

II SPEC

Simpósio de Pós-graduação em Engenharia Civil
Uberlândia, Minas Gerais, Brasil
Março, 2024

TRANSDUTORES PIEZOELÉTRICOS: MODELAGEM E ANÁLISE

Piezoelectric Transducers: Modeling and Analysis

Lucas Gomes ^a, Leila Aparecida de Castro Motta ^b, Raquel Naiara Fernandes Silva ^c

^a Mestrando em Engenharia Civil (PPGEC- FECIV/UFU), E-mail: lucas.g@ufu.br

^b Professora da Faculdade de Engenharia Civil (FECIV/UFU), E-mail: lacastro@ufu.br

^c Professora da Faculdade de Engenharia Civil (FECIV/UFU), E-mail: raquelfernandes@ufu.br

RESUMO

O monitoramento de danos em estruturas é essencial para a segurança e eficiência em engenharia. Este artigo destaca o uso de transdutores piezoelétricos para essa finalidade, com ênfase na modelagem matemática e simulação numérica como ferramentas essenciais para o projeto e análise de sistemas. O Método dos Elementos Finitos é apresentado como uma abordagem proeminente para a modelagem matemática de processos dinâmicos. O estudo visa avaliar o comportamento do software em relação à modelagem, buscando uma comparação métrica entre os dados simulados e a aplicação adequada para a análise de impedância. Para isso, foram coletadas as assinaturas de um transdutor simples e modelado um com as mesmas características por meio do COMSOL Multiphysics. Após o processamento, as assinaturas foram obtidas e comparadas, revelando uma proximidade nos resultados encontrados.

Palavras-chave: monitoramento de integridade estrutural; transdutores; análise de impedância; simulação numérica; modelagem.

ABSTRACT

Monitoring structural damage is crucial for safety and efficiency in engineering. This article highlights the use of piezoelectric transducers for this purpose, with an emphasis on mathematical modeling and numerical simulation as essential tools for system design and analysis. The Finite Element Method is presented as a prominent approach for the mathematical modeling of dynamic processes. The study aims to evaluate the software's behavior regarding modeling, seeking a metric comparison between simulated data and the appropriate application for impedance analysis. To achieve this, signatures from a simple transducer were collected and a model with the same characteristics was created using COMSOL. After processing, the signatures were obtained and compared, revealing a close proximity in the results.

Keywords: *structural health monitoring; transducers; impedance analysis; numerical simulation; modeling.*

1. INTRODUÇÃO

A análise de danos em engenharia é vital para identificar possíveis falhas que podem levar a rupturas e acidentes graves. São numerosos os métodos de monitoramento de integridade estrutural para detecção de danos, dentre as diversas opções de monitoramento tem-se a atuação de transdutores piezoelétricos.

Os transdutores piezoelétricos são dispositivos essenciais na engenharia, convertendo energia mecânica em elétrica e vice-versa por meio do efeito piezoelétrico em materiais como cristais e cerâmicas. O princípio é caracterizado pela mudança das dimensões quando aplicada uma tensão elétrica sendo atuador ou inversamente atuando como transdutor por meio da conversão de energia.

Com sua capacidade de monitoramento em tempo real e de forma não invasiva, os transdutores desempenham um papel fundamental na prevenção de falhas críticas e acidentes catastróficos, tornando-se essenciais para a segurança e a manutenção preventiva em diversas áreas da engenharia. É crucial verificar a adequação do seu uso em cada ambiente para garantir uma detecção mais sensível, sendo possível empregar a modelagem para agilizar a execução e elaboração do conjunto, acelerando assim a avaliação dos parâmetros.

A modelagem matemática do sistema, especialmente por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), oferece uma abordagem eficaz para avaliar o comportamento do sistema, facilitando a comparação entre os dados simulados e os resultados obtidos em testes em bancadas.

