



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
LUCAS GOMES



**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ARRANJO DE PROTEÇÃO
EM TRANSDUTORES PIEZOELÉTRICOS APLICADOS NA
TÉCNICA DA IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA EM
ESTRUTURAS DE CONCRETO**

Uberlândia, 2024

LUCAS GOMES

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ARRANJO DE PROTEÇÃO
EM TRANSDUTORES PIEZOELÉTRICOS APLICADOS NA
TÉCNICA DA IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA EM
ESTRUTURAS DE CONCRETO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Engenharia Urbana

Orientador: Prof.^a Dr.^a Raquel Naiara
Fernandes Silva

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

G633e
2024 Gomes, Lucas, 1998-
 Estudo da influência do arranjo de proteção em transdutores piezoelétricos aplicados na técnica da impedância eletromecânica em estruturas de concreto [recurso eletrônico] / Lucas Gomes. - 2024.

 Orientadora: Raquel Naiara Fernandes Silva.
 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.
 Modo de acesso: Internet.
 Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2024.5098>
 Inclui bibliografia.
 Inclui ilustrações.

 1. Engenharia Civil. I. Silva, Raquel Naiara Fernandes, 1986-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624

 André Carlos Francisco
 Bibliotecário Documentalista - CRB-6/3408



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 302, PPGEC				
Data:	19 de Julho de 2024	Hora de início:	14:00h	Hora de encerramento:	15:50h
Matrícula do Discente:	12212ECV008				
Nome do Discente:	Lucas Gomes				
Título do Trabalho:	Estudo da influência do arranjo de proteção em transdutores piezoelétricos aplicados na técnica da impedância eletromecânica em estruturas de concreto				
Área de concentração:	Análise Espacial, Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental				
Linha de pesquisa:	Engenharia Urbana				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Especificidades da técnica de ISHM na Engenharia Civil				

Reuniu-se, em sessão pública por webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Diogo de Souza Rabelo - UFG, Leila Aparecida de Castro Motta - UFU e Raquel Naiara Fernandes Silva, orientadora do candidato.

Iniciando os trabalhos, a presidente da mesa, Raquel Naiara Fernandes Silva, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Raquel Naiara Fernandes Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/07/2024, às 15:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leila Aparecida de Castro Motta, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/07/2024, às 15:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Diogo de Souza Rabelo, Usuário Externo**, em 19/07/2024, às 15:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5536252** e o código CRC **FC31951F**.

RESUMO

O estudo proposto visa investigar várias modificações para melhorar as propriedades mecânicas do transdutor piezelétrico utilizado na técnica de ISHM para estruturas de concreto. Especificamente, o foco está em desenvolver uma nova camada de proteção para o transdutor piezelétrico, aprimorando suas propriedades de resistência e deformação, garantindo também um acoplamento eletromecânico eficiente entre a interface e o transdutor piezelétrico. A eficácia da nova camada de proteção é avaliada usando o método de elementos finitos (MEF) no *software* COMSOL Multiphysics®. Essa simulação permite explorar diferentes modificações, como variar a composição mecânica do revestimento, alterar a espessura da camada de proteção e selecionar diferentes elementos para formação de compósito. Posteriormente, a camada de proteção foi testada em ensaios experimentais para validar os resultados obtidos na simulação computacional. O desempenho do transdutor foi avaliado analisando a resposta da propagação de ondas, comparando o sinal de impedância obtido pelo transdutor em elementos de concreto sem e com danos. Para garantir a confiabilidade dos dados, várias métricas estatísticas foram empregadas para avaliar sua precisão e acurácia. O conjunto de proteção consistiu numa adição de lâmina de alumínio junto ao revestimento de epóxi, visando melhorar a resposta de assinatura. Seguindo essa abordagem foi possível constatar que modelo proposto sendo empregado uma placa de alumínio junto à resina epóxi apresentou respostas adequadas para detecção de danos de forma satisfatória e robustez no MEF. Ao analisar os resultados obtidos no experimento, constata-se que essa pesquisa valida o modelo proposto por meio das métricas analisadas, permitindo assim uma confiabilidade maior das respostas obtidas.

Palavras-chave: COMSOL; Estruturas Inteligentes; ISHM; MEF; Monitoramento de Integridade Estrutural; Transdutor piezoelétrico.

ABSTRACT

The proposed study aims to investigate various modifications to improve the mechanical properties of the piezoelectric transducer used in the ISHM technique for concrete structures. Specifically, the focus is on developing a new protective layer for the piezoelectric transducer, enhancing its strength and deformation properties while also ensuring efficient electromechanical coupling between the interface and the piezoelectric transducer. The effectiveness of the new protective layer is evaluated using the finite element method (FEM) in the COMSOL Multiphysics® software. This simulation allows for exploring different modifications, such as varying the mechanical composition of the coating, altering the thickness of the protective layer, and selecting different elements for composite formation. Subsequently, the protective layer was tested in experimental trials to validate the results obtained from the computational simulation. The transducer's performance was assessed by analyzing the wave propagation response, comparing the impedance signal obtained by the transducer in concrete elements both with and without damage. To ensure data reliability, various statistical metrics were employed to evaluate its precision and accuracy. The protective set consisted of adding an aluminum sheet along with the epoxy coating to improve the signature response. Following this approach, it was possible to verify that the proposed model, using an aluminum plate along with the epoxy resin, presented satisfactory damage detection responses and robustness in the FEM. Analyzing the experimental results, it is evident that this research validates the proposed model through the analyzed metrics, thus providing greater reliability in the obtained responses.

Keywords: COMSOL; Smart Structures; ISHM; MEF; Structural Integrity Monitoring; piezoelectric transducer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fixação com agente intermediário.	3
Figura 2 - Modelo unidimensional do acoplamento eletromecânico.	8
Figura 3 - Demonstração do efeito piezoelétrico.....	10
Figura 4 – Sistema de aquisição de dados de impedância.	11
Figura 5 - Modelo 3D (a) transdutor livre (b) tradutor com camada de resina epóxi.	17
Figura 6 - Viga de concreto danificada com transdutor (a) modelo 3D esquemático, (b) modelo de malha, (c) espectro propagação de onda no modelo.	17
Figura 7 - Corpos de prova com diferentes danos	18
Figura 8 - Efeito do módulo de cisalhamento na assinatura de admitância.	20
Figura 9 - Efeito da espessura da camada de ligação na assinatura	20
Figura 10 - Geometria do conjunto de transdutores.	21
Figura 11 - Deslocamento do transdutor.	22
Figura 12 - Processo dinâmico da simulação de elemento finito adaptado.....	29
Figura 13 - Fluxo de desenvolvimento da pesquisa.	33
Figura 14 – Modelo 3D do corpo de prova com entalhe.	39
Figura 15 – Modelo de definição dos campos de voltagem.	39
Figura 16 – Deformação do transdutor com revestimento em diferentes espessuras: a) 0,7mm do epóxi b) 4,7mm de epóxi	41
Figura 17 – Sequência de empilhamento da fibra de carbono.....	42
Figura 18 – Modelo 3D proposto.	43
Figura 19 – Espessura da placa de alumínio recortada.....	45
Figura 20 – Proteção do tradutor: a) espessura; b) modelo com e sem placa.	46
Figura 21 - Avaliação do sinal do transdutor.	47
Figura 22 - Corpo de prova prismático com SIAU.	48
Figura 23 – Detalhe do entalhe na seção central do corpo de prova.	49
Figura 24 – Primeira malha.	50
Figura 25 – Qualidade da malha do transdutor piezoelétrico com epóxi.	51
Figura 26 – Segunda malha de análise (prova cilíndrico com transdutor revestido de epóxi).	52
Figura 27 – Segunda malha de análise com índice de qualidade.	52
Figura 28 – Assinatura de impedância com o transdutor livre.	53

Figura 29 – Assinatura de impedância modelado com epóxi e SIAU incorporados ao concreto.	54
Figura 30 – Valores MAPD modelados.	55
Figura 31 – Impedância resistiva pela frequência do transdutor piezoelétrico para o conjunto com e sem epóxi.	56
Figura 32 – Impedância resistiva por frequência para mudança da espessura do revestimento.	57
Figura 33 – Impedância resistiva no transdutor revestido com epóxi/carbono (45°).....	58
Figura 34 – Impedância resistiva no transdutor com epóxi/carbono.....	59
Figura 35 – Impedância resistiva no transdutor com epóxi/carbono com diferentes espessuras.	59
Figura 36 – Impedância no transdutor com auxílio da placa de aço (perfuração).....	60
Figura 37 – Impedância no transdutor com placa de alumínio.	61
Figura 38 - Assinaturas de impedância para o traço A versus simulação 30MPa.....	62
Figura 39 – Comparação MAPS entre epóxi, SIAU e MEF (30MPa).	63
Figura 40 – Assinaturas de impedância das regiões de pico de ressonância (a) SIAU pico primário (b) SIAU pico secundário (c) Epóxi pico primaria (d) Epóxi pico secundário.	64
Figura 41 – Métrica dos picos de ressonância da concreto de 30MPa.....	66
Figura 42 – Métrica MAPD 10kHz a 400kHz.....	67
Figura 43 – Métrica MRSD 10kHz 400kHz.....	67
Figura 44 – Métricas MARP e RMSD de 30MPa e 60MPa combinadas do SIAU.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resumo de estudo ISHM de materiais cimentícios.	15
Tabela 2. Propriedades do PZT 4D	37
Tabela 3 . Propriedades da resina epóxi.	37
Tabela 4. Propriedades da resina epóxi com reforço com carbono	41
Tabela 5. Propriedades do Alumínio	42
Tabela 6. Propriedades do Aço.....	43
Tabela 7 - Dados do analisador de impedância.	46
Tabela 8 – Métricas para o concreto de 30MPa.	65
Tabela 9 – Métricas para o concreto 30MPa zonas de ressonância.....	65
Tabela 10 - Métricas para o concreto de 60MPa	68
Tabela 11 – Métricas para o concreto 60MP nas zonas de ressonância.	68

LISTA DE SÍMBOLOS

C_E	Matriz de elasticidade
D	Vetor deslocamento elétrico [C/m ²]
d	Tensor das constantes piezelétricas em deformação [m/V]
d^T	Coefficiente piezoelétrico
d	Deslocamento elétrico por unidade de tensão em campo elétrico
d_{3x}^2	Constante de acoplamento piezoelétrico;
E	Vetor campo elétrico [V/m]
$F(\omega)$	Força alternada
$f_{i,s}$	<i>baseline</i> do espécime
$f_{i,a}$	Espécime envelhecido
$I_0(\omega)$	Corrente de saída do transdutor
j	Unidade imaginária $\sqrt{-1}$.
Q_m	Fator de qualidade mecânica
Q_m	Fator de qualidade mecânica
Q_E	Fator de qualidade elétrica do material
$v(\omega)$	Velocidade resultante
S	Vetor das deformações [m/m]
s	Tensor de flexibilidade [m ² /N]
T	Vetor das tensões [N/m ²]
$V_i(\omega)$	Tensão elétrica de entrada do atuador transdutor
$w_a l_a e h_a$	Largura, comprimento e espessura do transdutor;
$Y(\omega)$:	Admitância elétrica do transdutor (inverso da impedância);
\bar{Y}_{22}^E	Módulo de Young do transdutor com campo elétrico nulo;
$Z_s(\omega)$	Impedância mecânica da estrutura
$Z_a(\omega)$	Impedância mecânica do transdutor
ϵ_{33}^{-T}	Constante dielétrica do transdutor com tensão mecânica nula;
δ	Fator de perda dielétrica do transdutor;
η	Fator de perda mecânica do transdutor
ω	Representa da frequência angular

$Z_M(\omega)$	Impedância
Z_n, d	Representam parte real da impedância da medição sem danos;
Z_n, h	Representa parte real da impedância com modificação na configuração;
Z_n, h^2	Representa número total de amostras.
\bar{Z}_h e \bar{Z}_d	Representa a média do sinal com a estrutura íntegra (<i>baseline</i>);
ϵ_T	Permissividade dielétrica
η_S	Amortecimento mecânico
η_ϵ	Perda dielétrica ou fator de dispersão
Ω	Impedância mecânica
ϵ	Permissividade elétrica [F/m]
δ	Diferença das médias de cada um dos sinais.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Modelagem tridimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASD	Diferença média quadrada
CCD3	Desvio do Coeficiente de Correlação ao Cubo
CCD	Desvio do Coeficiente de Correlação
COV	Covariância
CP	Cimento Portland
END	Ensaio não destrutivo
H2	Norma Quadrada ou Euclidiana
HINF	Norma Infinita
IOT	Internet das coisas
ISHM	Monitoramento de Integridade Estrutural Baseado em Impedância
MAPD	Desvio Médio Absoluto Percentual
MEF	Modelagem de elementos finitos
PEA	Pulso eletroacústico
PZT	Titanato de Zirconato de Chumbo
RMSD	Desvio da Raiz Quadrática Média
SIAU	Unidade de Análise de Integridade Estrutural
VEMCC	Varição do Coeficiente de Acoplamento Eletromecânico
VRFN	Varição Relativa das Frequências Naturais

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	OBJETIVOS	6
1.1.1.	<i>Objetivo Geral</i>	<i>6</i>
1.1.2.	<i>Objetivos específicos</i>	<i>6</i>
2.	MONITORAMENTO POR ISHM	7
2.1.	SISTEMA ISHM	7
2.2.	TÉCNICA DA IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA	8
2.3.	PRINCÍPIO BÁSICO	10
2.3.1.	<i>Característica e modo de operação.....</i>	<i>11</i>
2.4.	IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ISHM.....	11
2.5.	MÉTRICAS ESTATÍSTICAS	12
2.6.	ANÁLISE DE FREQUÊNCIA E VOTAGEM	15
2.7.	PUBLICAÇÕES RELEVANTES	16
2.7.1.	<i>Modelagem e análise experimental</i>	<i>17</i>
2.7.2.	<i>Análise de pré-dano e análise dos transdutores PZT.....</i>	<i>19</i>
2.7.3.	<i>Modelagem de elementos finitos e comparação do desempenho de materiais piezoelétricos</i>	<i>21</i>
3.	MATERIAIS COMPÓSITOS.....	23
3.1.	CONCRETO.....	24
3.1.1.	<i>Deterioração.....</i>	<i>24</i>
3.1.2.	<i>Patologias: anomalias em elementos de concreto.....</i>	<i>25</i>
3.1.3.	<i>Monitoramento</i>	<i>26</i>
4.	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	28
4.1.	MODELAGEM	28
4.1.1.	<i>Influência dos fatores de amortecimento.....</i>	<i>30</i>
4.1.2.	<i>Perda dielétrica</i>	<i>30</i>
4.1.3.	<i>Perda de acoplamento</i>	<i>31</i>
4.1.4.	<i>Voltagem.....</i>	<i>31</i>
4.1.5.	<i>Análise da espessura do revestimento</i>	<i>32</i>
5.	MATERIAIS E MÉTODOS	33
5.1.	SIMULAÇÃO TESTE	34

5.2.	SIMULAÇÃO DO ARRANJO DE PROTEÇÃO.....	35
5.2.1.	<i>Equacionamento</i>	35
5.2.2.	<i>Propriedades para simulação e equação</i>	36
5.2.3.	<i>Geometria</i>	38
5.2.4.	<i>Voltagem</i>	39
5.2.5.	<i>Revestimento de proteção</i>	40
5.3.	EXPERIMENTAÇÃO IN SITU.....	43
5.3.1.	<i>Agregado</i>	44
5.3.2.	<i>Aditivo</i>	44
5.3.3.	<i>Elaboração do transdutor</i>	45
5.3.4.	<i>Teste de sinal do transdutor piezoelétrico</i>	46
5.3.5.	<i>Moldagem dos corpos de prova</i>	47
5.4.	GERAÇÃO DE DANOS E TESTES.....	48
6.	RESULTADOS	50
6.1.	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.....	50
6.1.1.	<i>Qualidade da malha</i>	50
6.1.2.	<i>Respostas do transdutor livre e com proteção</i>	53
6.1.3.	<i>Respostas do transdutor no interior do CP</i>	55
6.1.4.	<i>Análise de sinais para diferentes materiais de proteção</i>	58
6.2.	EXPERIMENTAÇÃO IN SITU E VALIDAÇÃO DO MODELO.....	62
7.	CONCLUSÕES	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
	APÊNDICE A – CURVAS DE IMPEDÂNCIA E METRICAS	81

1. INTRODUÇÃO

O cimento é empregado largamente na concepção de estruturas pequenas a grande porte na sociedade atual, onde seu emprego deve crescer aceleradamente nas próximas décadas devido à evolução no processo de urbanização (HABERT *et al.*, 2020).

É essencial realizar uma análise do processo que leve em conta possíveis variações nas características ao longo das etapas de utilização, assim como os efeitos de fatores externos ou falhas humanas que podem levar à perda de desempenho. Além disso, é comum ocorrer uma diminuição no desempenho ao longo da utilização do empreendimento devido à deterioração causada por fatores naturais ou mecânicos, independentemente de sua localização.

Segundo Bhalla e Kaur (2018) danos por fadiga com baixas deformações são frequentemente observados em estruturas de concreto expostas a vibrações contínuas, como aquelas causadas pelo tráfego de veículos em pontes e pela ação do vento em edifícios.

Embora os métodos de análise de dados mais comuns sejam precisos, eles são fornecidos com equipamentos caros, além de poderem ser demorados e, em alguns casos, destrutivos, uma vez que são retiradas amostras. Isso resulta em resultados pontuais que não refletem a evolução real dos possíveis danos e das propriedades desde a concepção até o estado atual a longo prazo.

Nesse sentido, a necessidade do monitoramento das estruturas vem se destacando como um campo de pesquisa, visto que aprimorar as técnicas e o desenvolvimento não buscam somente a segurança de danos incipientes, mas a avaliação de possíveis falhas críticas que podem levar a ruptura e conseqüentemente a acidentes catastróficos. A avaliação do real estado da estrutura permite a economia, por significar a antecipação da manutenção e reparação, elevando a qualidade e a segurança a longo prazo.

Várias metodologias foram desenvolvidas para o monitoramento em estruturas de concreto, cada uma tem suas peculiaridades e limitações no alcance de dados obtidos. A escolha da metodologia a ser empregada dependerá de algumas variáveis como tipo de estrutura, condições do ambiente e qual tipo de mudança se tem em vista verificar.

São numerosos os métodos de monitoramento de integridade estrutural para detecção de danos, tem-se entre eles a emissão acústica, ondas *Lamb*, sensores de fibra ótica, correntes parasitas e impedância eletromecânica (CASTRO; BAPTISTA; CIAMPA, 2019).

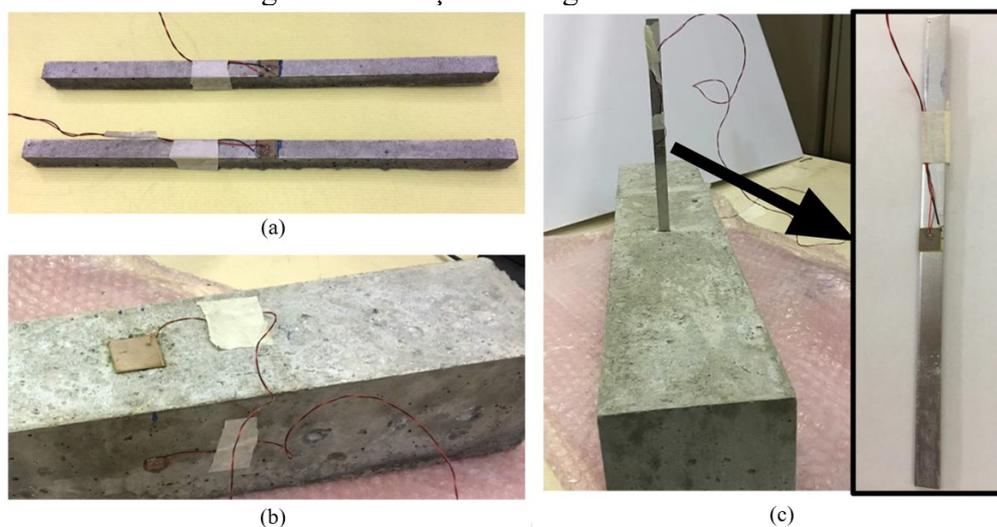
O emprego da técnica do Monitoramento de Integridade Estrutural Baseado em Impedância (*Indirect Structural Health Monitoring*) ISHM pode ser aplicado em diversas

áreas, não se limitando apenas às engenharias, e pode ser facilmente integrado a um sistema sem fio para realizar o monitoramento autônomo do objeto de estudo, quando empregados na forma de “agregados inteligentes”. Esses agregados podem ser usados para avaliar o estado atual e emitir alerta, por exemplo, em edificações, a fim de garantir a segurança dos ocupantes. Segundo SU *et al.* (2019) na técnica ISHM, é comum o uso de transdutores piezoelétricos fabricados com Titanato de Zirconato de Chumbo (PZT). Esses transdutores apresentam vantagem como tamanho reduzido, baixo peso e custo se comparados a outras tecnologias, além de fornecerem respostas sobre a integridade do objeto de estudo sem apresentarem danos estruturais. A análise e tratamento dos dados não depende de equipamentos parametrizados e onerosos para interpretação do estado da estrutura.

O processo de monitoramento tem início com a incorporação de um transdutor PZT no objeto de estudo, que, devido ao efeito piezoelétrico, permite a relação entre as propriedades mecânicas e a impedância elétrica, possibilitando a verificação e monitoramento da estrutura (SILVA, 2017). A avaliação da estrutura é realizada por meio da detecção de mudanças na impedância mecânica e/ou na assinatura de impedância. Essas mudanças podem ser causadas pela variação na amplitude e/ou no deslocamento da faixa de frequência.

Tem-se também a fixação do sensor na superfície da estrutura monitorada com epóxi ou uso de agente intermediário tais como parafuso, ou haste metálica, segundo Alexander *et al.* (2021) . Na Figura 1(a) e (b) temos a fixação pela parte externa a qual o transdutor é fixado com resina epóxi, posteriormente tem-se na Figura (c) a qual uma haste de alumínio serve como intermediário para a propagação das excitações do transdutor para o corpo de prova prismático. Embora os métodos usando agente intermediário permitam obter a resposta, eles apresentam a desvantagem pois apresentam uma sensibilidade inferior se comparados com método direto o qual são sensores imbuídos no objeto de estudo, no entanto, é possível reutilizar o transdutor nesses métodos.

Figura 1 – Fixação com agente intermediário.



Fonte: LU *et al.* (2019).

Para a correta implementação do transdutor, é necessário o uso de uma proteção adequada do transdutor adequada para evitar variações advindas do ambiente que podem gerar interpretações errôneas sobre o estado real e diminuir a sensibilidade do transdutor. Incorporar os sensores PZT no interior do concreto pode causar danos ao sensor durante o processo de cura. O esquema de proteção deve atender a diversos fatores, como esforços mecânicos, exposição a fatores ambientais, moldagem do concreto e resistência à pressão no processo de cura do concreto, que influenciam diretamente na resposta do transdutor.

De acordo com Gayakwad e Thiagarajan (2022) a camada de ligação é um elemento fundamental e complexo no ISHM, visto que é responsável por transmitir adequadamente a tensão de cisalhamento do objeto de estudo para a estrutura do transdutor.

Nesse sentido o emprego do epóxi vem sendo utilizado largamente para o encapsulamento de eletrônicos, onde o mesmo pode ser empregado para a produção de diferentes materiais compósitos para melhorar suas características. Segundo Jeong *et al.* (2016) os polímeros, em específico o epóxi, é adequado para uso devido a sua confiabilidade mecânica. Outras características do epóxi são resistência à água, resistência química, alta resistência e adesão (ZHU *et al.*, 2004).

O uso do epóxi em conjunto com os transdutores tem sido amplamente estudado devido à sua versatilidade e características favoráveis. No entanto, é importante ressaltar que o emprego do epóxi pode resultar em desacoplamento após vários ciclos térmicos e mecânicos, devido à incompatibilidade de contração térmica, como mencionado por ZHANG *et al.* (2020).

O estresse gerado na superfície de contato entre o transdutor e o meio devido às características de módulo condutividade térmica faz com que o sinal obtido seja errôneo, com redução da precisão nos transdutores de coleta. Nesse sentido é necessário a melhora nas características do polímero para o uso na produção de uma proteção que se encaixe adequadamente às variações em que se pode aplicar ao concreto.

Segundo Huynh *et al.* (2020) outros fatores de degradação do transdutor e sua camada de ligação são a sobrecarga, mudanças ambientais e deterioração do material. Esses efeitos degradam o sinal e afetam diretamente na transmissão da força do transdutor na estrutura.

De acordo com Xu *et al.* (2015) a temperatura e carga são fatores ambientais importantes quando se trata da engenharia. A variação de temperatura não apenas pode alterar a *baseline* de assinatura como a condutância do transdutor, picos de ressonância e amplitude. Quanto maior for a temperatura, maior é a variação da assinatura sendo necessário a compensação de temperatura para reduzir esse efeito, sendo requisito no ISHM. O processo de compensação de temperatura pode basear na otimização híbrida associada a métrica de danos (RABELO *et al.*, 2017).

As mudanças relacionadas a danos causam alteração completa e abrupta no comportamento nos valores de impedância e já a temperatura causa apenas deslocamentos verticais e horizontais nos picos sem alteração do comportamento geral da assinatura (VENSON, 2020).

A espessura é outro fator a ser verificado devida a sua influência nos dados obtidos. Nos estudos de Saravanan *et al.* (2015) os experimentos com a camada de proteção reduzida refletiram em mudanças significativas de frequência nas idades iniciais, enquanto em estágios posteriores, as respostas de assinatura apresentaram variações mínimas. No entanto, quando o revestimento é mais espesso, o transdutor não se mostrou sensível em idades iniciais e apresentou uma amplitude substancial em estágios mais avançados.

Tal comportamento do revestimento também é verificado por Narayanan *et al.*, (2017), onde o transdutor com camada de proteção reduzida não obtém uma resposta sensível o suficiente para a coleta de dados após o momento de pega e durante o ganho de resistência inicial.

Já segundo (YANG; LIM; SOH, 2008), a espessura da camada adesiva, quando limitada a até 2/3 da espessura do transdutor e na faixa de frequência de até 100 kHz, não exerce influência significativa sobre a resposta de impedância. Contudo, quando a faixa de frequência excede 100 kHz e a espessura do adesivo ultrapassa 1/3 da espessura do transdutor, observa-se uma alteração direta e significativa na impedância, afetando a precisão das medições.

A escolha correta da faixa de frequência mais sensível é de suma importância para a técnica, permitindo a detecção precisa de danos e a reprodutibilidade dos resultados. Essa escolha geralmente parte da literatura como ponto de referência ou a partir da experimentação pelo método de tentativa e erro. Além disso, a configuração do arranjo para a sensibilidade do transdutor também é um aspecto crucial. Nos estudos realizados por Gayakwad e Thiyagarajan (2022), por exemplo, foi demonstrado que a implementação de uma lâmina de aço formando um compósito resultou em uma variação na magnitude do sinal de susceptância, resultando em uma maior identificação de danos e confiabilidade dos dados obtidos. Embora o compósito apresente vantagens na análise, como apontado por Gan (2009), um ponto desafiador é a durabilidade a longo prazo da ligação metal/polímero na interface de ligação.

Diante de todas essas informações, busca-se por uma alta durabilidade do transdutor e da camada de ligação. Os fabricantes de PZT afirmam que a taxa de deterioração é de 5% por década. No entanto, é importante protegê-lo adequadamente contra fatores ambientais, pois, sem a devida proteção, a degradação pode ocorrer mais rapidamente (NA; BAEK, 2018).

Para a combinação das características do conjunto de matérias, a simulação numérica permite a modelagem tridimensional do problema, tornou-se assim vantajosa por permitir inúmeras modificações de fatores, como composição química da camada de revestimento, a espessura da camada, temperatura, tensão mecânica, campo magnético, permissividade dielétrica, podendo ser ajustados e verificados quanto à precisão da técnica ISHM. Outras modificações que podem ser verificadas segundo DONALD J. (2007) são deformação, campo elétrico e deslocamento elétrico.

É notável pela literatura que ainda não há um método de encapsulamento que consiga atender de forma satisfatória todas as características exigidas para a técnica ISHM, a fim de garantir o desempenho adequado a longo prazo. Para assegurar a confiabilidade e precisão das medições dos transdutores em aplicações de monitoramento estrutural, torna-se fundamental buscar métodos de encapsulamento mais eficientes.

Portanto, é necessário a elaboração de uma proteção para que o transdutor se adeque à estrutura de concreto e que não somente apresente uma melhora no acoplamento, mas também aumente a vida útil do transdutor. A elaboração da proteção demanda uma pesquisa cuidadosa para avaliar a melhor combinação de materiais e processos de encapsulamento, para obter um desempenho ideal em termos de sensibilidade e durabilidade.

Dessa forma, o objetivo deste estudo consiste em avaliar uma nova proposta de proteção, a fim de superar as limitações dos materiais, buscando uma conexão mais eficaz deste compósito em relação ao acoplamento, utilizando a aplicação adequada para estabelecer a

conexão entre o conjunto e o ambiente ao qual é exposto. Para isso simulações computacionais foram realizadas a fim de otimizar o processo de fabricação da proteção do transdutor. Experimentos in situ foram realizados a fim de validar o modelo simulado computacionalmente.

A combinação do método analítico com a simulação computacional visa oferecer flexibilidade para a modificação das propriedades físicas e condições do sistema em análise, permitindo visualizar nuances do problema e, conseqüentemente, otimizá-lo eficientemente. Além disso, a abordagem analítica combinada com a experimentação pode ajudar a reduzir os custos e o tempo necessários para a realização de testes físicos.

Com a simulação computacional, verificou-se modelos próximos aos experimentais, permitindo testar diferentes cenários e condições, além de proporcionar economia de tempo e dinheiro. Observou-se ainda que essa abordagem pode minimizar o risco de acidentes ou danos aos equipamentos durante os testes.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Estudar a influência do arranjo de proteção em transdutores piezoelétricos, com vistas em aplicações da técnica do monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica em estruturas de concreto.

1.1.2. Objetivos específicos

- Realizar simulações computacionais visando avaliar o desempenho de diferentes arranjos do conjunto de proteção;
- Analisar intervalos de frequências mais adequados para o monitoramento;
- Conduzir ensaios em bancada experimental para validar os modelos propostos computacionalmente;
- Determinar a eficácia da nova proteção por meio da utilização de métricas estatísticas.

2. MONITORAMENTO POR ISHM

Este capítulo apresenta uma introdução ao sistema de monitoramento da integridade estrutural, descrevendo os modelos de execução adotados, os principais pontos de análise e a importância do acoplamento adequado para a efetividade do transdutor piezoelétrico. Além disso, são abordados os conceitos básicos da técnica de impedância eletromecânica e o uso de uma *baseline* para a análise de danos. Com a apresentação dessas informações, busca-se fornecer uma compreensão ampla e detalhada do sistema de monitoramento, a fim aplicar com sucesso em diferentes contextos e situações.

2.1. SISTEMA ISHM

O ISHM consiste no conjunto de várias técnicas e objetos que se caracterizam e contribuem no processo de monitoramento das condições e variações das estruturas ou objeto de estudo em diferentes áreas, tais como na civil, aeronáutica, mecânica, entre outras.

A finalidade desse sistema é verificar danos incipientes e monitorar sua progressão ao longo do tempo. O ISHM se baseia em ensaios não destrutivos (END), já que não é necessária a extração de testemunhos de concreto para a avaliação estrutural. Além de apresentar as variações no que tange o dano, permite uma maior integração nos sistemas, visto que podem ser adicionadas ligações à internet das coisas (IOT) para monitoramento em tempo real. Segundo Vieira (2016) com a implementação completa do sistema é possível detectar:

- Existência de danos;
- Localização do dano na estrutura;
- Caracterização do tipo de dano;
- Análise da extensão do dano;
- Avaliação do tempo restante da estrutura.

O sistema de ISHM devidamente projetado e implementado permite uma redução nos custos de manutenção. Nesse sentido de implementação tem-se não somente uma integração para longevidade e reparação, mas também para a segurança do ambiente, o qual pode ser avaliado e cabível da tomada de ações de mitigação.

2.2. TÉCNICA DA IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA

A técnica de impedância eletromecânica baseia-se no monitoramento da variação da impedância eletromecânica da estrutura, a qual ocorre quando a estrutura sofre danos, utilizando materiais com propriedades piezelétricas. Essa técnica permite o monitoramento contínuo da estrutura por meio de um transdutor fixado ou incorporado, que funciona tanto como atuador quanto como transdutor, onde o mesmo deve ficar íntegro na estrutura.

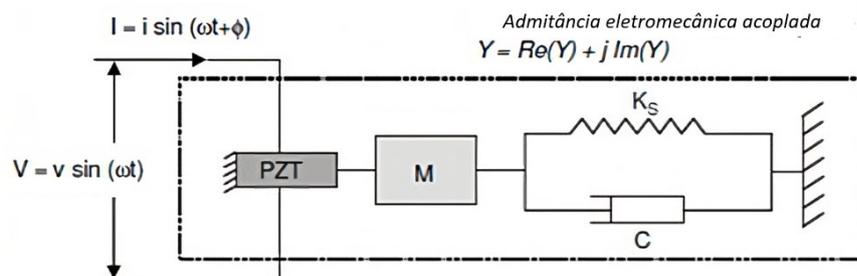
O transdutor empregado é uma pastilha piezoelétrica, utilizado para verificação da resposta dinâmica, em que se tem dimensões distintas a depender do tipo de implementação. O transdutor consegue a conversão de até 80% da energia mecânica aplicada em energia elétrica (VIEIRA, 2016).

