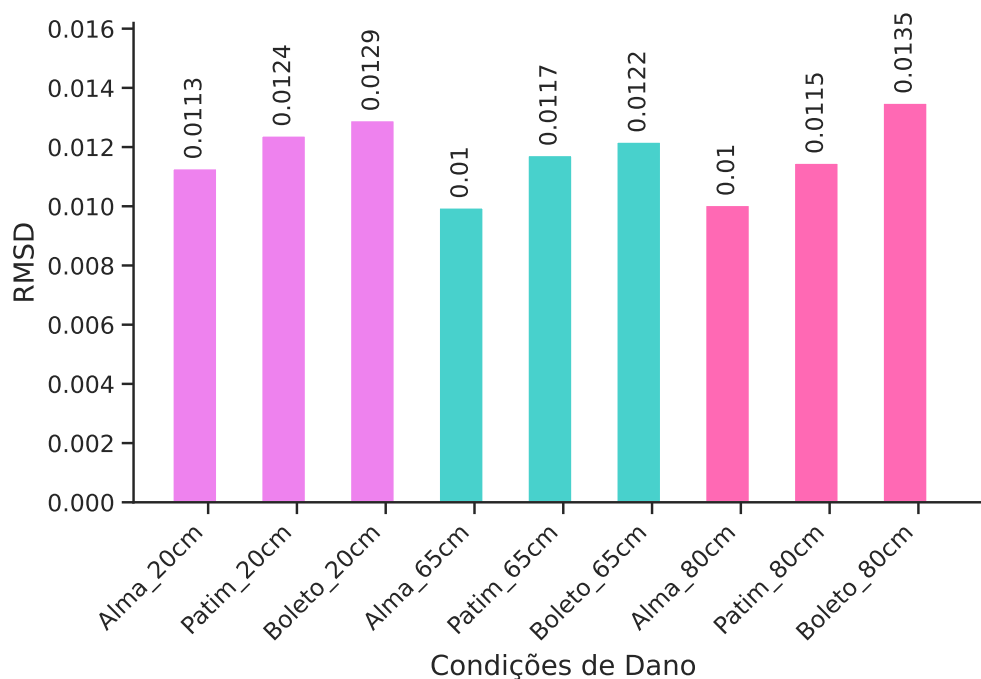
Figura 51: Valores de CCDM para diferentes condições de dano (parte imaginária da impedância).



Fonte: Própria autora.

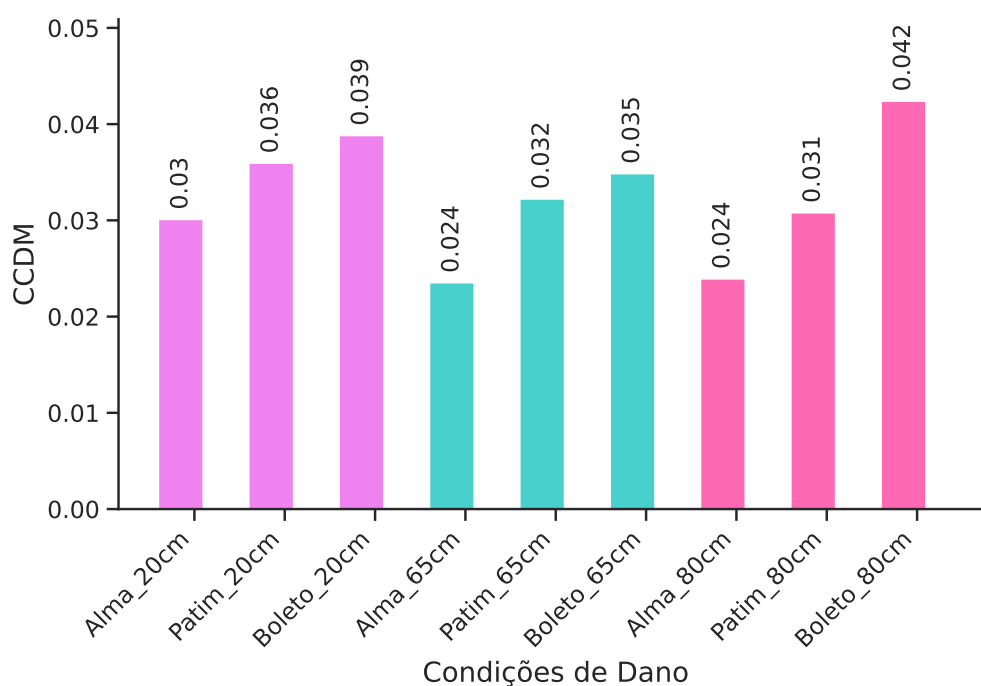
- **Ângulo de Fase**

Figura 52: Valores de RMSD para diferentes condições de dano (ângulo de fase).



Fonte: Própria autora.

Figura 53: Valores de CCDM para diferentes condições de dano (ângulo de fase).



Fonte: Própria autora.

Mais uma vez nota-se que os danos são melhor percebidos ao se analisar a parte real da impedância. Ainda assim, as tendências observadas são praticamente as mesmas para todas as situações estudadas. No caso do dano simulado utilizando a massa adesiva, foi possível detectar todos os danos, porém, pelos índices RMSD e CCDM observados, identificar uma proporcionalidade nos índices sugerindo correspondente localização de danos ainda não é viável, considerando que os valores exibem variações mínimas em função da distância.

Ademais, verificou-se que, novamente, o boleto é a região do trilho onde os índices são maiores para as mesmas configurações de dano. Portanto, pode-se dizer que os danos no boleto foram mais facilmente identificados que os danos na alma e no patim.

