

DIEGO PAPA RODRIGUES
DOUGLAS FRANCISCO WAGNER CAPELOSSI MARTINS

DESENVOLVIMENTO DE UM MOTOR PIEZELÉTRICO ROTATIVO

São Paulo
2011

DIEGO PAPA RODRIGUES
DOUGLAS FRANCISCO WAGNER CAPELOSSI MARTINS

DESENVOLVIMENTO DE UM MOTOR PIEZELÉTRICO ROTATIVO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica

Orientador: Prof.Dr. Emílio Carlos
Nelli Silva

São Paulo
2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Martins, Douglas Francisco Wagner Capelossi
Desenvolvimento de um motor piezelétrico rotativo / D.F.W.
C. Martins, D.P. Rodrigues. -- São Paulo, 2011.
71 p.

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de
Sistemas Mecânicos.**

**1. Motores elétricos (Projeto; Fabricação) I. Rodrigues, Diego
Papa II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos III.
t.**

AGRADECIMENTOS

A Deus e a nossas famílias, por terem nos dado força e paz durante todos os anos da graduação e, em especial, para realização desse trabalho.

Ao professor Emílio, pela orientação e estímulos constantes.

Aos membros dos laboratórios de otimização e ultrassom do departamento da mecatrônica pelo auxílio inestimável.

Aos técnicos da oficina da engenharia mecatrônica, pelo empenho na construção dos protótipos desse projeto

RESUMO

No mundo atual, cresce cada vez mais a necessidade de atuadores robustos que possam ser miniaturizados e utilizados em diferentes aplicações, como, por exemplo, no foco da câmera de um celular. Nesse contexto, possuem destaque os motores piezelétricos. Em especial, destaca-se o motor rotativo desenvolvido pelo professor Kenji Uchino. Seu motor consiste em um estator em formato de tubo vazado com dois chanfros posicionados ortogonalmente em sua face externa, onde são fixadas duas cerâmicas piezelétricas, de modo que, dependendo da frequência de excitação, elas induzem um movimento rotativo oscilatório, que é transmitido ao rotor por meio de atrito.

Assim, o trabalho consiste no projeto e na fabricação desse tipo de motor piezelétrico rotativo. Para isso, serão realizadas simulações computacionais, utilizando-se o software comercial de elementos finitos ANSYS, de forma a entender o problema e obter as dimensões e os parâmetros necessários para a etapa seguinte da fabricação de protótipos, a fim de validar as simulações e o projeto em si.

Palavras-chave: Motores piezelétricos. Atuadores piezelétricos. Elementos finitos. Simulação computacional. Fabricação de protótipo.

ABSTRACT

Nowadays, the need for robust actuators that can be miniaturized and used in different applications is growing in the world. As an example, we can mention the focus system of a camera phone. In this context, we have the piezoelectric motors in highlight. In particular, there is the motor developed by Professor Kenji Uchino, which consists of a stator-shaped hollow tube positioned orthogonally with two notches on its outer side, where two piezoelectric ceramics are bonded, so that, depending on the excitation frequency they induce an oscillating rotary motion which is transmitted to the shaft through friction.

Thus, this work consists in designing and manufacturing this type of rotary piezoelectric motor. To achieve this, computer simulations are performed, using the commercial finite element software ANSYS in order to make a thoroughly analysis of the problem and obtain the dimensions and parameters needed for the next stage of prototyping, so to validate the simulations and the design itself.

Keywords: Piezoelectric motors. Piezoelectric actuators. Finite element method. Computer simulation. Prototype. *Manufacturing and characterization.*

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Motores piezelétricos acoplados às lentes das câmeras, utilizados para ajuste do foco.....	2
Figura 2 Fotos ilustrativas de: bafômetro (à esquerda), aparelho de endoscopia (ao centro) e microscópio (à direita).	2
Figura 3 À esquerda, foto de um mecanismo de posicionamento de alta precisão e repetibilidade que utiliza motor piezeletrico. À direita, exemplo de motor em miniatura.....	2
Figura 4 Estrutura básica de um motor piezelétrico mistos [UCHINO; GINIEWICZ,2003].	3
Figura 5 Formas dos motores piezelétricos mistos [UCHINO; GINIEWICZ,2003].	4
Figura 6 Típica estrutura de um motor rotativo mistos [UCHINO; GINIEWICZ,2003] .	5
Figura 7 Motor cilíndrico vazado com vibração torsional [UCHINO; GINIEWICZ,2003].	6
Figura 8 Motor em forma de tubo metálico [UCHINO; GINIEWICZ,2003].	7
Figura 9 Esquema de um motor linear em formato de π de ondas estacionárias [UCHINO; GINIEWICZ,2003].	8
Figura 10 Exemplo de um motor piezelétrico de modos mistos a)[UCHINO; GINIEWICZ,2003] b) [KOC et al., 2002].	8
Figura 11 Exemplo de motor piezelétrico linear de ondas propagantes em forma de π [UCHINO; GINIEWICZ,2003].	9
Figura 12 Esquema de motor piezelétrico rotativo de ondas propagantes em forma de anel [UCHINO; GINIEWICZ,2003].....	10
Figura 13 Exemplo de motor piezelétrico de rotação de modos em formato cilíndrico [KOC et al., 2002].	10
Figura 14 Exemplo de motor piezelétrico com dois modos de vibrar longitudinais defasados no tempo [KOC et al., 2002].	11
Figura 15 Contraste entre frequência de ressonância e anti-ressonância.	15
Figura 16 Configuração simplificada do motor piezelétrico.	18
Figura 17 Janela de criação de cilindro sólido.....	19
Figura 18 Janelas de criação de blocos sólidos.....	19
Figura 19 Resultado preliminar modelagem.....	20
Figura 20 Operador de extrusão.	21
Figura 21 Modelagem do motor piezelétrico.	22
Figura 22 Árvore da documentação do Ansys.....	22
Figura 23 Geometria do sólido 226.	23
Figura 24 Opções do SOLID226.	23
Figura 25 Geometria do sólido 186.	24
Figura 26 Definição de propriedades dos materiais.	24
Figura 27 Discretização de elementos.	26
Figura 28 Nós e malha estrutural do motor.	27

Figura 29 Seleção da análise modal.	27
Figura 30 Opções da análise modal.	28
Figura 31 Condições de contorno para análise modal.	28
Figura 32 Potencial elétrico na análise modal.	29
Figura 33 Seleção da análise harmônica.	30
Figura 34 Condições de contorno para análise harmônica.	30
Figura 35 Potencial elétrico na análise harmônica.	31
Figura 36 Resultados gráficos para espessura de 1,0 mm.	33
Figura 37 Resultados gráficos para espessura de 0,4 mm.	34
Figura 38 Resultados gráficos para espessura de 0,2 mm.	34
Figura 39 Gráfico de frequência por deslocamento.....	36
Figura 40 Figura de <i>Lissajou</i> para o nó externo.	36
Figura 41 Sequência de figuras que representam o funcionamento do motor.	37
Figura 42 Figura de <i>lissajou</i> para o nó externo com comprimento de cilindro de 15mm	38
Figura 43 Figura de <i>lissajou</i> para o nó externo com comprimento de cilindro de 20mm	38
Figura 44 Figura de <i>lissajou</i> para o nó externo com comprimento de cilindro de 30mm	39
Figura 45 Esquema do desenho de montagem do motor	40
Figura 46 Saída do impedômetro.	42
Figura 47 Gerador de funções e amplificador utilizados	42
Figura 48 Motor fixado e conectado no conjunto da fonte.....	43
Figura 49 Tensão medida pelo osciloscópio. Amplitude de 100V	43
Figura 50 Gerador de funções ajustado com onda senoidal de frequência 29,6 kHz	44

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Características dos motores piezelétricos ultrassônicos	4
Tabela 2 Parâmetros de criação dos blocos.	20
Tabela 3 Valores para cerâmica, com eixo principal em X e Y, material (1) e (2), respectivamente.....	25
Tabela 4 Valores para bronze material (3).	26
Tabela 5 Modos de vibrar.....	33
Tabela 6 Resultados análise modal.	33

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Motores Piezelétricos.....	3
1.2.1 Motores de ondas estacionárias	5
1.2.2 Motores de modos mistos.....	8
1.2.3 Motores de ondas propagantes	9
1.2.4 Motores de rotação de modos	10
1.3 Objetivo.....	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1 Materiais Piezelétricos	12
2.2 MEF piezelétrico	13
2.2.1 Análise modal	14
2.2.2 Análise Harmônica.....	16
3 MODELAGEM COMPUTACIONAL	17
3.1 Metodologia do estudo computacional.....	17
3.2 Etapas da Modelagem	17
3.2.1 Cilindro oco com faces achatadas	18
3.2.2 Placas piezelétricas	20
3.3 Resultados da Modelagem	22
3.4 Discretização do modelo – Ansys	22
3.4.1 Etapas da discretização	22
3.4.2 Resultados da Discretização	26
3.5 Análise Modal.....	27
3.5.1 Etapas da análise modal.....	27
3.6 Análise Harmônica	29
3.6.1 Etapas da Análise Harmônica.....	29
4 RESULTADOS.....	32
4.1 Resultados da análise modal	32
4.1.1 Comparação com motor da tese de K. Ushino	34
4.2 Resultados da análise HarMônica.....	35
4.3 Simulação de funcionamento	37

4.4 Fabricação e teste.....	39
4.4.1 Projeto e fabricação	39
4.4.2 testes do protótipo	41
5 CONCLUSÃO	45
6 REFERÊNCIAS BIBIOGRÁFICAS	46
7 ANEXOS	47
7.1 Desenhos de fabricação	47
7.2 Código matlab	54
7.2.1 Figuras lissajou.....	54
7.2.2 Animação do Movimento	55
7.3 Código ansys	56

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

Atuadores são dispositivos importantíssimos na Engenharia atual, possuindo uma ampla gama de aplicações, e se caracterizam como transdutores, transformando vários tipos de energia, como a elétrica, por exemplo, em deslocamento ou força.

Bastante utilizados, os motores eletromagnéticos, como os servos-motores e os motores de passo, vem ocupando lugar de destaque na Engenharia há décadas.

Porém, a cada dia, surge a necessidade de se construir modelos em escala reduzida e a miniaturização dos atuadores se tornou um requisito nos projetos modernos. Dessa forma, os tradicionais motores eletromagnéticos, devido à sua complexidade, não poderiam mais atender à essa necessidade de maneira satisfatória.

Assim, surgiram com grande força os atuadores piezelétricos, que se tornaram os principais em aplicações onde é necessária a miniaturização dos mesmos, graças à sua simplicidade de construção e funcionamento, que, além disso, favorece a sua produção em larga escala a custos menores.

Os atuadores piezelétricos também atendem a outros requisitos de grande importância na engenharia atual, como ter um tempo de resposta pequeno e uma alta precisão e repetibilidade dos movimentos.

Um exemplo típico da aplicação desses atuadores é no foco da câmera dos celulares, onde fica evidente a necessidade de se ter um dispositivo compacto que desempenhe com precisão e rapidez a função de posicionar corretamente a lente, garantindo o foco da imagem captada. Porém tudo isso deve ser realizado sem elevar em demasia o custo do produto, o que inviabilizaria a sua produção.

Outras aplicações de motores piezelétricos são: ajuste fino do foco de microscópios; sistema de bombeamento pneumático presente em bafômetros; aparelhos médicos de endoscopia (tanto na lente quanto no aparato de coleta de amostras); nanopositionadores, pois apresenta grande repetibilidade.

Na Figura 1, tem-se, à esquerda, uma lente em que uma das funções principais do motor piezelétrico é realizar a focagem automática, de maneira veloz

porém silenciosa. Ao centro está uma câmera de alta resolução, que tira múltiplas fotos que, no fim, são compostas produzindo a foto final. Assim, cabe ao motor movimentar mecanismo acoplado à lente internamente, alterando o foco e permitindo que imagem seja capturada por etapas, mas sem ser necessário mover a câmera.



Figura 1 Motores piezelétricos acoplados às lentes das câmeras, utilizados para ajuste do foco.



Figura 2 Fotos ilustrativas de: bafômetro (à esquerda), aparelho de endoscopia (ao centro) e microscópio (à direita).

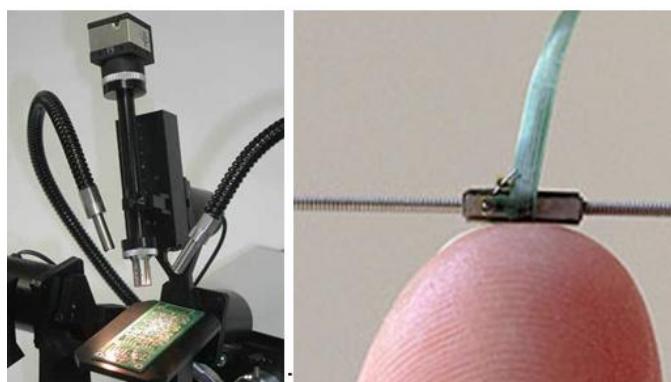


Figura 3 À esquerda, foto de um mecanismo de posicionamento de alta precisão e repetibilidade que utiliza motor piezeletrico. À direita, exemplo de motor em miniatura.

1.2 MOTORES PIEZELÉTRICOS

Os motores piezelétricos são dispositivos ultrassônicos, os quais são caracterizados por um acionamento através de uma ou mais entradas de tensão AC senoidal sintonizadas nas suas frequências de ressonância.

Para que deformações nos piezelétricos possam de fato gerar o movimento desejado na saída, é necessário uma defasagem nos modos de vibrar do motor. Quando o acionamento é feito por mais de uma fonte de tensão AC, a defasagem já é garantida pelos próprios sinais, que são gerados com uma diferença de fase específica (em geral 90°). Porém, quando existe apenas uma entrada única, em uma frequência específica, é necessária a presença de amortecimento no sistema.

Abaixo, tem-se o esquema básico de um motor piezelétrico. Uma vez feito o acionamento do dispositivo piezelétrico, ele irá se deformar, juntamente com uma peça que está acoplada a ele, cuja função é vibrar elasticamente e transmitir, através do atrito, o movimento à saída do sistema.

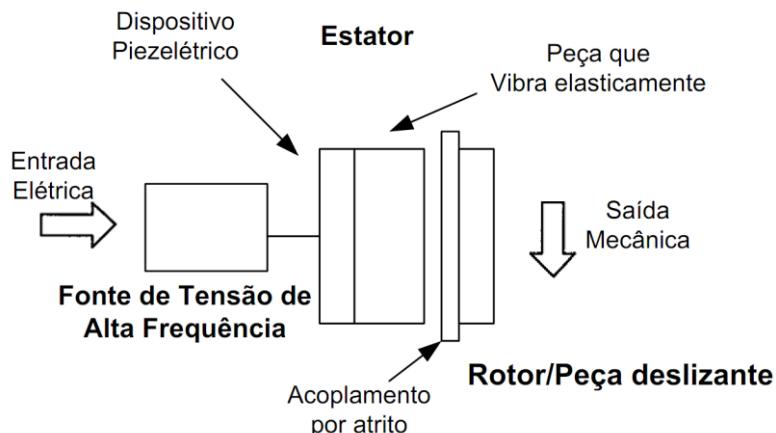


Figura 4 Estrutura básica de um motor piezelétrico misto [UCHINO; GINIEWICZ,2003].

O primeiro modelo de motor piezelétrico produzido foi proposto por H.V.Barth da IBM em 1973. Apesar de apresentar alguns defeitos, ele serviu de base para a produção de vários outros modelos.

Tem-se na Tabela 1, as principais características dos motores ultrassônicos [UCHINO; GINIEWICZ, (2003)]:

Tabela 1 Características dos motores piezelétricos ultrassônicos.

Qualidades	Defeitos
Baixa velocidade e alto torque; Resposta rápida; Ampla gama de velocidade; Sem folga com parada rápida; Excelente controlabilidade; Boa resolução de posicionamento; Alta relação entre potência e peso; Construção simples; Sem geração de radiação eletromagnética; Não afetado por campos eletromagnéticos externos;	Fonte de alta frequência necessária; Inclinação da curva torque x velocidade; Baixa durabilidade;

Eles apresentam diferentes tipos de construção e princípios de funcionamento, podendo ser classificados em duas categorias básicas: rotativo e linear. Em relação à forma, existem os em forma de π , de haste, de anel e de cilindro. Por último, pode-se classificar o motor com relação à vibração induzida nele: ondas estacionárias ou propagantes (*travelling waves*) [UCHINO; GINIEWICZ, 2003].

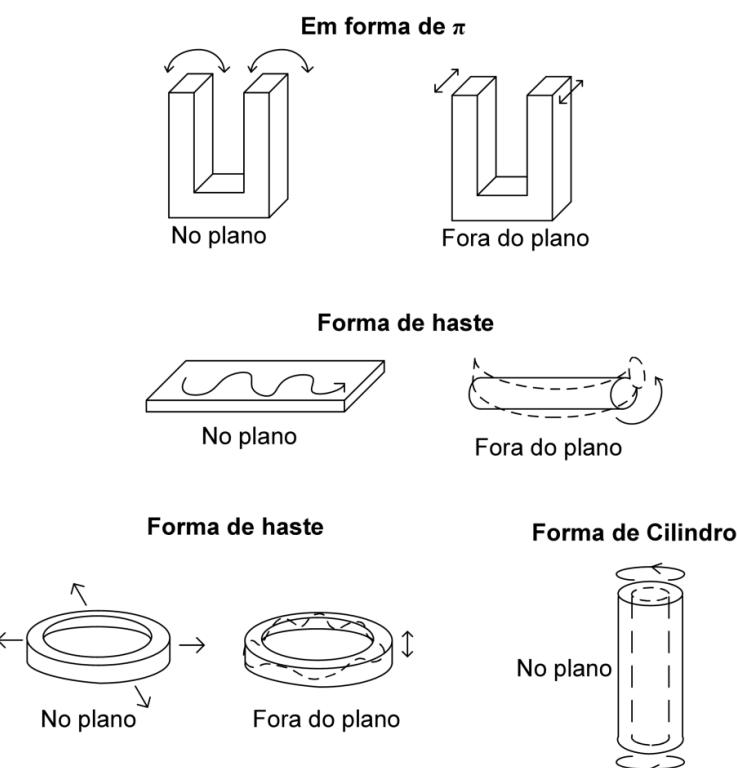


Figura 5 Formas dos motores piezelétricos mistos [UCHINO; GINIEWICZ,2003].

A seguir é feita uma breve descrição dos principais tipos de motores piezelétricos, sendo divididos em quatro categorias: de ondas estacionárias, de modos mistos, de ondas propagantes e de rotação de modos [UCHINO; GINIEWICZ, 2003].