A equação que expressa a impedância mecânica pode ser expressa pela resistência ao movimento que o componente tem ao se aplicar uma força no mesmo, correspondendo à razão entre a força aplicada e a velocidade resultante, Eq. (1).

$$Z_m(\omega) = \frac{F(\omega)}{v(\omega)} \quad (1)$$

Na qual temos $Z_M(\omega)$ sendo a impedância; $F(\omega)$ a força alternada; $v(\omega)$ a velocidade resultante, e “ ω ” a frequência angular. A impedância mecânica é expressa por Ohms “ Ω ”. O transdutor interage com a alta frequência eletricamente excitando o material ou pode atuar a partir da deformação da mesma sobre o transdutor gerando mudança na voltagem elétrica. O modelo da estrutura a ser monitorada pode ser visualizado como um sistema de 1 grau de liberdade em um conjunto, no qual o PZT desempenha o papel de atuador e transdutor (Figura 2).

Figura 2 - Modelo unidimensional do acoplamento eletromecânico.



Fonte: Inman *et al.* (2005)

O modelo da Figura 2 representa o sistema o qual pode-se encontrar a interação expressa pelas Eq. 2 e 3 (CRAWLEY *et al.*, 1983 apud SILVA, 2017, p. 52).

$$S_i = S_i^E + d_m E_m \quad (2)$$

$$D_m = d_m T_j + \varepsilon_{mk}^T E \quad (3)$$

Nas quais:

S: vetor das deformações [m/m];

T: vetor das tensões [N/m²];

E: vetor campo elétrico [V/m];

D: vetor deslocamento elétrico [C/m²];

s: tensor de flexibilidade [m²/N];

d: tensor das constantes piezelétricas em deformação [m/V];

ε : permissividade elétrica [F/m];

A interação entre a matriz o e transdutor pode ser expresso pela Eq. 4 na qual os sinais são monitorados pela impedância mecânica da estrutura.

$$Y(\omega) = \frac{I_0(\omega)}{V_i(\omega)} = j\omega \frac{w_a l_a}{h_a} \left[\begin{matrix} -T \\ \varepsilon_{33} \end{matrix} (1 - j\delta) - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \bar{Y}_{22}^E (1 + j\eta) \right] \quad (4)$$

onde:

$Y(\omega)$: admitância elétrica do transdutor;

$Z_s(\omega)$: impedância mecânica da estrutura;

$Z_a(\omega)$: impedância mecânica do transdutor;

$V_i(\omega)$: tensão elétrica de entrada do atuador transdutor;

$I_0(\omega)$: corrente de saída do transdutor;

$w_a l_a$ e h_a : largura, comprimento e espessura da pastilha;

\bar{Y}_{22}^E : módulo de Young do transdutor com campo elétrico nulo;

d_{3x}^2 : constante de acoplamento piezelétrico;

$\begin{matrix} -T \\ \varepsilon_{33} \end{matrix}$: constante dielétrica do transdutor com tensão mecânica nula;

δ : fator de perda dielétrica do transdutor;

η : fator de perda mecânica do transdutor;
 j : unidade imaginária $\sqrt{-1}$.

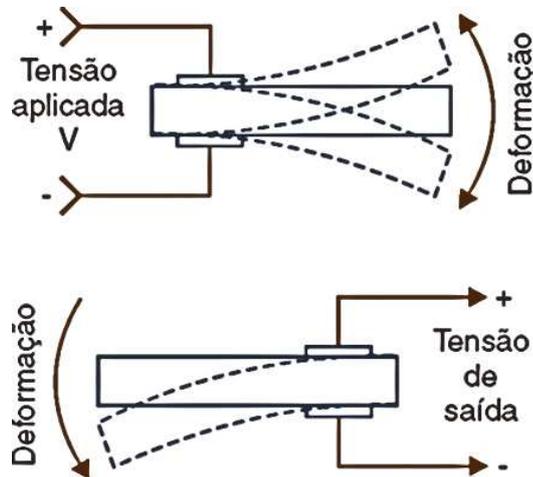
A admitância elétrica $Y(\omega)$ é a parte capacitiva, sendo a mesma parte imaginária do termo dominante, sendo mais sensível às variações de temperatura que a parte real. Devido à característica complexa da equação é necessário que um impedancímetro gere os sinais de excitação e colete as assinaturas de respostas.

A impedância eletromecânica consiste no conjunto transdutor/estrutura no qual temos a representação da parte real e imaginária em relação à frequência a qual pode ser delimitada a uma determinada faixa.

2.3. PRINCÍPIO BÁSICO

Os materiais piezoelétricos caracterizam-se pela mudança das dimensões quando aplicada uma tensão elétrica sendo atuador ou inversamente atuando como transdutor por meio da conversão de energia (Figura 3).

Figura 3 - Demonstração do efeito piezoelétrico



Fonte: Energia (2012)

O efeito piezoelétrico é o principal ponto para o monitoramento baseado na impedância, onde a junção da atuação e sensibilidade permite quantificar e mensurar o dano da estrutura. A origem da descoberta do efeito piezoelétrico é de 1880 em que:

Ao analisarem determinados minerais cristalinos (como quartzo e Titanato de Bário), descobriram uma característica incomum: quando sujeitos a uma força mecânica, os

cristais tornaram-se polarizados. A tensão e a compressão geraram tensões de polaridade oposta e, proporcional à força aplicada. Subsequentemente, o inverso deste relacionamento foi confirmado: quando um destes cristais foi exposto a um campo elétrico se observou que o mesmo alongou ou encurtou conforme a polaridade do campo e, proporcionalmente à força do campo. A esse fenômeno foi dado o nome de Piezeletricidade, relacionado à ferroeletricidade (GLHARDI, 2010, p. 15)

Outro aspecto é a temperatura de Curie que influencia diretamente nas propriedades do efeito piezoelétrico. Segundo Paes (2006) a cerâmica policristalina quando submetida à temperatura superior ao limite de Curie, perde a orientação dos domínios, advinda do processo de polarização, resultando na perda de sua capacidade de funcionamento.

2.3.1. Característica e modo de operação

A condição para que um material seja piezoelétrico é a ausência de centro de simetria, característica que segundo Lele (2013) torna os materiais piezoelétricos intrinsecamente anisotrópicos, com a suas propriedades relacionadas às constantes elásticas e dielétricas, embora tenhamos que segundo (DONALD J. , 2007) várias cerâmicas apresentam o comportamento ortotrópicos . Outro fator apontado sobre os efeitos não lineares é que o estímulo mecânico e elétrico pode ser avaliado nas propriedades quanto à variação na composição das cerâmicas com base na temperatura e no tempo.

2.4. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ISHM

A implementação do ISHM dependerá de fatores tais como objeto de estudo, ambiente em que está exposto. Segundo Vieira (2016) pode-se classificar em quatro principais pontos: aquisição de sinal, pré-processamento, transmissão do sinal, processamento e resultados. A figura 4 apresenta a configuração do sistema para o monitoramento de impedância.

Figura 4 – Sistema de aquisição de dados de impedância.



Fonte: Autor

A etapa de aquisição é aberta a várias possibilidades, visto que pode se verificar um único ponto de interesse ou uma rede ampla a qual deve ser dimensionada. Outro aspecto é a forma que o transdutor vai estar acoplado à estrutura no qual as variações do conjunto influenciarão na precisão. É importante considerar também o custo e a disponibilidade dos transdutores, além da complexidade de sua instalação e calibração. Todos esses fatores devem ser cuidadosamente avaliados durante a etapa de aquisição para garantir a obtenção de dados precisos e confiáveis. Nessa etapa que se encontra um dos pontos mais frágeis de todo o sistema, visto que o único ponto ou o cluster devem estar devidamente acoplados para que após alguns ciclos de uso o conjunto não tenha o sinal deteriorado, outro aspecto é a escolha das faixas de frequências que são usadas para obtenção dos dados.

A transmissão de dados é a terceira etapa do processo, podendo ser realizada tanto por meio de cabos quanto por métodos sem fio. A escolha do método de transmissão depende do modelo adotado e da acessibilidade do sistema de coleta. Caso o sistema esteja facilmente acessível, é possível empregar o uso de cabos. Já se o sistema for composto por módulos com bateria, estes podem se comunicar com a rede e transferir os dados para uma base de coleta e processamento.

Após a obtenção das assinaturas é feito o processamento de dados com filtros e reduzidos possíveis ruídos. Também pode envolver a segmentação dos dados, ou seja, a identificação e separação de regiões de interesse. Vieira (2016) cita que é importante destacar que o sucesso da etapa de processamento depende diretamente da qualidade dos dados obtidos na etapa de aquisição e do pré-processamento realizado.

A última etapa é a análise desses dados, onde serão calculadas as métricas, realizadas comparações e classificação para interpretação de possíveis danos ou outro tipo de mudança estrutural. Nesta fase, podem ser empregados algoritmos de comparação direta, redes neurais entre outros parâmetros. Com essa aquisição é possível classificar qual a escala e dimensão de dano e em quais pontos se encontram quando em *cluster*.

2.5. MÉTRICAS ESTATÍSTICAS

Para medir e detectar variações do comportamento da estrutura, tais como danos, mudanças na rigidez, nível de desgaste, desempenho, entre outras análises, é necessário utilizar índices que permitam uma comparação entre as medidas obtidas em diferentes momentos e

estabelecer uma escala baseada em parâmetros estatísticos. O tratamento dos dados é fundamental nesse processo, já que é preciso separar o sinal de interesse do ruído presente nas medições, como já apresentado anteriormente.

Os picos observados nos gráficos obtidos por técnicas como a ISHM fornecem parâmetros qualitativos, os quais representam a mudança interna da estrutura e conseqüentemente expõem que ocorreu alguma mudança nas propriedades mecânicas da estrutura. No entanto, para quantificar a extensão e a gravidade dessas modificações, é necessário realizar uma análise mais detalhada dos dados, utilizando as conhecidas métricas de danos que considerem características como a amplitude, a frequência e o tempo de ocorrência dos eventos.

A escolha das métricas de danos a serem utilizadas depende do tipo de estrutura e do tipo de modificação que se espera encontrar. É possível, por exemplo, utilizar métricas baseadas na análise de sinais no domínio do tempo, da frequência ou da energia, ou ainda combinar diferentes abordagens para obter uma visão mais completa do problema. Em resumo, a análise de métricas de danos é fundamental para avaliar a integridade estrutural e tomar decisões baseadas em evidências quantitativas.

Segundo Vieira (2016), são várias as técnicas de detecção de danos nas quais temos o uso de parâmetros modais e comparações espectrais das curvas de resposta. Alguns exemplos citados são:

- 1) Índices Modais
 - Variação Relativa das Frequências Naturais (VRFN)
 - Variação do Coeficiente de Acoplamento Eletromecânico (VEMCC)
- 2) Índices Baseados na Resposta em Frequência
 - Desvio da Raiz Quadrática Média (RMSD)
 - Desvio Médio Absoluto Percentual (MAPD)
 - Covariância (COV)
 - Desvio do Coeficiente de Correlação (CCD)
 - Desvio do Coeficiente de Correlação ao Cubo (CCD3)
 - Norma Infinita (Hinf)
 - Norma Quadrada ou Euclidiana (H2)
 - Diferença média quadrada (ASD)

Os índices calculados a partir da resposta de frequência associam um valor escalar para comparação de amplitude dos espectros de frequência da estrutura com e sem danos, já os índice modais buscam a variação da rigidez e da distribuição de massa da estrutura, refletindo alteração na frequência natural e ligação dos elementos.

Comumente é empregado no ISHM o desvio da raiz quadrática média (RMSD) expressa pela Eq. (5).

$$RMSD = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Z_{n,d} - Z_{n,h})^2}{Z_{n,h^2}}} \quad (5)$$

Na qual:

$Z_{n,d}$ representam parte real da impedância da medição sem danos;

$Z_{n,h}$ representa parte real da impedância com modificação na configuração;

Z_{n,h^2} representa número total de amostras.

O índice RMSD oriunda do desvio do valor quadrático médio (RMS). A identificação do dano é caracterizada pela comparação entre a impedância elétrica medida no estado íntegro e a leitura após danos sofridos nos diferentes ranges de frequência possíveis, o qual já deve ser escolhido antecipadamente.

Outro índice estatístico mencionado na literatura é Desvio do Coeficiente de Correlação (CCD), Eq. 6, obtido por (MARQUI *et al.*, 2008).

$$CCD = 1 - \left| \frac{\sum_n^N (Z_{n,h} - \bar{Z}_h)(Z_{n,d} - \bar{Z}_d)}{\sqrt{\sum_n^N (Z_{n,h} - \bar{Z}_h)^2} \sqrt{\sum_n^N (Z_{n,d} - \bar{Z}_d)^2}} \right| \quad (6)$$

Sendo:

\bar{Z}_h e \bar{Z}_d representa a média do sinal com a estrutura íntegra (*baseline*);

Já o ASD (diferença média quadrada) é dado pela Eq. 7, segundo (SILVA, 2017)

$$ASD = \sum_{i=1}^n [Re(Z_{1,i}) - Re(Z_{2,i}) - \delta]^2 \quad (7)$$

Onde δ é a diferença das médias de cada um dos sinais Eq. 8.

$$\delta = Re(\bar{Z}_1) - Re(\bar{Z}_2) \quad (8)$$

Já a Variação Relativa das Frequências Naturais (VRFN) é caracterizado pela diferença entre as frequências naturais e dos espécimes envelhecidos, com a perda de ductibilidade e tenacidade o material apresenta variação, o valor dado pela Eq. 9 (DAVID D.S. SILVA et al., 2020)

$$VRFN = \left| \frac{f_{i,a} - f_{i,s}}{f_{i,s}} \right| \times 100 \quad (9)$$

Onde $f_{i,s}$ é a *baseline* e $f_{i,a}$ e o espécime envelhecido.

Demais métricas podem ser consultadas nos estudos de Vieira (2016), Palomino (2008), Barella (2021) e Rocha (2017).

2.6. ANÁLISE DE FREQUÊNCIA E VOTAGEM

Hugo (2017) estudou outros ajustes, como a mudança na voltagem para geração de excitação, em que nos experimentos foi verificado a mudança nos picos com a resposta em 400 mV e 800mV.

Quanto à faixa de frequência, vários trabalhos, como visto na Tabela 1, exploram a resposta em diferentes frequências, estados de consistência e idades. Esses fatores influenciam na amplitude das assinaturas coletadas.

Tabela 1. Resumo de estudo ISHM de materiais cimentícios.

Pesquisa	Material	Range de frequência	Fase inicial da amostra (teste)	Idade da amostra
Soh and Bhalla, 2005	Concreto	100–150 kHz	Endurecido	3–365 dias
Shin <i>et al.</i> , 2008	Concreto	100–400 kHz	Endurecido	3–28 dias
Yang <i>et al.</i> , 2010	Concreto	70–120 kHz	Líquido	0–48 h
Tawie and Lee, 2010	Concreto	100–400 kHz	Endurecido	3–28 dias

Tawie and Lee, 2010	RC	100–150 kHz	Líquido	0–168 h
Annamdas <i>et al.</i> , 2010	Concreto	0–500 kHz	Endurecido	1–28 dias
Wang and Zhu, 2011	Concreto	150–350 kHz	Endurecido	1–28 dias
Providakis <i>et al.</i> , 2013	Concreto	50–70 kHz	Líquido	3 h–28 dias
Narayanan <i>et al.</i> , 2016	Argamassa	70–110 kHz	Líquido	0–72 h
Narayanan <i>et al.</i> , 2017	Argamassa	10–150 kHz	Líquido	0–16 h, 2–28 dias
Negi <i>et al.</i> , 2018	Concreto	0–1000 kHz	Endurecido	3–28 dias
Lu <i>et al.</i> , 2018	Concreto	5–450 kHz	Endurecido	5 h, 1–28 dias
Ghafari <i>et al.</i> , 2018	Argamassa	0–500 kHz	Endurecido	1–28 dias
Priya <i>et al.</i> , 2018	Concreto	0–200 kHz	Líquido	0.5–20 h, 1–28 dias
Talakokula <i>et al.</i> , 2018	RC	200–400 kHz	Líquido	1–12 h, 1–28 dias
Su <i>et al.</i> , 2019	Argamassa	0–500 kHz	Endurecido	4–8 h, 1–7 dias
Pan and Huang, 2020	Argamassa	0–1000 kHz	Endurecido	1–56 dias

Fonte: Adaptado de Zhang, *et al.* (2020)

Devidos às características do cimento, o uso da técnica para o monitoramento prematuro é visto em várias pesquisas para obter avaliações iniciais. Observa-se a definição de várias faixas para detectar em qual frequência observa-se as mudanças de forma mais clara, ponto esse que a assinatura demonstra os chamados picos de ressonância. A medida em que a hidratação progride, a frequência necessita de ajustes ou amplia-se a faixa para verificação dos picos de ressonância.

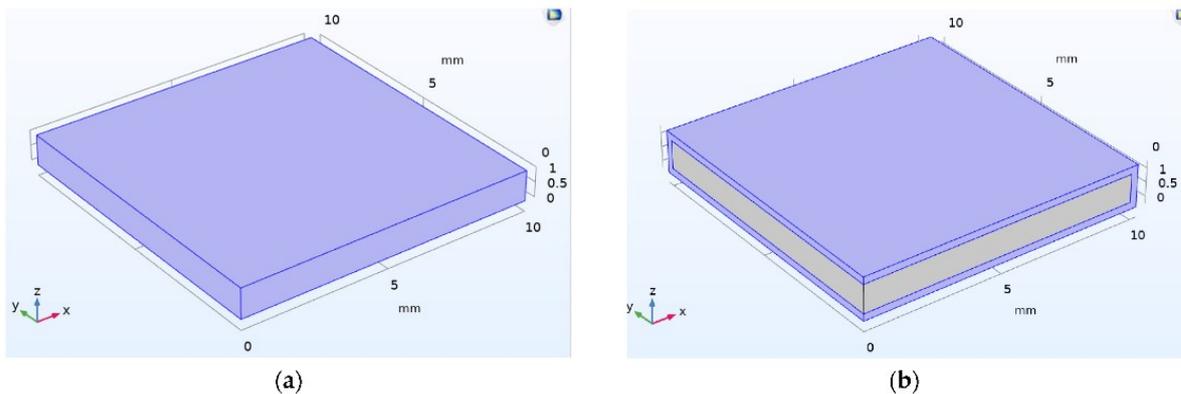
2.7. PUBLICAÇÕES RELEVANTES

A técnica ISHM tem sido amplamente utilizada em estudos de materiais cimentícios, com diversos trabalhos recentes apresentando modelagens e aplicações práticas da metodologia proposta. Alguns desses estudos se concentram em otimizar os parâmetros da técnica para obter melhores resultados, enquanto outros buscam avaliar a sua eficácia em diferentes cenários de aplicação. Além disso, existem pesquisas complementares que abordam outros aspectos importantes na fundamentação e comparação dos resultados, como a análise de incertezas, a validação experimental. Esses estudos ajudam a consolidar a técnica como uma ferramenta útil e confiável para a avaliação da integridade de estruturas de vários elementos.

2.7.1. Modelagem e análise experimental

Gayakwad e Thiagarajan (2022) realizaram experimento de simulação com o *software* COMSOL Multiphysics® empregando a técnica de impedância eletromecânica em modelagem tridimensional (3D). A investigação base serviu para o estabelecimento das configurações iniciais a serem posteriormente empregadas, os parâmetros inicialmente utilizados foram um transdutor de 10 mm x 10 mm x 1 mm com tensão de 1V; com excitação senoidal, a dimensão do epóxi 10,25 mm x 10,25 mm x 1,5 mm na qual a frequência escolhida foi de 10 a 500 kHz em 1200 pontos (Figura 5).

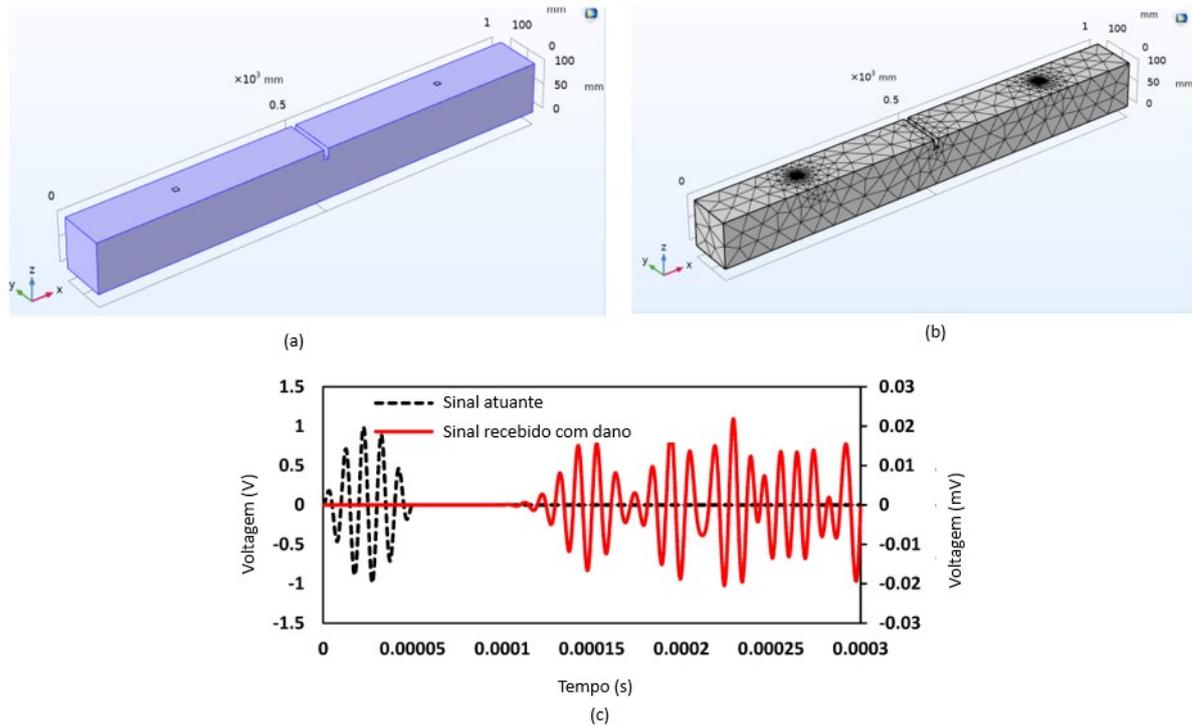
Figura 5 - Modelo 3D (a) transdutor livre (b) tradutor com camada de resina epóxi.



Fonte: Gayakwad e Thiagarajan (2022)

Após a abordagem de teste empregando a malha de elementos finitos, no qual foi possível verificar a análise com apenas um transdutor atuando, foi proposto outro modelo com dois transdutores, sendo o primeiro atuador e o segundo transdutor foi observado o efeito da amplitude na simulação. Posteriormente, foram investigados seis casos diferentes, como visto na Figura 6, para verificação da resposta em distintas configurações, mudando a quantidade de transdutores e o tipo de dano adicionado à malha.

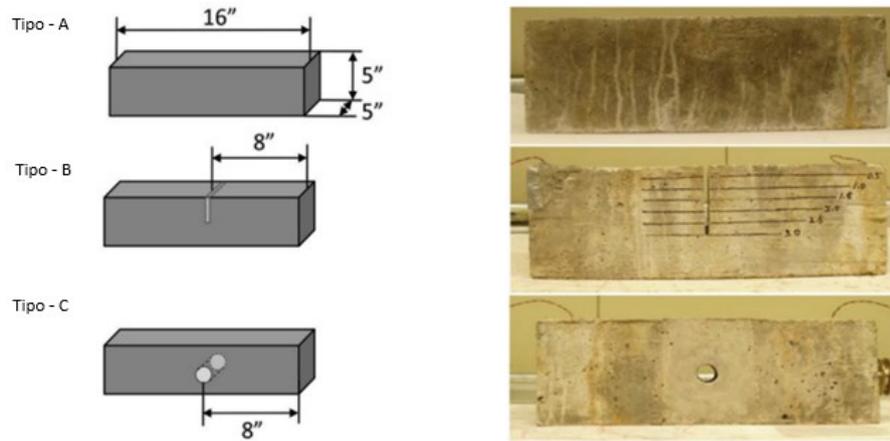
Figura 6 - Viga de concreto danificada com transdutor (a) modelo 3D esquemático, (b) modelo de malha, (c) espectro propagação de onda no modelo.



Fonte: Gayakwad e Thiagarajan (2022)

O estudo experimental foi realizado posteriormente à modelagem para testar a propagação de ondas. Os dados foram tratados e combinados com os dados da simulação (Figura 7). O modelo do tipo A é a estrutura no estado intacto o qual não se tem danos no prisma, no modelo B tem-se o entalhe na estrutura na seção vertical em diferentes profundidades de forma progressiva e por último, o C no tem-se o corte na seção central com serra copo.

Figura 7 - Corpos de prova com diferentes danos



Fonte: Gayakwad e Thiagarajan (2022)

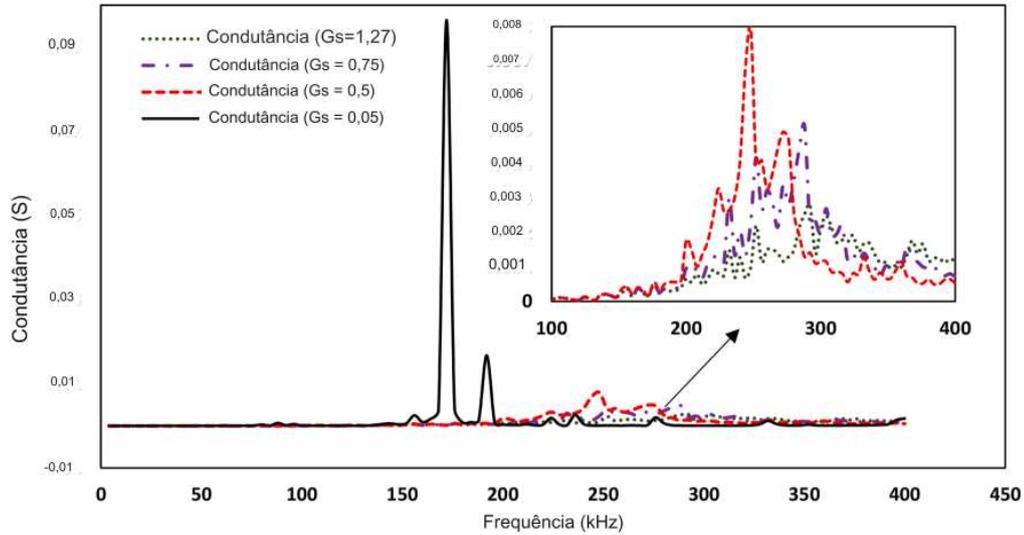
Ao fim, os autores conseguiram a detecção de dano com o aumento do sinal de tensão recebido e o valor de RMSD foi aprimorado. O conjunto de resultados é compatível com o modelo experimental, demonstrando um bom ajuste no comportamento do modelo 3D e resultados experimentais. Outra característica apontada pelos autores foi o conjunto da placa junto ao transdutor, onde foram obtidos resultados mais robustos ao comparar à resina epóxi.

2.7.2. Análise de pré-dano e análise dos transdutores PZT

Nos estudos de (JOTHI SARAVANAN; SINGH CHAUHAN, 2022) foi discutido uma metodologia para um diagnóstico precoce de danos no transdutor e na camada adesiva durante o processo ISHM. Para a verificação, partiu-se da simulação por meio do *software* ANSYS utilizando um modelo transdutor com as dimensões de 10mm x 10mm x 0,3mm. Empregou-se um modelo de malha de 1mm resultante em 100 elementos, a faixa de frequência de 0 a 450kHz.

A camada adesiva com as dimensões de 10mm x 10mm x 0,1mm foi empregada no estudo junto a um bloco de alumínio de 48mm x 48mm x 10mm. Variando o módulo de cisalhamento entre 0,05 e 1,27 GPa, foi observado que as assinaturas de condutância se deslocaram para baixo e apresentaram uma diminuição na inclinação. É visto que nos grandes picos para valores muito baixos de Gs (módulo de cisalhamento adesivo usado para colar os sensores), a estrutura hospedeira e a camada do transdutor se comportam independentemente, ou seja, não há efeito de impedância estrutural, ponto observado na Figura 8 que quando o módulo de cisalhamento é 0,05GPa, o comportamento se equipara a um transdutor desconexo da estrutura.

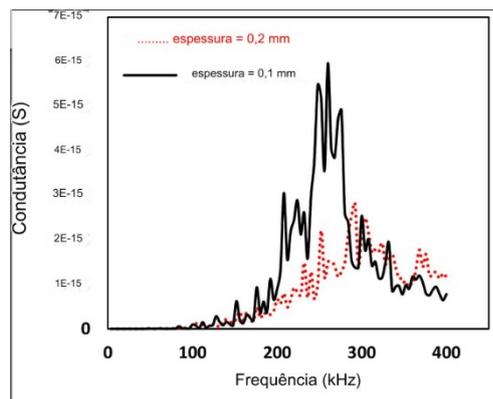
Figura 8 - Efeito do módulo de cisalhamento na assinatura de admitância.



Fonte: (JOTHI SARAVANAN; SINGH CHAUHAN, 2022)

Outro efeito observado foi ao manter o módulo de cisalhamento constante e variar a espessura da camada de ligação. Neste estudo, uma espessura foi definida de 0,1 mm e 0,2mm para a camada de ligação (Figura 9) . Foi observado que, à medida que a espessura da camada de ligação aumenta, o pico da assinatura de condutância se desloca para baixo, o deslocamento da assinatura de condutância também ocorria verticalmente.

Figura 9 - Efeito da espessura da camada de ligação na assinatura .



Fonte: (JOTHI SARAVANAN; SINGH CHAUHAN, 2022)

Já em relação à análise de falha do transdutor nos estados de quebra do transdutor deslocamento foram elaboradas distintas simulações para avaliação dos comportamentos. Para a detecção de dano na camada adesiva, a assinatura de condutância e susceptância foram verificados na faixa de frequência de 0 a 180 kHz uma vez que os deslocamentos foram visíveis nesse ponto devido ao comportamento livre da interface, com uma diminuição de 10% na seção

do transdutor. Com base nas simulações foi possível verificar o comportamento no qual o método foi eficaz para detectar esses problemas.

A assinatura de susceptância demonstrou não ser adequada para verificação quanto à descolagem da camada adesiva, por apresentar uma média de apenas 2% a 12% de variação, valores esses que podem ser facilmente interpretados erroneamente por fatores externos. Já a variação uniforme do deslocamento vertical ou descendente uniforme sem alteração na frequência de ressonância indicaram descolagem do adesivo, ou quebra do transdutor.

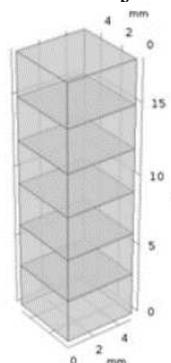
2.7.3. Modelagem de elementos finitos e comparação do desempenho de materiais piezoelétricos

O estudo de Espinosa (2021) apresentou a análise detalhada do comportamento dos atuadores transdutores, considerando diferentes tipos de perdas que influencia o desempenho desses dispositivos. As perdas dielétricas, mecânicas e piezoelétricas foram investigadas por meio de simulações realizadas com o *software* COMSOL®, permitindo avaliar os efeitos de cada uma dessas perdas na resposta do Atuadores Piezoelétricos (PEA).

O estudo buscou a partir do fator de qualidade a otimização do PEA considerando as diferentes perdas combinadas. Essa análise permitiu avaliar de forma integrada os efeitos das perdas e sua influência no desempenho do dispositivo.

Para os estudos empregou-se uma pilha retangular com 6 transdutores, visto na Figura 10, em que foi verificado o comportamento nas assinaturas de impedância do conjunto quanto a mudança do parâmetro de perda elástica, coeficiente de amortecimento e perda dielétrica.

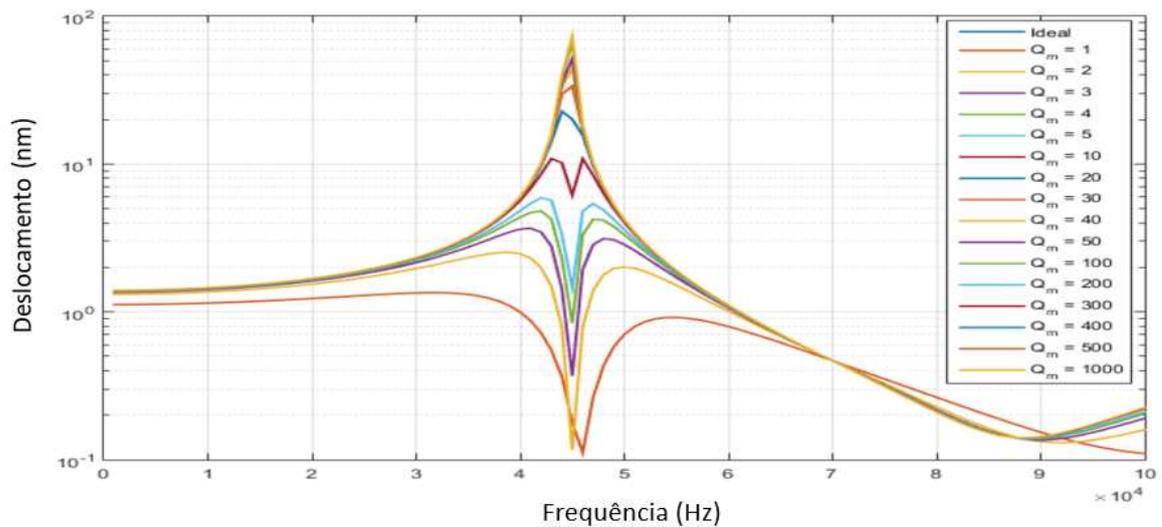
Figura 10 - Geometria do conjunto de transdutores.



