

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA FONSECA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ADRIELLE SANTOS OLIVEIRA
NICHOLAS SANTOS NOGUEIRA**

**ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO DE GERAÇÃO DE ENERGIA UTILIZANDO ELEMENTOS
PIEZOELÉTRICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**RIO DE JANEIRO
2023**

**ADRIELLE SANTOS OLIVEIRA
NICHOLAS SANTOS NOGUEIRA**

**ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO DE GERAÇÃO DE ENERGIA UTILIZANDO ELEMENTOS
PIEZOELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Paulo Cesar da Camara Monteiro Junior

**RIO DE JANEIRO
2023**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

- O48 Oliveira, Adrielle Santos
Estudo de otimização de geração de energia utilizando elementos piezoelétricos /
Adrielle Santos Oliveira [e] Nicholas Santos Nogueira – 2023.
54f : il. (algumas color.) ; enc.
- Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow daFonseca,
2023.
Bibliografia: f. 54
Orientador: Paulo Cesar da Camara Monteiro Junior
1. Engenharia mecânica. 2. Geração de energia. 3. Energia – Fontes alternativas.
4. Sistemas não-lineares. I. Nogueira, Nicholas Santos. II. Monteiro Junior, Paulo Cesar da
Camara (Orient.). III. Título.
- CDD 620.1

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes – CRB/7 nº 5281

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos àqueles que estiveram ao meu lado durante esta jornada desafiadora.

Em especial, meu pai, cujo apoio e constante incentivo foram fundamentais para que eu persistisse. Seu encorajamento, orientação e principalmente, seu amor foram a luz que me guiou nos momentos de dúvida.

À minha mãe, minha amiga e conselheira, que sempre esteve presente, oferecendo seu carinho, compreensão e força nos momentos de dificuldade. Ambos desempenharam papéis essenciais, e sem o apoio incondicional de vocês, esta jornada teria sido muito mais árdua. Este trabalho é dedicado a vocês, com profunda gratidão e amor.

Também gostaria de agradecer ao meu colega, Nicholas e ao nosso orientador, professor Paulo, com quem pude dividir os últimos passos dessa longa caminhada com muito companheirismo.

Adrielle Santos Oliveira

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, que sempre me apoiou na minha jornada acadêmica, principalmente a minha irmã Amanda, que foi a pessoa que mais me deu força.

Agradeço também aos meus amigos de curso, que me acompanharam nessa árdua jornada, compartilhando sucessos e desafios e sempre triunfando no final.

Agradecer a minha dupla, Adrielle, que aceitou o desafio de me acompanhar nesse projeto.

E por fim agradecer ao corpo de professores do CEFET-RJ, destacando os professores Paulo Cesar e Luciana Loureiro, dois dos melhores professores que eu já tive na minha vida acadêmica.

Sou extremamente grato a todos

Nicholas Santos Nogueira

RESUMO

OLIVEIRA, Adrielle. NOGUEIRA, Nicholas. Estudo de Otimização de Geração de Energia Utilizando Elementos Piezoelétricos. 2023. 54 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2023.

Este trabalho de conclusão de curso aborda a aplicação de materiais piezoelétricos para geração de energia, um campo de pesquisa e desenvolvimento que tem ganhado crescente importância devido à redução de custos com energia elétrica que essa tecnologia pode oferecer, em especial para ambientes de difícil acesso e sob condições severas (temperatura, vazão e pressão), tal qual ocorre na indústria de óleo e gás. Para isto, foi proposta inicialmente a modelagem em elementos finitos do comportamento do material piezoelétrico sob o ponto de vista eletromecânico, as simulações foram realizadas com auxílio do software comercial ANSYS®. Para a validação do modelo foram realizados testes experimentais em condições controladas e utilizou-se os resultados para comparar com as simulações.

Palavras-chave: Piezoelétrico, Elementos Finitos, Colheita de Energia, Sensores.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Adrielle. NOGUEIRA, Nicholas. Study of Energy Generation Optimization Using Piezoelectric Elements. 2023. 54 pages. Trabalho de Conclusão de Curso – Federal Center of Technological Education Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2023.

This dissertation explores the utilization of piezoelectric materials for energy production, a burgeoning area in research and development due to its potential cost-saving implications in electrical energy. This technology holds significant promise, particularly in challenging environments characterized by extreme conditions such as those found in the oil and gas industry. The study initially involved finite element modeling of the electromechanical behavior of piezoelectric materials using ANSYS® software. Experimental tests were conducted under controlled conditions to validate the model, enabling a comparative analysis with the simulations.

Keywords: Piezoelectric, Finite Elements, Energy Harvesting, Sensors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Efeito piezoelétrico (a) Dipolos no interior de um material piezoelétrico (b) Voltagem gerada quando o material é submetido a uma tensão de compressão. Fonte: Adaptado de Callister (2018).....	17
Figura 2: Comportamento tensão-deformação de material elástico. Fonte: Donald J. Leo, 2007.	19
Figura 3: (a) Efeito da piezoelectricidade direta; (b) relação entre tensão e deslocamento elétrico em um material piezoelétrico. Fonte: Donald J. Leo, 2007.	20
Figura 4: Relação entre o campo elétrico aplicado e o deslocamento provocado no material piezoelétrico. Fonte: Donald J. Leo, 2007.	21
Figura 5: Relação entre o campo elétrico e a deformação em um material piezoelétrico.	21
Figura 6: Cubo piezoelétrico indicando o sistema de coordenadas. Fonte: Donald J. Leo, 2007.	23
Figura 7: Modelo em elementos finitos. Fonte: Autores.	29
Figura 8: Malha em elementos finitos. Fonte: Autores.	29
Figura 9: Primeiro modo de vibração do elemento ocorrendo em uma frequência de 1.351 Hz.	30
Figura 10: Segundo modo de vibração do elemento ocorrendo em uma frequência de 2.166 Hz. Fonte: Autores.	30
Figura 11: Terceiro modo de vibração do elemento ocorrendo em uma frequência de 3.718 Hz.	31
Figura 12: Resposta de amplitude de deformação para excitação entre 1 kHz e 4 kHz. Fonte: Autores.	31
Figura 13: Distribuição de tensão na viga sob carregamento harmônico de 5 N. Fonte: Autores.	32
Figura 14: Distribuição de deformação elástica na viga sob carregamento harmônico de 5 N. Fonte: Autores.	32
Figura 15: Teste de malha considerando o tamanho dos elementos. Fonte: Autores.....	33
Figura 16: Teste de malha considerando a quantidade dos elementos. Fonte: Autores.....	34
Figura 17: Malha do modelo em elementos finitos com 2 mm. Fonte: Autores.....	34

Figura 18: Primeiro modo de vibração com frequência de 60,3 Hz. Fonte: Autores.	37
Figura 19: Segundo modo de vibração com frequência de 239,7 Hz. Fonte: Autores.	37
Figura 20: Terceiro modo de vibração com frequência de 374,1 Hz. Fonte: Autores.	38
Figura 21: Quarto modo de vibração com frequência de 790,3 Hz. Fonte: Autores.	38
Figura 22: Resposta de amplitude de deformação para excitação entre 0 Hz e 150 Hz. Fonte: Autores.	39
Figura 23: Geração de tensão elétrica na frequência de 60,3 Hz. Fonte: Autores.	39
Figura 24: Deformação na viga sob carregamento harmônico de 5 N. Fonte: Autores.	40
Figura 25: Distribuição de tensão na viga sob carregamento harmônico de 5 N. Fonte: Autores.	40
Figura 26: Geração de tensão elétrica na frequência de 57 Hz. Fonte: Autores.	41
Figura 27: Geração de tensão elétrica na frequência de 64,5 Hz. Fonte: Autores.	41
Figura 28: Placa piezoelétrica fixada no shaker modelo 2025E. Fonte: Autores.	42
Figura 29: Montagem do experimento. Fonte: Autores.	43
Figura 30: Resposta harmônica do piezoelétrico no Signal Express LabView. Fonte: Autores.	43
Figura 31: Deslocamento da ponta durante a varredura. Fonte: Autores.	44
Figura 32: Voltagem do piezoelétrico durante a varredura. Fonte: Autores.	45
Figura 33: Deslocamento da ponta com frequência de 77,5 Hz. Fonte: Autores.	45
Figura 34: Voltagem do piezoelétrico com frequência de 77,5 Hz. Fonte: Autores.	46
Figura 35: Deslocamento da ponta com frequência de 72,5 Hz. Fonte: Autores.	47
Figura 36: Voltagem do piezoelétrico com frequência de 72,5 Hz. Fonte: Autores.	47
Figura 37: Deslocamento da ponta com frequência de 82,5 Hz. Fonte: Autores.	48
Figura 38: Voltagem do piezoelétrico com frequência de 82,5 Hz. Fonte: Autores.	48
Figura 39: Análise Numérica x Análise Experimental. Fonte: Autores.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matriz Propriedades Piezoelétricas	35
Tabela 2 – Matriz de Conformidade no eixo Y	35
Tabela 3 – Matriz de Rigidez no eixo Y	35
Tabela 4 – Matriz de Permissividade com tensão constante no eixo Y	36
Tabela 5 – Matriz de Permissividade com deformação constante no eixo Y	36
Tabela 6 – Matriz Piezoelétrica no eixo Y	36
Tabela 7 – Matriz Piezoelétrica - Permissividade com deformação constante no eixo Y	36
Tabela 8 – Dados da configuração da varredura feita em laboratório	43

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. OBJETIVO	11
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	12
2. EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS	13
2.1. SENSORIAMENTO DE INSTALAÇÕES.....	14
2.2. GERAÇÃO DE ENERGIA – <i>ENERGY HARVESTING</i>	15
3. PIEZOELETRICIDADE	17
3.1. PIEZOELETRICIDADE DIRETA.....	19
3.2. PIEZOELETRICIDADE INVERSA.....	20
3.3. FABRICAÇÃO DE MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS	21
3.4. EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS PIEZOELÉTRICAS.....	22
4. ANÁLISE EM ELEMENTOS FINITOS	29
4.1. ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS - PIEZOELÉTRICO	33
4.1.1. Análise da Banda de Ressonância.....	40
5. ANÁLISE EXPERIMENTAL	42
6. COMPARAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DO PIEZOELÉTRICO	49
7. CONCLUSÃO	51
7.1. TRABALHOS FUTUROS	52
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento da exploração de petróleo e gás em águas profundas, foram encontrados diversos gargalos operacionais na prática desta atividade. Um dos grandes empecilhos no segmento é o alto custo das tecnologias usadas na área de sensoriamento.

Sabendo que os dutos de escoamento da produção (*flowlines*) se estendem por centenas de quilômetros em um ambiente de altas pressões, com grande variação de temperatura, compreende-se a alta demanda de sistemas de monitoramento, assim como entende-se que, devido a dimensões do projeto, os custos e a complexidade envolvida nesses sistemas são altas. Os elementos piezelétricos têm, como principal característica, a alta performance de geração, quando excitados em uma frequência próxima de sua frequência natural (ressonância). Contudo, essa característica pode se modificar ao longo de sua vida útil, uma vez que a faixa de ressonância é, em geral, estreita.

Este projeto faz parte do grupo de pesquisa de materiais inteligentes do CEFET, no qual o orientador deste estudo é um membro ativo. Sua contribuição fundamental reside na implementação de um modelo numérico no software comercial ANSYS®, utilizando representação tridimensional. Este avanço é significativo em relação às análises discretas anteriormente realizadas, proporcionando uma nova abordagem.

1.1. OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é identificar a viabilidade do uso de elementos piezoelétricos para geração de energia *in loco* em dutos de prospecção e produção de hidrocarbonetos, visando diminuir eventuais falhas nos umbilicais e permitir uma melhor coleta de dados relevantes como temperatura, vazão e pressão.

Para isso, será proposta a utilização de simulações por elementos finitos e testes experimentais para compreender o comportamento piezoelétrico e a geração de tensão quando o material é excitado em sua frequência natural e em frequências próximas à faixa de ressonância. O objetivo é desenvolver um modelo piezoelétrico no ambiente virtual e conduzir uma série de simulações para determinar os modos naturais de frequência do material, bem como sua resposta harmônica.

Posteriormente, serão realizados testes laboratoriais em uma placa piezoelétrica,

com o intuito de analisar e comparar com os resultados obtidos nas simulações para aprofundar a compreensão do comportamento do material sob diferentes frequências de excitação.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O projeto tem como finalidade analisar a viabilidade do uso de elementos piezelétricos para geração de energia em instalações de petróleo.

O projeto será dividido em 3 partes:

- Pesquisa bibliográfica: Estudar e buscar dados relevantes sobre o comportamento e características dos piezelétricos e como geram energia;
- Simulações: Elaboração de um modelo numérico em elementos finitos, capaz de descrever o comportamento eletromecânico de um elemento piezoelétrico. O modelo numérico desse trabalho será elaborado por meio do software de elementos finitos ANSYS®.
- Experimentos: Elaboração de um modelo prático do dispositivo, buscando a configuração ótima para uso.

2. EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS

A indústria de petróleo é uma das mais importantes no mundo atual, responsável por grande parte do suprimento energético do planeta. O petróleo é uma fonte de energia fóssil e não renovável, extraído do subsolo e processado, capaz de produzir uma série de produtos após seu tratamento e refino, como gasolina, diesel, óleo combustível, querosene, e lubrificantes, usados em diversos setores que vão desde a geração de energia elétrica até a produção de plásticos e cosméticos. Dada a sua relevância, a indústria do petróleo enfrenta constantes desafios em busca de sua extração e produção.

A descoberta de reservas na região do pré-sal no Brasil, anunciada pela Petrobras em 2006, foi uma das maiores descobertas de reservatório *offshore* das últimas décadas. O reservatório está localizado em águas ultra profundas que variam de 2.000 a 3.000 metros de coluna d'água nas bacias sedimentares do litoral sul e sudeste do país, de acordo com o Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030) do Ministério de Minas e Energia do Brasil. Dentre as bacias estão a Bacia do Espírito Santo, de Campos e a de Santos, compondo uma faixa litorânea que vai do Espírito Santo à Santa Catarina. Sua exploração se tornou um dos maiores desafios técnicos e econômicos do nosso país, mas não deixa de representar, também, uma excelente oportunidade do Brasil se tornar ainda mais influente e relevante no mercado mundial da produção de petróleo.

De acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), as reservas de petróleo do pré-sal são estimadas em mais de 170 bilhões de barris. Representando cerca de 50% das reservas totais brasileiras, as reservas possuem grande importância estratégica para o país, uma vez que são compostas de grandes acumulações de óleo leve, de excelente qualidade e alto valor comercial. Contudo, segundo a Petrobras, os hidrocarbonetos nas reservas do pré-sal são de difícil extração e apresentam diversos desafios como distância da costa, profundidade da lâmina d'água e profundidade do reservatório.

Outro fator relevante a ser considerado é o seu alto custo. A exploração em águas profundas e ultra profundas requer investimentos altíssimos em pesquisa, tecnologia e infraestrutura, o que faz da indústria uma das principais investidoras em inovação e aprimoramento tecnológico, uma vez que, para realizar suas atividades com eficiência e segurança, é necessário o uso de tecnologias avançadas que promovam o monitoramento

constante das condições de sua operação em ambiente inóspito e de difícil acesso.

Contudo, a exploração do pré-sal tem se mostrado viável do ponto de vista econômico, graças às tecnologias avançadas de exploração e produção desenvolvidas pela indústria petrolífera. Segundo dados da ANP, a produção de petróleo no pré-sal aumentou de aproximadamente 40 mil barris por dia em 2009 para mais de 1,8 milhão de barris por dia em 2021, cerca de 80% da produção total de petróleo no Brasil.

