

**RENAN ROSENFELD BAYER MATIAS
VICTOR RIBEIRO MIGUEZ**

**PRÉ PROJETO DE UM MOTOR
PIEZOELÉTRICO LINEAR**

São Paulo
2021

**RENAN ROSENFELD BAYER MATIAS
VICTOR RIBEIRO MIGUEZ**

**PRÉ PROJETO DE UM MOTOR
PIEZOELÉTRICO LINEAR**

Trabalho apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para ob-
tenção do Título de Engenheiro Engenheiro
Mecatrônico.

Área de Concentração:

Mecânica dos Sólidos e Impacto em Estra-
turas

Orientador:

Marcílio Alves

São Paulo
2021

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e, consequentemente, à USP, aos docentes da Escola e outros Institutos que fizeram parte de nossa formação, aos Diretores e aos Coordenadores e equipe da disciplina que conduziu e apoiou a realização desta monografia;

Ao Prof. Dr. Marcílio Alves por nos orientar ao longo deste trabalho de conclusão de curso;

Aos nossos familiares e aos colegas do Departamento de Engenharia Mecatrônica e especialmente os do Centro Moraes Rêgo.

RESUMO

Materiais piezoelétricos convertem energia elétrica em energia mecânica. Esses materiais são amplamente utilizados para a construção de diferentes dispositivos, entre eles, motores piezoelétricos. Usualmente, tais motores são utilizados em ambientes laboratoriais para aplicações ligadas à instrumentação e posicionamento. O objetivo deste trabalho foi conceber e avaliar dois possíveis princípios de atuação de motores piezoelétricos com foco na realização ensaios de tração em corpos de prova de ordem de grandeza milimétrica. Diferentes tipos de motores piezoelétricos foram considerados neste estudo, a fim de propor designs e princípios de funcionamento adequado tais ensaios mecânicos. Trabalhos e abordagens relacionadas à tais motores são explorados. A partir desta análise, foram propostas duas soluções de motores com diferentes modos de funcionamento, para requisitos semelhantes. Um deles consiste em um motor ressonante e o outro em um motor inercial. As soluções foram submetidas à análises pelo Método de Elementos Finitos pela utilização do software *Abaqus*. Os resultados foram refinados e discutidos. Chegou-se a conclusão que ambos os conceitos analisados foram capazes de cumprir grande parte dos requisitos propostos, mas que eles também tiveram dificuldades em questões específicas. O motor de ressonância atingiu altas velocidades, mas com uma força reduzida, enquanto o motor inercial apresentou uma força adequada, mas uma velocidade de operação baixa. Os dois conceitos se apresentaram complementares em seu desempenho.

Palavras-Chave – Motores Piezoelétricos; Ensaios mecânicos; Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT

Piezoelectric materials convert electrical energy into mechanical energy. These materials are widely used to build different devices, including piezoelectric motors. Usually, such motors are used in laboratory environments for applications related to instrumentation and positioning. The goal of this work was to conceive and evaluate two possible principles of action of piezoelectric motors with a focus on performing tensile tests on specimens of millimeter order of magnitude. Different types of piezoelectric motors were considered in this study, in order to propose designs and principles of proper functioning for such mechanical tests. Works and approaches related to such engines are explored. From this analysis, two engine solutions with different operating modes were proposed for similar requirements. One of them consists of a resonant motor and the other of an inertial motor. The solutions were submitted to analysis by the Finite Element Method using the software *Abaqus*. The results were refined and discussed. It was concluded that both analyzed concepts were able to fulfill most of the proposed requirements, but that they also had difficulties in specific issues. The resonance motor reached high speeds but with reduced force, while the inertial motor had adequate force but low operating speed. The two concepts were complementary in their performance.

Keywords – Piezoelectric Motors; Mechanical Testing; Finite Element Method.

LISTA DE FIGURAS

1	Corpo de prova	12
2	Estrutura do cristal [1]	14
3	Cristal tensionado [1]	15
4	Efeito de polarização do cristal [1]	15
5	Polarização no cristal para diferentes sentidos de tensão mecânica [2] . . .	15
6	Tênis inteligente - imagem retirada de revistagalileu.globo.com	16
7	Pneu equipado com nanogeradores piezoeletricos - imagem retirada de https://www.inovacaotecnologica.com.br/	16
8	Funcionamento básico do motor de ressonância de onda viajante [3]	18
9	Funcionamento básico do motor de ressonância de onda estacionária [3] . .	18
10	Funcionamento básico do motor de ressonância de onda híbrida [3]	19
11	Funcionamento básico do motor de acionamento inercial por fricção [4] . .	20
12	Funcionamento básico do motores passo a passo [4]	21
13	Gráfico que ilustra a diferença de diferentes curvas de tensão x deformação para valores distintos de taxa de deformação [5]	24
14	Esquemático e funcionamento do <i>Langevin Motor</i> [6]	27
15	Visualização do deslocamento e estresses mecânicos de Von Mises durante a operação do motor[6]	29
16	Elipses de movimento resultantes da aplicação de 36kHz, 38kHz, 40kHz, 42kHz e 44kHz e as suas respectivas velocidades[6]	29
17	Princípio de operação do motor [7]. Aplicação de duas ondas em fase em (a) e fora de fase por π em (b)	31
18	Posicionamento dos dentes e seu modo de operação quando aplicadas ondas em fase (a) e fora de fase (b) [7]	32
19	Deformação do motor utilizando o método de elementos finitos [7]	32

20	Protótipo do motor construído [7]	33
21	Comportamento da velocidade do motor quando aplicados carregamentos e tensões diferentes [7]	33
22	Característica da velocidade e carregamento do motor [8]	34
23	Piezocerâmica	37
24	Malha de Elementos Finitos	39
25	Candidato 1	40
26	Resultados da simulação do candidato 1	41
27	Candidato 1	42
28	Comportamento do deslocamento a partir de uma vibração do tipo dente de serra [9]	43
29	Figura 1 do Candidato 2	44
30	Figura 2 do Candidato 2	44
31	Figura 3 do Candidato 2	44
32	Design Candidato 1	47
33	Design do Candidato 2	48

SUMÁRIO

1	Introdução	9
1.1	Objetivo	11
1.2	Justificativa	11
1.3	Metodologia	12
2	Aspectos Conceituais e Requisitos	14
2.1	Efeito Piezoelétrico	14
2.1.1	Aplicações e discussão	16
2.2	Tipos de Motores Piezoelétricos	17
2.2.1	Motores de ressonância	17
2.2.2	Motores inerciais	19
2.2.3	Motores "passo a passo"(stepping principle)	20
2.3	A família de materiais PZT	21
2.4	Parâmetros de ensaios mecânicos	22
2.5	Requisitos	23
3	Trabalhos Relacionados	26
3.1	Simulation of a linear piezoelectric motor by using finite element method [6]	27
3.2	Development of a New Standing Wave Type Ultrasonic Linear Motor [7] .	30
3.3	Discussão sobre os motores analisados	33
4	Concepção do Motor	35
4.1	Descrição do processo de simulação com Elementos Finitos	36
4.1.1	Definição da geometria do material	36
4.1.2	Determinação do material PZT-4 e outros materiais	37

4.1.3	Modelagem do assembly e interações	38
4.1.4	Condições de contorno	38
4.1.5	Malhas de Elementos Finitos	39
4.1.6	Job e análise dos resultados	39
4.2	Candidato 1	40
4.3	Candidato 2	43
4.4	Discussão	45
5	Conclusão	49
Referências		52

1 INTRODUÇÃO

O ensaio de tração é uma das atividades mais famosas da engenharia e é fundamental para a caracterização de diferentes materiais usados em múltiplas indústrias e no campo acadêmico. A partir deste teste é possível obter propriedades fundamentais de diferentes tipos de materiais, como Módulo de Elasticidade, Resistência à Tração e Limite de Escoamento e também entender o comportamento do material para diferentes valores de tensão para a obtenção da curva Tensão X Deformação de um determinado material. Além do teste de tração clássico, existem outros tipos de ensaios como testes de impacto e testes quase-estáticos, que servem para quantificar a absorção energética ou modos de falha de diferentes materiais [10]. Por fim, também existem ensaios de tração micrométricos, os quais são aplicados em corpos de prova de dimensões micrométricas e tem como principal objetivo quantificar as propriedades de uma única fase ou interface do material, além da detecção e estudo de mecanismos de deformação plástica [11].

Tais testes consistem na aplicação de uma força de tração axial num corpo de prova padronizado, promovendo a deformação do material na direção do esforço, que tende a alongá-lo (ou comprimi-lo) até fraturar. Em uma máquina universal de ensaio, projetada para esse tipo de ensaio, os dados são obtidos e computados durante todo o processo, permitindo assim, a posterior análise das informações referentes ao material utilizado.

Para a realização do ensaio coloca-se adequadamente um corpo de prova preso à garras e a máquina é ajustada para que a linha de ação da força de tração/compressão esteja alinhada e que não haja outras forças atuantes na célula de descarga. Então, define-se o método no qual será realizado o ensaio, as dimensões do corpo de prova, velocidade do ensaio e de retorno, os limites de operação do equipamento, a forma de apresentação dos resultados, entre outros. O ensaio usual termina quando o corpo de prova se rompe. Os tipos de ensaios variam principalmente no que tange à força exercida, taxa de deformação, dimensão do corpo de prova e tipo do material. Alguns exemplos de normas técnicas adotadas são:

- ISO 6892 – Teste de tração de materiais metálicos

- ISO 527-3 – Teste de tração em filmes e folhas
- ASTM E8 / E8M – Teste de tração de materiais metálicos
- ASTM D412 – Teste de tração de elastômeros
- ASTM D638 – Teste de tração de plásticos
- ASTM D6319 – Teste de tração em luvas médicas

A fim de que o ensaio de tração seja confiável é necessária a utilização de uma máquina de ensaio de precisão. Dentre os principais componentes responsáveis pelo alcance dos requisitos definidos por normas técnicas, está o motor da máquina, que traciona o corpo de prova. Este motor deve apresentar um movimento constante e responsivo, além de gerar a força de carregamento adequada para o material e norma que se deseja utilizar.

Ao longo das últimas décadas, diversos tipos de máquinas de ensaio de tração foram desenvolvidas utilizando tecnologias diferentes para a realização dos ensaios, com diferentes objetivos, para cada tipo de ensaio. Além da vasta aplicação no setor produtivo, outros tipos de ensaios mecânicos laboratoriais como testes quase-estáticos e testes de impacto são pertinentes para avaliar o comportamento de materiais e estruturas, sobretudo nas áreas de análise e mecanismos de falhas, impacto de estruturas, avaliação e seleção de materiais avançados, entre outras [10]. Para análises mais finas, a resolução dos sensores das máquinas de teste e a precisão dos movimentos são fatores importantes.

Embora as soluções supracitadas sejam ideais para diversos casos, se a precisão requerida para um determinado teste for micrométrica, um motor elétrico convencional dificilmente será adequado. Além disso, esse tipo de motor comumente sofre com problemas de folga (*backlash*) e não costumam ter uma resposta em tempo instantânea. Como o tipo de deslocamento buscado nessa aplicação é o linear, um outro problema dos motores eletromagnéticos é que eles costumam exigir engrenagens e elementos de fixação, o que dificulta a sua miniaturização.

Existe, entretanto, um outro candidato a solucionar os problemas apresentados: o motor piezoelétrico, o qual funciona a partir do efeito piezoelétrico inverso. Seu modo de operação faz com que ele tenha uma série de diferenciais, como:

- Precisão e responsividade no tempo.
- Facilidade de miniaturização para realização de ensaios em pequena escala.

- Funcionamento em sentido linear e não apenas radial.
- Não são impactados por campos eletromagnéticos e também podem funcionar no vácuo.

Por conta de algumas destas características, um estudo será apresentado nesta monografia, a fim de proporcionar um entendimento mais profundo de motores piezoelétricos e dos desafios encontrados para a aplicação à um tipo de ensaio mecânico.

1.1 Objetivo

O Objetivo deste Trabalho de Conclusão de Curso é entender e implementar o princípio operante de um motor piezoelétrico a fim de aplicá-lo à realização de análises de desempenho estrutural em corpos de prova de dimensão micrométrica, por meio de ensaios de tração. Devido à alta precisão de grande parte dos atuadores piezoelétricos, eles são bastante utilizados em ambientes laboratoriais para aplicações ligadas à instrumentação. Seu design será inspirado em exemplos pré existentes, de modo a aproveitar características positivas do que se já tem criado. Por conta disso, este estudo não prestará apenas para apresentar novas oportunidades de aplicações para motores piezoelétricos, mas também servirá como uma discussão sobre algumas abordagens para o projeto deste tipo de motor. Devido à circunstâncias de isolamento social causadas pela pandemia de Covid-19, o foco do estudo será a concepção do design conceitual da máquina realizado com base na análise de referências, realização de simulações baseadas em elementos finitos (FEM) e design com ferramentas de CAD. Com tais ferramentas, obterá-se o princípio necessário para o projeto detalhado do motor.

O motor terá como objetivo a realização de testes de desempenho estrutural de corpos de prova com alta precisão. O corpo de prova será um elemento constituído de liga ABNT 1050 em formato de paralelepípedo com dimensões 0.1mm x 0.1mm x 1mm, como mostrado na Figura 1. Ele será posicionado verticalmente de forma que uma de suas extremidades seja fixada e a outra seja tensionada pelo motor.

1.2 Justificativa

Em geral, os piezo-motores tem uma eficiência energética acentuada, melhor performance relativa em torque e precisão, com um custo benefício competitivo em relação aos

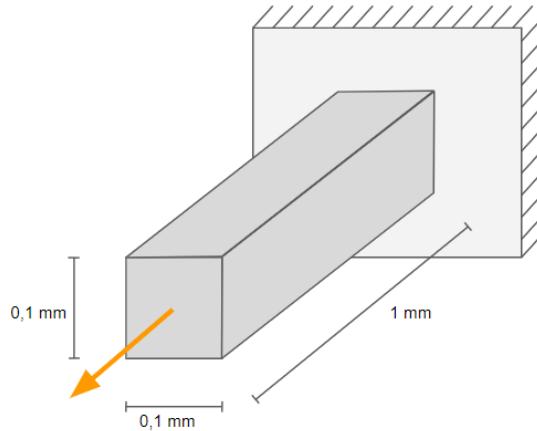


Figura 1: Corpo de prova

eletromagnéticos, de dimensão reduzida [12]. Apesar disso, muitos destes possuem uma vida útil limitada, além do grande problema de inconsistência na performance entre motores iguais [12]. No aspecto de atuadores piezo-lineares, estes conseguem atingir precisões nanométricas, com uma força maior que os demais, para esta resolução. Entretanto, têm um design complexo e, em alguns casos, não são tão rápidos [12].