1.2.1 MOTORES DE ONDAS ESTACIONÁRIAS

Conhecido também como *acoplador vibracional*, este tipo de motor é composto por um parte que vibra acoplada com uma cerâmica piezelétrica, que é acionada por uma única fonte de tensão AC senoidal. A extremidade desse conjunto executa, então, graças ao amortecimento presente no sistema, um movimento elíptico que é transmitido para o rotor, por exemplo, pelo atrito.

Como vantagem, esse tipo de motor apresenta baixo custo de produção e alta eficiência, porém apresenta uma certa variabilidade do formato da elipse realizada pela extremidade e uma assimetria entre o sentido horário e o anti-horário.

A seguir, são ilustrados alguns exemplos de motores de ondas estacionárias rotativos e lineares.

a) Motores Rotativos

Um típico motor rotativo é representado na Figura 6, desenvolvido por Sashida (1982).

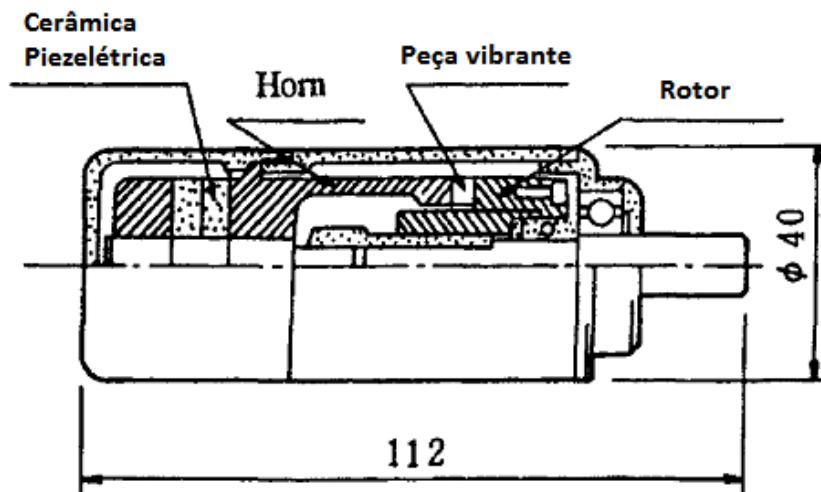


Figura 6 Típica estrutura de um motor rotativo misto [UCHINO; GINIEWICZ, 2003]

Uma variação possível também é apresentada na Figura 7. Consiste de um cilindro vazado feito de cerâmica piezelétrica vibrando torsionalmente. Para induzir essa vibração um padrão em 45° de um eletrodo é impresso sobre sua superfície externa. O movimento é, então, transmitido por atrito a um rotor posicionado em uma das extremidades do cilindro.

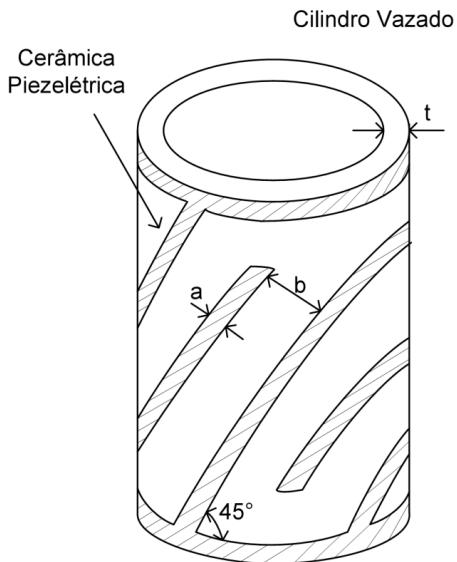


Figura 7 Motor cilíndrico vazado com vibração torsional [UCHINO; GINIEWICZ,2003].

Porém, uma terceira opção apresenta uma construção mais simples que as anteriores. Consiste em estator cilíndrico vazado, porém feito de material metálico ao invés de piezelétrico. Assim, dois chanfros são feitos ortogonalmente na superfície externa do tubo, onde duas placas retangulares feitas de cerâmica piezelétricas PZT são acopladas.

Quando uma das cerâmicas é excitada, por exemplo, no eixo x, ela provoca um momento fletor sobre o tubo fazendo-o oscilar ao longo desse eixo. Porém, devido a sua construção e distribuição assimétrica de massa, o tubo também tende a oscilar ortogonalmente, em torno do eixo y, caracterizando dois modos de vibrar degenerados, cujas frequências de ressonância são bem próximas.

Caso o valor da frequência da excitação esteja entre os valores dessas frequências de ressonância do motor, a composição dos dois modos de vibrar resulta em um movimento elíptico da extremidade do tubo no sentido horário, graças a um pequeno amortecimento intrínseco ao sistema que provoca uma defasagem entre os deslocamentos nas direções x e y. Caso a cerâmica excitada fosse aquela que está na direção y, o sentido da rotação seria o anti-horário.

Dada a sua simplicidade de construção e fácil miniaturização, o foco desse trabalho será projetar esse modelo específico de motor rotativo.

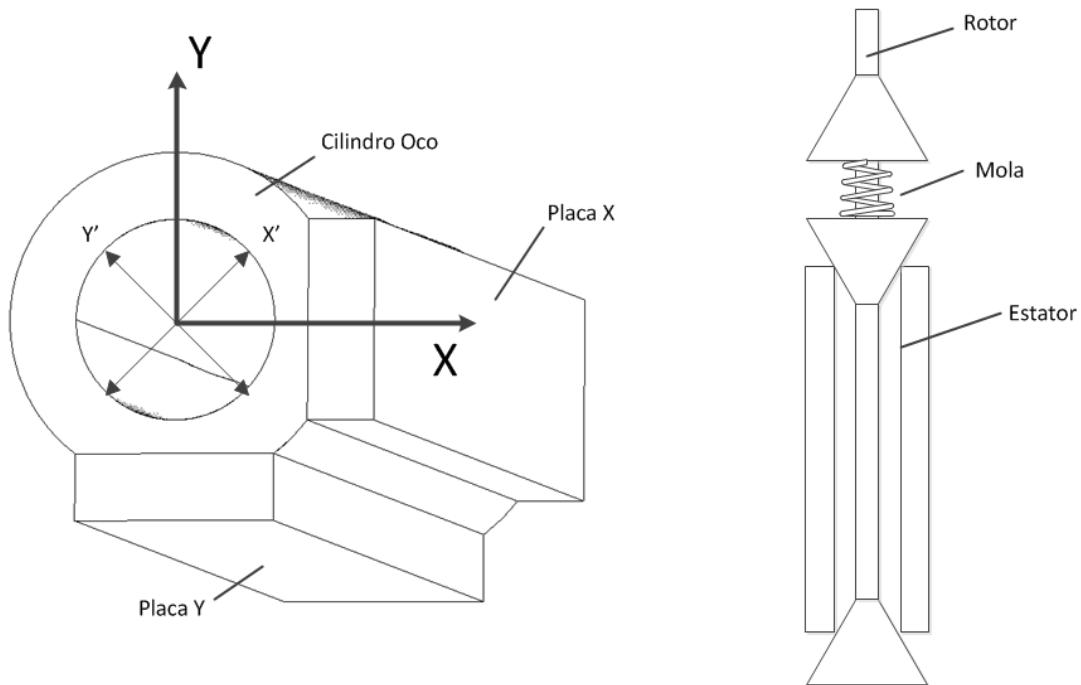


Figura 8 Motor em forma de tubo metálico [UCHINO; GINIEWICZ,2003].

b) Motores lineares

Pode-se citar como exemplo um motor linear em formato de π , representado na Figura 8, formado por um atuador piezelétrico multicamadas e por 'pernas' metálicas na forma de garfo. Uma pequena diferença na frequência de ressonância dessas 'pernas', juntamente com um pequeno amortecimento, gera uma defasagem de 90° entre os modos de vibrar nelas. Com isso, uma parte deslizante se move como no trote de um cavalo, fornecendo movimento linear.

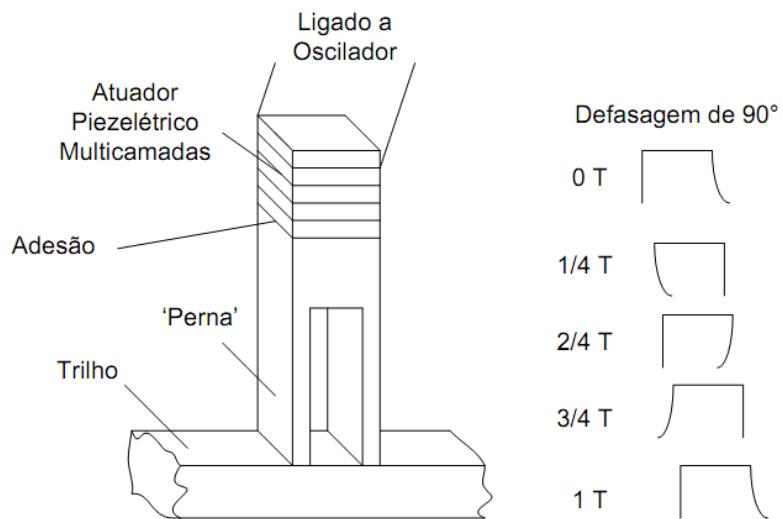


Figura 9 Esquema de um motor linear em formato de π de ondas estacionárias [UCHINO; GINIEWICZ,2003].

1.2.2 MOTORES DE MODOS MISTOS

Existem também os motores de modos mistos, que são uma variação do motor de ondas estacionárias, porém o de modos mistos possuem dois atuadores que irão gerar dois modos de vibrar que serão combinados produzindo o movimento final.

Esse tipo, por apresentar duas frequências distintas de excitação dos atuadores, difere do de ondas propagantes, que apresenta apenas uma frequência, porém defasada de 90° .

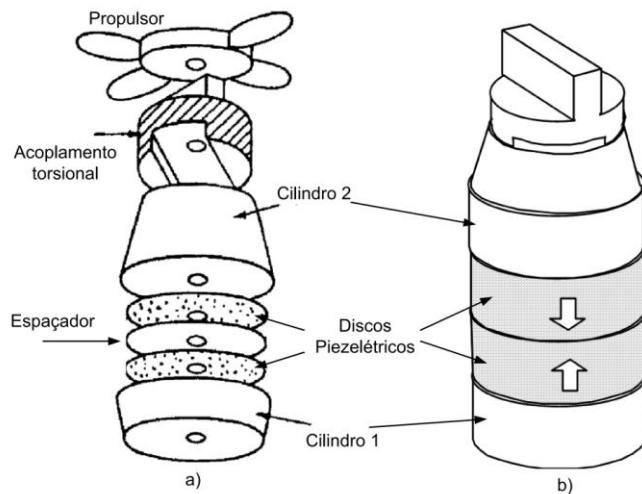


Figura 10 Exemplo de um motor piezelétrico de modos mistos a)[UCHINO; GINIEWICZ,2003] b) [KOC et al., 2002].

1.2.3 MOTORES DE ONDAS PROPAGANTES

Conhecido também como *motor de onda de superfície*. Para o motor funcionar, é necessário se produzir duas ondas estacionárias com uma diferença de fase de 90° . Assim, é possível gerar uma onda propagante sobre a superfície do motor, cujos pontos realizam também uma trajetória senoidal. Esse movimento é então transferido, ponto a ponto, para parte móvel ou rotor.

Uma desvantagem dessa configuração é a sua baixa eficiência, menor que 50%, devido às interferências destrutivas que ocorrem entre as ondas estacionárias defasadas de 90° .

O motor linear de ondas estacionárias em forma de π apresentado anteriormente pode ser modificado de modo a operar como um motor de ondas propagantes . Para isso é necessário acoplar um segundo atuador piezelétrico multicamadas na sua parte superior. Assim, é induzido um movimento linear no sistema quando sinais de entrada com um diferença de fase de 90° são aplicados nos atuadores.

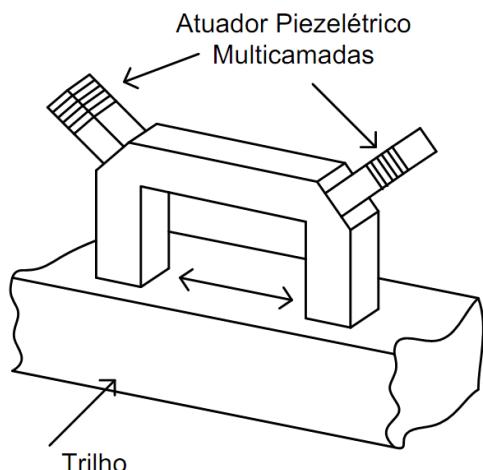


Figura 11 Exemplo de motor piezelétrico linear de ondas propagantes em forma de π [UCHINO; GINIEWICZ,2003].

Usando esse princípio de operação, é possível construir uma superfície circular em forma de anel, de modo a transformar esse movimento de deslizamento em uma rotação, onde um dos anéis desliza sobre o outro.

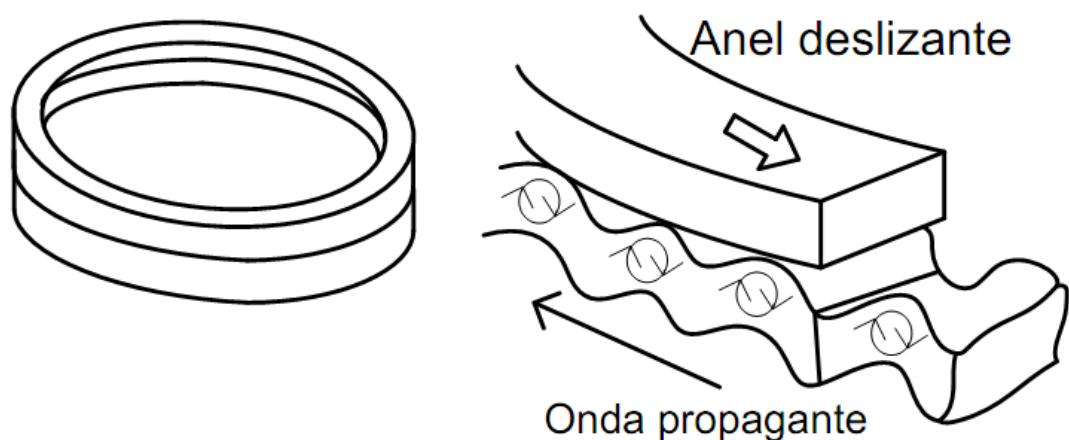


Figura 12 Esquema de motor piezelétrico rotativo de ondas propagantes em forma de anel [UCHINO; GINIEWICZ,2003].

1.2.4 MOTORES DE ROTAÇÃO DE MODOS

Uma variação do motor de ondas propagantes. Nesse modelo, vários atuadores são excitados numa mesma frequência com a devida diferença de fase a fim de produzir apenas um modo de vibrar.

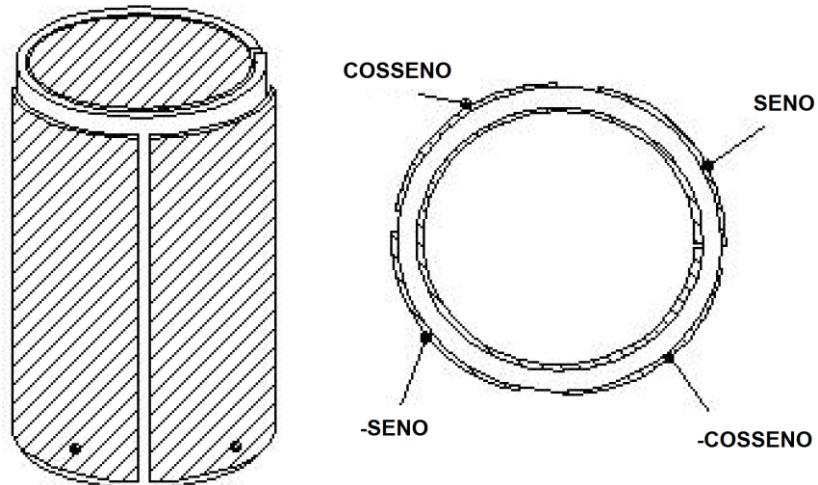


Figura 13 Exemplo de motor piezelétrico de rotação de modos em formato cilíndrico [KOC et al., 2002].

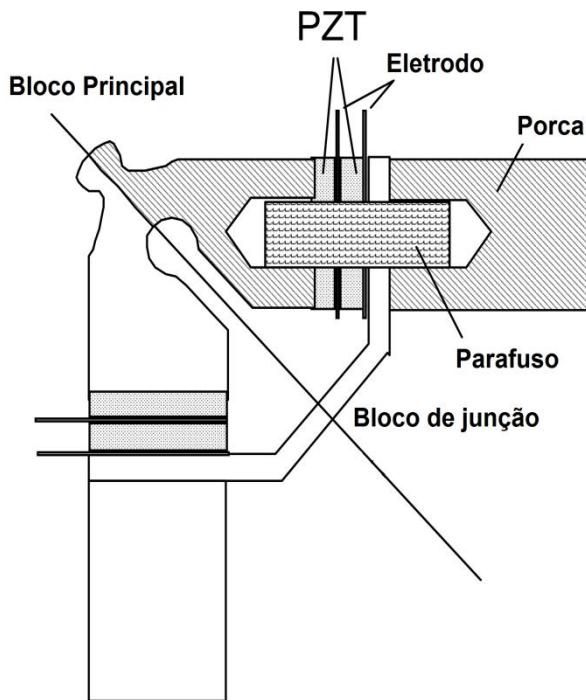


Figura 14 Exemplo de motor piezelétrico com dois modos de vibrar longitudinais defasados no tempo [KOC et al., 2002].

1.3 OBJETIVO

- Projetar um motor piezelétrico rotativo de ondas estacionárias, seguindo modelo apresentado por Uchino et al. (2003), ilustrado na **Error! Reference source not found.**, que consiste em um estator cilíndrico vazado com chanfros na lateral onde são fixadas duas placas de cerâmica piezelétrica.
- Simular modelo do motor utilizando *software* de elementos finitos;
- Construir protótipos e fazer validação experimental;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MATERIAIS PIEZELÉTRICOS

Materiais piezelétricos são conhecidos pela sua capacidade de converter deformações mecânicas em campo elétrico e vice-versa. Assim, quando se aplica um campo elétrico sobre um material piezelétrico, obtém-se uma deformação induzida proporcional à entrada.