3.2.1 Análise da Faixa de Frequência entre 20 kHz e 40 kHz

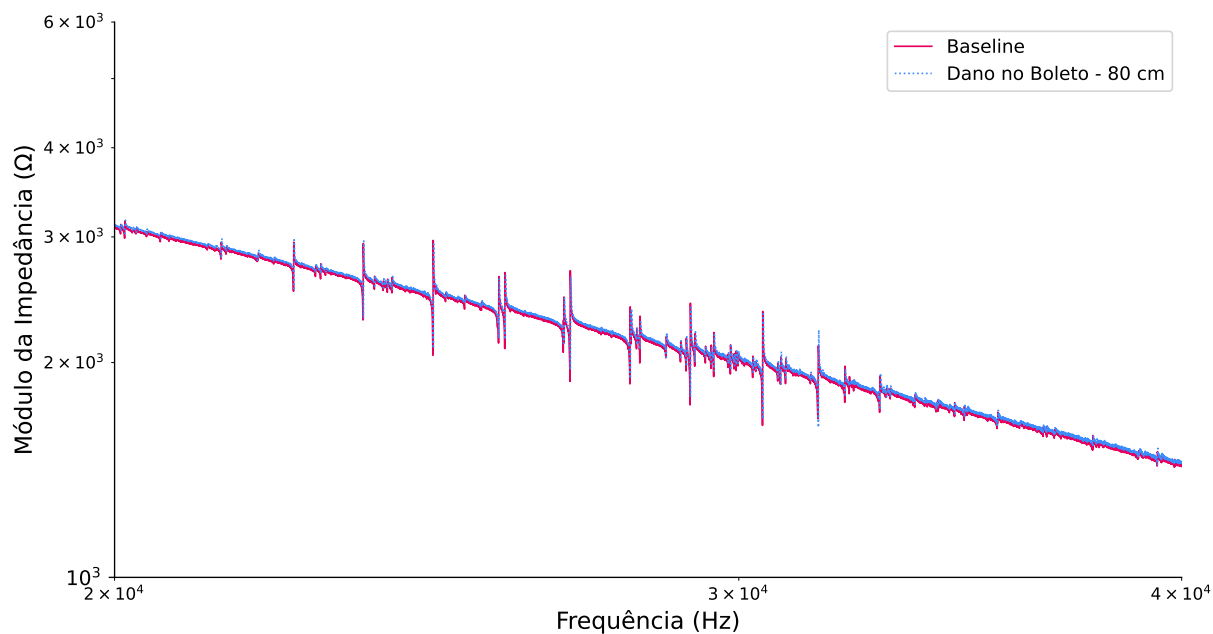
Para a faixa de frequência definida por Ryue et al. (2009) como a mais eficaz para a propagação de ondas ao longo dos trilhos ferroviários, podendo variar de acordo com o local e as condições dos trilhos e dos trens, as Figuras 54 a 65 evidenciam as curvas de módulo, parte real, parte imaginária e ângulo de fase da impedância para os danos no boleto, a 80 cm do PZT, além dos gráficos de RMSD e CCDM com danos localizados a 20, 65 e 80 cm do PZT, para a faixa de frequência variando entre 20 kHz e 40 kHz.

As tendências comportamentais verificadas para a nova faixa de frequência permaneceram as mesmas: os danos são detectados, mas não existem grandes disparidades em função da distância, não sendo possível a localização dos danos ao longo da extensão do trilho. Observou-se ainda que os índices RMSD e CCDM, assim como para os testes com ímã, apresentaram valores maiores para a faixa de frequência de 20 a 40 kHz quando comparados a faixa completa de 3 a 80 kHz, revelando que os danos são mais facilmente detectados na faixa estabelecida no trabalho de Ryue et al. (2009).

Por fim, destaca-se que, para essa faixa específica de frequência foram observados valores significativos de CCDM relacionados ao ângulo de fase (Figura 65), valores estes que não se manifestaram ao se considerar a faixa completa de frequência, merecendo, portanto, especial atenção.

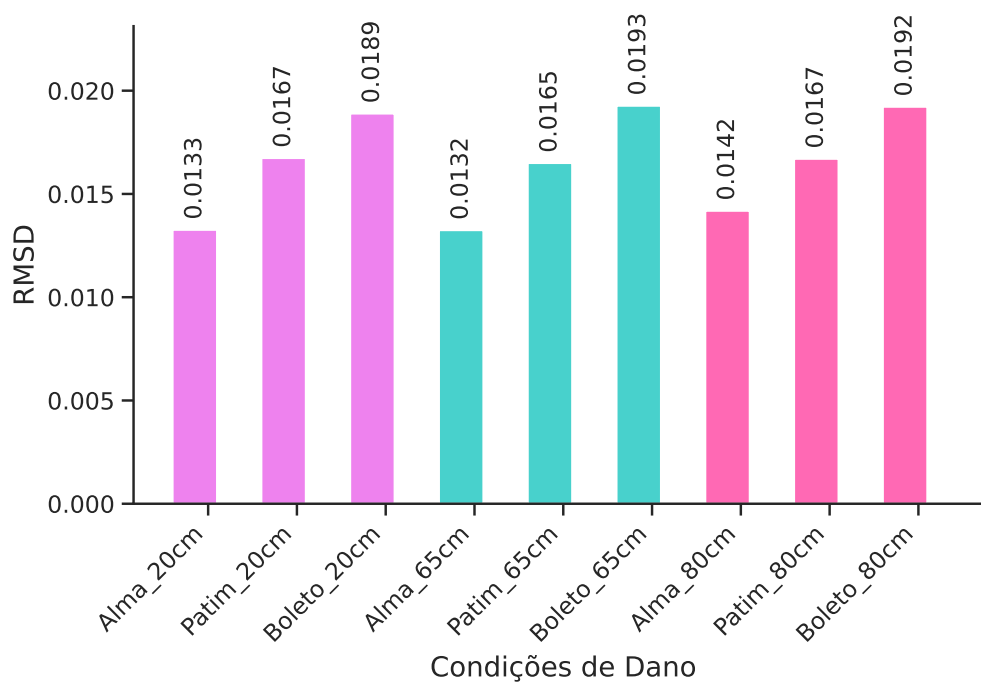
• Módulo da Impedância

Figura 54: Danos no boleto a 80 cm do PZT (módulo da impedância).