Fonte: Espinosa (2021)

Após realizar simulações variando o amortecimento, constatou-se que esse fator exerce uma influência direta no deslocamento do transdutor. Valores mais baixos do fator de qualidade ideal resultaram em deslocamentos fora da curva de ressonância (Figura 11). Para a coleta de energia, valores de qualidade abaixo de 20 mostraram-se ideais, enquanto valores superiores foram considerados adequados para projetos com cargas mais pesadas.

Figura 11 - Deslocamento do transdutor.



Fonte: Espinosa (2021)

Outro ponto discutido foi que perda dielétrica tem pouco efeito sobre o deslocamento mecânico. No entanto, a perda dielétrica afeta significativamente a magnitude da impedância no pico de antirressonância.

3. MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais compósitos consistem na combinação de materiais distintos os quais são combinados para modificação de um ou mais aspectos com a finalidade da melhora do desempenho de características mecânicas, físicas, entre outras.

A união de diferentes materiais pode resultar em um compósito com propriedades que não seriam possíveis de serem obtidas individualmente pelos componentes isolados. A combinação pode conferir ao material compósito características como maior resistência, rigidez, tenacidade ou mesmo propriedades multifuncionais que possibilitem aplicações diversas (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

A norma ASTM D3878 (2020) define que o material composto é uma substância que deriva da origem de dois ou mais materiais, insolúveis entre si e que quando combinados formam um material com características que não apresentavam nos seus constituintes. Ainda segundo a mesma norma, o material compósito é inerte e não homogêneo ao nível microscópico, mas pode ser considerado homogêneo quando se analisa em uma escala macroscópica.

Os compósitos contêm as fases de matriz e reforço e entre essas fases está presente a zona de transição a qual é de suma importância o desempenho para que a se tenha uma eficiência na transferência dos esforços.

Segundo Tsuruta (2008) os compósitos são classificados conforme o tipo de material de reforço utilizado, sendo que os principais são fibras, particulados e laminares. Cada tipo de reforço confere propriedades específicas ao material compósito resultante.

A avaliação por meio da MEF pode ser significativamente afetada por mudanças na sua distribuição, por exemplo as características mecânicas dos compósitos de concreto são dependentes do conjunto dos elementos inseridos no mesmo e como está a distribuição. Embora o modelo seja baseado em dados estatísticos quanto à forma e à dispersão dos componentes do concreto, é importante considerar que a sua natureza não homogênea pode gerar variações significativas em relação aos materiais isotrópicos tais como alumínio.

Considerando a análise de compósitos, é importante compreender as características do cimento e suas interações com outros materiais a fim de melhorar as propriedades, uma vez que o cimento desempenha um papel central sendo o elemento monitorado.

3.1. CONCRETO

O cimento Portland é amplamente utilizado na construção civil, devido às suas propriedades aglomerantes e aglutinantes que o tornam ideal para a produção de concretos e argamassas, facilidade da disponibilidade da matéria-prima, além da facilidade de aplicação frente a outras técnicas que podem se apresentar onerosas. Quando combinado com água, o cimento sofre um processo de hidratação que resulta em um endurecimento progressivo da mistura, conferindo-lhe uma forma fixa e resistência mecânica adequada para as aplicações em construção.

A resistência de um material é definida pela tensão requerida para o seu rompimento. No caso dos materiais cimentícios, a teoria de tensão é empregada no dimensionamento, onde a resistência está intrinsecamente ligada ao processo de hidratação, que ocorre de forma gradual e lenta (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Embora o concreto apresente resistência mecânica conforme a sua evolução, sua fragilidade tem origem na baixa resistência a tração e a sua capacidade a deformação. Segundo Silva, Ribeiro e Macedo (2015), essas falhas de tração estão associadas a falhas pré-existentes, sendo estas microfissuras. A elaboração de modelos comportamentais é complexa devido aos fatores da alta complexidade da microestrutura e heterogeneidade que o concreto apresenta, ficando evidente quando se observa a um nível microscópico.

Segundo Mehta e Monteiro (2008) a existência de vazios na matriz da pasta e na zona de transição, sendo esse um dos fatores determinantes da resistência. A relação água/cimento, o tipo de cimento, o adensamento e a cura são alguns dos fatores que influenciam a porosidade do concreto, portanto, sua resistência e durabilidade.

A adição de compostos para melhoria da matriz possibilita ganho na resistência, elementos de alta resistência, como fibras de aço ou polímeros reforçados com fibra de carbono, podem aumentar a resistência à tração do compósito. Visto a importância na compreensão da integridade do concreto na construção, a análise do desempenho se torna necessária e importante para avaliação das condições de deterioração e evolução de possíveis imperfeições, visto a implicação socioeconômica atrelada a durabilidade.

3.1.1. Deterioração

A compreensão da evolução dos mecanismos de deterioração do concreto pode fornecer informações importantes quanto as melhores configurações de implementação do

monitoramento visto que se tem um processo evolutivo. Os agentes de deterioração são compostos por fatores naturais, esforços externos e/ou internos, problemas com execução e utilização, aos quais podem agir isoladamente ou ser o conjunto de ação simultânea. (ARANHA, 1994).

Entre as causas físicas da deterioração do concreto temos o desgaste superficial causado por abrasão, erosão e cavitação e pela fissuração temos a variação de volumétricas advinda do gradiente de temperatura e umidade, carregamento estrutural com origem em sobrecarga, impacto e carregamento cíclico e por fim, a exposição ao conjunto distinta temperaturas como o fogo e o ciclo de congelamento e descongelamento (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A ABNT NBR 6118:2014 classifica em três grupos as manifestações patológicas em específico quanto a mecanismo de deterioração da estrutura, sendo ela: mecanismos de envelhecimento e deterioração, deterioração de armadura e a deterioração da estrutura propriamente dita (Quadro 1).

Quadro 1 - Mecanismos de patologia.

Deterioração relativas ao concreto	Deterioração relativos à armadura	Deterioração da estrutura propriamente dita	
Lixiviação	Despassivação por carbonatação	Ações mecânicas	Retração
Expansão por sulfatos	Despassivação por ação de cloretos	Movimentações de origem térmica	Fluência
Reação álcali-agregado		Impactos	Relaxação
		Ações cíclicas	

Fonte: Adaptado ABNT NBR 6118 (2014)

3.1.2. Patologias: anomalias em elementos de concreto

A corrosão é uma das principais causas da deterioração, segundo Meire (2017) a corrosão age de maneira progressiva, na qual resulta na fissuração e desprendimento do concreto. Isso pode comprometer a integridade estrutural e a funcionalidade da construção. Tendo sua classificação em:

- Corrosão generalizada uniforme;
- Corrosão generalizada irregular;
- Corrosão localizada;
- Corrosão com formação pite;

- Corrosão com formação de fissuras.

Segundo Leite; Morais; Pedro (2022) a detecção desse fenômeno pode ser difícil nos estágios iniciais dependendo da técnica END empregada para análise, sendo visto já em estágios mais avançados.

Já trincas decorrem do desenvolvimento de esforço de tração de distintas origens, distinguindo-se de fissuras na dimensão. Segundo Gonçalves (2015) as fissuras afetam os elementos estruturais ao criar caminhos para que agentes agressivos penetrem de forma acelerada.

Também segundo Gonçalves (2015), o processo de deslocamento surge com o processo de corrosão no qual a manifestação não tratada progride junto a evolução da fissura, meio pelo qual agentes deteriorantes adentram e leva a desagregação do revestimento.

Existem vários outros mecanismos químicos e físicos que podem agir de forma isolada ou em combinação mútua, a qual podem levar a afeitos mais graves, aumentando a magnitude dos problemas e acelerando a degradação da estrutura. No entanto, tais mecanismos não serão abordados nesse trabalho.

3.1.3. Monitoramento

O conceito da patologia de acordo com Nazário (2021) é a ciência que analisa a origem, sintoma e a natureza das doenças na qual é levado em afeição o desenvolvimento e suas ocorrências futuras, no âmbito da construção empregasse a abordagem anterior, mas quanto ao funcionamento da estrutura. Esse tipo de análise tem se tornado cada vez mais importante para entender o processo de deterioração das estruturas.

A partir da segunda metade do século XX, começou a ser observado que estruturas com idades mais avançadas estavam apresentando anomalias decorrentes de deterioração. Para lidar com essa questão, foram necessários estudos mais aprofundados para identificar e entender os mecanismos que levam a esse tipo de problema. Esses estudos, por sua vez, promoveram a inclusão de normas e requisitos nos projetos visando a mitigação dos problemas e estimularam o desenvolvimento de estudos complementares com foco no monitoramento (CHIES, 2014).

Para a correção um dos pontos é a manutenção das estruturas de concreto que segundo Aranha (1994) é considerada o conjunto de ações que visa identificar e prevenir danos incipientes, nos casos em que se apresenta danos significativos, age evitando o comprometimento da estrutura. A origem parte de várias etapas do processo de construção e

está relacionada a etapas de custo do empreendimento, prazos curtos, falha no acompanhamento e controle tecnológico da matéria-prima.

Os estudos de técnicas END junto a estudos em matrizes cimentícias potencializam as possibilidades de prever a integridade do material, possibilitando a manutenção, sendo empregados como prognóstico para análise e busca da estimativa da evolução de problemas patológicos, tendo como umas das características obtidas a estimativa da resistência.

Capineri e Bulletti (2021) citam que as técnicas END avaliam as propriedades de um material, componente ou sistemas, sendo as mesmas frequentemente realizadas em laboratórios ou no local de estudo, mas seguindo um cronograma visto que não estão implementadas a um sistema.

Tem-se a existência de duas classes de método que podem ser empregados, a primeira consiste em métodos nos quais se estima a resistência por meio de ensaio de dureza superficial, resistência à penetração e maturidade. Já a segunda classe é a mensuração de outras característica e/ou defeitos internos por meio de propagação de ondas e termografia (CHIES, 2014).

Entre os vários ensaios tem-se, comumente:

- Inspeção visual;
- Líquidos penetrantes;
- Partículas magnéticas;
- Ultrassom;
- Radiografia Industrial;
- Correntes parasitas.

A escolha da técnica a ser empregada varia para cada empreendimento, onde é levado em consideração aspectos como material a ser analisado, equipamentos e a mão de obra especializada para manuseio e análise. Este trabalho se concentra principalmente no método de impedância eletromecânica, por isso, não serão discutidas outras especificidades dos métodos listados.

4. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Neste capítulo, são apresentadas as etapas para simular o *design* de dispositivos piezoelétricos usando análises de impedância baseadas em mecânica estrutural. O MEF é empregado para a simulação matemática de fenômenos físicos complexos. De forma geral os *softwares* apresentam as mesmas configurações, podendo apresentar algumas variações nos nomes apresentados e menus de acesso, mas parte dos mesmos fatores para serem ajustados.

A ferramenta que fomenta este trabalho é o COMSOL, programa comercial que trabalha com o MEF na qual é modelado distintos tipos de simulação tais como estrutura mecânica, plasma, ótica, transferência de calor, estequiometria, entre outras aplicações física e engenharia.

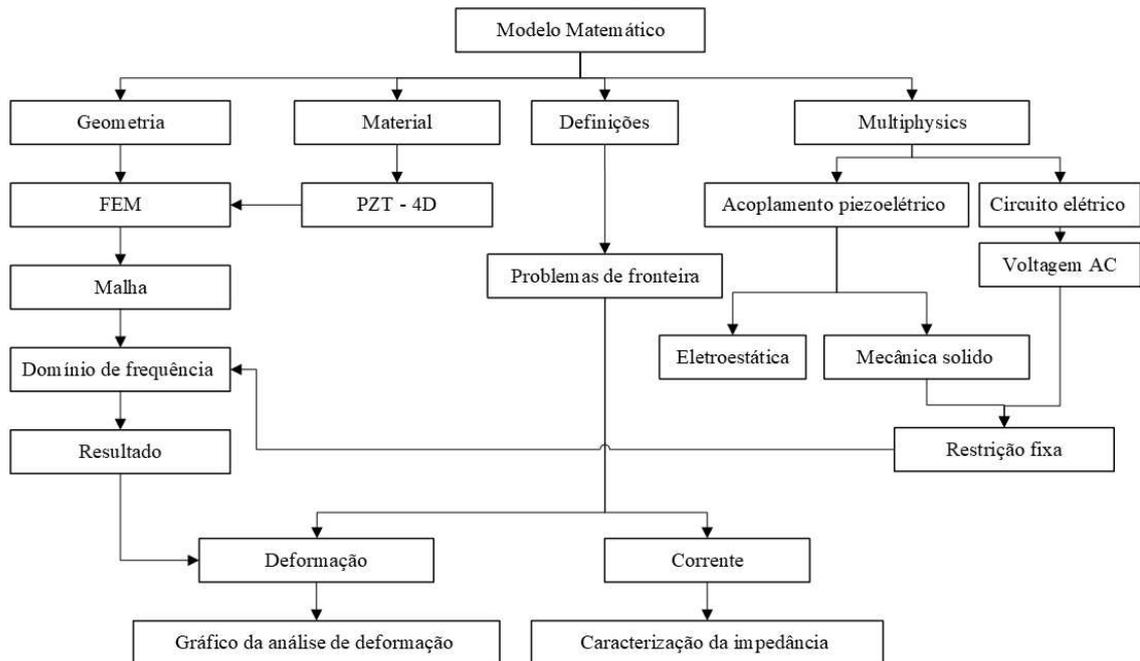
4.1. MODELAGEM

Segundo Aline e Lemos (2019) para a realização de uma simulação computacional, as seguintes etapas devem ser seguidas:

- Definição espacial do problema;
- Definição da física do problema;
- Definição da geometria do problema;
- Seleção e especificação dos materiais e propriedades;
- Escolha de malha;
- Cálculo e apresentação dos resultados.

A Figura 12 dispõe de um fluxograma proposto por Espinosa (2021) que define quais módulos estarão presentes nesta pesquisa.

Figura 12 - Processo dinâmico da simulação de elemento finito adaptado.



Fonte: Adaptado de Espinosa (2021)

O estudo do modelo matemático é conduzido no domínio de frequência, permitindo a análise em frequências definidas e configurando a progressão do desenvolvimento. Além disso, o modelo de excitação harmônica pode ser utilizado para analisar os padrões que apresentam as maiores deformações. Esse método possibilita uma análise mais precisa e completa do modelo, sendo útil em diversas áreas de pesquisa e desenvolvimento. Os nós que contemplam os materiais piezoelétricos no que tange as suas propriedades são:

- Amortecimento mecânico
- Perda de acoplamento
- Perda dielétrica
- Perda por condução (harmônica no tempo)

Para a simulação é empregado o módulo de estrutura usando o efeito piezoelétrico na modelagem. Os parâmetros dos transdutores segundo a conversão no *software* de MEF, sendo definidos pelas Eq. (10) (11).

$$S = \frac{T}{C_E} + d^T E \quad (10)$$

$$D = dT + \epsilon_T E \quad (11)$$

No qual temos:

S é o vetor de deformação (6x1);

T é a tensão (6x1) em Pa;

C_E é a matriz de elasticidade em (6x6) em Pa,

E é o vetor de campo elétrico (3x1) em Volt/m,

D é o vetor de deslocamento elétrico em C/m²;

d^T é o coeficiente piezoelétrico em m/Volt;

d é o deslocamento elétrico por unidade de tensão em campo elétrico (3x6) em C/N;

ϵ_T é a permissividade dielétrica (3x3) em Farad/m.

Além das propriedades dos transdutores que devem ser previamente definidas, é possível ainda alterar outros fatores a partir de equações pré-definidas pelo *software* por meio dos submenus, sendo eles: fator de amortecimento, perda dielétricas, perda de acoplamento, mudança de voltagem. Esses ajustes podem ser controlados ou seguirem o valor padrão influenciando no comportamento da impedância.

4.1.1. Influência dos fatores de amortecimento

O amortecimento mecânico (às vezes representado como amortecimento do material, amortecimento estrutural ou histerético) representa as perdas mecânicas do material piezoelétrico por meio do uso do fator de perda de dados do material para rigidez ou amortecimento de Rayleigh. A equação de amortecimento é definida como inversamente relacionada ao fator de qualidade mecânica (Q_m) Eq. (12).

$$\eta_s = \frac{1}{2Q_m} \quad (12)$$

Onde:

η_s : Amortecimento mecânico;

Q_m : Fator de qualidade mecânica.

4.1.2. Perda dielétrica

Segundo Espinosa (2021) a Perda Dielétrica possibilita a modelagem de perdas elétricas em transdutores. Essas perdas podem ser prescritas usando um fator de perda para a

permissividade elétrica ou na forma de dispersão dielétrica. O fator de perda para as perdas dielétricas no material corresponde ao fator de perda para a permissividade elétrica sob estresse constante Eq. (13).

$$\eta_{\varepsilon} = \frac{1}{Q_E} \quad (13)$$

Onde:

η_{ε} : Perda dielétrica ou fator de dispersão;

Q_E : Fator de qualidade elétrica do material.

4.1.3. Perda de acoplamento

A perda de acoplamento possibilita a modelagem de perdas no acoplamento de transdutores, utilizando os dados do fator de perda do material para a matriz de acoplamento (3x6) ou como amortecimento proporcional de Rayleigh. O fator da perda no acoplamento é importante para otimizar o desempenho do transdutor. A matriz que expressa a perda é dada pela Eq. (14).

$$[d''] = \begin{bmatrix} d_{12} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Onde:

d'' : Fator de perda constante do acoplamento do transdutor

4.1.4. Voltagem

O controle voltagem permite a configuração de circuito e a implementação do mesmo para geração de excitação. Nesse estudo é empregado a variação para distintas voltagens para análise comportamental do conjunto no domínio de frequência. Já na análise harmônica, em que se tem a máxima deformação, a voltagem não é necessária visto que o *software* simula de forma autônoma.

4.1.5. Análise da espessura do revestimento

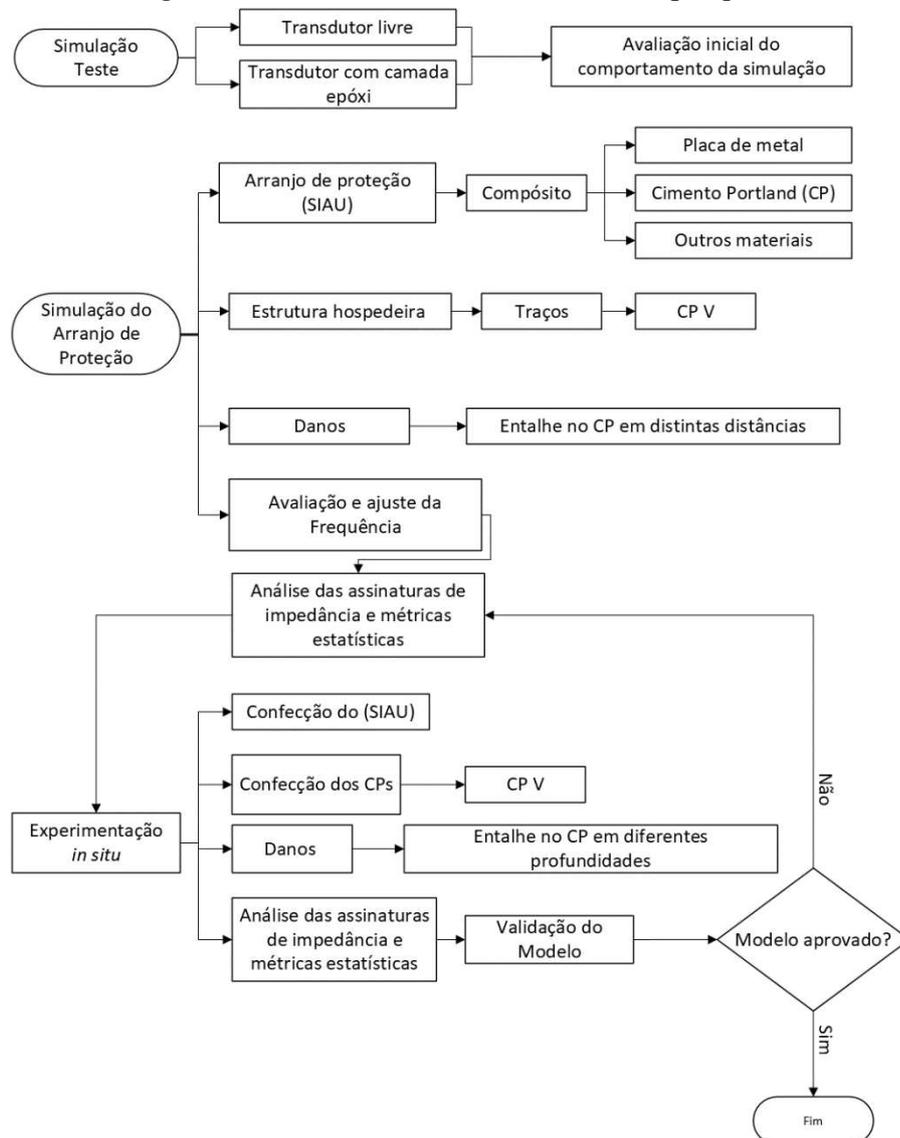
A malha gerada pelo programa de MEF para cada modelo é construída gradualmente, partindo do modelo mais simples utilizando uma malha livre de elementos finos até chegar à densificação da espessura na qual não apresente resultados discrepantes com a maior densificação. A análise da resposta resultante é fundamental para a escolha da replicabilidade do modelo e para verificar sua influência.

Além disso, a escolha do tipo de malha adequado é crucial para garantir a precisão e a eficiência da simulação. Uma malha simples pode levar a resultados imprecisos por não representar corretamente os efeitos, enquanto uma malha mais robusta pode aumentar significativamente o tempo de processamento, se tornando oneroso para prosseguir com o processamento. Portanto, é importante encontrar um equilíbrio entre a precisão e a eficiência da simulação.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, apresenta-se a análise e aplicação do método ISHM. Será conduzido um programa experimental para comparar a resposta obtida através da modelagem por MEF a fim de validar o método (FIGURA 13). A modelagem foi composta por três pontos principais. No estágio inicial, tem-se a simulação com testes, análise e experimentação para desenvolvimento do fluxo de construção da simulação. Em seguida, ocorreu a construção do arranjo por meio da simulação. Por fim, foi realizada a experimentação *in situ* do modelo simulado. Nesta pesquisa definiu-se como a Unidade de Análise de Integridade Estrutural (*Structural Integrity Analysis Unit – SIAU*), o arranjo que foi proposto.

Figura 13 - Fluxo de desenvolvimento da pesquisa.



A avaliação foi realizada inicialmente por meio de simulações computacionais para ajustar o comportamento da malha e as configurações de otimização do modelo. Após as correções iniciais, o modelo do transdutor piezolétrico foi testado com diferentes configurações no que se refere a materiais, com base na expansão do referencial teórico. As configurações incluem o uso de placas de metal e epóxi, além de outras possibilidades como pó de alumínio, pó de aço, cimento, fibras entre outras.

Os testes *in situ* envolvem a utilização de corpo de provas prismáticos confeccionados seguindo os padrões da ABNT NBR 5738:2015 e os padrões empregados no *software* no que tange a proteção do transdutor. Após a moldagem, foram introduzidos diferentes tipos de danos nos corpos de prova (CPs) para avaliar os efeitos na assinatura, realizou-se a verificação do comportamento da camada de proteção, doravante SIAU. Essa etapa foi de suma importância para garantir o melhor acoplamento do transdutor na estrutura, uma vez que falhas na interface do dispositivo com o meio circundante podem alterar consideravelmente a resposta coletada pelo transdutor.

5.1. SIMULAÇÃO TESTE

Para o entendimento e compreensão das limitações e configurações do *software*, seguiu-se o planejamento do fluxograma (Figura 13) para abordagem e teste de um modelo simples visando avaliar o conjunto de equações para aquisição das assinaturas de impedância. Foi utilizado na fase de experimentação e teste ANSYS®, COMSOL® e OnScale®, os quais foram citados durante a revisão, sendo o último da mesma companhia do ANSYS®. Foram testados modelos simples em todos os *softwares* e verificados as respostas de assinaturas para verificar o comportamento.

Dentre estes o COMSOL® se adequou melhor aos objetivos, pois apresentou resultados mais precisos e confiáveis em comparação aos outros *softwares* testados, visto que por permitir a simulação de fenômenos distintos, abrange uma análise mais robusta com um controle melhor sobre seu funcionamento. Outros fatos também influenciaram na escolha, tais como os seus módulos que já apresentam as matrizes dos materiais, permite rápida alteração das características e propriedades dos componentes sem a necessidade de programação, além de uma interface mais intuitiva e clara.

5.2. SIMULAÇÃO DO ARRANJO DE PROTEÇÃO

A unidade de detecção foi mantida dentro da estrutura estudada, partindo do primeiro ponto no qual reside o problema de acoplamento. Nesse sentido foi empregada a análise no ponto de acoplamento eletromecânico entre o arranjo de proteção do transdutor e a estrutura hospedeira, partindo assim para a verificação de respostas em diferentes situações. A partir das simulações, foram estabelecidos os modelos a serem empregados junto às análises de acoplamento.

A elaboração do SIAU parte da composição do arranjo, para tal execução o modelo segue a metodologia aplicada no capítulo 4. Os elementos foram agrupados de acordo com suas especificações no banco de dados existente, e quaisquer outras particularidades foram abordadas com base no referencial teórico.

5.2.1. Equacionamento

No COMSOL® o modelo sob análise de domínio de frequência não apresenta o fluxo final diretamente. Para tal, as informações dos dados processados devem ser separadas e configuradas para representar a saída correta e plotagem direta para a finalidade de análise. Uma das formas de expressar o cálculo do valor de impedância da corrente complexa é representada na Eq. (15).

$$Z = \frac{[V]}{(abs(bnd1))} \quad (15)$$

A entrada de informação “bnd1” corresponde ao ponto de análise superficial definido na configuração *boundary probe*, onde o valor avaliado é a carga por metro quadrado (C/m²) nos modelos 2D e no 3D a saída da informação é dada em ampere (A). Nessa configuração, a superfície do topo do modelo do transdutor foi selecionada como ponto monitorado para a geração de informações, em que a saída corresponde à corrente elétrica. A variável *abs* foi utilizada para calcular o valor absoluto de um número ou de uma expressão, como no caso deste modelo. A última entrada foi o valor de voltagem, que pode ser programada para um fluxo de teste ou fixada num valor constante, como neste modelo, em que é igual a 1V.

Outra forma de avaliação da impedância no conjunto foi a implementação do módulo de *electrical circuit* na qual foi possível configurar os aspectos de resistência além da voltagem

e do aterramento. A Eq. 16 foi empregada para o cálculo de impedância por meio do módulo *electrostatics*.

$$Z = \frac{(es.V0_1/es.I0_1)}{1} \quad (16)$$

Ainda foi possível realizar uma avaliação global das propriedades do material piezoelétrico por meio das Eq. 17 e 18, que forneceram, respectivamente, a impedância e a admitância. Essas equações possuem como base a propriedade de rigidez piezoelétrica do material, considerando a sua direção específica de deformação, configurada por padrão no eixo Z pelo *software* COMSOL®. Essa formulação permitiu uma análise mais completa das propriedades elétricas e mecânicas do material, sendo útil na modelagem e simulação de dispositivos piezoelétricos.

$$Z = \frac{V}{(es.Y11)} \quad (17)$$

$$Y = es.Y11 \quad (18)$$

A implementação final da formulação foi verificada e os resultados obtidos nos testes no COMSOL® foram comparados com os dados obtidos na literatura dos manuais e com base no fórum do *software*, confirmando a acurácia do modelo teste. Para simplificar o processo de configuração, foram selecionadas as Eq. 16 e 17, que permitem a avaliação da impedância e admitância, respectivamente. Essa escolha se deve à facilidade de implementação, uma vez que não foi necessário adicionar e configurar o circuito elétrico no módulo *electrical circuit*, já que essas equações fazem parte do módulo *electrostatics*, economizando tempo e recursos computacionais durante a simulação.

5.2.2. Propriedades para simulação e equação

A análise das Eq. 17 e 18 partiram do modelo experimental do trabalho de Gayakwad e Thiyagarajan (2022), no qual foi possível entender se as respostas foram decisivas. As

propriedades do transdutor empregado foram avaliadas. A Tabela 2 apresenta as propriedades as quais foram utilizadas nas simulações.

Tabela 2. Propriedades do PZT 4D

Parâmetros	Valor
Densidade ρ [kg/m ³]	7500
Razão de Poisson ν	0,3
Taxa de amortecimento ζ	0,012
Fator de perda dielétrica δ	0,0169
Matriz de elasticidade [Pa]	$\begin{bmatrix} 1,20 \times 10^{11} & 7,51 \times 10^{10} & 7,50 \times 10^{10} & 0 & 0 & 0 \\ 7,51 \times 10^{10} & 1,20 \times 10^{11} & 7,51 \times 10^{10} & 0 & 0 & 0 \\ 7,51 \times 10^{10} & 7,50 \times 10^{10} & 1,10 \times 10^{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,10 \times 10^{10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,10 \times 10^{10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2,25 \times 10^{10} \end{bmatrix}$
Matrix de acoplamento [C/m ²]	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 12,29 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 12,29 & 0 & 0 \\ -5,35 & -5,35 & 15,78 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Permissividade relativa	$\begin{bmatrix} 919,1 & 0 & 0 \\ 0 & 919,1 & 0 \\ 0 & 0 & 826,6 \end{bmatrix}$

Autor: COMSOL (2022)

Para o isolamento do transdutor foi empregada a resina epóxi Bisfenol A como material base de revestimento do SIAU. A Tabela 3 apresenta os dados utilizados para os campos de propriedade do elemento na modelagem MEF.

Tabela 3 . Propriedades da resina epóxi.

Parâmetros	Variável	Valor
Módulo de Young	E	2 GPa
Densidade	ρ	1250 kg/m ³
Razão de Poisson	ν	0,40

Fonte: Gayakwad e Thiyagarajan (2022)

5.2.3. Geometria

Avaliar a geometria foi importante para facilitar a utilização dos resultados. O uso da malha por meio do MEF possibilitou a aplicação de algoritmos e cálculo de equações. A geometria aplicada para análises pode ser triangular e retangular para os modelos 2D e *Tetrahedral* e *Hexahedral* em 3D. Para análise completa foi escolhido a 3D, acarretando um custo computacional maior, porém o modelo se apresentou mais detalhado visto a não linearidade do transdutor.

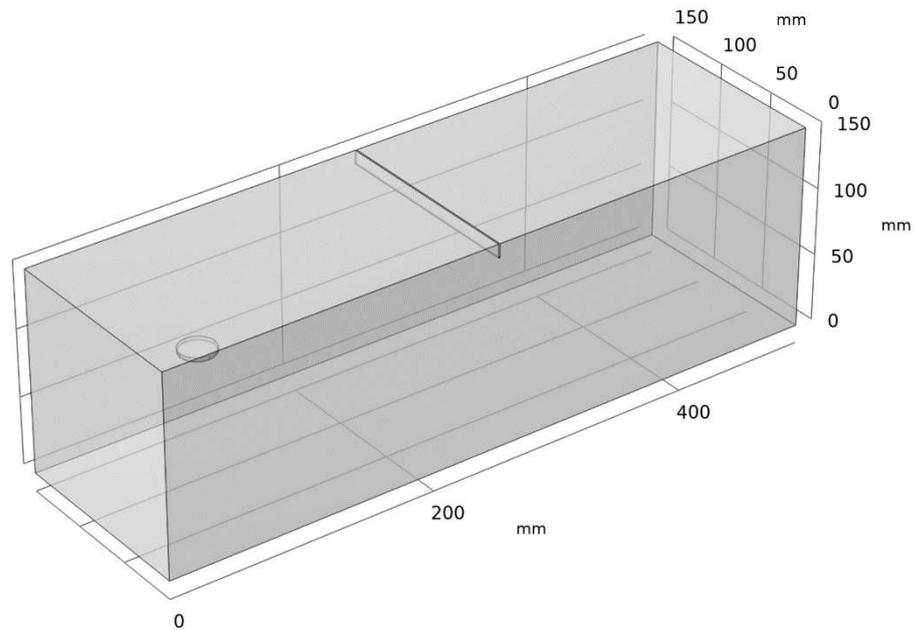
Para a elaboração da geometria foi empregado o uso computacional de um notebook *Alienware M17 R3*, com Intel Core i7 10750H de 10ª Geração e uma memória RAM de 16.0GB. As ferramentas utilizadas na configuração da malha seguem a Figura 11, na qual é possível verificar todas as entradas que antecedem o processo de modelagem.