Já existem opções de motores piezoelétricos disponíveis no mercado. A justificativa para se propor um novo projeto é que as soluções existentes têm propósitos diferentes dos buscados neste projeto, trazendo uma complexidade desnecessária para a realização de ensaios de tração em corpos de prova. Isso se torna um problema pelo fato de encarecer o preço dos motores. Para agravar este cenário, não há fabricantes nacionais, o que exige a compra de equipamentos importados cuja especificação é calculada em moedas altamente valorizadas em relação ao real, como dólar, euro ou franco suíço. Somada à conversão, é necessário aplicar o imposto IOF de aproximadamente 6.0%, o valor do frete e as taxas alfandegárias. O objetivo deste projeto é propor uma solução simples, capaz de cumprir com os seus requisitos de operação de forma satisfatória e que, assim, tenha um custo mais acessível para a realidade brasileira.

1.3 Metodologia

Este trabalho utiliza uma metodologia de projeto bastante comum para o desenvolvimento de máquinas. Inicialmente, o problema a ser resolvido é estudado para obter o entendimento e os objetivos de operação que o motor deve cumprir. Feito isso, uma análise

extensa de outras propostas de motores com características semelhantes foi realizada a fim de encontrar referências que possam servir de inspiração para o projeto e também identificar problemas que devem ser evitados. Na sequência, foram propostos candidatos para a arquitetura da piezo cerâmica que rege o funcionamento do motor. Elas foram analisadas utilizando o Método dos Elementos Finitos e comparadas. Após a realização das simulações iniciais, foram realizados refinamentos no design dos candidatos a fim de otimizar o seu desempenho. Concluída essa etapa, foram propostos conceitos iniciais para o projeto de motores piezoelétricos e foram discutidos os resultados das simulações finais, de forma a avaliar se eles são adequados ou não para o desafio inicial proposto e também avaliar se eles poderiam ser interessantes para outros cenários de aplicação dentro e fora do escopo proposto.

- No capítulo 2 serão apresentados conceitos sobre ensaios mecânicos, piezoelectricidade e diferentes tipos de motores piezoelétricos. Neste capítulo também estão descritos e explorados os requisitos de projeto;
- No capítulo 3 estão expostos estudos diversos dentro e fora do escopo de aplicação deste trabalho
- No capítulo 4 é apresentado o ferramental do método dos elementos finitos, a concepção dos motores e a discussão acerca dos resultados obtidos;
- No capítulo 5 é apresentada a conclusão.

2 ASPECTOS CONCEITUAIS E REQUISITOS

A seguir, serão apresentados conceitos pertinentes para o entendimento e desenvolvimento lógico deste documento. Inicialmente, será dado contexto sobre o efeito piezoelétrico direto e inverso, tópico relevante para outros dois assuntos tratados neste capítulo: motores piezoelétricos e a família de materiais PZT. Em seguida, são explorados alguns conceitos sobre ensaios mecânicos e por fim, a exposição dos requisitos de projeto elaborados.

2.1 Efeito Piezoelétrico

O efeito piezoelétrico (ou piezoelectricidade), descoberto pelos irmãos Jacques e Pierre Curie, é a interação linear entre quantias mecânicas e elétricas. Tal interação pode ser obtida por meio de materiais piezoelétricos, os quais, quando submetidos à deformações mecânicas, sofrem uma mudança da polarização elétrica no material, o que é chamado de efeito piezoelétrico direto. O contrário, o efeito piezoelétrico indireto, também é possível: ao aplicar uma tensão elétrica no material, é induzida uma deformação mecânica no material.

Para o melhor entendimento do leitor, a seguir apresenta-se um esquema simplificado que ilustra o funcionamento de um composto piezoelétrico. [1]:

Normalmente, as cargas em um cristal com propriedades piezoelétricas são perfeitamente balanceadas, mesmo que não sejam simetricamente arranjadas.

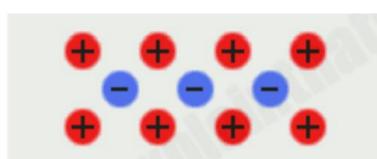


Figura 2: Estrutura do cristal [1]

Ao tensionar o material, a estrutura cristalina se deforma, o que gera a perturbação do balanceamento das cargas elétricas do material (Figura 3).

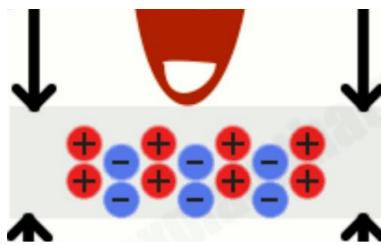


Figura 3: Cristal tensionado [1]

Com a deformação, é induzida uma polarização elétrica. Logo, a partir da tensão mecânica, foi gerada uma diferença de potencial elétrico nas faces do cristal (Figura 4). Este é o efeito piezoelétrico direto. Após a descoberta dos irmãos Curie, também foi notado que o contrário também ocorre: a aplicação de tensão elétrica em cristais piezoelétricos gera tensão mecânica nos mesmos.

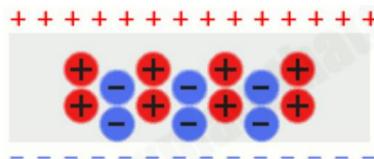


Figura 4: Efeito de polarização do cristal [1]

É importante notar também que a direção e intensidade da força mecânica aplicada é necessariamente vinculada à direção e intensidade da força elétrica resultante da polarização elétrica. Com isso, podemos entender que existem diferentes formas de induzir o efeito piezoelétrico. Por exemplo, a Figura 5 mostra que a compressão em uma dada direção gera uma polarização em um sentido, enquanto a tração nesta mesma direção gera a polarização no sentido oposto [2]. Logo, a força resultante desejada depende principalmente da geometria dos cristais e do vetor da força aplicada.

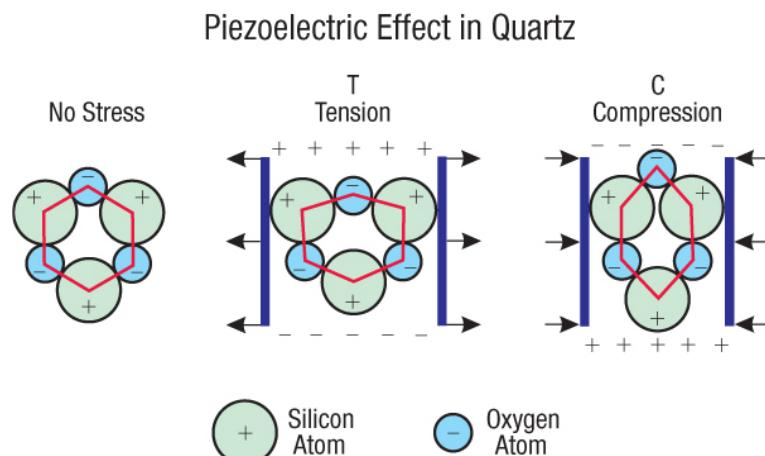


Figura 5: Polarização no cristal para diferentes sentidos de tensão mecânica [2]

De forma análoga, é possível entender que, ao aplicar uma tensão elétrica em um

cristal piezoelétrico, as cargas estáticas se movimentarão no sentido da tensão elétrica e, consequentemente, irão deformar o material na direção desejada, seguindo o princípio do efeito inverso.

2.1.1 Aplicações e discussão

Apresentado o funcionamento das propriedades piezoelétricas, entende-se que há muitas possibilidades a serem exploradas. Como por exemplo, em [1], mostra-se que há uma procura por novas fontes alternativas que possam atender os mercados e causar pouco ou nenhum impacto ao meio ambiente. Neste contexto, uma das técnicas de geração de energia elétrica de forma sustentável que ganhou destaque foi o emprego da piezoelectricidade. Exemplos conhecidos de emprego dessa tecnologia para geração de energia são calçadas e rodovias que se utilizam das propriedades dos materiais para gerar energia elétrica. Outros exemplos interessantes são tênis capazes de carregar dispositivos e pneus equipados com nanogeradores piezoelétricos, como indicados nas Figuras 6 e 7.



Figura 6: Tênis inteligente - imagem retirada de revistagalileu.globo.com



Figura 7: Pneu equipado com nanogeradores piezoelétricos - imagem retirada de <https://www.inovacaotecnologica.com.br/>

Os exemplos citados mostram apenas utilidades do efeito direto da piezoelectricidade, porém, o objeto de estudo, que são os motores piezoelétricos, se utilizam do efeito indireto, para que o material se deforme de acordo com a tensão aplicada e deslocamento desejado. O movimento gerado pelos materiais piezoelétricos é da ordem de $1 \mu\text{m}$ a $100 \mu\text{m}$. Logo, motores baseados em piezoelectricidade contêm um movimento preciso que é repetível e confiável, que é a chave para obter um posicionamento de precisão extremamente alta, da ordem de até 1.0 nm .

Tais motores podem ser divididos em três categorias [13]: (1) Motor ultrassônico, no qual a vibração na faixa de frequência ultrassônica em um elemento oscilante é transferida para um elemento móvel por meio de acoplamento (fricção ou condução direta do movimento); (2) Motor (de impulsos) de inércia, no qual um movimento é gerado por ondas

triangulares (dente-de-serra) e o movimento é gerado por impacto ou coeficiente de atrito dependente da velocidade; e (3) Motor de acionamentos piezoelétricos (piezo-step-walk-drives), no qual vários atuadores piezoelétricos são usado para alternativamente prender e deslocar um elemento ou haste móvel. Os atuadores nestes diferentes tipos de motores operam em um modo quase estático [13].

Devido ao seu modo de operação, uma característica relevante deste tipo de motor é que ele pode gerar não apenas movimentos radiais, como pode ser linear. Essa característica é relevante para minimizar a complexidade e tamanho da configuração do motor, em diferentes casos.

2.2 Tipos de Motores Piezoelétricos

Como supracitado neste texto, é possível categorizar os motores piezoelétricos em três tipos [20]. Nesta seção, serão denotadas as características principais de funcionamento de cada um.

2.2.1 Motores de ressonância

Os motores de ressonância operam em frequências ultrassônicas e combinam elementos piezoelétricos e elementos elásticos para controlar a dinâmica de movimento de um estator. É possível separar as diferentes características desse tipo de motor em diferentes categorias [20]; os motores podem ter movimento elíptico ou oblíquo, podem ter um ou múltiplos modos de vibração do componente piezoelétrico, o motor pode ser uni ou bidirecional e por fim, pode ser parcialmente ou completamente dirigido (isto é, se o elemento piezoelétrico conduz o atuador durante todo o movimento). É possível também, separar os motores piezoelétricos de ressonância no que tange como a propagação de onda é dada no motor [3]. São 3 possibilidades: Motor com onda estacionária, onda viajante (ondas estacionárias com diferentes diferenças de fase) e motor com modos híbridos (ondas de diferentes modos, em diferentes direções do cristal).

O princípio básico de funcionamento dos diferentes tipos de motor de ressonância estão ilustrados nas Figuras 8-10. O objetivo deste tipo de dinâmica é submeter a cerâmica piezoelétrica ao movimento vibracional a fim de obter pequenos movimentos elípticos entre os pés de condução (*driving foots*) e o atuador [3]. O atrito entre estes pés e o elemento possibilita o deslocamento do atuador na direção desejada.

O funcionamento do motor ilustrado na Figura 8 se dá pelo movimento elíptico com

amplitude vertical semelhante à amplitude da própria onda e amplitude horizontal proporcional ao ângulo de inclinação produzido pela onda propagante e à distância entre os pés condutores e a linha neutra do estator. Os pés movem o atuador a partir de movimentos elípticos, enquanto a onda se propaga para frente. A direção do movimento do atuador é oposta à da propagação da onda viajante. Esta onda é composta por duas ondas em defasagem de $\pi/2$ ou $-\pi/2$ [3].

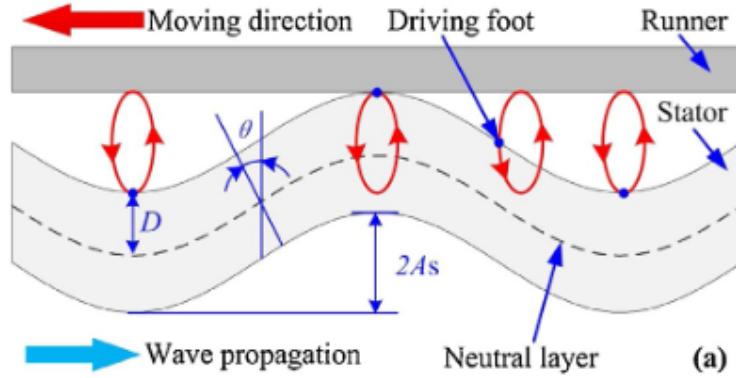


Figura 8: Funcionamento básico do motor de ressonância de onda viajante [3]

Por sua vez, o motor de onda estacionária, exibido na Figura 9 se dá pelo movimento de apenas uma onda, o que só é possível devido à uma diferença entre o valor do amortecimento entre atuador e o elemento piezoeletrico [14]. Isso resulta em um movimento semelhante ao de uma elipse achatada, que pode ser aproximado para um dinâmica linear oblíqua ao atuador. Isto faz com que ele se mova na direção pretendida. A partir diferentes designs de circuitos elétricos para gerar diferentes ondas e troca de frequência de vibração, é possível estabelecer motores uni e bidirecionais neste caso.