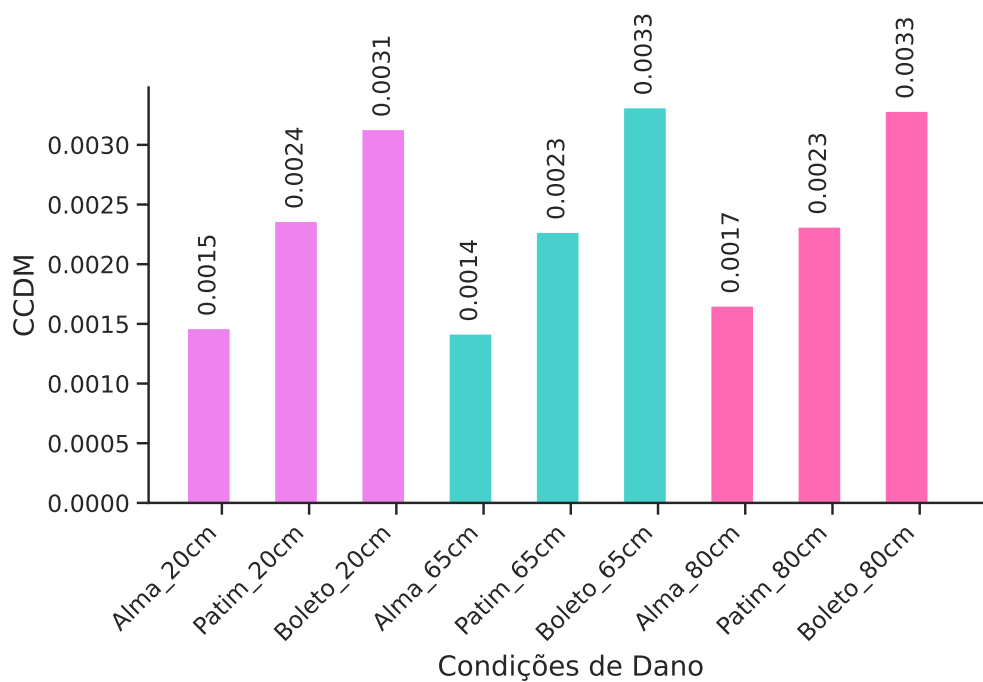
Fonte: Própria autora.

Figura 55: Valores de RMSD para diferentes condições de dano (módulo da impedância).



Fonte: Própria autora.

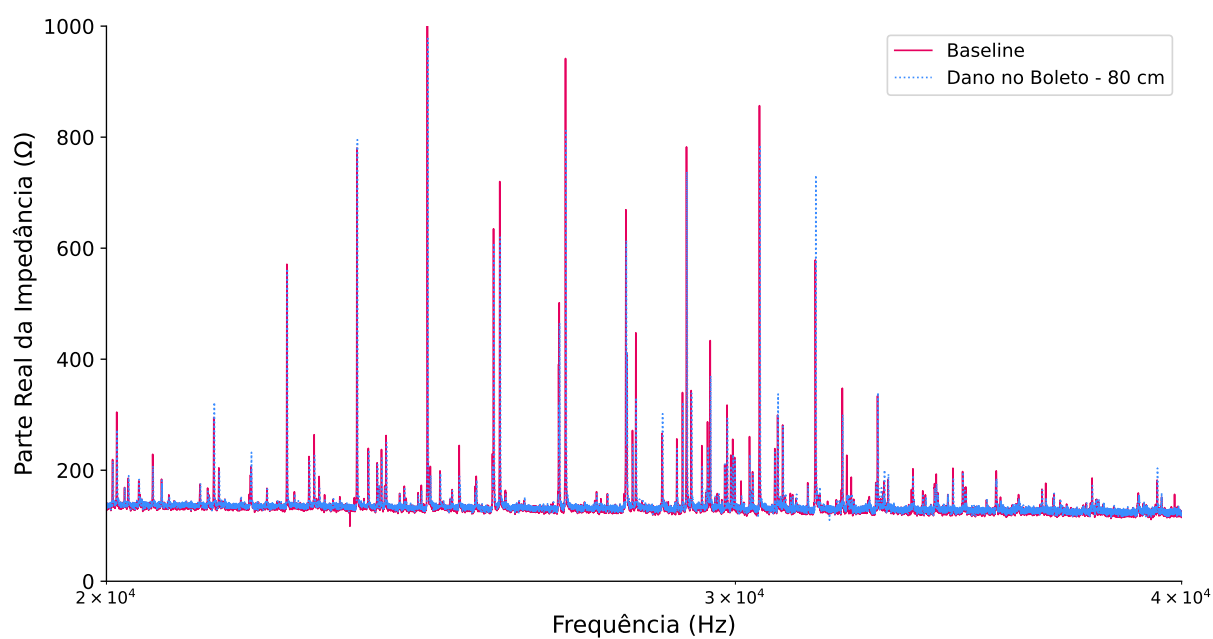
Figura 56: Valores de CCDM para diferentes condições de dano (módulo da impedância).



Fonte: Própria autora.

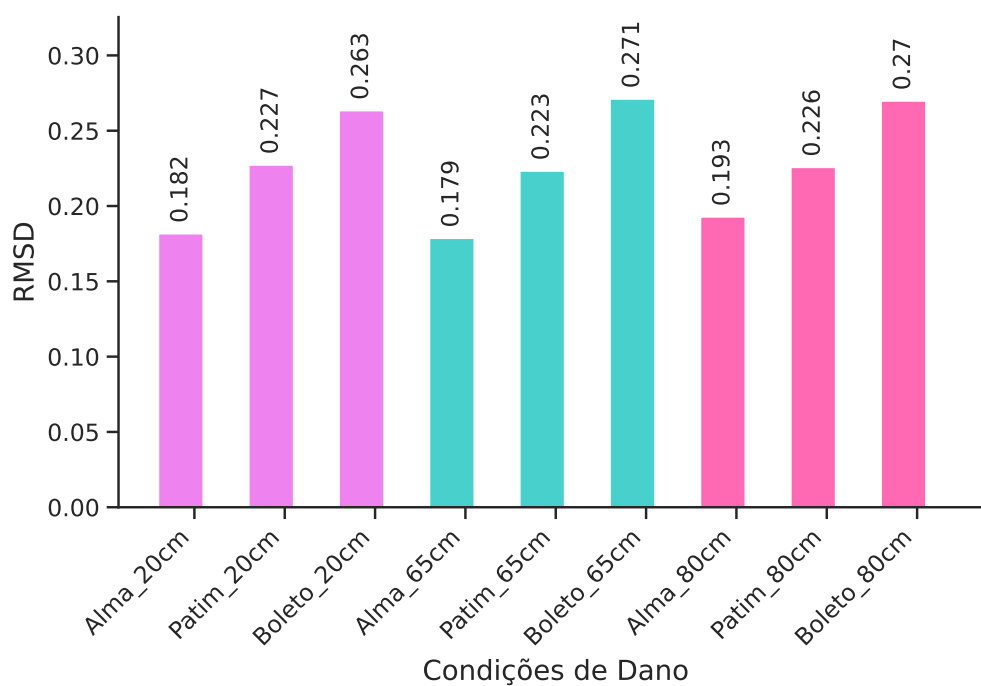
• Parte Real da Impedância

Figura 57: Danos no boleto a 80 cm do PZT (parte real da impedância).