Em suma, a exploração do pré-sal é uma atividade complexa e desafiadora, que requer investimentos significativos em tecnologia e infraestrutura, bem como uma gestão adequada dos impactos ambientais e sociais. No entanto, o pré-sal também representa uma oportunidade importante para o Brasil se tornar um dos principais produtores do mundo e contribuir para a segurança energética global.

2.1. SENSORIAMENTO DE INSTALAÇÕES

Fundamental na indústria de exploração e produção de petróleo, o sensoriamento é o processo de identificar, coletar e mensurar informações de um ambiente como temperatura, pressão, umidade, vibração, posição, ruído e luz, e transmitir esses dados para armazenamento e análise. Assim, as redes de sensoriamento são de extrema importância na indústria da extração de óleo e gás, pois ajudam a manter o monitoramento contínuo da produção, coletando dados importantes sobre vazão do fluido, temperatura, pressão e outras variáveis.

Os sensores também contribuem para a segurança, permitindo a detecção de possíveis vazamentos, incêndios e outros fatores que possam colocar em risco a vida das pessoas, causando danos aos ativos e ao meio ambiente. Também são importantes para a gestão de manutenção, pois permitem a detecção precoce de falhas e problemas, permitindo a realização de manutenção preditiva antes de falhas catastróficas e possíveis interrupções na produção. Ademais, são fundamentais no processo de análise e de tomada de decisões, pois suas informações coletadas podem ser usadas para tomar decisões estratégicas sobre o processo de produção, como a otimização da vazão, redução de custos e melhoria da eficiência dos sistemas.

Os sensores mais utilizados incluem os de pressão, usados para medir a pressão dos fluidos, dos poços, tubulações e tanques de armazenamento; sensores de temperatura,

usados para medir a temperatura dos fluidos nos poços e nos sistemas de produção; de vazão, usados para medir a vazão de fluidos nos poços e nas tubulações; sensores de gás, para detectar a presença de tóxicos e inflamáveis nos poços e nos sistemas de produção; e sensores de vibração, para detectar vibrações em equipamentos e tubulações.

Quanto à energia, os dispositivos são, geralmente, alimentados por baterias de longa duração, instaladas em caixas à prova de intempéries e projetadas para durar por anos, sem necessidade de manutenção. Alguns sensores também podem ser alimentados por cabos submarinos, conhecidos como umbilicais, que fornecem energia e transmitem dados entre a plataforma *offshore* e o sistema submarino de exploração. Os umbilicais são projetados para resistir às condições adversas do ambiente marinho e garantir a confiabilidade da transmissão de dados.

2.2. GERAÇÃO DE ENERGIA – *ENERGY HARVESTING*

A colheita de energia é o processo pelo qual a energia proveniente de fontes externas, tais como energia solar, eólica, vibracional, dentre outras podem ser transformadas em energia elétrica. A energia cinética que máquinas ou organismos disponibilizam para o meio é chamada de vibracional e pode ser transformada em energia elétrica a partir dos materiais piezoelétricos (MASSONE, 2019). (“Colheita de energia vibracional utilizando materiais piezoelétricos ...”). Começou a ser estudada na década de 60, pelo pioneiro William C. Brown, pesquisador da Nasa, que desenvolveu um sistema transmissor de energia elétrica sem fio a partir de micro-ondas (GOMES, DIAZ, 2019).

Os *harvesters*, ou colhedores de energia, podem ser construídos com base em diversos materiais, podendo ser eles fotoelétricos, termoelétricos ou piezoelétricos e devem ser capazes de transformar energia mecânica, magnética, térmica, eólica ou solar em energia elétrica. A eficiência dessa conversão depende de diversos fatores, como as propriedades dos materiais selecionados e da forma como o dispositivo é formado.

A energia gerada pelos *harvesters* pode ser armazenada em baterias ou supercapacitores, dependendo da aplicação, e utilizada para alimentar dispositivos eletrônicos, atuadores, sensores e sistemas embarcados. Essa técnica se torna muito interessante quando pensada no uso de ambientes remotos ou de difícil acesso, onde o uso de baterias convencionais e quilômetros de cabos elétricos se torna complexo e dificultoso.

A técnica de coleta de energia apresenta diversas vantagens, como a possibilidade de geração de energia limpa e sustentável, redução de custos com manutenção e fornecimento elétrico além do prolongamento da vida útil de baterias em dispositivos eletrônicos. No entanto, é uma tecnologia que ainda demanda muito estudo e aprimoramento, uma vez que existem muitos desafios a serem superados, como a baixa eficiência energética dos *harvesters* e a dificuldade em adaptar a técnica para diferentes tipos de ambientes e fontes de energia.

3. PIEZOELETRICIDADE

Em 1880, os renomados físicos franceses Pierre Curie e Jacques Curie abriram caminho para uma descoberta revolucionária: os materiais piezoelétricos. O fenômeno, batizado como piezoelectricidade, cuja tradução literal é "eletricidade de pressão", caracteriza a capacidade ímpar dos cristais de se tornarem eletricamente polarizados quando submetidos a qualquer forma de deformação mecânica.

Conforme definiu William Callister (2018), em *Ciência dos Materiais*, a piezoelectricidade é uma propriedade incomum que se manifesta apenas em determinados materiais cerâmicos. A eletricidade por pressão ocorre quando a polarização é induzida e um campo elétrico é criado em uma amostra devido à aplicação de forças externas. Vale ressaltar que a inversão do sentido da força externa, ou seja, de tração para compressão, resulta na inversão da direção do campo elétrico, gerando uma deformação mecânica no material. Esse fenômeno é conhecido por piezoelectricidade reversa.

Este efeito pode ser observado na figura 1:

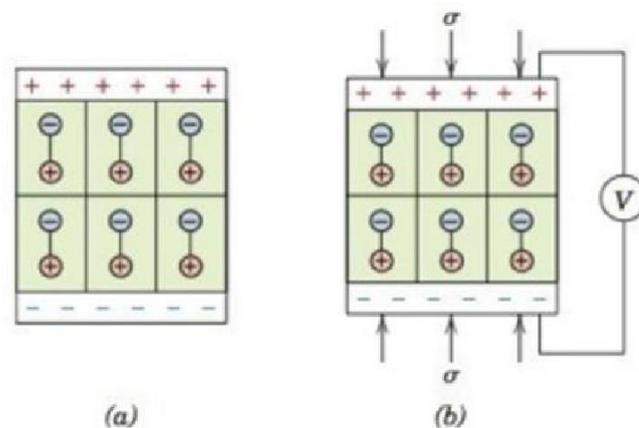


Figura 1: Efeito piezoelétrico (a) Dipolos no interior de um material piezoelétrico (b) Voltagem gerada quando o material é submetido a uma tensão de compressão. Fonte: Adaptado de Callister (2018).

O efeito piezoelétrico é uma consequência da baixa simetria presente nos materiais, o que permite que as cargas elétricas respondam às deformações mecânicas. Esse fenômeno é observável em materiais cristalinos como quartzo, titanatos de bário e chumbo, zirconato de chumbo (PbZrO_3), di-hidrogenofosfato de amônio ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) e em alguns tipos de cerâmicas com estruturas cristalinas complexas. O comportamento piezoelétrico

de uma amostra policristalina pode ser intensificado mediante o aquecimento acima de sua temperatura de Curie, seguido pelo resfriamento em um campo elétrico vigoroso até alcançar a temperatura ambiente (Callister, 2018).

A maioria dos materiais piezoelétricos pertence à categoria dos sólidos cristalinos. Os cristais são estruturas sólidas em que os átomos estão organizados em um padrão repetitivo e uniforme. Essa organização altamente ordenada é fundamental para compreender suas propriedades em escala macroscópica, pois em análise, podemos começar pelas propriedades dos cristais individuais que se repetem no sólido como um todo. Quando esses cristais se unem, formam uma disposição tridimensional chamada célula unitária.

Um aspecto fundamental da célula unitária, no contexto da piezoelectricidade, é a polaridade de sua estrutura. Os cientistas da cristalografia dedicaram esforços ao estudo dessas células unitárias e as categorizam em 32 classes cristalinas, ou grupos pontuais distintos. Cada grupo pontual é caracterizado por uma disposição única dos átomos que o compõem. Dentre os 32 grupos, dez foram identificados como exibindo um eixo polar, no qual existe uma separação clara entre as cargas positivas presentes no cristal e suas respectivas cargas negativas. A divisão de cargas gera um dipolo elétrico, base da piezoelectricidade.

O comportamento piezoelétrico pode ser compreendido por meio de um conjunto de constantes elásticas, que variam de acordo com a orientação cristalográfica do material. Estas constantes, obtidas através de experimentos, desempenham um papel fundamental na modelagem do comportamento piezoelétrico do material. Da mesma forma, quando um campo elétrico é aplicado a um material, ele induz um deslocamento de cargas elétricas na estrutura cristalina, resultando em uma deformação mecânica. Esse fenômeno é conhecido como efeito piezoelétrico reverso. A magnitude dessa deformação mecânica está diretamente relacionada à intensidade do campo elétrico aplicado.

A resposta piezoelétrica dos materiais é regida por suas constantes piezoelétricas, que descrevem a relação entre a deformação mecânica e a polarização elétrica gerada no material. Essas constantes podem ser determinadas experimentalmente e dependem da orientação cristalográfica do material.

3.1. PIEZOELETRICIDADE DIRETA

Ao aplicarmos uma tensão mecânica em duas faces opostas de um material elástico, cuja movimentação se restringe a direção da carga aplicada, o estresse resultante provocará uma extensão no mesmo sentido da carga.

Em níveis de tensão inicialmente baixos, a resposta da deformação será linear, seguindo esse padrão até que um ponto crítico seja atingido, a partir do qual o material começará a ceder. Dentro dessa região linear, a inclinação da curva tensão-deformação permanece constante, sendo denominada como o módulo de elasticidade ou módulo de Young (Leo, 2007), conforme observado na figura 2.

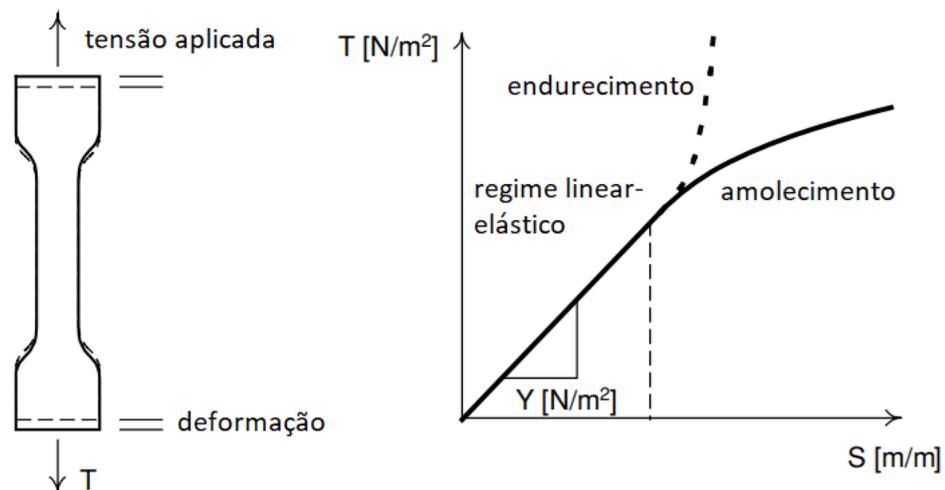


Figura 2: Comportamento tensão-deformação de material elástico. Fonte: Donald J. Leo, 2007.

Considerando que o material elástico mencionado seja também um material piezoelétrico, além do aumento de comprimento induzido pelo estresse, há um fluxo de carga em eletrodos posicionados nas extremidades da amostra, resultado do movimento dos dipolos elétricos dentro do material. A aplicação de estresse externo faz com que as partículas carregadas se desloquem, gerando um fluxo de carga aparente que pode ser quantificado nos dois eletrodos, exemplificado na figura 3.

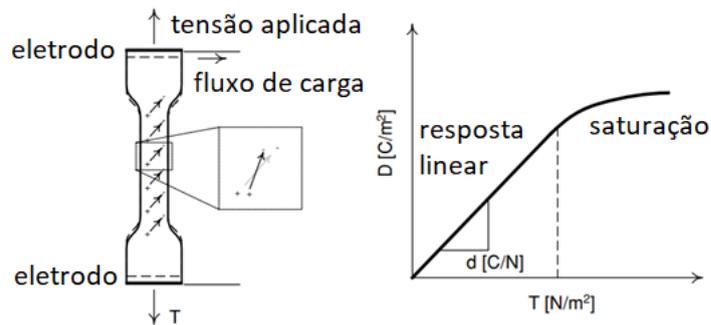


Figura 3: (a) Efeito da piezoeletricidade direta; (b) relação entre tensão e deslocamento elétrico em um material piezoelétrico. Fonte: Donald J. Leo, 2007.

3.2. PIEZOELETRICIDADE INVERSA

Os materiais piezoelétricos também apresentam um efeito reverso, onde a aplicação de um campo elétrico resulta em uma resposta mecânica. Isso pode ser ilustrado considerando a aplicação de um potencial elétrico constante através de eletrodos, conforme mostrado na figura 4.

O potencial aplicado gera um campo elétrico no material, que por sua vez, induz a interação entre a carga aplicada e os dipolos elétricos presentes. Como resultado, os dipolos elétricos rotacionam, gerando um deslocamento elétrico que pode ser medido nos eletrodos do material.

Em valores suficientemente baixos do campo aplicado, a relação entre a intensidade do campo elétrico (E) e o deslocamento elétrico (D) é linear, com uma constante de proporcionalidade conhecida como permissividade dielétrica. Assim como acontece com a tensão aplicada, à medida que aumentamos o campo elétrico aplicado, eventualmente chegamos a um ponto de saturação no movimento dos dipolos, resultando em uma relação não linear entre o campo elétrico aplicado e o deslocamento elétrico.

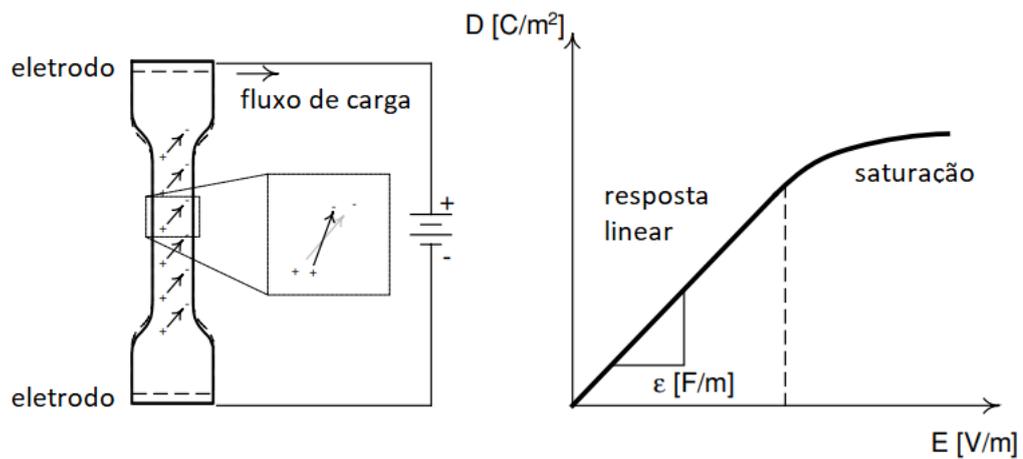


Figura 4: Relação entre o campo elétrico aplicado e o deslocamento provocado no material piezoelétrico.
 Fonte: Donald J. Leo, 2007.

