



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Escola Politécnica

BOMBA PIEZELÉTRICA DE FLUXO BASEADA EM PRINCÍPIO  
ONDULATORIO

Jacqueline de Miranda Kian  
Luís Fernando Nogueira de Sá

São Paulo  
2013

JACQUELINE DE MIRANDA KIAN  
LUÍS FERNANDO NOGUEIRA DE SÁ

# BOMBA PIEZELÉTRICA DE FLUXO BASEADA EM PRINCÍPIO ONDULATORIO

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

Orientador: Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli  
Silva

São Paulo

2013

JACQUELINE DE MIRANDA KIAN  
LUÍS FERNANDO NOGUEIRA DE SÁ

# BOMBA PIEZELÉTRICA DE FLUXO BASEADA EM PRINCÍPIO ONDULATORIO

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

2013

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Kian, Jacqueline de Miranda**

**Bomba piezelétrica de fluxo baseada em princípio ondulatório / J.M. Kian, L.F.N. de Sá. -- São Paulo, 2013.  
96 p.**

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

**1.Dinâmica dos fluidos 2.Método dos elementos finitos  
3.Atuadores piezelétricos I.Sá, Luis Fernando Nogueira de  
II.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos III.t.**



Dedico este trabalho a pessoa com quem namoro, por toda a sua dedicação ao desenvolvimento do projeto.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos a nosso orientador Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli Silva, pelas importantes instruções e conselhos que nos guiaram no desenvolvimento deste trabalho.

Agradecemos ao Dr. Sandro Vatanabe, que nos auxiliou com seus conhecimentos de simulação computacional e nos cedeu figuras de sua autoria.

Agradecemos ao Timóteo Francisco de Oliveira, por sua orientação sobre técnicas de usinagem e manipulação de materiais piezelétricos.

Agradecemos aos Prof. Dr. Júlio C. Adamowsky e Prof. Dr. Flávio Buiochi pela cessão das instalações do Laboratório de Ultrassom para a realização dos ensaios.

Agradecemos ao Dr. Marco Aurélio pelo auxílio no manuseio dos equipamentos utilizados nos ensaios.

Agradecemos à equipe da oficina do Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, em especial aos técnicos Tiago Monteiro Camponucci, Adilson Fernandes Feliz Filho e Fidel Vicente de Paula, que nos auxiliaram na usinagem do protótipo.

Agradecemos às nossas famílias e amigos, por todo o apoio durante o período de condução deste trabalho de formatura.

## RESUMO

Bombas piezelétricas de fluxo são sistemas que combinam elementos de microeletrônica e mecânica, a fim de propiciar o movimento de um fluido. São utilizadas em equipamentos que visam alto rendimento e tamanho reduzido, como para refrigeração de aparelhos eletrônicos e também em áreas biomédicas, por exemplo, em bombas cardíacas e sistemas de dosagem de medicamentos.

Em geral, possuem boa relação peso/potência e baixo consumo de energia, além disso, possuem alta confiabilidade, por apresentarem deformações estáveis em escala micro e nanométricas, resposta rápida e ausência de partes móveis, o que limita o desgaste, possibilitando uma vasta gama de aplicações.

Estas bombas apresentam seu funcionamento baseado, geralmente, em três princípios: o oscilatório, em que o movimento ocorre pela oscilação transversal de uma chapa, o ondulatório, no qual uma onda propagante simula a rotação de um anel piezelétrico, e de diafragma, que se assemelham ao princípio de bombas volumétricas, em que a deformação de um disco promove o deslocamento do fluido. Neste trabalho será desenvolvida uma bomba piezelétrica que se utiliza do princípio ondulatório para transporte de fluido, com configuração rotativa inspirada em motores piezelétricos.

Este projeto compreende a simulação computacional do modelo através de método de elementos finitos utilizando software Ansys, onde será contemplada a análise dos modos de vibrar do anel da bomba, resposta dinâmica a excitações harmônicas e estudo do escoamento de fluido. Em seguida são realizados o projeto e a construção de protótipos para realização de testes para avaliar as características da bomba construída.

**Palavras-chave:** Atuador piezelétrico. Bomba piezelétrica de fluxo. Simulação Computacional. Onda propagante. Princípio ondulatório.

## ABSTRACT

Piezoelectric flow pumps are systems that combine micro-electronic and mechanical elements to create fluid movement. They are used in applications that require high performance and small size, such as electronic refrigeration and biomedical applications. We can cite as an example, cardiac pumps and drug delivery systems.

Generally, they have a good power-to-weight ratio and low energy consumption, furthermore, they have a high reliability, for presenting stable deformations in micro and nanometric scale, fast response and absence of moving parts, which limits their mechanical wear, enabling a big range of applications.

These pumps, usually, work under three principles: the oscillatory, where the movement occurs due to transversal oscillation of a plate, the undulatory, in which a travelling wave simulates a piezoelectric ring rotation, and the diaphragm, that resembles the volumetric pump principle, where the disc deformation promotes fluid dislocation. In this work, an undulatory based piezoelectric pump will be developed using a rotational configuration, inspired by ultrasonic piezoelectric motors.

This project includes the computational simulation of the model through finite element method using software Ansys, contemplating the analysis of vibrational modes of the pump ring, the dynamic response to harmonic excitations, and study of fluid flow. Next, a prototype is designed and built to perform tests and evaluate the characteristics of the pump.

**Keywords:** Piezoelectric actuator. Piezoelectric flow pump. Computational simulation. Travelling wave. Undulatory principle.

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 - Fluxograma de sistema de dosagem de medicamentos (adaptado de NISAR et al., 2008).</i>	1
<i>Figura 1.2 - Sistema de refrigeração. (a) Circuito do fluido. (b) Microcanais das aletas. (Adaptado de GARIMELLA et al., 2006).</i>	2
<i>Figura 1.3 - Classificação de bombas e microbombas (LASER; SANTIAGO, 2004).</i>	3
<i>Figura 1.4 - Bomba piezelétrica de fluxo de Diafragma (GONZÁLEZ; MOUSSA, 2002).</i>	4
<i>Figura 1.5 - Bomba piezelétrica de fluxo "valve-less" (CHOI, 2009).</i>	5
<i>Figura 1.6 - Movimento relativo dos peixes (VATANABE, 2008).</i>	5
<i>Figura 1.7 - Movimentos ondulatórios e oscilatórios do nadar dos peixes (SFAKIOTAKIS; LANE; DAVIES, 1999).</i>	6
<i>Figura 1.8 - (a) Vórtices gerados pelo escoamento ao redor de um cilindro. (b) Vórtices gerados pelo nadar de um peixe. (c) Circuito de formação dos vórtices. (SFAKIOTAKIS; LANE; DAVIES, 1999).</i>	6
<i>Figura 1.9 - (a) Modelo bilaminar para geração de vórtices. (b) Esquema de um atuador piezelétrico bilaminar. (VATANABE, 2008).</i>	6
<i>Figura 1.10 - Movimento Peristáltico.</i>	7
<i>Figura 1.11 - Formação de onda propagante (adaptado de BAR-COHEN; CHANG, 2001).</i>	7
<i>Figura 1.12 - Distribuição de cerâmicas piezelétricas sobre o disco.</i>	8
<i>Figura 1.13 - Condução de fluido através da deformação circunferencial.</i>	8
<i>Figura 4.1 - Efeitos transversais e longitudinais de materiais piezelétricos.</i>	10
<i>Figura 4.2 - Propagação de onda em meio teórico infinito com uma fonte senoidal.</i>	15
<i>Figura 4.3 - Forma de ondas propagando para frente e para trás.</i>	16
<i>Figura 4.4 - Interferência de ondas para produção de onda propagante.</i>	16
<i>Figura 4.5 - Composição da onda.</i>	17
<i>Figura 5.1 - Elementos utilizados: (a) Shell281, (b) Solid226 (ANSYS, 2010)</i>	18
<i>Figura 5.2 - Deformação da malha de elementos finitos em tempos distintos.</i>	20
<i>Figura 5.3 - Modelo do disco bidimensional.</i>	20
<i>Figura 5.4 - Disposição de cerâmicas piezelétricas sobre o disco na configuração com dois arrays.</i>	22
<i>Figura 5.5 - Configuração com a distribuição uniforme.</i>	22
<i>Figura 5.6 - Onda propagante na face inferior do modelo.</i>	24
<i>Figura 5.7 - Malha de elementos finitos de duto retilíneo.</i>	26
<i>Figura 5.8 - Condições de contorno modelo linear.</i>	27
<i>Figura 5.9 - Condições de contorno modelo circular.</i>	28
<i>Figura 6.1 - Desenho de conjunto da bomba piezelétrica: (a) Vista Isométrica. (b) Corte Transversal.</i>	31
<i>Figura 7.1 - Peças usinadas através de corte a laser.</i>	32
<i>Figura 7.2 - Gabarito, disco e suporte auxiliar de posicionamento.</i>	33
<i>Figura 7.3 - Posicionamento das cerâmicas com auxílio de gabarito.</i>	33
<i>Figura 7.4 - Estator da bomba piezelétrica de fluxo.</i>	33
<i>Figura 7.5 - Fiação do disco piezelétrico. (a) Configuração distribuída. (b) Configuração Dois Arranjos.</i>	34