Sua descoberta é creditada aos cientistas e irmãos Pierre e Jacques Curie, que identificaram os efeitos da piezeletricidade pela primeira vez nos cristais de quartzo, em 1880. Nos anos cinquenta, Jaffe e seus colaboradores, examinando o titanato zirconato de chumbo (PZT), chegaram a uma composição com uma alta resposta piezelétrica. Desde então, as cerâmicas de PZT modificadas se tornaram as mais usadas nas aplicações com piezelétricos (UCHINO; GINIEWICZ, 2003).

As cerâmicas piezelétricas podem ser modeladas pelas seguintes equações (IKEDA, 1996):

$$\mathbf{T} = \mathbf{c}^E \mathbf{S} - \mathbf{e}^t \mathbf{E} \quad \{2.1\}$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{\epsilon}^s \mathbf{E} + \mathbf{e} \mathbf{S} \quad \{2.2\}$$

onde, \mathbf{T} é o tensor de tensão mecânica, \mathbf{D} é o vetor de deslocamento elétrico, \mathbf{c}^E é o tensor de rigidez elástica para campo elétrico constante, \mathbf{S} é o tensor de deformação mecânica, \mathbf{e} é o tensor de coeficientes piezelétricos de tensão mecânica, $\mathbf{\epsilon}^s$ é o tensor dielétrico para deformação constante, \mathbf{E} é o vetor campo elétrico e ϕ é o potencial elétrico. Onde:

$$\mathbf{c}^E = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad \{2.3\}$$

$$S_{jk} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_j} \right) \quad \{2.4\}$$

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \{2.5\}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^S = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad \{2.6\}$$

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi \quad \{2.7\}$$

2.2 MEF PIEZELÉTRICO

Para se estudar o comportamento do motor piezelétrico que será fabricado, é utilizado o *software* de elementos finitos *Ansys*. As equações de equilíbrio para o MEF de piezelétricos podem ser descritas em função do deslocamento nodal $\{U\}$ e do o potencial elétrico nodal $\{\emptyset\}$ para cada nó, sendo que $\{F\}$ representa os carregamentos mecânicos e $\{Q\}$ os elétricos, como (Lerch, 1990; Ostergaard, 1986):

$$[\mathbf{M}_{uu}]\{\ddot{\mathbf{U}}\} + [\mathbf{C}_{uu}]\{\dot{\mathbf{U}}\} + [\mathbf{K}_{uu}]\{\mathbf{U}\} + [\mathbf{K}_{u\emptyset}]\{\emptyset\} = \{F\} \quad \{2.8\}$$

$$[\mathbf{K}_{u\emptyset}]^T\{\mathbf{U}\} + [\mathbf{K}_{\emptyset\emptyset}]\{\emptyset\} = \{Q\} \quad \{2.9\}$$

As equações podem ser expressas na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} [\mathbf{M}_{uu}] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{\mathbf{U}}\} \\ \{\emptyset\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{C}_{uu}] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{\mathbf{U}}\} \\ \{\dot{\emptyset}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{K}_{uu}] & [\mathbf{K}_{u\emptyset}] \\ [\mathbf{K}_{u\emptyset}]^T & [\mathbf{K}_{\emptyset\emptyset}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\mathbf{U}\} \\ \{\emptyset\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix} \quad \{2.10\}$$

Onde:

$$[\mathbf{K}_{uu}] = \iiint_{\Omega_e} [\mathbf{B}_u]^T [\mathbf{c}] [\mathbf{B}_u] dV \quad \{2.11\}$$

$$[\mathbf{K}_{u\emptyset}] = \iiint_{\Omega_e} [\mathbf{B}_u]^T [\mathbf{e}] [\mathbf{B}_\emptyset] dV \quad \{2.12\}$$

$$[\mathbf{K}_{\emptyset\emptyset}] = \iiint_{\Omega_e} [\mathbf{B}_\emptyset]^T [\boldsymbol{\varepsilon}] [\mathbf{B}_\emptyset] dV \quad \{2.13\}$$

$$[\boldsymbol{M}_{uu}] = \rho \iiint_{\Omega_e} [\boldsymbol{N}_u]^T [\boldsymbol{N}_u] dV \quad \{2.14\}$$

$$[\boldsymbol{C}_{uu}] = \beta [\boldsymbol{K}_{uu}] \quad \{2.15\}$$

Sendo:

$[\boldsymbol{K}_{uu}]$ - matriz de rigidez mecânica

$[\boldsymbol{K}_{u\phi}]$ - matriz de acoplamento piezelétrico

$[\boldsymbol{K}_{\phi\phi}]$ - matriz de rigidez dielétrica

$[\boldsymbol{M}_{uu}]$ - matriz de massa

$[\boldsymbol{C}_{uu}]$ - matriz de amortecimento mecânico

$[\boldsymbol{B}_u], [\boldsymbol{B}_\phi]$ - derivativos das funções de forma do MEF

$[c]$ - coeficientes elásticos

$[e]$ - coeficientes piezelétricos

$[\varepsilon]$ - coeficientes dielétricos

β - coeficiente de amortecimento

2.2.1 ANÁLISE MODAL

O material piezelétrico possui duas frequências de proeminência: a de ressonância e a de anti-ressonância. Na frequência de ressonância a impedância do atuador é a mínima possível, e tem-se, portanto, os máximos valores de potência e corrente. Na frequência de anti-ressonância (ligeiramente mais alta que a de ressonância) a impedância do atuador é máxima e a corrente e a potência são mínimas.

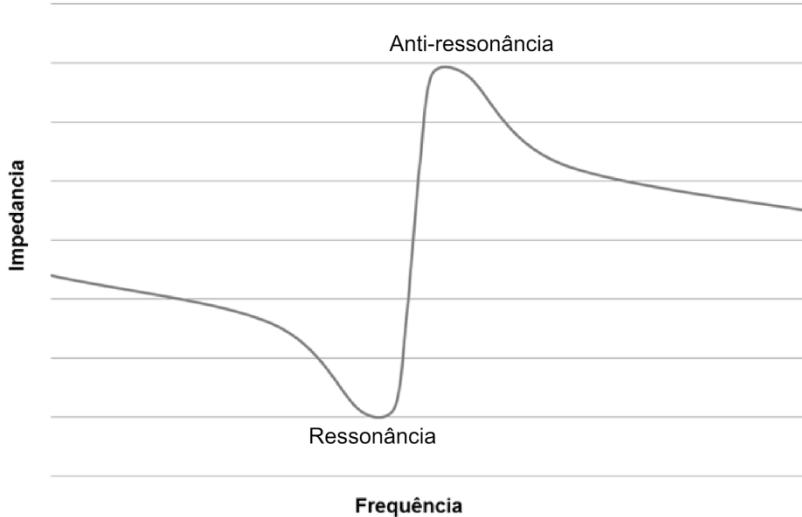


Figura 15 Contraste entre frequência de ressonância e anti-ressonância.

Para se obter os modos de vibrar do motor piezelétrico, é feita a análise modal, na qual não se coloca carregamentos no sistema modelado ($\{F\} = 0$) e nem amortecimento. Assim, tem-se:

$$\begin{bmatrix} [M_{uu}] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{U}\} \\ \{\ddot{\emptyset}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{uu}] & [K_{u\emptyset}] \\ [K_{u\emptyset}]^T & [K_{\emptyset\emptyset}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U\} \\ \{\emptyset\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \{Q\} \end{Bmatrix} \quad \{2.16\}$$

Para obter a frequência de ressonância devemos curto-circuitar os eletrodos, aplicando como condição de contorno o mesmo potencial (zero, neste caso) nos dois eletrodos. Já para a frequência de anti-ressonância basta impor potencial zero na face interna da placa piezelétrica.

Resolvendo-se problemas de autovalores e autovetores, é possível obter as frequências de ressonância e anti-ressonância e modos de vibrar do motor piezelétrico.

Deve-se considerar que a análise não distingue os modos piezelétricos dos mecânicos (que não interessam para este estudo). Eles são diferenciados por serem autovalores iguais (frequências de ressonância) para as duas condições de contorno descritas acima, o que significa que são independentes das condições de contorno elétricas, ou seja, são modos de vibrar puramente mecânicos.

De posse dessas informações encontra-se a faixa de frequências em que se deve excitar cerâmica piezelétrica de modo a alcançar máximos deslocamentos.

2.2.2 ANÁLISE HARMÔNICA

Nessa análise o piezelétrico é alimentado com uma tensão elétrica senoidal, o que permite ver qual o comportamento do sistema modelado sob a ação de forças harmônicas, deslocamentos, carregamentos elétricos ou potenciais elétricos, que são representados, respectivamente, por:

$$\{F(t)\} = \{F\}e^{j.w.t}; \{U(t)\} = \{U\}e^{j.w.t} \quad \{2.17\}$$

$$\{Q(t)\} = \{Q\}e^{j.w.t}; \{\phi(t)\} = \{\phi\}e^{j.w.t} \quad \{2.18\}$$

onde w é a frequência de excitação.

Tem-se que os valores de $\{U\}$, $\{\phi\}$, $\{F\}$, $\{Q\}$ são números reais quando o sistema não apresenta um fator de amortecimento e números complexos quando apresenta, caracterizando uma defasagem. Assim, é possível dizer que:

$$\begin{bmatrix} K_{uu} + j.w.C_{uu} - w^2.M_{uu} & K_{u\phi} \\ K_{u\phi}^T & K_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{U} \\ \hat{\phi} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \hat{F} \\ \frac{1}{j.w}\hat{I} \end{Bmatrix} \quad \{2.19\}$$

Onde “^” representa vetores complexos.

3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

3.1 METODOLOGIA DO ESTUDO COMPUTACIONAL

Para fazer um estudo do motor deve-se primeiro conhecer a faixa de operação do mesmo, ou seja, a banda de frequência em que ele vai trabalhar. Para isso são feitas análises modal e harmônica do motor utilizando o programa ANSYS em sua versão 13. A análise modal fornece a frequência e o modo de vibrar. A partir desta frequência é feita uma análise harmônica que fornece os deslocamentos reais e complexos que são pós-processados no Matlab a fim de obter as curvas de *lissajou* e movimentos do motor.

O primeiro passo da simulação é a de representar, em CAD, um modelo do motor piezelétrico. Nessa primeira etapa de representação, foi escolhida a adoção de um modelo simplificado para o motor, a fim de facilitar a interpretação dos resultados e validar com estudos anteriores.

Dentro do ambiente de modelagem do Ansys, é necessária uma cautela com as unidades. O software não trabalha com nenhuma unidade padrão, cabendo ao usuário inserir valores coerentes. Nesse trabalho, todas as unidades seguirão o sistema internacional (S.I.) e todas as posições apresentadas serão coordenadas do sistema cartesiano (x, y, z).

A documentação do Ansys 13 foi utilizada juntamente de todos os processos de simulação, como referência, disponível junto à distribuição do software.

3.2 ETAPAS DA MODELAGEM

A escolha do modelo simplificado para o motor consiste de estator que combina seções de corte circulares e quadradas. A superfície externa de um cilindro oco é achatada em dois lados defasados em 90 graus e duas placas retangulares uniformes unidas nessas superfícies achatadas. A configuração simplificada do motor é representada na figura 16.



Figura 16 Configuração simplificada do motor piezelétrico.

Nesta seção são apresentadas todas as etapas de criação do modelo simplificado de simulação.

3.2.1 CILINDRO OCO COM FACES ACHATADAS

Etapa I – Criação de volumes padrão

Nesta etapa, inicia-se a criação de todos os volumes necessários para representar o modelo. As geometrias são

- Dois cilindros
- Dois blocos

Para criar os dois cilindros, no Ansys, o caminho é **Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Cylinder > Solid > Cylinder** e na janela que surge, representada na Figura 17, deve-se inserir os valores de 0 nas coordenadas de *working plane* (WP) que correspondem a origem do sistema, o raio (0,0025 m e 0,0015m) e a profundidade (0,02 m).

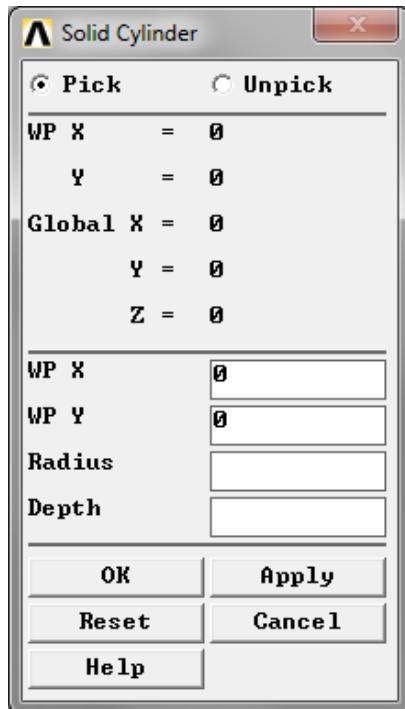


Figura 17 Janela de criação de cilindro sólido.

Caso houvesse necessidade de mover os sólidos, o caminho seria **Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Volume**, selecionando o que se desejava mover e inserindo os valores de deslocamento relativos. O resultado preliminar está representado na Figura 18.

Em seguida, os dois blocos utilizados na subtração booleana. O caminho é **Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Cylinder > Solid > Block > By Dimensions** e na janela que surge deve-se inserir os valores das coordenadas.

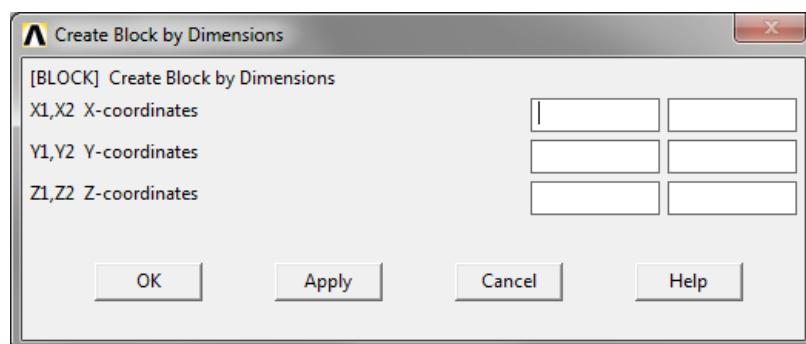


Figura 18 Janelas de criação de blocos sólidos.

Na Tabela 2 as coordenadas foram escolhidas para corretamente subtrair volumes dos cilindros e representar o motor.

Tabela 2 Parâmetros de criação dos blocos.

Volume	Unidade			
	X1	X2	1E-3	2E-3
Bloco A	Y1	Y2	-1E-3	1E-3
	Z1	Z2	0	10E-3
	X1	X2	-1E-3	1E-3
Bloco B	Y1	Y2	1E-3	2E-3
	Z1	Z2	0	10E-3

Etapa II - operadores booleanos

Nesta etapa, são apresentadas as operações de subtração dos volumes da etapa I. O caminho é **Preprocessor > Modeling > Operate > Boolean > Subtract > Volumes** e escolhe-se primeiramente o volume que se deseja subtrair e seguidamente os volumes que serão subtraídos do primeiro. O resultado preliminar esta representado na Figura 19.

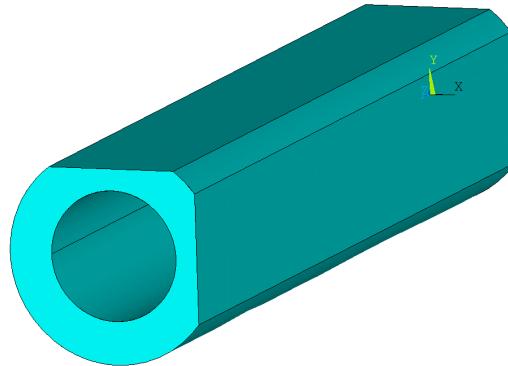


Figura 19 Resultado preliminar modelagem.

3.2.2 PLACAS PIEZELÉTRICAS

Para representar as placas piezelétricas aplica-se o operador de extrusão nas superfícies planas do estator. O caminho para a extrusão é **Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > Along Normal** e na janela representada na Figura 20 seleciona-se a superfície e o valor da espessura da placa (0,001 m) deve ser inserido.

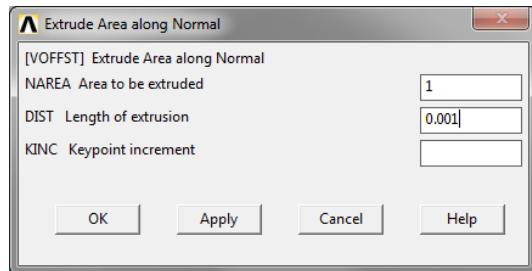


Figura 20 Operador de extrusão.

O mesmo processo deve ser repetido na outra face.

Agora, o caminho para colar as placas é **Preprocessor > Modeling > Operate > Boolean > Glue > Volumes** e na janela que surge selecionam-se todos os volumes. O resultado preliminar da etapa e final da modelagem simplificada esta representado na próxima seção.

3.3 RESULTADOS DA MODELAGEM

Os resultados obtidos pelas etapas seguidas são apresentados na Figura 21.

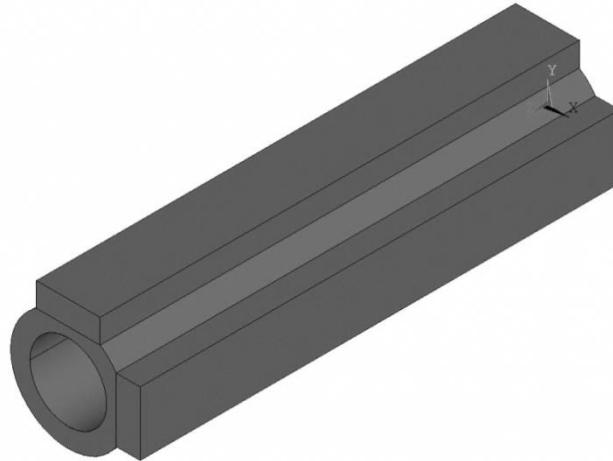


Figura 21 Modelagem do motor piezelétrico.

3.4 DISCRETIZAÇÃO DO MODELO – ANSYS

3.4.1 ETAPAS DA DISCRETIZAÇÃO

Escolha de “Element Type”

Nesta etapa foi necessário um estudo detalhado da documentação do Ansys, especificamente na seção **Mechanical APDL > Element Reference > I. Element Library**. Um elemento é a menor unidade de análise em um estudo. Ao definir um tipo de elemento, são dadas condições para o software representar o modelo a partir da definição de inúmeras partes independentes menores, que consistem na discretização do modelo.