Inicialmente, foi escolhida uma seção simples estática para ser utilizada nos modelos de análise de espessura, revestimento e incremento de placa. Para as simulações, foi considerada uma malha regular, considerando os seguintes aspectos:

- Convergência: a malha deve ser fina o suficiente para que a solução se aproxime da solução exata.
- Qualidade da malha: a malha deve ser uniforme e sem elementos com formas irregulares, para evitar erros numéricos.
- Representação correta da geometria: a malha deve representar fielmente a geometria real do objeto.
- Custo computacional: a malha deve ser fina o suficiente para garantir a precisão, mas não tão fina a ponto de tornar as simulações inviáveis.
- Material de revestimento: a malha deve ser adaptada às características do material de revestimento, para que os resultados sejam precisos.

Para a análise de danos, efetuou-se entalhes com variações de sua posição. O ponto inicial foi de 0mm como *baseline*, sendo centralizado do elemento de estudo, como visto na Figura 14. Posteriormente, definiu-se a evolução de dano com profundidades de 10, 20 e 30mm.

Figura 14 – Modelo 3D do corpo de prova com entalhe.

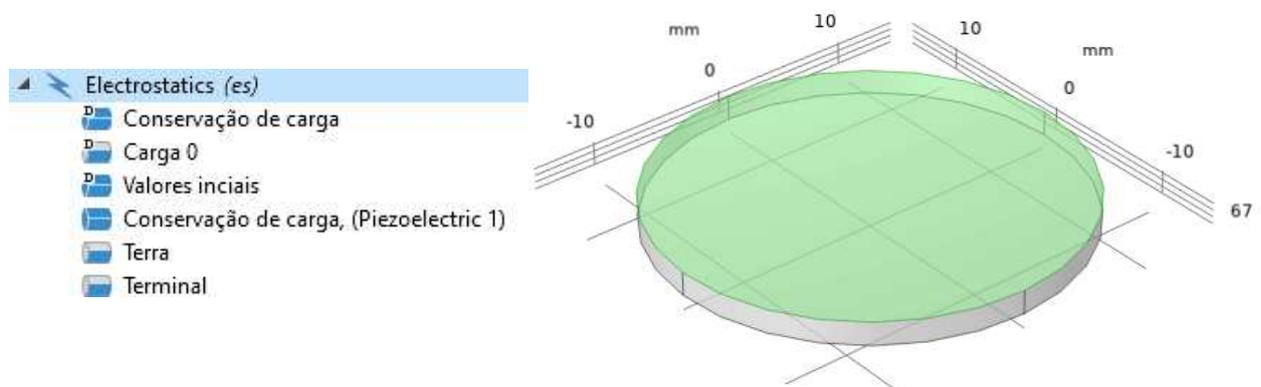


Fonte: Autor

5.2.4. Voltagem

O sistema de análise do COMSOL permite a entrada de voltagem de formas distintas o qual possibilita diferentes condições. A figura 15 apresenta o modelo de implementação de voltagem empregado.

Figura 15 – Modelo de definição dos campos de voltagem.



Fonte: Autor

Os valores iniciais são os valores dos campos elétricos e de potencial elétrico no início da simulação. Os valores iniciais podem ser especificados para cada domínio ou superfície no modelo:

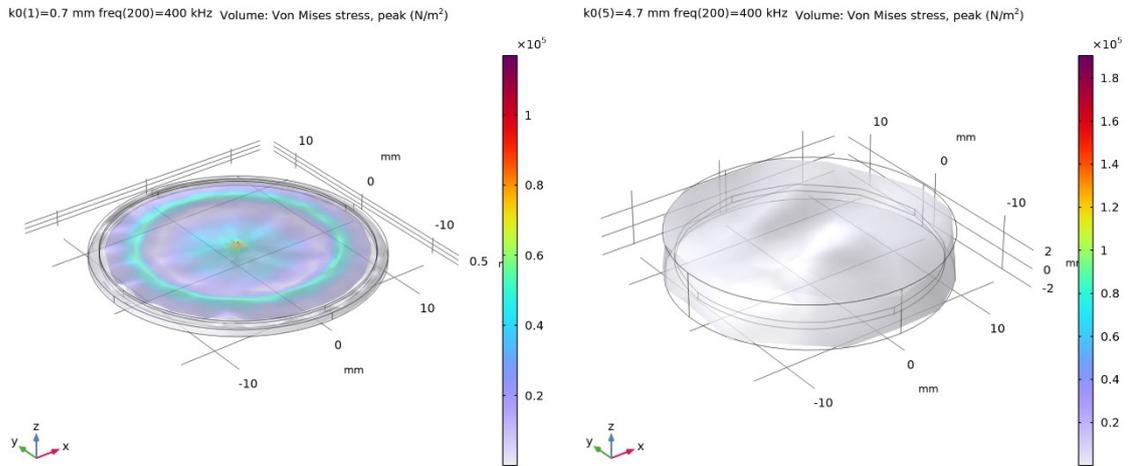
- Conservação de carga - A equação de Poisson-Boltzmann é uma equação diferencial parcial que descreve o campo elétrico em um meio dielétrico.
- Carga 0 - A carga 0 é um valor de carga elétrica que é usado para inicializar a solução da equação de Poisson-Boltzmann.
- Valores iniciais - são os valores dos campos elétricos e de potencial elétrico no início da simulação. Os valores iniciais podem ser especificados para cada domínio ou superfície no modelo.
- Conservação de carga piezoelétrica - é uma lei fundamental da física que afirma que a carga elétrica total em um material piezoelétrico é constante.
- Terra - é uma superfície considerada com potencial elétrico de zero. A terra é frequentemente usada como uma superfície de referência para definir os valores iniciais dos campos elétricos.
- Terminal - Um terminal é uma superfície que é usada para aplicar uma fonte de tensão elétrica. O terminal é usado para aplicar uma fonte de tensão elétrica à simulação.

No modelo, o terminal de entrada de voltagem está localizado no topo e o terra está localizado na parte inferior. Os demais valores seguem sem alteração visto que no modelo não é necessária a alteração.

5.2.5. Revestimento de proteção

A espessura do revestimento de proteção no PZT afeta o desempenho do material de várias maneiras. Em geral, um revestimento mais espesso fornecerá maior proteção contra danos mecânicos, ambientais e químicos. No entanto, um revestimento mais espesso também pode aumentar a resistência elétrica do material, o que pode reduzir sua eficiência. A Figura 16, apresenta a mudança de espessura para esta pesquisa, sendo 1,7mm a 4,7mm.

Figura 16 – Deformação do transdutor com revestimento em diferentes espessuras: a) 0,7mm do epóxi b) 4,7mm de epóxi



Fonte: Autor

As condições de *stress* podem ser vistas nos dois modelos, sendo essa a forma por unidade de área do material na qual temos a medida de resistência do material a deformação. Foi notório que o revestimento menor deduziu uma maior deformação a qual facilitou a propagação de vibrações. Já no segundo caso a maior espessura acarretou numa menor deformação e conseqüentemente promoveu perda de sensibilidade em detrimento do aumento da resistência.

No caso do revestimento de epóxi, a deformação foi maior devido à menor rigidez da matriz. Isso permitiu que as vibrações se propaguem mais facilmente, o que pode ser benéfico em aplicações que requerem amortecimento. No entanto, também pode ser prejudicial em aplicações que requerem sensibilidade, como sensores.

No caso do revestimento de epóxi e fibra de carbono, a possibilidade de deformação menor devido à maior rigidez da matriz, implicou na possível redução à propagação de vibrações, o que pode ser benéfico em aplicações que requerem sensibilidade. No entanto, também pode ser prejudicial em aplicações que requerem amortecimento. Para avaliação do mesmo a Tabela 4 apresenta a matriz empregada na modelagem.

Tabela 4. Propriedades da resina epóxi com reforço com carbono

Parâmetros	Variável	Valor
Matrix de elasticidade	{D11,D12,D13,	{141.34,3.35,3.35,
	D22,D23,D33,	10.25,2.83,10.25,
	D44,D55,D66}	4.52,2.95,4.52} GPa
Densidade	ρ	1520 kg/m ³

Razão de Poisson

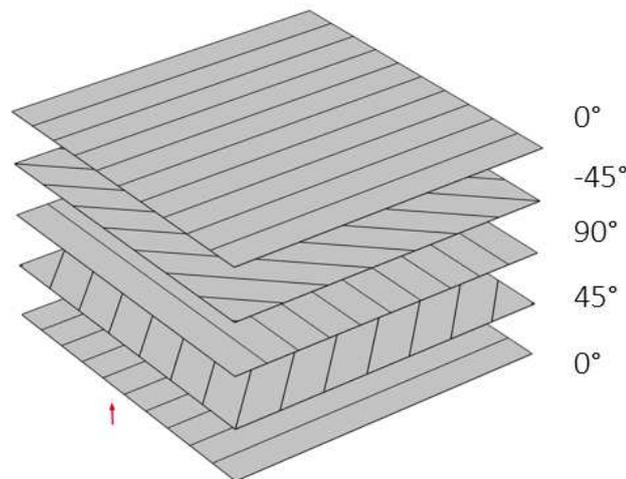
v

0,40

Fonte: COMSOL (2023)

Devido a estrutura o mesmo seguiu o método laminado antissimétrico, ao qual seguiu os fatores apresentados pelo próprio manual de uso. A Figura 17 apresenta a representação das possíveis disposições em que o conjunto pode ser alinhado.

Figura 17 – Sequência de empilhamento da fibra de carbono.



Autor: COMSOL (2022)

Para a análise foi empregado o modelo de empilhamento de camadas de fibra de carbono balanceado com a camada a 45° e 45°/90°/0° para um melhor posicionamento do conjunto de fibra de carbono junto ao epóxi, seguindo um sequenciamento padrão e homogêneo nas camadas visando a verificação de assinatura de impedância tendo a espessura padrão 1mm a 5mm.

Ainda na modelagem com MEF com relação a parte de proteção, a placa de material metálico a ser empregada inicialmente como elemento de estudo junto aos outros materiais tem suas propriedades descritas na Tabela 5 e 6.

Tabela 5. Propriedades do Alumínio

Parâmetros	Variável	Valor
Módulo de Young	E	70 GPa
Densidade	ρ	2700 kg/m ³
Razão de Poisson	v	0,33

Fonte: Gayakwad e Thiyagarajan (2022)

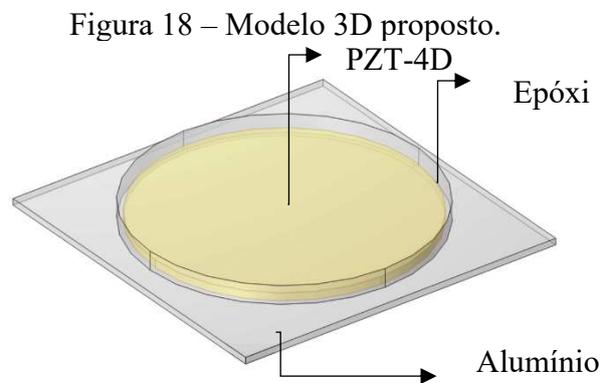
Tabela 6. Propriedades do Aço

Parâmetros	Variável	Valor
Módulo de Young	E	200 GPa
Densidade	ρ	7850 kg/m ³
Razão de Poisson	ν	0,30

Fonte: COMSOL (2022)

Para análise numérica foi empregado um modelo livre para avaliação da resposta, sendo usado o PZT de Ø25mm de diâmetro e 0.7mm de espessura. A coleta da assinatura foi realizada com uma voltagem configurada de 1V e dentro da faixa de frequência de 10kHz a 400kHz. Um transdutor com as mesmas especificações empregadas no MEF foi ensaiado em bancada para verificação das configurações e ajuste.

A Figura 18 demonstra a estrutura proposta para criação do SIAU *Structural Integrity Analysis Unit* (Unidade de Análise de Integridade Estrutural) a qual é composta de um conjunto de placa de alumínio com espessura de 0,6 mm e dimensões de 30x30 mm, epóxi e PZT-4D.



Fonte: Autor

Para simulação foi utilizado um corpo de prova prismático de concreto com 500 mm de comprimento, 150 mm de largura e 150 mm de altura. O arranjo experimental foi avaliado utilizando MEF para analisar o comportamento do sistema sob diferentes condições de danos, mantendo o PZT dentro da estrutura para avaliação. A avaliação do comportamento do arranjo foi verificada com epóxi e com SIAU.

5.3. EXPERIMENTAÇÃO IN SITU

Nesta seção é apresentada o modelo de arranjo composto por resina epóxi e placa de alumínio proposto com base na análise da simulação MEF, seguindo as características apresentadas na seção anterior. Esse arranjo foi moldado em laboratório e submetido a testes de funcionamento. A disposição do SIAU seguirá o esquema da terceira malha de teste vista na Figura 19.

Para o monitoramento após os 28 dias de cura, foram gerados danos replicando o que foi inserido na simulação dos dados.

Após a obtenção das assinaturas de impedância, os valores foram processados e organizados para a aplicação das técnicas de métricas estatísticas visando avaliar a reprodutibilidade da simulação e comparar a eficiência da nova proposta. Essas técnicas permitiram analisar o desempenho do método em termos de sensibilidade, precisão e especificidade na detecção de danos. Além disso, foram avaliados os limites de detecção e a capacidade de discriminação do método em diferentes níveis de danos.

A Quadro 2 apresenta a composição de materiais para a produção da estrutura hospedeira. Os procedimentos empregados para a confecção da estrutura hospedeira estão descritos na ABNT NBR 5738: 2015.

Quadro 2 - Traço de materiais da estrutura hospedeira.

Grupo	Resistência média alvo aos 28 dias (MPa)	Abatimento (mm)	Traço	Tipo de cimento	Teor de aditivo	Número de amostras
A	30	210 ± 30	1:1,83:2,82:0,49	CP V - ARI	0,50%	3
B	60		1:1,3:2,3:0,33	CP V - ARI	0,70%	3

Fonte: Arantes (2021).

5.3.1. Agregado

Para esta pesquisa foi escolhida areia natural quartzosa com granulação fina e média como agregado miúdo, e a brita 0 de origem basáltica foi utilizada como agregado graúdo.

5.3.2. Aditivo

Para o aditivo líquido optou-se pelo tipo superplastificante *MASTERGLENIUM® 51*, para atingir as mesmas propriedades do concreto de Arantes (2021). Esse composto contém Éter policarboxílico modificados, livre de cloretos que reduzem a quantidade de água necessária

(40% aproximadamente), com recomendação pelo fabricante de 0,2% a 1,2% da massa do cimento.

5.3.3. *Elaboração do transdutor*

A fragilidade dos PZTs, que pode ser agravada por vibrações e pressões durante a moldagem e cura, exige o uso de uma cápsula que garanta a correta sensibilidade sem perdas na verificação das variações mecânicas do material em análise. O método empregado por Silva (2017) serviu como base para a criação do SIAU. Esse método utiliza um revestimento de adesivo de resina epóxi, satisfatório para o monitoramento, pois resiste a esforços superiores a 100 MPa e temperaturas de até 80 °C. Observando-se o acréscimo presente na métricas MAPD vista na seção anterior, o arranjo se procedeu com o emprego de uma lâmina para melhoria das características do arranjo.

Para encapsular o SIAU, as placas de alumínio foram recortadas tendo as dimensões de 0,6 mm espessura média e uma área de 30x30 mm, visto na Figura 26. Em seguida, foram fixadas ao conjunto com uma fina camada de resina, assegurando a robustez necessária para a aplicação na região de contato entre a interface e o transdutor, posteriormente foi aplicada a resina epóxi para finalizar o encapsulamento. Já o conjunto com apenas resina seguiu-se a metodologia da referência citada anteriormente.

Após a completa cura do epóxi, com uma espessura média de 2 mm para o conjunto completo, as placas foram submetidas a ensaios para verificação de funcionamento (FIGURA 19).

Figura 19 – Espessura da placa de alumínio recortada.



Fonte: Autor

Figura 20 – Proteção do tradutor: a) espessura; b) modelo com e sem placa.



Fonte: Autor

O posicionamento seguiu o sentido paralelo em relação à maior seção do corpo de prova prismático. Foi empregado o SIAU e o modelo com revestimento simples com camada epóxi.

5.3.4. Teste de sinal do transdutor piezoelétrico

O transdutor piezoelétrico foi testado quanto à sua assinatura de impedância no estado livre para verificar a correspondência com seu modelo específico, a fim de comparar as propriedades do transdutor com o modelo computacional e observar a similaridade das assinaturas. O fio soldado foi conectado ao analisador de impedância *Agilent 4294A*. O Laboratório de Mecânica de Estruturas (LMEST) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) cedeu o equipamento para análise. As especificações do equipamento estão apresentadas na Tabela 7, enquanto a Figura 21 exhibe o equipamento juntamente com a assinatura de impedância coletada.

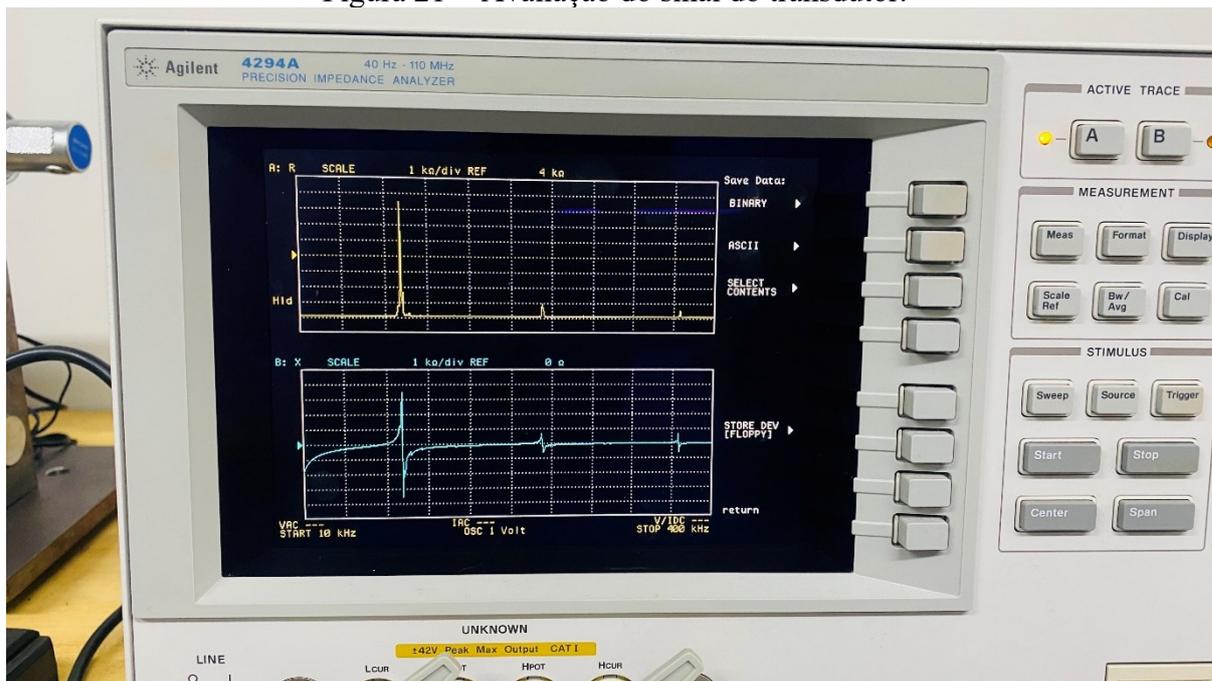
Tabela 7 - Dados do analisador de impedância.

Característica	Dados
Faixa de frequência	40Hz a 110 MHz
Precisão básica de impedância	+/- 0,08%
Intervalo de nível de sinal	5mV a 1V rms
	200 μ A a mA rms

Intervalo de viés DC	0V a +/- 40 V 0 mA a +/- 100 mA
Intervalo de temperatura de uso do equipamento	0 °C a 40 °C
Número de mensuração de pontos	2 a 801 pontos

Fonte: (TECHNOLOGIES, 2008)

Figura 21 - Avaliação do sinal do transdutor.



Fonte: Autor

A assinatura de impedância foi coletada para validar as especificações do transdutor na simulação. Inicialmente, a coleta foi realizada sem o uso de epóxi e sem aplicação de esforço mecânico. Posteriormente, uma força manual foi aplicada ao transdutor, resultando em mudanças nos picos da assinatura, embora as métricas correspondentes não tenham sido coletadas durante este último teste.

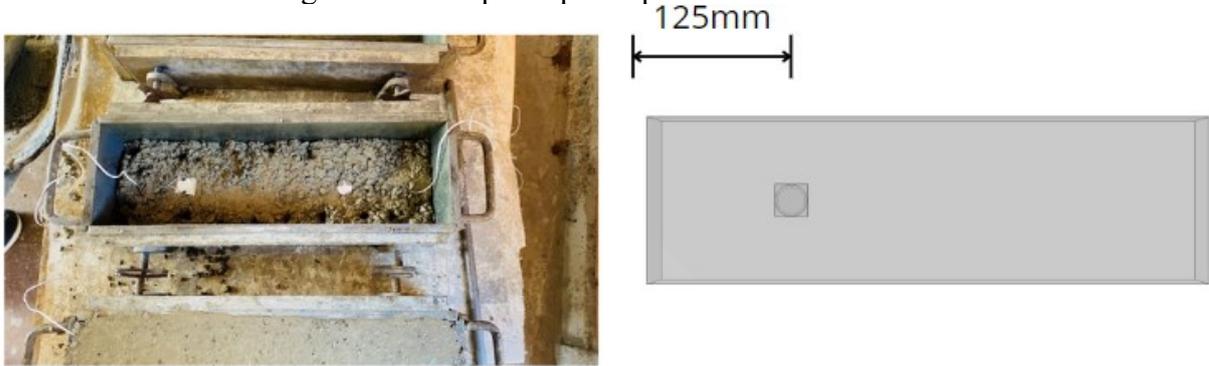
5.3.5. Moldagem dos corpos de prova

O traço A e B foram confeccionados em betoneiras estacionais com o cimento CP V – ARI e o aditivo foi dosado para o abatimento previamente estabelecido, sendo o mesmo de 210 ± 30 mm, sendo seguido as normas da ABNT NM 67:1998. Foram moldados para cada grupo, corpos de provas cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura: sendo 4 unidades para

o ensaio de compressão aos 28 dias e 2 prismáticos de 150 mm por 150 mm e 500 mm de comprimento, para os ensaios destrutivos com a inserção dos transdutores após 28 dias a fim de testar o SIAU.

O transdutor foi inserido na faixa longitudinal com espaçamento interno de 125 mm de distância das bordas a 0° do eixo horizontal, como visto na Figura 22. Esse posicionamento foi implementado visando distanciamento do eixo central, ao qual é a zona de aplicação de danos, além de considerar a influência de alteração e leves descolamentos seguindo as direções de descolamento laterais e longitudinais advindas do adensamento do concreto na forma.

Figura 22 - Corpo de prova prismático com SIAU.



Fonte: Autor

As amostras foram levadas à câmara úmida, na qual permaneceram por 24 horas. Após esse período as amostras foram desenformadas e permaneceram até a data de ensaio na câmara, visto que não era necessário o monitoramento nas idades iniciais, seguindo as normas da ABNT NBR 5738:2015. Após os 28 dias, os corpos de prova foram colocados por 2 dias em ambiente com temperatura constante de 25 °C ($\pm 0,5$ °C). Este período foi essencial para permitir estabilização da temperatura para os testes de funcionamento e ensaio.

5.4. GERAÇÃO DE DANOS E TESTES

Para a avaliação de danos na seção central dos corpos prismáticos, foi utilizada uma serra de mármore a úmido GDC 151 para realizar cortes precisos em diferentes profundidades. As assinaturas de impedância foram coletadas em cada profundidade utilizando dois transdutores diferentes: um SIAU e outro com proteção simples. Esta abordagem permitiu a

comparação detalhada das respostas de impedância eletromecânica entre os dois tipos de transdutores em diferentes condições de dano. A figura 23 apresenta o entalhe feito nos corpos de prova na seção central dos corpos de prova.

Figura 23 – Detalhe do entalhe na seção central do corpo de prova.



Fonte: Autor

6. RESULTADOS

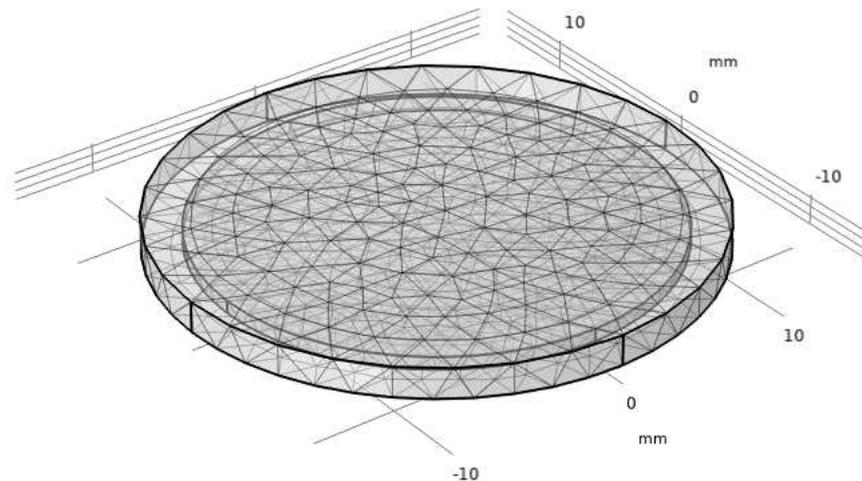
Nesta seção, são vistos três subitens: resultados das simulações, resultados experimentais e validação dos resultados. As análises do MEF incluem os parâmetros analisados individualmente e as implicações das escolhas feitas. Em seguida, são apresentados os resultados referentes às propriedades do concreto que são analisados e discutidos.

6.1. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

6.1.1. Qualidade da malha

Na simulação computacional, houve casos em que refinou-se a malha com incremento da placa metálica, alterando-a para camada do tipo fina. Isso ocorreu porque a malha fina tem elementos menores, que são necessários para representar com precisão as características da placa, sendo esses elementos grosseiros que não permitem regiões finas e bordas curtas. No entanto, a malha fina também leva a um maior tempo de processamento. A Figura 24, apresenta o transdutor piezelétrico na sua forma simples a qual conta apenas com o revestimento.

Figura 24 – Primeira malha.

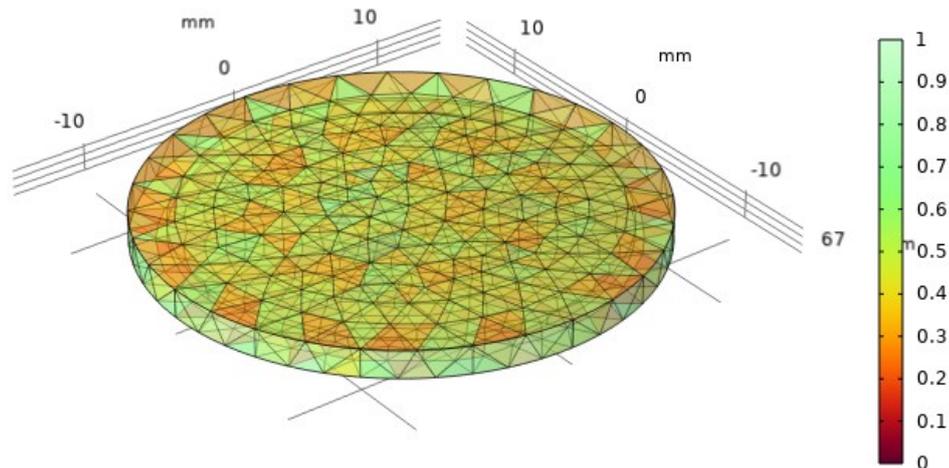


Fonte: Autor

A qualidade dos elementos criados pode ser caracterizada pela própria ferramenta, onde esse intervalo foi estabelecido na escala de 0 a 1, sendo que, valores próximos ao 1 corroboram para uma melhor representação dos elementos e valores próximos ao 0 apresentam elementos

degenerados. A Figura 25, apresenta os valores de qualidade de elemento presentes na primeira malha.

Figura 25 – Qualidade da malha do transdutor piezoelétrico com epóxi.



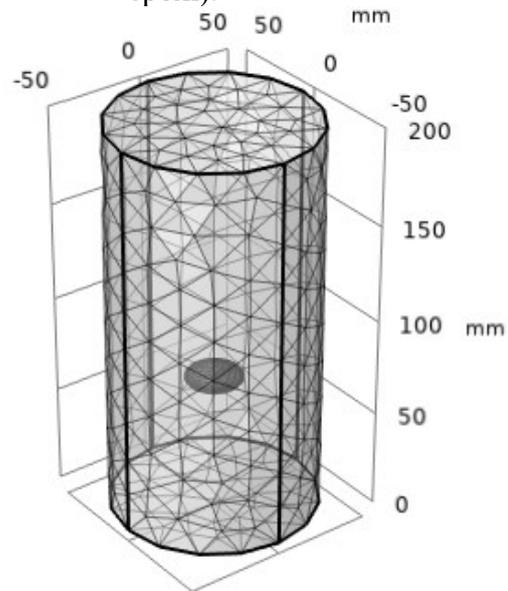
Fonte: Autor

A qualidade geral segundo o próprio *software* foi de 0.6573, essa média consegue representar com clareza os contornos sem a sobrecarregamento da densificação da malha para os elementos representados. O modelo apresenta 7.114 elementos, tendo como um volume de malha de 1.128 mm³. Pode-se inicialmente densificar a malha, mas para a estrutura atual não se torna necessário visto ao contorno representar bem sem grandes perdas.

O modelo, com a primeira malha, teve sua solução gastando 7h 59min, utilizando a memória física de 1,55 GB. Os resultados de impedância foram observados e comparados com a separação de uma única amostra das várias espessuras testadas e com a malha fina para definir se era necessário esse ajuste completo, no caso foi visto a não necessidade.

A segunda malha de teste, apresentada na Figura 26, constitui um total de 9.479 elementos, tendo um corpo de prova cilíndrico de 100mm de diâmetro por 200mm de altura, o qual o mesmo elemento, o epóxi e o transdutor anterior, mas mantendo a espessura fixa em 1,7mm para a camada de epóxi.

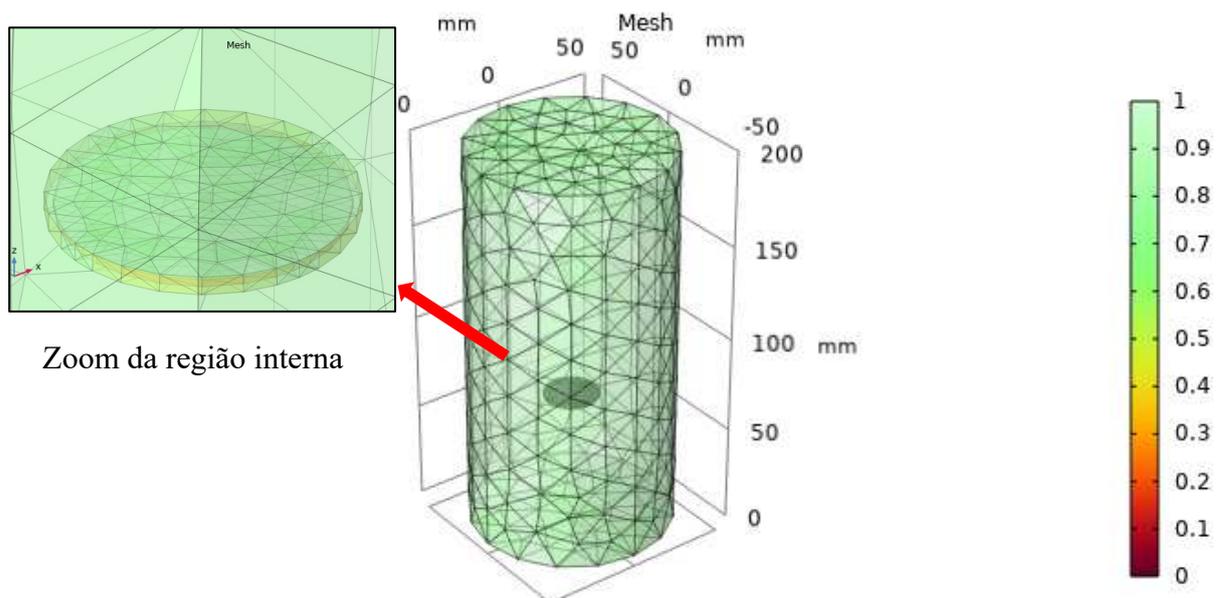
Figura 26 – Segunda malha de análise (prova cilíndrico com transdutor revestido de epóxi).



Fonte: Autor

Foi possível notar por meio da visualização 3D que existe uma densificação no entorno do transdutor e a malha externa com uma configuração de elementos menor. Seguindo a mesma premissa anterior verificou-se a malha por meio do gráfico. A Figura 27 apresenta o estudo de qualidade da segunda malha testada.

Figura 27 – Segunda malha de análise com índice de qualidade.