Figura 7.6 - Carcaça da bomba piezelétrica de fluxo.....	34
Figura 7.7 - Elementos de fixação do disco piezelétrico. ....	35
Figura 7.8 - Protótipo da bomba piezelétrica montado. ....	35
Figura 8.1 - Aparato experimental para excitação das cerâmicas. ....	36
Figura 8.2 - Diagrama de blocos da ligação elétrica. ....	37
Figura 8.3 - Vibrômetro a laser Polytec OFV-5000 .....	38
Figura 8.4 - Diagrama de blocos de medição utilizando vibrômetro.....	38
Figura 8.5 - Aparato experimental do ensaio de pressão. ....	39
Figura 8.6 - Aparato experimental do ensaio de vazão.....	39
Figura 9.1 - Modos de vibrar do disco plano de alumínio. (a) Primeiro modo. (b) Quarto modo. (c) Sexto modo. (d) Décimo primeiro modo. (e) Décimo segundo modo. (f) Décimo quarto modo. ....	42
Figura 9.2 - Modos de vibrar escolhido. ....	42
Figura 9.3 - Modo de vibrar com seis ondas para a configuração de dois arrays. ....	43
Figura 9.4 - Modo de vibrar com seis ondas para a configuração com Distribuição Uniforme.....	44
Figura 9.5 - Forma de onda propagante para excitação harmônica com $f=24$ kHz. ....	44
Figura 9.6 - Variação da amplitude em frequências próximas a ressonância. ....	45
Figura 9.7- Figuras de Lissajous para Configuração com Dois Arrays. ....	45
Figura 9.8 - Forma de onda propagante para excitação harmônica com $f=18,62$ kHz. ....	46
Figura 9.9 - Variação da amplitude em frequências em torno da ressonância. ....	46
Figura 9.10 - Figuras de Lissajous para configuração com distribuição uniforme.....	47
Figura 9.11 - Disco com pastilhas piezelétricas: a) com curvatura b) retangulares. ....	48
Figura 9.12 - Dimensões da cerâmica piezelétrica. ....	49
Figura 9.13 - Amplitude de deslocamento por espessura da cerâmica. ....	50
Figura 9.14 - Amplitude de Deslocamento por Largura da cerâmica piezelétrica.....	51
Figura 9.15 - Amplitude de Deslocamento por Comprimento da cerâmica piezelétrica. ....	52
Figura 9.16 - Definição do ângulo de desvio de posicionamento. ....	53
Figura 9.17 - Figura de Lissajous para erros de montagem.....	53
Figura 9.18 - Vazão mássica média em função do tempo para altura de 1mm.....	54
Figura 9.19 - Vetores de velocidade para vazão mássica máxima ( $t=0,369796s$ ).....	54
Figura 9.20 - Vetores de velocidade para vazão mássica mínima ( $t=0,369826s$ ).....	54
Figura 9.21 - Vazão mássica média em função do tempo para altura de 2mm.....	55
Figura 9.22 - Vetores de velocidade para vazão mássica máxima ( $t=0,699441s$ ).....	55
Figura 9.23 - Vetores de velocidade para vazão mássica mínima ( $t=0,696441s$ ).....	55
Figura 9.24 - Vazão mássica média em função do tempo para altura de 3mm.....	56
Figura 9.25 - Vetores de velocidade para vazão mássica máxima ( $t=0,827512$ ). ....	56
Figura 9.26 - Vetores de velocidade para vazão mássica mínima ( $t=0,827477s$ ).....	56
Figura 9.27 - Vazão mássica média em função do tempo para altura de 4mm.....	57
Figura 9.28 - Vetores de velocidade para vazão mássica máxima ( $t=1,6060s$ ).....	57

<i>Figura 9.29 - Vetores de velocidade para vazão mássica mínima (<math>t=1,6063s</math>).....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 9.30 - Vazão mássica média em função do tempo para altura de 5mm.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 9.31 - Vetores de velocidade para vazão mássica máxima (<math>t=1,36814s</math>).....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 9.32 - Vetores de velocidade para vazão mássica mínima (<math>t=1,36818s</math>).....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 9.33 - Vazão mássica média em função da altura.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 9.34 - Vazão mássica média em função do tempo.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 9.35 - Vazão mássica na saída da bomba em regime permanente.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 9.36 - Pressão na saída da bomba em regime permanente.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 9.37 - Vetores de velocidade para vazão mássica máxima (<math>t=0,938953s</math>).....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 9.38 - Vetores de velocidade para vazão mássica máxima (<math>t=0,938918s</math>).....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 9.39 – Variação da distribuição de pressão na condução do fluido. ....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 9.40 - Forma de onda estacionária.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 9.41 - Variação da amplitude em frequências em torno da ressonância para a configuração de dois arranjos. ....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 9.42 - Variação da amplitude em frequências em torno da ressonância para a configuração distribuída. ....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 9.43 - Protótipo em funcionamento. ....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 9.44 - Ensaio de Vazão. ....</i>	<i>66</i>
<i>Figura B.0.1 - IHM do formatador de saída ANSYS.....</i>	<i>82</i>

# Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Princípio de Bombeamento de Líquidos.....	2
1.2	Bombeamento de Líquidos Utilizando Atuadores Piezelétricos .....	3
1.2.1	Bomba Piezelétrica de Fluxo de Diafragma .....	4
1.2.2	Bomba piezelétrica de Princípio Oscilatório .....	5
1.2.3	Bomba Piezelétrica de Princípio Ondulatório .....	7
2.	JUSTIFICATIVA .....	9
3.	OBJETIVOS.....	9
4.	FORMULAÇÃO TEÓRICA.....	10
4.1	Estudo de Materiais Piezelétricos .....	10
4.2	Modelagem Dinâmica de Fluidos .....	11
4.3	MEF Piezelétrico .....	12
4.3.1	Análise Modal .....	13
4.3.2	Análise Harmônica .....	13
4.4	Propagação de Ondas.....	14
5.	MODELAGEM COMPUTACIONAL.....	18
5.1	Ambiente de Modelagem.....	18
5.1.1	Linguagem APDL .....	19
5.1.2	Condições de Contorno Móveis (ALE).....	19
5.2	Criação de Modelos .....	20
5.2.1	Disco Bidimensional .....	20
5.2.2	Configurações Propostas .....	21
5.3	Procedimento de simulação e coleta de dados.....	23
5.4	Simulação do Escoamento de Fluido .....	23
5.4.1	Equacionamento do Movimento da Face Inferior .....	24
5.4.2	Cálculo vazão média mássica .....	25