O efeito piezoelétrico recíproco é quantificado pela relação entre o campo elétrico aplicado e a deformação mecânica resultante. Quando aplicamos valores suficientemente baixos de campo elétrico, observamos uma relação linear entre o campo aplicado e a deformação mecânica na figura 5 (Leo, 2007).

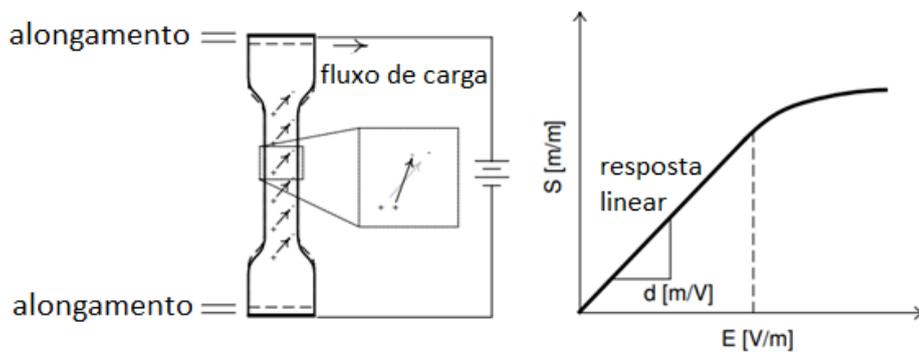


Figura 5: Relação entre o campo elétrico e a deformação em um material piezoelétrico.
 Fonte: Donald J. Leo, 2007.

3.3. FABRICAÇÃO DE MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS

A fabricação de materiais piezoelétricos sintéticos começa, tipicamente, com a utilização de materiais constituintes na forma de pó. Uma mistura típica de materiais com propriedades piezoelétricas envolve chumbo (Pb), zircônio (Zr) e titânio (Ti). Esses componentes são combinados para criar o material piezoelétrico comumente conhecido como chumbo-zircônio-titanato, frequentemente abreviado como PZT. Outros tipos de

materiais piezoelétricos incluem o titânio de bário e niobatos de sódio-potássio.

O efeito piezoelétrico está intrinsecamente relacionado à presença de dipolos elétricos na estrutura cristalina do material cerâmico. Em geral, após o processamento, o material bruto não apresenta propriedades piezoelétricas significativas, por estarem aleatoriamente orientados. Sendo assim, as propriedades piezoelétricas do material são inicialmente limitadas. Para que exiba um forte acoplamento eletromecânico, é necessário que o material alinhe seus dipolos elétricos individuais. Esse processo é conhecido como *poling*, e envolve o aquecimento do material piezoelétrico acima de sua temperatura de Curie.

A orientação dos dipolos elétricos tem o efeito de intensificar o fenômeno piezoelétrico no material. Agora, um campo elétrico aplicado induzirá rotações semelhantes em todo o material, resultando em uma acumulação de deformação devido ao campo aplicado. Por outro lado, a deformação induzida em uma direção específica resultará em uma acumulação de fluxo de carga aparente no material, levando a um aumento na produção de carga do material.

3.4. EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS PIEZOELÉTRICAS

As propriedades fundamentais de um material piezoelétrico são matematicamente expressas como uma relação entre variáveis mecânicas, tensão (T) e deformação (S); e variáveis elétricas, campo elétrico (E) e deslocamento elétrico (D). As equações são em função de três parâmetros: conformidade mecânica (s), permissividade elétrica (ϵ), e coeficiente de deformação piezoelétrica, (d).

O resultado é uma expressão geral que relaciona as quatro variáveis em três direções. Essas relações são expressas em matrizes dos três parâmetros mencionados no parágrafo anterior. Considerando o cubo de material piezoelétrico, é definido um sistema de coordenadas, conforme a figura 6:

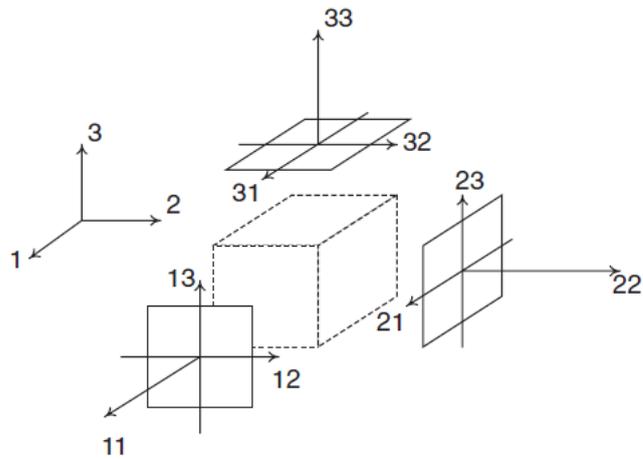


Figura 6: Cubo piezoelétrico indicando o sistema de coordenadas. Fonte: Donald J. Leo, 2007.

A figura 6 indica as direções passíveis de aplicação de campo elétrico, nominadas como E_i , $i = 1, 2, 3$ e expressadas em forma de vetor de campo elétrico:

$$\underline{E} = \begin{matrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{matrix} \quad (4.1)$$

De forma similar, também é possível gerar deslocamento elétrico, nominado como D_i , $i = 1, 2, 3$ e expressadas em forma de vetor:

$$\underline{D} = \begin{matrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{matrix} \quad (4.2)$$

Por haver três direções associadas ao campo elétrico e três associadas ao deslocamento elétrico, a relação geral entre as variáveis é a seguinte:

$$D_1 = \epsilon_{11}^T E_1 + \epsilon_{12}^T E_2 + \epsilon_{13}^T E_3 \quad (4.3)$$

$$D_2 = \epsilon_{21}^T E_1 + \epsilon_{22}^T E_2 + \epsilon_{23}^T E_3 \quad (4.4)$$

$$D_3 = \epsilon_{31}^T E_1 + \epsilon_{32}^T E_2 + \epsilon_{33}^T E_3 \quad (4.5)$$

Simplificando:

$$D_m = \epsilon_{mn}^T E_n \quad (4.6)$$

As equações que relacionam a deformação com a tensão devem ser derivadas de forma semelhante. São necessários nove termos para uma especificação completa. Os componentes de tensão e deformação normais da superfície do cubo são T11, T22, T33 e S11, S22, S33, respectivamente. Os componentes de cisalhamento são T12, T13, T23, T21, T32, T31 e S12, S13, S23, S21, S32, S31. E podemos relacionar a deformação com a tensão por meio da expressão abaixo para materiais lineares e elásticos, onde o termo S_{ijkl} representa termos de conformidade mecânica.

$$S_{ij} = S_{ijkl}^E T_{kl} \quad (4.7)$$

O último passo para descrever as equações de relações constitutivas tridimensionais é especificar como acoplar as variáveis mecânicas às variáveis elétricas. Em geral, vemos que os nove termos de deformação são relacionados aos três campos elétricos por meio da expressão:

$$S_{ij} = D_{ijn} E_n \quad (4.8)$$

E os três termos de deslocamento elétrico estão relacionados ao estresse mecânico por meio da expressão:

$$D_m = D_{mkl} T_{kl} \quad (4.9)$$

Combinando as quatro equações anteriores, conseguimos dizer o conjunto completo de equações constitutivas de um material piezoelétrico linear:

$$S_{ij} = S_{ijkl}^E T_{kl} + D_{ijn} E_n \quad (4.10)$$

$$D_m = D_{mkl} T_{kl} + \epsilon_{mn}^T E_n \quad (4.11)$$

A forma compacta das relações constitutivas baseia-se em tensores de tensão e deformação serem simétricos, logo:

$$T_{ij} = T_{ji} \quad (4.12)$$

$$S_{ij} = S_{ji} \quad (4.13)$$

Utilizando a simetria, podemos simplificar alguns componentes de tensão e deformação:

$$S_1 = S_{11} \quad T_1 = T_{11} \quad (4.14)$$

$$S_2 = S_{22} \quad T_2 = T_{22} \quad (4.15)$$

$$S_3 = S_{33} \quad T_3 = T_{33} \quad (4.16)$$

$$S_4 = S_{23} + S_{32} \quad T_4 = T_{23} = T_{32} \quad (4.17)$$

$$S_5 = S_{31} + S_{13} \quad T_5 = T_{31} = T_{13} \quad (4.18)$$

$$S_6 = S_{12} + S_{21} \quad T_6 = T_{12} = T_{21} \quad (4.19)$$

Com essas simplificações, podemos reduzir as equações constitutivas da seguinte forma:

$$S_i = S_{ij}^E T_j + d_{ik} E_k \quad (4.20)$$

$$D_m = d_{mj} T_j + \epsilon_{mk}^T E_n \quad (4.21)$$

Onde i e j assumem valores entre 1 e 6, e m e n assumem valores entre 1 e 3. Essa notação reforça que temos apenas 36 constantes elásticas independentes, 18 coeficientes de deformação piezoelétrica e 9 valores de permissividade elétrica.

Expandindo as equações em forma de matriz, temos:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} \\ d_{51} & d_{52} & d_{53} \\ d_{61} & d_{62} & d_{63} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

Muitos materiais piezoelétricos são ortotrópicos, ou seja, possuem as mesmas propriedades mecânicas em um mesmo plano, porém diferem na direção ortogonal. Levando essa propriedade em consideração, podemos assumir:

$$\begin{aligned} s_{ij} = s_{ji} = 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad j = 4, 5, 6 \\ s_{45} = s_{46} = s_{56} = s_{65} = 0 \end{aligned} \quad (4.23)$$

Dessa forma, a matriz de conformidade reduz para a seguinte forma:

$$s^E = \begin{bmatrix} \frac{1}{Y_1^E} & -\frac{\nu_{12}}{Y_1^E} & -\frac{\nu_{13}}{Y_1^E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{Y_2^E} & \frac{1}{Y_2^E} & -\frac{\nu_{23}}{Y_2^E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{Y_3^E} & -\frac{\nu_{32}}{Y_3^E} & \frac{1}{Y_3^E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}^E} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}^E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}^E} \end{bmatrix}, \quad (4.24)$$

A simetria dessa matriz requer que:

$$\frac{\nu_{ij}}{Y_i^E} = \frac{\nu_{ji}}{Y_j^E} \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (4.25)$$

Logo, os módulos elásticos nas direções 1 e 2 são iguais,

$$Y_1^E = Y_2^E. \quad (4.26)$$

e com isso podemos reescrever a matriz 4.24 da seguinte forma:

$$\mathbf{s}^E = \begin{bmatrix} \frac{1}{Y_1^E} & -\frac{\nu_{12}}{Y_1^E} & -\frac{\nu_{13}}{Y_1^E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{Y_1^E} & \frac{1}{Y_2^E} & -\frac{\nu_{23}}{Y_2^E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{Y_3^E} & -\frac{\nu_{32}}{Y_3^E} & \frac{1}{Y_3^E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}^E} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}^E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}^E} \end{bmatrix}, \quad (4.27)$$

A simetria na estrutura cristalina de materiais piezoelétricos resulta na redução do número de parâmetros mecânicos e elétricos. Isso acontece porque os campos elétricos aplicados em uma direção específica não produzem deslocamento elétrico em direções ortogonais, simplificando a matriz de permissividade elétrica de forma diagonal.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \quad (4.28)$$

O mesmo ocorre com a matriz de coeficiente de deformação piezoelétrica. É possível simplificá-la da seguinte forma:

$$\mathbf{d} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.29)$$

É possível reduzir ainda mais os coeficientes acima a depender da simetria apresentada pelo material, de forma que $d_{13} = d_{23}$ e $d_{15} = d_{24}$. Combinando as equações (4.27), (4.28) e (4.29) temos que as propriedades constitutivas dos materiais piezoelétricos podem ser escritas da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} S1 \\ S2 \\ S3 \\ S4 \\ S5 \\ S6 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{Y_1^E} & -\frac{\nu_{12}}{Y_1^E} & -\frac{\nu_{13}}{Y_1^E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{Y_1^E} & \frac{1}{Y_2^E} & -\frac{\nu_{23}}{Y_2^E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{Y_3^E} & -\frac{\nu_{32}}{Y_3^E} & \frac{1}{Y_3^E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}^E} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}^E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}^E} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} T1 \\ T2 \\ T3 \\ T4 \\ T5 \\ T6 \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & d13 \\ 0 & 0 & d23 \\ 0 & 0 & d33 \\ 0 & d24 & 0 \\ d15 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} E1 \\ E2 \\ E3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} D1 \\ D2 \\ D3 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d24 & 0 & 0 \\ d31 & d32 & d33 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} T1 \\ T2 \\ T3 \\ T4 \\ T5 \\ T6 \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} E1 \\ E2 \\ E3 \end{bmatrix}$$

(4.30)

4. ANÁLISE EM ELEMENTOS FINITOS

Para analisarmos o comportamento eletromecânico do elemento piezoelétrico, foi elaborado um modelo no software ANSYS®. Nele foram feitas diferentes análises, focando na determinação de seus modos naturais de vibração e da resposta a excitações harmônicas e transientes em um modelo inicialmente feito de aço estrutural (AISI 1020).

Para as análises preliminares, foi utilizado um modelo simples de viga biengastada, com as dimensões de um elemento piezoelétrico comercial, 63 mm de comprimento, 32 mm de largura e 1 mm de espessura, ilustrada na figura 7.

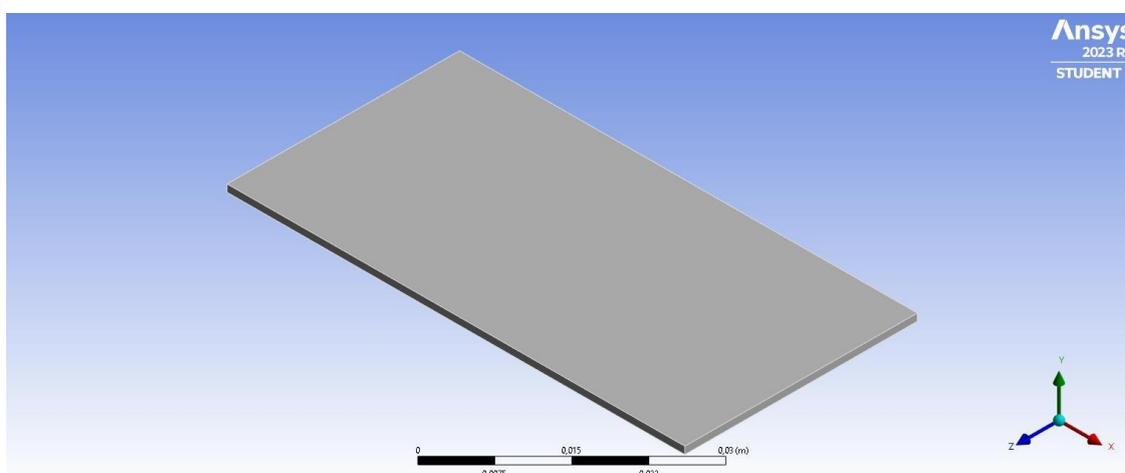


Figura 7: Modelo em elementos finitos. Fonte: Autores.

Foi criada uma malha com 400 elementos para a análise preliminar. Em seguida foi realizado um estudo de convergência de malha para otimização da simulação.