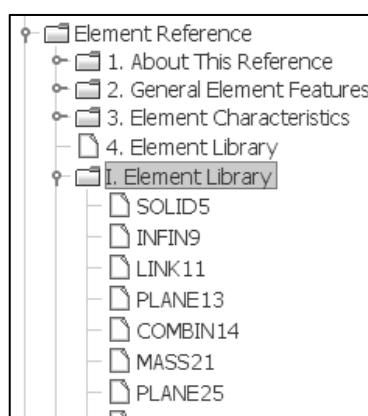


Figura 22 Árvore da documentação do Ansys.

A escolha para as placas piezelétricas PZT-5A foi o elemento SOLID226, que apresenta diversas capacidades estruturais além de representar efeitos piezelétricos em análises dinâmicas. O elemento SOLID226 é um aprimoramento do antigo SOLID5.

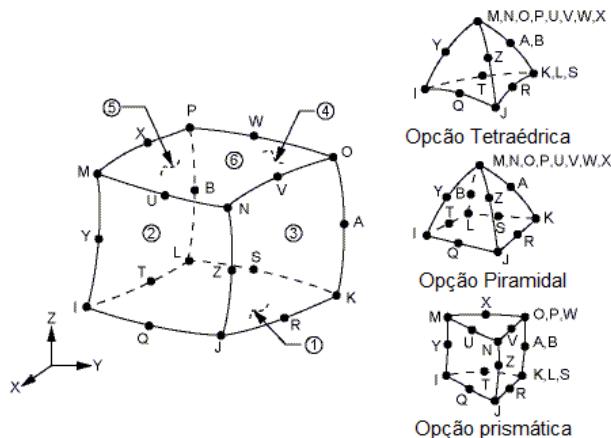


Figura 23 Geometria do sólido 226.

Adicionalmente, nas opções do “*Element Type*”, escolha *Electroelastic/Piezoelectric* como é mostrada na Figura 24.

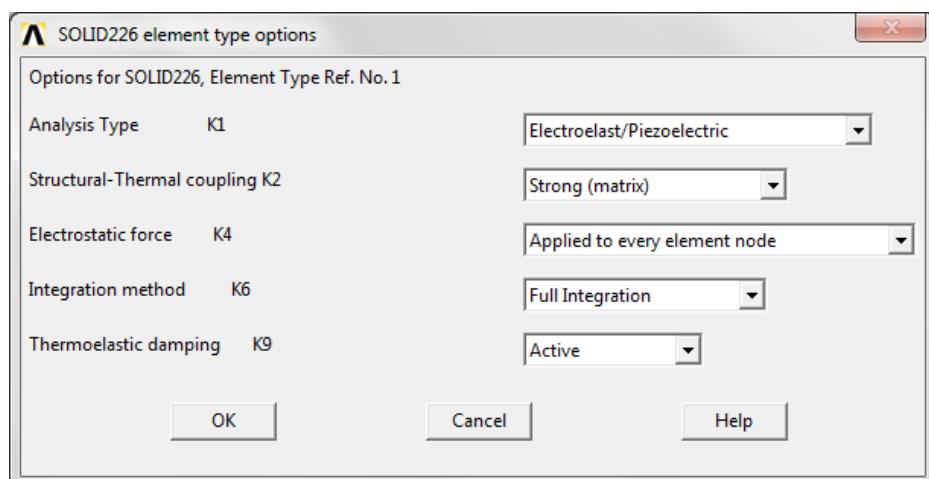


Figura 24 Opções do SOLID226.

A escolha para o estator de bronze foi o SOLID186, que possui a capacidade de representar três graus de liberdade em 20 pontos e suportando diversas propriedades mecânicas. Assim como o SOLID 226, o SOLID186 é uma versão aprimorada do antigo SOLID45.

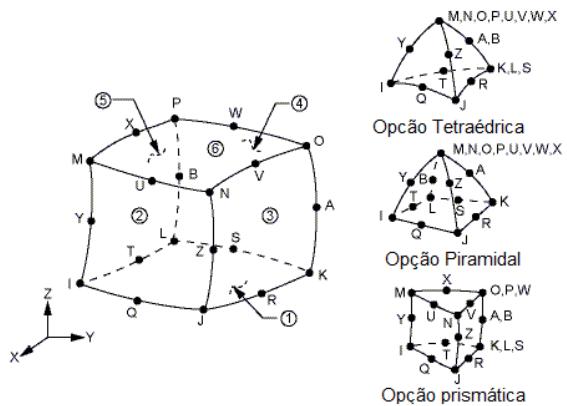


Figura 25 Geometria do sólido 186.

Definição das propriedades dos materiais.

Com os elementos definidos, a próxima etapa é a de caracterizar um material por suas propriedades relevantes na análise. Os materiais aqui utilizados são o bronze e o material piezelétrico (PZT-5A). Nas tabelas estão detalhadas as propriedades que serão inseridas no Ansys.

O caminho é **Preprocessor > Material Props > Material Models**. Na Figura 26 temos os modelos criados para os dois materiais utilizados: a cerâmica piezelétrica, com propriedades em relação ao eixo x (material 1), a cerâmica piezelétrica, com propriedades em relação ao eixo y (material 2) e o bronze (material 3).

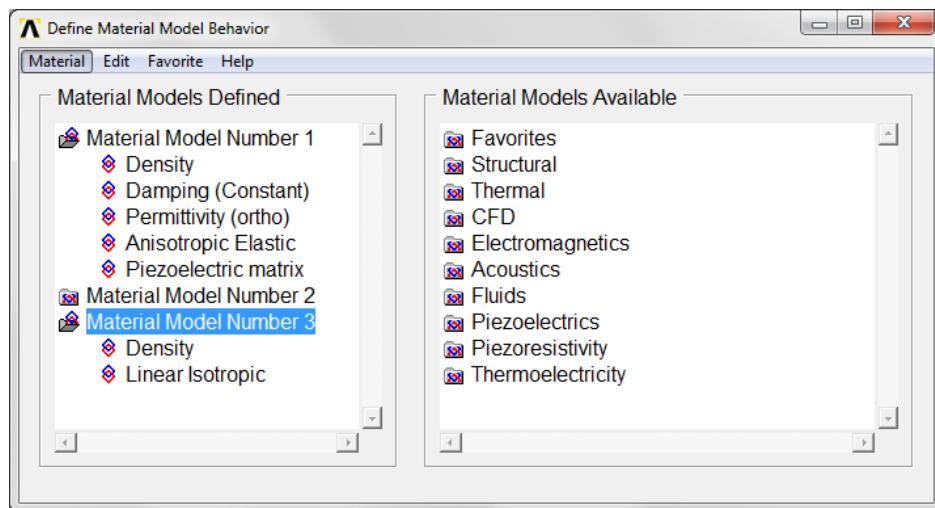


Figura 26 Definição de propriedades dos materiais.

Para cada modelo de material é necessário inserir as propriedades que o representam. Dispondo das características do bronze e da cerâmica x e y, devem-se inserir os dados contidos nas Tabela 3 e Tabela 4 abaixo para seus respectivos modelos.

Tabela 3 Valores para cerâmica, com eixo principal em X e Y, material (1) e (2), respectivamente.

Propriedade	Piezo cerâmica Eixo X	Piezo cerâmica Eixo Y
Matriz piezelétrica	XX	15,8
	XY	0
	XZ	0
	YX	-5,4
	YY	0
	YZ	0
	ZX	-5,4
	ZY	0
	ZZ	0
	XYX	0
	XYY	12,3
	XYZ	0
	YZX	0
	YZY	0
	YZZ	0
	XZX	0
	XZY	12,3
	XZZ	0
Densidade	DENS	7800
Amortecimento	DAMP	5E-8
Permissividade Ortotrópica	PERX	1,5028E-8
	PERY	1,4586E-8
	PERZ	1,4586E-8
Elasticidade Anisotrópica	D11	1,11E11
	D12	7,52E10
	D13	7,52E10
	D14	0
	D15	0
	D16	0
	D22	1,2E11
	D23	7,54E10
	D24	0
	D25	0
	D26	0
	D33	1,2E11
	D34	0
	D35	0
	D36	0
	D44	2,305E10
	D45	0
	D46	0
	D55	2,23E10
	D56	0
	D66	2,305E10

Tabela 4 Valores para bronze material (3).

Densidade	DENS	8580
Lineares Isotrópicas	EX	1,04E11
	PRXY	0,37

Criação da malha de discretização

Nessa etapa é necessário atribuir cada elemento e modelo de material para cada um dos volumes criados na etapa de modelagem. Para isso, utiliza-se o **Preprocessor > Meshing > MeshTool** e na janela que surge será definido o detalhe da malha no *Slider* com extremos *Fine* e *Coarse* e em *Set*, o número do tipo de elemento e o número do material deve ser selecionado. Em “*Mesh*”, selecionam-se os volumes a serem discretizados. Repete-se o processo para os outros volumes. A Figura 27 representa o processo de criação da malha para o estator de bronze.

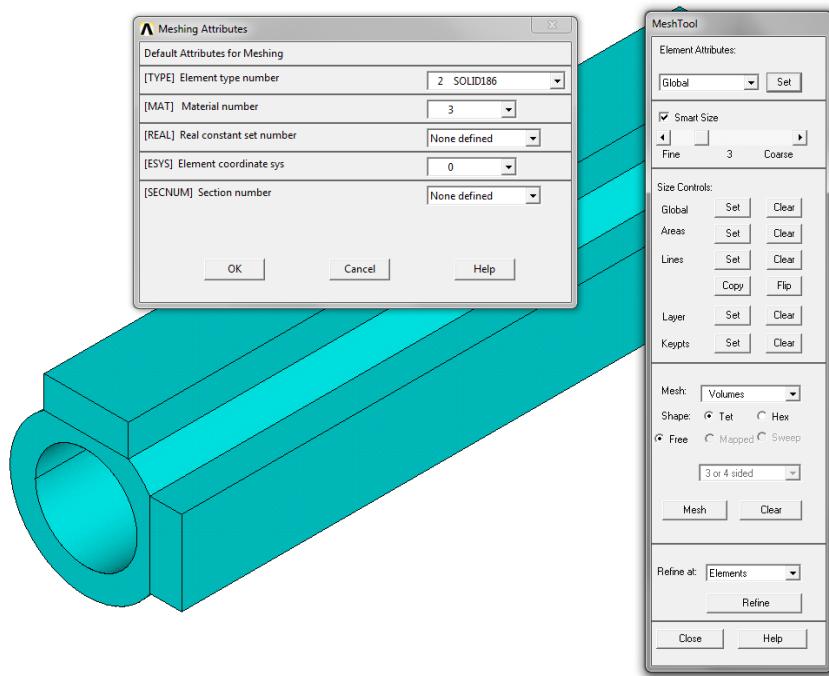


Figura 27 Discretização de elementos.

3.4.2 RESULTADOS DA DISCRETIZAÇÃO

Os resultados obtidos pelas etapas seguidas acima são apresentados na Figura 28. Nesta pode-se observar a malha e os elementos criados a partir do qual o programa fará a análise modal e harmônica do comportamento da estrutura.

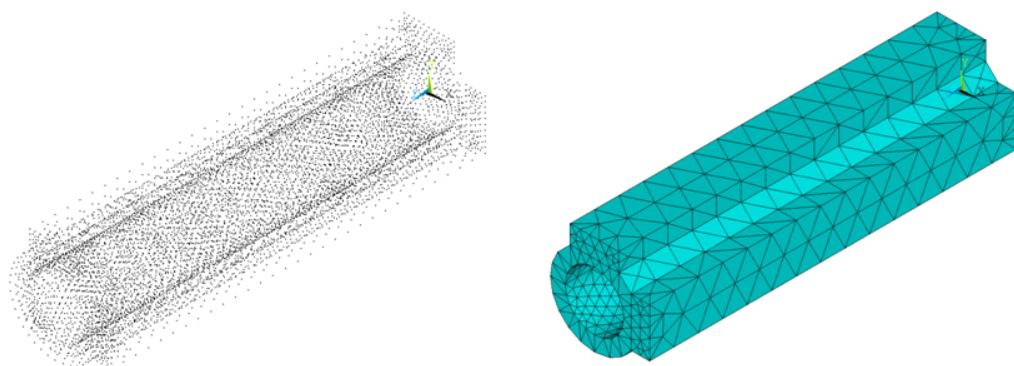


Figura 28 Nós e malha estrutural do motor.

3.5 ANÁLISE MODAL

3.5.1 ETAPAS DA ANÁLISE MODAL

Primeiramente, para obter os dados de frequência natural e modos de vibrar do modelo, é necessária a seleção do tipo de análise a ser realizado, sendo neste caso uma análise modal. Para isso, utiliza-se o caminho **Preprocessor > Loads > Analysis Type > New Analysis > Modal** (figura 29).

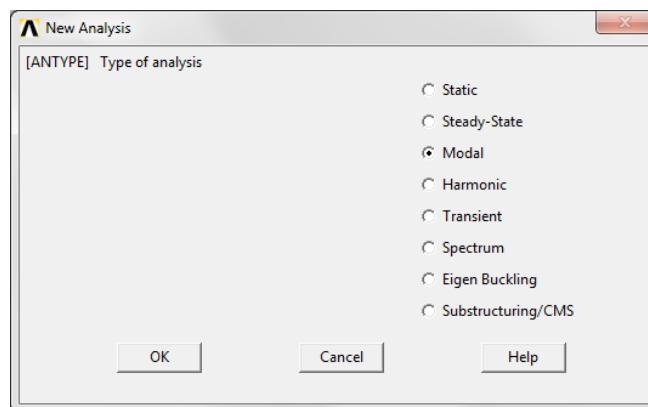


Figura 29 Seleção da análise modal.

Em seguida, é necessário configurar as opções da análise modal. Para isso, utiliza-se o caminho **Preprocessor > Loads > Analysis Type > Analysis Options**, selecionar “Block Lanczos” e definir a quantidade de modos a serem extraídos (Figura 30), e na próxima janela, definir o intervalo de frequências que serão percorridas em busca das frequências naturais.

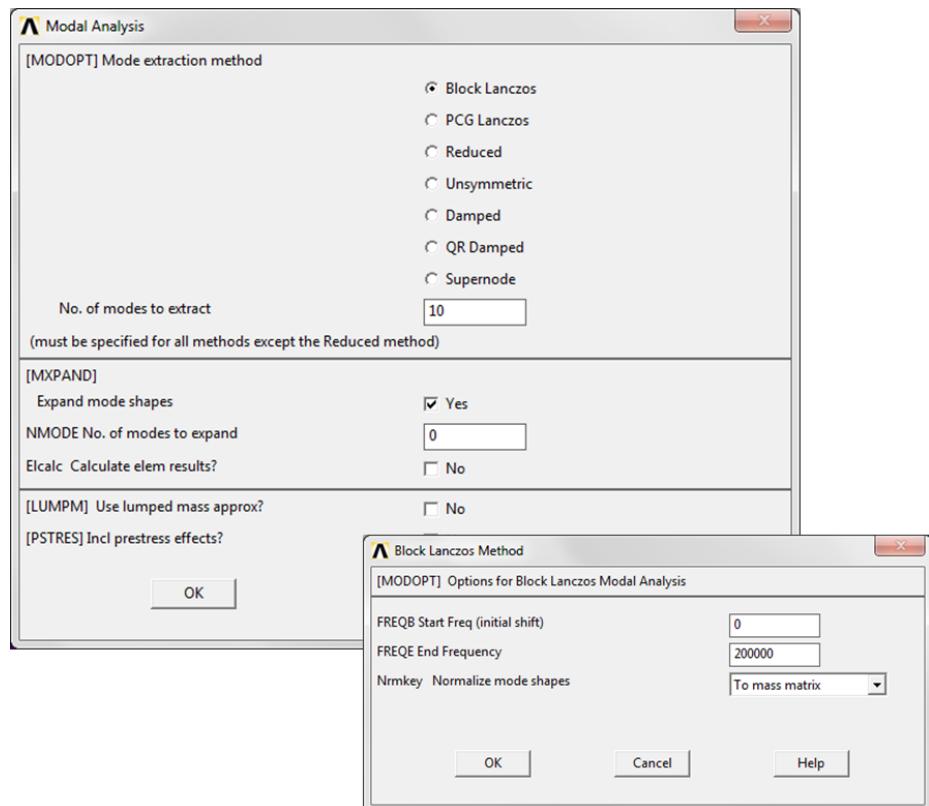


Figura 30 Opções da análise modal.

Finalizada a etapa da escolha tipo de análise, é necessário definir todas as condições de contorno da estrutura.

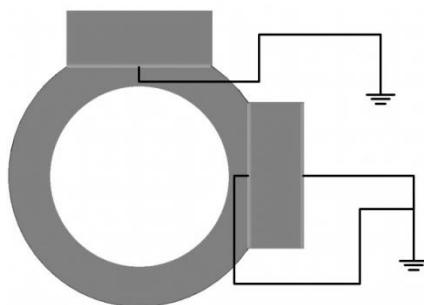


Figura 31 Condições de contorno para análise modal.

Foi definida na análise modal apenas a de potencial elétrico nas faces das placas piezelétricas. No caso, potencial nulo para todas as faces internas das placas piezelétricas, e da face superior da qual se deseja excitar, condições que caracterizam ressonância da placa piezelétrica. Para isso, utiliza-se o caminho

Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Electric > Boundary > Voltage > On Areas, e devem-se selecionar todas as faces necessárias (11 faces) e inserir o valor de zero volt na janela representada na Figura 32.

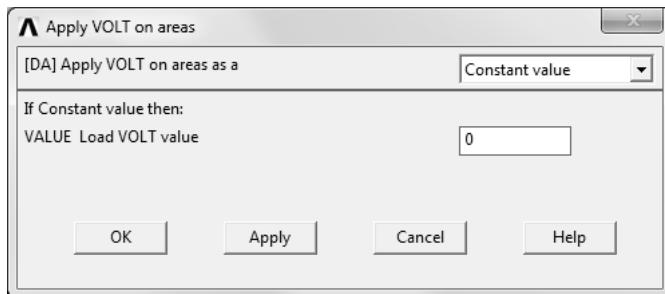


Figura 32 Potencial elétrico na análise modal.

Finalmente deve-se iniciar a resolução no caminho **Solution > Solve > Current LS.**

3.6 ANÁLISE HARMÔNICA

Partindo dos dados da análise modal podem-se obter os modos de vibrar da estrutura para as respectivas frequências.

A frequência que será analisada corresponde ao meio do intervalo composto pelas duas frequências obtidas na análise modal. O movimento de oscilação é gerado pela excitação da placa piezelétrica na mesma frequência.