5.4.3	Estudo de escoamento em duto retilíneo .....	25
5.4.4	Estudo de escoamento em modelo tridimensional circular .....	27
6.	PROJETO CONSTRUTIVO .....	29
6.1	Requisitos de Projeto .....	29
6.1.1	Adesivo .....	29
6.1.2	Suporte do estator .....	29
6.1.3	Carcça .....	30
6.1.4	Sistema elétrico .....	30
6.2	Modelo do Protótipo .....	30
7.	FABRICAÇÃO .....	32
7.1	Construção do Estator .....	32
7.2	Montagem do Protótipo .....	34
8.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	36
8.1	Equipamentos Utilizados .....	36
8.2	Montagem experimental .....	37
8.3	Ensaio .....	37
8.3.1	Varredura de Frequências de Ressonância .....	37
8.3.2	Pressão Estática .....	39
8.3.3	Vazão .....	39
9.	RESULTADOS .....	40
9.1	Simulação Computacional .....	40
9.1.1	Análise do disco bidimensional .....	41
9.1.2	Análise Modal da configuração com Dois Arrays.....	43
9.1.3	Análise Modal da configuração com Distribuição Uniforme.....	43
9.2	Análise Harmônica da Configuração com Dois Arrays.....	44
9.2.1	Análise Harmônica da Configuração com Distribuição Uniforme .....	46
9.2.2	Simplificação do Formato das Cerâmicas .....	47

9.2.3	Influência das dimensões do disco piezelétrico na propagação da onda.....	49
9.2.4	Influência de Erros de Montagem .....	52
9.2.5	Simulação de escoamento em duto retilíneo .....	53
9.3	Simulação de Escoamento em Modelo Tridimensional Circular .....	59
9.4	Ensaio Realizados .....	63
9.4.1	Varredura de frequências de ressonância .....	63
9.4.2	Ensaio de condução .....	65
9.4.3	Ensaio de Vazão .....	65
9.4.4	Ensaio de Pressão .....	66
10.	CONCLUSÕES .....	67
11.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	68

## 1. INTRODUÇÃO

Bombas piezelétricas são sistemas que combinam elementos de microeletrônica e mecânica, a fim de propiciar o movimento de um fluido. São utilizadas em equipamentos que visam alto rendimento e tamanho reduzido, como para refrigeração de aparelhos eletrônicos (GARIMELLA et al., 2006) e também em áreas biomédicas, por exemplo, em bombas cardíacas e sistemas de dosagem de medicamentos intra-corpóreos. Assim, foram propostas na literatura diversas configurações de bombas piezelétricas, entre elas, atuadores lineares e rotativos (YE et al., 2009).

Tendo em vista as dimensões de bombas piezelétricas, pode-se concluir que apresentam uma boa relação peso/potência e baixo consumo de energia, além disso, possuem alta confiabilidade, por apresentarem deformações estáveis em escala micro e nanométricas, resposta rápida e ausência de partes móveis, o que limita o desgaste, possibilitando uma vasta gama de aplicações.

Dentre as aplicações que obtiveram êxito ao utilizar estas bombas, podem-se citar os sistemas de dosagem de medicamentos, que apresentam um reservatório com a substância e uma microbomba, ilustrado pela Figura 1.1. Outro exemplo biomédico são os “lab-on-a-chip”, que realizam teste de substâncias químicas em escala micro (NISAR et al., 2008).

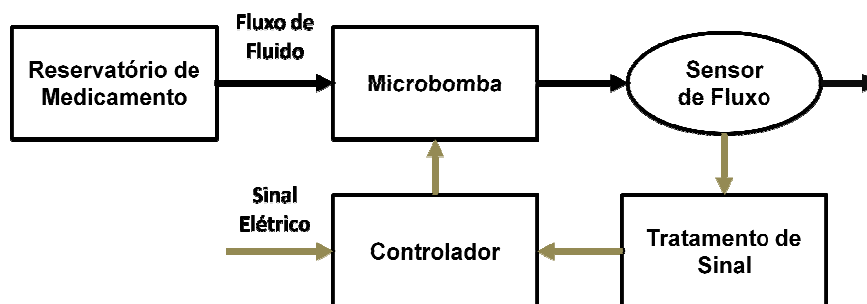
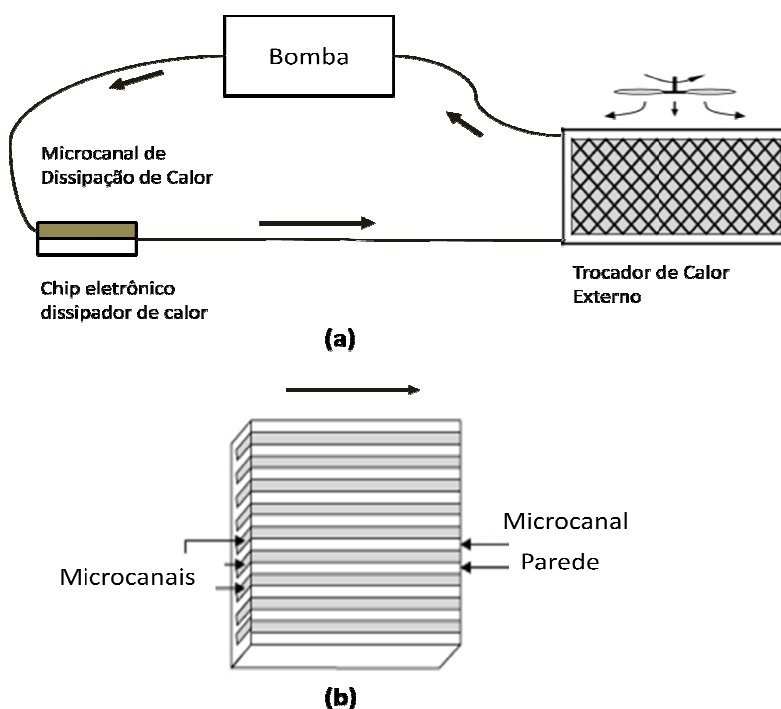


Figura 1.1 - Fluxograma de sistema de dosagem de medicamentos (adaptado de NISAR et al., 2008).

Áreas de refrigeração de microeletrônicos também apresentam uma grande aplicabilidade para estas bombas, em que são utilizados como fluido de troca de calor tanto o ar como a água. Uma das arquiteturas para tal resfriamento foi proposta por Garimella e colaboradores, em que uma bomba de pistão efetua o movimento do fluido pelos micro-canais das aletas acopladas aos chips, conforme a Figura 1.2 (GARIMELLA et al., 2006).



**Figura 1.2 - Sistema de refrigeração. (a) Circuito do fluido. (b) Microcanais das aletas.**

(Adaptado de GARIMELLA et al., 2006).

Portanto, pode-se perceber que existe uma crescente demanda pela miniaturização de sistemas em geral, e com isso surgem cada vez mais aplicações. Pois, além das já citadas vantagens de baixo consumo de energia e um bom rendimento, elas são ainda bastante versáteis por não apresentarem elevada dependência do material do fluido bombeado. Porém, em aplicações que demandem alta vazão e pressão como em micropropulsores (GUANG-MING et al., 2007), elas ainda não são muito eficientes.