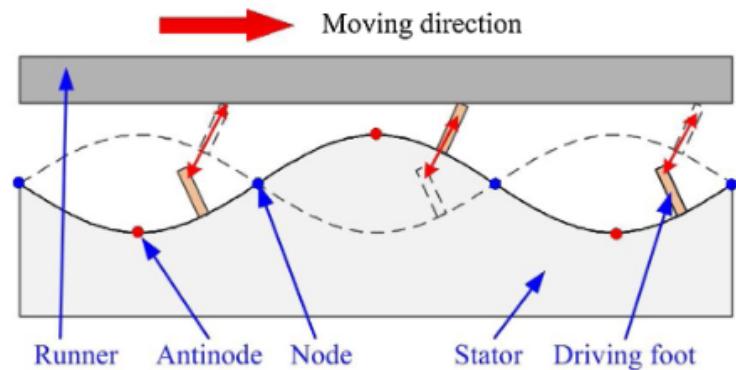


Figura 9: Funcionamento básico do motor de ressonância de onda estacionária [3]

Por fim, destacam-se os motores híbridos, que, como exibido na Figura 10, depende de pelo menos dois modos de vibração para gerar o movimento elíptico. Por exemplo, ao observar os modos A e B da figura, mostra-se que a elipse é obtida através de uma oscilação

longitudinal (modo A) combinada com uma oscilação fletora de amplitudes diferentes (modo B), separadas por uma diferença de fase específica. Com diferentes geometrias de cerâmicas piezoelétricas, é possível criar movimentos de oscilação dos seguintes tipos: Longitudinal-Longitudinal, Longitudinal-Flexional, Longitudinal-Torsional e Flexional-Flexional [3]. Diferentes modos de oscilação geram movimentos lineares ou rotacionais distintos.

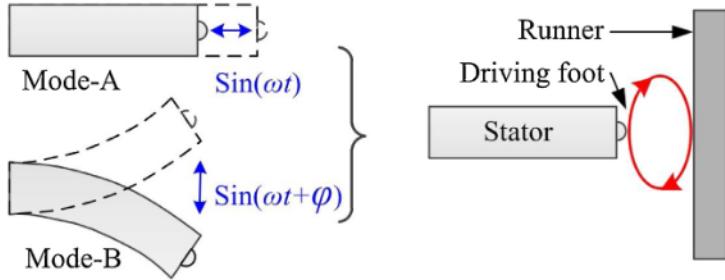


Figura 10: Funcionamento básico do motor de ressonância de onda híbrida [3]

2.2.2 Motores iniciais

Os atuadores piezoelétricos do tipo de acionamento inercial utilizam, em geral, um sinal de forma de onda dente de serra com diferentes *duty cycles* para excitar uma ou um conjunto de piezo-cerâmicas empilhadas para gerar deformações rápidas e lentas de maneira alternada. Assim, o movimento mecânico linear da cerâmica e sua rápida contração e expansão podem ser transmitidos para o estator e o atuador. Os atuadores piezoelétricos do tipo de acionamento inercial podem realizar movimentos de curso longo repetindo séries de movimentos microscópicos periódicos [4].

Existem, principalmente, dois tipos de motores de acionamento inercial: fricção e impacto. Ambos os motores funcionam de maneira análoga, se utilizando da mesma forma de onda. O princípio de funcionamento do motor de acionamento por fricção é melhor descrito na Figura 11. Com o atuador em repouso, é imprimida uma onda do tipo dente de serra com tensão elétrica máxima U na piezo-cerâmica, assim permitindo que o material se expanda na direção longitudinal e a parte atuante (em vermelho) se desloque linearmente, conduzida pela força de atrito devido ao contato com a parte friccional (em cinza). Após atingir o pico de tensão U , a tensão cai rapidamente devido ao formato da onda e, consequentemente, o elemento piezoelétrico contrai rapidamente. Este movimento rápido faz com que o deslocamento positivo na ida seja显著mente menor que o deslocamento negativo na volta do movimento.

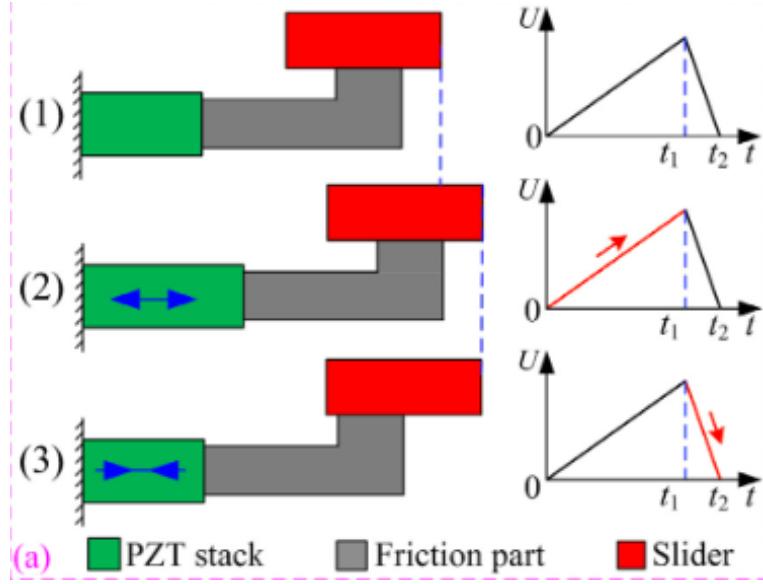


Figura 11: Funcionamento básico do motor de acionamento inercial por fricção [4]

O funcionamento por impacto ocorre da mesma forma que o por fricção, porém em vez de ocorrer uma fricção entre as partes vermelha e cinza da Figura 11, é realizado um contato direto, de maneira que o elemento piezoelétrico empurra linearmente a peça a ser movida. Como o elemento está preso ao estator, ele se move por inércia, assim realizando um movimento linear no atuador.

2.2.3 Motores "passo a passo" (stepping principle)

O último tipo de motor a ser contextualizado são os motores "passo a passo", também chamados de "inchworm motors", ou seja, motor "lagarta" pois a dinâmica das piezo-cerâmicas funciona de maneira análoga. São motores de baixa velocidade, alta precisão e possibilidade de alto torque [4]. O princípio de funcionamento básico está ilustrado na Figura 12. Um sistema de piezo-cerâmicas é estimulado eletricamente de maneira sequencial. Primeiro, a peça "C" se expande, entrando em contato com a haste atuante. Assim, a piezo-cerâmica intermediária "B" se expande em seguida, aumentando a distância entre as piezo-cerâmicas "A" e "C". Em seguida, com a expansão da piezo-cerâmicas "A" o atuador está sendo "segurado" pelo sistema de piezo-cerâmicas. Assim, com a contração de "C", o atuador fica livre novamente e com a contração de "B", o atrito entre "A" e o atuador é responsável por realizar um movimento linear para a direita, assim realizando um passo do motor. Com a contração de "A", o motor está preparado para realizar um ciclo de movimento novamente.

Existem outros designs de sistemas de piezo-cerâmicas para estes motores e também

ordens diferentes de realização da sequência de contração-expansão das piezo-cerâmicas, mas o princípio principal de movimento é o supracitado. Esta dinâmica de movimento possibilita um controle nanométrico do motor piezoelétrico [4] e esta é sua principal vantagem.

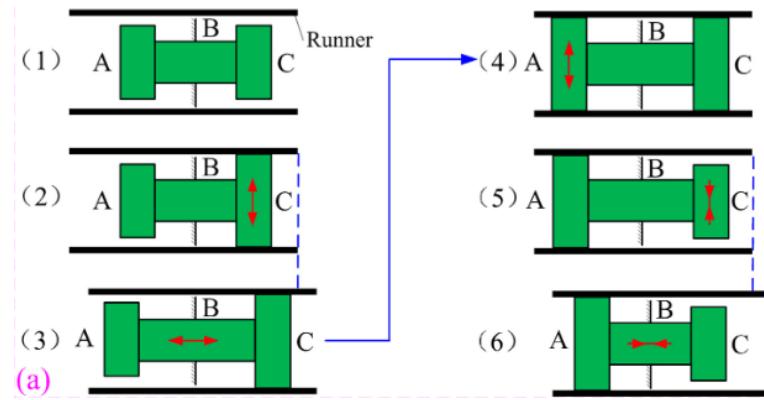


Figura 12: Funcionamento básico do motores passo a passo [4]

2.3 A família de materiais PZT

A sigla PZT (titânato de zirconato de chumbo) agrupa alguns dos materiais mais utilizados neste contexto. Eles apresentam as características piezoelétricas já apresentadas anteriormente. Sua estrutura é formada por um óxido metálico desenvolvido por cientistas do Instituto de Tecnologia de Tóquio por volta de 1952. A principal diferença deste tipo de material para outras piezo cerâmicas é que eles apresentam uma sensibilidade maior e também uma temperatura de operação maior.

Segundo a American Piezo Ceramics (APC International) [15], o processo de manufatura de PZT consiste de 6 etapas, sendo minuciosamente produzido desde a seleção da matéria-prima até o produto final, para que suas propriedades sejam garantidas e replicadas. A morfologia do material PZT é crucial para preencher consistentemente as cavidades da matriz no processo de prensagem a seco durante a fabricação de cerâmicas piezoelétricas. O PZT-4 é um material bastante utilizado para aplicações em transdutores e atuadores. Além dele, outras piezo-cerâmicas com características singulares podem ser utilizadas de acordo com os requisitos definidos para a operação do motor. Alguns desses exemplos são PZT-5A, PZT-5H e PZT-8. Este último, junto com o PZT-4, costuma ser escolhido para projetos de motores como os tratados neste documento.

PZT8 e PZT4 são os materiais piezo cerâmicos "duros" comuns usados em transdutores ultrassônicos de energia (por exemplo, soldagem, corte, sonar, etc.) [16]. PZT8 é

percebido como a melhor escolha para dispositivos ressonantes, principalmente devido ao seu fator de qualidade mecânica superior Q_m . O PZT8 também é considerado um material “mais duro” em comparação com o PZT4, pois tem melhor estabilidade em pré-cargas e níveis de acionamento mais elevados. Muitos designers de transdutores nunca consideram o PZT4 para suas aplicações, embora tenha vantagens claras, como maior saída (ou seja, d_{33} superior). A vantagem percebida de PZT8 em relação a Q_m também pode não se comprovar em alguns casos.” Em sua pesquisa, eles realizaram um estudo de caso sobre o desempenho de transdutores ultrassônicos idênticos substituindo-se a piezo-cerâmica entre PZT-4 e PZT-8. Seu objetivo foi estabelecer diretrizes de projeto e boas práticas para a seleção de materiais em projetos de atuadores. Várias métricas foram investigadas, como impedância, frequência, capacidade, perda dielétrica, Q_m , aquecimento, ganho de deslocamento e o fator de acoplamento eletromecânico. Os métodos de pesquisa teórica e experimental incluíram gráficos de bode, imagens de câmera infravermelha térmica e análise de elementos finitos de campo acoplado.

O PZT4 pode ser mais adequado para aplicações de energia ultrassônica de acionamento contínuo onde o ganho de estabilidade e a amplitude máxima de drive é menos importante, e menos aquecimento e impedância mais baixa são mais desejáveis[16]. Contudo, pode ser necessária uma pré-carga mais alta para ver os benefícios de aquecimento reduzidos com PZT4, uma vez que essa cerâmica se mostrou melhor do que PZT8 em 96MPa, mas 44MPa obteve um desempenho muito semelhante.

Para este projeto, o material escolhido para as piezo cerâmicas foi o PZT4. Apesar de ele poder apresentar um desempenho pior do que o PZT8 em alguns cenários, ele está presente em diversos motores estudados na análise bibliográfica, estando apto para cumprir os requisitos propostos. Outro fator determinante para a escolha dele foi a presença de mais informações e estudos sobre ele disponíveis. As propriedades mais relevantes do PZT são apresentadas em momento oportuno neste documento, no Capítulo 4.

2.4 Parâmetros de ensaios mecânicos

Um importante tópico para o trabalho e principalmente para a elaboração de requisitos são as variáveis envolvidas em ensaios mecânicos. De maneira resumida, os principais parâmetros são inerentes ao material escolhido. São eles o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e os limites de tensão do material (escoamento, ruptura, entre outros). Outros parâmetros são as dimensões do corpo de prova escolhido. Para diferentes dimensões, combinadas com os parâmetros dos materiais, os requisitos de força e direção

de tração do teste podem ser determinados.

É necessário, também, determinar a velocidade em que o teste será feito, pois para diferentes velocidades de deformação, a tensão inerente ao material varia. Esta "velocidade" em que o corpo de prova pode ser entendida como a taxa de deformação. Esta alteração no comportamento do material pode ser vista na Figura 13, a qual mostra uma relação de tensão x deformação, além de pontos de escoamento e ruptura diferentes para determinadas taxas de deformação constantes ao longo dos ensaios.

A taxa de deformação, por sua vez, é definida como a mudança na deformação (deformação) de um material em relação ao tempo. Altas taxas de deformação são eventos que ocorrem em um curto período de tempo devido às propriedades elásticas dos materiais. Por outro lado, baixas taxas de deformação são eventos que ocorrem por um período de tempo mais longo devido à resistência ao impacto ou tenacidade dos materiais [10]. A taxa de deformação é um importante fator em estudos de análise e modos de falha de diferentes tipos de materiais e depende de testes quase estáticos (com menor taxa de deformação) e testes de impacto (com maior taxa de deformação).

Neste relatório, a taxa de deformação ϵ será calculada a partir da forma simplificada, dada pela equação 2.1

$$\epsilon = \frac{v}{L_0} \quad (2.1)$$

Na qual v é a velocidade linear média em que os extremos do corpo de prova estão se afastando e L_0 é o tamanho original do corpo de prova.

2.5 Requisitos

Após a contextualização teórica dos motores e de alguns conceitos, é necessário estabelecer e calcular os requisitos. Estes serão considerados e explorados na análise de elementos finitos, e deverão ser considerados em outras análises posteriores.