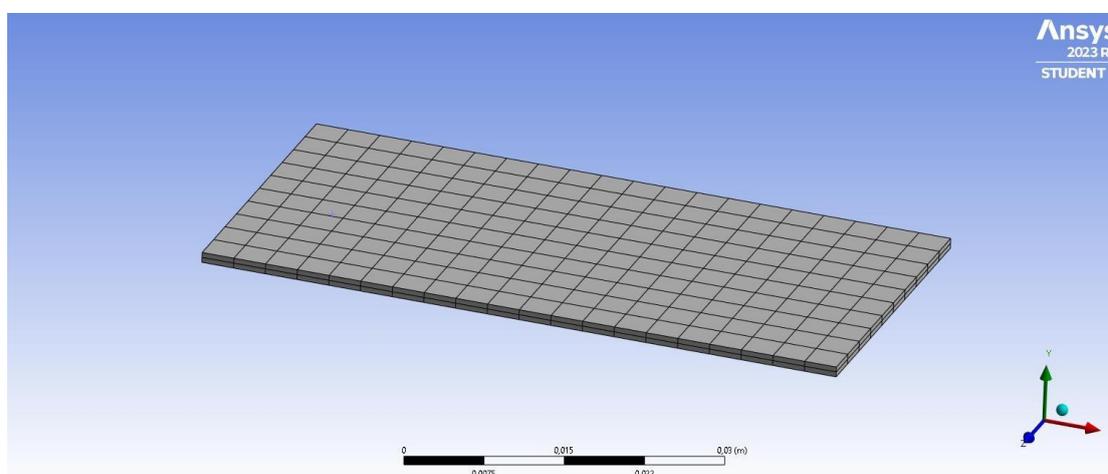


Figura 8: Malha em elementos finitos. Fonte: Autores.

A seguir, foi realizada uma análise modal afim de obter as frequências naturais de vibração do elemento. As condições de contorno utilizadas foram engaste em ambas as extremidades no comprimento. A análise modal do elemento mostrou os primeiros cinco modos naturais, sendo as análises realizadas apenas nos três primeiros modos, devido às frequências mais baixas, 1.351 Hz, 2.166 Hz e 3.718 Hz. A figura 9 mostra o primeiro modo.

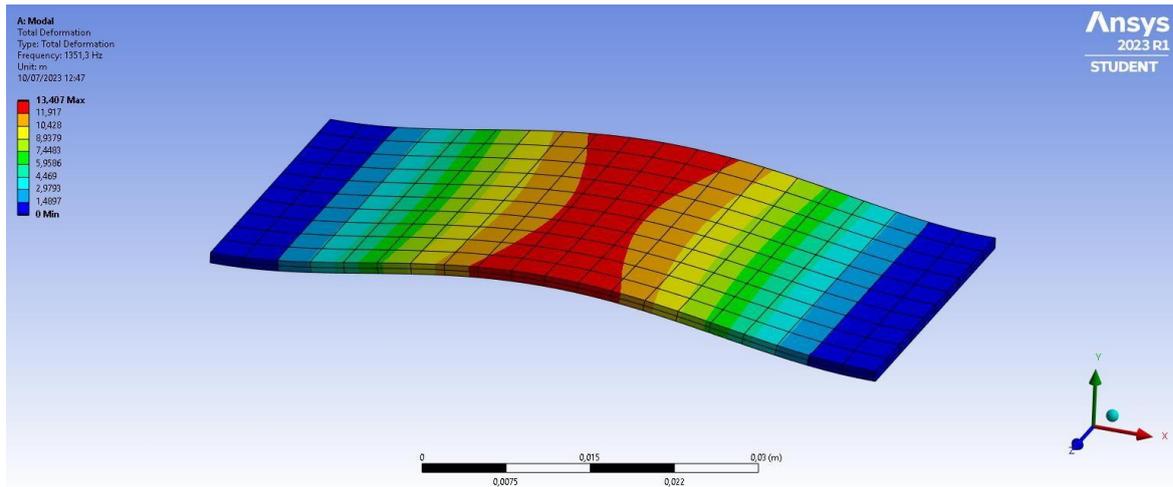


Figura 9: Primeiro modo de vibração do elemento ocorrendo em uma frequência de 1.351 Hz.
Fonte: Autores.

Já a figura 10 mostra o segundo modo.

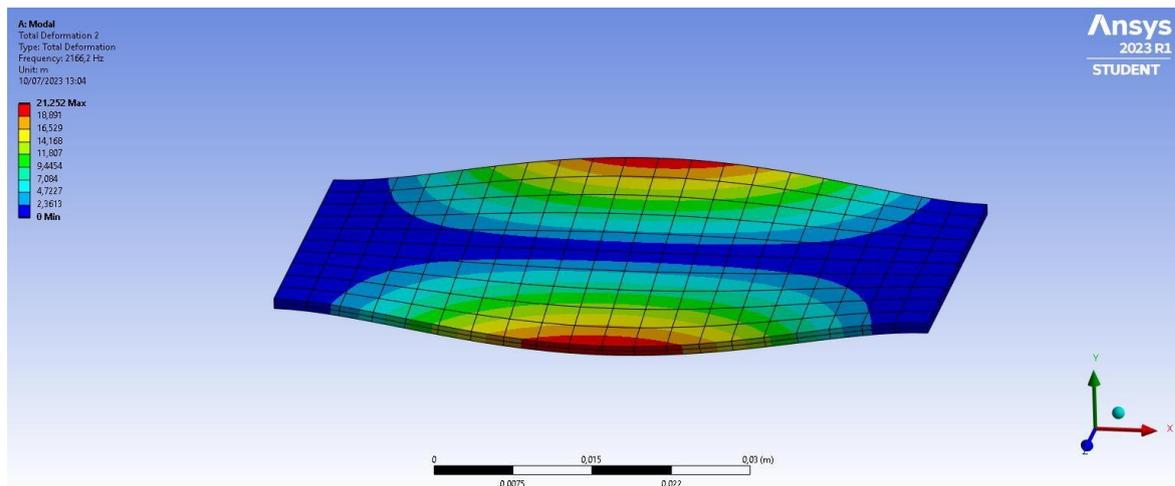


Figura 10: Segundo modo de vibração do elemento ocorrendo em uma frequência de 2.166 Hz. Fonte: Autores.

E por fim, a figura 11 mostra o terceiro modo de vibração.

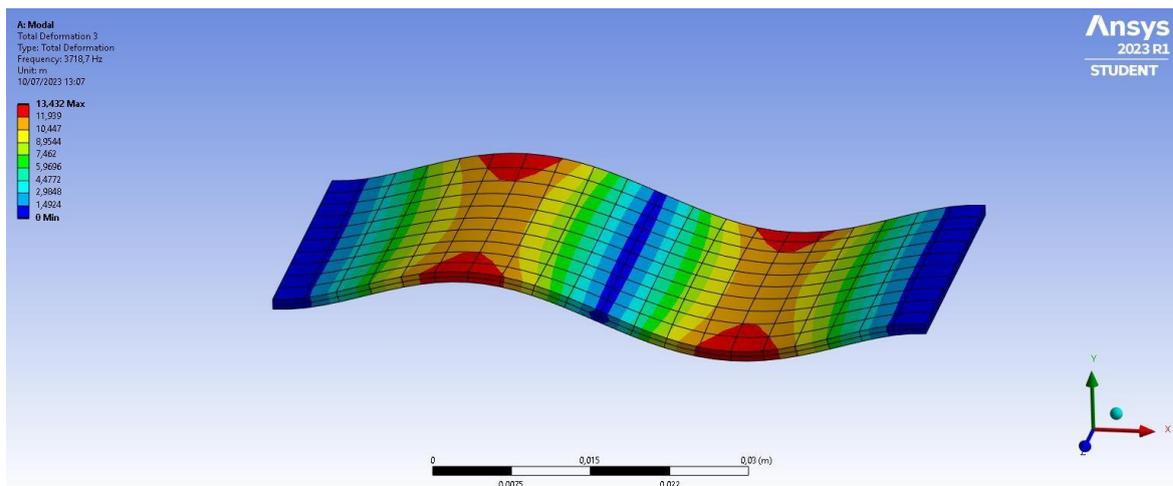


Figura 11: Terceiro modo de vibração do elemento ocorrendo em uma frequência de 3.718 Hz.
 Fonte: Autores.

Para a realização da análise harmônica, resposta em deformação que o elemento sofre ao ser excitado por uma carga mecânica em uma faixa de frequência escolhida, se faz necessária a aplicação de um carregamento mecânico no elemento e da escolha de uma faixa de frequências de excitação. Para tal, foi escolhida como uma carga de 5 N (~ 500 g) aplicada em toda a superfície do elemento e a excitação na faixa de 1 kHz a 4 kHz para observar o comportamento da viga nos três primeiros modos. Os resultados são apresentados nas figuras a seguir:

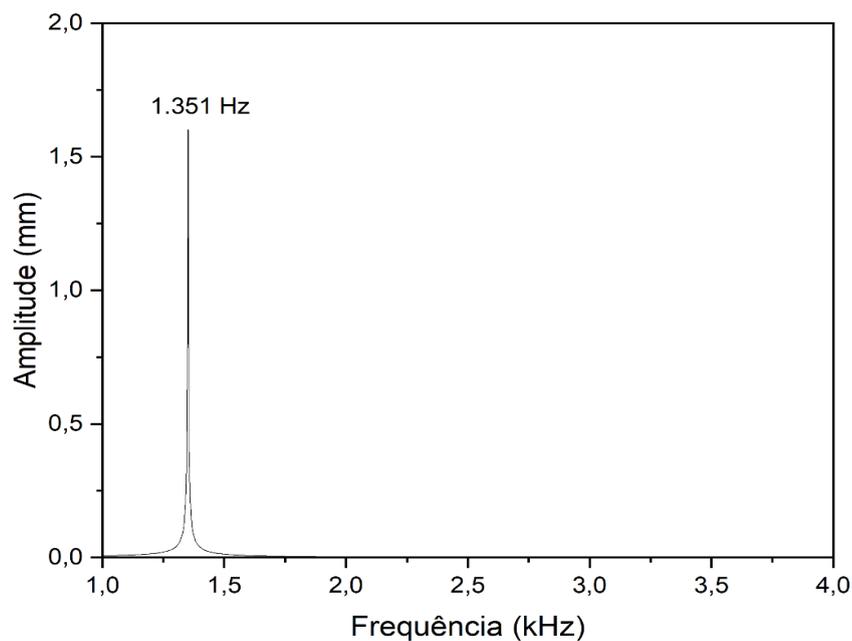


Figura 12: Resposta de amplitude de deformação para excitação entre 1 kHz e 4 kHz. Fonte: Autores.

A figura 12 mostra que apenas o primeiro modo é relevante para a análise, pois este apresenta um aumento considerável da amplitude com a deformação da viga. As figuras 13 e 14 mostram, respectivamente, a distribuição de tensão e deformação na viga. Esses resultados são importantes para a análise de risco de falha no material por excesso de carga.

De acordo com figura 13, a tensão máxima a que a viga fica sujeita atinge 696 kPa, localizada na sua parte central, muito inferior à tensão máxima admissível para o material (aço) que é de 300 MPa.

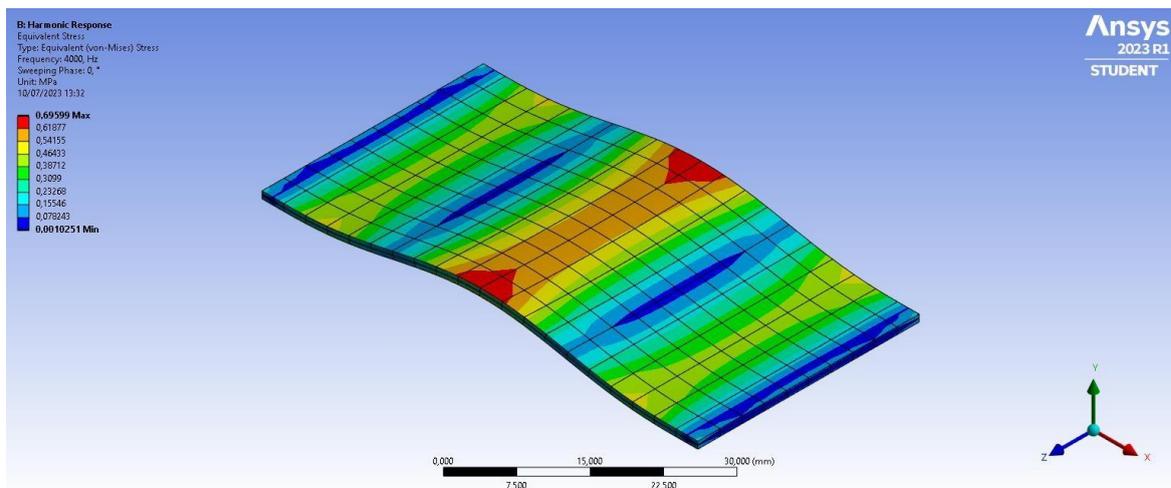


Figura 13: Distribuição de tensão na viga sob carregamento harmônico de 5 N. Fonte: Autores.

A distribuição de deformação, também localizada na parte central, mostra uma deformação máxima de $3,48 \times 10^{-4} \%$, também muito abaixo da deformação elástica máxima suportada pelo aço ($\sim 0,5 \%$), conforme mostra a figura 14.

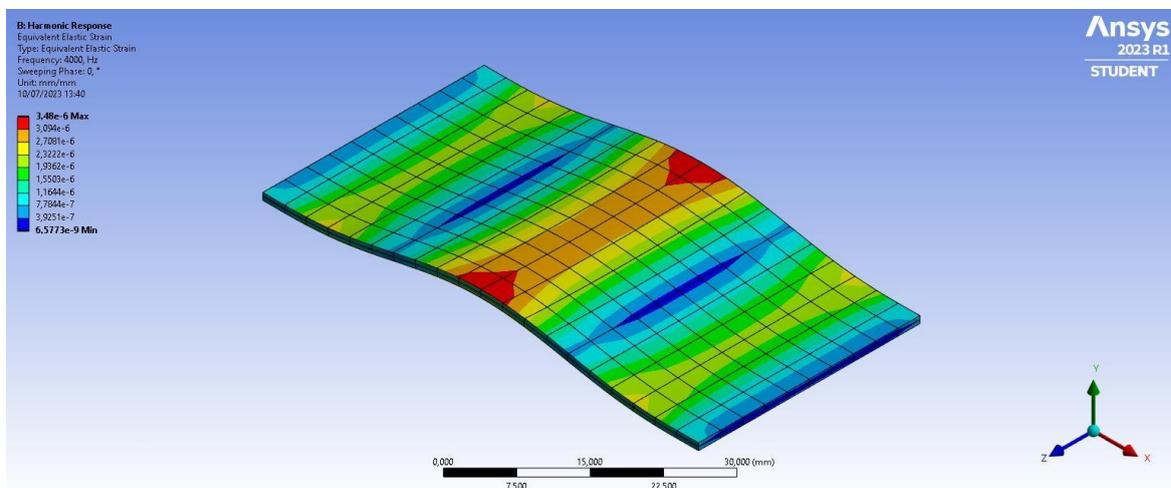


Figura 14: Distribuição de deformação elástica na viga sob carregamento harmônico de 5 N. Fonte: Autores.

Com os resultados apresentados, a próxima etapa foi a realização das mesmas simulações, utilizando um material piezoelétrico. Para isto, foi necessário a implementação no ANSYS® das matrizes de rigidez e piezoelétricas e das propriedades mecânicas do material a ser escolhido. Os dados obtidos deram informações sobre o comportamento mecânico e elétrico da viga.