3.6.1 ETAPAS DA ANÁLISE HARMÔNICA

Primeiramente, para obter os dados de frequência natural e modos de vibrar do modelo, é necessária a seleção do tipo de análise a ser realizado, sendo neste caso uma análise harmônica. Para isso, utiliza-se o caminho **Preprocessor > Loads > Analysis Type > New Analysis > Harmonic.**

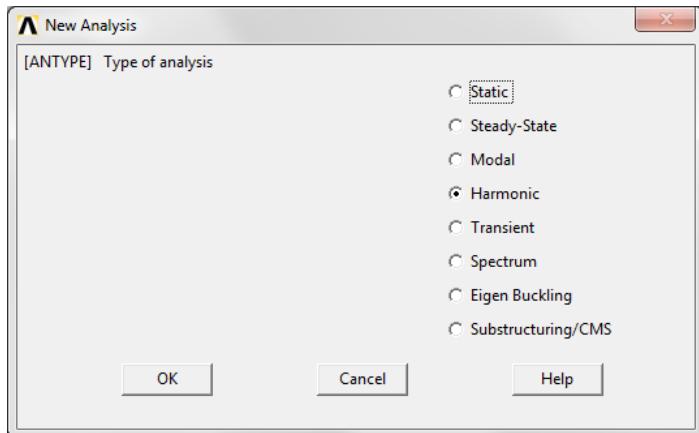


Figura 33 Seleção da análise harmônica.

Em seguida, devem-se definir as condições de contorno aplicadas na estrutura. Na análise harmônica, todas as faces da cerâmica devem ser aterradas, com exceção da que sofrerá influência do potencial elétrico (400 volts).

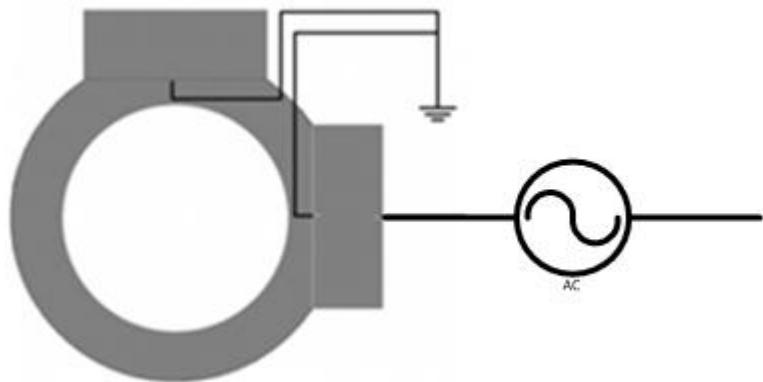


Figura 34 Condições de contorno para análise harmônica.

O caminho para definir os carregamentos e condições de contorno é **Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Electric > Boundary > Voltage > On Areas**, devendo selecionar as faces externas e definindo o valor de 400 no campo real e zero no campo imaginário como aparece na Figura 35.

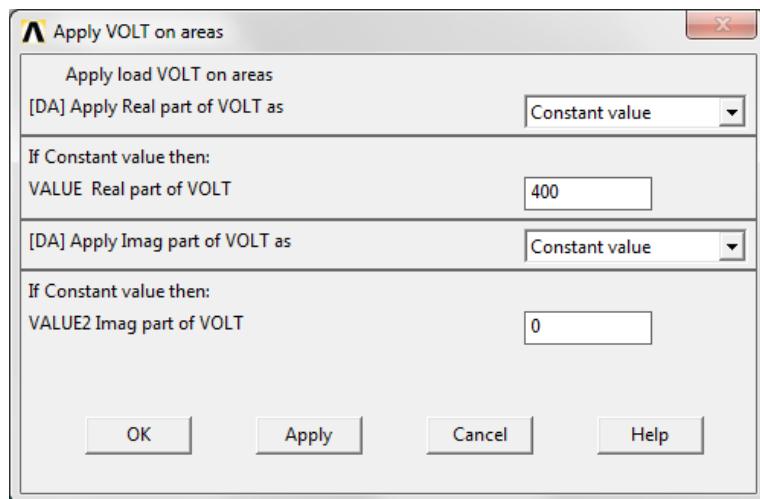


Figura 35 Potencial elétrico na análise harmônica.

Agora, é necessário configurar as opções da análise harmônica. Para isso, utiliza-se o caminho **Solution > Load Step Opts > Time/Frequency > Freq and Substeps**, deve-se inserir o intervalo de frequências que contenha os modos de vibrar piezelétricos selecionados (no caso 60-80 kHz), e a quantidade de substeps (numero de subdivisões do intervalo).

Por último devemos especificar o valor para o amortecimento estrutural que será considerado durante a análise harmônica, esta etapa é importante pois é o amortecimento que gera a defasagem dos modos de vibrar, conceito principal para o funcionamento do motor.

No caminho **Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/ Frequency > Damping** inserimos o valor de 0,02.

Finalmente deve-se iniciar a resolução no caminho **Solution > Solve > Current LS**.

4 RESULTADOS

As simulações foram realizadas em um computador com as seguintes especificações técnicas:

- Operating System - Microsoft Windows 7 Professional
- CPU Type - QuadCore Intel Core i7-930, 4000 MHz (20 x 200)
- Motherboard Name - Asus Rampage III Extreme (1 PCI, 1 PCI-E x4, 4 PCI-E x16, 6 DDR3 DIMM, Audio, Gigabit LAN, IEEE-1394)
- Motherboard Chipset - Intel Tylersburg X58, Intel Nehalem
- 12 GB DDR3-1333 (9-9-9-24 @ 666 MHz) (8-8-8-22 @ 592 MHz) (6-6-6-16 @ 444 MHz)

4.1 RESULTADOS DA ANÁLISE MODAL

Os resultados obtidos pelas etapas descritas acima serão apresentados na tabela. Deve-se dar atenção ao fato de que nem todos os modos de vibrar obtidos como resultado da análise modal são piezelétricos. Tais modos são restritamente mecânicos e não apresentam resposta a estímulos elétricos. A diferença entre modos piezelétricos e mecânicos pode ser identificada com uma comparação entre os valores absolutos de frequências naturais entre a simulação objetivo desse projeto (ressonância, teste A) e uma simulação onde a face externa da placa piezelétrica duplamente aterrada é aberta (anti-ressonância, teste B).

Modos mecânicos são diferenciados por terem autovalores iguais (frequências de ressonância) para as duas condições de contorno descritas acima, o que significa que são independentes das condições de contorno elétricas, ou seja, são modos de vibrar puramente mecânicos.

A Tabela 5 representa as frequências naturais respectivas a seus modos de vibrar para as duas análises, e a identificação dos modos piezelétricos e os mecânicos.

Tabela 5 Modos de vibrar.

Modo de Vibrar	Teste A [kHz]	Teste B [kHz]	Variação
1	36,0	37,1	3%
2	37,2	37,6	1%
3	47,2	47,2	0%
4	75,6	77,2	2%
5	77,0	77,7	1%
6	82,4	84,1	2%
7	94,1	94,2	0%
8	101,0	101,0	0%
9	102,0	102,0	0%
10	107,6	107,7	0%

 Modos Piezelétricos
 Modos Mecânicos

Identificados os modos de vibrar, partimos para a escolha da espessura da placa piezelétrica, e para isso utilizaremos a distância relativa entre os modos selecionados. Na Tabela 6, são representados os pares de modos de vibrar piezelétricos para as diferentes espessuras de placas disponíveis.

Tabela 6 Resultados análise modal.

Espessura placa	1º Modo [kHz]	2º Modo [kHz]
0.2 mm	38,03	38,63
0.4 mm	37,83	38,53
1.0 mm	36,00	37,17

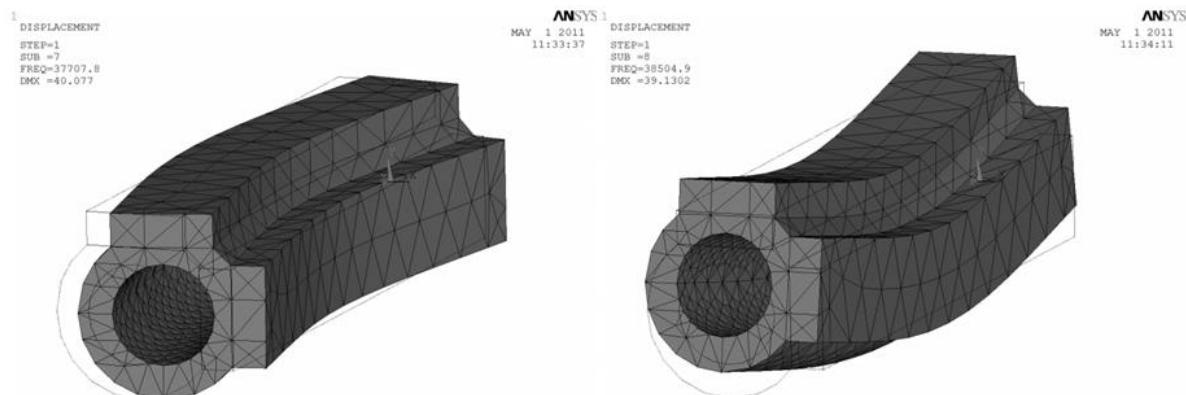


Figura 36 Resultados gráficos para espessura de 1,0 mm.

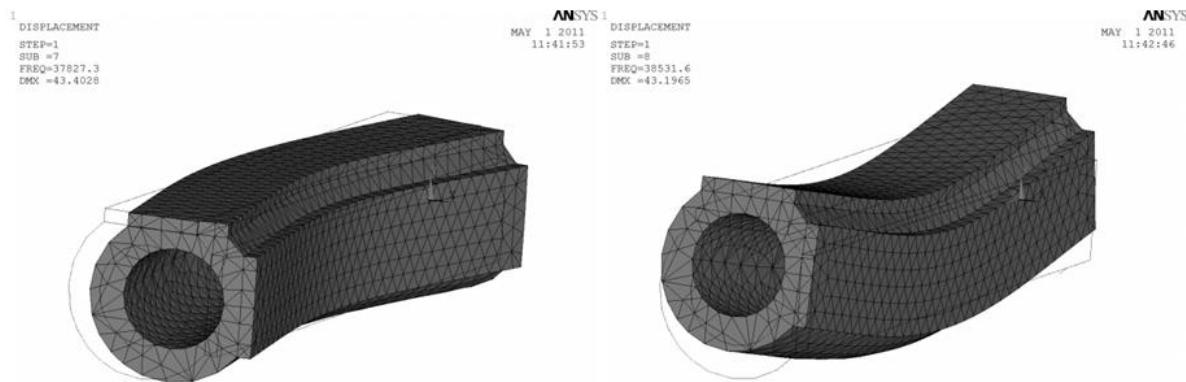


Figura 37 Resultados gráficos para espessura de 0,4 mm.

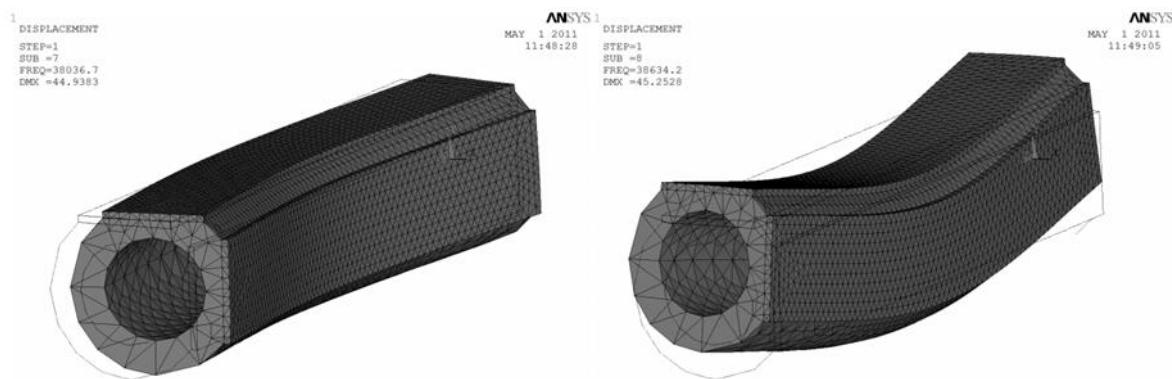


Figura 38 Resultados gráficos para espessura de 0,2 mm.

Observando os resultados encontrados nas figuras pode-se concluir que a melhor opção de espessura para as placas piezelétricas são as de espessura de 1,0 mm, pois as mesmas proporcionam um maior distanciamento entre as duas frequências dos modos de vibrar relevantes para a composição de movimento. Tal distanciamento traria maior facilidade em projetar um excitador elétrico para as placas, que deve ser calibrado para uma frequência entre os dois modos.

4.1.1 COMPARAÇÃO COM MOTOR DA TESE DE K. USHINO

Esta seção tem o objetivo de simular o motor descrito na tese de Kenji Ushino e comparar os resultados da simulação realizada pelo autor, podendo desta forma validar os resultados obtidos com as medidas propostas de fabricação do modelo.

Os resultados das frequências dos modos de ressonância que são apresentados na tese são as frequências de 71,8 e 74,0 kHz.

Seguindo todas as etapas de modelagem e discretização detalhadas nas seções anteriores partindo das medidas detalhadas na tabela, foi criado um modelo igual ao representado na tese de K. Ushino.

Os resultados obtidos no ambiente de simulação do Ansys foram de 71,08 e 73,54 kHz, que comparados com os resultados da tese de K. Ushino apresentam proximidade.

Após esta verificação da consistência de simulações pode-se obter maior segurança de resultados corretos nas simulações realizadas.

4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE HARMÔNICA

O objetivo da analise harmônica é de demonstrar o funcionamento do motor, que consiste na resposta simultânea de dois modos de vibrar distintos e perpendiculares. O gráfico da Figura 39 representa os deslocamentos de um nó do motor num intervalo de frequências. Através da inspeção do mesmo, podemos observar que na região entre 35,0 kHz e 38,0 kHz temos deslocamentos em X e Y, dando bases para a teoria de que ao se excitar uma das placas piezelétricas com uma voltagem senoidal com frequência de 35~38 kHz e amplitude de 400 V, haverá o movimento oscilatório de rotação. Deve-se ressaltar que essa oscilação é resultado da defasagem entre os dois modos de vibrar, que é provocada pelo amortecimento estrutural do motor.

Análise Harmônica - Frequência x Deslocamento

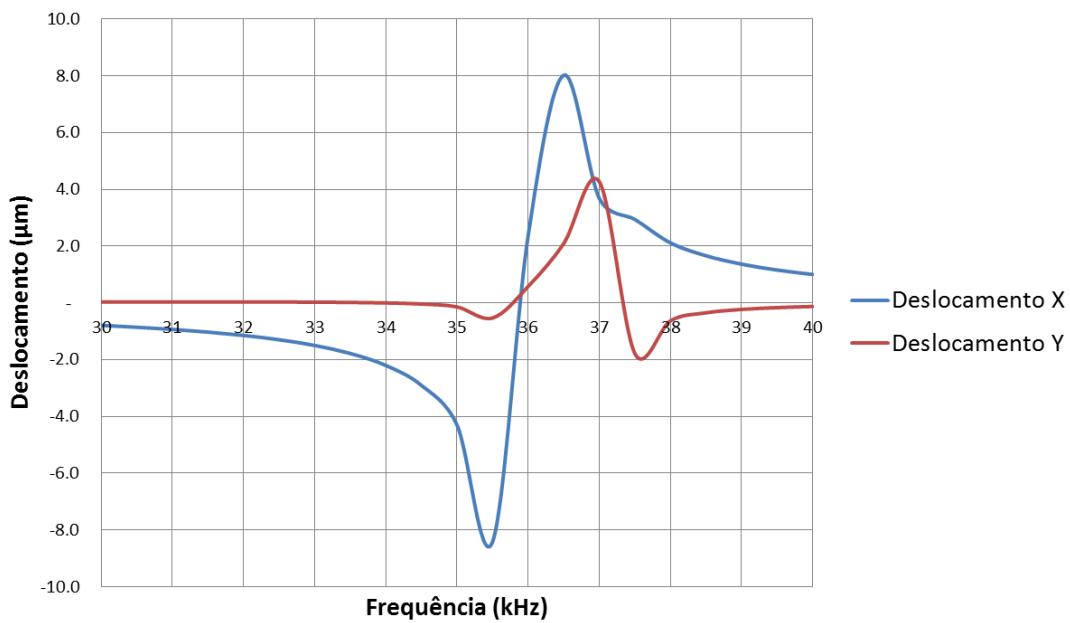


Figura 39 Gráfico de frequência por deslocamento.

Exportando os deslocamentos complexos para um arquivo de texto e processando no Matlab (anexo 5.2.1) obtemos as seguintes curvas para um nó na face externa da cerâmica excitada.

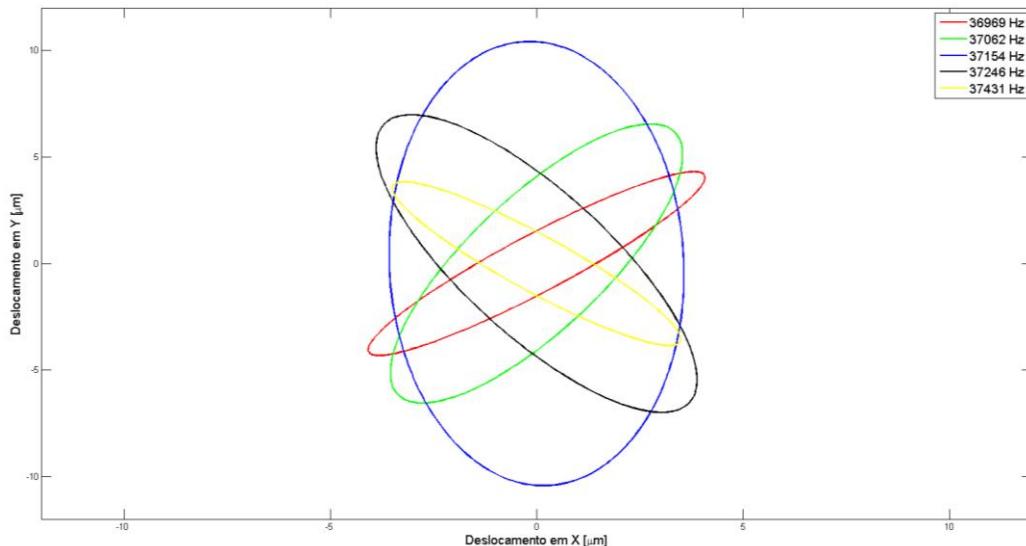


Figura 40 Figura de *Lissajou* para o nó externo.

É possível também obter uma visualização da maneira que o motor se comportaria ao ser submetido a frequência de excitação de 37,15 kHz (anexo 5.2.1).