## 1.1 Princípio de Bombeamento de Líquidos

As bombas de fluxo em geral podem ser classificadas quanto sua principal função, isto é, gerar vazão ou pressão, mas podem ainda ser diferenciadas quanto ao seu princípio de funcionamento, como eletromagnética ou piezelétrica, e ainda quanto a sua configuração, por exemplo, bomba piezelétrica de diafragma (VAN LINTEL et al., 1988). Deste modo, a Figura 1.3 cita os diversos tipos de bombas.

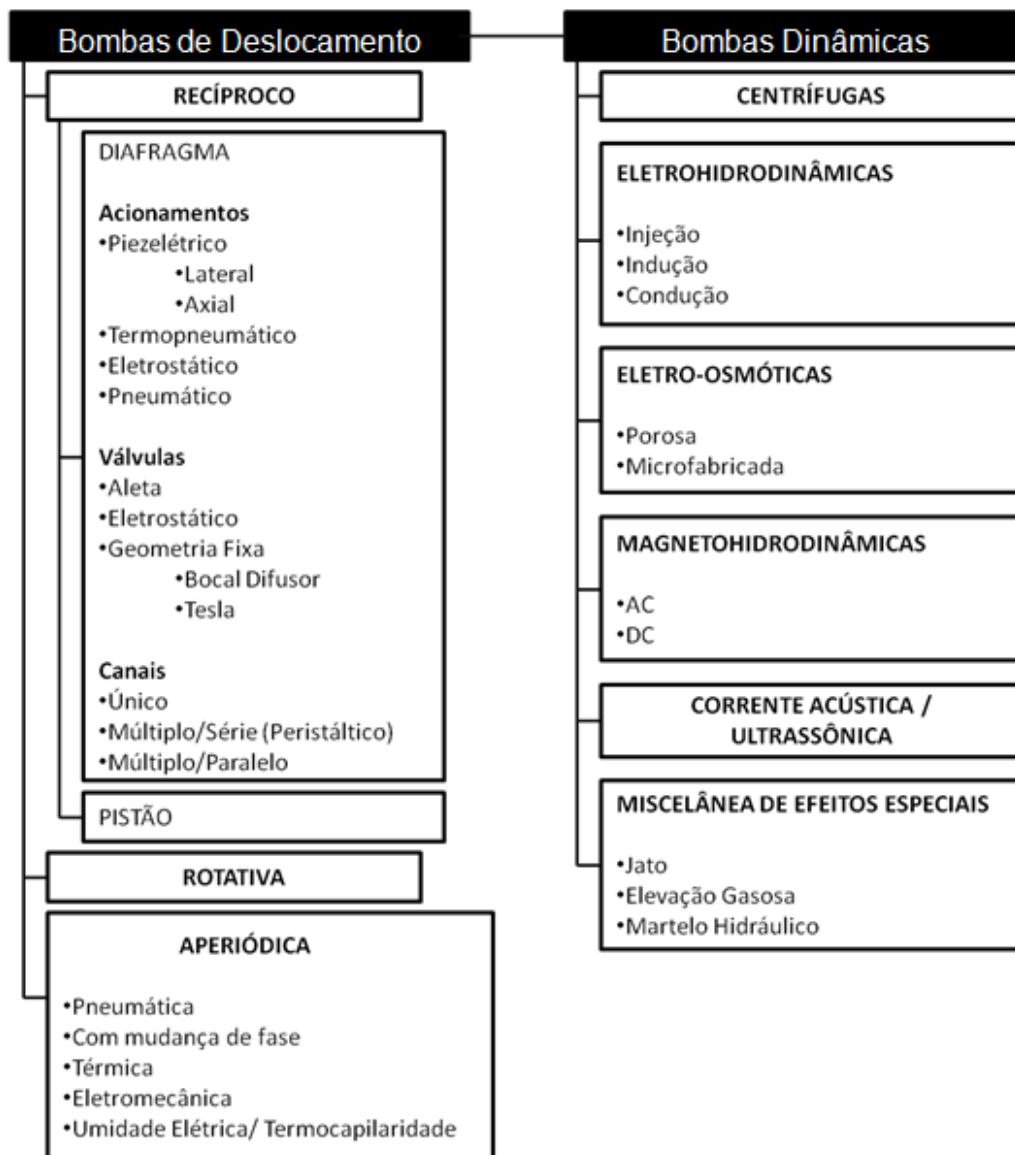


Figura 1.3 - Classificação de bombas e microbombas (LASER; SANTIAGO, 2004).

## 1.2 Bombeamento de Líquidos Utilizando Atuadores Piezelétricos

Dentre os princípios de bombeamento citados anteriormente os que se baseiam em atuadores piezelétricos são o foco deste trabalho. Materiais piezelétricos têm a propriedade de transformar energia elétrica (potencial e carga elétrica) em energia mecânica (tensão e deformação) e também no sentido contrário, estímulos mecânicos em saídas elétricas. Portanto, apresentam um grande potencial como atuadores, sendo utilizados de diversos modos para a geração de movimentos, inclusive na movimentação de líquidos.

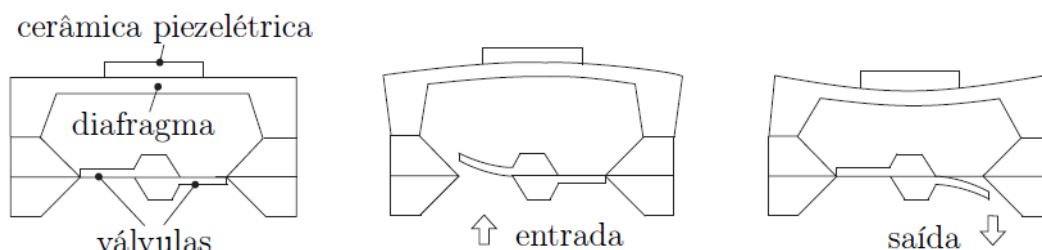
Assim, existem diversos tipos de bombas piezelétricas, entre eles, os três mais relevantes são: bombas de princípio oscilatório, em que o movimento ocorre pela oscilação transversal de uma chapa (NAKASONE et al., 2005), de princípio ondulatório, no qual uma onda transversal simula a rotação de um anel metálico (BAR-COHEN; CHANG, 2001), e de diafragma, que se assemelham a bombas volumétricas, em que a deformação de um disco promove o deslocamento do fluido (VAN LINTEL ET al., 1988).

A seguir serão descritos estes três principais tipos de bombas piezelétricas.

### 1.2.1 Bomba Piezelétrica de Fluxo de Diafragma

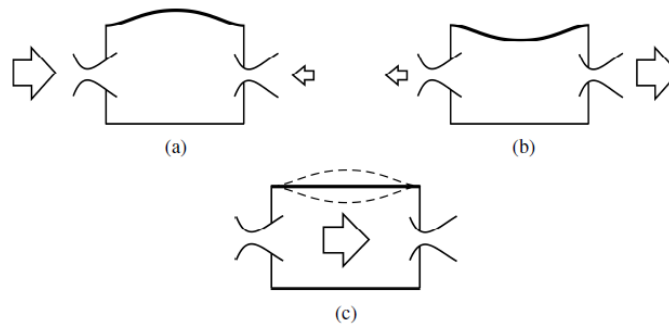
As bombas piezelétricas de diafragma tem como sua principal característica a maior pressão imposta ao líquido, em relação às outras configurações. Assim, ela é indicada para aplicações que possuam uma maior perda de carga nos dutos, como em resfriamento de eletrônicos, em que o fluido passa por trocadores de calor multi tubulares.

O seu funcionamento consiste basicamente na deformação de um piezelétrico e, em geral, na atuação de válvulas que permitem a circulação do fluido em apenas um sentido, conforme a Figura 1.4.