4.1. ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS - PIEZOELÉTRICO

A fim de avaliar o comportamento do material piezoelétrico PTZ5 sob a ação de esforços e determinar a voltagem induzida pela sua deformação, empregou-se o software de elementos finitos ANSYS®. Dentro dessa plataforma, conduzimos duas formas de análise distintas: uma análise modal destinada a avaliar as respostas vibracionais apresentadas pelo material; e uma análise estrutural, com o propósito de examinar o desempenho eletromecânico, incluindo a avaliação da deformação e da tensão máxima e a tensão elétrica produzida.

Para iniciar os trabalhos, foi realizado um estudo para determinar o melhor tamanho dos elementos para a geração da malha. Diferentes tamanhos foram testados, e os resultados obtidos estão apresentados nas figuras 15 e 16.

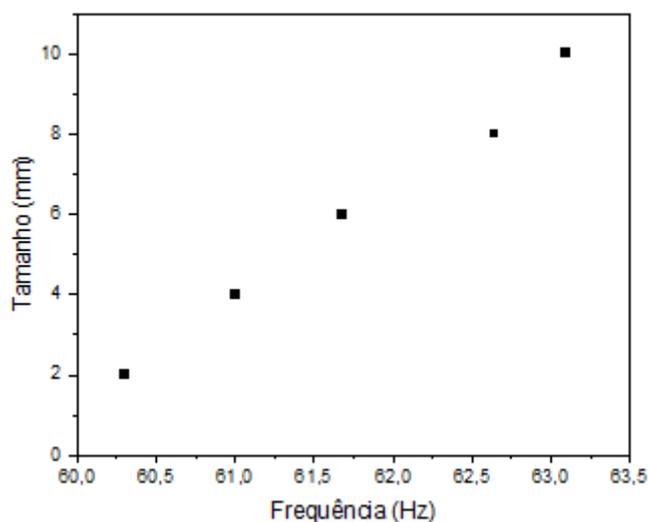


Figura 15: Teste de malha considerando o tamanho dos elementos. Fonte: Autores

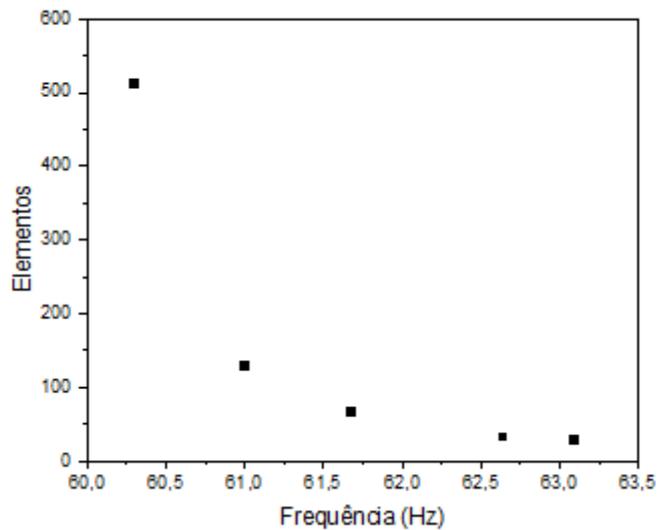


Figura 16: Teste de malha considerando a quantidade dos elementos. Fonte: Autores

Podemos observar nesses gráficos que ao diminuir o tamanho dos elementos e aumentar sua quantidade, obtemos diferentes frequências naturais do modelo. Em vista ao que descobrimos, escolhemos a malha com o maior número de elementos e menor tamanho, buscando resultados mais precisos e confiáveis.

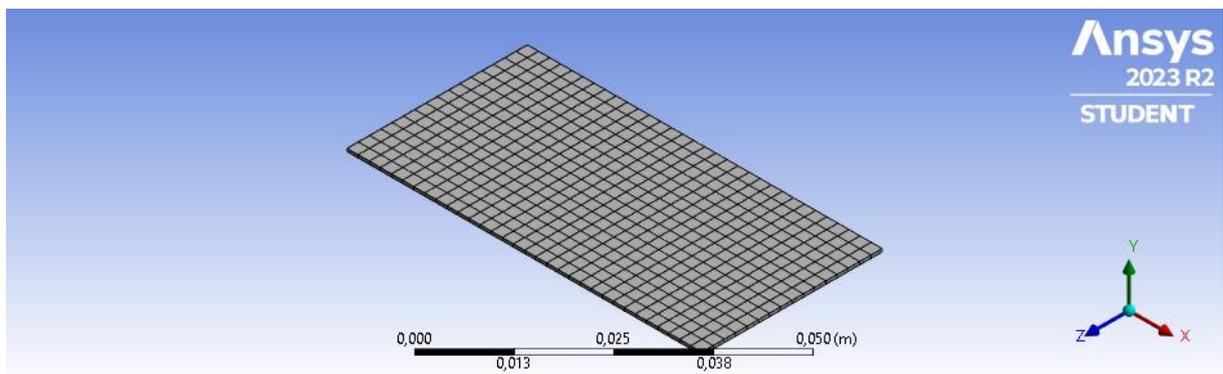


Figura 17: Malha do modelo em elementos finitos com 2 mm. Fonte: Autores.

Apesar da utilização do sistema de viga biengastada na análise do aço estrutural, ao considerar o material piezoelétrico optou-se pelo sistema cantilever, a fim de melhor corresponder às condições experimentais descritas no próximo capítulo. Para essa análise, foram empregados parâmetros predefinidos do material piezoelétrico PZT5 no software, conforme as tabelas 1 a 8 disponíveis no apêndice E do livro "Piezoelectric Energy

Harvesting" dos autores Alper Erturk e Daniel J. Inman.

Tabela 1 – Matriz Propriedades Piezoelétricas

Material type		Unidade	PZ21	PZ23	PZ24	PZ26	PZT5A
ρ	7500	kg/m ³	7,78E+03	7,70E+03	7,70E+03	7,70E+03	7,75E+03
d_{31}		m/V	-2,59E-10	-1,28E-10	-5,80E-11	-1,28E-10	-1,71E-10
d_{33}		m/V	6,40E-10	3,28E-10	1,49E-10	3,26E-10	3,74E-10
d_{15}		m/V	6,16E-10	4,21E-10	1,51E-10	3,27E-10	5,84E-10
S^E_{11}		m.s ² /kg	1,82E-11	1,48E-11	1,05E-11	1,30E-11	1,64E-11
S^E_{33}		m.s ² /kg	1,80E-11	1,94E-11	1,36E-11	1,96E-11	1,88E-11
S^E_{12}		m.s ² /kg	-7,76E-12	-5,84E-12	-3,13E-12	-4,35E-12	-5,74E-12
S^E_{13}		m.s ² /kg	-6,85E-12	-7,12E-12	-4,77E-12	-7,05E-12	7,22E-12
S^E_{44}		m.s ² /kg	3,80E-11	3,90E-11	2,30E-11	3,32E-11	4,75E-11
S^E_{66}		m.s ² /kg	5,20E-11	4,13E-11	2,72E-11	3,47E-11	4,43E-11
$\epsilon^{S_{11}}/\epsilon_0$		adimensional	3,24E+03	1,37E+03	8,10E+02	1,19E+03	1,04E+03
$\epsilon^{S_{33}}/\epsilon_0$		adimensional	3,98E+03	1,50E+03	1,33E+03	1,33E+03	9,39E+03
ϵ_0	8,85E-12	F/m					

As tabelas 2 e 3, abaixo, representam a fórmula 4.27 apresentada no estudo teórico.

Tabela 2 – Matriz de Conformidade no eixo Y

Polarização em Y					
Conformidade com campo constante					
1,64E-11	-7,22E-12	-5,74E-12	0	0	0
-7,22E-12	1,88E-11	-7,22E-12	0	0	0
-5,74E-12	-7,22E-12	1,64E-11	0	0	0
0	0	0	4,75E-11	0	0
0	0	0	0	4,75E-11	0
0	0	0	0	0	4,43E-11

Tabela 3 – Matriz de Rigidez no eixo Y

Polarização em Y					
Rigidez com campo constante					
1,20E+11	7,51E+10	7,52E+10	0	0	0
7,51E+10	1,11E+11	7,51E+10	0	0	0
7,52E+10	7,51E+10	1,20E+11	0	0	0
0	0	0	2,11E+10	0	0
0	0	0	0	2,11E+10	0
0	0	0	0	0	2,26E+10

Já a tabela 4 e 5 está de acordo com a matriz simplificada da permissividade elétrica

apresentada na fórmula 4.28.

Tabela 4 – Matriz de Permissividade com tensão constante no eixo Y

Polarização em Y		
Permissividade com tensão constante		
9,17E-09	0	0
0	8,31E-09	0
0	0	9,17E-09

Tabela 5 – Matriz de Permissividade com deformação constante no eixo Y

Polarização em Y		
Permissividade com deformação constante		
1,99256E-09	0	0
0	5,78382E-10	0
0	0	1,99256E-09

Tabela 6 – Matriz Piezoelétrica no eixo Y

Polarização em Y		
Matriz d, deformação/E		
0	-1,71E-10	0
0	3,74E-10	0
0	-1,71E-10	0
5,84E-10	0	0
0	0	5,84E-10
0	0	0

Tabela 7 – Matriz Piezoelétrica - Permissividade com deformação constante no eixo Y

Polarização em Y		
Permissividade com deformação constante		
0	-5,35116	0
0	15,78347	0
0	-5,35116	0
12,29474	0	0
0	0	12,29474
0	0	0

A análise modal do elemento piezoelétrico foi feita com uma malha de 2 mm, totalizando 512 elementos e as próximas figuras mostram os primeiros quatro modos naturais com frequências de 60,3 Hz, 239,7 Hz, 374,1 Hz e 790,3 Hz determinadas pelo software

utilizando os dados das tabelas 1 a 7. A figura 18 mostra a deformação do elemento para o primeiro modo de vibração, 60,3 Hz, vale notar que, em geral, esse é o que apresenta maior resposta de tensão, deformação e tensão elétrica.

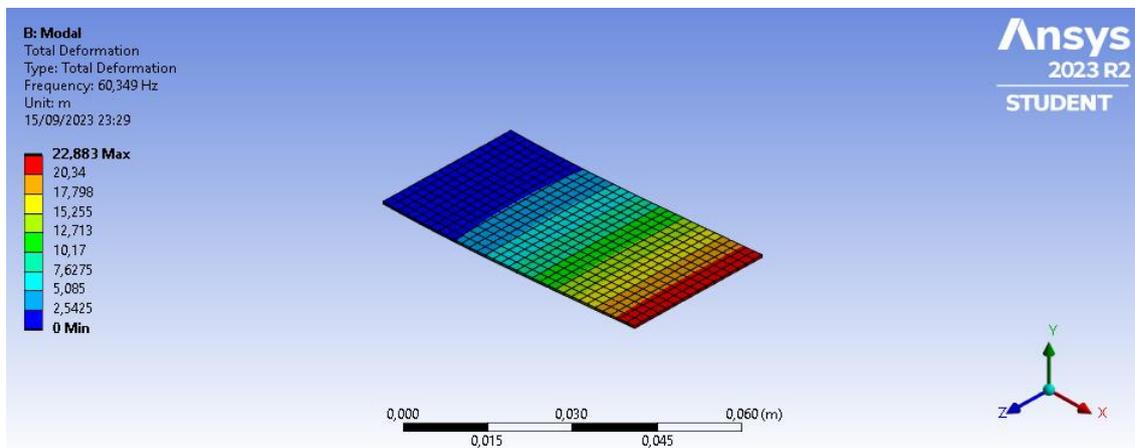


Figura 18: Primeiro modo de vibração com frequência de 60,3 Hz. Fonte: Autores.

Conforme a figura 19 abaixo, é possível observar a deformação do piezoeétrico durante o segundo modo de vibração, a 239,7 Hz.

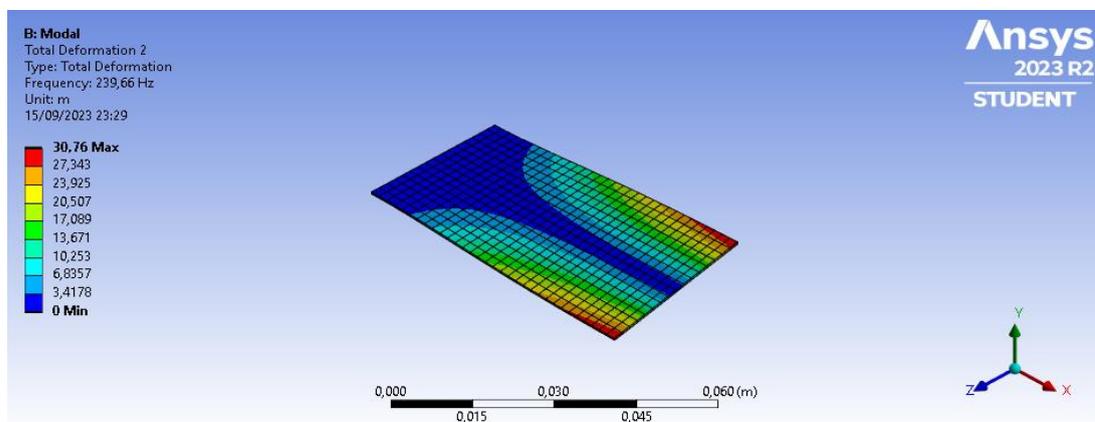


Figura 19: Segundo modo de vibração com frequência de 239,7 Hz. Fonte: Autores.

Enquanto as figuras 20 e 21 demonstram o processo de deformação do piezoeétrico durante o terceiro e quarto modo de vibração, respectivamente.

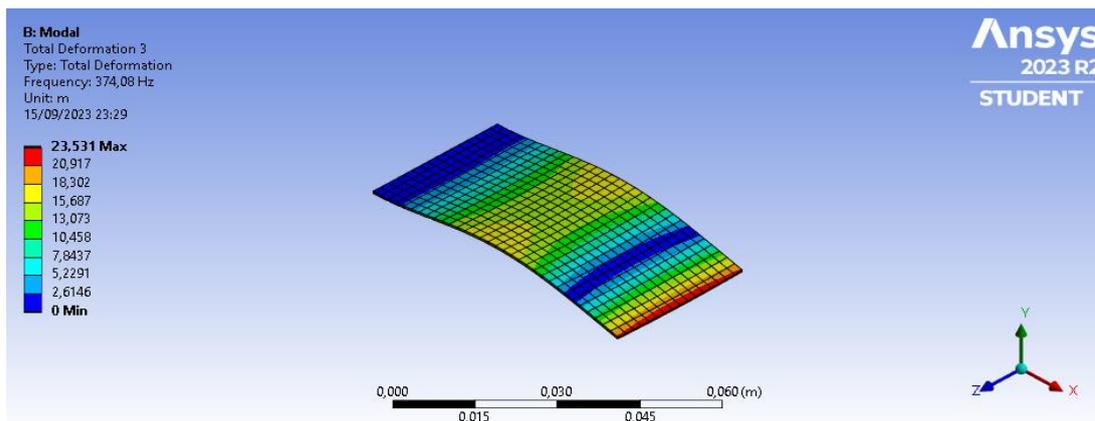


Figura 20: Terceiro modo de vibração com frequência de 374,1 Hz. Fonte: Autores.