Para o fim proposto, o conjunto piezoeletrônico deve atingir alguns requisitos operacionais. Primeiramente, o motor deve realizar um movimento contínuo linear para deslocar o corpo de prova em um sentido, para uma mesma direção. A peça piezoeletrônica, em conjunto com a estrutura deve ser de dimensão pequena e próxima do mercado [17]. A tensão elétrica aplicada ao motor, responsável pela amplitude do movimento, pode ser de uma ampla gama de valores, desde 100V até 1000V como visto em [3, 4, 6, 7, 18]. Foi

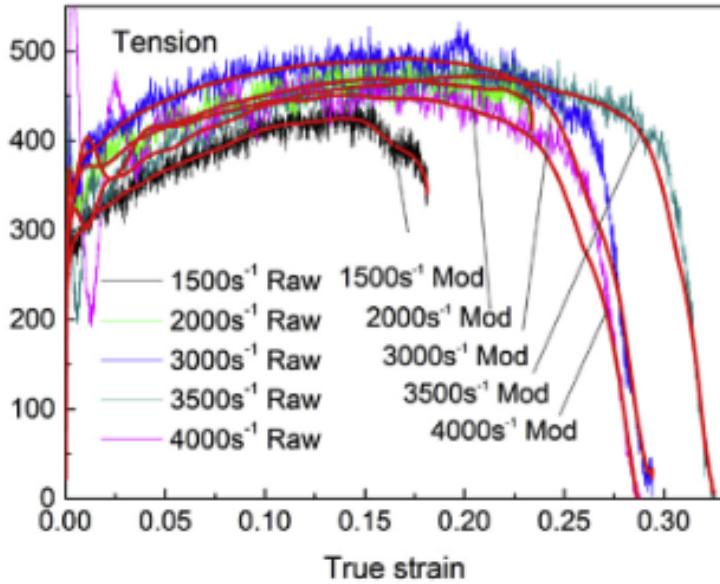


Figura 13: Gráfico que ilustra a diferença de diferentes curvas de tensão x deformação para valores distintos de taxa de deformação [5]

escolhida a tensão de 1000V, pensando em uma maior amplitude do movimento, embora, para fins práticos e de segurança, uma menor tensão seria também adequada.

A velocidade será determinada a partir da taxa de deformação. Para uma liga de alumínio, foi encontrada uma série de testes de falha para taxas de deformação de 1000s^{-1} até 4000s^{-1} e também para valores menores que 10^{-2}s^{-1} [5,10]. Há uma grande variedade de taxas de deformação entre os testes de tração com motores piezoeletricos, pois a velocidade em geral não é o parâmetro mais importante, já que é possível realizar diversos testes para uma faixa de velocidades diferentes. Apesar disto, será escolhida uma faixa aceitável da taxa de deformação entre 100^{-1} e 1000^{-1} , com base nos estudos de motores e também nas diferentes taxas de deformação supracitadas para o alumínio. Usando a definição citada na seção 2.4 deste relatório, a velocidade pretendida está na faixa entre 10cm/s e 100cm/s.

Por fim, resta estabelecer um requisito para a força que o motor deve imprimir no corpo de prova. O valor da força necessária depende do material e dimensões do corpo de prova. Será utilizado o valor médio do limite de escoamento da liga de alumínio ABNT 1050 para definir a tensão necessária para o teste, limite cujo valor é de 50 MPa. O corpo de prova tem comprimento de 1mm e área da seção transversal de 0.01 mm^2 . Utilizando a definição de tensão, a qual corresponde ao valor da força necessária, por unidade de área. A partir destes dois valores, a força necessária para o motor pretendido é de 0.5 N.

Vale notar que requisitos sobre características marcantes e experimentais dos motores

piezoelétricos não serão explorados, como possibilidade de operar sob efeitos de fortes campos magnéticos, vácuo, resolução de movimento e potência.

A lista a seguir sumariza os requisitos propostos para o trabalho:

- Realizar um movimento contínuo linear
- Tensão elétrica de 100V até 1000V
- Velocidade pretendida na faixa entre 10cm/s e 100cm/s
- Força necessária para o motor pretendido é de 0,5N
- As dimensões do motor devem medir individualmente no máximo 100mm

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Foram estudados diversos projetos de motores piezoelétricos com arquiteturas de design diferentes. Essa análise de referências possui uma grande importância na etapa inicial de um projeto de máquinas, pois ela evita uma reinvenção da roda. Com o entendimento do modo de operação de outros motores, foi possível identificar similaridades, diferenças, vantagens e desvantagens entre eles e, assim, direcionar o foco do trabalho a partir dessa análise. Ao todo, foram analisados 5 projetos de motores. Uma discussão sobre o desempenho deles é apresentada no final deste capítulo. Para sintetizar esta análise, a seguir apresentaremos em maiores detalhes dois dos cinco motores estudados. Eles são os que apresentaram características mais relevantes para o escopo deste projeto.

Além destes motores que serão mais explorados abaixo, destaca-se também, motores piezoelétricos utilizados em aplicações para ensaios mecânicos. Em [19] e [20], foram construídos diferentes atuadores piezoelétricos para testes mecânicos de materiais rígidos, mas que funcionam de forma parecida. A peça piezoelétrica é colocada em contato com uma articulação flexível que está dentro de uma base rígida para sustentar a operação do motor. Nesta mesma base, estão os mecanismos necessários para a realização dos testes. Com o deslocamento do elemento piezoelétrico, a articulação se move e, devido a um conjunto de molas e também às propriedades mecânicas da articulação, é imprimida uma alta força de tração neste mecanismo. Ambas as referências citadas também utilizam do mesmo mecanismo para a realização de testes de fadiga, devido a alta frequência que o elemento piezoelétricos pode conferir ao mecanismo. Vale notar que existem, também, as problemáticas de temperatura e acumulação de carga no mecanismo.

Outros motores de tração que funcionam com elementos piezoelétricos também são utilizados em corpos de provas micrométricas, porém com uma diferença sobre os supracitados: são utilizados para testes que requerem alta precisão e com corpos de prova compostos de materiais como fibras, micro materiais e outros materiais flexíveis [21]. Tais testes também são utilizados, assim como os tradicionais, para a caracterização de materiais específicos em escalas micro e nanométricas [11].

3.1 Simulation of a linear piezoelectric motor by using finite element method [6]

Este estudo desenvolveu uma metodologia de simulação e modelagem que pode ser utilizada para se entender o comportamento de motores piezoeelétricos e calcular a sua frequência de excitação ótima, de forma a obter uma melhor performance.

Para realizar o estudo, foi utilizado um design de motor piezoeelétrico conhecido como *Langevin Motor*, apresentado na figura a seguir. Ele possui dois estatores constituídos de uma cerâmica piezoeelétrica conectados em seu topo. A angulação de 90 graus entre eles gera uma diferença de fase na excitação da cerâmica que os compõe, resultando em um movimento elíptico do cabeçote que, em fricção com a barra acima dos estatores, faz ela se mover linearmente.

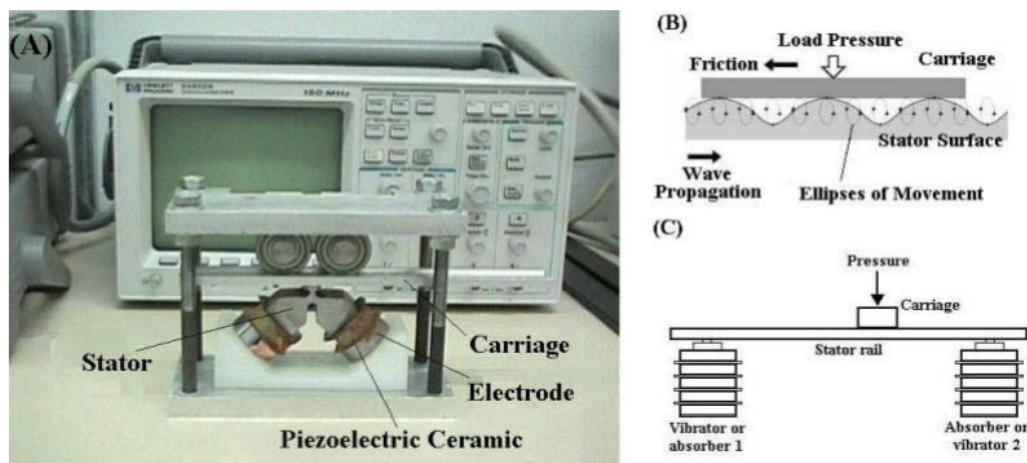


Figura 14: Esquemático e funcionamento do *Langevin Motor* [6]

Além deste design, outros projetos de motores seguindo o conceito de Langevin já foram propostos [7, 22–24]. A velocidade no ponto mais alto da elipse determina a velocidade da barra e, por isso, o estudo da elipse de velocidades gerada pelas excitações piezoeelétricas é fundamental para a análise do comportamento do motor. A amplitude da elipse é diretamente influenciada pela frequência de operação do motor e, para otimizar o sistema, se faz necessário encontrar a frequência que maximize o valor dessa amplitude. Para obter este resultado, assim como encontrar o comportamento de estresses da estrutura do motor o uso do *Finite Element Method (FEM)* foi adotado. Para isso as ferramentas ANSYS e Matlab foram utilizadas.

Primeiramente, foram apresentadas, de maneira expositiva as equações pertinentes para a modelagem em Elementos Finitos do para o elemento piezoeelétrico.

$$\begin{bmatrix} [M_{uu}] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U} \\ \ddot{\phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{uu}] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U} \\ \dot{\phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{uu}] & [K_{u\phi}] \\ [K_{u\phi}] & [K_{\phi\phi}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ \phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ Q \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

Onde as matrizes $[K]$ são matrizes de rigidez mecânica, piezoelétrica e dielétricas, $[M]$ é a matriz de massa, $[C]$ é a matriz de amortecimento mecânico, e $c, /epsilon, e, /beta$ são as constantes elástica, dielétricas, piezoelétricas e de amortecimento, respectivamente.

O motor piezoelétrico é excitado com voltagens elétricas harmônicas. Por isso, a análise harmônica permite a observação da estrutura do motor sob influência de forças harmônicas, deslocamentos, cargas elétricas ou potenciais (como é o caso deste motor estudado). Além disso, a análise da resposta em frequência e modal são também relevantes para entender os modos de vibração do componente piezoelétrico. Assim, a partir da equação matricial 3.1, é possível realizar tais análises e obter a resposta em frequência.

A seguir foi realizada a simulação computacional do motor. Ele foi excitado com uma onda elétrica senoidal de 500V de amplitude e 42kHz de frequência central, além de 90 graus de diferença de fase entre os sinais de excitação aplicados a cada um dos stators. O modelo FEM possui 1286 elementos finitos e 1402 nós. Para obter a elipse do movimento, uma rotina no Matlab foi criada. Ela utiliza os dados de output da análise harmônica feita no ANSYS como inputs. Para calcular a velocidade e posição de cada axis, foi utilizada a equação 3.2 para poder realizar o ajuste da curva para o output preterido.

$$X = u_x \cos(\omega t + \phi_x); Y = u_y \cos(\omega t + \phi_y) \quad (3.2)$$

Onde X e Y são os deslocamentos, u_x, u_y são as amplitudes de deslocamento e ϕ_x, ϕ_y são as fases de cada eixo. A derivação dessa equação nos dá os valores das velocidades nos eixos X e Y, podendo achar uma velocidade total para $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$

Como resultados, é apresentada a visualização do deslocamento do material e os estresses mecânicos resultantes. A Figura 15 a seguir ilustra tal comportamento.

A análise da dos deslocamentos de Von Mises indica que a região de constrição (a parte mais fina da estrutura) é a que está sujeita aos maiores estresses concentrados. O estresse de Von Mises encontrado neste local foi de 19,2 MPa. Esse fator é importante para a escolha do material a ser utilizado no motor [6].

Foi realizada também uma análise da frequência ótima de operação. O seu objetivo era encontrar a frequência de excitação que gera a elipse de movimento com maior amplitude. Para encontrar essa frequência o motor foi simulado dentro do intervalo de 28kHz

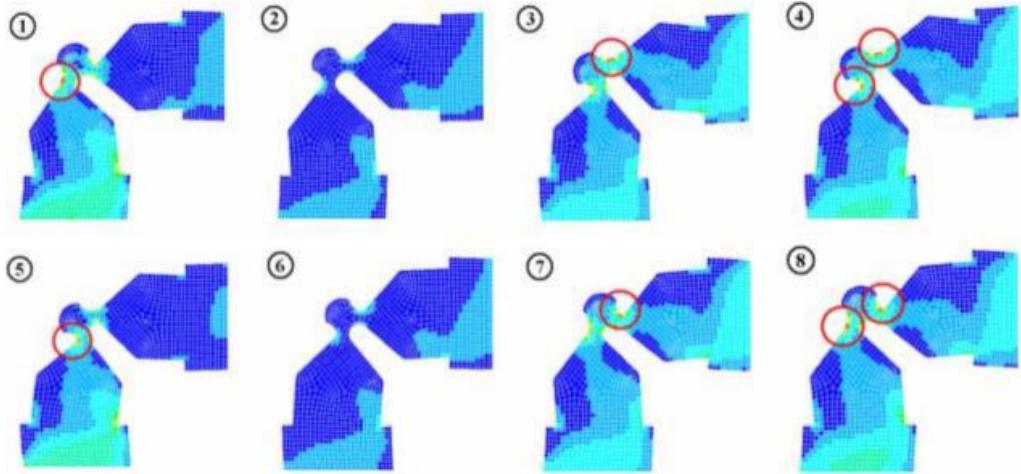


Figura 15: Visualização do deslocamento e estresses mecânicos de Von Mises durante a operação do motor[6]

(próximo à segunda frequência de ressonância) e a 57kHz (próxima à quarta frequência de ressonância), porque a frequência de operação (42kHz) está dentro deste intervalo. A Figura 16 indica tal comportamento.