**Figura 1.4 - Bomba piezelétrica de fluxo de Diafragma (GONZÁLEZ; MOUSSA, 2002).**

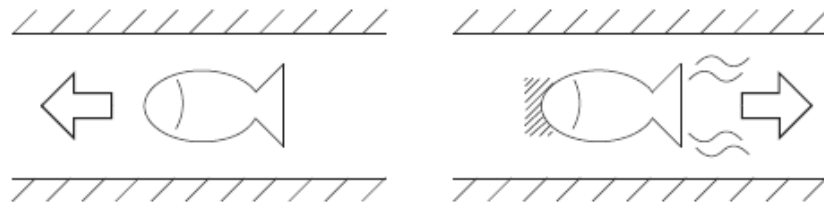
Outra configuração de diafragma é a “valve-less” estudada por Choi (CHOI, 2009) e utilizada por Garimella et al. (GARIMELLA et al., 2006), na qual os formatos da entrada e da saída da bomba oferecem uma direção preferencial de bombeamento, como mostrado na Figura 1.5.



**Figura 1.5 - Bomba piezelétrica de fluxo "valve-less" (CHOI, 2009).**

### 1.2.2 Bomba piezelétrica de Princípio Oscilatório

Este princípio foi desenvolvido tendo como base o nadar dos peixes, pois estes realizam movimentos ondulatórios e oscilatórios para se deslocar. Deste modo, tendo em vista o princípio de velocidade relativa, e tomando o peixe como referencial em repouso, os movimentos deste realizariam o deslocamento do fluido, gerando certa vazão. Como mostrado na Figura 1.6.



**Figura 1.6 - Movimento relativo dos peixes (VATANABE, 2008).**

O movimento de nadar foi bastante estudado na literatura, mostrando que diferentes espécies apresentam diferentes modos de locomoção, sendo que muitos deles estão relacionados com movimento ondulatórios ou oscilatórios, como mostrado na Figura 1.7, além disso, foi observado por Sfakiotakis et al. (SFAKIOTAKIS; LANE; DAVIES, 1999) que o movimento da cauda fornece impulso devido à criação de vórtices discretos de sinal alternado, diferente dos vórtices de arrasto gerado no escoamento ao redor de corpos, conforme exemplificado na Figura 1.8.

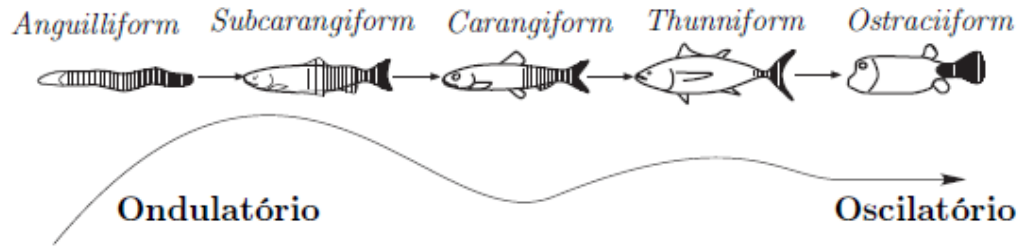


Figura 1.7 - Movimentos ondulatorios e oscilatorios do nadar dos peixes (SFAKIOTAKIS; LANE; DAVIES, 1999).

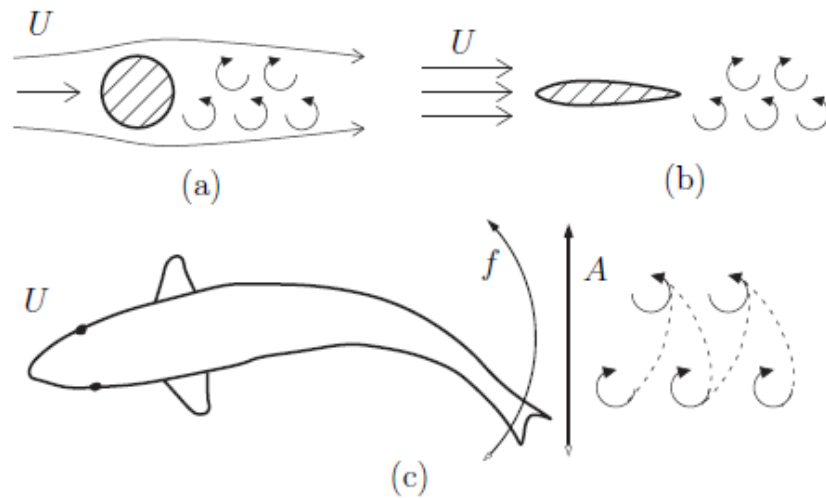


Figura 1.8 - (a) Vórtices gerados pelo escoamento ao redor de um cilindro. (b) Vórtices gerados pelo nadar de um peixe. (c) Circuito de formação dos vórtices. (SFAKIOTAKIS; LANE; DAVIES, 1999).

Assim, uma configuração para reproduzir este movimento foi proposta por Ihara et al. (IHARA; WATANABE, 1994), exemplificada na Figura 1.9.

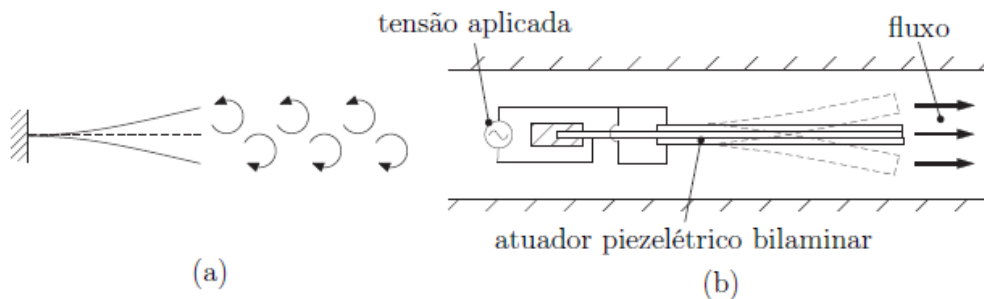
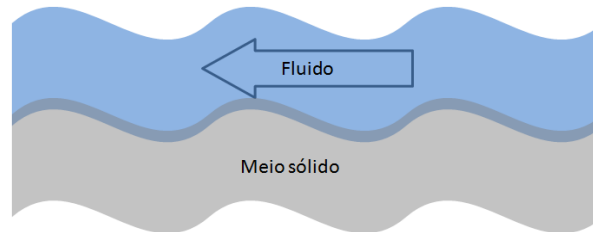


Figura 1.9 - (a) Modelo bilaminar para geração de vórtices. (b) Esquema de um atuador piezoeletrico bilaminar. (VATANABE, 2008).



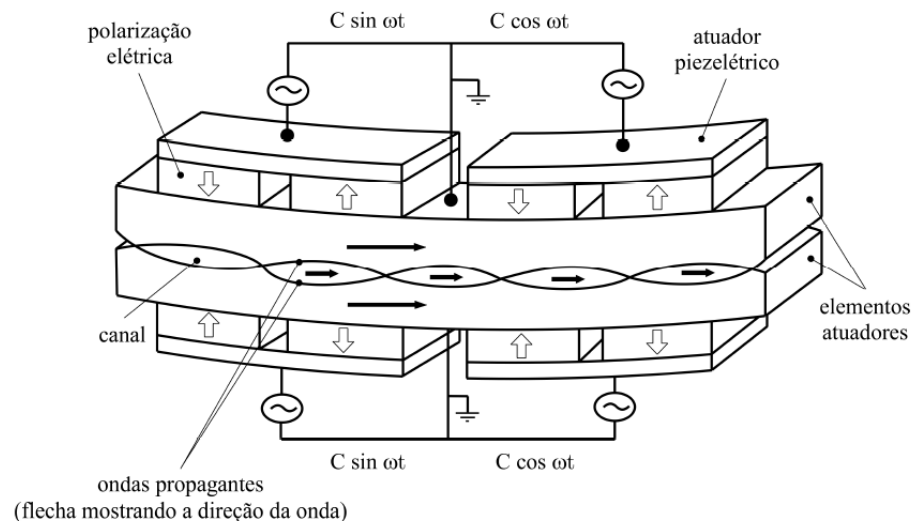
### 1.2.3 Bomba Piezelétrica de Princípio Ondulatório

O bombeamento por princípio ondulatório se dá devido à transmissão de movimento ao fluido pela propagação de uma onda em meio sólido, de modo semelhante ao movimento peristáltico (MIYAZAKI et al., 1991), ilustrado na Figura 1.10. Entre os picos e vales da onda são formadas câmaras onde é provocado o deslocamento de líquido.