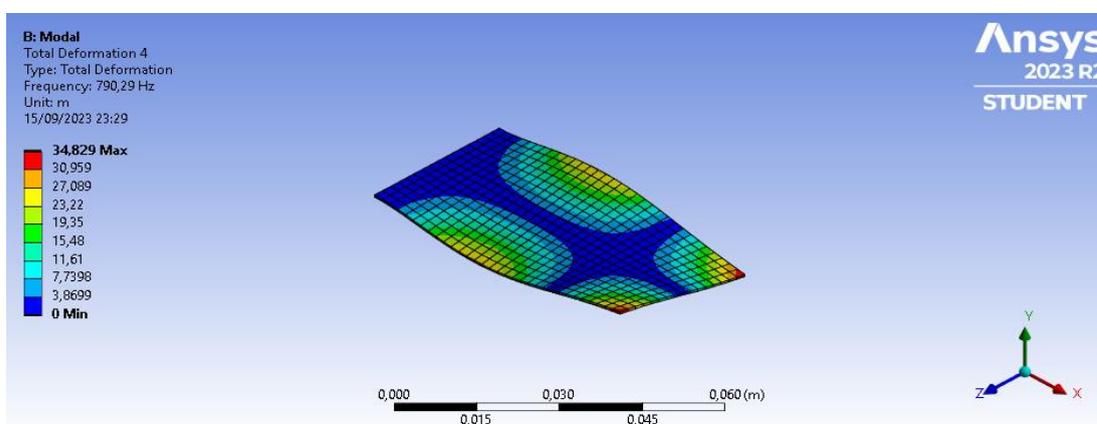


Figura 21: Quarto modo de vibração com frequência de 790,3 Hz. Fonte: Autores.

Para conduzir a análise harmônica mantivemos a aplicação de carga feita na simulação da análise anterior, em aço estrutural, de 5 N (~ 500 g) na extremidade do elemento, na direção oposta ao eixo Y, enquanto excitamos na faixa de frequência de 0 Hz a 150 Hz, a fim de observar o comportamento do material no primeiro modo de vibração. Os resultados são apresentados nas figuras 22 a 25.

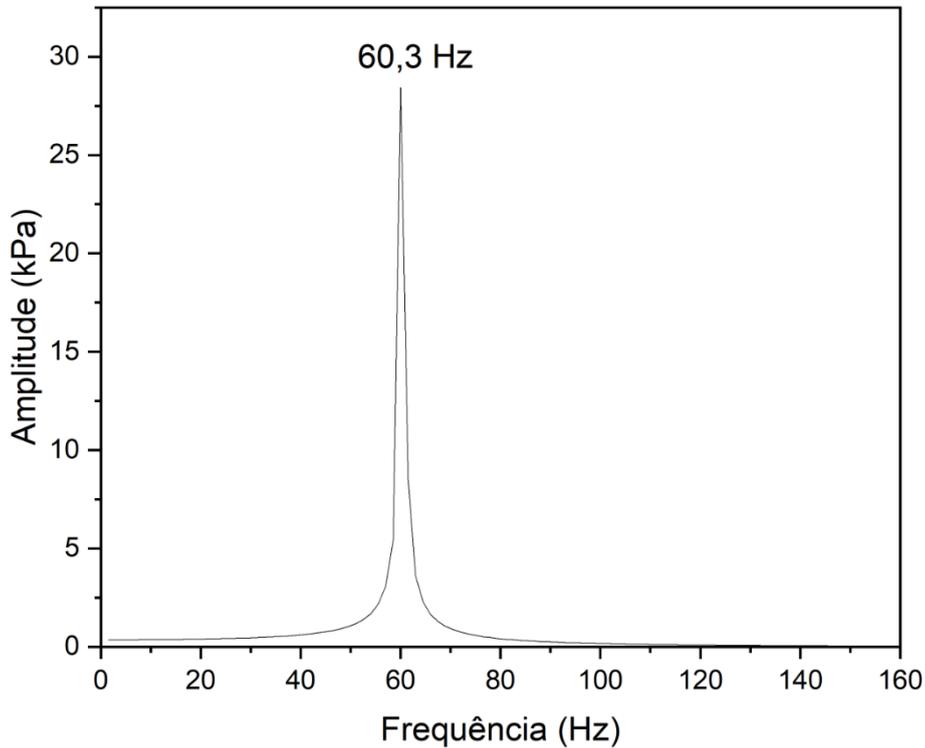


Figura 22: Resposta de amplitude de deformação para excitação entre 0 Hz e 150 Hz. Fonte: Autores.

Por meio do gráfico apresentado na figura 22, é possível analisar o comportamento do piezoelétrico. Nele, observamos uma notável tendência de aumento exponencial da amplitude de deformação à medida que nos aproximamos da frequência encontrada no primeiro modo de vibração (60,3 Hz). Esse aumento de amplitude informa que nesse ponto ocorre o fenômeno da ressonância e com isso, temos a maior geração de tensão elétrica produzida pelo material piezoelétrico, de aproximadamente 15,2 V, conforme a figura 23.

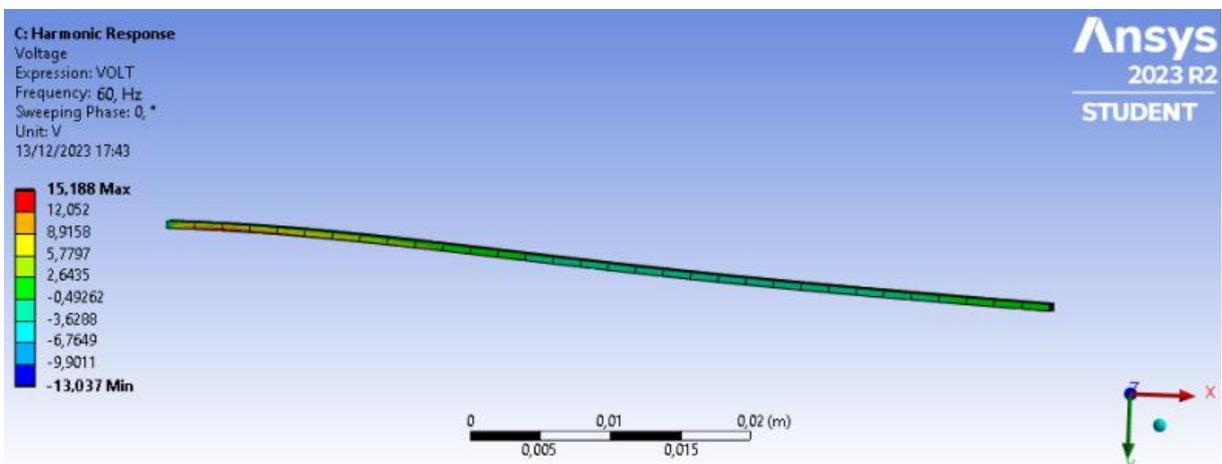


Figura 23: Geração de tensão elétrica na frequência de 60,3 Hz. Fonte: Autores.

Esse padrão sugere que a maior tensão deve ser encontrada precisamente nesse ponto, com um crescimento gradual nas proximidades. A figura 24 mostra a deformação no material, que na zona vermelha atingiu 0,3 mm de deslocamento e a figura 25 mostra a distribuição da tensão ao longo do material sob o efeito da carga de 5 N.

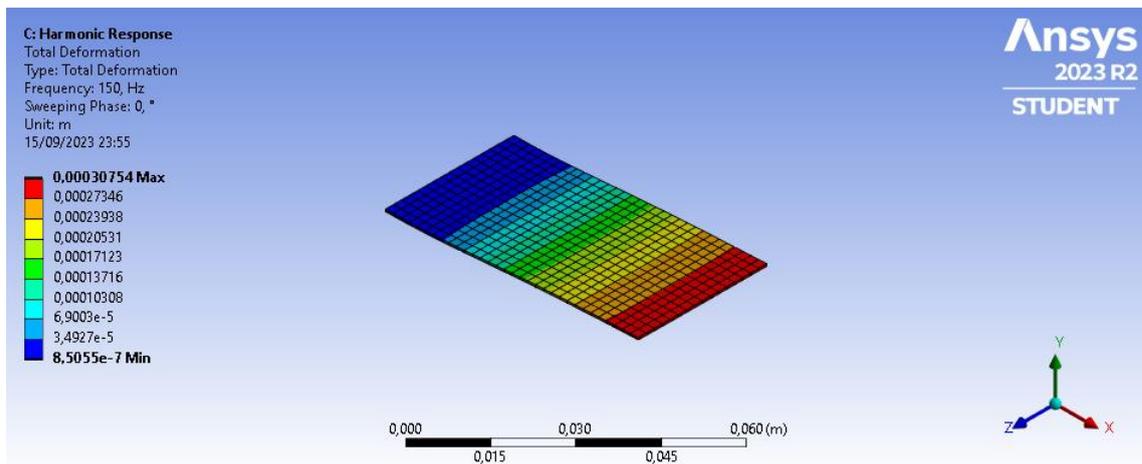


Figura 24: Deformação na viga sob carregamento harmônico de 5 N. Fonte: Autores.

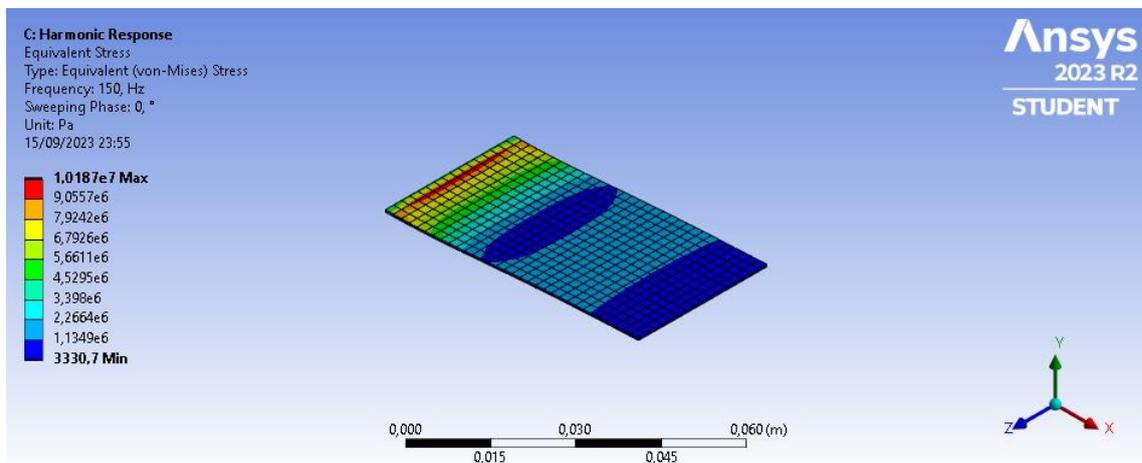


Figura 25: Distribuição de tensão na viga sob carregamento harmônico de 5 N. Fonte: Autores.

4.1.1. Análise da Banda de Ressonância

Após a identificação da frequência de ressonância por meio da análise de elementos finitos, com o propósito de ampliar a faixa de ressonância e otimizar o processo de geração e captura de energia, foi conduzida uma análise numérica em frequências muito próximas à frequência de maior amplitude, marcada pelo software em 60,3 Hz, quando o material piezoelétrico atingiu sua voltagem máxima de 15 V. Essa abordagem permitiu explorar o

espectro de frequências circundantes para avaliar a capacidade do material na geração de tensão elétrica.

Ao selecionar a frequência de 57 Hz, cerca de 6 % menor que a frequência de ressonância, com o objetivo de investigar o comportamento do material, foi observado que, de acordo com os resultados do software, o piezoelétrico gerou 14,9 V.

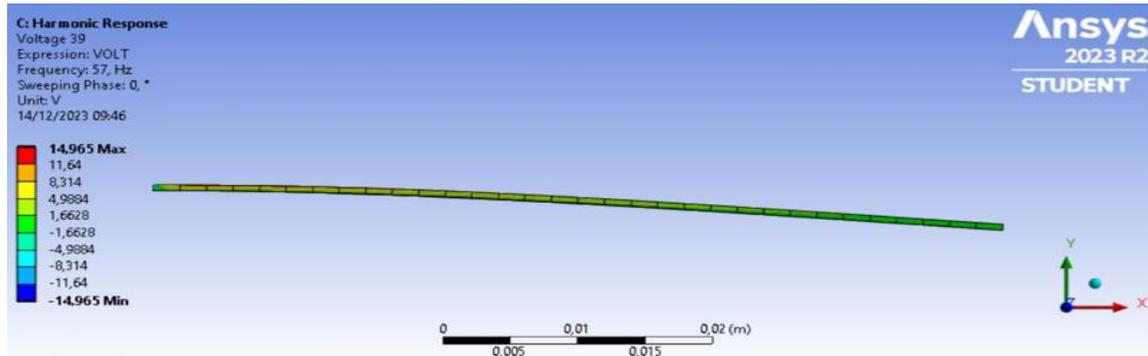


Figura 26: Geração de tensão elétrica na frequência de 57 Hz. Fonte: Autores.

Ao selecionar a frequência 64,5 Hz, cerca de 6 % maior que a frequência de ressonância, o software apontou 14,5 V como o maior potencial atingido pelo piezoelétrico.

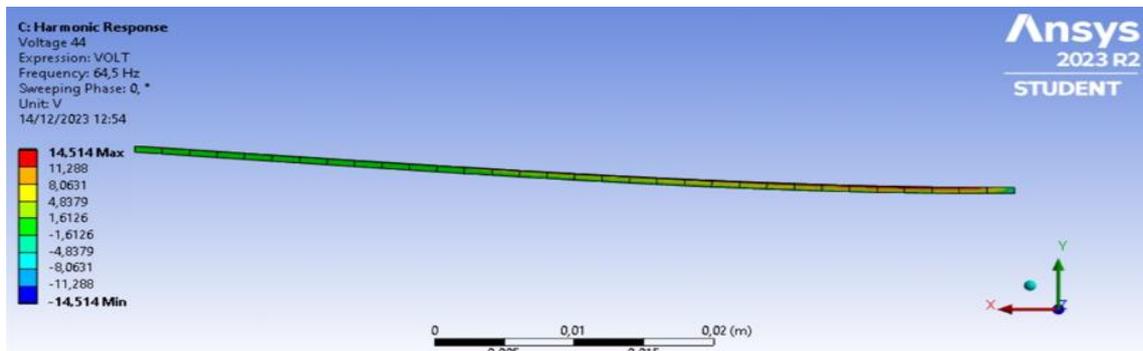


Figura 27: Geração de tensão elétrica na frequência de 64,5 Hz. Fonte: Autores.

5. ANÁLISE EXPERIMENTAL

Após a conclusão da análise por meio da simulação em elementos finitos através do software ANSYS®, direcionamos nossa atenção para a etapa experimental com o objetivo de complementar e validar nossos resultados em um ambiente de laboratório. Para tal finalidade, estabelecemos nosso experimento nas instalações do Laboratório de Sistemas e Estruturas Inteligentes (LASEI) do CEFET.

O experimento em si envolveu a medição do deslocamento da ponta com um sensor a *laser* sobre uma placa piezoelétrica, que foi montada em uma mesa vibratória "*shaker*". A principal finalidade desse experimento foi identificar as frequências harmônicas reais da placa, bem como avaliar sua capacidade de geração de eletricidade em resposta às vibrações induzidas pelo *laser*.

Os equipamentos utilizados para a realização desse experimento incluíram um sensor de deslocamento a *laser* Micro-Epsilon do modelo optoNCDT 1220, uma placa piezoelétrica modelo "PZT05", uma bancada de suporte para a posição precisa do sensor de deslocamento a *laser* e um *shaker* PCB, modelo "2025E".



Figura 28: Placa piezoelétrica fixada no *shaker* modelo 2025E. Fonte: Autores.

Para iniciar o experimento, a placa piezoelétrica foi fixada no *shaker*, na configuração vertical em cantilever. Em seguida, o sensor de deslocamento a *laser* foi posicionado de forma a direcionar-se para a extremidade livre da placa.