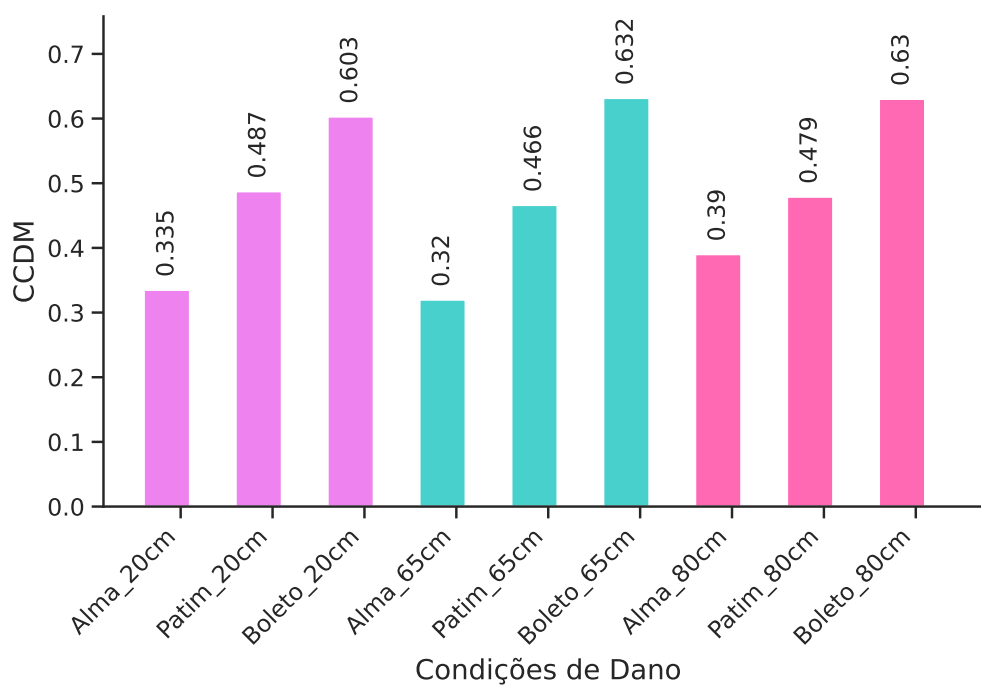
Fonte: Própria autora.

Figura 58: Valores de RMSD para diferentes condições de dano (parte real da impedância).



Fonte: Própria autora.

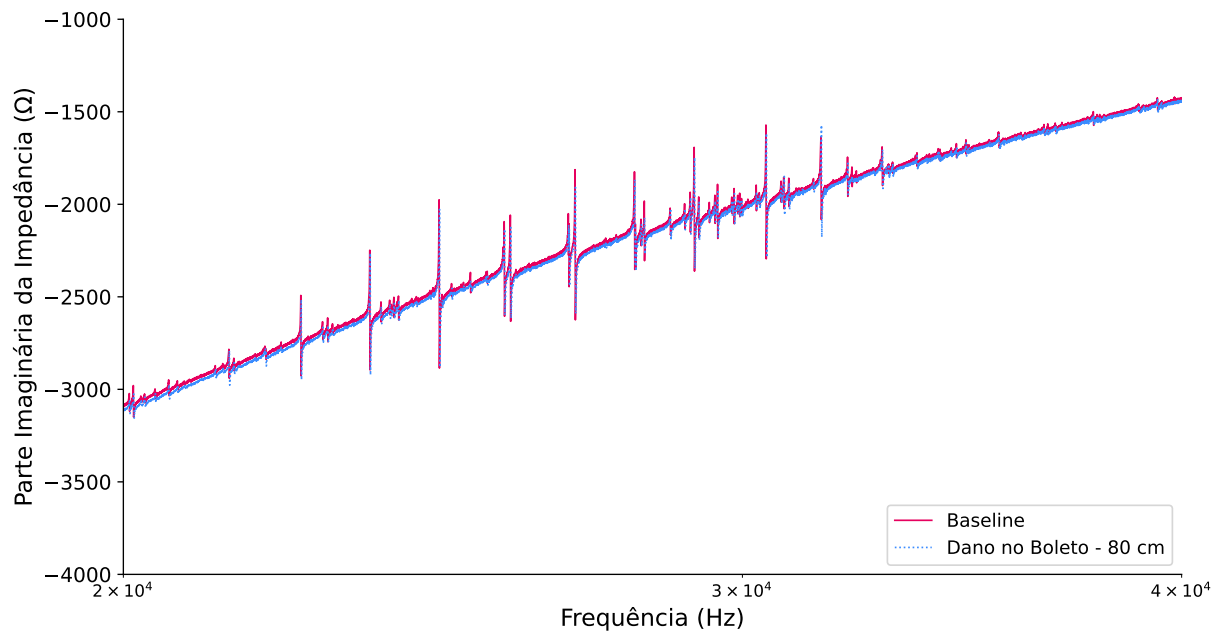
Figura 59: Valores de CCDM para diferentes condições de dano (parte real da impedância).



Fonte: Própria autora.

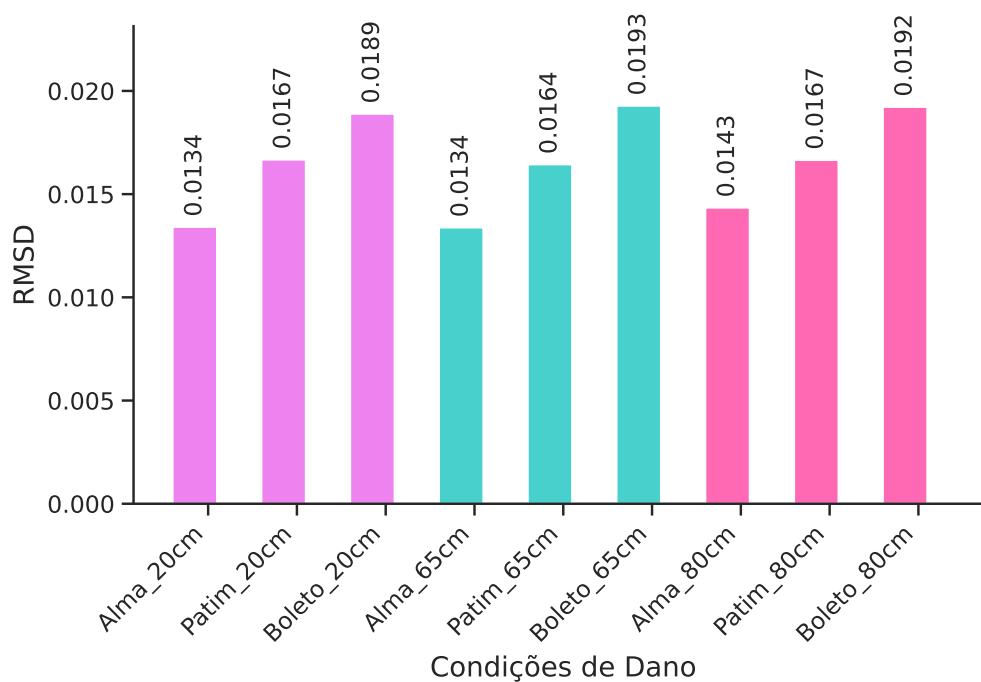
• Parte Imaginária da Impedância

Figura 60: Danos no boleto a 80 cm do PZT (parte imaginária da impedância).