**Figura 1.10 - Movimento Peristáltico.**

A propagação de ondas se dá por meio da excitação harmônica de atuadores piezelétricos fixos a uma placa elástica, em frequências próximas à ressonância do sistema. O posicionamento das cerâmicas piezelétricas é combinado a excitações defasadas no tempo, para que sejam obtidas interferências construtivas e destrutivas que gerem uma onda propagante, como mostra a Figura 1.11.

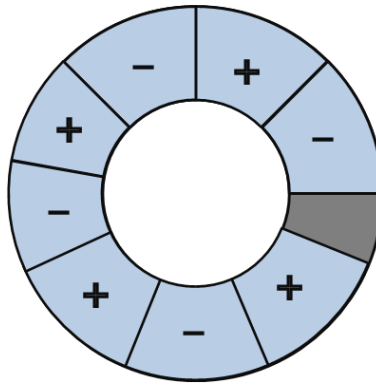


**Figura 1.11 – Formação de onda propagante (adaptado de BAR-COHEN; CHANG, 2001).**

Este mesmo princípio é também amplamente utilizado em motores ultrassônicos piezelétricos, em que o movimento da onda propagante em meio elástico é transmitido a um rotor rígido (UCHINO, 1997). Deste modo, tem sido estudadas diversas configurações rotativas de bombas piezelétricas, com atuador similar ao encontrado em motores

piezelétricos, sendo que a mais antiga encontrada na pesquisa realizada é a presente na patente US 5961298 (BAR-COHEN et al., 1996).

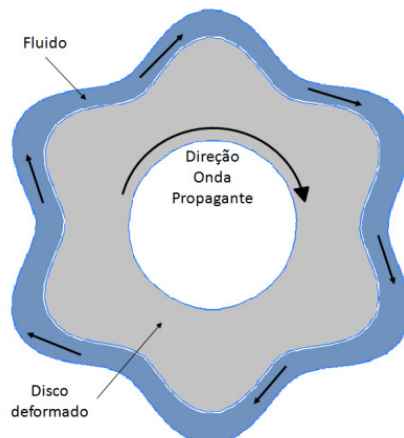
Entre as bombas encontradas, uma constituída por um disco de PZT-5A (titanato zirconato de chumbo) acoplado a um anel de cobre, mostrou-se bastante eficaz no transporte de fluidos. Neste, para a geração do movimento ondulatório, foram acoplados ao disco oito elementos piezelétricos para a inserção do sinal elétrico defasados de  $90^\circ$  entre cada parte, como mostra a Figura 1.12, o que emula o deslocamento desejado (BAR-COHEN; CHANG, 2001).



**Figura 1.12 - Distribuição de cerâmicas piezelétricas sobre o disco.**

Outra configuração semelhante a esta foi proposta por Xu et al. (XU et al, 2012), em que uma bomba de duas cavidades foi desenvolvida para melhorar a dissipação de calor através de escoamento fluido e aumentar o volume bombeado.

Em ambas as bombas apresentadas anteriormente, os maiores deslocamentos gerados no disco ocorrem em sua direção axial, e o fluido encontra-se sobre a superfície deste. Estudos recentes investigaram também a possibilidade de utilizar a deformação circunferencial do disco para movimentar fluido através de um tubo flexível acoplado na circunferência externa no disco (LIANG et al., 2011), conforme ilustrado na Figura 1.13.



**Figura 1.13 - Condução de fluido através da deformação circunferencial.**

## **2. JUSTIFICATIVA**

Como relatado anteriormente, a utilização de bombas de fluxo piezelétricas em aplicações que requerem baixo consumo de potência e volume reduzido, como bioengenharia e sistemas de refrigeração de equipamentos eletrônicos, vêm se mostrando como uma alternativa eficiente. Assim, o número de estudos relacionados a esta área tem crescido consideravelmente.

O princípio de transmissão de movimento através da propagação de ondas encontra-se amplamente aplicado a motores ultrassônicos, porém ainda é pouco explorado no bombeamento de fluidos. Deste modo, mostra-se relevante o desenvolvimento de bombas de fluxo baseadas em ondas propagantes.

## **3. OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é desenvolvimento de bomba de fluxo piezelétrica com configuração rotativa que utiliza princípio ondulatório para movimento de fluido, utilizando simulação computacional, caracterização e construção de protótipos.

Os objetivos específicos deste projeto são:

- Estudar a viabilidade de configuração rotativa de bombas e projetar um modelo.
- Simular o modelo de bomba proposto através de modelagem por Método de Elementos Finitos (MEF) em software ANSYS.
- Construir de protótipos e realizar de testes experimentais.

## 4. FORMULAÇÃO TEÓRICA

### 4.1 Estudo de Materiais Piezelétricos

Materiais piezelétricos possuem a propriedade de contraírem ou expandirem de acordo com a tensão elétrica aplicada em seus terminais, e também o efeito inverso, geram campo elétrico ao serem submetidos a uma deformação. Observa-se na Figura 4.1, a resposta de deformação transversal e longitudinal de acordo com a tensão submetida.

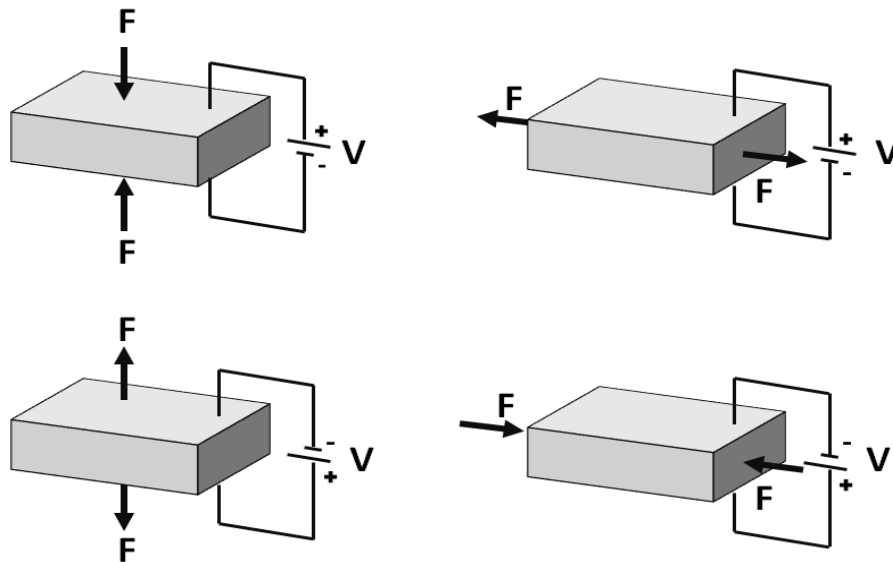


Figura 4.1 - Efeitos transversais e longitudinais de materiais piezelétricos.