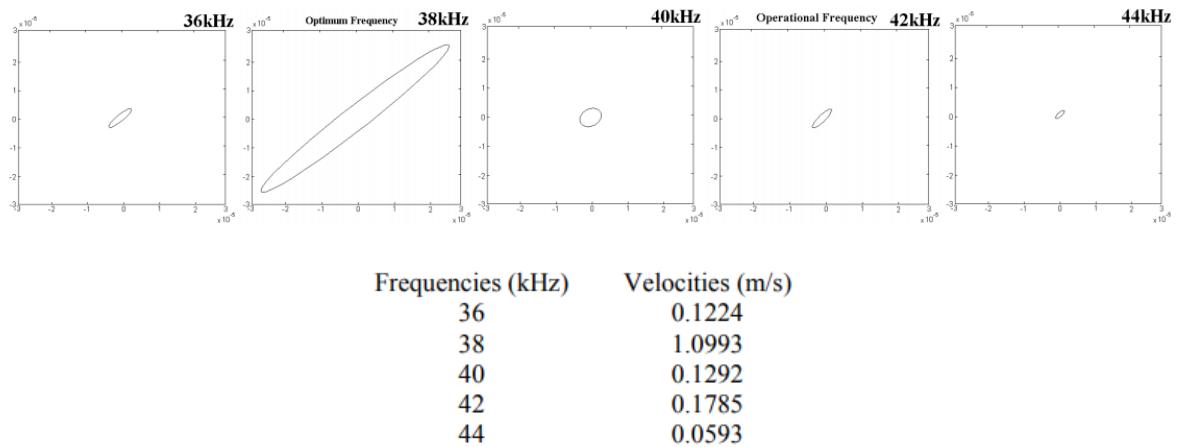


Figura 16: Elipses de movimento resultantes da aplicação de 36kHz, 38kHz, 40kHz, 42kHz e 44kHz e as suas respectivas velocidades[6]

Comparando os gráficos das elipses e as suas respectivas velocidades, notou-se que a frequência de 38kHz é a frequência de operação ótima, por ter gerado a maior velocidade entre elas. Este estudo se mostrou uma referência de grande valor para ser utilizado como metodologia de estudo do comportamento da estrutura piezoelétrica. A simulação a elementos finitos será utilizada durante as primeiras etapas do projeto do motor.

3.2 Development of a New Standing Wave Type Ultrasonic Linear Motor [7]

Em [7] também foi proposto o desenvolvimento de um motor piezoelétrico linear ultrassônico baseado no conceito de Langevin, mas com um design diferente. Neste caso, o estator é uma barra metálica encoberta por duas piezo cerâmicas em extremidades opostas. Elas são espaçadas com uma diferença de fase de meio comprimento de onda, de acordo com a frequência de operação do motor. O artigo apresenta o princípio de operação do motor por meio de equações teóricas e a sua viabilidade foi verificada utilizando o método dos elementos finitos. O artigo menciona que o motor oferece performance idêntica tanto em movimento para frente como para trás. Aliado a isso, a sua estrutura simples o torna flexível para aplicações diversas. Estes fatores nortearam e justificaram o desenvolvimento do projeto.

A Figura 17 ilustra o princípio de operação do motor. As barras em amarelo e azul representam a piezo cerâmica, sendo que as amarelas são polarizadas positivamente e as azuis negativamente. A largura de cada barra equivale a $1/2$ do comprimento de onda aplicado pela corrente elétrica. No total são utilizadas 4 barras de cada lado, sendo duas polarizadas negativamente e duas positivamente intercaladas. As linhas de barras piezo cerâmicas são defasadas de $1/4$ de comprimento de onda em relação às que estão posicionadas do lado oposto do estator. A figura (a) apresenta a aplicação de duas ondas em fase sendo aplicadas ao sistema. Já a (b) mostra ondas fora de fase por uma diferença de π . A diferença de fase entre as ondas aplicadas ao sistema é responsável pela definição do modo de operação do motor para frente ou para trás. Extrusões metálicas, "dentes" (já citados nesta monografia como "pés condutores"), são posicionados em locais específicos da barra para deslocarem linearmente uma segunda barra de acordo com a direção desejada.

A partir do equacionamento da geometria e dinâmica da estrutura, os autores identificaram os locais ótimos para o posicionamento dos dentes. Eles se localizam em

$$x_n = (2n + 1/4)\lambda$$

Como o comprimento total da barra é de 2λ , obtemos 4 posições para os dentes (x vai de 0 a 3). Dessa forma, os dentes se posicionam sempre na fronteira entre as piezocerâmicas polarizadas negativamente e positivamente na parte de baixo da barra. Quando aplicadas ondas em senoidais em fase, os dentes realizam movimentos elípticos em sentido horário, como mostrado na figura 18 (a). Já quando ondas em diferença de

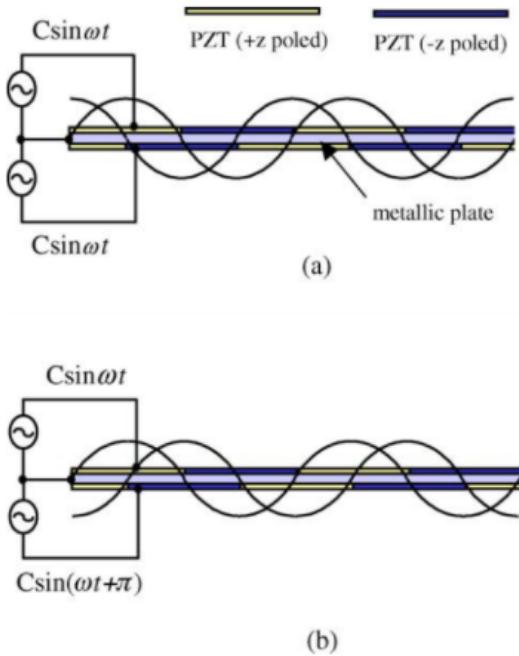


Figura 17: Princípio de operação do motor [7]. Aplicação de duas ondas em fase em (a) e fora de fase por π em (b)

fase são aplicadas, eles passam a se mover em sentido anti horário (b), isso faz gerar o movimento linear para trás.

Para a simulação do motor em método de elementos finitos foi modelado um elemento 3D no software ANSYS. O modelo consiste de 7860 elementos hexagonais de cerâmica. Latão foi o material selecionado para o estator devido a sua disponibilidade e fácil processamento. As piezocerâmicas são de PZT-4. Uma barra superior feita de latão foi inserida com o objetivo de suportar cargas aplicadas em condições reais. Feitas as análises estruturais e de circuito, o resultado da deformação do motor é apresentada na Figura 19.

A partir de análise numérica, os autores definiram as dimensões do motor proposto. O ponto de partida foi a definição da frequência de operação, que deveria estar no campo supersônico para evitar ruídos, mas não poderia ser tão alta para não causar consequências como atenuação excessiva da energia de saída e aumento de temperatura. A frequência escolhida foi de 28kHz. Considerando este requisito e a conveniência da disponibilidade de materiais no mercado, o comprimento das placas de PZT (piezo cerâmica) foram de 48mm, correspondendo a um comprimento de onda de 24mm. A espessura das barras foi definida em 0,5mm. A barra de latão foi de 1mm de espessura e 2,5mm de largura. A largura do motor completo foi de 8mm, sendo menor do que metade do comprimento de

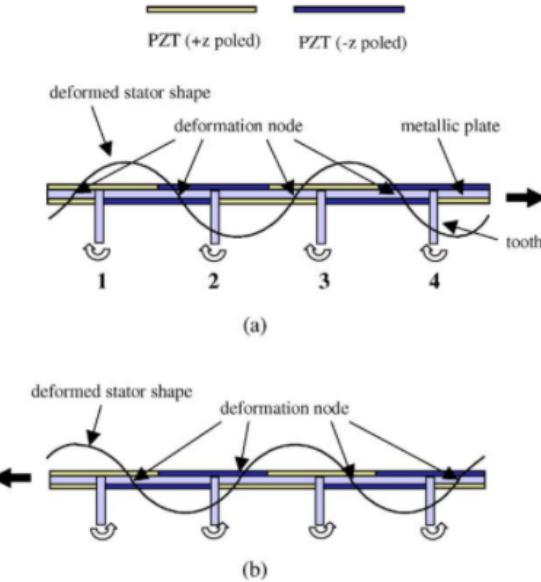


Figura 18: Posicionamento dos dentes e seu modo de operação quando aplicadas ondas em fase (a) e fora de fase (b) [7]

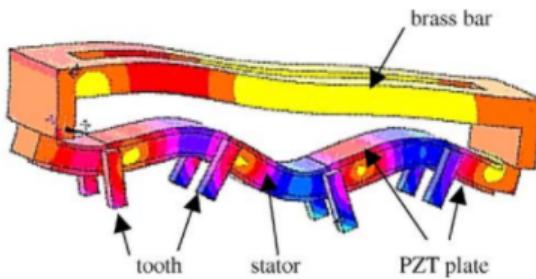


Figura 19: Deformação do motor utilizando o método de elementos finitos [7]

onda.

Também foi abordado o estudo das condições ótimas de operação do motor, mas diferentemente de [6], foi avaliado o desempenho da velocidade impressa pelo motor em relação a alterações na voltagem aplicada às piezo cerâmicas. Como o efeito da piezoeletricidade é amplificado pelo aumento da tensão no material, notou-se que o incremento dela resultou em maiores velocidades resultantes, exibido na Figura 21. A figura também considera o desempenho do atuador quando aplicado a carregamentos na barra de latão para simular uma operação em cenário real.

O incremento da voltagem também deve ser analisado sob outros fatores como o aumento da temperatura que ele causa no motor e uma possível depolarização das barras. A partir do uso repetitivo do motor os autores definiram o potencial de até 100V como seguro para a sua operação.

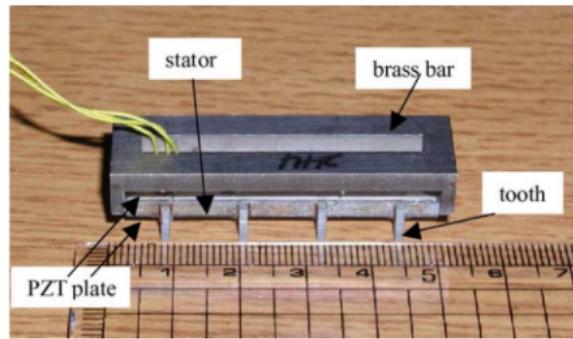


Figura 20: Protótipo do motor construído [7]

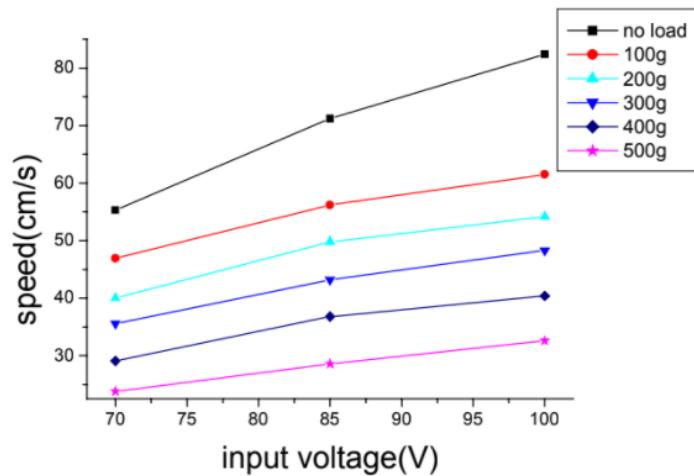


Figura 21: Comportamento da velocidade do motor quando aplicados carregamentos e tensões diferentes [7]

3.3 Discussão sobre os motores analisados

A tabela a seguir compara as principais especificações dos dois motores apresentados anteriormente juntamente aos outros três estudados. Para facilitar a visualização da tabela os motores foram numerados como segue:

1. Simulation of a linear piezoelectric motor by using finite element method [6]
2. Development of a New Standing Wave Type Ultrasonic Li-near Motor [7]
3. Piezoelectric Actuator Based on Two Bending-Type Langevin Transducers [25]
4. A Piezoelectronic Actuator, Based on a Langevin-Type Transducer, for Dermatological Aesthetic Applications [26]
5. A High Speed Ultrasonic Linear Motor Using Longitudinal and Bending Multimode Bolt-Clamped Langevin Type Transducer [8]

Métrica	Motor				
	1	2	3	4	5
Material da piezocerâmica	Não especificado	PZT-4	PZT-8	PZ 26	Não especificado
Material da estrutura metálica	Alumínio	Latão	Aço X20Cr13	Aço AISI 304	Não especificado
Dimensões aproximadas (mm)	Não especificado	54x8x6	28x35x28	45x0,5	Não especificado
Massa (kg)	Não especificado	0,021	0,092	Não especificado	Não especificado
Frequência de operação (kHz)	38	28	33	25	32
Velocidade ótima (cm/s)	110	80	Não especificado	Não especificado	85
Força de impulso ótima (N)	Não especificado	0,45	8,8	Não especificado	50
Tensão de operação(V)	500	100	100	250	120 e 180V
Diferença de fase aplicada	$\pi/2$	π	$\pi/2$	Não especificado	$\pi/2$ e π
Tipo de movimento	Não especificado	bidirecional	bidirecional	unidirecional	bidirecional

Figura 22: Característica da velocidade e carregamento do motor [8]

Analizando a tabela exposta na Figura 22 é possível notar que os motores estudados possuem características relevantes para a aplicação buscada neste projeto. A maioria deles cumpre parcialmente os requisitos estipulados e, por isso, estas referências têm um grande valor como ponto de partida para decisões de design dentro do projeto.

4 CONCEPÇÃO DO MOTOR

Após o estudo dos aspectos conceituais, trabalhos relacionados e definição dos requisitos, o próximo passo consistiu na concepção de modelos de candidatos para o motor. O objetivo é avaliar os candidatos, por meio do Método dos Elementos Finitos, para escolher aquele que melhor atende os objetivos propostos para este projeto. A fim de se testar conceitos diferentes para o motor, os seguintes parâmetros e características serão testados:

- Geometria e modo de vibração da piezo-cerâmica
- Características da diferença de potencial elétrico aplicada, entre elas:
 - Nível de tensão
 - Frequência

Após a realização das simulações de operação dos candidatos utilizando a ferramenta *Abaqus*, elas foram comparadas entre si e a melhor opção será escolhida para o projeto do motor.

Foram projetados dois modelos de operação do motor para simulação e análise comparativa entre eles.