Nesse contexto, o propósito deste estudo é avaliar o desempenho do *software* em relação à sua modelagem, com o intuito de otimizar analiticamente os parâmetros. A meta é estabelecer uma comparação precisa entre os dados obtidos experimentalmente e os simulados, abrangendo aspectos como a malha, a definição do circuito e o controle de frequência. Essa combinação analítica e experimental oferece flexibilidade na modificação das propriedades físicas do sistema, auxiliando na otimização eficiente do processo, diminuindo custos e tempo necessário para testes físicos.

2. METODOLOGIA

2.1. IMPEDÂNCIA

A técnica de impedância eletromecânica monitora a variação da assinatura eletromecânica da estrutura, empregando materiais piezoelétricos para detectar danos como fissuras e rompimentos de seção. Essa abordagem possibilita o monitoramento contínuo da estrutura por meio de um transdutor fixado ou incorporado. A equação que expressa a impedância elétrica corresponde oposição que um circuito ou componente oferece à corrente alternada **Eq. (01)**.

$$Z = \frac{V}{I} \tag{01}$$

Na qual temos Z sendo a impedância; V tensão elétrica alternada; I corrente resultante. A impedância é expressa por Ohms “ Ω ”. O transdutor interage eletricamente com o material, excitando-o ou respondendo à sua deformação para gerar mudanças na voltagem. A detecção de anomalias se baseia no comportamento eletromecânico, analisando as variações na impedância em relação às frequências naturais da estrutura, que são impactadas pelo dano, essas discrepâncias são claramente visíveis nas diferenças nos picos ou deslocamento das assinaturas.

2.2. TRANSDUTOR PIEZOELÉTRICO

O estudo do transdutor piezoelétrico feito por testes em condições livres e sem danos para verificar sua assinatura de impedância, sendo utilizado o transdutor de 25mm x 0.7mm, modelo PED25T07F3000R. Esse procedimento envolveu a conexão do transdutor ao analisador de impedância Agilent 4294A, disponibilizado para análise pelo Laboratório de Mecânica de Estruturas (LMEST) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

A coleta da assinatura foi realizada com uma voltagem configurada de 1V e dentro da faixa de frequência de 10kHz a 400kHz, conforme o estudo de Gayakwad e Thiyagarajan (2022). Esse intervalo demonstra ser adequado para avaliar o comportamento do transdutor de forma precisa e abrangente. Os valores obtidos são exportados pelo próprio equipamento.

2.3. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Para a modelagem e análise do transdutor, é crucial considerar as etapas de conexão da ferramenta no COMSOL *Multiphysics*, detalhadas no processo ilustrado na **Fig.1**.