As equações constitutivas do efeito piezelétrico são:

$$\mathbf{T} = \mathbf{c}^E \mathbf{S} - \mathbf{e}^t \mathbf{E} \quad (4.1)$$

$$\mathbf{D} = \boldsymbol{\epsilon}^S \mathbf{E} + \mathbf{e} \mathbf{S} \quad (4.2)$$

Onde:

$\mathbf{T}$  = tensor de tensão mecânica

$\mathbf{D}$  = vetor de deslocamento elétrico

$\mathbf{E}$  = vetor campo elétrico

$\mathbf{S}$  = tensor de deformação mecânica

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.3)$$

$\mathbf{c}^E$  = tensor de rigidez elástica obtido com campo elétrico constante

$$\mathbf{c}^E = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$\mathbf{e}$  = tensor de coeficientes piezelétricos de tensão mecânica

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$\boldsymbol{\varepsilon}^S$  = tensor dielétrico medido com deformação constante

$$\boldsymbol{\varepsilon}^S = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

## 4.2 Modelagem Dinâmica de Fluidos

As equações que regem o movimento de partículas fluídas são brevemente apresentadas a seguir. O problema de escoamento de fluidos é governado pelas equações de Navier-Stokes, conservação da massa e conservação de quantidade de movimento, dadas por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (4.7)$$

$$\vec{V} \cdot \vec{V} = 0 \text{ (fluido incompressível)} \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (4.9)$$

Onde:

$\rho$  = densidade

$\vec{V}$  = vetor de velocidade

$P$  = pressão

$\mu$  = viscosidade dinâmica

O software de simulação utilizado ANSYS CFX, utiliza o Método de Volumes Finitos Baseado em Elementos para resolver estas equações.

### 4.3 MEF Piezelétrico

As simulações computacionais utilizam o método dos elementos finitos para resolver as equações que regem os sistemas. Deste modo, para a simulação dos atuadores piezelétricos são utilizadas as equações em termos do deslocamento  $\mathbf{U}$  e do potencial elétrico  $\Phi$  para cada nó da malha de elementos, sendo que esforços mecânicos são representados por forças ( $\mathbf{F}$ ) e as cargas elétricas ( $\mathbf{Q}$ ), resultando nas equações abaixo (LERCH, 1990):

$$[\mathbf{M}_{uu}]\{\ddot{\mathbf{U}}\} + [\mathbf{C}_{uu}]\{\dot{\mathbf{U}}\} + [\mathbf{K}_{uu}]\{\mathbf{U}\} + [\mathbf{K}_{u\phi}]\{\Phi\} = \{\mathbf{F}\} \quad (4.10)$$

$$[\mathbf{K}_{u\phi}]^T\{\mathbf{U}\} + [\mathbf{K}_{\phi\phi}]\{\Phi\} = \{\mathbf{Q}\} \quad (4.11)$$

Essas equações podem ser expressas na forma matricial (LERCH, 1990):

$$\begin{bmatrix} [\mathbf{M}_{uu}] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{U}} \\ \ddot{\Phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{C}_{uu}] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{U}} \\ \dot{\Phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{K}_{uu}] & [\mathbf{K}_{u\phi}] \\ [\mathbf{K}_{\phi u}] & [\mathbf{K}_{\phi\phi}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U} \\ \Phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{Q} \end{Bmatrix} \quad (4.12)$$

Sendo que para cada elemento finito  $e$  (LERCH, 1990):

$$\text{Matriz de rigidez mecânica: } [\mathbf{K}_{uu}]_e = \iiint_{\Omega_e} [\mathbf{B}_u]^T [\mathbf{c}] [\mathbf{B}_u] dV_e \quad (4.13)$$

$$\text{Matriz de acoplamento piezelétrico: } [\mathbf{K}_{u\phi}]_e = \iiint_{\Omega_e} [\mathbf{B}_u]^T [\mathbf{e}] [\mathbf{B}_\phi] dV_e \quad (4.14)$$

$$\text{Matriz de rigidez elétrica: } [\mathbf{K}_{\phi\phi}]_e = \iiint_{\Omega_e} [\mathbf{B}_\phi]^T [\boldsymbol{\epsilon}] [\mathbf{B}_\phi] dV_e \quad (4.15)$$

$$\text{Matriz de Massa: } [\mathbf{M}_{uu}]_e = \rho \iiint_{\Omega_e} [\mathbf{N}_u]^T [\mathbf{N}_u] dV_e \quad (4.16)$$

$$\text{Matriz de amortecimento: } [\mathbf{C}_{uu}] = \alpha [\mathbf{M}_{uu}]_e + \beta [\mathbf{K}_{uu}]_e \quad (4.17)$$

Sendo:

$\Omega_e$ : Domínio do elemento

$\alpha$ : Constante de amortecimento multiplicadora da matriz de massa (LERCH, 1990).

$\beta$ : Constante de amortecimento multiplicadora da matriz de rigidez.

$[\mathbf{N}_u]$ : Funções de interpolação do deslocamento

As matrizes  $[\mathbf{B}_u]$  e  $[\mathbf{B}_\phi]$  são dadas por:

$$[\mathbf{B}_u] = [\mathbf{B}][\mathbf{N}_u] \quad (4.18)$$

$$\text{grad}([\mathbf{N}_\phi][\hat{\Phi}]) = -[\mathbf{B}_\phi][\hat{\Phi}] \quad (4.19)$$

Onde:

$[N_\phi]$ : Funções de interpolação de potencial elétrico

$[\hat{\phi}]$ : Potencial elétrico nos nós dos elementos

$$[B]^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

### 4.3.1 Análise Modal

Utiliza-se análise modal para determinar as frequências naturais de ressonância e antirressonância dos atuadores piezelétricos. Para isto é resolvido um problema de autovalor e autovetor, dado por (LERCH,1990):

$$\begin{bmatrix} [M_{uu}] & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U} \\ \ddot{\phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{uu}] & [K_{u\phi}] \\ [K_{u\phi}^T] & [K_{\phi\phi}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ \phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ Q \end{Bmatrix} \quad (4.21)$$

Para  $Q = \mathbf{0}$ , temos um problema que permite calcular as frequências de antirressonância. Para obter a ressonância, basta curto-circuitar os eletrodos, eliminar as equações do sistema 4.21 que envolvem os nós dos eletrodos e obter o problema de autovalor e autovetor correspondente.

### 4.3.2 Análise Harmônica

Cerâmicas piezelétricas são excitadas com ondas de tensão elétricas senoidais, o que faz necessário realizar uma simulação harmônica, permitindo avaliar o comportamento do sistema nestas condições.

As forças, cargas e potenciais elétricos e deslocamentos são dados por:

$$\{F(t)\} = \{\hat{F}\}e^{j\omega t}; \{Q(t)\} = \{\hat{Q}\}e^{j\omega t} \quad (4.22)$$

$$\{\phi(t)\} = \{\hat{\phi}\}e^{j\omega t}; \{U(t)\} = \{\hat{U}\}e^{j\omega t} \quad (4.23)$$

onde  $\omega$  é a frequência de excitação.

Substituindo as equações 4.22 e 4.23 em 4.10 e 4.11, temos:

$$\begin{bmatrix} [K_{uu}] + j\omega[C_{uu}] - \omega^2[M_{uu}] & K_{u\phi} \\ K_{u\phi}^T & K_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{U} \\ \hat{\phi} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \hat{F} \\ \frac{1}{j\omega} \hat{I} \end{Bmatrix} \quad (4.24)$$

onde  $\hat{\phantom{x}}$  representa matrizes complexas. A análise harmônica permite determinar a resposta em frequência das características da estrutura piezelétrica.