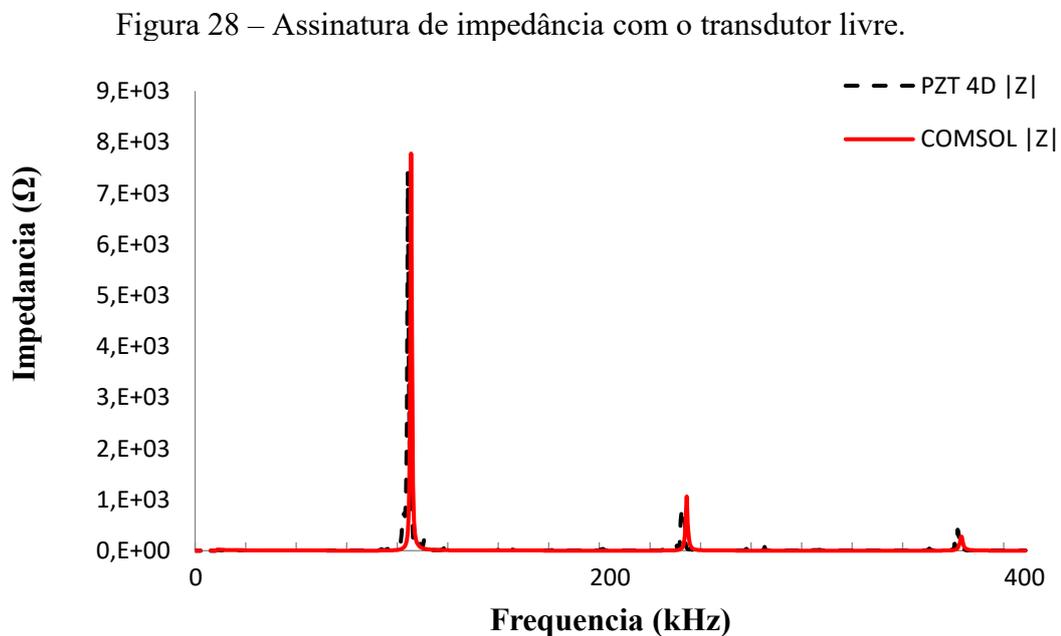
Fonte: Autor

Observou-se que a geração das curvas dos elementos tende a se densificar nos elementos menores, sendo o epóxi e o transdutor, a malha apresenta ter uma robustez menor. A qualidade da malha decaiu nesse ponto tendo como valor de 0,5873 segundo o *software*.

A terceira malha de análise consistiu no conjunto do transdutor piezoelétrico com a modificação do corpo de prova, nesse caso foi empregado o corpo de prova prismático 15x15x50cm, conforme ABNT NBR 5738:2015 . O arranjo foi modificado para o incremento de uma placa de alumínio junto ao restante do conjunto de epóxi e o transdutor conforme visto na Figura 26.

6.1.2. Respostas do transdutor livre e com proteção

A partir da coleta das assinaturas do transdutor, se elaborou-se um gráfico constatando os valores obtidos exportados pelo próprio equipamento, sendo obtidos 801 pontos utilizando o analisador de impedância Agilent 4294A junto ao modelo MEF para verificação do comportamento (Figura 28).

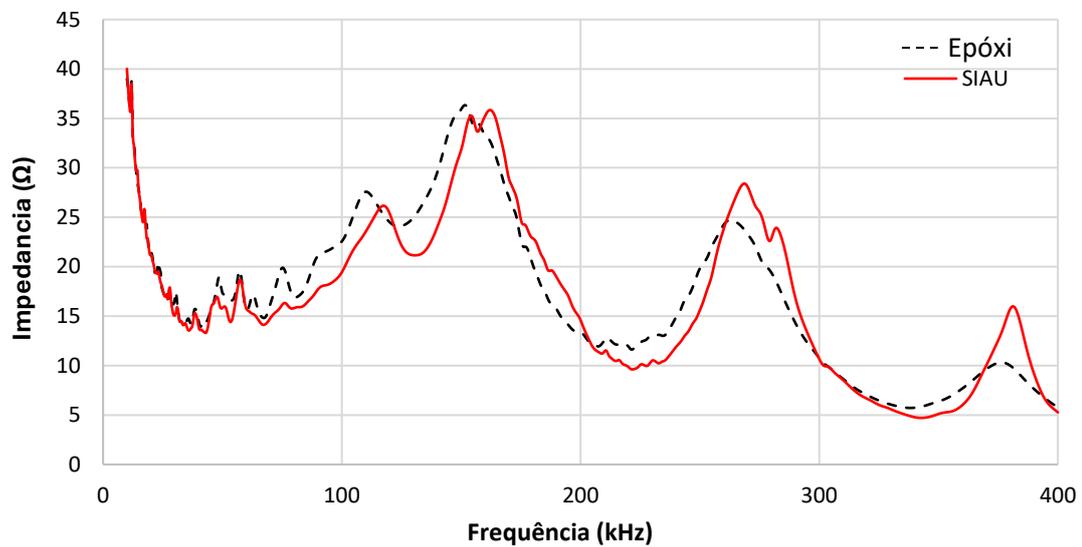


Fonte: Autor

Os resultados numéricos comparados com o experimento, demonstraram um bom comportamento e proximidade com relação a modelagem numérica por meio do COMSOL,

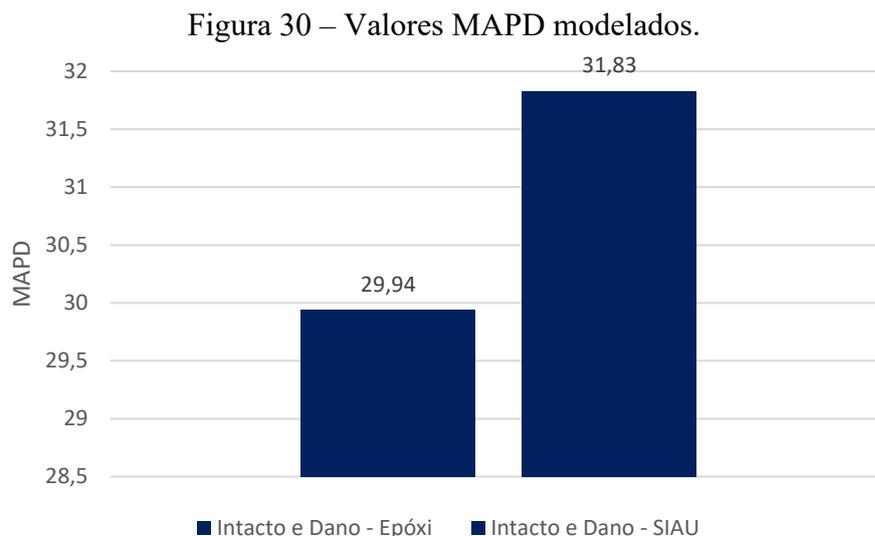
sendo um elemento simples. A Figura 29 apresenta a resposta obtida a partir da modelagem, mas com o SIAU e epóxi já incorporados ao concreto.

Figura 29 – Assinatura de impedância modelado com epóxi e SIAU incorporados ao concreto.



Fonte: Autor

A avaliação do comportamento pode ser verificada observando a variação da impedância onde a adição do elemento promoveu o aumento dos picos secundário e terciário visto no intervalo de 200-300kHz e 350-400kHz se comparados à proteção com epóxi. Utilizando o mesmo modelo anterior, foi analisada a influência das proteções de epóxi e epóxi/lâmina de alumínio na detecção de danos de 10 mm na região central, utilizando MEF. As assinaturas obtidas foram comparadas com as assinaturas de baseline, evidenciando a eficácia das diferentes proteções na detecção de danos avaliando com a métricas MAPD.



Fonte: Autor

Conforme observado na Figura 30, a adição da lâmina proporcionou uma melhoria significativa na resposta em estruturas de concreto, quando comparada à proteção simples com epóxi.

6.1.3. Respostas do transdutor no interior do CP

Utilizando a metodologia descrita no Capítulo 4, foi obtida uma série de dados estrategicamente relacionados, mantendo-se uma variável constante e alterando-se as demais para avaliar os aspectos de sensibilidade relacionados à composição do arranjo experimental.

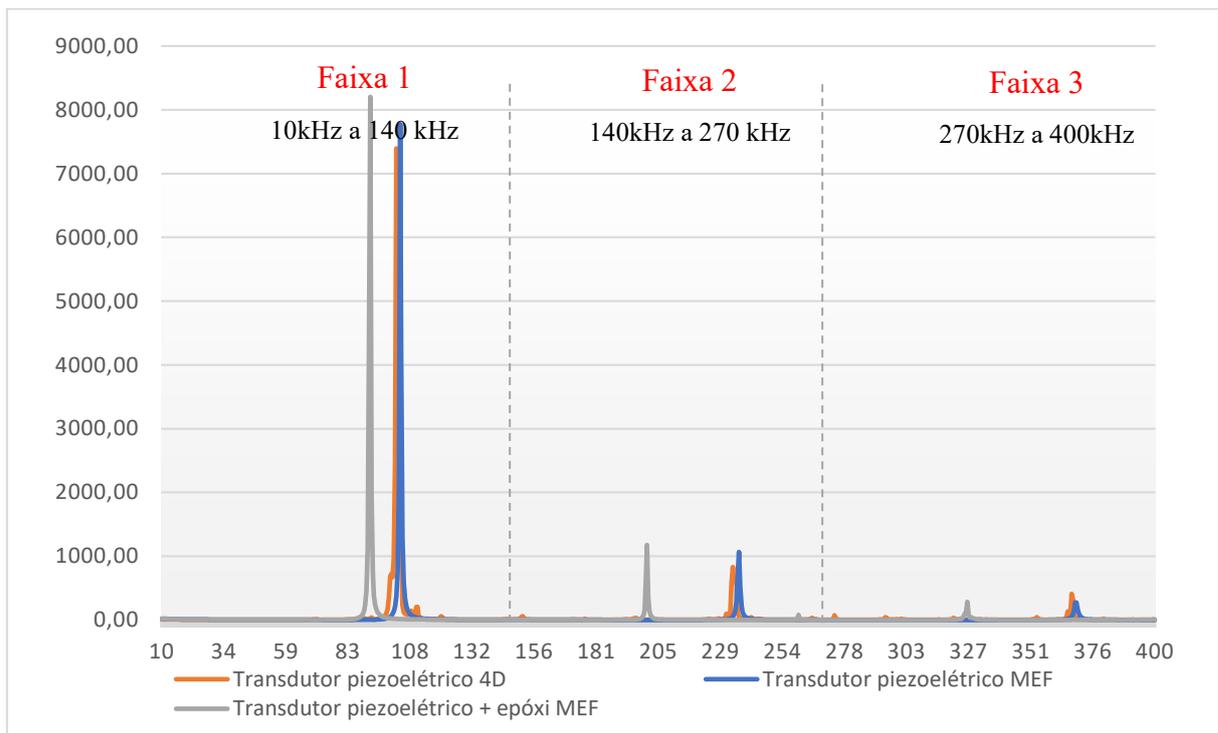
A eficiência na coleta de assinaturas foi essencial para garantir que os resultados fossem confiáveis e reproduzíveis. A escolha adequada de frequência natural, seleção de geometria, afetaram significativamente o comportamento das assinaturas.

O estudo da frequência natural foi importante para encontrar o material piezoelétrico empregado na análise. Isso ocorreu porque a frequência natural é única para cada material. Portanto, a comparação da frequência natural das assinaturas coletadas com a frequência natural do material piezoelétrico empregado pode ajudar a identificar o material.

A coleta inicial para fins de análise de teste de sinal do transdutor abrangeu a faixa de frequência de 10 kHz a 400 kHz. Essa faixa é consistente com a maioria das pesquisas sobre materiais cimentícios, apresentadas na Tabela 1. A escolha dessa faixa também foi motivada pela necessidade de considerar o comportamento dos materiais em diferentes frequências, que podem ser negligenciadas em análises iniciais com intervalos curtos.

As Equações 17 e 18 foram empregadas para coleta da assinatura no modelo MEF e processadas com o uso computacional de um notebook *Alienware M17 R3* citado anteriormente na análise de malha e para elaboração dos dados gerados pelo *Agilent 4294A*. A Figura 31 apresenta a leitura obtida pelo equipamento de impedância, juntamente com o resultado da simulação, além da resposta em adição à camada de revestimento.

Figura 31 – Impedância resistiva pela frequência do transdutor piezoelétrico para o conjunto com e sem epóxi.



Fonte: Autor

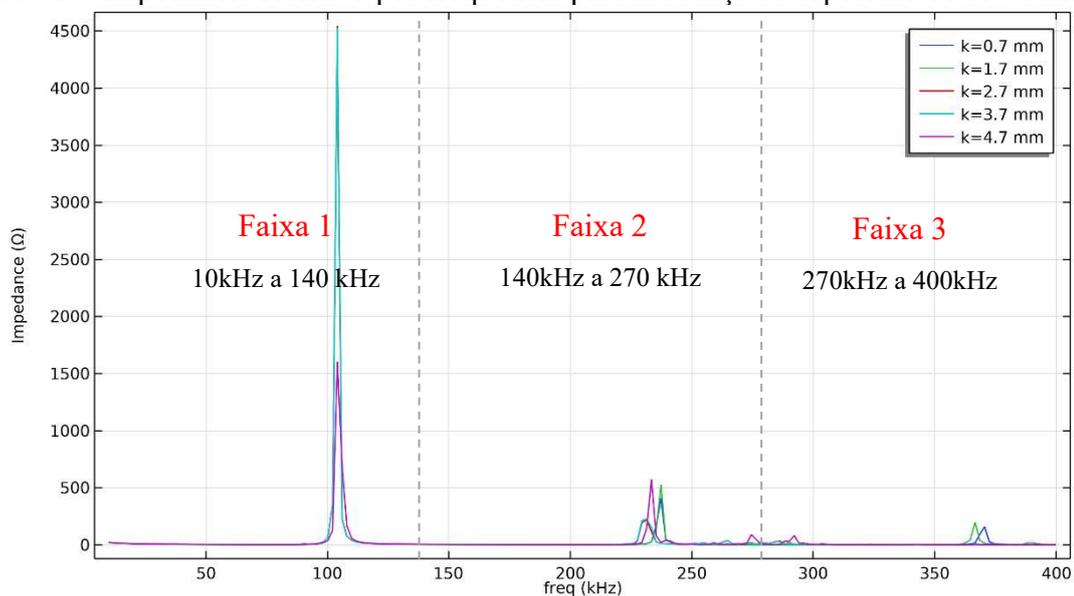
As assinaturas de frequência do transdutor PZT-4D utilizado no estudo apresentaram três picos distribuídos em intervalos distintos. Cada pico está associado a uma resposta específica do material piezoelétrico. Para uma compreensão mais aprofundada, esses intervalos foram denominados de zonas de frequência, conforme ilustrado na Figura 31.

O efeito do revestimento no conjunto resultou no deslocamento da assinatura nos três intervalos, como destacado na Figura 31. Esse comportamento foi verificado no trabalho de Gayakwad e Thiyagarajan (2022), onde o componente do revestimento, considerado um agente de propagação, exerceu uma influência direta inferindo no comportamento ressonante. Para avaliar essa influência, foi realizado um teste alterando a espessura do revestimento. Os

resultados dessa simulação, variaram de 0,7 mm, correspondente à espessura do transdutor, até 4,7 mm, que representa a espessura da camada de epóxi.

Na faixa de 400 kHz, o comportamento dos materiais foi consistente, com uma variação significativa do *stress*, variação essa que representa a força por unidade de área do material. A análise das assinaturas de impedância na Figura 32 permitiu acompanhar a evolução desse comportamento à medida que a espessura aumentou em incrementos de 1 mm. Essa análise forneceu informações importantes sobre a relação entre a frequência, as propriedades dos materiais e a variação do *stress*. Essas informações contribuíram para uma compreensão mais aprofundada do comportamento do material sob diferentes condições.

Figura 32 – Impedância resistiva por frequência para mudança da espessura do revestimento.

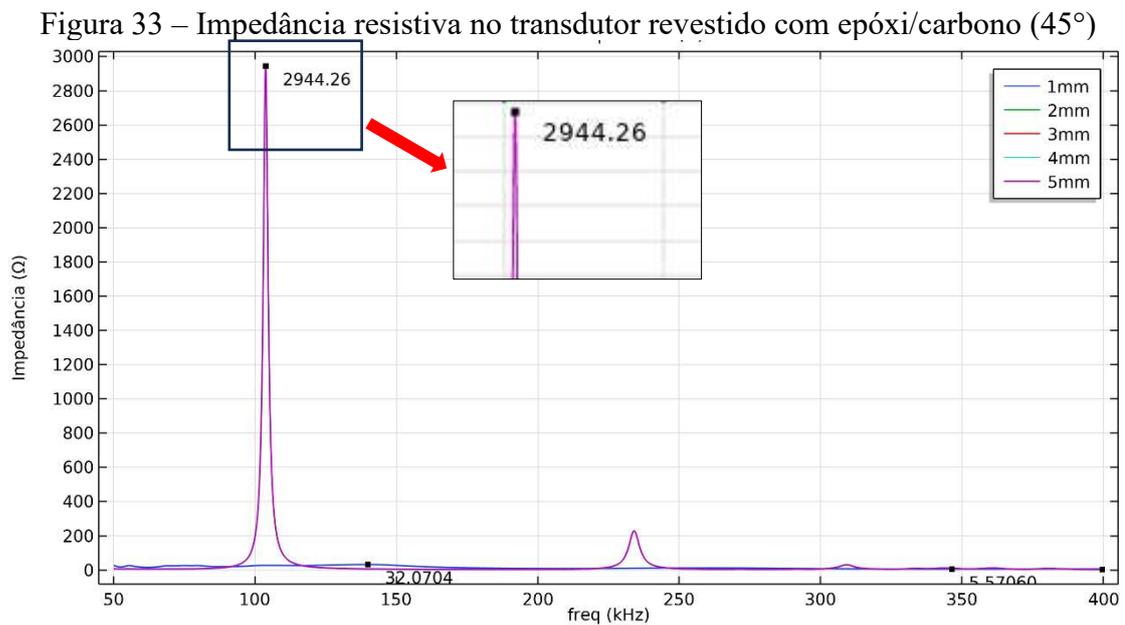


Fonte: Autor

As assinaturas de epóxi são estáveis na faixa inicial, com espessuras de revestimento variando de 0,7 mm a 3,7 mm, sendo 0,7mm a *baseline*. No entanto, o aumento da espessura a 4,7 mm comprometeu a estabilidade, resultando em um considerável decaimento do sinal. Esse fenômeno sugere que a leitura é degradada pelo aumento da espessura, possivelmente devido às propriedades do material. Tal fenômeno é visto no trabalho de (YANG; LIM; SOH, 2008), a qual devido a análise exceder a recomendação de 100kHz e a espessura ser superior a 1/3 da espessura do transdutor é visto essa degradação quando analisamos o modelo sem contar a influência de temperatura e amortecimento do material.

6.1.4. Análise de sinais para diferentes materiais de proteção

O uso de materiais distintos para a proteção gerou mudanças nas assinaturas, como descrito no capítulo anterior. Assim, foram analisados os aspectos propagados por essa mudança. A Figura 33 apresenta as assinaturas empregando-se o epóxi com fibra de carbono no modelo presente na segunda malha, a qual consiste no corpo cilíndrico com o transdutor imerso, tendo apenas uma lâmina de eixo.

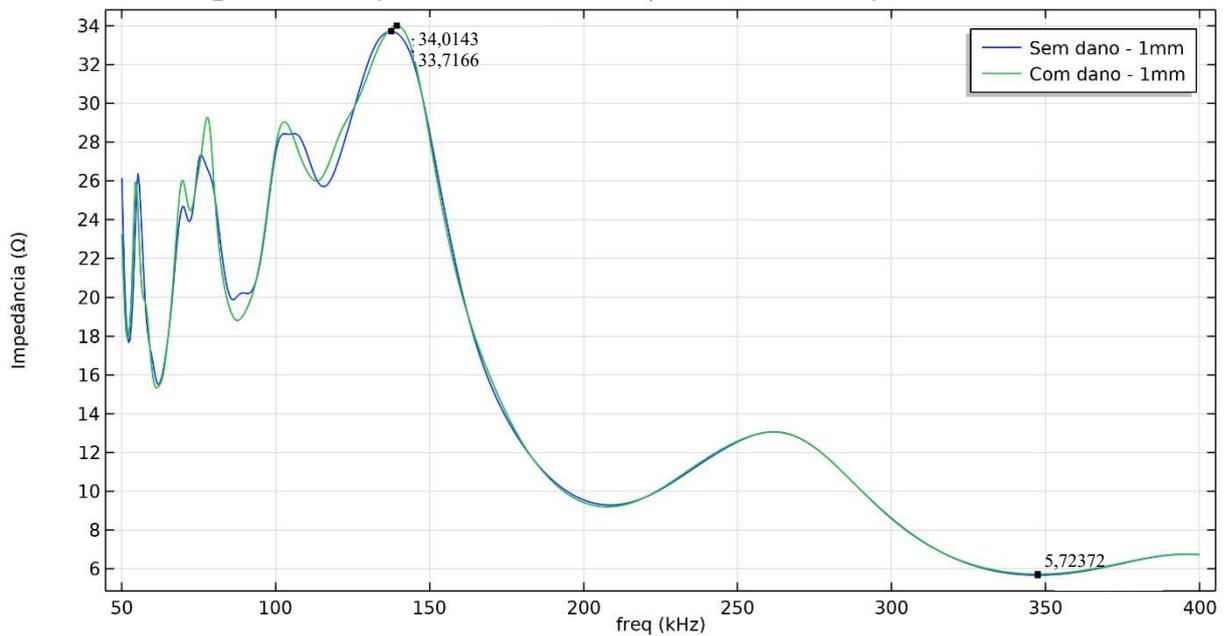


Fonte: Autor

A Figura 34 demonstra que o uso de um composto de epóxi reforçado com fibra de carbono apresentou variações na impedância se comparado ao modelo com apenas epóxi. No caso de 1mm como camada de proteção do transdutor não houve assinaturas relevantes. Já nos casos com o aumento gradual da espessura para 2 mm a 5 mm, notou-se que os picos de impedância passaram a ser inalterados.

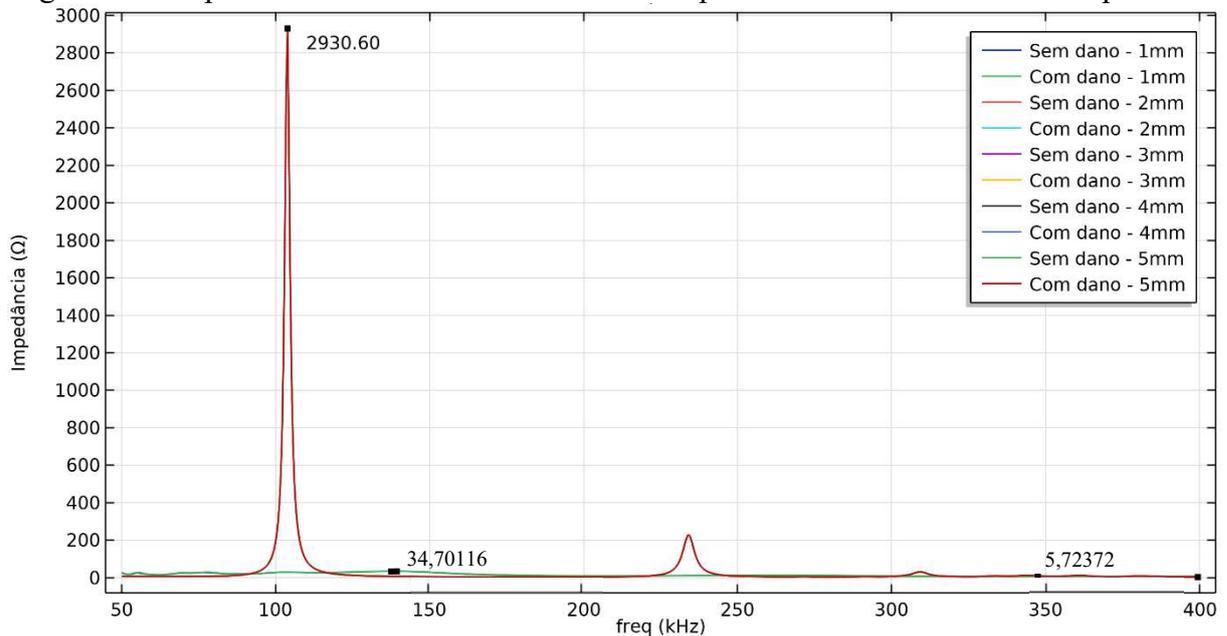
A análise mais contundente do uso do revestimento de proteção com a inserção de dano é vista na Figura 35, ao qual tem-se um corpo de prova utilizando a segunda malha de análise com aumento gradativo da espessura de revestimento.

Figura 34 – Impedância resistiva no transdutor com epóxi/carbono.



Fonte: Autor

Figura 35 – Impedância resistiva no transdutor com epóxi/carbono com diferentes espessuras.

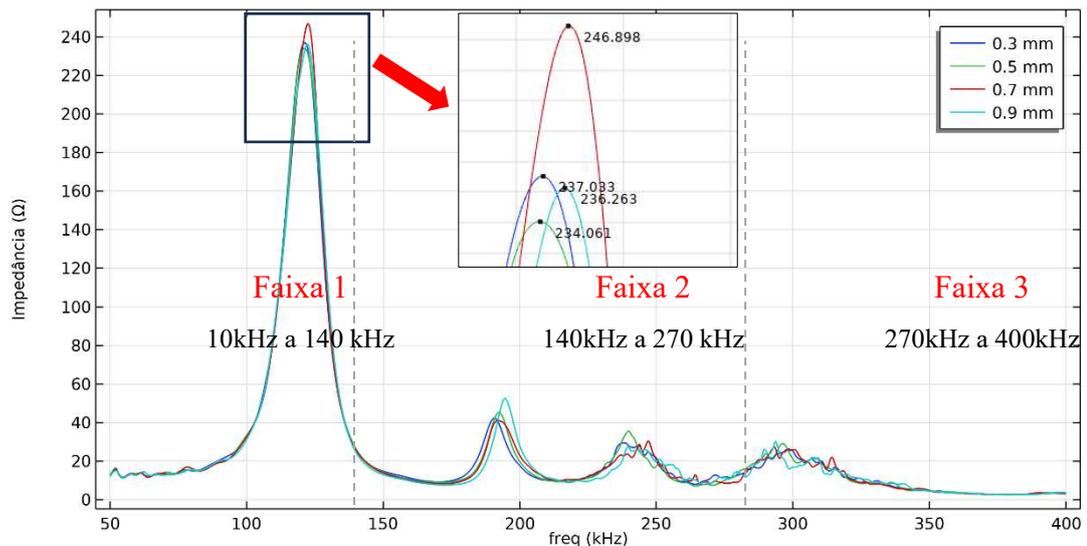


Fonte: Autor

Tendo em vista esses aspectos foi possível observar que a assinatura de impedância se tornou degradada devido à proteção ser mais resistente, impedindo a atuação do transdutor para identificação de mudanças no meio cimentício. Com isso o material foi descartado para uso no modelo de experimentação da pesquisa.

Já com relação ao uso de uma superfície de contato maior, sendo o uso da placa aderida ao transdutor, tem-se o uso de chapa metálica a qual foi avaliada quanto a sua espessura e suas particularidades. A Figura 36, apresenta as assinaturas observadas no modelo com cilíndrico, com resistência de 30MPa, observado na segunda malha a estrutura com o advento da chapa, tendo a variação de 0,3mm a 0,9mm.

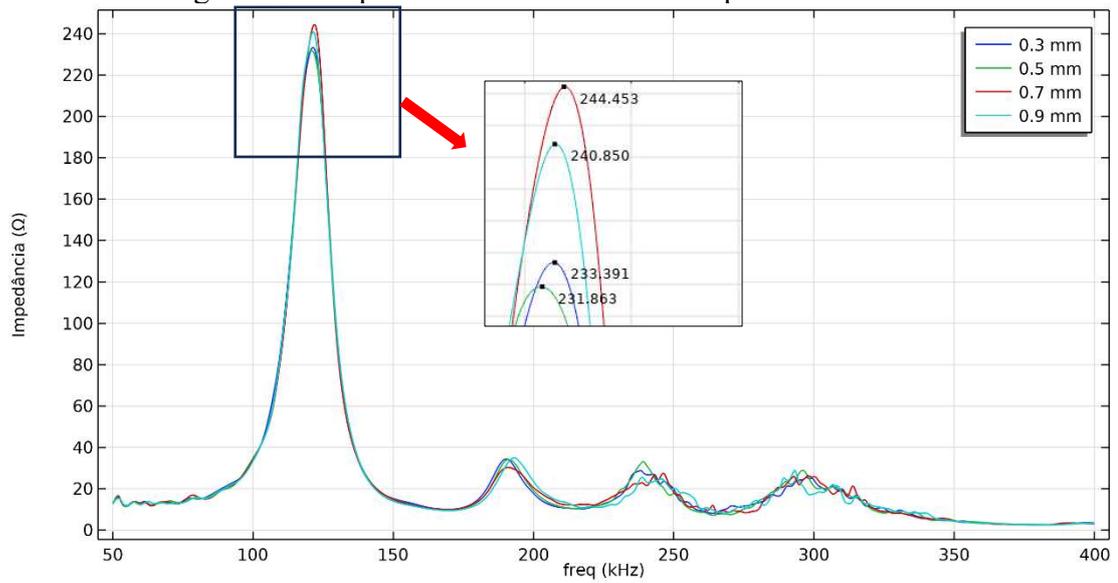
Figura 36 – Impedância no transdutor com auxílio da placa de aço (perfuração).



Fonte: Autor

Observou-se que a espessura alterou o comportamento de forma significante. Com a espessura de 0,7 tem-se os picos de 246,898 ohms, tendo os demais picos próximos. Observou-se que existe um novo pico de assinatura na segunda faixa com o começo da placa se comparado a estrutura inicial do modelo com transdutor livre. A Figura 37 apresenta os resultados com o uso do alumínio seguindo os mesmos parâmetros da segunda malha.

Figura 37 – Impedância no transdutor com placa de alumínio.



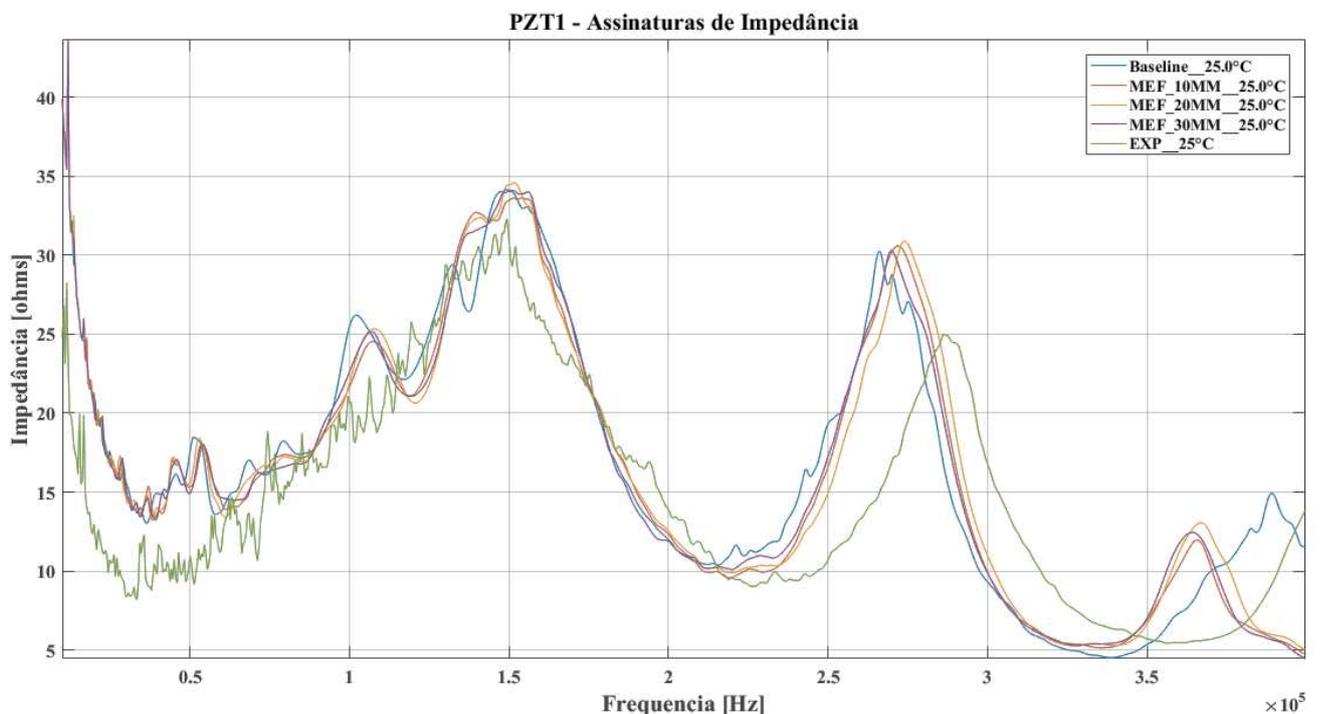
Fonte: Autor

Observou-se que o alumínio apresentou o mesmo comportamento no que tange as assinaturas da camada com aço, onde o pico mais representativo foi o da espessura de 0,7mm. A partir desse ponto os dois tenderam a diminuir.

6.2. EXPERIMENTAÇÃO *IN SITU* E VALIDAÇÃO DO MODELO

Após a cura completa, iniciou-se o monitoramento dos sinais de impedância eletromecânica, com o primeiro sinal sendo a *baseline* utilizada como referência. Os valores de resistência mecânicas obtidos do concreto são de 32,56 MPa e 58,62 MPa aos 28 dias, os quais ficaram nomeados de 30MPa e 60MPa nas análises. A partir das assinaturas obtidas, foi traçado um gráfico com os valores da parte real da impedância utilizando o GNU Octave. A Figura 38 ilustra o gráfico obtido na faixa de 10kHz a 400kHz, contendo os valores resultantes da modelagem, incluindo *baseline* e os danos variando de 10mm a 30mm.