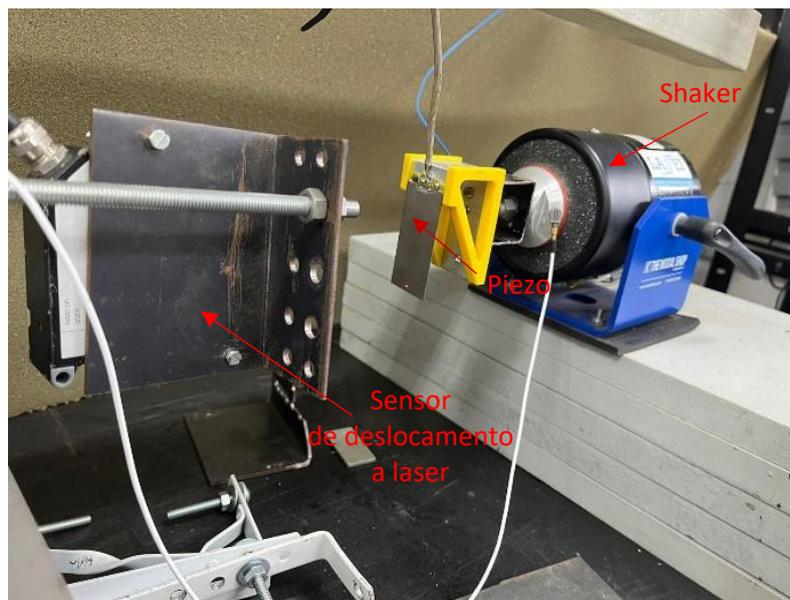


Figura 29: Montagem do experimento. Fonte: Autores.

A mesa vibratória foi configurada para executar o teste de varredura de frequência, indo e voltando, na faixa de 20 Hz a 150 Hz enquanto o sensor a *laser* coletava os dados de deslocamento da ponta do piezoelétrico. A frequência inicial selecionada foi de 20 Hz, com a direção selecionada para cima e com velocidade de 1 Hz/s. O intervalo selecionado engloba a frequência de 60,3 Hz, que foi identificada na simulação numérica como a frequência de ressonância.

Tabela 8 – Dados da configuração da varredura feita em laboratório

Tipo de entrada de varredura: Intervalo fixo e velocidade			
Frequência inicial (Hz):	20	Tempo da varredura:	0000:02:10 (HHHH:MM:SS)
Frequência à direita (Hz):	150	Velocidade da varredura:	1 (Hz/s)
Direção inicial de varredura:	Vertical	Varredura:	1

Ao finalizarmos o experimento, observamos que a frequência natural do primeiro modo harmônico da placa estava situada em 77,5 Hz, podendo ser observado no segundo pico da figura 30.



Figura 30: Resposta harmônica do piezoelétrico no Signal Express LabView. Fonte: Autores.

Vale ressaltar que o primeiro pico observado na figura acima, na frequência de 60 Hz, embora próximo ao valor encontrado na simulação computacional, representa a frequência nominal do sistema elétrico brasileiro e foi desconsiderado da análise acerca do experimento.

A figura 31 mostra a amplitude do deslocamento do piezoelétrico ao longo do tempo conforme o aumento gradual das frequências aplicada durante o processo de varredura. Nela, são visíveis dois picos que indicam a entrada do piezoelétrico em ressonância. O segundo pico é uma repetição do primeiro, pois durante a varredura, ao atingir a frequência máxima de 150 Hz, o sistema retorna à frequência inicial de 20 Hz. Isso faz com que o *laser* atinja o pico de ressonância duas vezes. As setas em vermelho indicam a direção da varredura.

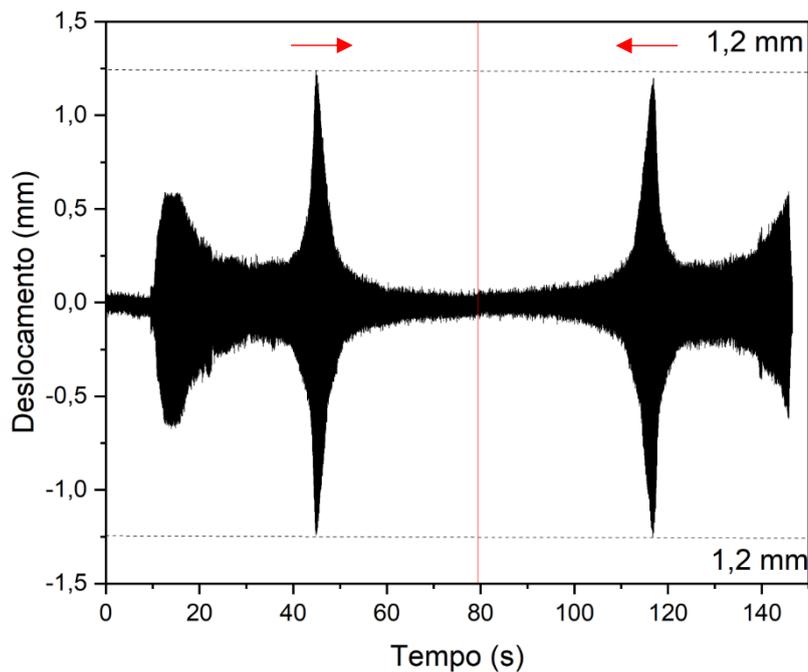


Figura 31: Deslocamento da ponta durante a varredura. Fonte: Autores.

A figura 32 ilustra a variação da amplitude da voltagem registrada pelo piezoelétrico ao longo do tempo durante a varredura. O pico máximo atingiu 23,3 V, correspondendo ao momento de maior deslocamento, quando a frequência das vibrações aplicadas se alinha com a frequência natural de ressonância do material. Nesse instante, a conversão de energia mecânica das vibrações em tensão elétrica alcança sua máxima eficiência.

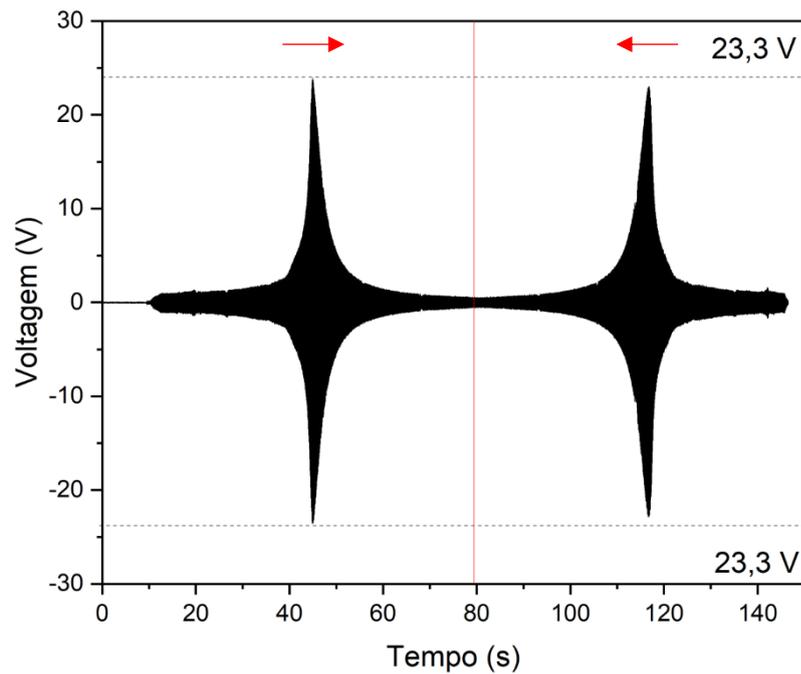


Figura 32: Tensão do piezoeletrico durante a varredura. Fonte: Autores.

No decorrer da varredura, foi identificado que a frequência de ressonância do piezoeletrico em análise é de 77,5 Hz, destacada como o segundo pico da figura 30. Com base nesse dado, realizou-se um novo teste para manter a frequência de ressonância constante ao longo de um período de 50 segundos. O deslocamento resultante da vibração atingiu 1,4 mm, a partir da base, como pode ser observado na figura 33.

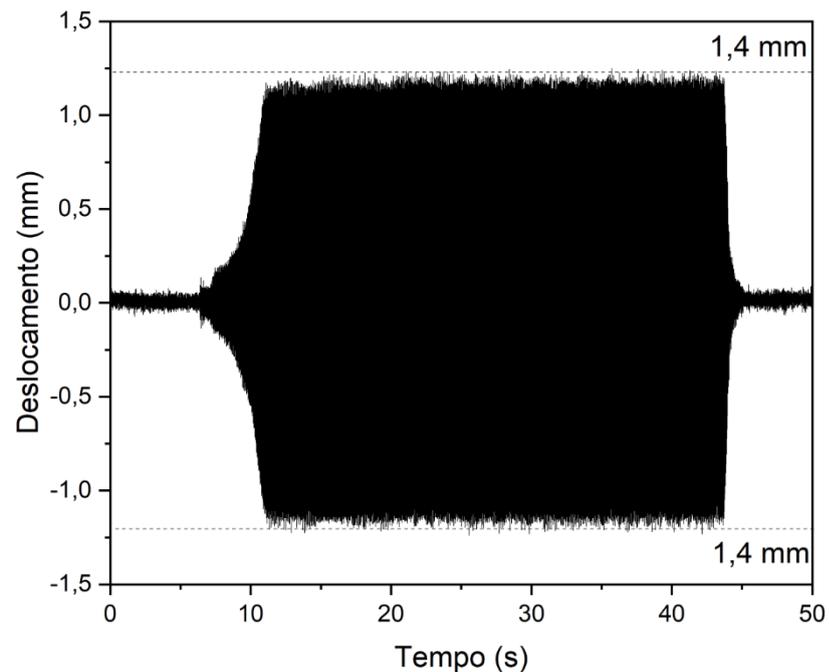


Figura 33: Deslocamento da ponta com frequência de 77,5 Hz. Fonte: Autores.

Enquanto a produção de tensão elétrica observada no piezoelétrico durante o teste com a frequência estabilizada em 77,5 Hz atingiu 22,1 V, conforme podemos observar na figura 34.

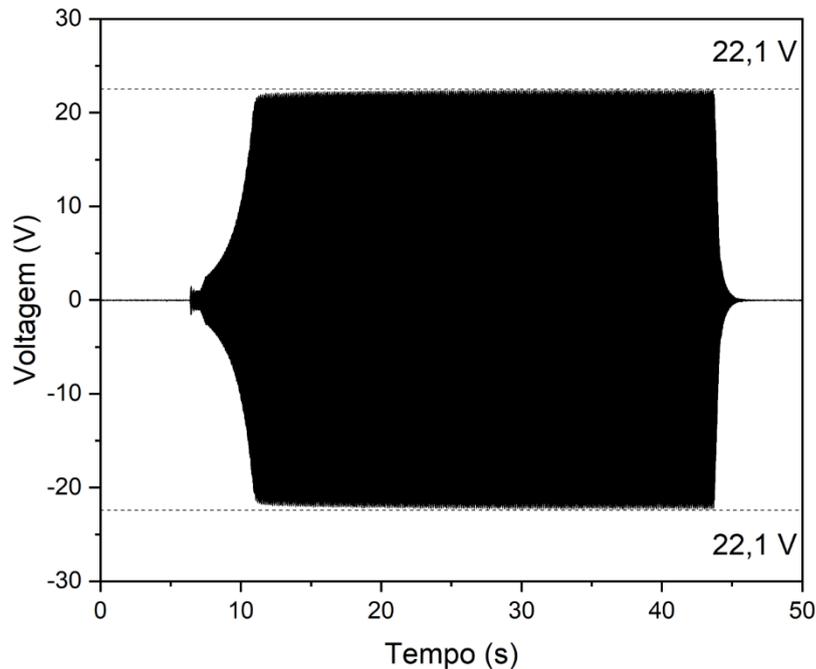


Figura 34: Voltagem do piezoelétrico com frequência de 77,5 Hz. Fonte: Autores.

Com base nos resultados do primeiro teste e com o propósito de analisar a largura das bandas de ressonância e a perda de eficiência ao sair delas, visando otimizar a geração de energia elétrica por meio do piezoelétrico, foram conduzidos mais dois testes. Estes testes contemplaram frequências próximas à ressonância, com os intervalos percentuais inferior e superior semelhantes àqueles utilizados na simulação numérica. Permitindo uma compreensão mais aprofundada do comportamento do material quando estimulado pela vibração gerada pelo *shaker* e sua capacidade em gerar tensão elétrica.

Para o segundo teste, foi selecionada uma frequência que representava aproximadamente 94 % da frequência de ressonância, totalizando 72,5 Hz, e sua execução teve a duração de 50 segundos. Os resultados registrados revelaram um deslocamento medido a partir da base de 0,4 mm, como demonstrado abaixo.

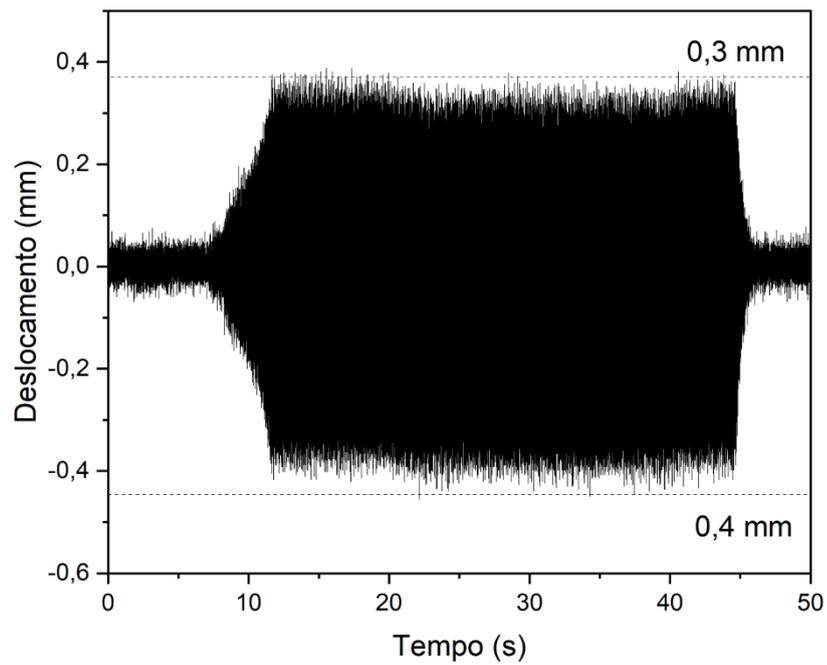


Figura 35: Deslocamento da ponta com frequência de 72,5 Hz. Fonte: Autores.

Enquanto foi observado uma geração máxima de tensão elétrica de 6,1 V pelo piezoelétrico durante o teste com a frequência estabilizada em 72,5 Hz ao longo do período estipulado de 50 segundos.