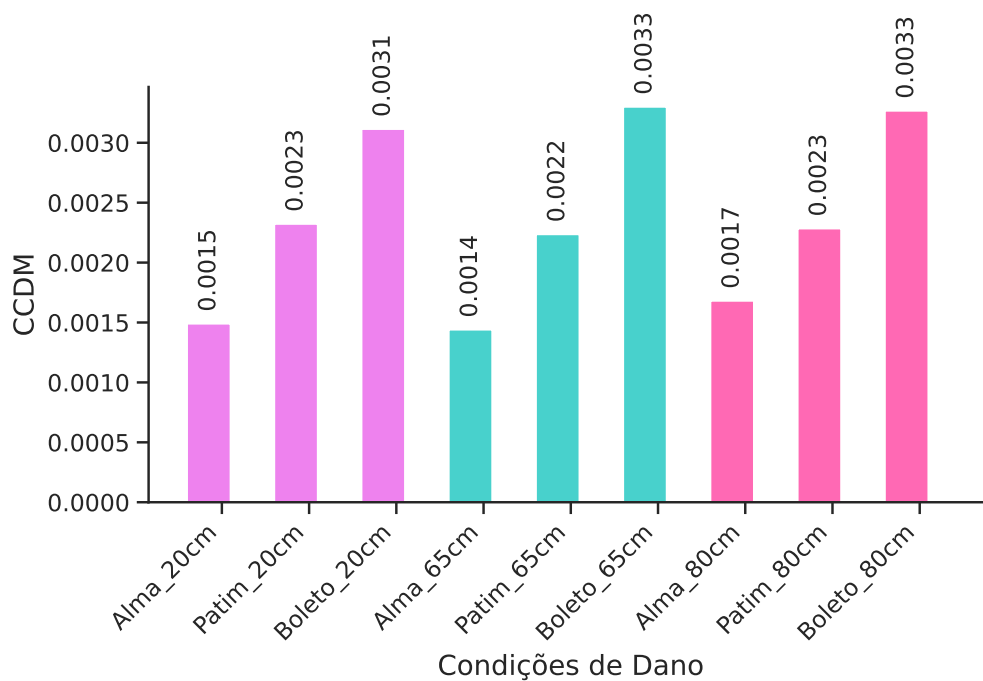
Fonte: Própria autora.

Figura 61: Valores de RMSD para diferentes condições de dano (parte imaginária da impedância).



Fonte: Própria autora.

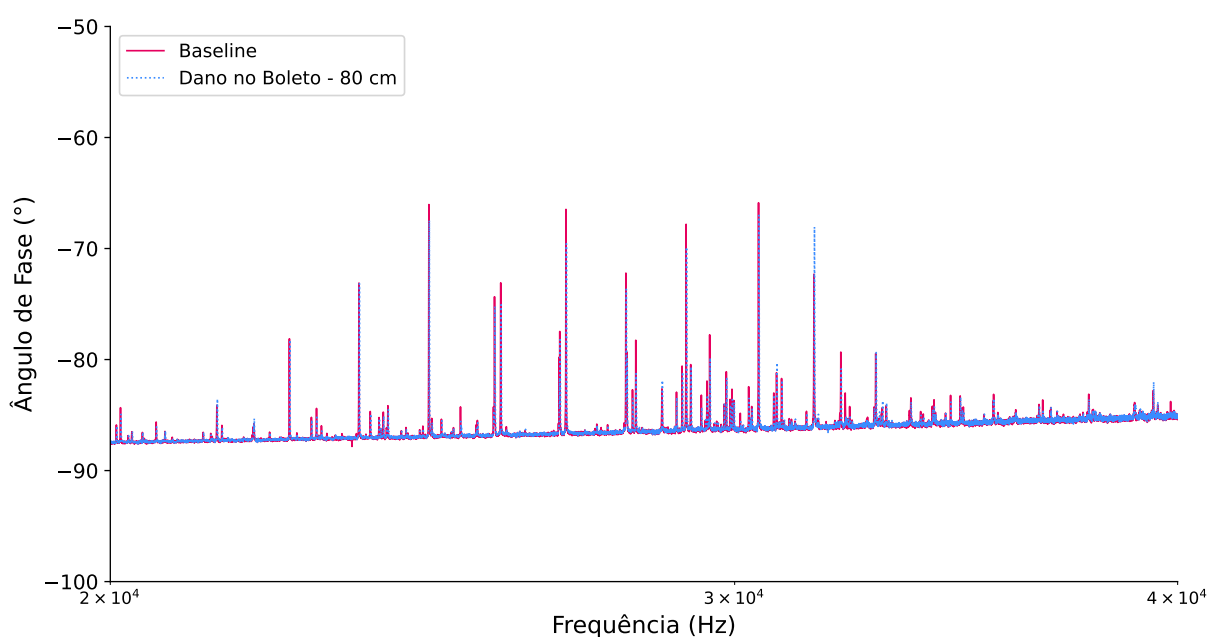
Figura 62: Valores de CCDM para diferentes condições de dano (parte imaginária da impedância).



Fonte: Própria autora.