Figura 38 - Assinaturas de impedância para o traço A versus simulação 30MPa.

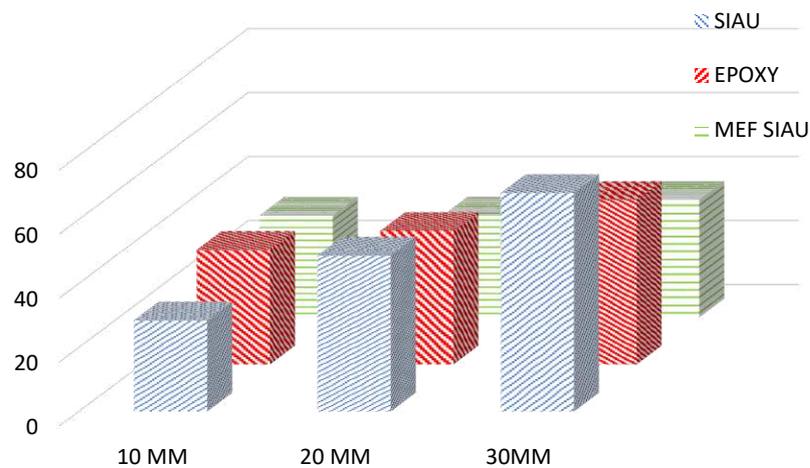


Fonte: Autor

A partir das assinaturas verificou-se que o comportamento obtido no MEF demonstrou similaridade, mas não representação completa do experimento. Esse fator pode ser atrelado a não linearidade do corpo de prova a qual não pode ser simulada completamente com o modelo, além de limite de densificação da malha. Apesar da diferença do comportamento a presença dos picos de ressonância entres o experimento e a modelagem, sendo esse os pontos de análise para o emprego das métricas.

A Figura 39 apresenta o gráfico MAPD em função de distintas profundidades do entalhe no corpo de prova, analisando uma faixa completa de frequências de 10 kHz a 400 kHz. Esta análise incluiu tanto a avaliação experimental quanto a simulação utilizando o MEF, com referência a elementos sem danos. Os dados foram comparados entre dois materiais distintos: SIAU e EPOXY, com o objetivo de determinar a eficácia na detecção de danos em diferentes profundidades de entalhe.

Figura 39 – Comparação MAPS entre epóxi, SIAU e MEF (30MPa).



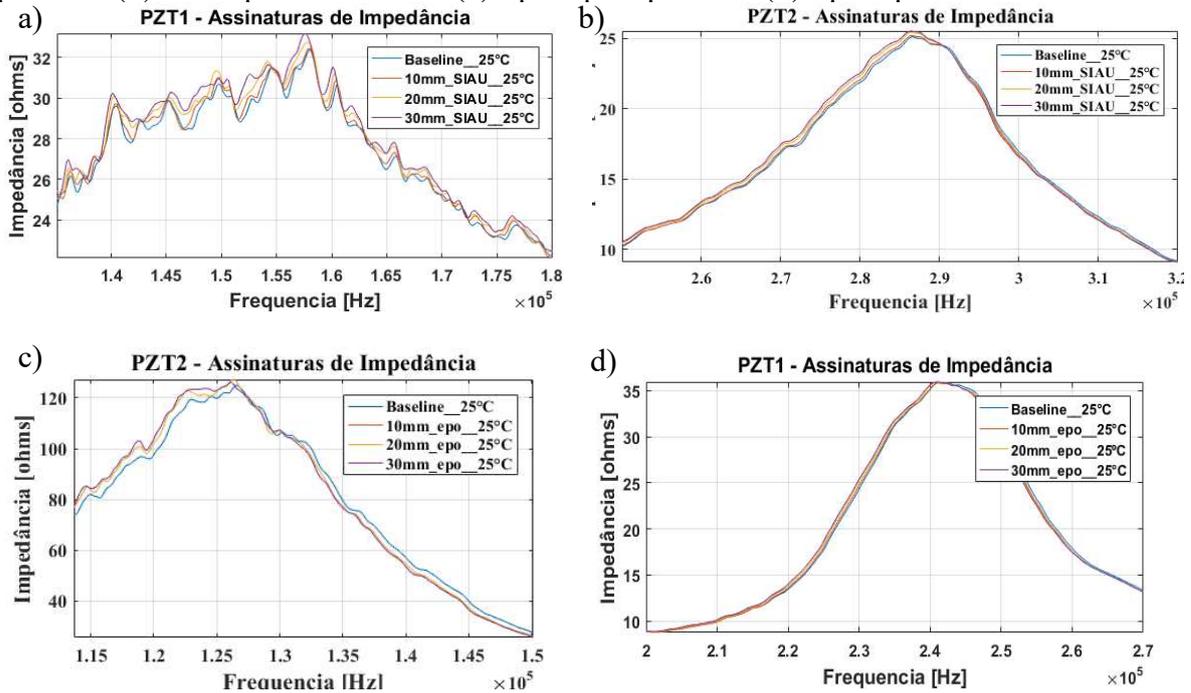
Fonte: Autor

Com o aumento da profundidade dos danos observou-se um aumento da métrica MAPD. Comparando os materiais, o SIAU apresentou valores de MAPD consistentemente mais altos em todas as profundidades de entalhe, indicando maior sensibilidade à detecção de danos. O Epóxi também mostrou um aumento significativo nos valores de MAPD, mas os valores são menores comparados ao SIAU.

A modelagem do SIAU, por sua vez, apresentou os valores mais baixos de MAPD, sugerindo uma menor sensibilidade. Essa variação nos valores de MAPD entre os materiais pode ser atribuída às diferentes características intrínsecas de cada material e à interação com a técnica utilizada.

A Figura 40 apresenta as regiões de interesse, sendo caracterizado como pico de ressonância, onde o critério de agrupamento dos dados foi baseado em picos de ressonância, com o objetivo de comparar o comportamento entre os experimentos.

Figura 40 – Assinaturas de impedância das regiões de pico de ressonância (a) SIAU pico primário (b) SIAU pico secundário (c) Epóxi pico primária (d) Epóxi pico secundário.



Fonte: Autor

Para quantificar a impedância e possibilitar a comparação entre os danos, foram calculadas as métricas (RMSD, CCD, M, MAPD, ASD) para as faixas de leitura de 10kHz a 140kHz, 140kHz a 270kHz e 270kHz a 400kHz, além da restrição de zonas específicas. Os resultados podem ser apresentados de diversas formas e para facilitar a compreensão os valores foram organizados de forma tabular. Todas as assinaturas constam no Apêndice A. A extração dos dados de métricas foi realizada pelo Octave e é apresentada nas Tabelas 8 e 9, com referência a uma resistência de 30 MPa.

Tabela 8 – Métricas para o concreto de 30MPa.

Corpo de prova - 30MPa											
Faixa	Dano	SIAU					Epóxi				
		RMSD	CCD%	M	MAPD	ASD	RMSD	CCD%	M	MAPD	ASD
10kHz 400kHz	10 mm	0,261	0,109	164,200	28,450	187,900	0,650	0,071	1014,000	35,810	1047,000
	20 mm	0,440	0,200	466,000	48,700	715,500	1,079	0,118	2800,000	41,700	3104,000
	30 mm	0,577	0,286	799,400	68,290	1397,000	1,425	0,174	4879,000	51,360	5592,000
10kHz 140kHz	10 mm	0,236	66,830	134,000	18,550	174,200	0,578	66,720	804,100	14,410	1571,000
	20 mm	0,370	66,980	328,600	27,080	485,900	0,982	66,730	2317,000	21,010	4568,000
	30 mm	0,471	67,100	532,200	36,870	927,900	1,290	66,740	3996,000	27,760	8069,000
140kHz 270kHz	10 mm	0,159	0,140	20,240	4,100	29,610	0,497	0,141	197,500	9,980	335,400
	20 mm	0,344	0,162	94,550	10,520	230,700	0,772	0,168	477,400	14,220	669,800
	30 mm	0,481	0,193	185,600	15,360	474,400	1,048	0,202	879,300	19,430	1160,000
270kHz 400kHz	10 mm	0,111	0,139	9,890	5,810	10,820	0,127	0,132	3,440	4,170	4,170
	20 mm	0,231	0,183	42,890	11,120	52,780	0,083	0,148	5,570	6,570	17,080
	30 mm	0,319	0,230	81,610	16,060	111,500	0,655	0,167	12,840	11,430	49,780

Fonte: Autor

Tabela 9 – Métricas para o concreto 30MPa zonas de ressonância.

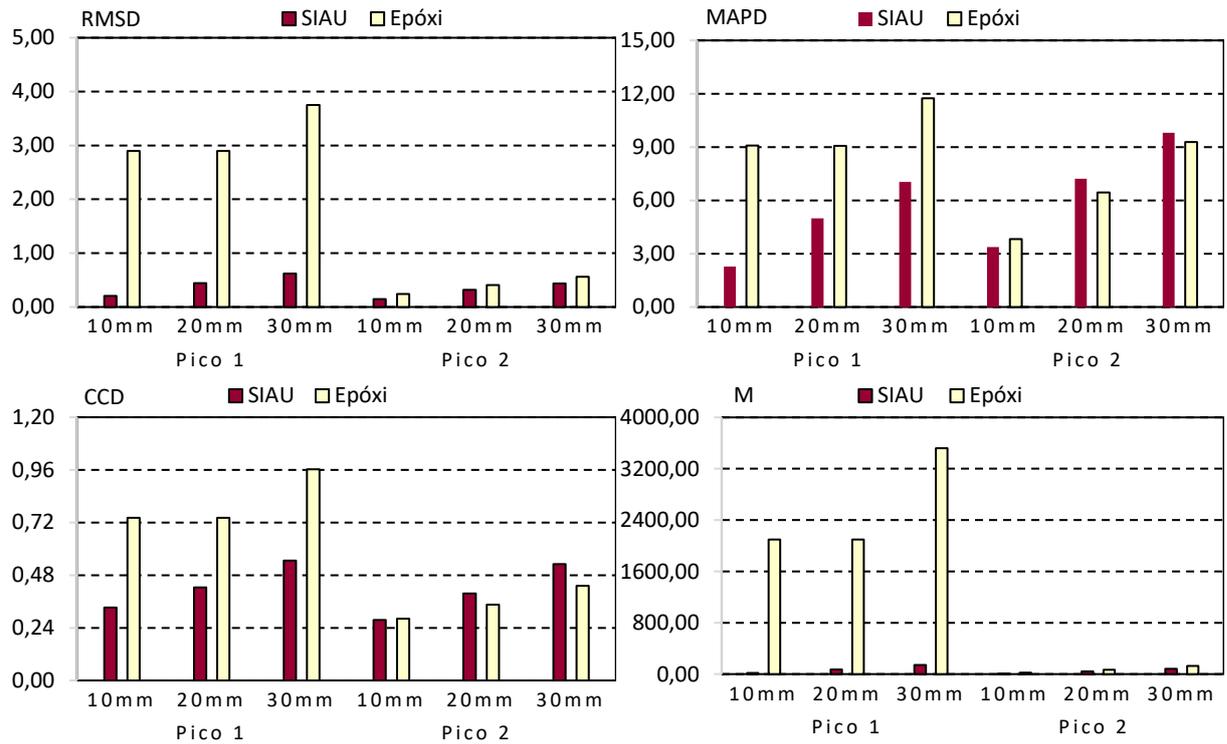
Corpo de prova - 30MPa											
Faixa	Dano	SIAU					Epóxi				
		RMSD	CCD%	M	MAPD	ASD	RMSD	CCD%	M	MAPD	ASD
Pico 1 ressonância	10 MM	0,207	0,332	15,970	2,270	27,190	2,896	0,742	2097,000	9,090	2190,000
	20 MM	0,446	0,424	73,920	4,980	193,700	2,898	0,742	2099,000	9,070	2201,000
	30MM	0,620	0,546	143,200	7,030	387,600	3,753	0,963	3521,000	11,750	3761,000
Pico 2 ressonância	10 MM	0,147	0,275	9,110	3,380	9,150	0,243	0,282	23,610	3,830	27,670
	20 MM	0,316	0,397	42,320	7,210	55,340	0,406	0,346	66,170	6,440	67,860
	30MM	0,435	0,531	80,330	9,800	112,800	0,564	0,432	127,600	9,290	139,500

Fonte: Autor

O comportamento das métricas revelou-se consistente no que diz respeito ao aumento dos danos nas amostras em ambos os casos. Isso demonstrou que, inicialmente, ambas as métricas têm potencial para a aferição dos danos. No entanto, ao comparar os valores das métricas de forma isolada, observou-se correspondências distintas. Isso indicou que, apesar da consistência geral, as métricas podem apresentar variações específicas em relação à detecção e quantificação dos danos.

Outro ponto visto é com relação primeira faixa, sendo 10kHz a 140kHz, na qual temos os picos de ressonância da estrutura (normalmente menor que 100kHz) o qual são notórios picos menores, mas densamente espaçados, elevando os valores do CCD. A Figura 41 apresenta os valores de RMSD, MAPD, CCD e M dos dois picos de ressonância.

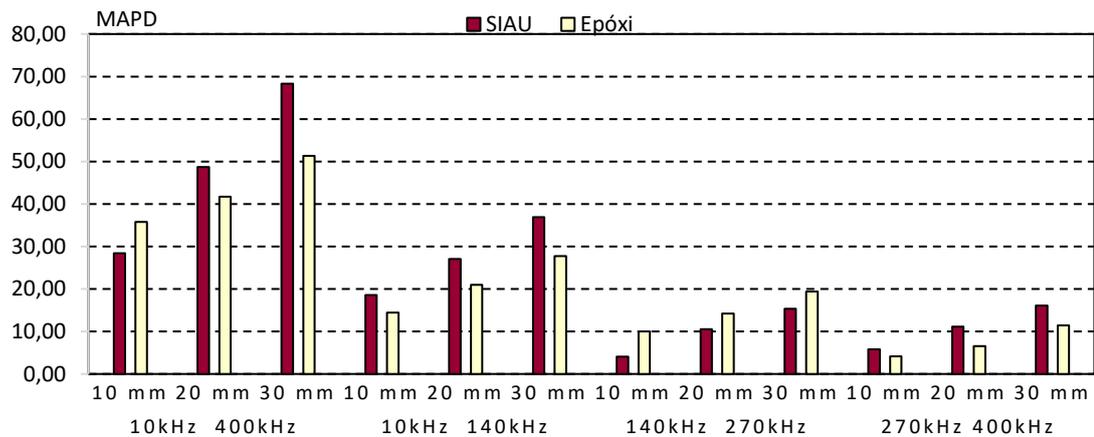
Figura 41 – Métrica dos picos de ressonância da concreto de 30MPa.



Fonte: Autor

Com isso, observou-se que os valores de RMSD são maiores em ambos os picos de ressonância se tratando do epóxi em comparação ao SIAU. Outro ponto foi que o primeiro pico de ressonância foi mais sensível para avaliação de dano. Já observando o MAPD e CCD com relação ao epóxi, foi visto a maior sensibilidade no primeiro pico, contudo o segundo pico de ressonância se tornou mais característico demonstrando se adequar mais para o emprego do SIAU. A métrica M por fim, se apresentou como válida para avaliação no primeiro pico para o epóxi demonstrando maior sensibilidade. Ao observar as faixas mais abrangentes o comportamento das métricas foi de modo geral sensível, independentemente do método de encapsulamento. A Figura 42 apresenta o MAPD.

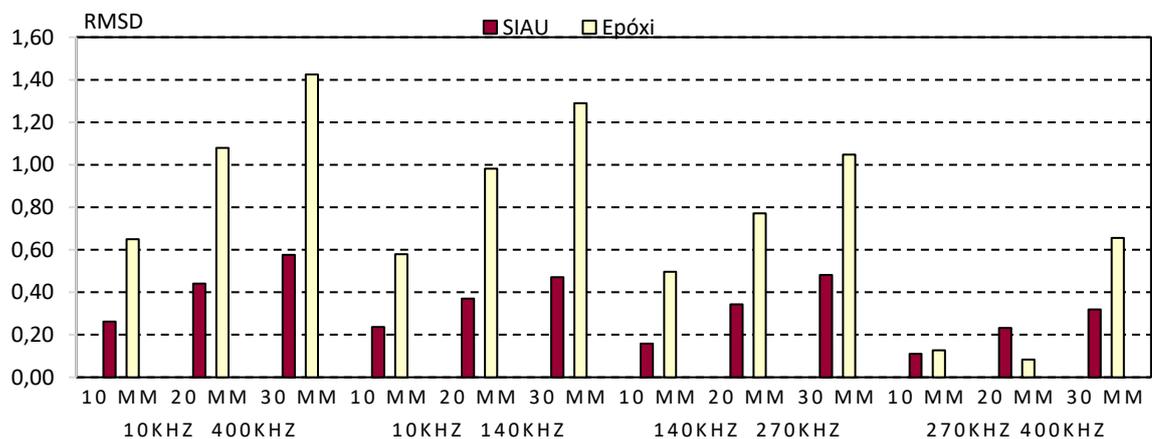
Figura 42 – Métrica MAPD 10kHz a 400kHz.



Fonte: Autor

Os valores da métrica MAPD demonstraram uma sensibilidade notável, independentemente da faixa analisada. Esta característica se mostrou particularmente adequada para o uso com o SIAU, conferindo à métrica MAPD uma consistência e confiabilidade aprimoradas. A evolução dos valores desta métrica revelou uma consistência notória, sem apresentar qualquer descontinuidade, o que reforça sua confiabilidade. A Figura 43 apresenta os valores do mesmo intervalo, mas com a métrica de RMSD.

Figura 43 – Métrica MRSD 10kHz 400kHz



Fonte: Autor

Os valores de RMSD exibiram um comportamento consistente com os picos de ressonância observados anteriormente. Notou-se uma sensibilidade acentuada quando aplicado o epóxi, destacando sua eficácia. No entanto, o SIAU demonstrou uma eficiência superior nas faixas mais elevadas. Isso pode ser atribuído à sua capacidade de manter uma leitura contínua, sem descontinuidades, proporcionando uma medição mais precisa e confiável. Esta

característica do SIAU a tornou particularmente útil para análises em faixas mais altas. As Tabela 10 e 11 apresentam os valores obtidos para a concreto com resistência de 60MPa.

Tabela 10 - Métricas para o concreto de 60MPa

Corpo de prova - 60MPa											
Faixa	Dano	SIAU					Epóxi				
		RMSD	CCD%	M	MAPD	ASD	RMSD	CCD%	M	MAPD	ASD
10kHz - 400kHz	10 MM	0,278	0,132	185,700	24,500	235,100	0,310	0,105	292,800	49,260	541,700
	20 MM	0,425	0,262	433,000	36,310	485,000	0,556	0,228	785,200	75,070	1234,000
	30MM	0,490	0,337	577,400	43,770	624,800	0,676	0,300	1096,000	156,900	1778,000
10kHz - 140kHz	10 MM	0,464	0,472	172,100	18,880	286,200	0,484	0,362	187,200	18,740	240,200
	20 MM	0,696	1,030	387,900	25,550	506,100	0,881	0,804	528,400	30,700	618,300
	30MM	0,789	1,325	499,100	29,710	608,000	0,967	1,036	748,500	38,040	972,400
140kHz - 270kHz	10 MM	0,126	0,146	12,660	3,187	12,740	0,264	0,150	55,680	9,102	118,000
	20 MM	0,221	0,189	39,120	5,761	39,190	0,437	0,205	152,900	14,190	255,800
	30MM	0,286	0,230	65,410	7,163	66,020	0,542	0,249	234,900	17,450	403,600
270kHz - 400kHz	10 MM	0,034	0,126	0,924	2,434	2,389	0,250	0,127	49,910	21,420	197,500
	20 MM	0,086	0,134	5,946	5,003	9,549	0,360	0,143	103,900	30,180	395,900
	30MM	0,127	0,146	12,910	6,898	18,060	0,376	0,163	113,100	30,480	411,400

Fonte: Autor

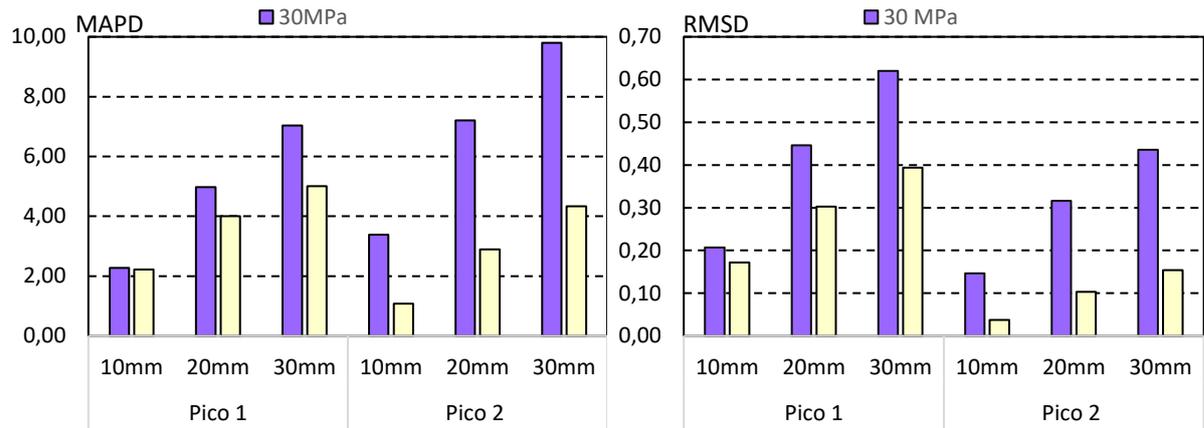
Tabela 11 – Métricas para o concreto 60MP nas zonas de ressonância.

Corpo de prova - 60MPa											
Faixa	Dano	SIAU					Epóxi				
		RMSD	CCD%	M	MAPD	ASD	RMSD	CCD%	M	MAPD	ASD
Pico 1 - ressonância	10 MM	0,172	0,493	11,900	2,226	11,930	0,361	0,357	60,950	4,579	84,800
	20 MM	0,303	0,986	36,760	3,999	38,730	0,558	0,557	145,500	7,062	162,300
	30MM	0,394	1,462	62,260	5,012	68,970	0,663	0,668	205,900	8,905	255,600
Pico 2 - ressonância	10 MM	0,037	0,207	0,688	1,082	1,423	0,220	0,693	14,620	3,757	54,610
	20 MM	0,103	0,230	5,218	2,899	6,826	0,317	0,841	30,260	4,940	97,750
	30MM	0,154	0,263	11,640	4,331	13,760	0,340	0,995	34,880	4,939	95,260

Fonte: Autor

Avaliando os valores das métricas para o caso da resistência 60MPa tem-se o comportamento esperado no que tange às métricas, porém não oferece uma correlação linear em todos os resultados (Figura 44).

Figura 44 – Métricas MARP e RMSD de 30MPa e 60MPa combinadas do SIAU.



Fonte: Autor

Para avaliar a correlação entre a evolução dos dados e as métricas, foi elaborado o Quadro 3, que apresenta os valores de correlação de Pearson, onde a métrica de confiabilidade foi estabelecida em 0,95.

Quadro 3 - Correlação de Pearson de 30MPa e 60MPa.

Correlação de Pearson		RMSD	CCD	M	MAPD	ASD
CP V 30MPa SIAU	10kHz 400kHz	0,9970	0,9999	0,9996	1,0000	0,9973
	10kHz 140kHz	0,9968	0,9979	0,9999	0,9992	0,9951
	140kHz 270kHz	0,9965	0,9955	0,9983	0,9967	0,9985
	270kHz 400kHz	0,9960	0,9997	0,9989	0,9998	0,9954
	Pico 1 – ressonância	0,9960	0,9966	0,9987	0,9968	0,9990
	Pico 2 – ressonância do PZT	0,9951	0,9996	0,9992	0,9939	0,9980
CP V 30MPa Epóxi	10kHz 400kHz	0,9981	0,9987	0,9990	0,9903	0,9985
	10kHz 140kHz	0,9970	1,0000	0,9995	1,0000	0,9990
	140kHz 270kHz	1,0000	0,9976	0,9947	0,9983	0,9941
	270kHz 400kHz	0,8301	0,9984	0,9537	0,9813	0,9700
	Pico 1 – ressonância do material	0,8670	0,8660	0,8666	0,8636	0,8691
	Pico 2 – ressonância do PZT	0,9999	0,9966	0,9946	0,9997	0,9871
CP V 60MPa SIAU	10kHz 400kHz	0,9767	0,9883	0,9887	0,9916	0,9870
	10kHz 140kHz	0,9710	0,9845	0,9834	0,9912	0,9783
	140kHz - 270kHz	0,9940	0,9998	1,0000	0,9858	1,0000
	270kHz 400kHz	0,9975	0,9937	0,9957	0,9962	0,9988
	Pico 1 – ressonância	0,9948	0,9999	1,0000	0,9878	0,9994
	Pico 2 – ressonância do PZT	0,9973	0,9949	0,9951	0,9977	0,9974
CP V 60MPa Epóxi	10kHz 400kHz	0,9809	0,9889	0,9916	0,9577	0,9976
	10kHz 140kHz	0,9369	0,9843	0,9923	0,9906	0,9998
	140kHz 270kHz	0,9900	0,9980	0,9988	0,9921	0,9998
	270kHz 400kHz	0,9169	0,9985	0,9255	0,8802	0,8967
	Pico 1 – ressonância do material	0,9852	0,9864	0,9954	0,9964	0,9986
	Pico 2 – ressonância do PZT	0,9429	0,9999	0,9541	0,8657	0,8392

Fonte: Autor

O comportamento do SIAU apresentou um coeficiente de correlação de Pearson mais estável se comparado aos obtidos com epóxi. Observou-se ainda os valores de correlação RMSD, CCD, M, ASD e MAPD próximos de 1, indicando um alto grau de correlação. Os valores são consistentemente altos em todas as faixas de frequência testadas (10kHz a 400kHz) e nos picos de ressonância, já nos valores do segundo conjunto de dados dos testes apresentaram uma ligeira queda nas métricas em comparação com os conjuntos de testes anteriores, especialmente na faixa de 10kHz a 140kHz. No entanto, os valores ainda são relativamente altos, indicando um bom desempenho geral.

Já observando o epóxi temos em destaque nas faixas mais altas, onde não se comportaram adequadamente para análise, na qual os picos de ressonância apresentaram queda nas métricas na faixa de 270kHz a 400kHz e no Pico 1 de ressonância. Foi visto que no último conjunto de teste houve uma maior variação nas métricas. Embora algumas faixas de frequência e picos de ressonância apresentassem alto desempenho, outras, como a faixa de 270kHz a 400kHz e o Pico 2 de ressonância, mostraram uma queda significativa.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a análise de um novo conjunto de proteção do sensor, visando a detecção de danos em estruturas mecânicas, baseado na abordagem do ISHM. Os dados permitiram verificar que os valores de RMSD, CCD, M, ASD e MAPD aumentam com a profundidade do entalhe tanto para o epóxi quanto para o SIAU, indicando uma correlação positiva entre a profundidade do dano e a detecção de danos. No entanto, o SIAU demonstrou maior sensibilidade em faixas mais altas e profundidades maiores de dano, mostrando uma resposta melhor nesses cenários ao ser avaliado pelas métricas de CCD e MAPD.

A forte correlação linear entre os valores das métricas foi observada ao analisar apenas o conjunto SIAU, apresentando melhores valores de correlação de Pearson em ambos os picos de ressonância além das outras faixas investigadas. Embora não apresente os melhores resultados em todas as métricas, o SIAU pode ser usado de forma consistente para a avaliação de danos.

Por meio da literatura foi possível verificar a faixa mais usual no que tange elementos cimentícios sendo estabelecido o intervalo empregado na pesquisa no MEF e ensaio *in situ*. No que diz respeito ao modelo MEF, o comportamento previsto pelo *software* mostrou-se consistente nas regiões esperadas para a presença dos picos de ressonância do material e do transdutor. Além disso, corroborou na escolha e delimitação dos componentes que poderiam ser utilizados para proteção. No entanto, o modelo não coincidiu linearmente com as faixas dos experimentos. Portanto, é necessário um maior refinamento das métricas da literatura e uma densificação mais robusta da malha, incorporando fatores específicos ao concreto, como a não linearidade do material.

Com base na pesquisa desenvolvida nessa dissertação, tem-se como proposta para o desenvolvimento de trabalhos futuros:

- Estudo com entalhes mais profundos para verificação do comportamento do SIAU frente ao Epóxi para detecção de danos, visando verificar se os valores de RMSD se manteriam em patamar inferior ou iriam progredir à medida que o dano evoluísse.
- Avaliação do encapsulamento do transdutor para monitoramento acima de 28 dias.

- Verificação da sensibilidade do SIAU com modificação de mudança térmicas para verificação da interferência nas métricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDER, S. J.; Sumathi, P.; Panigrahi S. K.; Gopalakrishnan, N. “Embedded Dual PZT-Based Monitoring for Curing of Concrete”. **Construction and Building Materials**, vol. 312, dezembro de 2021, p. 125316. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125316>
- ALINE, L.; LEMOS, A. C. **Estudo da influência térmica dos revestimentos em ferramentas de corte por meio da análise numérica utilizando o programa COMSOL**. 81 f. Tese (graduação em engenharia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D3878-20b: Standard Terminology for composite materials. 2020.
- ARANHA, P.M.S. **Contribuição ao Estudo das Manifestações Patológicas nas Estruturas de Concreto Armado na Região Amazônica**. 1994. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.
- ARANTES, I. S. C. **Monitoramento da evolução da resistência à compressão do concreto por meio da técnica de impedância eletromecânica**. 2021. 217 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.
<http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.480>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.. **ABNT NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.
- BARELLA, B. P. **Modelagem com aprendizado de máquina aplicada aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural**. Dissertação (mestrado). Disponível em <
<http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/11546>>, Acesso em: 23 de abril de 2023.

BHALLA, S.; KAUR, N. “Prognosis of Low-Strain Fatigue Induced Damage in Reinforced Concrete Structures Using Embedded Piezo-Transducers”. **International Journal of Fatigue**, vol. 113, agosto de 2018, p. 98–112. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.04.002>.

CAPINERI, L.; BULLETTI, A. Ultrasonic Guided-Waves Sensors and Integrated Structural Health Monitoring Systems for Impact Detection and Localization: A Review. **Sensors**, v. 21, n. 9, p. 2929, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21092929>.

CASTRO, B. A.; BAPTISTA, F. G.; CIAMPA, F. “Comparative Analysis of Signal Processing Techniques for Impedance-Based SHM Applications in Noisy Environments”. **Mechanical Systems and Signal Processing**, vol. 126, julho de 2019, p. 326–40. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.02.034>

CHIES, J. A. **Ensaio não destrutivo em concreto: detecção de falhas no interior de estruturas de concreto com o uso de ultrassom**. Tese (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil, 2014.

DAVID D.S. SILVA et al. Application of electromechanical impedance technique in the monitoring of sigma phase embrittlement in duplex stainless steel. **Materials science and engineering. A, Structural materials: properties, microstructures and processing/Materials science & engineering. A, Structural materials: properties, microstructure and processing**, v. 788, p. 139457–139457, 1 jun. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139457>

DATTA, S. “Piezoelectric Materials: Crystal Orientation and Poling Direction”. **COMSOL**. (2014). Disponível em: <<https://www.comsol.com/blogs/piezoelectric-materials-crystal-orientation-poling-direction/>>. Acesso em: 01 de abril de 2023.

DONALD J. , L. (Donald J. Leo) Engineering Analysis of Smart Mate PDF | PDF | Atomic Force Microscopy | Piezoelectricity. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/356835669/Donald-J-Leo-Engineering-analysis-of-smart-mate-BookSee-org-pdf>>. Acesso em: 5 jul. 2024.

ENERGIA, F. A. P. P. D. **Energias: Efeito Piezoelétrico**. Disponível em: <<http://fontesalternativaspth.blogspot.com/2012/06/efeito-piezoelétrico.html>>. Acesso em: 13 abril de 2023.

ESPINOSA, M. C. P.; Calub, P. N.; Fenol, D. S. Simulation of Piezoelectric Stack Actuators for Loss Component. **Journal of Engineering Science & Technology Review**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 153–160, 2021. Disponível em: <<http://jestr.org/downloads/Volume14Issue4/fulltext191442021.pdf>>. Acesso em: 28 de março de 2023.

GAN, Y. “Effect of Interface Structure on Mechanical Properties of Advanced Composite Materials”. **International Journal of Molecular Sciences**, vol. 10, no 12, novembro de 2009, p. 5115–34. <https://doi.org/10.3390/ijms10125115>.

GAYAKWAD, H.; THIYAGARAJAN, J. S. Structural Damage Detection through EMI and Wave Propagation Techniques Using Embedded PZT Smart Sensing Units. **Sensors**, v. 22, n. 6, p. 2296, 16 mar. 2022. <https://doi.org/10.3390/s22062296>.

GONÇALVES, E. A. B. **Estudo de patologias e suas causas nas estruturas de concreto armado de obras de edificações**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2015

HABERT, G.; Miller, S. A.; John, V. M.; Provis, J. L.; Favier, A.; Horvath, A.; Scrivener, K. L. “Environmental Impacts and Decarbonization Strategies in the Cement and Concrete Industries”. **Nature Reviews Earth & Environment**, vol. 1, no 11, novembro de 2020, p. 559–73. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>.