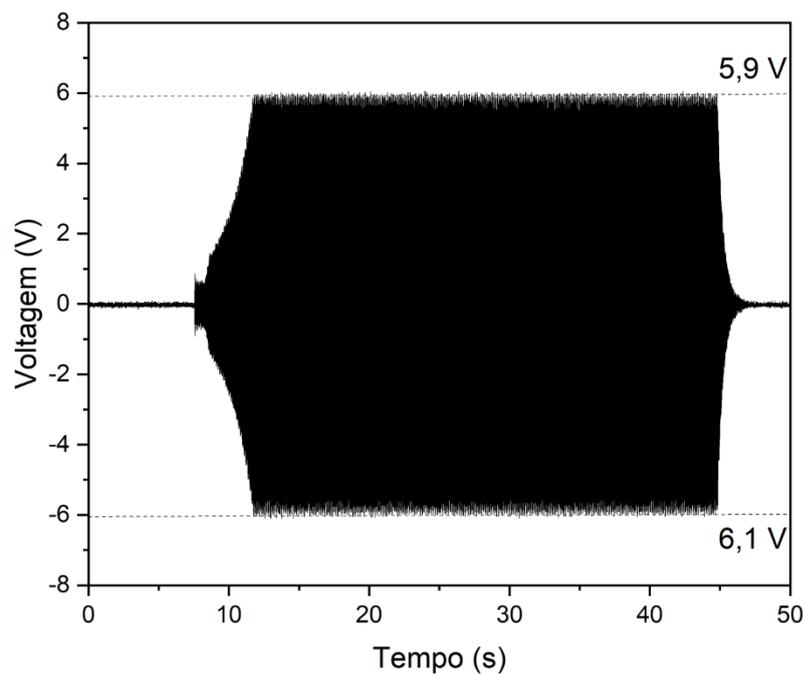


Figura 36: Voltagem do piezoelétrico com frequência de 72,5 Hz. Fonte: Autores.

E por fim, para o terceiro teste foi selecionado a frequência de 82,5 Hz, cerca de 6 % maior que a frequência de ressonância, o mesmo intervalo utilizado na análise numérica do capítulo anterior. Os resultados obtidos foram um deslocamento a partir da base de 0,7 mm.

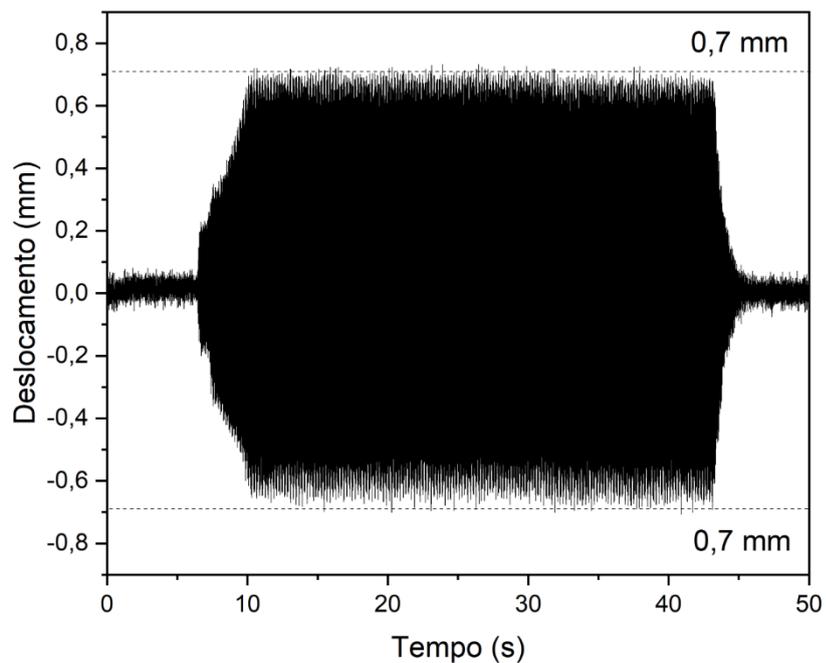


Figura 37: Deslocamento da ponta com frequência de 82,5 Hz. Fonte: Autores.

E a geração de 14,2 V de tensão elétrica com a frequência estabilizada em 82,5 Hz durante o intervalo de 50 segundos.

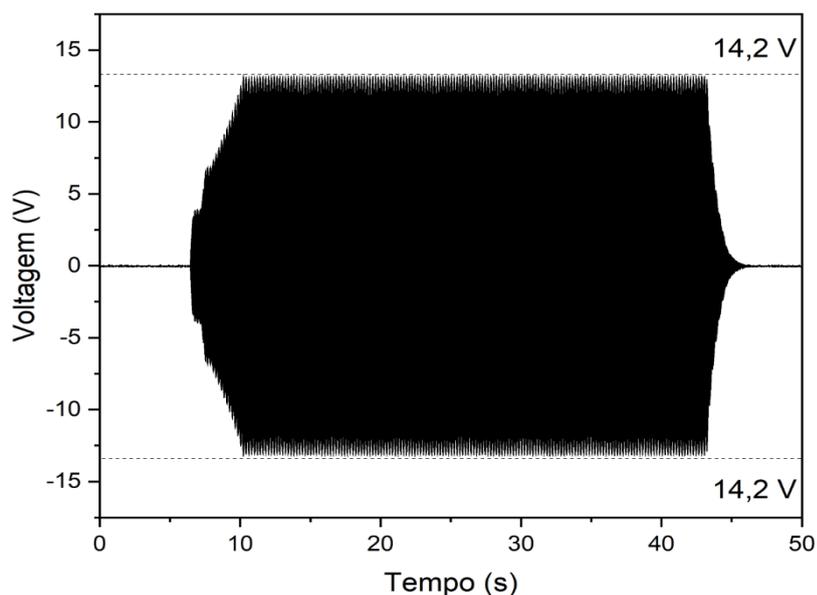


Figura 38: Voltagem do piezoelétrico com frequência de 82,5 Hz. Fonte: Autores.

6. COMPARAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DO PIEZOELÉTRICO

O objetivo deste capítulo é apresentar a comparação entre os resultados obtidos durante a simulação numérica realizada no software ANSYS® e os derivados das experimentações conduzidas no Laboratório de Sistemas e Estruturas Inteligentes (LASEI) do CEFET.

Conforme discutido durante o capítulo 4 deste estudo, a frequência de ressonância estimada do material piezoelétrico, obtida através de simulação computacional, foi de 60,3 Hz gerando uma tensão elétrica medida em 15,2 V.

No capítulo 5, os resultados obtidos durante o experimento com o piezoelétrico foram divergentes aos encontrados anteriormente, com o fenômeno de ressonância ocorrendo na frequência de 77,5 Hz promovendo uma geração de tensão elétrica mensurada em 22,1 V.

Essa diferença encontrada entre os valores computacionais e os experimentais, destacam a presença de variáveis não mensuradas entre o comportamento previsto pelo modelo computacional e as características reais do material piezoelétrico testado, tendo o ambiente do mundo real e as interações do material com condições específicas não totalmente consideradas na simulação computacional podendo explicar tais divergências.

Após identificar a frequência na qual o fenômeno da ressonância se manifesta, foi conduzida uma análise detalhada de um intervalo de frequências próximas para avaliar o potencial de geração de energia e explorar estratégias para ampliar as bandas de ressonância, buscando assim, expandir a faixa de utilização dos sensores piezoelétricos estudados.

Durante a análise computacional, foi constatado que dentro do intervalo proposto, de 6 % abaixo e 6 % acima da ressonância, 57 Hz e 64,5 Hz respectivamente, a geração de tensão elétrica foi muito próxima a geração máxima observada durante a análise computacional. Isso evidenciou uma estabilidade favorável para o processo de otimização do piezoelétrico.

No entanto, ao considerar os dados obtidos durante o experimento laboratorial, seguindo o mesmo intervalo percentual, 6 % abaixo e 6 % acima da ressonância, representando 72,5 Hz e 82,5 Hz respectivamente, notou-se uma disparidade considerável nos intervalos de geração de tensão elétrica.

A figura abaixo ilustra a geração de tensão elétrica encontrada em ambas as análises.

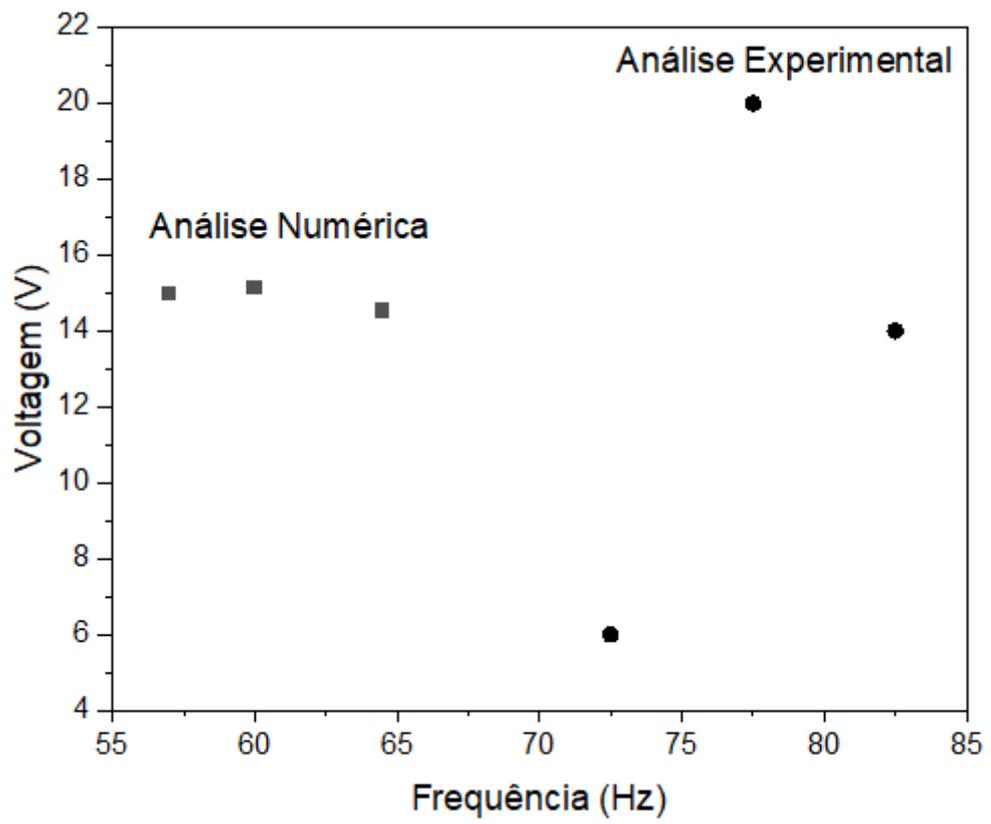


Figura 39: Análise Numérica x Análise Experimental. Fonte: Autores.

7. CONCLUSÃO

O nosso estudo teve como objetivo investigar a largura da banda de frequência de ressonância de um piezelétrico e determinar a queda de eficiência de geração de tensão elétrica ao se afastar dessa frequência. Para isso foi implementado um modelo numérico, em elementos finitos, que tentou descrever seu comportamento eletromecânico. Por fim, utilizou-se testes experimentais para tentar, através de uma correlação numérico-experimental, validar a modelagem.

Ao longo desse estudo, exploramos os fundamentos teóricos da piezoeletricidade, buscando compreender suas propriedades físicas. Em seguida, utilizamos o software ANSYS®, ferramenta computacional baseada em elementos finitos que permite a simulação e análise de comportamentos físicos complexos tornando-os mais fáceis de serem tratados matematicamente, para simular o comportamento eletromecânico de uma placa piezoelétrica.

A simulação resultou na geração de 15,1 V a uma frequência de 60,3 Hz. Após esta etapa teórica e computacional, avançamos para experimentos em laboratório, observando o comportamento da mesma placa piezoelétrica sob diferentes frequências de excitação e analisando suas respostas aos estímulos. Identificamos que a frequência natural do primeiro modo harmônico da placa foi de 77,5 Hz, estabelecendo uma base sólida para investigações posteriores. Realizamos o principal teste para identificarmos a maior quantidade de geração de tensão elétrica, que foi de 22,1 V.

Em seguida, foram realizados testes adicionais em frequências próximas do modo harmônico principal (primeiro modo) permitindo observar a geração de tensão elétrica utilizando a mesma variação percentual de frequência da placa em cada configuração. Os resultados obtidos revelaram como as diferentes frequências de excitação influenciam a capacidade da placa em converter vibrações em eletricidade.

Entretanto, os resultados obtidos na simulação computacional visando o estudo do de eficiência das bandas de ressonância foram divergentes aos resultados obtidos no ambiente laboratorial. Durante a simulação o a discrepância de geração de eletricidade em pontos próximos a ressonância foi muito pequena, assim apresentando uma estabilidade do comportamento piezoelétrico, enquanto no ambiente experimental, a eletricidade produzida próximo a faixa de ressonância obteve intervalos muito grandes, demonstrando

uma instabilidade de geração de eletricidade no intervalo proposto. Diferentes motivos podem ter afetado a diferença nos resultados, dentre eles:

- *Diferenças entre o modelo e o experimento*: o suporte experimental é mais complexo e envolve dois diferentes materiais em formato de sanduiche, onde a cerâmica piezoelétrica fica protegida, o que altera a frequência natural do elemento e não foi modelado numericamente. A simulação considerou que toda a viga era composta apenas de PZT5.
- *Tipo de fixação*: A fixação experimental, através de dois parafusos é diferente da modelada, com engaste ao longo de toda a extremidade
- *Parâmetros do material*: Os parâmetros utilizados no modelo, como as matrizes piezoelétricas e de rigidez, foram extraídos da literatura e não diretamente da chapa piezoelétrica utilizada experimentalmente.

Essas descobertas representam avanço no estudo dos materiais piezoelétricos, sendo responsável por empregar um modelo em software 3D enquanto trabalhos anteriores realizados pelo grupo de pesquisa de materiais inteligentes do CEFET-RJ tiveram foco em modelagem matemática. O estudo destaca áreas de aprimoramento e pesquisa, evidenciando os desafios enfrentados ao longo do trabalho. Desta forma, oferece não apenas conclusões, mas também um ponto de partida para pesquisas subsequentes, com o objetivo de impulsionar o desenvolvimento contínuo e as inovações tecnológicas no campo dos dispositivos piezoelétricos.

7.1. TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados coletados, a próxima etapa seria buscar a otimização do modelo computacional, buscando se aproximar ainda mais o ambiente computacional à realidade então começar a etapa de otimização da geração de energia para o sensor.

Outra forma de otimizar o modelo computacional, seria explorar a simulação utilizando outros eixos de polarização, buscando entender o comportamento piezoelétrico e obtendo novos resultados que se aproximem ao dispositivo piezoelétrico real.

Essa etapa teria como objetivo a ampliação da faixa de frequência ao qual o fenômeno de ressonância ocorre, buscando que esse intervalo ótimo de geração de energia, abranja as frequências naturais que os dutos submarinos geram, dessa forma, garantimos

que ao longo da vida útil do equipamento, sua operação seja mantida de maneira contínua e eficaz.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Dados de produção de petróleo e gás natural**. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-abertos/producao-de-petroleo-e-gas-natural>. Acesso em: 11 de abril de 2023.

CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. John Wiley & Sons, Inc., 2018.

ERTURK, A. & Inman, D.J., **Piezoelectric Energy Harvesting**. WileyBlackwell, 2011.

GOMES, D. & DIAZ, F (2019). **Conversão da Energia das Ondas Eletromagnéticas Artificiais dos Meios Urbanos em Energia Elétrica**. Relatório final de pesquisa de Iniciação Científica (graduação) - FATECS – Faculdade De Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Brasília, 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS (IBP). **Pré-sal: desafios e oportunidades**. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/noticias/presal-desafios-e-oportunidades/>. Acesso em: 11 de abril de 2023.

LEO, D. J. **Engineering Analysis of Smart Material Systems**. John Wiley & Sons, Inc., 2007.

MASSONE, A., REIS, S., & VIOLA, F. (2019). **Colheita de energia vibracional utilizando materiais piezoelétricos**. *Conhecimento & Diversidade*, 11(25), 63- 80.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília: MME, 2021.

PETROBRÁS. **Pré-sal**. Disponível em: <https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>. Acesso em: 12 de abril de 2023.