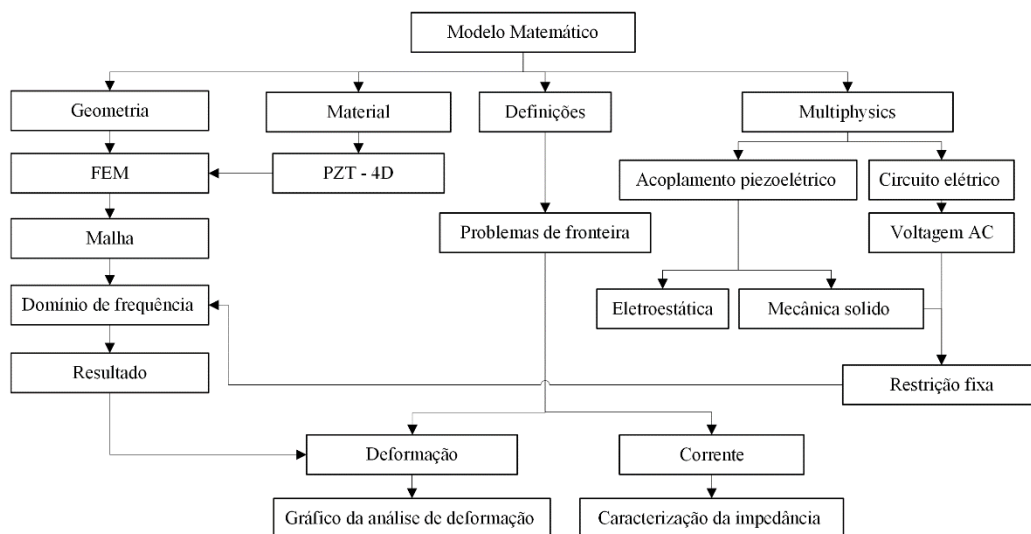


Fig. 1: Processo dinâmico da simulação de elemento finito, adaptado de Espinosa (2021)

O transdutor circular é o elemento numérico empregado na análise, onde são verificadas a impedância $|Z|$ e a susceptância $|B|$, assinaturas obtidas após a modelagem que viabilizam a detecção de danos. A investigação do modelo matemático ocorre no domínio da frequência, permitindo a análise em frequências específicas e direcionando o progresso do desenvolvimento. Durante a simulação, é utilizado o módulo de estrutura que integra o efeito piezoelétrico na modelagem. As propriedades do transdutor foram minuciosamente avaliadas, com a Tabela 1 apresentando as propriedades utilizadas nas simulações.

Tabela 1 - 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

Autor: COMSOL (2023)

O sistema de análise do COMSOL permite diversas modificações, sendo utilizado no modelo um transdutor circular de Ø25x0.7mm. O terminal de entrada de voltagem está localizado no topo, onde é aplicada uma tensão de 1 V, enquanto o terra está situado na parte inferior. Esses valores observados são os mesmos empregados no transdutor piezoelétrico utilizado na análise no impedancímetro. Esses valores são os mesmos observados no transdutor piezoelétrico utilizado na análise no impedancímetro. A **Fig. 2** mostra o modelo gerado, onde foi realizada a análise e a deformação proveniente da aplicação da carga gerada na simulação.

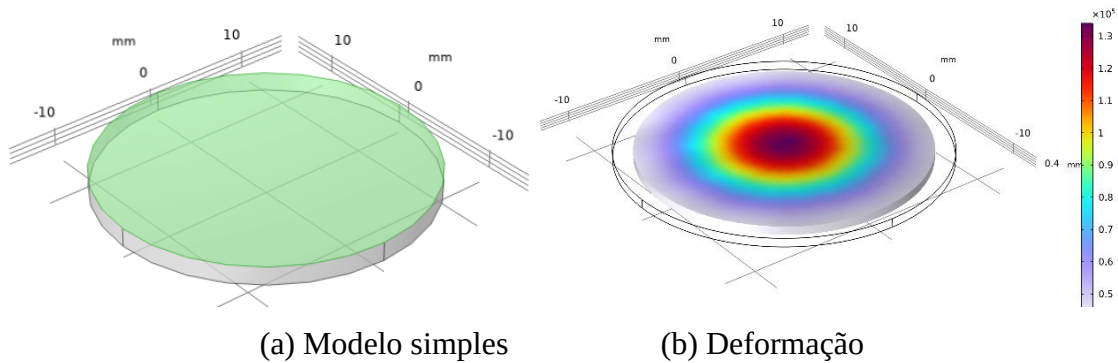


Fig. 2: Modelo de estudo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando a metodologia vista na **Fig. 1**, a série de dados foi obtida, a fim de avaliar a sensibilidade e os aspectos discricionais relacionados ao arranjo experimental. A eficiência na coleta de assinaturas é vista para garantir a confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados. O resultado do processamento das assinaturas com relação a impedância e a susceptância

obtidas pelo analisador de impedância, sendo esse o PZT 4D e as obtidas pelo COMSOL, sendo esse representado por COMSOL, são vistas na **Fig. 3**.