O Candidato 1 utiliza o conceito de Ressonância, em que 2 peças piezo-cerâmicas são projetadas de forma a gerar um ponto de contato com a barra a ser deslocada. A elas é aplicada uma tensão elétrica de ordem supersônica e com diferença de fase de 90° entre elas. As peças piezo-cerâmicas são posicionadas uma ao lado da outra com um ângulo de 90° entre elas e as pontas mais próximas são conectadas. Assim, a diferença de fase gera um movimento elíptico da extremidade de contato das duas piezo-cerâmicas, os chamados pés de condução. Este comportamento do movimento faz com que o motor encoste no atuador e, por meio do atrito com ele, faça-o deslocar a partir da vibração supersônica. Um motor citado anteriormente que utiliza este conceito é o apresentado por *Vinhais, Ibrahim e Emílio* [6].

O Candidato 2, por sua vez, utiliza o conceito de Inércia. Neste caso, a piezo-cerâmica pode atuar de forma individual, sem a necessidade de uma segunda peça em diferença de fase. A ela é aplicada uma diferença de potencial elétrico. A sua vibração unidirecional linear faz com que a sua ponta desloque uma peça conectada a piezo-cerâmica. Essa peça é então conectada ao atuador de forma a gerar o seu movimento.

4.1 Descrição do processo de simulação com Elementos Finitos

Definidos os conceitos dos candidatos para o motor, foram modeladas versões simplificadas deles utilizando o software Abaqus para analisar o seu desempenho. As etapas realizadas dentro do software para isso foram as seguintes:

1. Definição da geometria do material;
2. Determinação do material PZT-4 de acordo com as características apresentadas anteriormente;
3. Modelagem do assembly e interações entre as piezo-cerâmicas e outras peças
4. Determinação das condições de contorno e carregamentos
5. Criação das malhas de Elementos Finitos
6. Configuração do Job (Trabalho)
7. Análise dos resultados

4.1.1 Definição da geometria do material

Todas as partes que compõem os dois candidatos foram projetadas no software *Inventor* e posteriormente exportadas para o *Abaqus*. Isso facilita o projeto, visto que o primeiro software possui um workflow de projeto de modelos muito rápido e completo. Vale ressaltar que, para os dois princípios de operação de motores piezoelétricos, é utilizado o mesmo modelo de piezocerâmica, constituído por um paralelepípedo com dimensões 6mm X 6mm X 25mm. O modelo da piezocerâmica é apresentado na Figura 23.

A seguir são descritas as etapas principais da modelagem do problema no software *Abaqus* desde a sua concepção até a análise dos resultados. Vale ressaltar que são apresen-

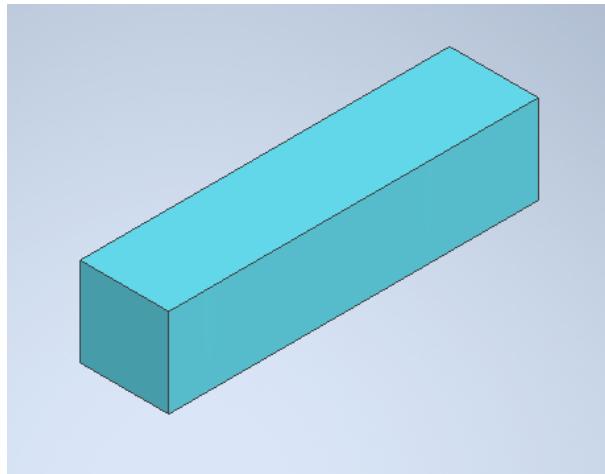


Figura 23: Piezocerâmica

tadas as etapas principais e outras configurações foram implementadas para a realização de simulações.

4.1.2 Determinação do material PZT-4 e outros materiais

Como informado na seção 2.4 deste documento, as informações relevantes utilizadas para a simulação do material PZT-4 são apresentadas a seguir:

- Densidade: 7500 kg/m^3
- Matriz de constantes elásticas (10^{10} N/m^2):

$$\begin{bmatrix} 13,9 & 7,8 & 7,4 \\ 13,9 & 7,4 & 11,5 \\ 2,56 & 2,56 & 3,05 \end{bmatrix}$$

- Matriz de constantes piezoelétricas (C/m^2):

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 12,7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 12,7 & 0 & 0 \\ -5,2 & -5,2 & 15,1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- Matriz de constantes dielétricas (10^{-11} F/m):

$$\begin{bmatrix} 762,5 & 0 & 0 \\ 0 & 762,5 & 0 \\ 0 & 0 & 663,5 \end{bmatrix}$$

Como as propriedades piezoelétricas dos materiais variam de acordo com as diferentes direções, é necessário determinar a direção principal. Para isso é realizada uma rotação de 90° no eixo Y da orientação do material.

Além disso, tanto no Candidato 1 como no Candidato 2 foram utilizadas peças metálicas conectadas as piezocerâmicas. Elas foram concebidas com as seguintes propriedades:

- Elasticidade:
 - Tipo: Isotrópico
 - Módulo de Young: 69 GPa
 - Taxa de Poisson: 0,33
- Plasticidade: Yield Stress X Plastic Strain

$$\begin{bmatrix} 60 & 0 \\ 90 & 0,125 \\ 113 & 0,25 \\ 124 & 0,375 \\ 165 & 1 \\ 166 & 2 \end{bmatrix}$$

4.1.3 Modelagem do assembly e interações

Criadas as peças e os seus materiais, o próximo passo foi a construção dos assemblies de acordo com o design especificado para cada um deles. Em cada cenário foram implementadas restrições de movimento para garantir que o comportamento de fixação entre as peças fosse obtido.

4.1.4 Condições de contorno

Essa é provavelmente uma das etapas mais importantes para a modelagem do problema. Foram necessárias sempre três condições de contorno por piezocerâmica:

- Na base da piezocerâmica: Tipo Mecânico - Simetria/Antissimetria/Encastre - Encastre ($U_1 = U_2 = U_3 = UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$);

- Na base da piezocerâmica: Electrical Magnetic - Electric Potential - Magnitude: 0,0V;
- No topo da piezocerâmica: Electrical Magnetic - Electric Potential - Neste caso a condição de contorno variou de acordo com o candidato entre:
 - Onda senoidal com 1000V de magnitude e frequência variável.
 - Onda cossenoidal com 1000V de magnitude e frequência variável.
 - Onda de tipo dente de serra com 1000V de magnitude e período variável.

Ou seja, na base das piezocerâmicas elas estão fixadas espacialmente e com potencial elétrico nulo. Em suas extremidades opostas são carregados os potenciais elétricos que geram o movimento das peças.

4.1.5 Malhas de Elementos Finitos

O próximo passo foi a criação das malhas. Por se tratar da análise inicial de candidatos e pela simplicidade dos modelos, optou-se pela criação de malhas simples, com um volume de elementos na casa das centenas de unidades para os modelos completos. As piezocerâmicas receberam malhas mais detalhadas, enquanto outros materiais com menos deformação e/ou movimento, foram modelados de forma mais simples.

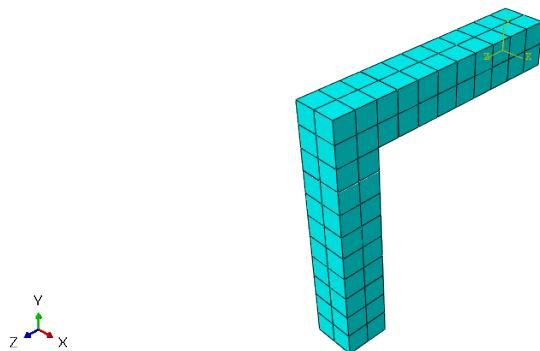


Figura 24: Malha de Elementos Finitos

4.1.6 Job e análise dos resultados

Por fim foram executadas as simulações e analisados os resultados. Para isso, foi criado um History Output dentro da aba Step em que selecionamos um nó na extremidade de deslocamento máximo da piezocerâmica e definimos uma análise de 500 pontos equidistantes ao longo do tempo de 1 segundo de análise. Neste nó são medidos os deslocamentos

em cada eixo, o potencial elétrico e o estresse mecânico. As simulações foram executadas e foram gerados gráficos para estas variáveis. Além dos gráficos, também foi útil exportar os resultados obtidos para os 500 pontos analisados para o *Excel* e, assim, aprofundar a análise do movimento com o cálculo de outros parâmetros, como a velocidade linear a partir do posicionamento do nó analisado ao longo do tempo. Já para a análise da força aplicada pelos motores, foram realizadas novas simulações com a aplicação de uma condição de contorno do tipo engaste em todas as direções na superfície de contato dos sistemas piezocerâmicos com os atuadores. Ao fixar estas regiões, tornou-se possível analisar as forças de reação (*RF, reaction force, no Abaqus*) em nós da malha contidos nessas regiões.

4.2 Candidato 1

Como mencionado anteriormente, o Candidato 1 utiliza o conceito de ressonância. Para isso, são utilizadas duas peças piezoelétricas em formato de paralelepípedo conectadas por um cabeçote metálico. Para realizar a primeira simulação de desempenho desta arquitetura, foi projetado um modelo simplificado do seu modo de operação, como apresentado na Figura 25.

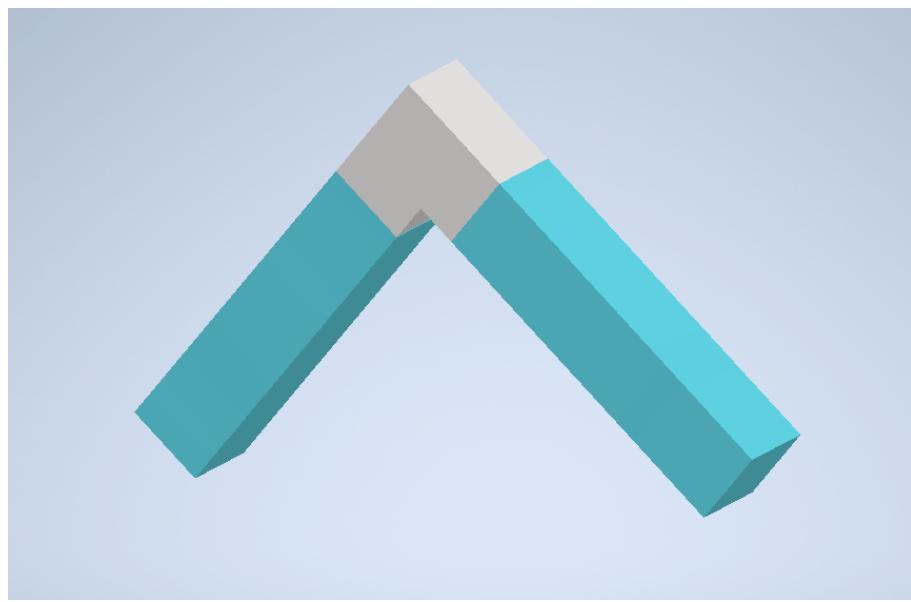


Figura 25: Candidato 1

As duas peças piezoelétricas são idênticas, com material PZT-4 e dimensões 6mm X 6mm X 25mm. É aplicada a diferença de potencial elétrico de 1000V com uma diferença de fase de 90° entre cada uma das peças, o que faz com que a extremidade superior do cabeçote metálico se desloque com um comportamento elíptico. Além disso, a frequência

inicial aplicada a esta tensão foi de 2kHz como ponto de partida. Construído o modelo, foi configurada a simulação utilizando o Método dos Elementos Finitos para avaliar a sua performance. As duas bases das piezo-cerâmicas foram fixadas e a elas também foi aplicada a condição de contorno de potencial elétrico como sendo igual a zero. Nas extremidades superiores foram configuradas as condições de contorno de potencial elétrico como mencionadas anteriormente, implementando a diferença de fase entre as peças. Por se tratar de um modelo simplificado, a malha de elementos finitos foi composta por 117 elementos em cada piezo-cerâmica.

A simulação foi executada e foi medido o comportamento do deslocamento nos eixos Y e Z de um nó na extremidade superior do cabeçote ao longo de 1 segundo de simulação. No eixo X não há deslocamento. O resultado foi uma elipse como se buscava. A Figura 26 a visualização da simulação utilizando um fator de escala para a deformação de 10^7 a fim de facilitar a visualização e o gráfico apresenta o resultado para o posicionamento da extremidade superior do cabeçote.

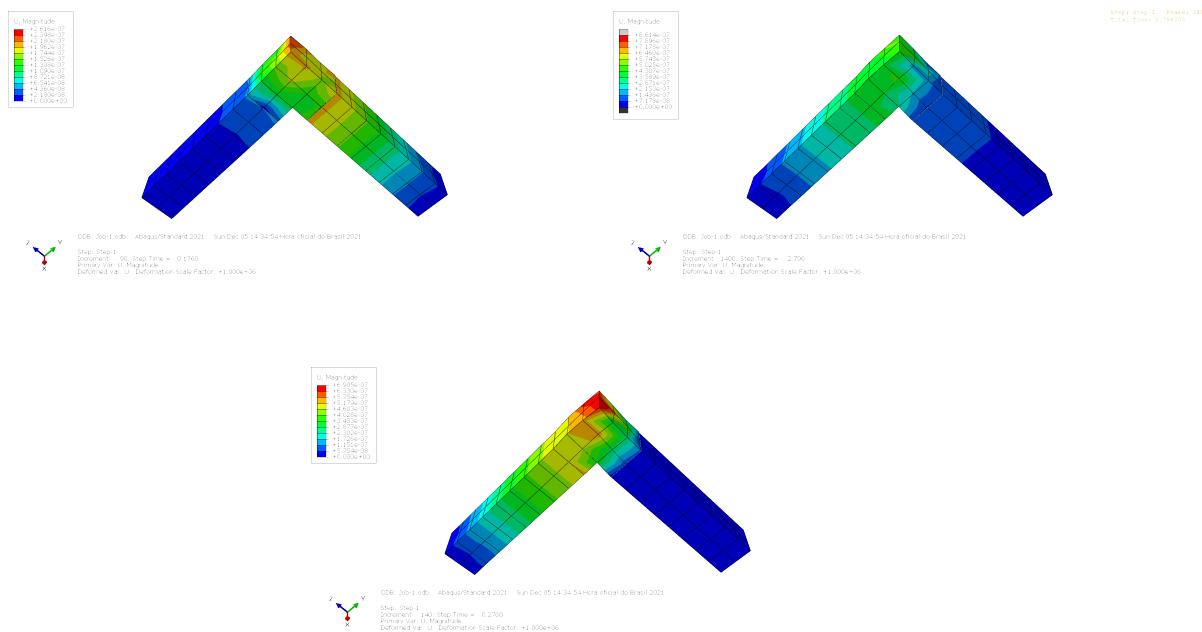


Figura 26: Resultados da simulação do candidato 1

Vale ressaltar que, devido à aplicação de frequências supersônicas, surgem descontinuidades *outliers* na plotagem do gráfico devido à taxa de frames da análise. Os pontos em que isso ocorreu foram corrigidos posteriormente para limpar a análise.