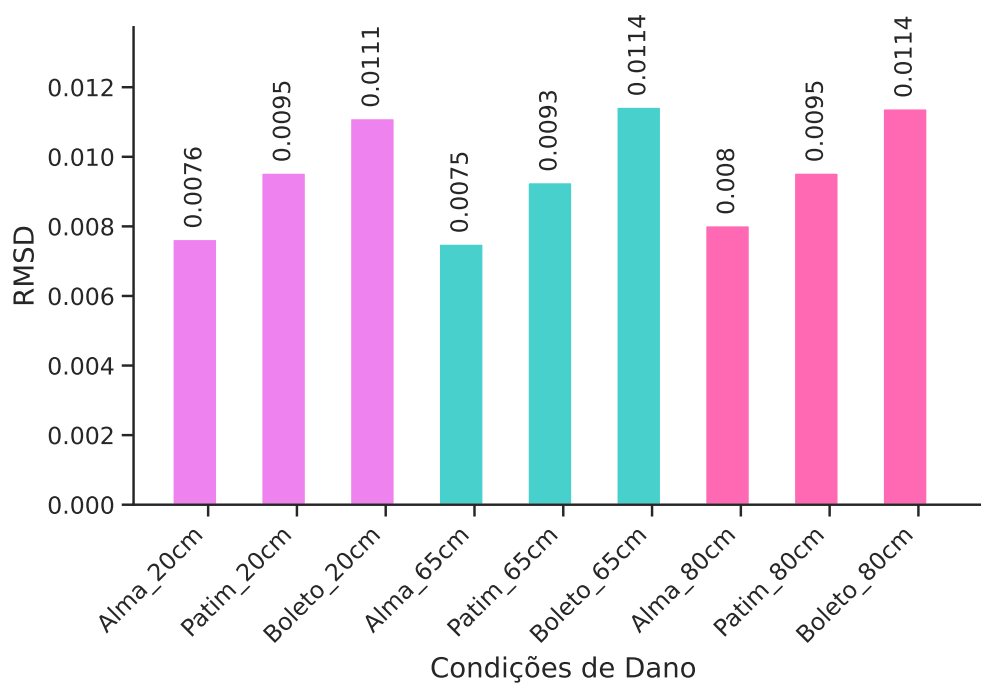
• Ângulo de Fase

Figura 63: Danos no boleto a 80 cm do PZT (ângulo de fase).



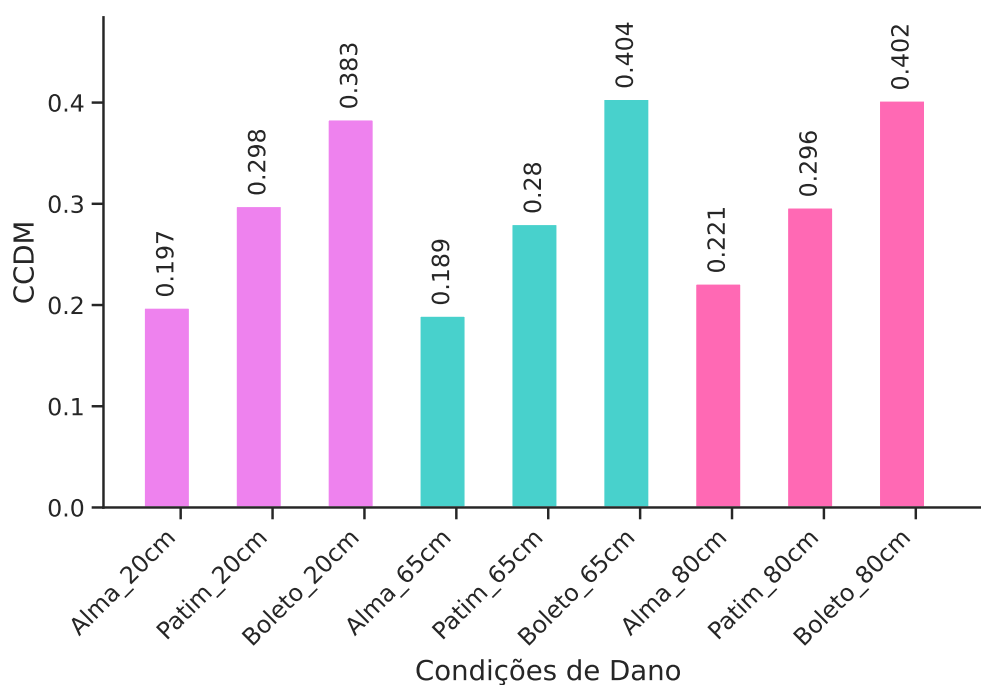
Fonte: Própria autora.

Figura 64: Valores de RMSD para diferentes condições de dano (ângulo de fase).



Fonte: Própria autora.

Figura 65: Valores de CCDM para diferentes condições de dano (ângulo de fase).



Fonte: Própria autora.

4 Considerações Finais

4.1 Conclusões

O presente trabalho de graduação tinha como objetivo avaliar a viabilidade da técnica de impedância eletromecânica na detecção de danos em trilhos ferroviários. Para isso, foram realizados testes laboratoriais em um trecho de trilho de 1 m de comprimento, com danos simulados a partir do acoplamento de ímãs e da fixação de massa adesiva.

A partir da simulação com ímãs, verificou-se que a técnica é eficaz na detecção de danos, e que existe uma tendência associada a proporcionalidade de distanciamento sugerindo uma possível localização, porém são necessários estudos mais aprofundados para esse caso. Os resultados indicaram que, quanto mais distantes do PZT, mais os danos apareciam nos sinais de impedância, pois maiores eram os valores dos índices RMSD e CCDM. Já para a quantificação dos danos, esta não foi possível e acredita-se que alguns pontos podem ter influenciado nesses resultados, como a baixa aderência entre os ímãs e o trilho, a massa desprezível dos ímãs quando comparada à massa do trilho utilizado, e a possibilidade de interferência magnética nos sinais de impedância.

No caso da simulação utilizando a massa adesiva, foi possível detectar todos os danos. No entanto, pelos índices observados, não mostrou-se viável identificar uma proporcionalidade nos índices sugerindo correspondente localização de danos. Destaca-se que a massa adesiva revelou uma tendência mais coerente, possivelmente em razão de sua melhor aderência ao trilho. Ainda assim, algumas inconsistências comportamentais foram observadas e podem ser atribuídas à dificuldade de padronizar a fixação do Durepoxi ao trilho e também pela massa ainda ser desprezível em relação a massa do trilho.

Ademais, as duas técnicas de simulação apresentaram um resultado em comum: para todos os casos, o boleto se destacou como a região do trilho com a maior facilidade na detecção de danos. Além disso, foram avaliados o módulo da impedância, a parte real, a parte imaginária e o ângulo de fase, e dentre essas variáveis, os danos foram mais efetivamente identificados por meio da análise da parte real da impedância.