HUGO, V. **Damage detection using the impedance based SHM approach under dynamic and static loads**. 32 f. Tese (graduação) Faculdade de Engenharia Aeronáutica, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

HUYNH, T. C. *et al.* “Sensor Fault Diagnosis for Impedance Monitoring Using a Piezoelectric-Based Smart Interface Technique”. **Sensors**, vol. 20, no 2, janeiro de 2020, p. 510. <https://doi.org/10.3390/s20020510>.

INMAN, D. J. *et al.* (EDS.). *Damage Prognosis: For Aerospace, Civil and Mechanical Systems*. 1o ed, Wiley, 2005. <https://doi.org/10.1002/0470869097>.

JEONG, S. H. *et al.* Effect of micro-ceramic fillers in epoxy composites on thermal and electrical stabilities of GdBCO coils. **Composites Part B: Engineering**, v. 94, p. 190–196, jun. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.03.065>.

LEITE, J.; MORAIS, D.; PEDRO, A. **Identificação de manifestações patológicas em elementos de concreto e concreto armado: um estudo de caso no campo de futebol Lázaro Paiva (Lazarão) em Mossoró/RN**. *Anima Educação*, 2022. Disponível em: <<https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/25158>>. Acesso em: 27 abr. 2023.

LELE, S. Piezoelectric Transformer and Hall-Effect Based Sensing and Disturbance Monitoring Methodology for High-Voltage Power Supply Lines. **Electronic Thesis and Dissertation Repository**, 5 setembro 2013. Disponível em: <<https://ir.lib.uwo.ca/etd/1618/>>. Acesso em: 01 abril de 2023.

LU, X.; LIM, Y. Y.; IZADGOSHASB, I.; SOH, C. K. “Strength Development Monitoring and Dynamic Modulus Assessment of Cementitious Materials Using EMI-Miniature Prism Based Technique”. **Structural Health Monitoring**, vol. 19, no 2, março de 2020, p. 373–89. <https://doi.org/10.1177/1475921719848087>.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. *Compósitos estruturais: ciência e tecnologia*. São Paulo: **Edgard Blücher**, 2006. 313 p.

MARQUI, C. R.; BUENO, D. D.; BAPTISTA, F. G.; VIEIRA FILHO, J.; SANTOS, R. B.; LOPES JUNIOR, V. External disturbance effect in damage detection using electrical impedance. In: **International Modal Analysis Conference**, 26., 2008, Orlando. Proceeding Orlando: SEM, 2008. P. 286-286.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais*. Editora: **IBRACON**, 2ª Edição. São Paulo, SP, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª Edição. São Paulo, SP: **IBRACON**, 2008.

NA, W. S.; BAEK, J “A Review of the Piezoelectric Electromechanical Impedance Based Structural Health Monitoring Technique for Engineering Structures”. **Sensors**, vol. 18, no 5, abril de 2018, p. 1307. <https://doi.org/10.3390/s18051307>

NARAYANAN, A.; KOCHERLA, A.; SUBRAMANIAM, K. V. L. Embedded PZT Sensor for Monitoring Mechanical Impedance of Hydrating Cementitious Materials. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 36, n. 4, 21 ago. 2017. <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0442-4>.

NAZÁRIO, R. P. **A importância do engenheiro civil para a execução de obras, manutenção e tratamento de manifestações patológicas**. 2021. 43 f. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) - Anima Educação, São Paulo, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/20531>>. Acesso em: 27 abr. 2023.

OLIVEIRA, G. C. **Estudo do Desempenho Térmico de Ferramentas de Corte Revestidas a partir da Obtenção da Solução Analítica de um Modelo Térmico de Condução de Calor 3D Transiente Dupla Camada**. 129 f. Tese (doutorado) Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

PAES, C. UNESP. **Transições de fases estruturais do sistema PZT, estudados por espectroscopia no infravermelho**. 75 f. Dissertação (mestrado) — Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/92009>> Acesso em: 01 abril de 2023.

PALOMINO, L. V. **Análise das Métricas de Dano Associadas à Técnica da Impedância Eletromecânica para o Monitoramento de Integridade Estrutural**. 2008. 117 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RABELO, D. S. et al. Fault Detection of a Rotating Shaft by Using the Electromechanical Impedance Method and a Temperature Compensation Approach. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 36, n. 2, 13 mar. 2017. <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0405-9>

ROCHA, L. A. d. A. **Identificação de dano em estruturas utilizando uma metodologia que integra a técnica da impedância eletromecânica e ondas de Lamb**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil, 2017.

SARAVANAN, T. J.; Balamonica, K.; Priya, C. B.; Reddy, A. L.; Gopalakrishnan, N. Comparative performance of various smart aggregates during strength gain and damage states of concrete. **Smart Materials and Structures**, v. 24, n. 8, p. 085016, 7 Julho. 2015. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/8/085016>.

SARAVANAN, T. J.; SINGH CHAUHAN, S. Study on pre-damage diagnosis and analysis of adhesively bonded smart PZT sensors using EMI technique. **Measurement**, v. 188, p. 110411, Janeiro. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110411>.

SILVA, A. B.; RIBEIRO, J. L. D.; MACEDO, M. O. T. Microstructure of hardened cement paste with nano-SiO₂. **Cement & Concrete Composites**, v. 58, p. 64-73, abril de 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.02.001>.

SILVA, R. N. F. **Monitoramento de Integridade Estrutural Utilizando a Técnica da Impedância Eletromecânica Aplicada em Estruturas de Concreto**. 146 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2017. <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/20889>

SU, Y.-F. et al. Instantaneous monitoring the early age properties of cementitious materials using PZT-based electromechanical impedance (EMI) technique. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 340–347, nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.164>

TECHNOLOGIES, A. **Agilent 4294A - Precision Impedance Analyzer**. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/299911/HP/4294A.html>>.

TSURUTA, K. M. **Structural health monitoring of composite materials subjected to impacts using the electromechanical impedance technique**. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008. <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14825>

VENSON, G. **Aplicação do Coeficiente de Hurst na Técnica de Monitoramento da Integridade Estrutural Baseada na Impedância Eletromecânica**. 174f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

<http://doi.org/10.14393/ufu.te.2020.356>.

VIEIRA, P. G. **Seleção da faixa de frequência usando wavelets para detecção de danos em sistemas SHM baseados no princípio da EMI**. 114 f. Dissertação (mestrado) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, 2016.

<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/148608>.

XU, D.; BANERJEE, S.; WANG, Y.; HUANG, S.; CHENG, X. Temperature and loading effects of embedded smart piezoelectric sensor for health monitoring of concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 76, p. 187–193, fevereiro.

2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.067>.

YANG, Y.; LIM, Y. Y.; SOH, C. K. 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**, v. 17, n. 3, p. 035008, 31 mar. 2008. [DOI 10.1088/0964-1726/17/3/035008](https://doi.org/10.1088/0964-1726/17/3/035008)

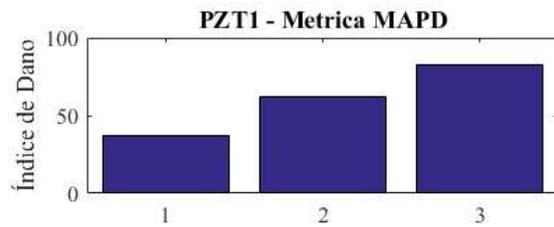
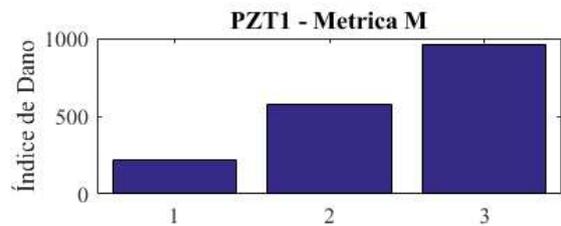
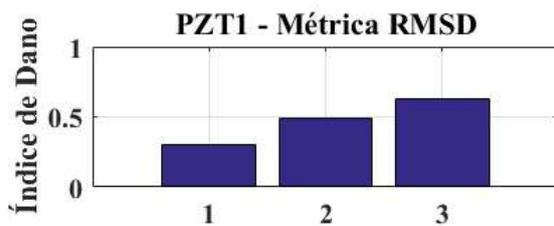
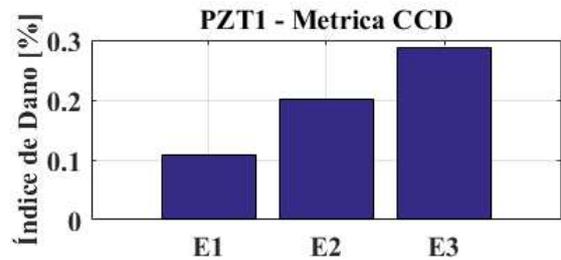
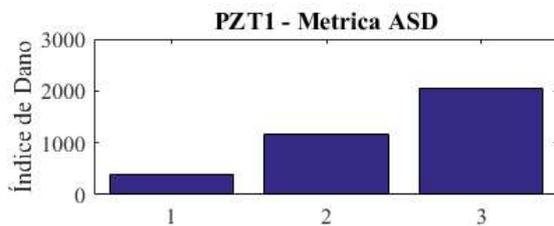
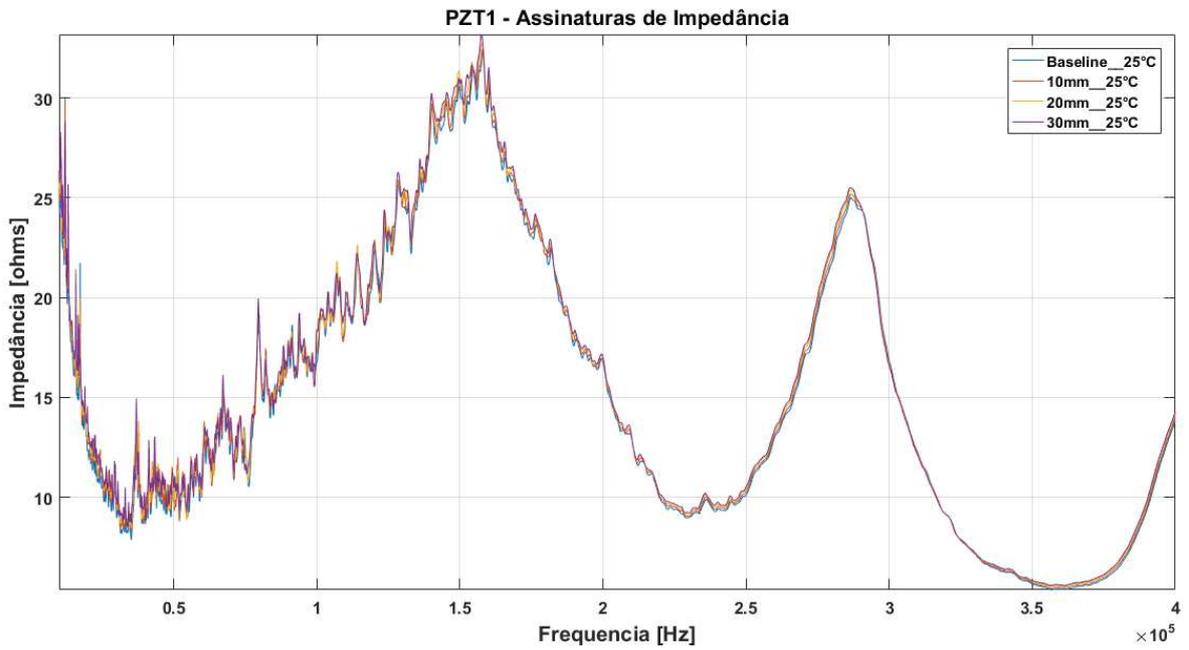
ZHANG, C.; PANDA, G. P.; YAN, Q.; ZHANG, W.; VIPULANANDAN C.; SONG, G. Monitoring early-age hydration and setting of Portland cement paste by piezoelectric transducers via electromechanical impedance method. **Construction and Building Materials**, v. 258, p. 120348, out. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120348>.

ZHANG, S.; HENG, Z.; ZIJIAN, J.; RUILION, C.; YANLIANG, X. CHUN, C.; YAMEI, Z. Thermal properties of amino-functionalized multi-walled carbon nanotubes reinforced epoxy-based transducers embedded in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 127, p. 104411, mar. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104411>.

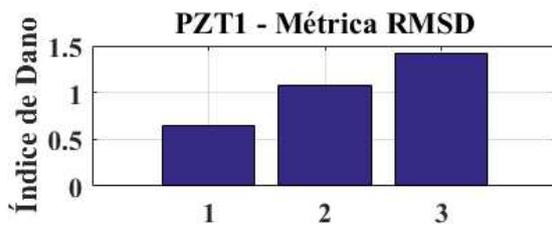
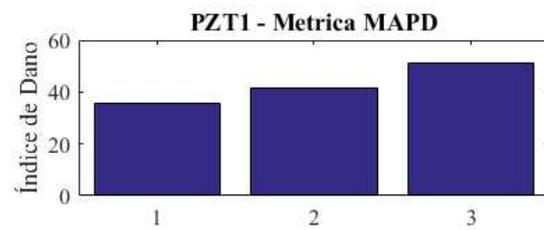
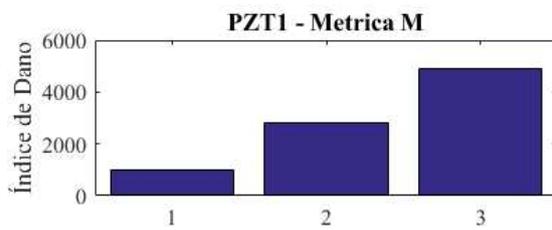
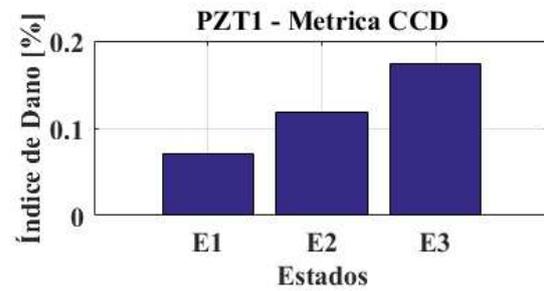
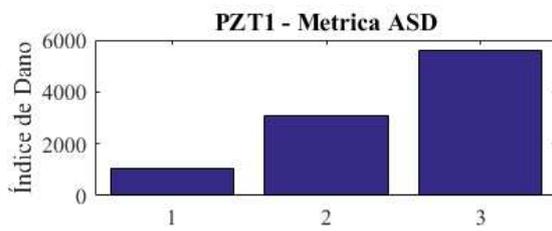
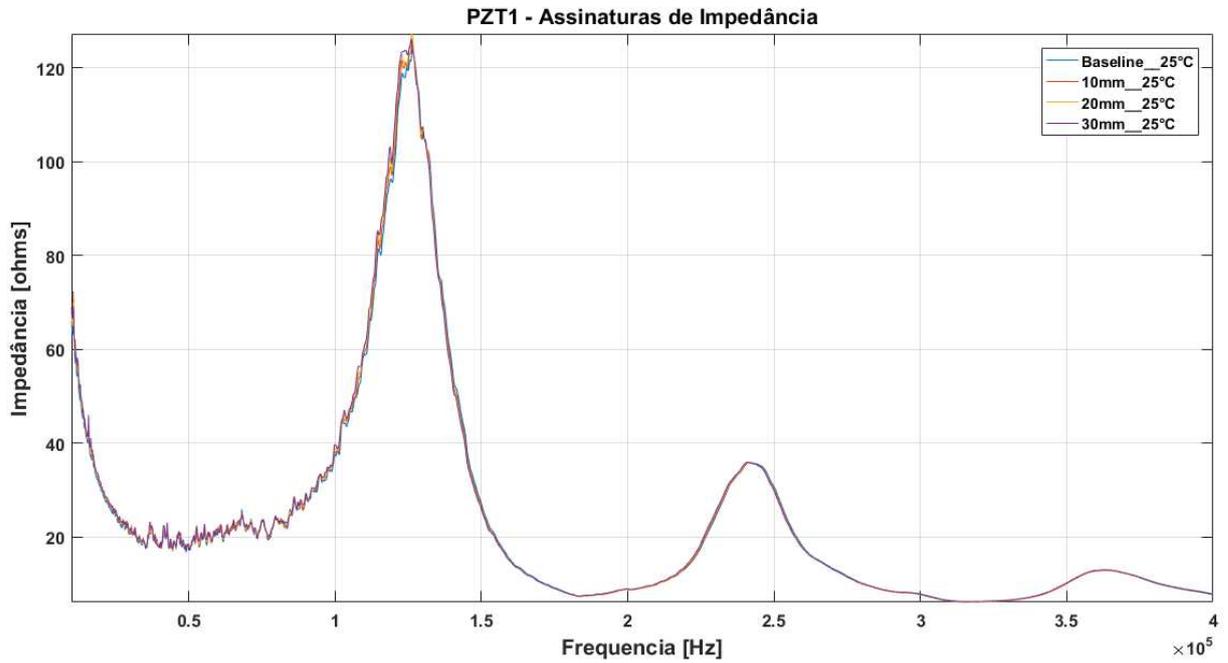
ZHU, J.; PENG, H.; RODRIGUEZ-MACIAS, F.; MARGRAVE, J. L.; KHABASHESKU, V. N.; IMAM, A. M.; LOZANO, K.; BARRERA, E. V. Reinforcing Epoxy Polymer Composites

Through Covalent Integration of Functionalized Nanotubes. **Advanced Functional Materials**, v. 14, n. 7, p. 643–648, julho. 2004. <https://doi.org/10.1002/adfm.200305162>.

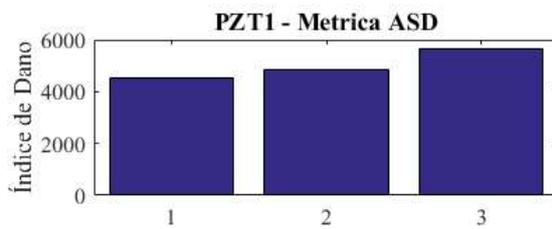
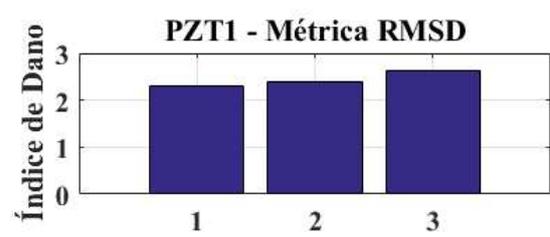
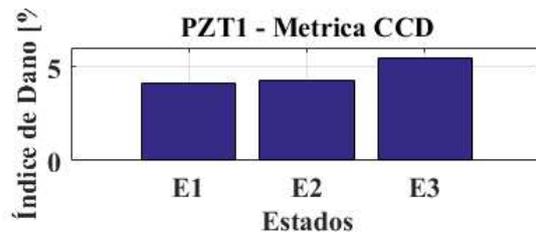
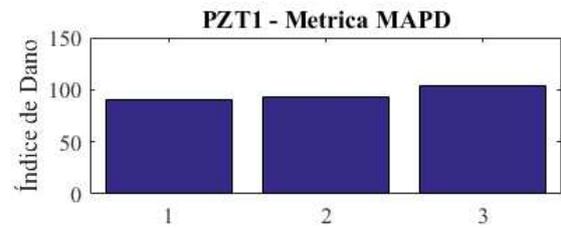
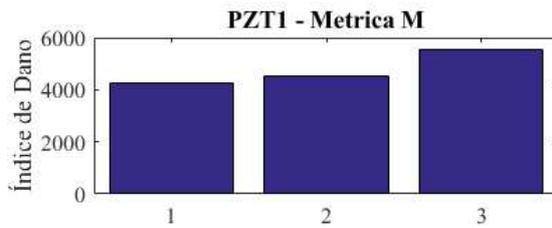
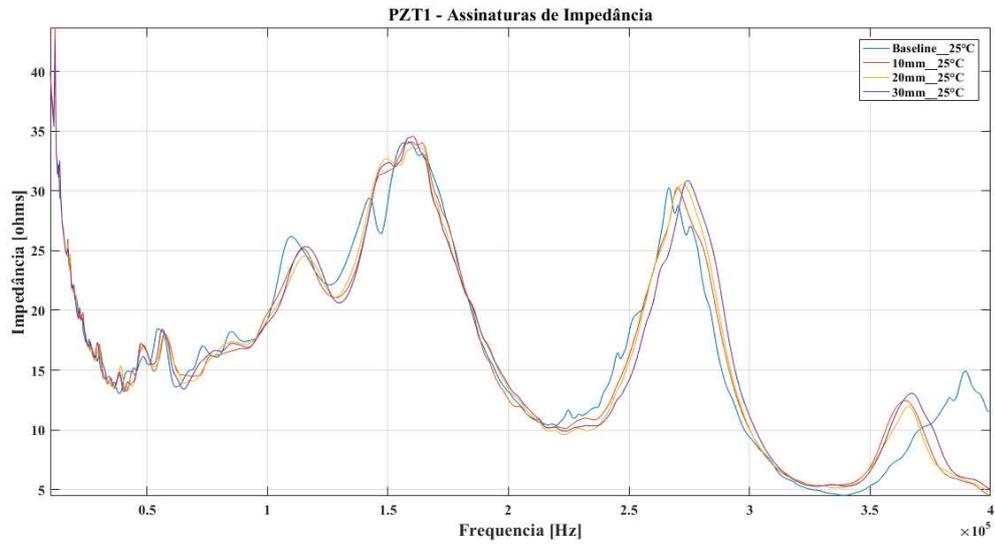
APÊNDICE A – CURVAS DE IMPEDÂNCIA E METRICAS
30MPa SIAU – 10kHz a 400kHz



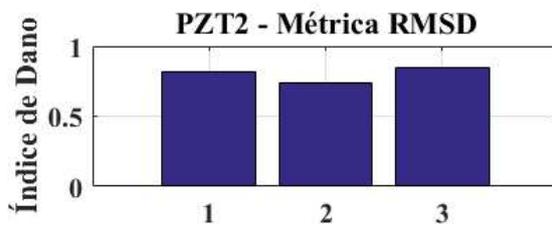
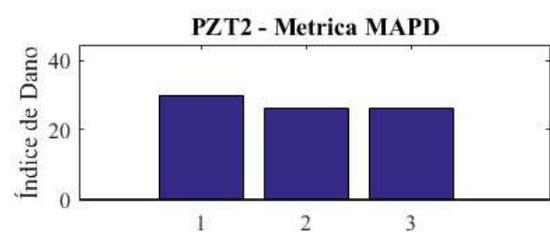
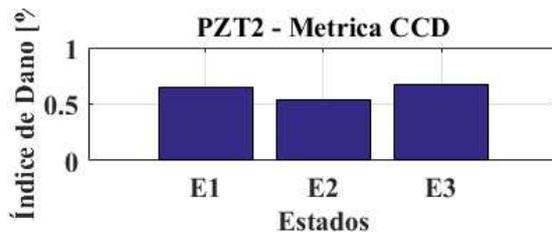
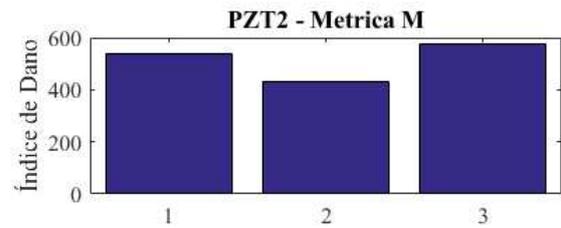
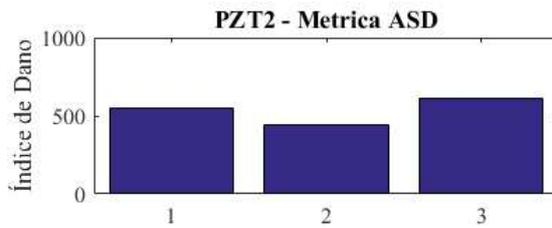
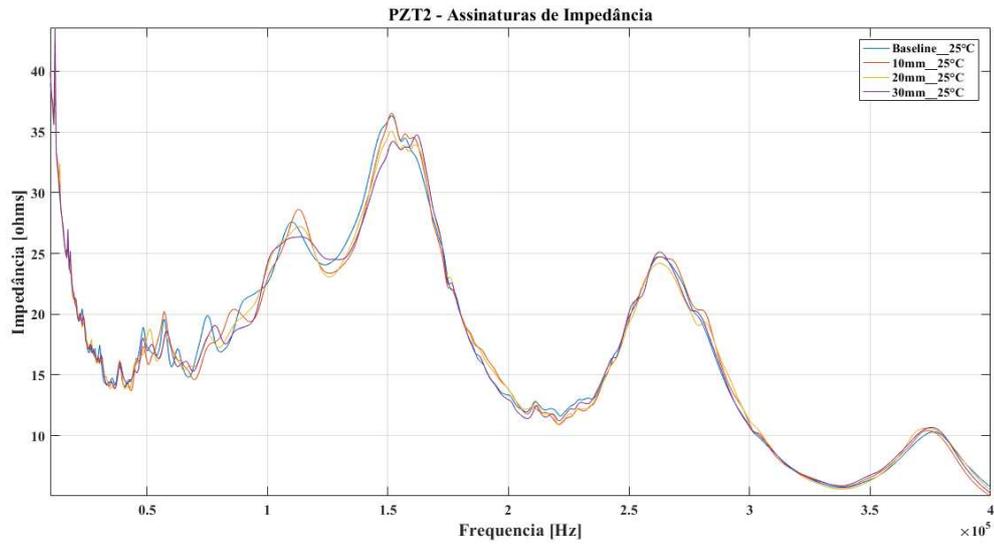
30 MPa epóxi - 10kHz 400kHz



30 MPa MEF SIAU - 10kHz 400kHz

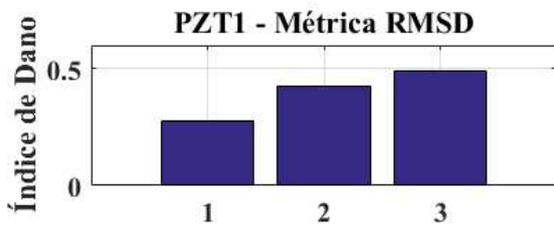
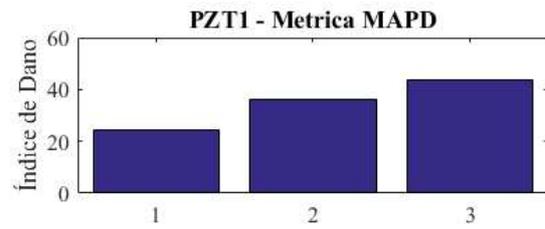
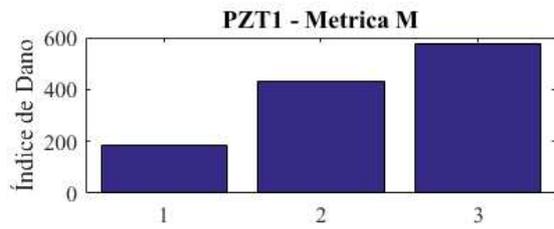
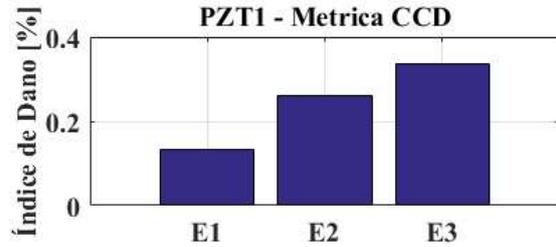
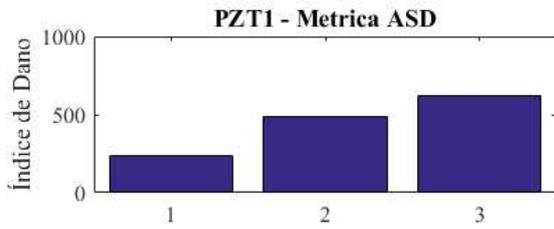
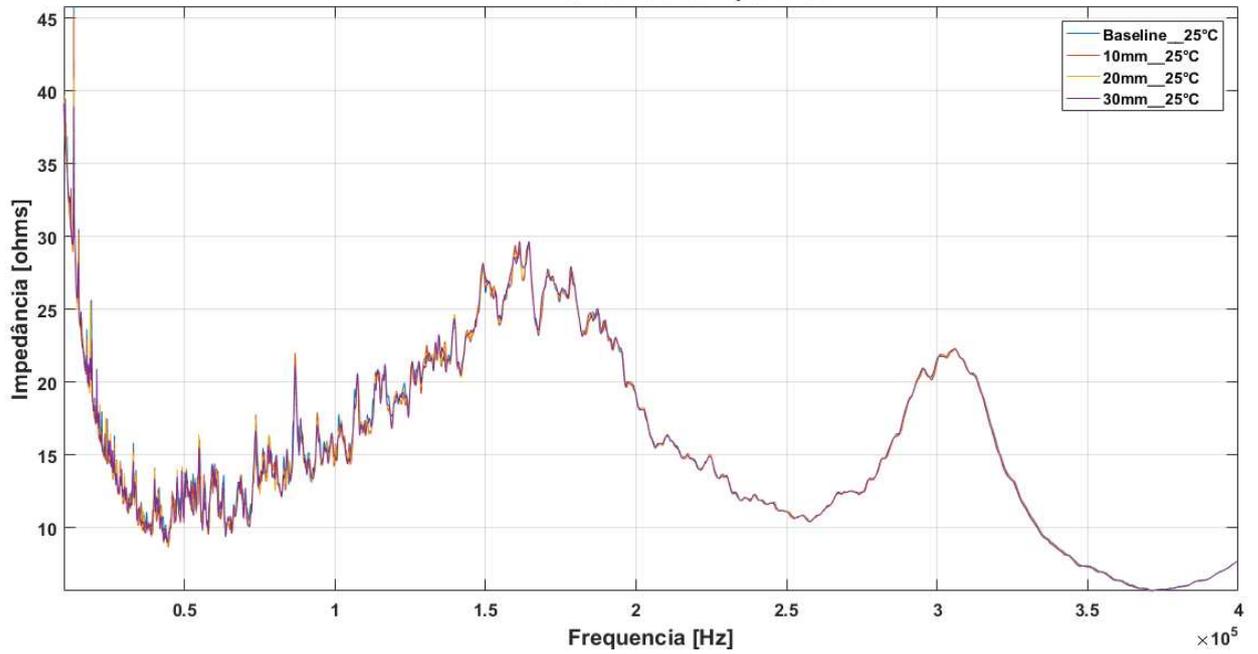


30 MPa MEF Epóxi - 10kHz 400kHz

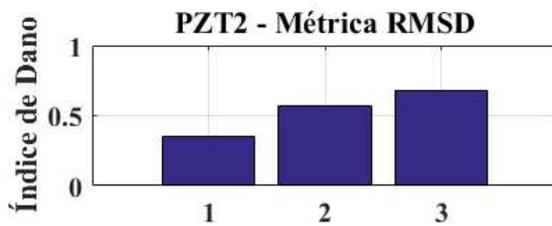
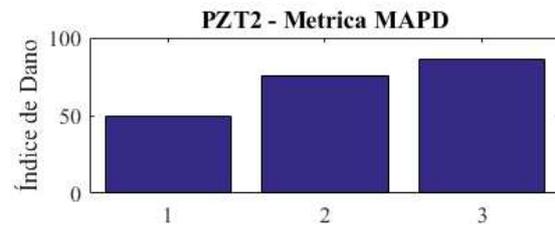
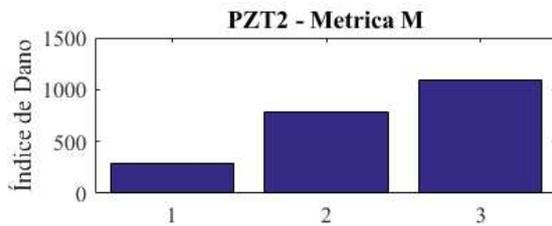
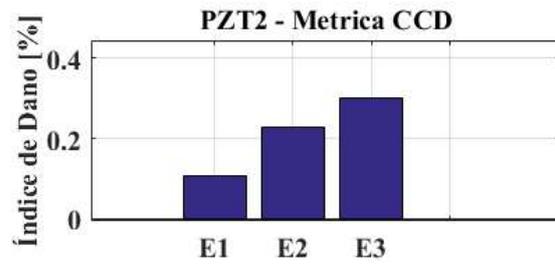
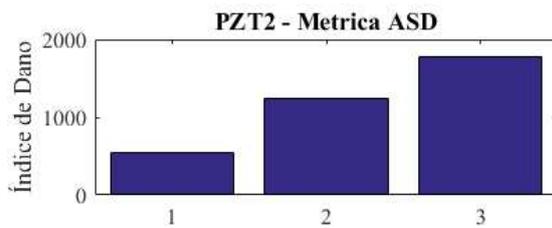
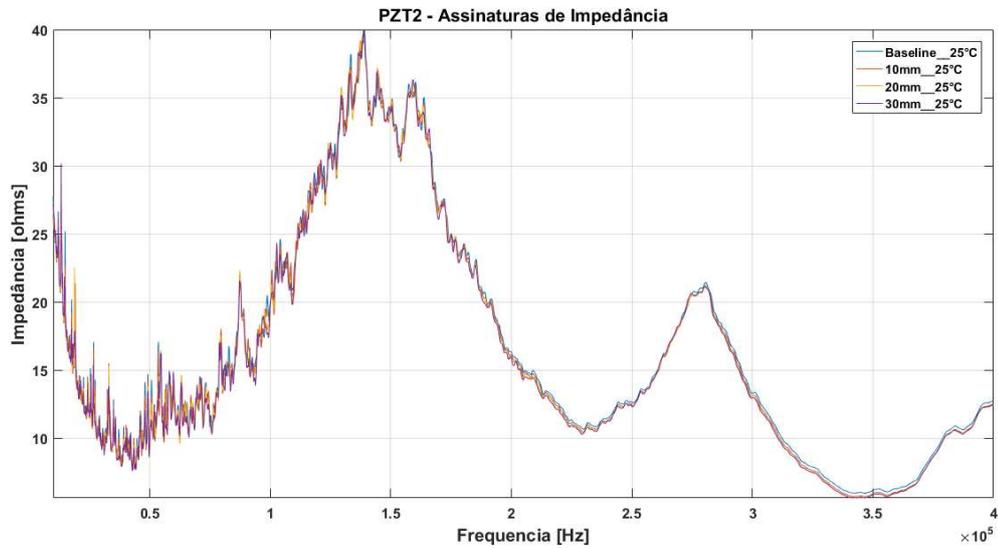