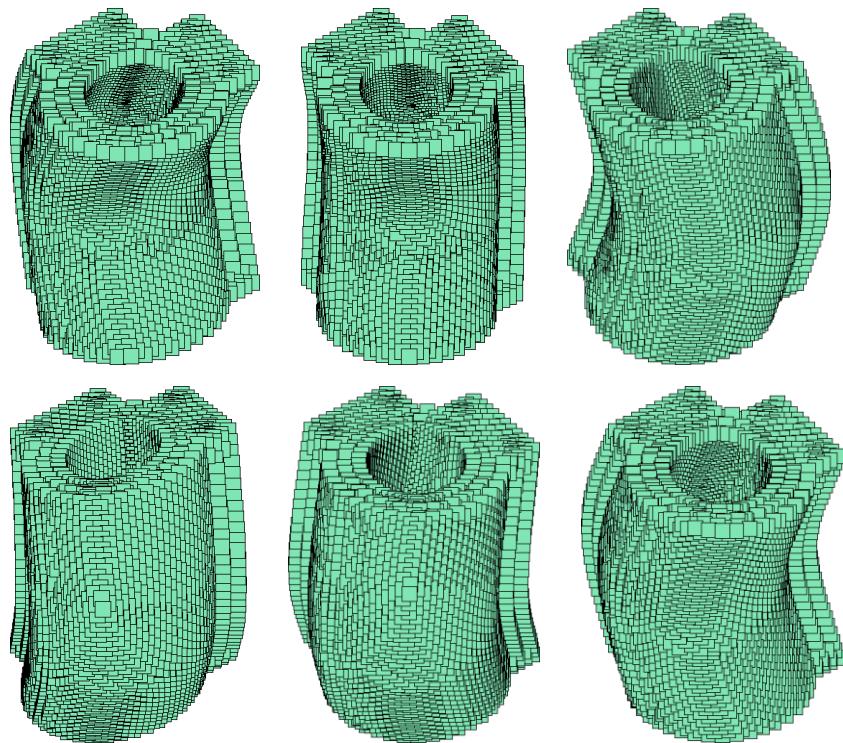


Figura 41 Sequência de figuras que representam o funcionamento do motor.

4.3 SIMULAÇÃO DE FUNCIONAMENTO

Na próxima etapa é necessário verificar o correto funcionamento das configurações projetadas. Partindo de uma simplificação do motor seguindo as medidas especificadas e a metodologia apresentada na seção 3, chegamos aos resultados de frequência esperada de funcionamento, representadas nas figuras de *lissajou* a seguir.

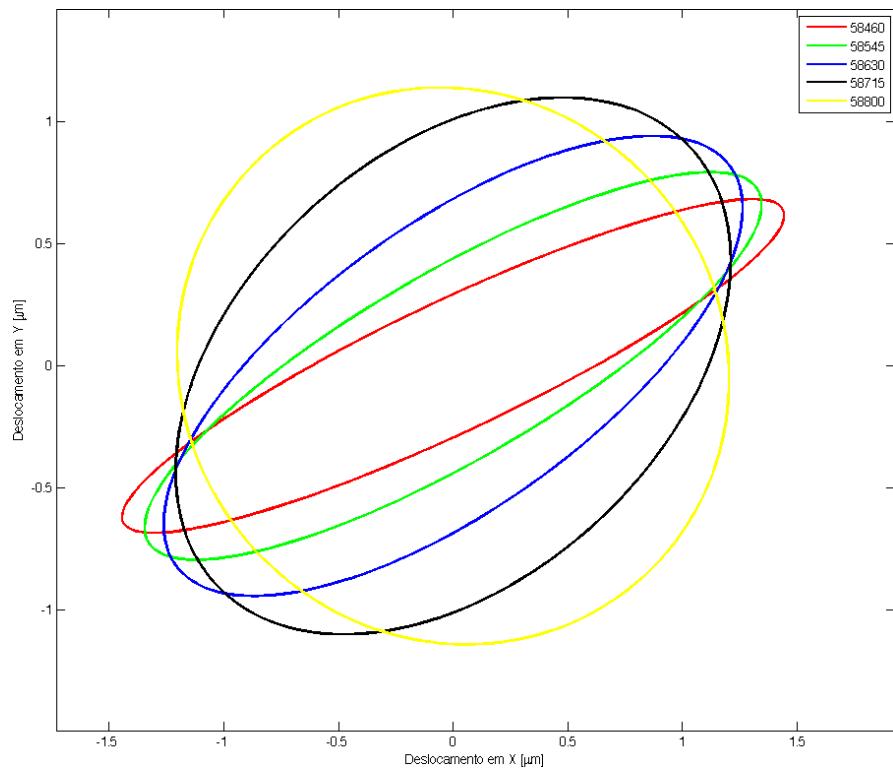


Figura 42 Figura de *lissajou* para o nó externo com comprimento de cilindro de 15mm

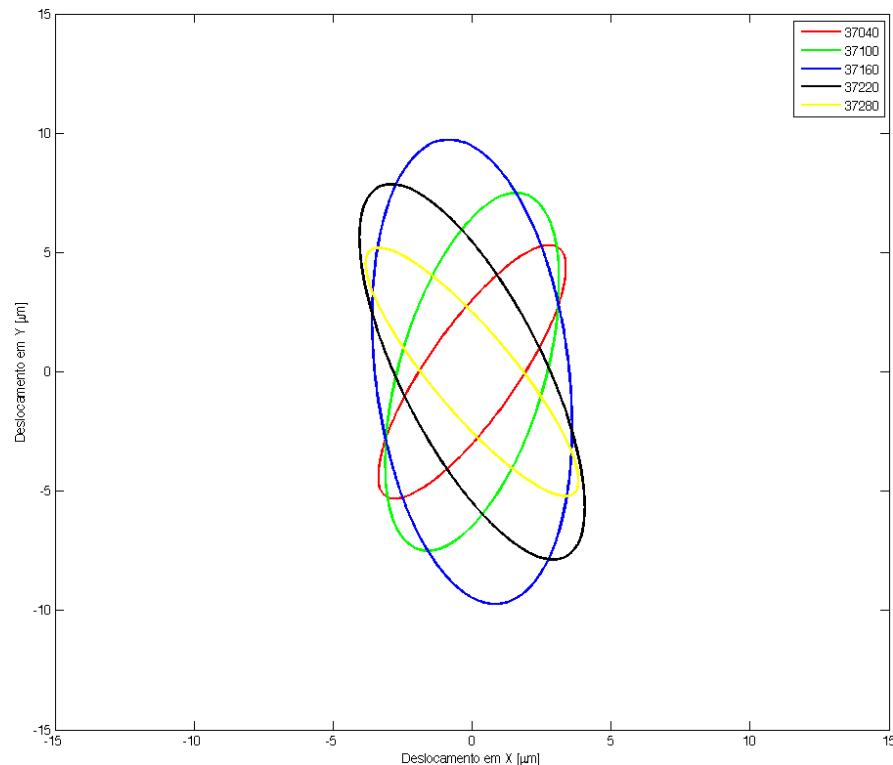


Figura 43 Figura de *lissajou* para o nó externo com comprimento de cilindro de 20mm

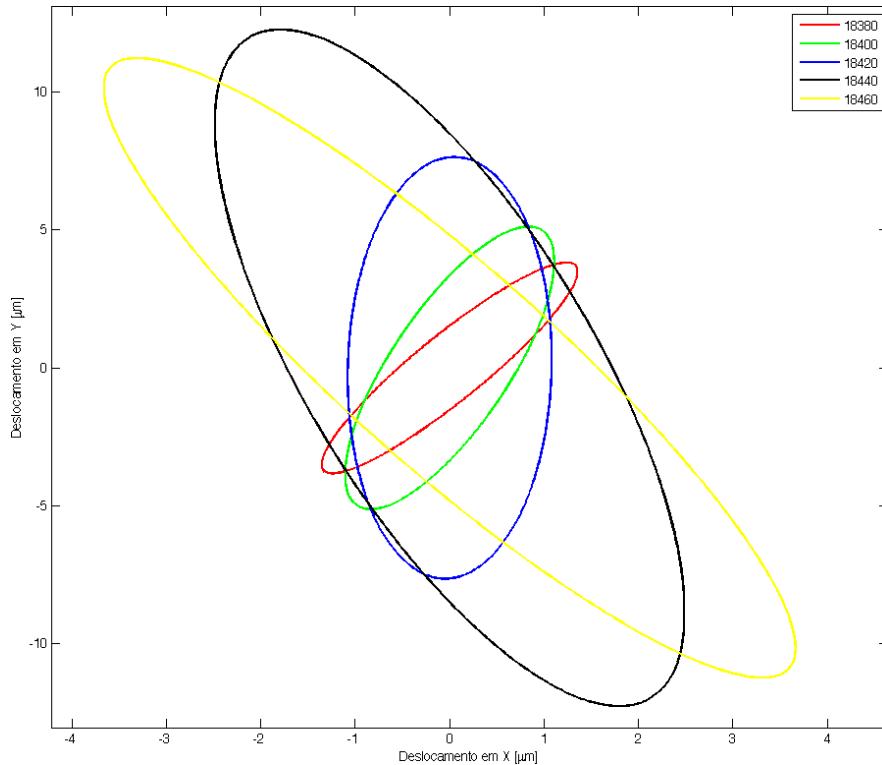


Figura 44 Figura de *lissajou* para o nó externo com comprimento de cilindro de 30mm

Observando o comportamento das Figuras de *lissajou*, conclui-se que a melhor configuração é projetar um cilindro com comprimento de 20 mm (Figura 43), que apresenta uma boa distribuição de deslocamentos em função das frequências de excitação, assim como suficientes amplitudes de deslocamento.

4.4 FABRICAÇÃO E TESTE

4.4.1 PROJETO E FABRICAÇÃO

Tendo como base o modelo apresentado por Uchino et al. (2003), foi feito o projeto do motor piezelétrico rotativo. Como apresentado anteriormente, o estator do motor consiste basicamente de um cilindro vazado com dois chanfros na sua lateral onde são fixadas duas cerâmicas piezelétricas. Quando uma dessas cerâmicas é excitada com um sinal senoidal de frequência específica, as extremidades do conjunto oscilam em um movimento elíptico que é transmitido para o eixo do motor por meio de atrito.

Dessa forma, o mecanismo projetado para realizar essa transmissão através de atrito consiste em um par de buchas, que efetuam o contato entre estator cilíndrico e eixo, e uma mola pré-tensionada que garante contato entre partes mesmo havendo a deformação esperada no conjunto do estator.

Para se ajustar a pré-tensão da mola de maneira satisfatória, foi feita uma rosca no eixo e com uma porca é possível regular a deformação inicial da mola. Além disso, para que a mola fique melhor apoiada, duas arruelas são colocadas em contato com as extremidades dela. Na figura abaixo é possível se ter uma visão geral do motor projetado.

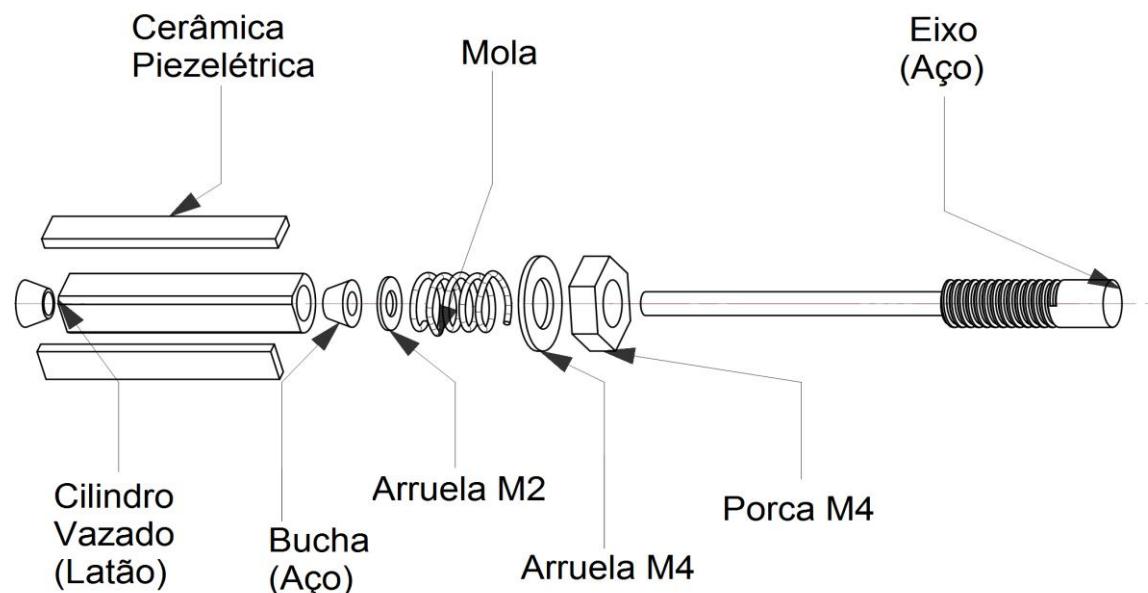


Figura 45 Esquema do desenho de montagem do motor

O cilindro do estator, feito de latão, possui comprimento de 20 mm, diâmetro externo de 5 mm e furo de 3 mm. O chanfro é feito de forma que a superfície chanfrada diste 2 mm do centro do cilindro.

O eixo, feito de aço inox, possui uma parte com diâmetro de 2 mm que vai inserida dentro do estator cilíndrico e outra com diâmetro de 4 mm onde é usinada a rosca. A escolha dos diâmetros diferentes foi feita apenas para facilitar a usinagem da rosca.

As buchas, feitas também de aço inox, tem como diâmetro externo máximo 4 mm, diâmetro interno de 2 mm, altura de 2 mm e a superfície externa faz um ângulo de 20º com o eixo de simetria do cilindro. A bucha da base é colado no eixo

utilizando-se cola epóxi enquanto a outra é apenas colocada, sendo pressionada pela mola contra estator.

As cerâmicas piezelétricas utilizadas são do tipo PZT5A, com 1mm de espessura. Primeiramente foi realizada a solda dos conectores no eletrodo da parte inferior das cerâmicas, que vai em contato com o cilindro. Em seguida as cerâmicas foram coladas no cilindro utilizando-se cola epóxi. Por último foram realizadas as soldas na parte superior da cerâmicas.

Vale salientar que se a cola utilizada for isolante é recomendável cortar as cerâmicas com comprimento de alguns milímetros maior que comprimento do cilindro para facilitar a soldagem dos conectores e permitir um melhor contato entre a superfície do cilindro e cerâmicas, sem influência da solda. Caso a cola seja condutora, é possível soldar conectores diretamente no cilindro do estator.

Uma vez de posse de todas as peças, a sequência de montagem do motor pode ser descrita como: inserir rosca, arruela M4, mola e arruela M2 no eixo, nessa ordem; inserir uma das buchas no eixo; inserir eixo no estator cilíndrico (de preferência com cerâmicas já coladas); colar, utilizando cola epóxi, a outra bucha na extremidade do eixo; regular tensão da mola através da posição da porca.

4.4.2 TESTES DO PROTÓTIPO

Após a fabricação e montagem concluídas, o passo seguinte foi realizar testes com o protótipo. Inicialmente, para varrer e verificar as frequências de ressonância do protótipo, foi utilizado um impedômetro (*Agilent 4294A - Precison Impedance Analyzer*). Retirando a pré-tensão da mola, tentando isolar apenas efeito do estator deformando-se, foi possível identificar as frequências de ressonância por volta do 30kHz conforme dados obtidos na simulação computacional.



Figura 46 Saída do impedômetro.

Realizadas essas observações, partiu-se para montagem dos equipamentos para de fato fazer motor funcionar. Assim, foram utilizados: um gerador de funções (*Agilent 33250A - 80MHz Function/Arbitrary Waveform Generator*), um amplificador (*AR Worldwide Model 8000A3*), uma garra para fixação, um tacômetro óptico para medir a velocidade rotação média do rotor (*Digital Tachometer DT-2234C+*).



Figura 47 Gerador de funções e amplificador utilizados

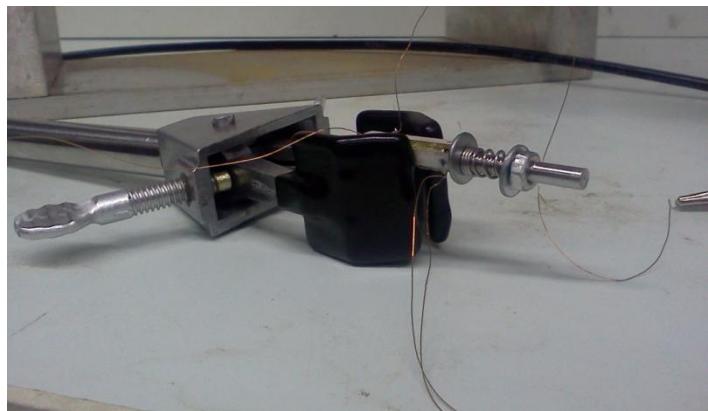


Figura 48 Motor fixado e conectado no conjunto da fonte

Então, ligou-se o gerador de funções no amplificador e a saída desse em uma das cerâmicas piezelétricas, ficando a outra aterrada dos dois lados. Gerando um sinal senoidal e varrendo-se as frequências em torno de 30kHz foi possível identificar pontos em que movimento do motor ocorria com maior intensidade, chegando-se, então, a uma frequência de 29,6kHz no gerador de funções, com uma amplitude de tensão no motor de cerca de 100V.