Com relação às faixas de frequência estudadas, os comportamentos gerais das curvas foram muito similares para a faixa completa de 3 a 80 kHz e para a faixa de-

finida por Ryue et al. (2009) como a mais eficaz na propagação de ondas ao longo de trilhos ferroviários (20 a 40 kHz). No entanto, observou-se que os valores dos índices RMSD e CCDM foram intensificados na nova faixa de frequência, revelando uma maior facilidade de detecção dos danos. Para o cenário dos ímãs, também a distinção entre as distâncias foi reforçada, apontando para novas sugestões de localização dos danos no trilho.

Apesar das divergências e dos muitos aspectos desconhecidos na pesquisa que necessitam ser explorados, conclui-se que a técnica de impedância eletromecânica com atuadores piezoelétricos aplicada a trilhos, embora embrionária, apresentou resultados satisfatórios, mostrando-se, assim, viável para a detecção de danos simulados em laboratório. Ressalta-se que, dentre os níveis de SHM definidos por Rytter (1993) e Doebling et al. (1998), a técnica estudada neste trabalho de graduação se enquadra, atualmente, no Nível 1, sendo possível a detecção da presença de danos. A técnica ainda sugere uma possível localização do dano (Nível 2), porém não é capaz de quantificar (Nível 3), ou ainda prever a vida útil remanescente da estrutura (Nível 4).

4.2 Trabalhos Futuros

A seguir são apresentadas algumas sugestões de trabalhos futuros que podem enriquecer a compreensão dos tópicos discutidos neste trabalho de graduação.

- Analisar a viabilidade da técnica aplicada a trilhos em operação, com a realização de experimentos em campo;
- Realizar investigações focadas em identificar e controlar as variáveis que influenciam nos resultados da técnica, visando maior padronização e confiabilidade;
- Aprofundar a investigação com estudos que explorem mais a fundo novas técnicas e configurações para simulação dos danos nos trilhos.

5 Referências

- Abbas, S., Li, F., Abbas, Z., Abbasi, T. U. R., Tu, X. & Pasha, R. A. (2021), 'Experimental study of effect of temperature variations on the impedance signature of pzt sensors for fatigue crack detection', *Sound & Vibration* **55**, 1–18.
- Ai, D., Zhu, H., Luo, H. & Yang, J. (2014), 'An effective electromechanical impedance technique for steel structural health monitoring', *Construction and Building Materials* **73**, 97–104.
- Antunes, P., Rodrigues, H., Travanca, R., Ferreira, L., Varum, H. & André, P. (2012), 'Structural health monitoring of different geometry structures with optical fiber sensors', *Photonic Sensors* **2**, 357–365.
- APC-International (2024), 'What is piezoelectric theory'. Acesso em: 03 out. 2024.
URL: <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/>
- Aranguren, G., Monje, P. M., Cokonaj, V., Barrera, E. & Ruiz, M. (2013), 'Ultrasonic wave-based structural health monitoring embedded instrument', *Review of Scientific Instruments* **84**, 125106.
- Armendani, W. A., Vieira, R. F., de SOUZA, R. V., BARROS, K., VICTOR, A. & FÁBIO, A. S. (2016), 'Conhecendo a piezoeletricidade, uma nova forma de geração de energia elétrica', *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*.
- Baptista, F. G., Budoya, D. E., De Almeida, V. A. D. & Ulson, J. A. C. (2014), 'An experimental study on the effect of temperature on piezoelectric sensors for impedancebased structural health monitoring', *Sensors* **14** pp. 1208–1227.
- Baptista, F. G. & Filho, J. V. (2009), 'A new impedance measurement system for pzt-based structural health monitoring', *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement* **58**(10), 3602–3608.
- Baptista, F. G., Filho, J. V. & Inman, D. J. (2011), 'Real-time multi-sensors measurement system with temperature effects compensation for impedance-based structural health monitoring', *Structural Health Monitoring* **11**(2), 173–186.
- CBFA (2024), 'Quais os tipos de desgaste nos trilhos do trem?', <https://cbfa.com.br/quais-os-tipos-de-desgaste-nos-trilhos-do-trem/>.
- Chalouhi, E. K., González, I., Gentile, C. & Karoumi, R. (2017), 'Vibration-based shm of railway bridges using machine learning: The influence of temperature on the health prediction'.

- Chen, S. X., Zhou, L., Ni, Y. & Liu, X. Z. (2020), 'An acoustic-homologous transfer learning approach for acoustic emission-based rail condition evaluation', *Sage* **20**(4), 2161–2181.
- Dias, L. L. (2021), 'Estratégias de compensação de temperatura na técnica de impedância eletromecânica'.
- Divsholi, B. S. & Yang, Y. (2012), 'Health monitoring of steel structures using sub-frequency electromechanical impedance technique', *Journal of Nondestructive Evaluation* **31**, 197–207.
- Doebeling, S., Farrar, C. & Prime, M. (1998), 'A summary review of vibration-based damage identification methods', *The Shock and Vibration Digest* **30**, 91–105.
- Farrar, C. R., Lieven, N. A. J. & Bement, M. T. (2005), *Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical Systems*, 1 edn, Wiley.
- García, I., Zubia, J., Durana, G., Aldabaldetrekú, G., Illarramendi, M. A. & Villatoro, J. (2015), 'Optical fiber sensors for aircraft structural health monitoring', *Sensors* **15**, 15494–15519.
- Giurgiutiu, V., Reynolds, A. & Rogers, C. A. (1999), 'Experimental investigation of e/m impedance health monitoring of spot-welded structure joints', *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **10**(10), 802–812.
- Gonsalez, C. G. (2012), Metodologias para reconhecimento de padrões em sistemas shm utilizando a técnica da impedância eletromecânica (e/m), Master's thesis, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".
- Graham, P. (2017), 'Como o ensaio não destrutivo mantém as ferrovias nos trilhos', <https://www.olympus-ims.com/pt/insight/how-nondestructive-testing-keeps-railways-on-track/>.
- Han, Q., Xu, J., Carpinteri, A. & Lacidogna, G. (2015), 'Localization of acoustic emission sources in structural health monitoring of masonry bridge', *Structural Control Health Monitoring* **22**, 314–329.
- Koo, K. Y., Park, S., Lee, J. J. & Yun, C. B. (2009), 'Automated impedance-based structural health monitoring incorporating effective frequency shift for compensating temperature effects', *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **20**(4), 367–377.
- Kołakowski, P., Mróz, A., Álvarez Sala ad Piotr Pawłowski, D., Sekuła, K. & Świercz, A. (2013), 'Investigation of dynamic response of a railway bridge equipped with a tailored shm system', **569-570**, 1068–1075.