60 MPa SIAU - 10kHz 400kHz

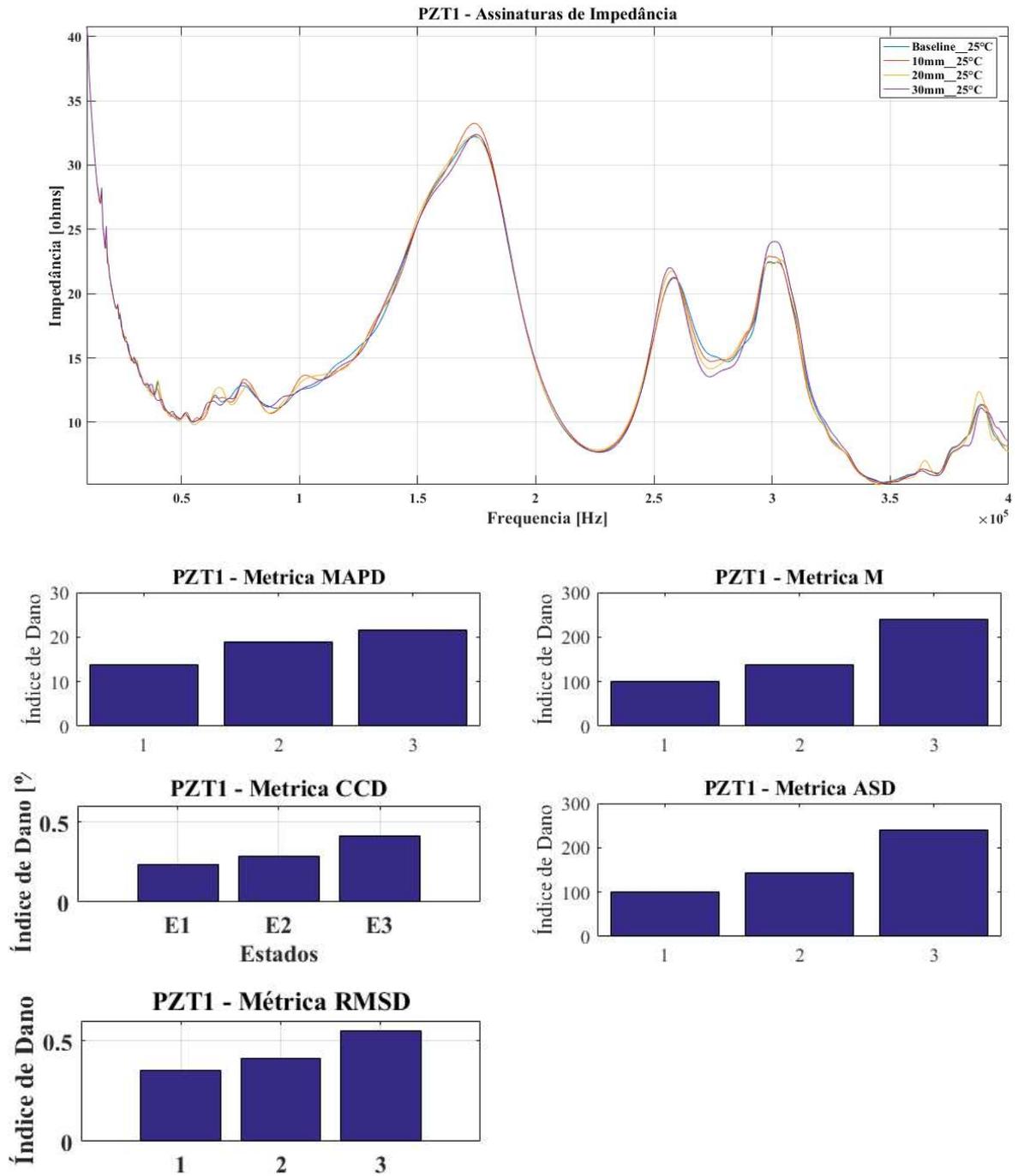
PZT1 - Assinaturas de Impedância



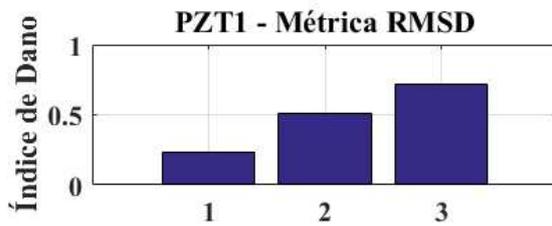
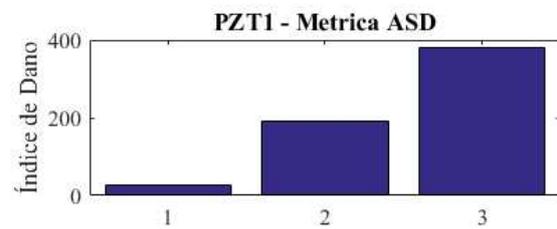
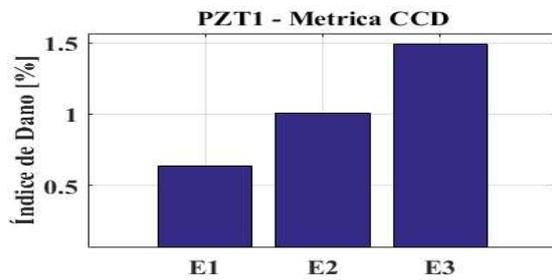
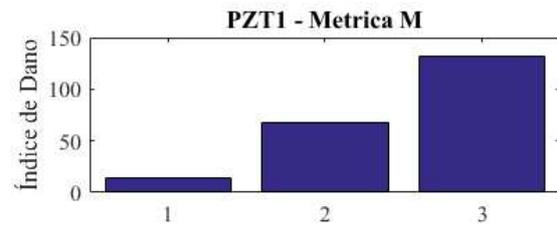
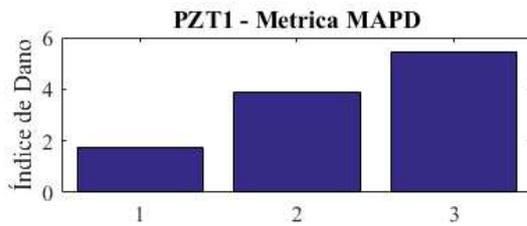
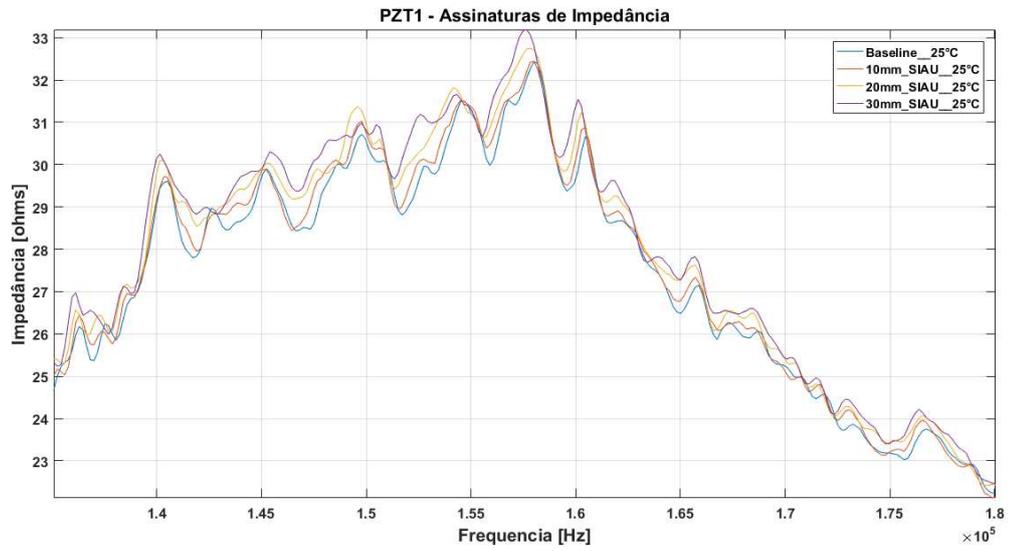
60 MPa epóxi - 10kHz 400kHz



60 MPa MEF SIAU - 10kHz 400kHz

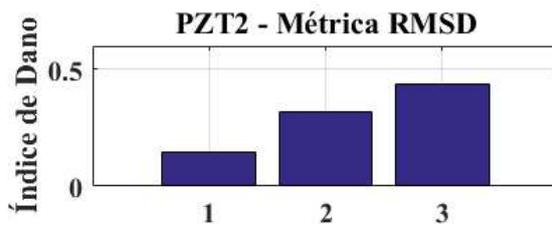
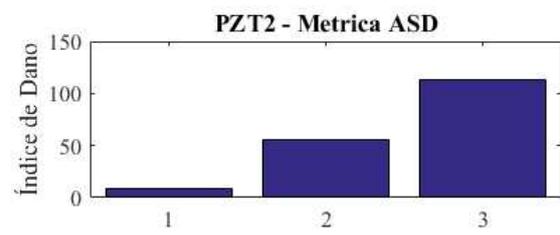
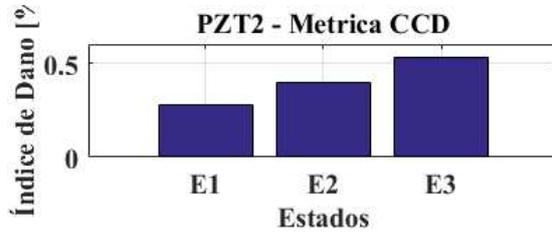
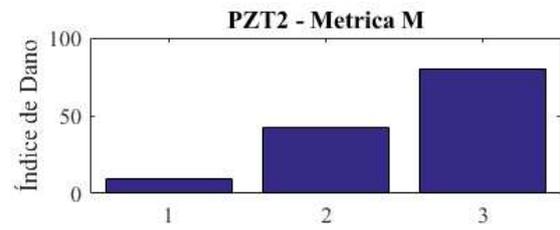
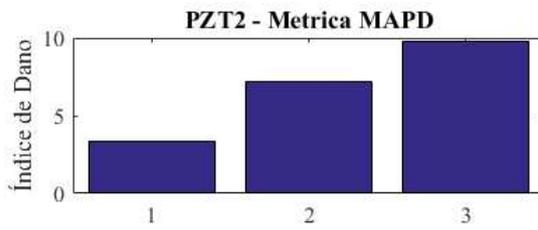
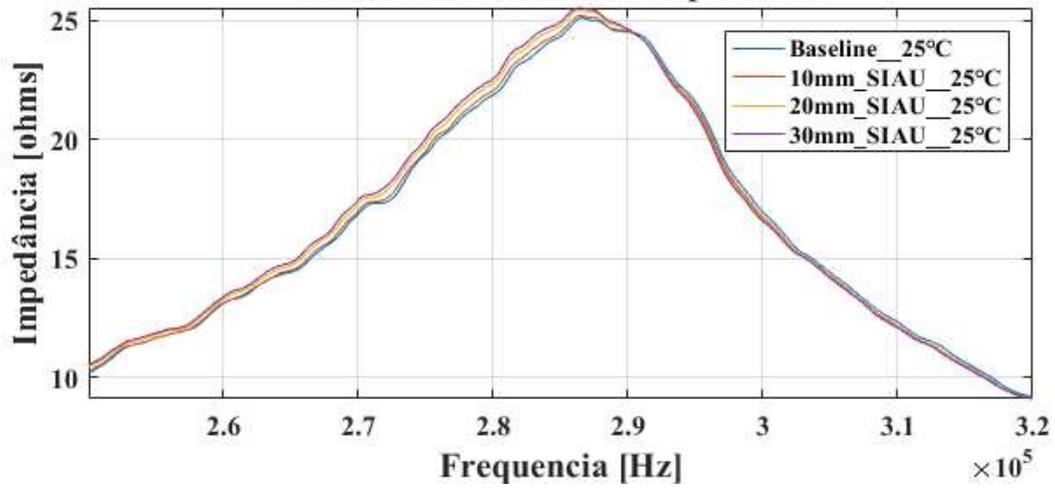


30MPa SIAU - 1º pico de ressonância

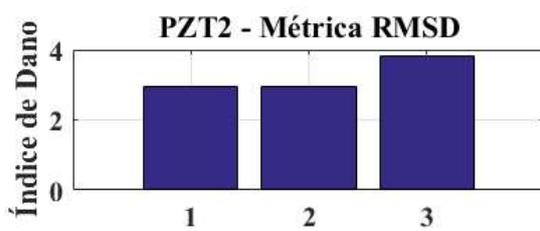
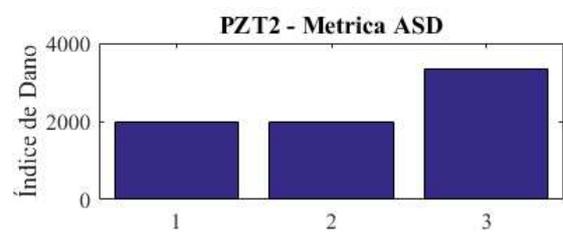
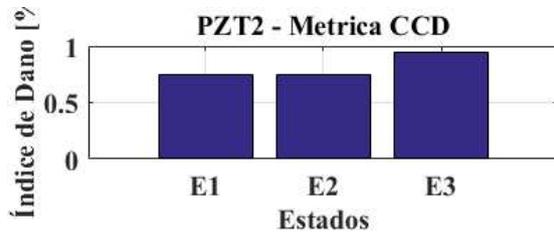
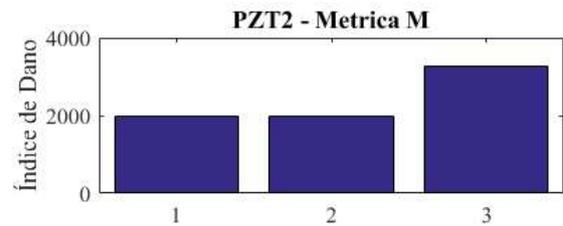
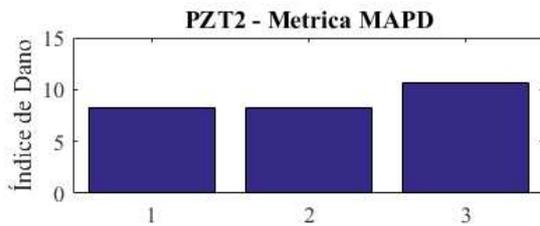
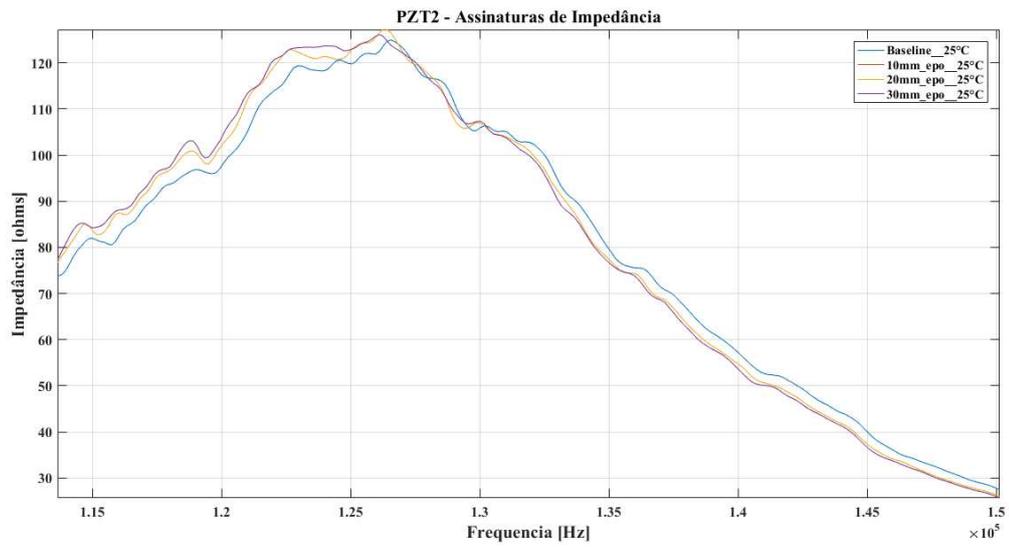


30MPa SIAU - 2° pico de ressonância

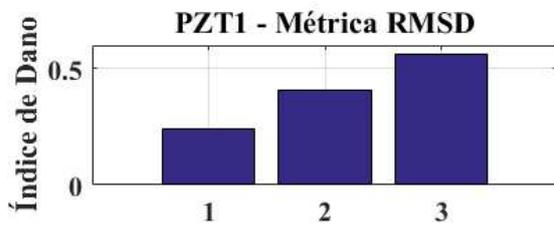
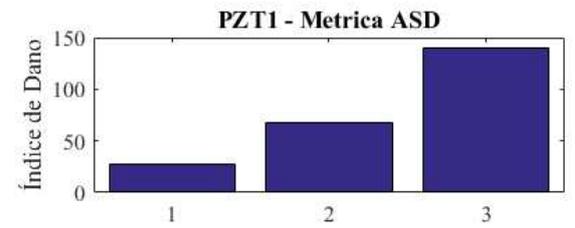
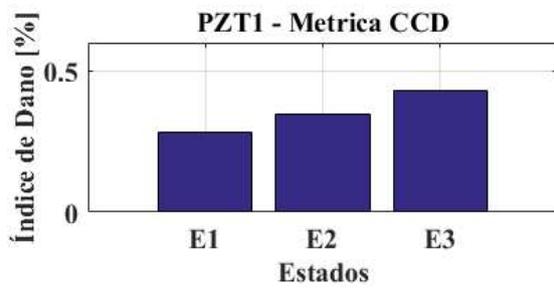
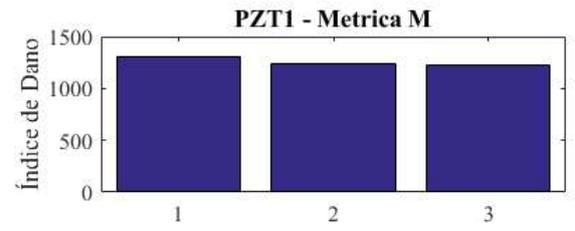
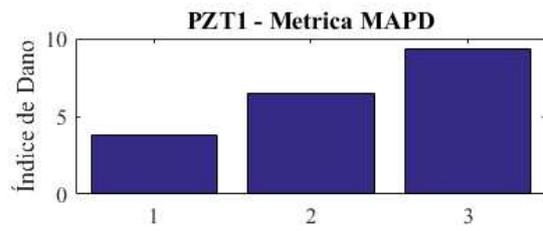
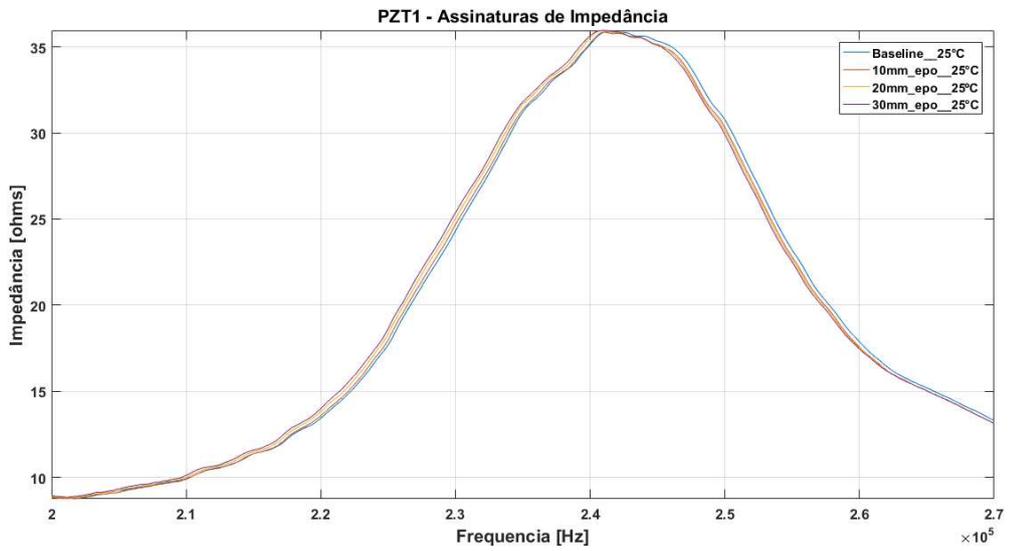
PZT2 - Assinaturas de Impedância



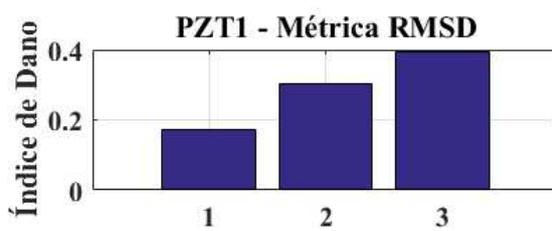
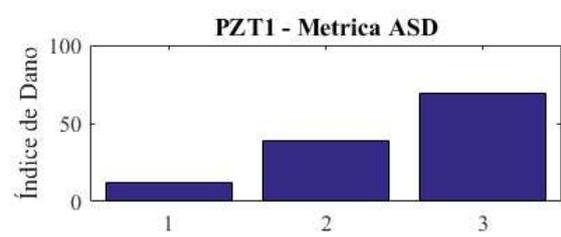
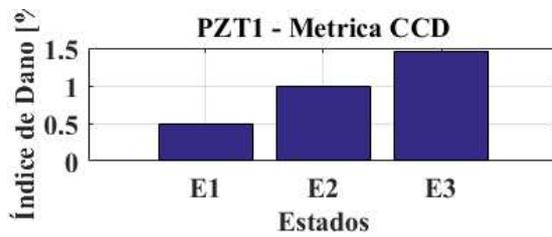
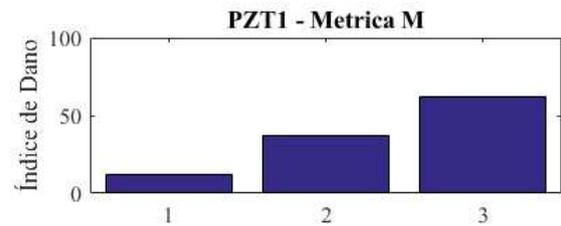
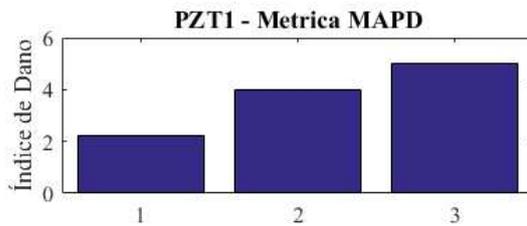
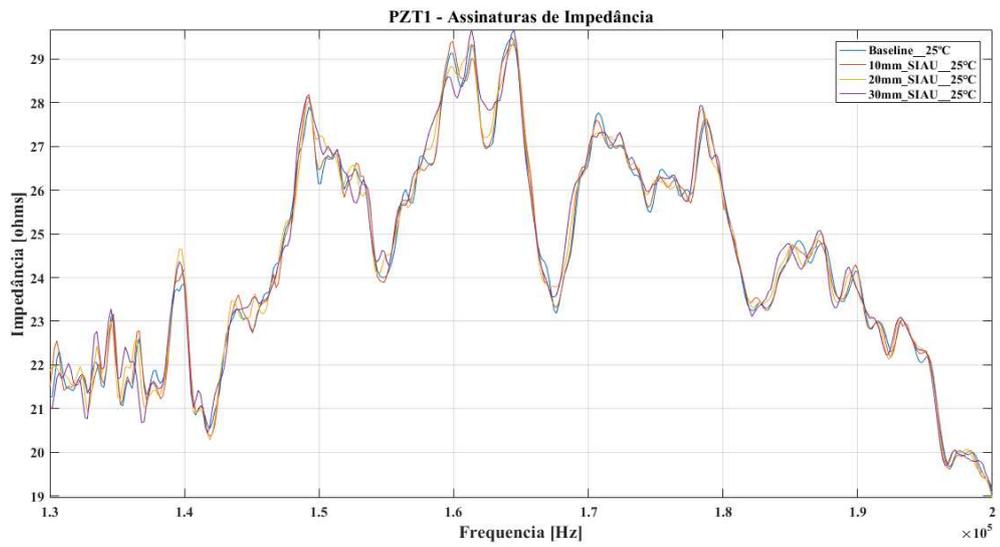
30MPa epóxi - 1º pico de ressonância



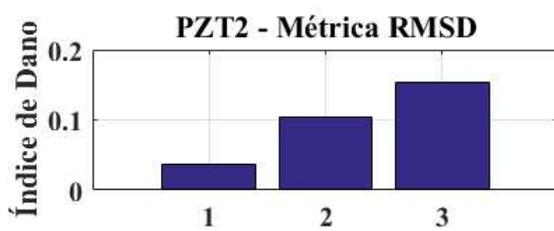
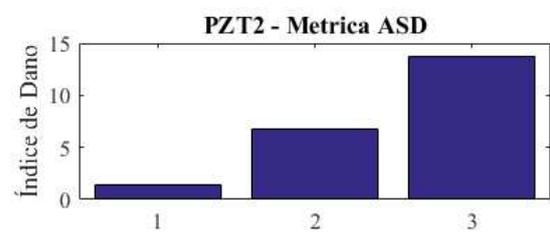
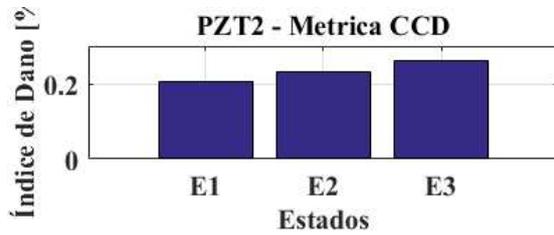
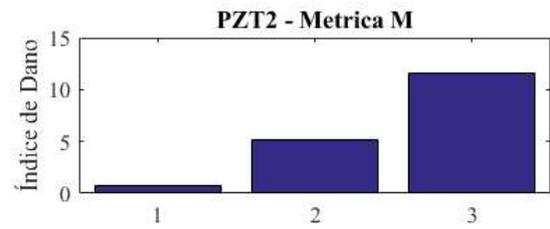
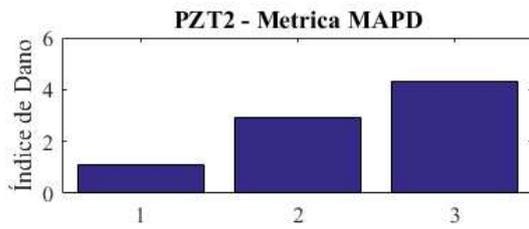
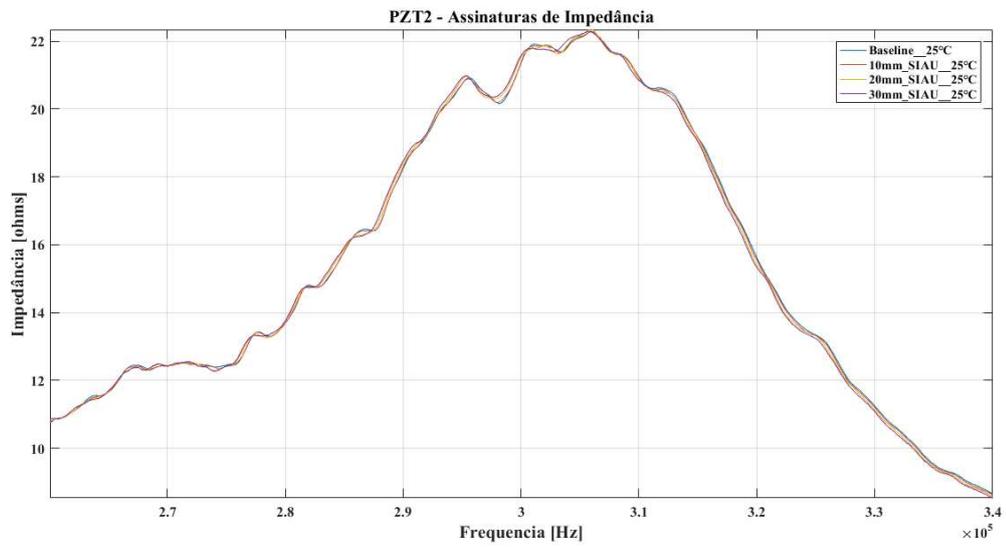
30MPa epóxi - 2º pico de ressonância



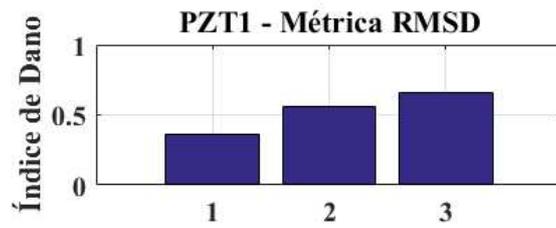
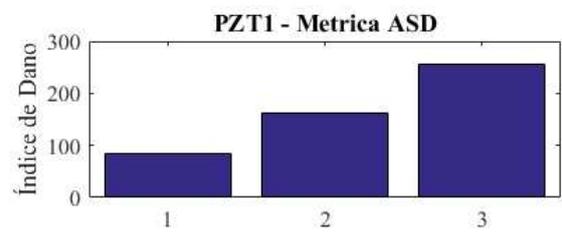
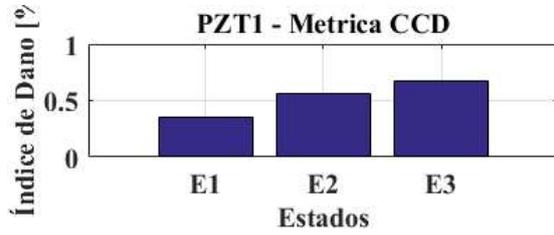
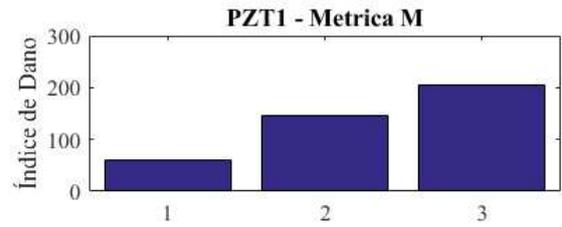
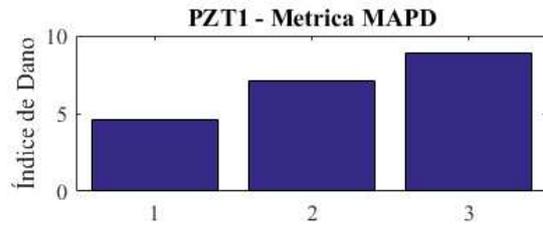
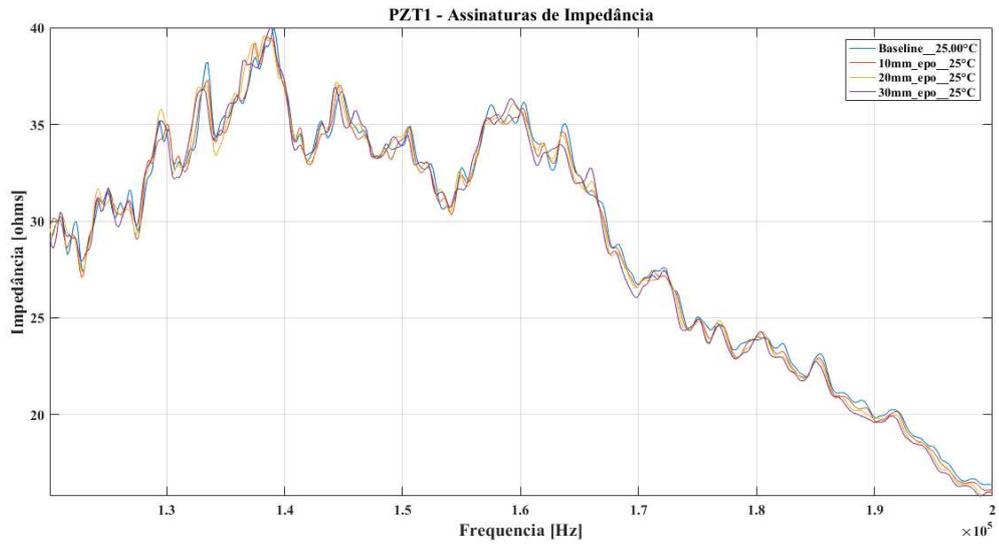
60MPa SIAU - 1º pico de ressonância



60MPa SIAU - 2º pico de ressonância



60MPa epóxi - 1º pico de ressonância



60MPa epóxi - 2º pico de ressonância