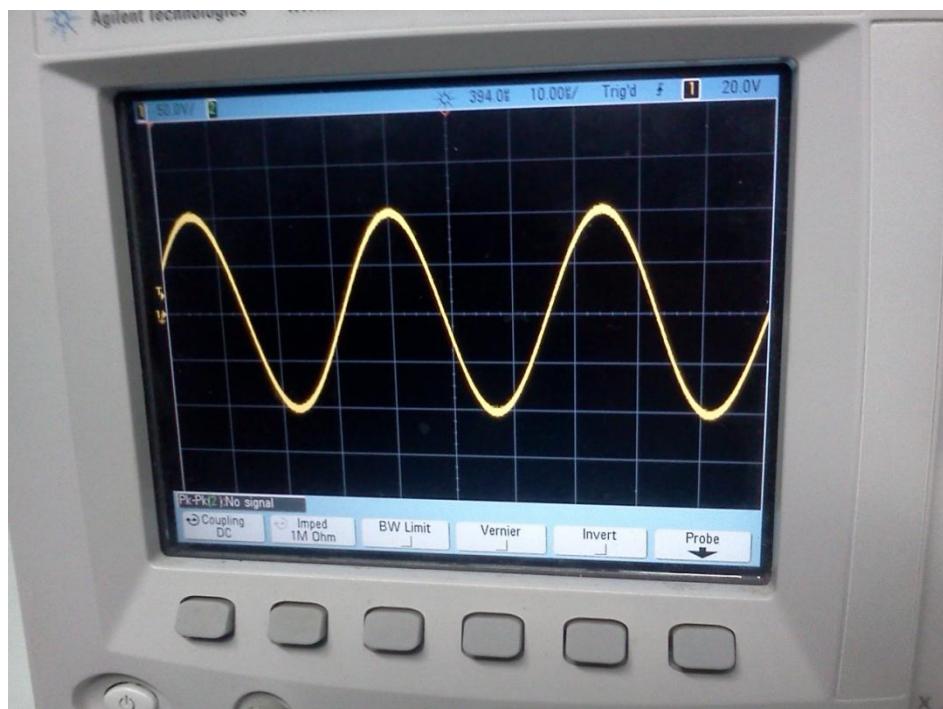


Figura 49 Tensão medida pelo osciloscópio. Amplitude de 100V



Figura 50 Gerador de funções ajustado com onda senoidal de frequência 29,6 kHz

Com o sinal senoidal de frequência 29,6kHz, o motor funcionou, efetuando rotações com uma velocidade média de 130rpm.

O fato do valor da frequência obtido experimentalmente ter sido menor que o obtido na simulação por elementos finitos decorre do fato das propriedades do motor não serem completamente conhecidas e modeladas. Na verdade, essa diferença de certa forma esperada, já que as simulações foram feitas levando-se em conta apenas o estator (cilindro e cerâmicas), enquanto que na prática tem-se a presença do eixo, que acrescenta bastante inércia ao conjunto do motor.

Durante os testes, foi possível observar uma influência razoável da pré-tensão da mola sobre funcionamento do motor, que altera suas condições de contorno. Estando a pré-tensão baixa e a mola frouxa a transmissão por atrito praticamente não ocorre e rotor não gira. Se a pré-tensão está muito alta o eixo fica travado e nada acontece também. Assim, existe um intervalo de pré-tensões em que conjunto opera de maneira satisfatória.

5 CONCLUSÃO

Nesse trabalho foram realizadas simulações, o projeto e a fabricação de um motor piezelétrico rotativo seguindo o modelo apresentado por Uchino et al. (2003).

O motor é composto por um cilindro vazado com dois chanfros ortogonais na sua face externa, onde são fixadas duas cerâmicas piezelétricas. A assimetria causada pelos chanfros produz dois modos de vibrar ortogonais cujas frequências de ressonância estão bem próximas. Quando se excita uma das cerâmicas com um sinal senoidal cujo valor da frequência se encontra entre as frequências de ressonância dos dois modos ortogonais, devido ao amortecimento presente no sistema, a extremidade do conjunto realiza um movimento elíptico, que é transmitido para o rotor através de atrito.

Dessa forma, o comportamento oscilatório do estator cilíndrico pode ser simulado utilizando-se o software comercial de elementos finitos *Ansys*, obtendo-se as frequências de ressonância dos dois modos de vibrar ortogonais. Esse modelo computacional permitiu ainda que as dimensões do cilindro e das cerâmicas fossem alteradas verificando o impacto sobre o comportamento do motor.

De posse dessas informações, um protótipo foi projetado e construído a fim de se validar simulações computacionais. Após fabricado, o motor também foi analisado em um impedômetro, sendo possível observar as frequências de ressonância do motor. Por fim, o motor foi colocado para funcionar apresentando um comportamento compatível com o esperado e com o simulado.

6 REFERÊNCIAS BIBIOGRÁFICAS

ANSYS, INC. **ANSYS Commands Reference.** [S.I.]: [s.n.], 2011.

ANSYS, INC. **Elements Reference.** [S.I.]: [s.n.], 2011.

ANSYS, INC. **Theory Reference.** [S.I.]: [s.n.], 2011.

IKEDA, T. **Fundamentals of Piezoelectricity.** Oxford: Oxford University Press, 1996.

UCHINO, K.; GINIEWICZ,J.R. **Micromechatronics.** Nova Iorque: Marcel Dekker, Inc., 2003.

UCHINO,K. **A 1.6-mm, Metal Tube Ultrasonic Motor.** IEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, v. 50, n. 7, p. 782 - 786, 2003.

UCHINO,K. **Introduction to Piezoelectric Actuators and Transducers.**

KOC, B.; CAGATAY, S.; UCHINO,K. **A Piezoelectric Motor Using Two Orthogonal Bending Modes of a Hollow Cylinder.** IEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, v. 49, n. 4, p. 495 - 500, 2002.

VINHAIS, H.F.; IBRAHIM,R.C.; SILVA,E.C.N. **Simulation of a Linear Piezoelectric Motor by Using Finite Element Method.** [Rio de Janeiro]: ABMC, 2004. v. 1.

KOC, B.; BASARAN,D.; AKIN,T; ERDEN, A. **Design of a Piezoelectric Ultrasonic Motor for Micro-Robotic Application.** Trabalho apresentado a *The 6th International Conference on Mechatronic Design and Modeling (MDM)*, 2002, Capadocia. Disponível em: < <http://design.atilim.edu.tr/pubs/mdm2002-25.pdf>>. Acesso em: 27 jun. 2011.

7 ANEXOS

7.1 DESENHOS DE FABRICAÇÃO

1

2

3

4

5

6

D

D

C

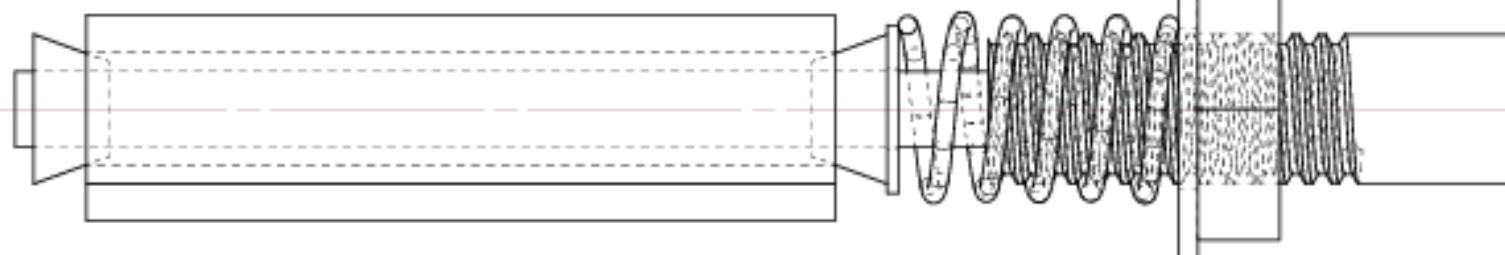
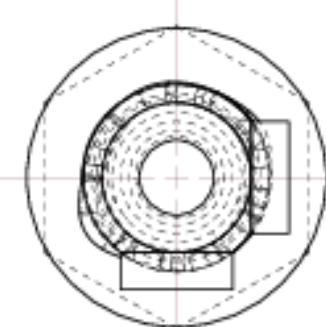
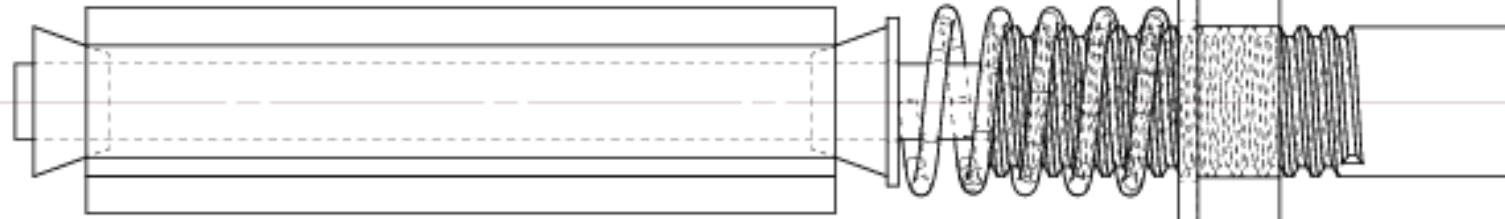
C

B

B

A

A



PMR2550
Projeto de Conclusão do Curso
Escola Politécnica
Universidade de São Paulo

Material: Aço/Latão

Tolerância: 0.05 mm

Projetado por:
Diego Papa Rodrigues
Douglas F.W.C. Martins

Motor Piezelétrico

Desenho

Desenho de Conjunto

Folha
A4

Número

CJ - 01

Revisão
2

Escala 5:1 Data: 10/10/2011 Medidas em mm Página 1 de 6

1

2

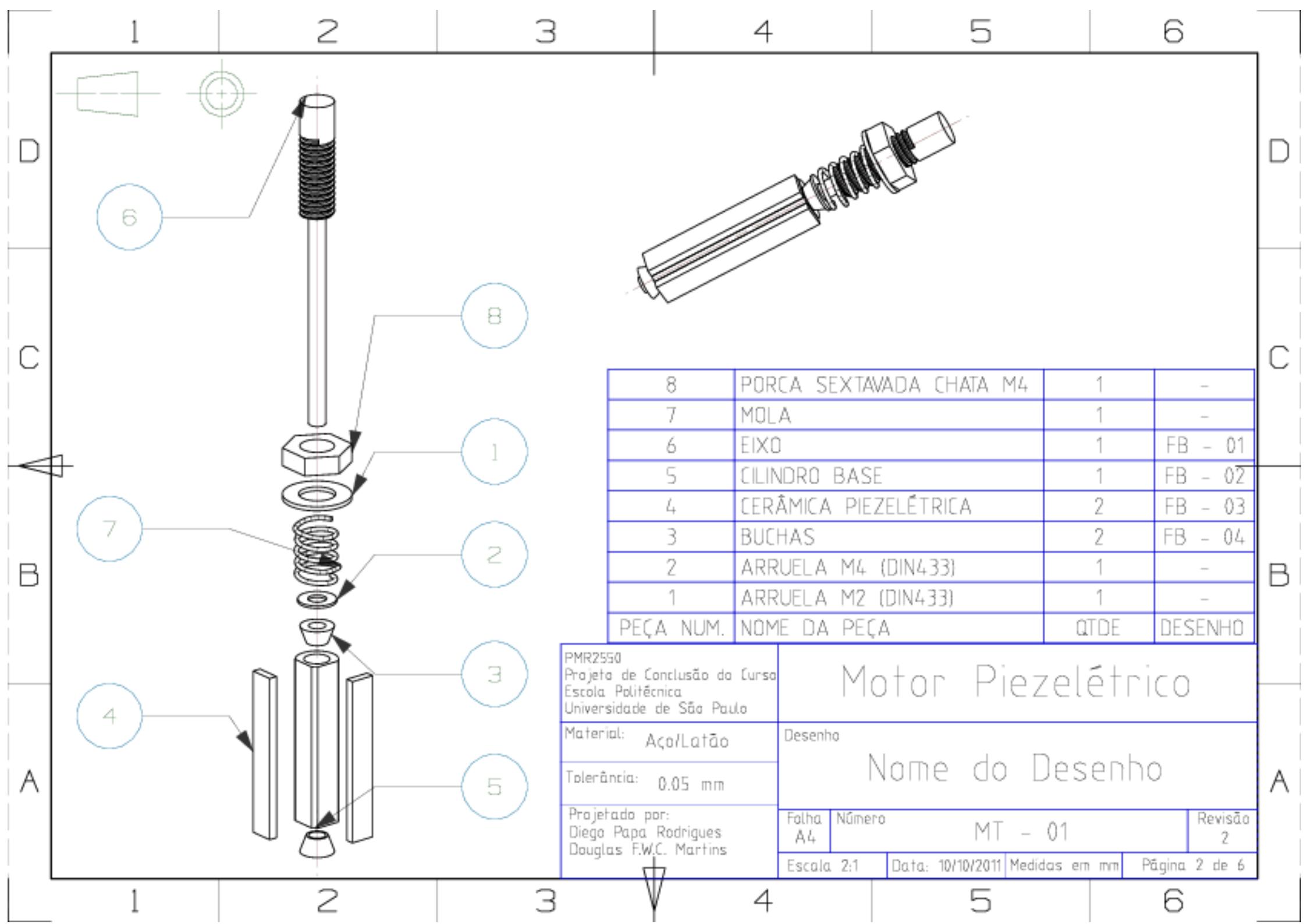
3

4

5

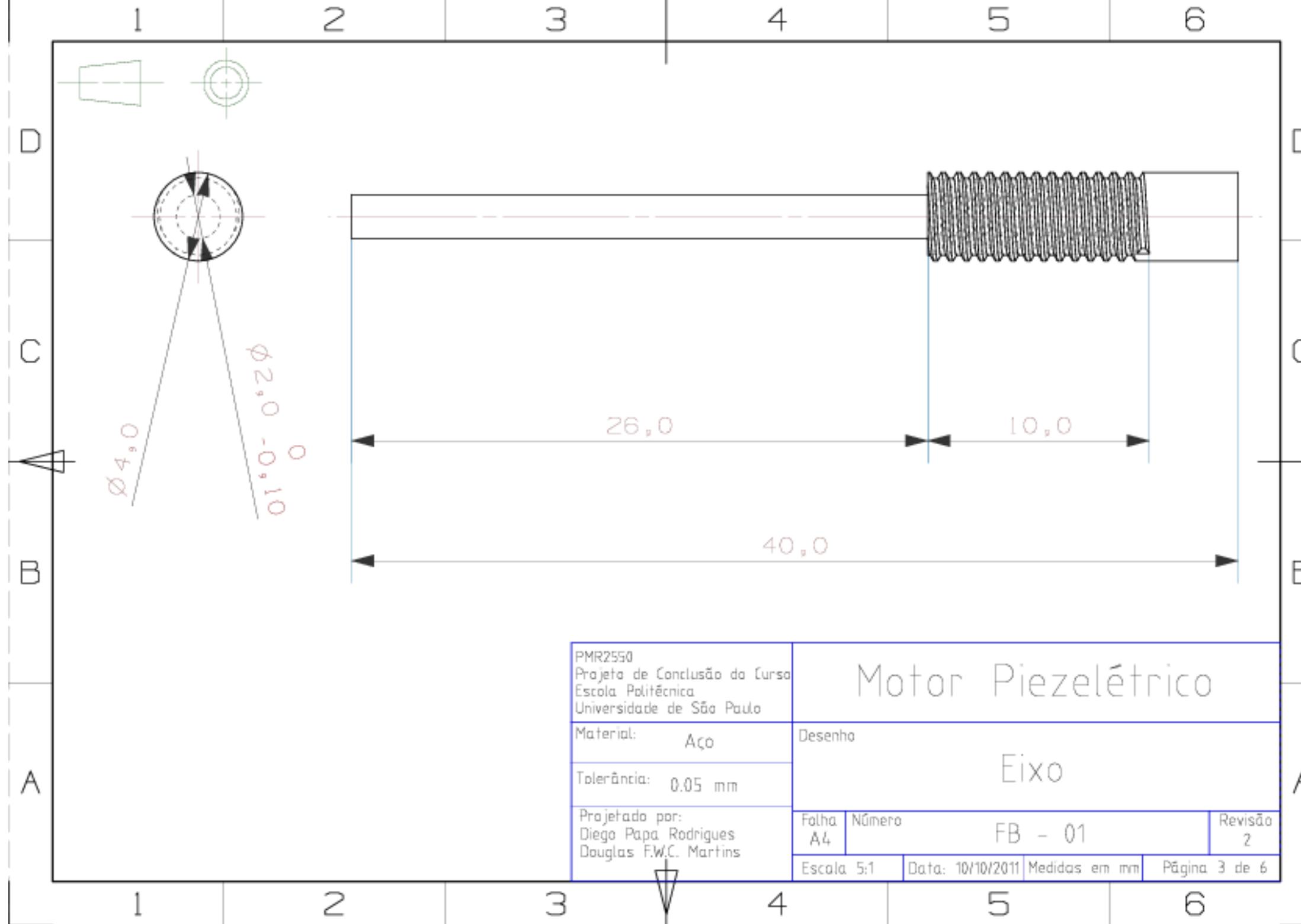
6

1 2 3 4 5 6

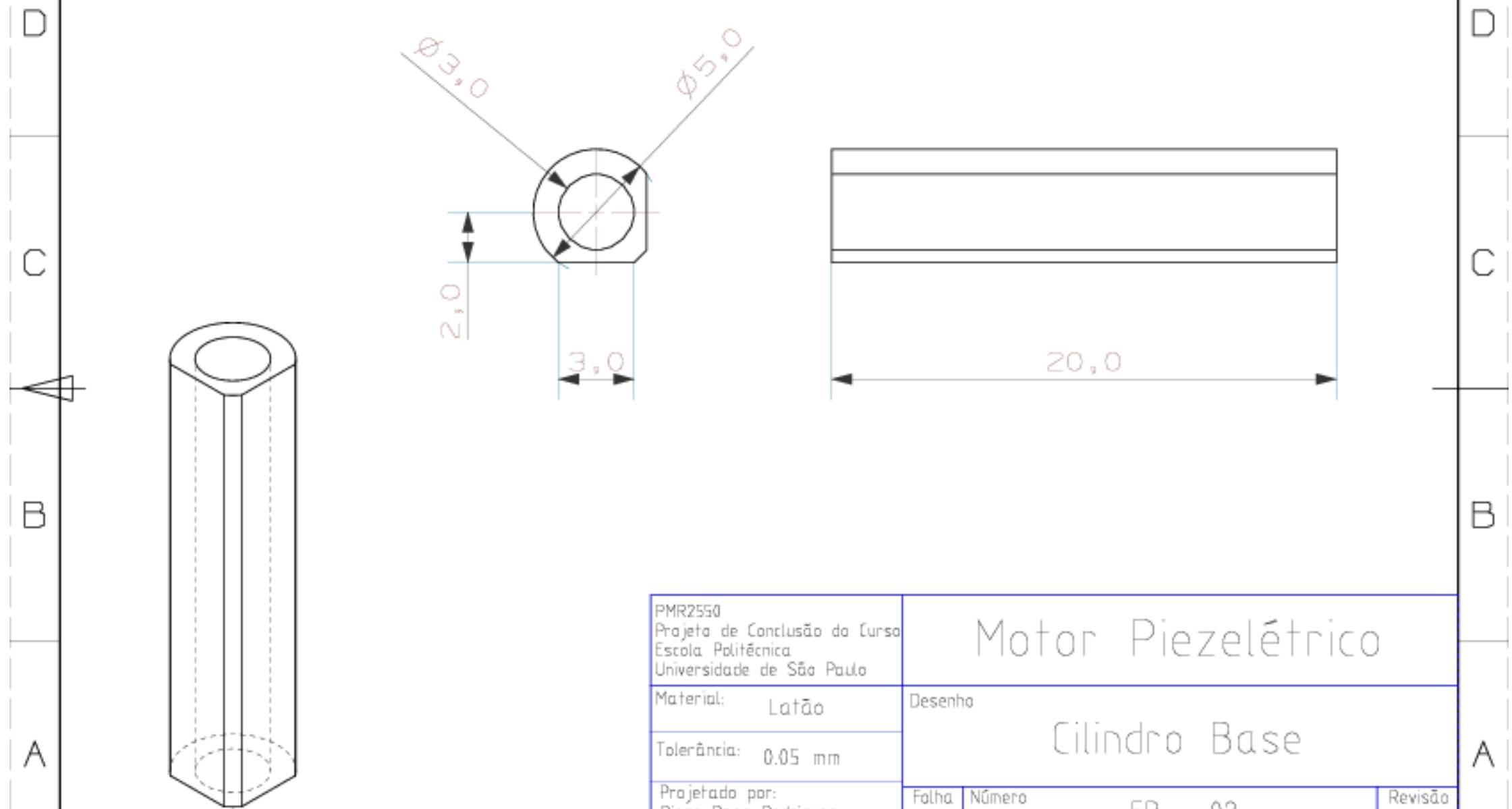


1 2 3 4 5 6

1 2 3 4 5 6



1 2 3 4 5 6



1 2 3 4 5 6

1

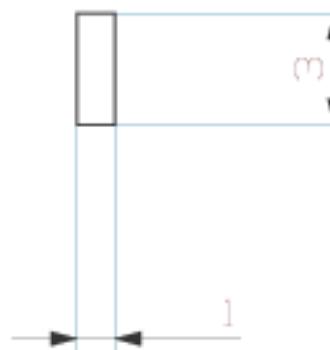
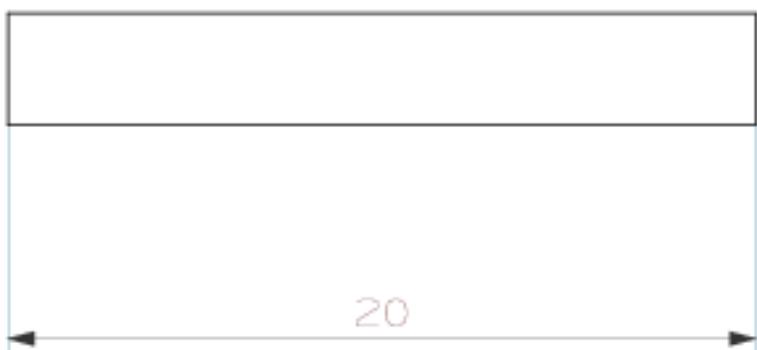
2