- Kral, Z., Horn, W. & Steck, J. (2013), 'Crack propagation analysis using acoustic emission sensors for structural health monitoring systems', *The ScientificWorld Journal* **2013**, 13.
- Leo, D. J. (2007), *Engineering Analysis of Smart Material Systems*, John Wiley & Sons.
- Liang, C., Sun, F. P. & Rogers, C. A. (1993), 'Coupled electromechanical analysis of piezoelectric ceramic actuator-driven systems: determination of the actuator power consumption and system energy transfer', *Smart Structures and Materials* . **URL:** <https://doi.org/10.1117/12.152767>.
- Liang, C., Sun, F. P. & Rogers, C. A. (1996), 'Electro-mechanical impedance modeling of active material systems', *Smart Materials and Structures* **5**(2), 171–186.
- Lobato, P. (2020), 'Lastro ferroviário: conceitos e características', <https://www.brferrovia.com.br/post/o-lastro-ferrovi>
- Lobato, P. (2022), 'Trilhos ferroviários: conceitos e características', <https://www.brferrovia.com.br/post/trilhos-conceitos-e-defini>
- Lopes Jr, V., Park, G., Cudney, H. H. & Inman, D. J. (1999), Structural health monitoring technique using artificial neural network and structural impedance sensors, in 'ASME mechanics and material conference', ASME, recent advances in experimental mechanics, Blacksburg, VA, p. 333–334.
- Loveday, P. W., Long, C. S. & Ramatlo, D. A. (2019), 'Ultrasonic guided wave monitoring of an operational rail track', *Structural Health Monitoring* **19**(6), 1666–1684.
- Luo, Y., Shen, Y., Fu, W., Yun, C. B., Liu, D., Yang, P., Yang, G. & Zhou, G. (2021), 'Implementation of shm system for hangzhou east railway station using a wireless sensor network', **27**(1), 19–33.
- Luo, Z., Cao, H., Meng, L. & Lin, L. (2013), 'Influences of mechanical contact on damage evaluation with electromechanical impedance technique', *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **25**(3), 321–331.
- Ma, L., Du, M., Wang, Z., Chung, H., Li, F. & Cheung, C. (2017), 'Damage assessment of high-speed emu train bolsters via pzt sensor network-based shm technology', *DEStech Publications* .
- Macêdo, F. B. (2009), 'Estudo do desgaste de trilhos ferroviários'.
- National-Instruments (2006), 'Daq m series - ni usb-621x user manual'. Austin, Texas, USA.

- Park, G., Cudney, H. & Inman, D. J. (2000a), 'Impedance-based health monitoring of civil structural components', *Journal of Infrastructure Systems* **6**, 153–160.
- RailDamage (2024), 'Corrugation', <https://www.raildamage.com/2024/05/22/corrugation/>.
- Rytter, A. (1993), Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures, PhD thesis, Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark.
- Ryue, J., Thompson, D., White, P. R. & Thompson, D. (2008), 'Investigations of propagating wave types in railway tracks at high frequencies', *FREEDOM* **315**(1-2), 157–175.
- Ryue, J., Thompson, D., White, P. R. & Thompson, D. (2009), 'Decay rates of propagating waves in railway tracks at high frequencies', *FREEDOM* **320**(4-5), 955–976.
- Sabato, A., Beale, C. & Niezrecki, C. (2017), 'A novel optical investigation technique for railroad track inspection and assessment'.
- Salas, K. I. & Cesnik, C. E. S. (2010), 'Guided wave structural health monitoring using clover transducers in composite materials', *Smart Material and Structures* **19**, 015014.
- Su, Z., Ye, L. & Lu, Y. (2006), 'Guided lamb waves for identification of damage in composite structures: A review', *Journal of Sound and Vibration* **295**(3-5), 753–780.
- Sun, F. P., Chaudhry, Z., Liang, C. & Rogers, C. A. (1995), 'Truss structure integrity identification using pzt sensor-actuator', *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **6**(1), 134–139.
URL: <https://doi.org/10.1177/1045389X9500600117>
- Tebaldi, A. (2004), Detecção de falhas estruturais usando sensores e atuadores piezelétricos e algoritmos genéticos, Master's thesis, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".
- Tressler, J. F., Alkoy, S. & Newnham, R. E. (1998), *Journal of Electroceramics* **2**(4), 257–272.
- Tsuruta, K. M. (2008), Monitoramento de integridade estrutural de materiais compostos sujeitos a impactos empregando a técnica da impedância eletromecânica, Master's thesis, Universidade Federal de Uberlândia.
- Tziavos, N. I., Hemida, H., Dirar, S., Papaelias, M., Metje, N. & Baniotopoulos, C. (2020), 'Structural health monitoring of grouted connections for offshore wind turbines by means of acoustic emission: An experimental study', *Renewable Energy* **147**, 130–140.

- Vieira Filho, J., Baptista, F. G. & Inman, D. J. (2011), 'Time-domain analysis of piezoelectric impedance-based structural health monitoring using multilevel wavelet decomposition', *Mechanical Systems and Signal Processing* **25**(5), 1550–1558.
- Wang, D., Song, H. & Zhu, H. (2014), 'Electromechanical impedance analysis on piezoelectric smart beam with a crack based on spectral element method', *Mathematical Problems in Engineering* p. 13.
- Wang, J., Wang, T. & Luo, Q. (2019), 'A practical structural health monitoring system for high-speed train car-body', *IEEE Access* **7**, 168316–168326.
- Wang, K., Cao, W., Su, Z., Wang, P., Zhang, X., Chen, L., Guan, R. & Lu, Y. (2020), 'Structural health monitoring of high-speed railway tracks using diffuse ultrasonic wave-based condition contrast: theory and validation', *Smart Structures and Systems* **26**(2), 227–239.
- Worden, K. & Dulieu-Barton, J. M. (2004), 'An overview of intelligent fault detection in systems and structures', *Structural Health Monitoring* **3**(1), 85–98.
- Yang, Y. & Divsholi, B. S. (2010), 'Sub-frequency interval approach in electromechanical impedance technique for concrete structure health monitoring', *Sensors (Basel)* **10**(12), 11644–11661.
- Yang, Y., Lim, Y. Y. & Soh, C. K. (2008), 'Practical issues related to the application of the electromechanical impedance technique in the structural health monitoring of civil structures: I. experiment', *Smart Materials and Structures* **17**(3), 035008.
- Zhou, S. W., Liang, C. & Rogers, C. A. (1996), 'An impedance-based system modeling approach for induced strain actuator-driven structures', *Journal of Vibration and Acoustics* **118**, 323–331.