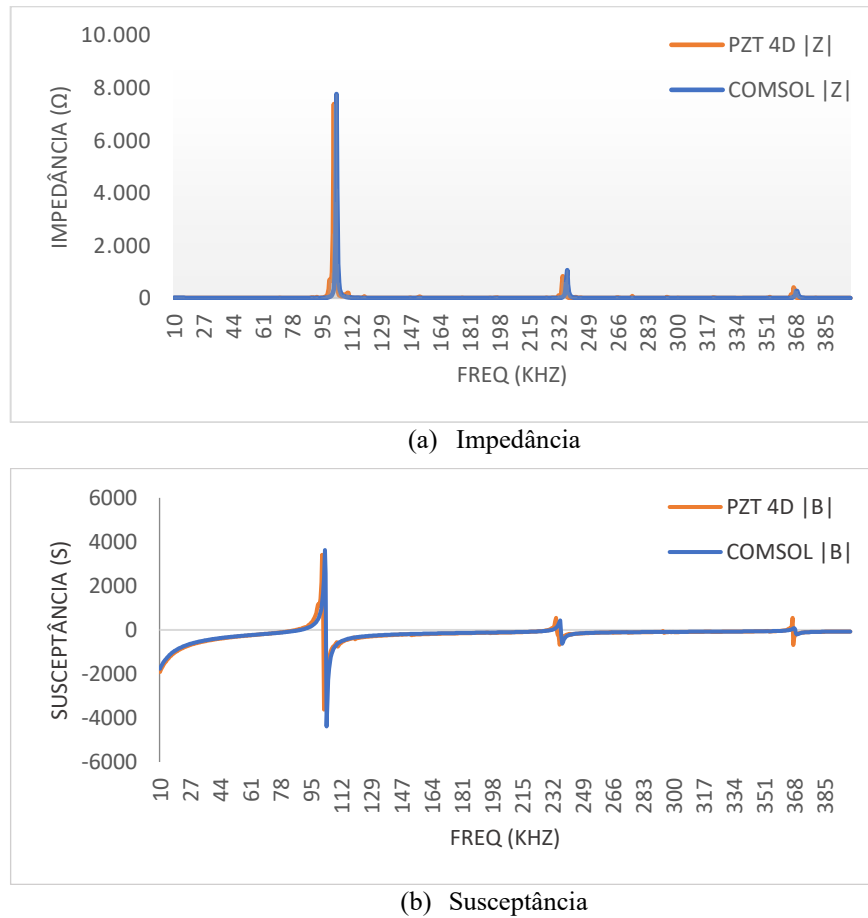


Fig. 3: Assinaturas de impedância e susceptância do modelo MEF e analisador de impedância

Com base nos resultados, foram identificados três picos de impedância. No analisador de impedância, os picos ocorreram em 102,14 kHz com 7.394,74 Ω, 234,25 kHz com 830 Ω e 367,34 kHz com 409,08 Ω. Já no modelo simulado, os picos foram observados em 103,6 kHz com 7.775,63 Ω, 236,68 kHz com 1.064,84 Ω e 369,28 kHz com 277,29 Ω. O comportamento das assinaturas de susceptância se manteve consistente, com picos semelhantes entre assinaturas obtidas pelo modelo MEF em comparação ao impedancímetro, refletindo a mesma tendência observada na impedância e evidenciando concordância nas assinaturas.

CONCLUSÕES

Os resultados numéricos são comparados e analisados com o experimento, demonstrando um bom comportamento e proximidade com relação a modelagem numérica por meio do COMSOL. A dinâmica proposta para modelagem se apresenta adequada para elaborar e aplicar transdutores em estruturas para avaliação de impedância e detecção de danos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COMSOL Multiphysics. **Reference Manual**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf>. 10 dez. 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/fulltext19144 2021.pdf](http://jestr.org/downloads/Volume14Issue4/fulltext19144%2021.pdf)>. Acesso em: 10 dez 2023.

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 dez. 2023. <https://doi.org/10.3390/s22062296>.