3

4

5

6



PMR2550
Projeto de Conclusão do Curso
Escola Politécnica
Universidade de São Paulo

Material: PZT

Tolerância: 0.1 mm

Projetado por:
Diego Papa Rodrigues
Douglas F.W.C. Martins

Motor Piezelétrico

Cerâmica Piezelétrica

Desenho

Folha
A4

Número
FB - 03

Revisão
2

Escala 5:1

Data: 10/10/2011 Medidas em mm

Página 5 de 6

1

2

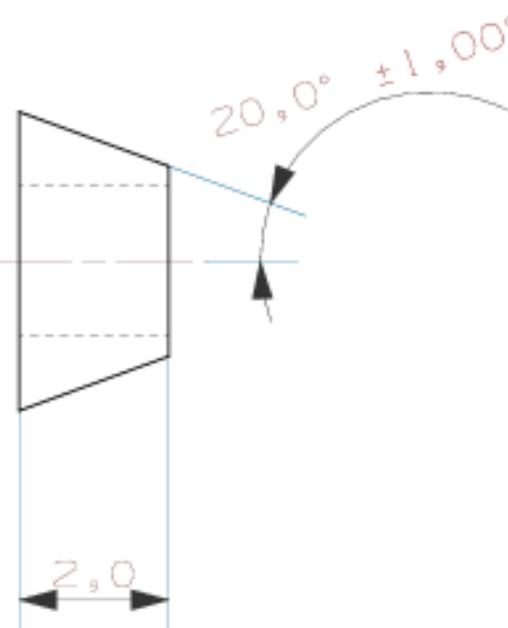
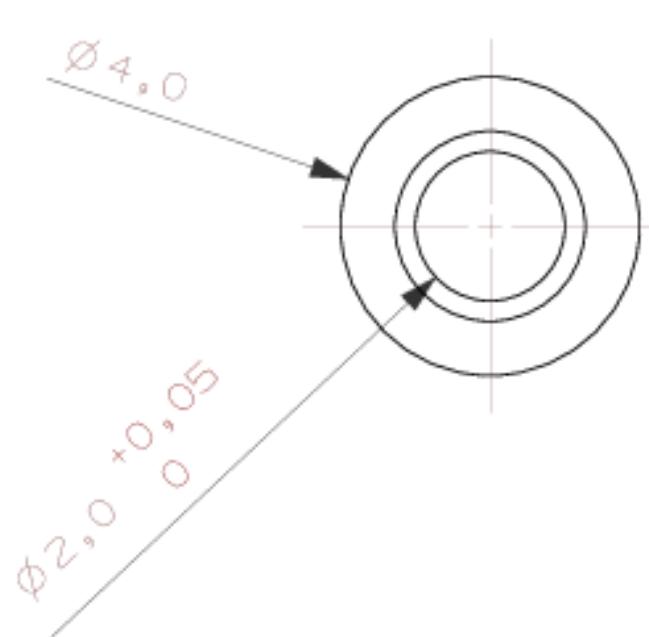
3

4

5

6

1 2 3 4 5 6



PMR2550
Projeto de Conclusão do Curso
Escola Politécnica
Universidade de São Paulo

Material: Aço

Tolerância: 0,05 mm

Projetado por:
Diego Papa Rodrigues
Douglas F.W.C. Martins

Motor Piezelétrico

Bucha

Desenho

FB - 04

Revisão
2

Folha
A4

Número

Escala 10:1

Data: 10/10/2011

Medidas em mm

Página 6 de 6

1 2 3 4 5 6

7.2 CÓDIGO MATLAB

7.2.1 FIGURAS LISSAJOU

```
xlsFileName = 'Filename';
posInicial = '1';
posFinal = '10';
NX0 = xlsread(xlsFileName,['B' posInicial ':' 'B' posFinal]);
NY0 = xlsread(xlsFileName,['C' posInicial ':' 'C' posFinal]);
UXR = xlsread(xlsFileName,['E' posInicial ':' 'E' posFinal]);
UYR = xlsread(xlsFileName,['F' posInicial ':' 'F' posFinal]);
UXI = xlsread(xlsFileName,['H' posInicial ':' 'H' posFinal]);
UYI = xlsread(xlsFileName,['I' posInicial ':' 'I' posFinal]);
FQS = xlsread(xlsFileName,['L' posInicial ':' 'L' posFinal]);

complexX = complex(UXR, UXI);
complexY = complex(UYR, UYI);

ampX = abs(complexX);
thetaX = angle(complexX);
ampY = abs(complexY);
thetaY = angle(complexY);

dt = 1e-7;
T = 0:dt:dt*1000;
X = zeros(length(FQS),length(T));
Y = zeros(length(FQS),length(T));
for i = 1:length(T)
    t = T(i);

    X(:,i) = ampX .* sin(2*pi*FQS*t + thetaX);
    Y(:,i) = ampY .* sin(2*pi*FQS*t + thetaY);
end
%ajustando escala:
X = 1e6*X;
Y = 1e6*Y;
lineW = 2;

st = 3;
clf
plot(X(st+1,:),Y(st+1,:),'r','LineWidth',lineW)
hold on
plot(X(st+2,:),Y(st+2,:),'g','LineWidth',lineW)
plot(X(st+3,:),Y(st+3,:),'b','LineWidth',lineW)
```

```

plot(X(st+4,:),Y(st+4,:),'k','LineWidth',lineW)
plot(X(st+5,:),Y(st+5,:),'y','LineWidth',lineW)

hold off
xlim([-15 15])
ylim([-15 15])
set(gcf,'Position',[100 100 1100 900])
%legend(num2str(FQS(st+1))&' Hz', num2str(FQS(st+2))&' Hz', num2str(FQS(st+3))&' Hz',
num2str(FQS(st+4))&' Hz', num2str(FQS(st+5))&' Hz')
legend(num2str(FQS(st+1)), num2str(FQS(st+2)), num2str(FQS(st+3)), num2str(FQS(st+4)),
num2str(FQS(st+5)))
xlabel('Deslocamento em X [\mu m]', 'Interpreter', 'Tex')
ylabel('Deslocamento em Y [\mu m]', 'Interpreter', 'Tex')

```

7.2.2 ANIMAÇÃO DO MOVIMENTO

```

%% Lendo do Excel %pf = 8731 + p0 - 1
xlsFileName = 'Harm\A.xlsx';
posInicial = num2str(139778);
posFinal = num2str(139778+ 8736 - 1 );

% tic
% tic
% X0 = xlsread(xlsFileName,['B' posInicial ':' 'B' posFinal]);
% toc
% Y0 = xlsread(xlsFileName,['C' posInicial ':' 'C' posFinal]);
% Z0 = xlsread(xlsFileName,['D' posInicial ':' 'D' posFinal]);
% UXr = xlsread(xlsFileName,['E' posInicial ':' 'E' posFinal]);
% UYr = xlsread(xlsFileName,['F' posInicial ':' 'F' posFinal]);
% UZr = xlsread(xlsFileName,['G' posInicial ':' 'G' posFinal]);
% UXi = xlsread(xlsFileName,['H' posInicial ':' 'H' posFinal]);
% UYi = xlsread(xlsFileName,['I' posInicial ':' 'I' posFinal]);
% UZi = xlsread(xlsFileName,['J' posInicial ':' 'J' posFinal]);
% freq = xlsread(xlsFileName,['L' posInicial ':' 'L' posInicial]);
% toc
%% Calculando amplitude e fase:
complexX = complex(UXr,UXi );
complexY = complex(UYr,UYi);
complexZ = complex(UZr,UZi);

ampX = abs(complexX);
thetaX = angle(complexX);
ampY = abs(complexY);
thetaY = angle(complexY);

```

```

ampZ = abs(complexZ);
thetaZ = angle(complexZ);

%% Montando vídeo:
dt = 0.0000005;
T = 0:dt:dt*200;
numframes = length(T);
num_frames_per_second = 20;
dur = numframes / num_frames_per_second;

figure('Position',[1233 49 680 948])
plot3(X0,Y0,Z0,'s')
axis off
set(gca,'NextPlot','replacechildren');

frame(numframes) = struct('cdata',[],'colormap',[]);
for i = 1:numframes
    t = T(i);
    X = X0 + ampX .* sin(2*pi*freq*t + thetaX)*100;
    Y = Y0 + ampY .* sin(2*pi*freq*t + thetaY)*100;
    Z = Z0 + ampZ .* sin(2*pi*freq*t + thetaZ)*100;
    plot3(X,Y,Z,'s', 'MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor',[0.5 0.9 0.7],'MarkerSize',20)
%    saveas(gcf, num2str(i), 'png');
    frame(i) = getframe ( gcf);
end
aviobj = aviwrite ( 'test3Dc.avi', 'fps', num_frames_per_second,'compression','None');
for j = 1 : numframes
    aviobj = addframe( aviobj, frame(j));
end
aviobj = close ( aviobj );
close all

```

7.3 CÓDIGO ANSYS

Ao trabalhar com o software Ansys, é possível que todos os comandos sejam traduzidos para uma linguagem própria do software. A seguir apresenta-se o código que foi utilizado para realizar todas as etapas.

```

finish
/clear
/PREP7
SMRT,OFF

```

```
/title,Piezoelectric motor modal, harmonic response
```

```
!!!!MODELING!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
PT = 0.001
CYL4,0,0,2.5E-3, , , ,20E-3
CYL4,0,0,1.5E-3, , , ,20E-3
BLOCK,2E-3,3E-3,-2E-3,2E-3,0,20E-3,
BLOCK,-2E-3,2E-3,2E-3,3E-3,0,20E-3,
FLST,3,3,6,ORDE,2
FITEM,3,2
FITEM,3,-4
VSBV,1,P51X
VOFFST,24,-PT , ,
VOFFST,23,-PT , ,
```

```
!!!!MATERIALS!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
ET,1,226
KEYOPT,1,1,1001
KEYOPT,1,2,0
KEYOPT,1,4,0
KEYOPT,1,6,0
KEYOPT,1,9,0
ET,2,186
```

```
!Piez - material Y
!*** Piezo constants
e31=-5.4
e33=15.8
e51=12.3
TB,PIEZ,2
TBDATA,1, 0,e31,0
TBDATA,4, 0,e33,0
TBDATA,7, 0,e31,0
TBDATA,10,e51,0,0
TBDATA,13,0,0,e51
```

```
!*** Elastic constants
c11=1.2E11
c12=7.54E10
c13=7.52E10
c33=1.11E11
c44=2.305E10
c66=.5*(c11-c12)
TB,ANEL,2
TBDATA,1,c11,c13,c12,0
TBDATA,7,c33,c13,0,0,0,c11
TBDATA,16,c44
TBDATA,19,c44,,c66
e00=8.84E-12
eps1=1650*e00
eps3=1700*e00
MP,PERX,2,eps1
MP,PERY,2,eps3
MP,PERZ,2,eps1
MP,DENS,2,7800
MP,DAMP,2,5e-8
```

```
!Piez - material X
!*** Piezo constants
e31=-5.4
e33=15.8
e51=12.3
TB,PIEZ,1
TBDATA,1, e33,0,0
```

```

TBDATA,4, e31,0,0
TBDATA,7, e31,0,0
TBDATA,10,0,e51,0
TBDATA,16,0,e51,0

!*** Elastic constants
c11=1.2E11
c12=7.54E10
c13=7.52E10
c33=1.11E11
c44=2.305E10
c66=.5*(c11-c12)
TB,ANEL,1
TBDATA,1,c33,c13,c13,0
TBDATA,7,c11,c12,0,0,0,c11
TBDATA,16,c44
TBDATA,19,c66,,c44
e00=8.84E-12
eps1=1650*e00
eps3=1700*e00
MP,PERX,1,eps3
MP,PERY,1,eps1
MP,PERZ,1,eps1
MP,DENS,1,7800
MP,DAMP,1,5e-8

```

!Brass - material

```

MPTEMP,,,...,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,3,,8580
MPTEMP,,,...,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,3,,1.04E+11
MPDATA,PRXY,3,,0.37

```

!!!!MESHING!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

TYPE, 1
MAT,    1
REAL,
ESYS,   0
SECNUM,
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 2
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2

```

```

TYPE, 1
MAT,    2
REAL,
ESYS,   0
SECNUM,
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VMESH,_Y1
CMDELE,_Y

```

```

CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
ISMRT,6
ISMRT,5
ISMRT,4
SMRT,3
ISMRT,2
TYPE, 2
MAT,    3
REAL,
ESYS,   0
SECNUM,
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , 5
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
FINISH

```

!!!!MODAL ANALYSIS!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

/SOLU

```

ANTYPE,2
MODOPT,LANB,10
EQSLV,SPAR
MXPAND,10, , ,1
LUMPM,0
PSTRES,0
MODOPT,LANB,10,1,400000, ,OFF
NSEL,S,LOC,X, 20E-4 + PT
D,ALL,VOLT,0
NSEL,S,LOC,X, 20E-4
D,ALL,VOLT,0
NSEL,S,LOC,Y, 20E-4
D,ALL,VOLT,0
NSEL,ALL
/STATUS,SOLU
SOLVE
FINISH
LSCLEAR,ALL

```

!!!!HARMONIC ANALYSIS!!!!!!!!!!!!!!

```

/SOLU
ANTYPE,3
HROPT,FULL
HROUT,ON
LUMPM,0
EQSLV,,1e-008,
PSTRES,0
DMPRAT, 0.02
NSEL,S,LOC,X, 20E-4 + PT
D,ALL,VOLT,400
NSEL,S,LOC,X, 20E-4
D,ALL,VOLT,0
NSEL,S,LOC,Y, 20E-4
D,ALL,VOLT,0
NSEL,ALL
HARFRQ,34000,38000,
NSUBST,30,
KBC,1

```

```

/STATUS,SOLU
SOLVE
FINISH

!!!!POST PROC!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
/POST26
FILE,'file','rst',''
/UI,COLL,1
NUMVAR,200
SOLU,191,NCMIT
STORE,MERGE
PLCPLX,0
PRCPLX,1
FILLDATA,191,,,1,1
REALVAR,191,191
NSOL,2,186,U,X, UX_2
STORE,MERGE
NSOL,3,186,U,Y, UY_3
STORE,MERGE
XVAR,1
/XRANGE,34000,38000,
/AXLAB,X,Frequency
/AXLAB,Y,Response
/GROPT,LOGX,OFF
/GROPT,LOGY,OFF
/GROPT,VIEW,1
/GRID,1
PLVAR,2,3,
/POST1
SET,FIRST
*CFOPEN,NodalSolreal.txt
*DO,k,1,30,1
SET,1,k,,0
*VWRITE
NODE, NX, NY, NZ, UX, UY, UZ, NUM
*GET,numberOfNodes,NODE,,COUNT
nodeNumber = 0
*DO,i,1,numberOfNodes,1
nodeNumber = NDNEXT(nodeNumber)
*VWRITE,nodeNumber,NX(nodeNumber),NY(nodeNumber),NZ(nodeNumber),UX(nodeNumber),UY(nod
eNumber),UZ(nodeNumber),k
%7i,%16.9e,%16.9e,%16.9e,%16.9e,%16.9e,%7i
*ENDDO
*ENDDO
*CFCLOS
SET,FIRST
*CFOPEN,NodalSolimg.txt
*DO,k,1,30,1
SET,1,k,,1
*VWRITE
NODE, NX, NY, NZ, UX, UY, UZ, NUM
*GET,numberOfNodes,NODE,,COUNT
nodeNumber = 0
*DO,i,1,numberOfNodes,1
nodeNumber = NDNEXT(nodeNumber)
*VWRITE,nodeNumber,NX(nodeNumber),NY(nodeNumber),NZ(nodeNumber),UX(nodeNumber),UY(nod
eNumber),UZ(nodeNumber),k
%7i,%16.9e,%16.9e,%16.9e,%16.9e,%16.9e,%7i
*ENDDO
*ENDDO
*CFCLOS

```