Para calcular a velocidade linear transferida a partir da extremidade do cabeçote metálico para o atuador, uma barra que se encontra em contato com ele quando a posição do nó se encontra na região positiva do eixo Z devemos implementar a seguinte equação [6]:

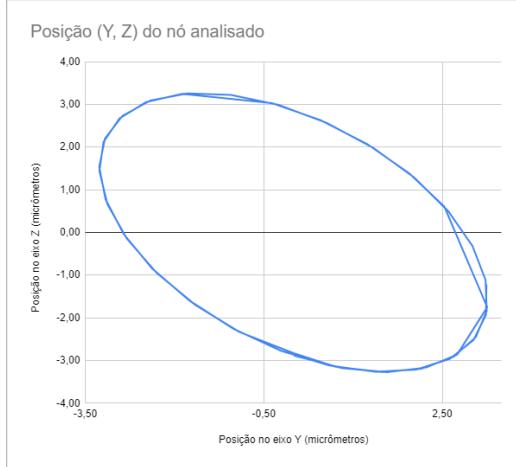


Figura 27: Candidato 1

$$Y = u_x \sin(\omega t); Z = u_y \cos(\omega t) \quad (4.1)$$

Ao derivar-se as equações exibidas em 4.1, são obtidas as velocidades nos eixos Y e Z, sendo possível achar a velocidade total para $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$

Têm-se:

- $u_y = u_z = 3,0$ micrônmetros
- $w = 12.560$ rad/s (equivalente a 2kHz)

O resultado final para a velocidade V foi, portanto:

$$V = 3,8 \text{ cm/s} \quad (4.2)$$

A velocidade obtida ficou abaixo do requisito esperado para o projeto, que era de 10 a 100 cm/s. Para aumentar essa velocidade até o valor esperado dois parâmetros podem ser alterados: a diferença de potencial elétrico ou a frequência de operação. Como o potencial elétrico de 1000V já está no limite estipulado para o projeto, a frequência então foi alterada. Com o valor de 6kHz, a velocidade obtida foi de:

$$V = 11,304 \text{ cm/s} \quad (4.3)$$

Calculada a velocidade do motor, o próximo passo foi calcular a força de impulso gerada por ele. Neste caso, a força gerada pelo movimento elíptico é transmitida à barra

de atuação por meio do atrito entre os componentes. Devido ao seu modo de operação, o comportamento da força do Candidato 1 segue o formato de uma senoide com diferença de fase de 90 graus entre os dois eixos de movimento e a determinação da componente da força na direção do movimento da barra de atuação é feita pela raiz quadrada da soma dos quadrados das forças em cada um dos seus sentidos. Para a força ser medida experimentalmente a partir da simulação no *Abaqus*, na extremidade superior do cabeçote metálico foi configurada uma fixação por engaste que impede que o cabeçote se mova. Dessa forma é possível analisar as componentes da força em um nó nessa extremidade. Realizados os procedimentos citados, foi obtida a força no valor de:

$$F = 0,027N \quad (4.4)$$

Este candidato, portanto, é capaz de cumprir o requisito proposto para a velocidade, já para a força, ele foi capaz de atingir 0,027N, valor esse que não atende ao requisito de 0.5N.

4.3 Candidato 2

O Candidato 2 utiliza o conceito de Motor de Inércia como mencionado anteriormente. Neste caso, uma única peça piezo-cerâmica realiza um movimento vibracional a partir de uma tensão elétrica cíclica do tipo dente de serra e entra em contato com o atuador apenas durante o ciclo positivo do movimento. Este formato de onda faz com que o movimento de flexão da peça no sentido desejado seja amplificado em relação ao retorno dela para a sua posição inicial. Tal comportamento pode ser exemplificado pela Figura 28.

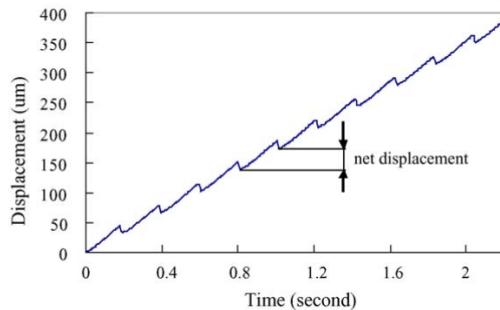


Figura 28: Comportamento do deslocamento a partir de uma vibração do tipo dente de serra [9]

Como apresentado pelo gráfico, o movimento neste caso se aproxima bastante de um deslocamento linear. O deslocamento médio pode ser calculado subtraindo-se o desloca-

mento de retorno do deslocamento no sentido desejado.

Este candidato possui uma arquitetura bastante simples. Ele utiliza uma peça piezocerâmica de dimensões e material iguais à do Candidato 1. O movimento longitudinal da piezocerâmica pode ser amplificado a partir da utilização de mecanismos e o ciclo do tipo onda de serra pode se tornar cíclico a partir de um sistema de rolamentos. O potencial elétrico aplicado inicialmente foi igual ao do Candidato 1, com 1000V e 2kHz de frequência. Com isso, identificou-se a amplitude de deslocamento da vibração da peça.

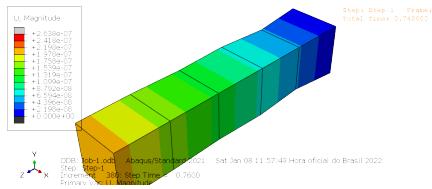


Figura 29: Figura 1 do Candidato 2

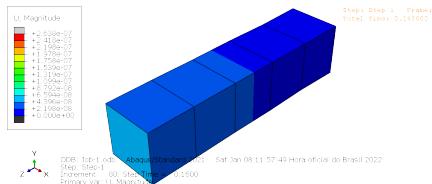


Figura 30: Figura 2 do Candidato 2

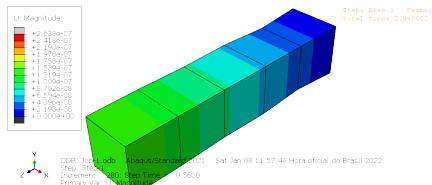


Figura 31: Figura 3 do Candidato 2

A deformação máxima gerada foi de $2,80 \times 10^{-7}$ m. Como, neste caso, o potencial elétrico cresce linearmente ao longo do ciclo, a velocidade da vibração é constante. Para calcular a velocidade, basta dividir o valor do deslocamento máximo da peça ao longo de um ciclo pelo comprimento de onda do ciclo que, no caso, é de 1/2000, ou 0,0005s. A partir daí, conclui-se que a velocidade resultante foi:

$$V = 0,056 \text{ cm/s} \quad (4.5)$$

A velocidade obtida é inferior ao requisito proposto para o projeto. Afim de aumentá-la, existem alguns parâmetros que podem ser ajustados. São eles:

1. Alterações na geometria da peça;

2. Mudança no material utilizado para a piezo-cerâmica;
3. Aumento da diferença de potencial elétrico;
4. Aumento da frequência de operação;
5. Inserção de um mecanismo amplificador do movimento.
6. Otimização do sinal dente de serra [4]

Como o objetivo é realizar uma comparação sobre o design de operação do motor, optou-se por não alterar os três primeiros parâmetros, mantendo a geometria, material e diferença de potencial elétrico sem alterações. Na sequência, foi avaliado se o aumento na frequência do sinal elétrico, para múltiplos ciclos de movimento piezoelétrico seria suficiente para alcançar o requisito proposto, contudo é necessário aplicar uma frequência da ordem de 400kHz para isto. Com base na bibliografia apresentada, optou-se por adotar a frequência máxima de 40kHz. Este aumento da frequência fez com que a velocidade do motor subisse para:

$$V = 1,12\text{cm/s} \quad (4.6)$$

Para calcular a força, novamente foi aplicada uma condição de contorno do tipo en-gaste no topo superior da peça piezoelétrica. Neste caso, a força obtida ao longo do movimento de expansão da peça piezoelétrica foi de 6,0N. Dessa maneira, o Candidato 2 conseguiu atender também ao requisito da força, de forma satisfatória.

4.4 Discussão

O Método Dos Elementos finitos, por meio da simulação do modo de operação dos dois candidatos à solução, se mostrou eficaz para oferecer um conhecimento detalhado do desempenho deles. As duas principais variáveis para o motor - velocidade e força - foram analisadas. A partir de resultados iniciais, diversas simulações foram feitas com o objetivo de aumentar o desempenho de cada um dos candidatos a partir de alterações nos parâmetros dos motores, sejam eles a geometria, condições de contorno, materiais utilizados, entre outros.

Os modos de operação de cada um dos candidatos se mostraram complementares. Enquanto o Candidato 1 conseguiu imprimir uma velocidade mais alta, a sua força de

Requisito	Valor Requisitado	Candidato 1	Candidato 2
Força (N)	0.5	0.027	6,0
Velocidade (cm/s)	10 a 100	11,3	1,12

Tabela 1: Comparação entre os resultados de força e velocidade obtidos para os dois candidatos

impulso se mostrou bastante baixa, resultado do seu modo de operação com diferença de fase de 90°, que gera interferências destrutivas na amplitude da força. Por outro lado, o Candidato 2 apresentou uma velocidade mais baixa, que superou por pouco o requisito proposto, mas uma força bem mais elevada do que a do primeiro Candidato 1. Mesmo assim, sua força, assim como a do Candidato 1, não foi capaz de atingir o requisito proposto para a utilização desses motores em ensaios mecânicos. A Tabela 1 mostra os desempenhos dos motores comparados.

A partir dos parâmetros definidos para o potencial elétrico aplicado (entre 100V e 1000V) e do limite de frequência de excitação de 40kHz, a conclusão à qual chegamos é a de que apenas o Candidato 1 foi capaz de atender satisfatoriamente ao requisito da velocidade, mas não conseguiu fornecer a força imaginada. Por outro lado, o Candidato 2 apresentou uma força satisfatória, enquanto não obteve a velocidade requerida. No entanto, o fato de que um dos requisitos não foi cumprido pelos motores não desqualifica a relevância deste estudo, uma vez que existem outras aplicações às quais estes princípios de atuação de motores poderiam ser aplicados de forma satisfatória. Devido a esta conclusão, foi feita uma modificação no curso do projeto. Visto que os motores não atenderam a todos os requisitos propostos para o ensaio mecânico, não haveria porque escolher um deles como solução final para esta aplicação. Como existem outros cenários em que eles podem ser utilizados, optou-se por uma discussão das vantagens e desvantagens de cada um deles entre si e de quais aplicações eles poderiam atender.

O Candidato 1 se mostrou vantajoso para aplicações aonde a velocidade é mais importante. Com apenas 6kHz de frequência aplicada ele já foi capaz de atingir a velocidade mínima estipulada pelo requisito e, caso fosse aplicada o limite máximo de frequência, que é de 40kHz, ele atingiria uma velocidade de 75,36cm/s. Ele também possui uma característica interessante que é a sua modularidade, permitindo que mais pares de “pistões” piezo-cerâmicos podem ser aplicados em paralelo com diferença de fase, de forma a aumentar tanto a velocidade e a força aplicados por ele. Foi projetado um conceito de design para ele utilizando o software CAD Inventor, como apresentado na próxima figura.

O Candidato 1, por trabalhar em velocidades mais altas, mas com uma força baixa,

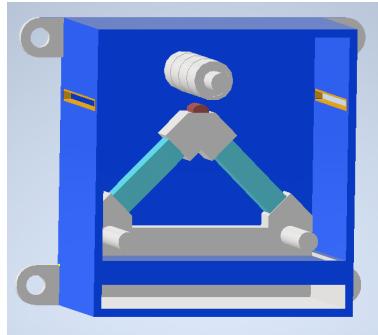


Figura 32: Design Candidato 1

pode ser utilizado para aplicações de posicionamento de objetos, mesmo dentro do escopo de ensaios de mecânicos [27]. Outra possibilidade é avaliar a resolução de movimento deste motor e aplicá-lo a testes que requerem menos força, por trabalharem com materiais mais finos ou menos rígidos, com limite de escoamento e ruptura menores do que o alumínio.

Outra possibilidade fora deste escopo é a aplicação em fabricação de precisão. Já é comum a utilização de até 3 sistemas de câmeras e cada uma delas tem uma configuração de zoom analógico diferente. Para construir estes componentes, que necessitam de camadas de lentes, um motor preciso, rápido e de pequeno porte é exigido. O Candidato 1 é interessante para essa aplicação por conta dos fatores anteriores, ele é capaz de imprimir uma velocidade mais alta e, assim, agilizar o processo de produção, é facilmente miniaturizável e sua força não se torna um problema nesta aplicação, uma vez que os componentes de uma lente de câmera de celular são extremamente leves.

Já o Candidato 2 foi capaz de imprimir uma força mais elevada. Isso se deve ao seu movimento linear sem a presença de peças periféricas que interfiram neste deslocamento. Seu conceito de projeto feito no Inventor é apresentado na Figura . A figura ilustra como a piezo-cerâmica pode ser acoplada a um mecanismo elástico tanto para amplificar o movimento, como para possibilitar a realização de n ciclos de movimento. No caso, a borracha elucida em vermelho é mantida em contato com uma barra atuadora apenas na etapa positiva do ciclo dente de serra e retorna a posição inicial sem contato com a mesma. Isso possibilita o movimento vibracional. Outra possibilidade é aplicar a atuação do elemento piezoelétrico de forma direta. Com o auxílio de um parafuso rosca sem fim e um fuso, é possível criar um mecanismo de inércia que puxa e empurra o atuador, mas que é preso ao fim do percurso. Desta forma, um movimento repetitivo e linear pode ser criado [19].

Um exemplo de aplicação do Candidato 2 seria para a realização de diálises. Este é o nome genérico dado para procedimentos de remoção de substâncias tóxicas retidas nos rins

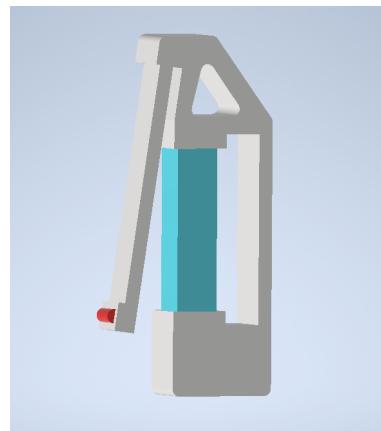


Figura 33: Design do Candidato 2

quando eles não estão funcionando de forma correta. Eles têm como princípio a remoção do líquido e toxinas como ureia e creatinina do paciente com insuficiência renal, além de poder corrigir também distúrbios no pH, sódio e no potássio sanguíneo. A empresa sueca PiezoMotor possui em seu portfólio um motor piezoelétrico linear com características muito semelhantes ao Candidato 2 - velocidade de operação de até 0,24cm/s e força de atuação de 6,5N - e apresenta em seu site esta aplicação do motor para realização de diálises como um caso de sucesso da tecnologia piezoelétrica. Nesta aplicação, se faz interessante um conceito de motor que seja capaz de manter um fluxo de remoção de líquidos baixo, da ordem de 0,1 μ l/min, mas com um fluxo constante. O problema de motores de passo mais tradicionais para este caso é que eles tendem a criar fluxos pulsantes, que são indesejados.

Apesar de não ser definida uma solução final para a aplicação de ensaios mecânicos, pode-se concluir que o Candidato 2 apresentou um desempenho mais interessante, visto que em muitas aplicações é a força que costuma ser o requisito mais relevante. Neste âmbito, o candidato 2 e seu princípio operante se demonstra mais adequado para a realização de um teste de tração no escopo proposto. Embora a velocidade não tenha sido atingida, vale ressaltar que há uma grande gama de ensaios que não requerem uma velocidade elevada. Portanto, sua possibilidade de aplicação é reiterada nesta discussão para testes menos rápidos. Ele foi capaz de atingir um desempenho equiparável a motores fabricados por empresas estrangeiras e, em um aprofundamento deste pré-projeto, pode ser aprimorado afim de aumentar a sua velocidade a partir de um aumento na deformação da piezo-cerâmica.

5 CONCLUSÃO

Ao final desta monografia, foi possível compreender o funcionamento e parâmetros de um motor piezoelétrico para a aplicação desejada, utilizando-se dois princípios distintos de funcionamento do motor. O efeito piezoelétrico inverso, em conjunto com o sinal elétrico oscilante e contínuo, forma e design do motor piezoelétrico atingiu resultados satisfatórios para determinados requisitos propostos, além de já ser de grande valor para outros fins, como explorado na introdução e discussão deste documento.

Ao fim das análises realizadas, o candidato 1 demonstrou melhor desempenho em termos de velocidade que o candidato 2. Ao aplicar uma frequência de 6kHz ao motor 1, foi obtida uma velocidade suficientemente elevada para o requisito proposto. Como tal motor utiliza o princípio de motor ressonante, é possível aumentar ainda mais a frequência de onda em determinadas faixas para atingir velocidades superiores [6]. No entanto, a força de atuação se mostrou baixa, mesmo com a mudança de parâmetros durante a construção do modelo. Vale ressaltar que mesmo o motor não sendo adequado para ser o atuador direto do ensaio, outras soluções utilizando dispositivos piezoelétricos para o posicionamento de precisão nestes ensaios também são possíveis [27].

O candidato 2, por sua vez, obteve um desempenho de força suficiente para o requisito proposto. Isto é principalmente devido à atuação direta da cerâmica piezoelétrica no movimento linear e, em conjunto com o princípio de um motor de inércia é possível realizar movimentos repetitivos e lineares em uma determinada direção. Em contraste, o desempenho de velocidade linear do atuador proposto é inferior ao requisito proposto. Mesmo assim, destaca-se que o candidato 2, por ter uma força satisfatória, poderia se encaixar em testes de tração que não requerem taxas de deformação elevadas ou que até mesmo ignoram tal requisito.

Como nenhum dos dois conceitos de motor foi capaz de atender plenamente a todos os requisitos propostos para o ensaio mecânico imaginado inicialmente, optou-se por não mais escolher um dos dois candidatos para a formulação de uma solução final, mas sim o aprofundamento da discussão sobre eles. Isso decorre do fato de que ambos apresenta-

ram desempenho similar ao de motores já comercializados no mercado hoje, sendo assim, apesar de não atenderem plenamente ao ensaio mecânico, eles podem ser direcionados a outras aplicações mais adequadas de acordo com o desempenho de cada um dos candidatos. Isso foi exemplificado a partir de duas aplicações às quais cada um dos motores poderia ser utilizado. A primeira, relacionada ao Candidato 1, é a do posicionamento de lentes para a fabricação de câmeras fotográficas para smartphones. Já a segunda é a de equipamentos para diálises, em que se faz necessária a geração de um pulso lento e preciso para a remoção de toxinas do organismo. Ela pode ser atendida pelo Candidato 2.

Como sugerido pelo título deste trabalho, o foco dele foi direcionada para a análise do modo de funcionamento de motores piezoelétricos. Sendo assim, o estudo teve como objetivo compreender o funcionamento dos motores em seu princípio básico de atuação. Por fim, ambos os motores atingiram diferentes requisitos e, com isso, é possível entender que o design dos motores piezoelétricos adéquam-se para projetos miniaturizáveis e para diferentes faixas de potencial elétrico fornecido. No que tange à comparação final entre os designs propostos, o motor intitulado como candidato 2 mostra-se mais satisfatório para conceber o princípio atuante do motor piezoelétrico a ser projetado e levado adiante, dado os resultados obtidos nas simulações.

Para a conclusão do projeto de motores piezoelétricos, como próximos passos são necessários o detalhamento do projeto, tanto no quesito de sua arquitetura física, como pela concepção do microcontrolador, sistema de controle e fonte de alimentação do motor. Outras análises pertinentes para o seguimento do projeto do motor são as análises de temperatura de operação e frequência ótima de ressonância, que se fazem mais adequadas em partes mais avançadas do projeto, mas que são igualmente necessárias, por serem pontos detratores de motores piezoelétricos [19]. Também se faz necessário como próxima etapa do projeto a construção física dos motores para avaliar aspectos como a sua durabilidade e precisão.

Além disso, outra análise relevante para este estudo seria a concepção de um motor piezoelétrico que funciona de acordo com o *stepping principle*, discutido na seção 2.2.3, o qual não foi explorado. Tais motores também apresentam alta resolução e movimento linear constante, embora, em média os motores de ressonância sejam mais velozes [3] e também pela ausência deste tipo de motor ser encontrado em bibliografias dentro do escopo apresentado. Também há a possibilidade de serem avaliadas outros designs e configurações de motores ultrassônicos e de inércia, além dos apresentados neste trabalho.

Por fim, destaca-se que este trabalho foi desenvolvido para abranger conceitos principais

da Engenharia Mecatrônica, entre eles, o efeito piezoelétrico, a modelagem em elementos finitos, a elaboração de requisitos e entendimento de parâmetros de ensaios mecânicos. Além da aplicação que foi explorada neste trabalho, destaca-se que é possível explorar os designs construídos para outras aplicações em áreas laboratoriais e de posicionamento.

REFERÊNCIAS

- 1 SILVA, R. P. Piezoelectricidade como fonte de energia alternativa. *Revista Científica Semana Acadêmica*, 2018. ISSN 2236-6717. Disponível em: <<https://semanaacademica.com.br/artigo/piezoelectricidade-como-fonte-de-energia-alternativa>>.
- 2 RUPITSCH, S. J. *Piezoelectric Sensors and Actuators*. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2019. 43-81 p.
- 3 TIAN, X. et al. A review on piezoelectric ultrasonic motors for the past decade: Classification, operating principle, performance, and future work perspectives. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 306, p. 111971, 2020. ISSN 0924-4247. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424720300583>>.
- 4 WANG, L. et al. A review of recent studies on non-resonant piezoelectric actuators. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 133, p. 106254, 2019. ISSN 0888-3270. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327019304698>>.
- 5 YAN, S. et al. Variation of strain rate sensitivity of an aluminum alloy in a wide strain rate range: Mechanism analysis and modeling. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 688, p. 776–786, 2016. ISSN 0925-8388. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838816321107>>.
- 6 VINHAIS, H. F.; IBRAHIM, R. C.; SILVA, E. C. N. Simulation of a linear piezoelectric motor by using finite element method. In: *International Congress of Mechanical Engineering*. [S.l.]: ABCM, 2003.
- 7 ROH, Y.; KWON, J. Development of a new standing wave type ultrasonic linear motor. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 112, n. 2, p. 196–202, 2004. ISSN 0924-4247. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424704000147>>.
- 8 SHI, S.; CHEN, W.; LIU, J. A high speed ultrasonic linear motor using longitudinal and bending multimode bolt-clamped langevin type transducer. In: *2006 International Conference on Mechatronics and Automation*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 612–617.
- 9 CHU, C.-L.; FAN, S.-H. A novel long-travel piezoelectric-driven linear nanopositioning stage. *Precision Engineering*, v. 30, n. 1, p. 85–95, 2006. ISSN 0141-6359. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635905000838>>.
- 10 Nurul Fazita, M. et al. 3 - effects of strain rate on failure mechanisms and energy absorption in polymer composites. In: JAWAID, M.; THARIQ, M.; SABA, N. (Ed.). *Failure Analysis in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*. Woodhead Publishing, 2019, (Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering). p. 51–78. ISBN 978-0-08-102293-1. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081022931000036>>.

- 11 FU, Z. et al. A high-entropy alloy with hierarchical nanoprecipitates and ultrahigh strength. In: . *Science advances*, 2018, (Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering). ISBN 978-0-08-102293-1. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081022931000036>>.
- 12 VATKAR, N. S.; VATKAR, Y. S. Piezoelectric motors & it's applications. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, v. 03, p. 986, 2016. ISSN 2395 -0056. Disponível em: <<https://www.irjet.net/archives/V3/i6/IRJET-V3I6186.pdf>>.
- 13 SPANNER, K.; KOC, B. Piezoelectric motors, an overview. *Actuators*, v. 5, n. 1, 2016. ISSN 2076-0825. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-0825/5/1/6>>.
- 14 CHANG, L.-K.; TSAI, M.-C. Design of single-phase driven screw-thread-type ultrasonic motor. *Review of Scientific Instruments*, v. 87, p. 055002, 05 2016.
- 15 INTERNATIONAL, A. *What is the purpose of a piezomotor*. 2020. Company Blogpost in Piezo Applications. Página online acessada em 22/05/2021 url: <https://www.americanpiezo.com/blog/what-is-the-purpose-of-a-piezo-motor/>.
- 16 DEANGELIS, D. A.; SCHULZE, G. W. Performance of pzt8 versus pzt4 piezoceramic materials in ultrasonic transducers. *Physics Procedia*, v. 87, p. 85-92, 2016. ISSN 1875-3892. 44th Annual Symposium of the Ultrasonic Industry Association, UIA 44th Symposium, 20-22 April 2015, Washington, DC, USA and of the 45th Annual Symposium of the Ultrasonic Industry Association, UIA 45th Symposium, 4-6 April 2016, Washington, DC, USA. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389216304175>>.
- 17 TECHNOLOGIES, C. *Piezomotors*. 1993. Product Online Catalog. Página online acessada em 20/05/2021 url: <https://www.cedrat-technologies.com/en/products/piezomotors>.
- 18 ARAFA, M.; ALDRAIHEM, O.; BAZ, A. Modeling and characterization of a linear piezomotor. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 20, n. 16, p. 1913–1921, 2009.
- 19 MA, Z. et al. Novel in situ device for investigating the tensile and fatigue behaviors of bulk materials. *The Review of scientific instruments*, v. 84 4, p. 045104, 2013.
- 20 WANG, S. et al. A novel in situ device based on a bionic piezoelectric actuator to study tensile and fatigue properties of bulk materials. *Review of Scientific Instruments*, v. 85, n. 6, p. 065103, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.4879935>>.
- 21 TOOLS, F. *In-Situ SEM Material Testing*. 2018. Product Online Catalog. Página online acessada em 24/12/2021 url: https://www.femtotools.com/fileadmin/pdf/Product_Brochures/FT-MTA03_Broschure.pdf.
- 22 ARNOLD, F.; MüHLEN, S. The resonance frequencies on mechanically pre-stressed ultrasonic piezotransducers. *Ultrasonics*, v. 39, n. 1, p. 1—5, January 2001. ISSN 0041-624X. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/s0041-624x\(00\)00047-0](https://doi.org/10.1016/s0041-624x(00)00047-0)>.

- 23 SHERMAN, C. H.; BUTLER, J. Transducers and arrays for underwater sound. In: . [S.l.: s.n.], 2008.
- 24 RUPITSCH, S. J. *Ultrasonic Transducers*: Materials and design for sensors, actuators and medical applications. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2012.
- 25 MAZEIKA, D. et al. Piezoelectric actuator based on two bending-type langevin transducers. *Energy Harvesting and Systems*, v. 0, 01 2015.
- 26 LAMBERTI, N. A piezoelectric actuator, based on a langevin-type transducer, for dermatological aesthetic applications. In: . [S.l.: s.n.], 2011. p. 163–167.
- 27 ELMUSTAFA, A.; LAGALLY, M. G. Flexural-hinge guided motion nanopositioner stage for precision machining: finite element simulations. *Precision Engineering*, v. 25, n. 1, p. 77–81, 2001. ISSN 0141-6359. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635900000581>>.