O elemento que representa a cerâmica piezelétrica fornece a carga elétrica complexa  $\hat{Q}$ , de modo que é possível calcular a impedância elétrica do elemento ( $Z$ ), como definido por:

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{V}{i\omega Q} \quad (4.25)$$

onde:

$V$  = diferença de potencial elétrico;

$I$  = corrente elétrica;

$\omega$  = frequência de excitação;

$Q$  = carga elétrica.

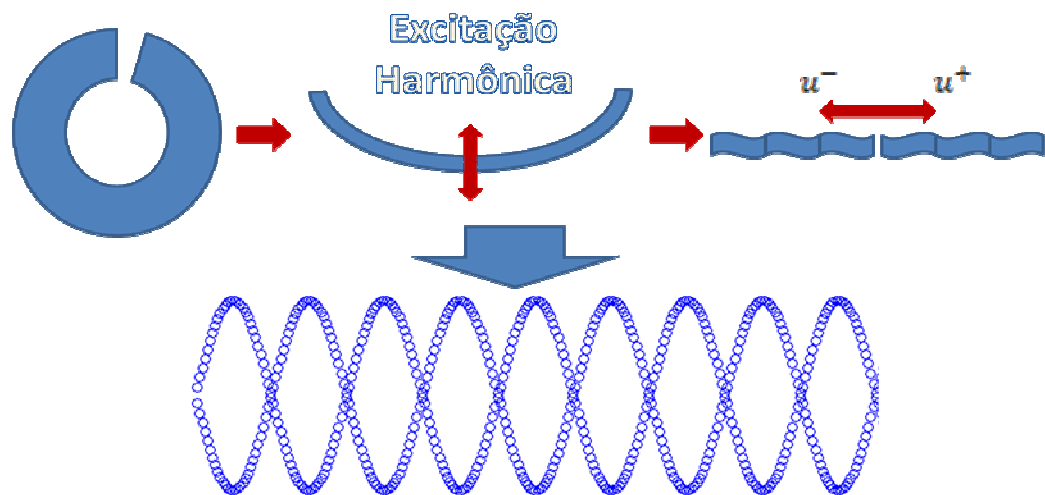
Assim, pode-se obter a curva de impedância elétrica em função da frequência de excitação.

#### 4.4 Propagação de Ondas

O princípio de funcionamento da bomba peristáltica consiste na propagação de ondas em um disco, deste modo, esta seção apresentará uma breve discussão sobre os efeitos da composição das ondas para esta situação.

Tomando-se a excitação harmônica de um disco, pode-se aproximar este por um por um meio propagante linear infinito, no qual uma onda gerada por uma fonte com excitação harmônica senoidal originará uma onda estacionária, conforme ilustrado na Figura 4.2.





**Figura 4.2 - Propagação de onda em meio teórico infinito com uma fonte senoidal.**

Este fato é comprovado observando-se as seguintes equações para a propagação de onda unidimensional:

$$u^+(z, t) = A \operatorname{sen}(\omega t - kz) \quad (4.26)$$

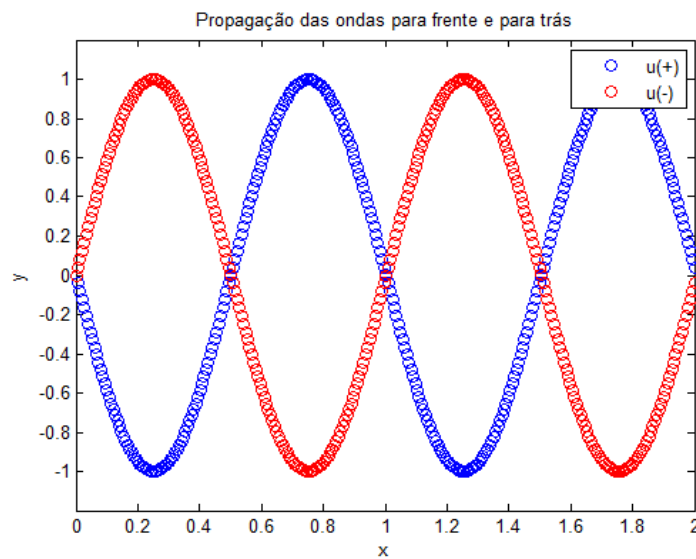
$$u^-(z, t) = A \operatorname{sen}(\omega t + kz) \quad (4.27)$$

Utilizando estas equações no campo das frequências, tem-se:

$$u^+(z) = A \operatorname{sen}(-kz) \quad (4.28)$$

$$u^-(z) = A \operatorname{sen}(+kz) \quad (4.29)$$

Deste modo, plotando-se as formas de onda em função da posição obtêm-se o gráfico da Figura 4.3:



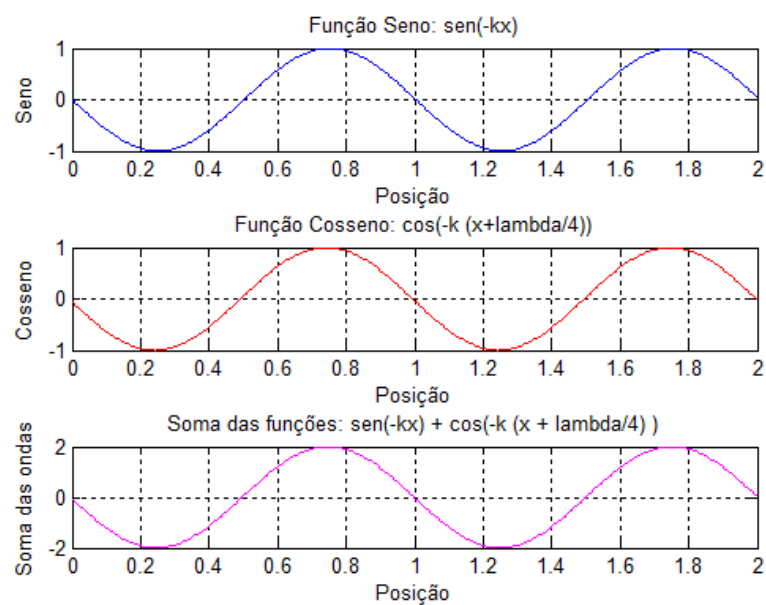
**Figura 4.3 - Forma de ondas propagando para frente e para trás.**

Deste modo, a onda resultante será estacionária, apresentando posições em que ocorrem interferências construtivas e destrutivas.

Com isso, inserindo-se mais uma fonte de excitação defasada de  $90^\circ$  no tempo e deslocada de um quarto do comprimento de onda, isto é, já no campo da frequência:

$$a(z) = A \cos\left(-k \times \left(z + \frac{\lambda}{4}\right)\right) \quad (4.30)$$

Pode-se simular novamente a propagação, obtendo a resposta da Figura 4.4:



**Figura 4.4 - Interferência de ondas para produção de onda propagante.**

Deste modo, o efeito observado pela adição da nova fonte, é que a onda apresenta uma direção preferencial de propagação, resultando assim, em uma onda propagante, conforme ilustrado na Figura 4.5:

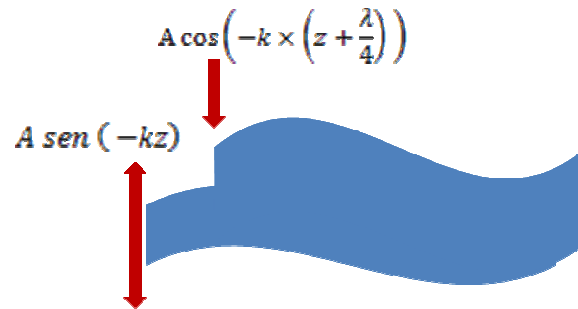


Figura 4.5 - Composição da onda.

## 5. MODELAGEM COMPUTACIONAL

### 5.1 Ambiente de Modelagem

O método de elementos finitos apresenta-se como técnica vantajosa na análise da bomba piezelétrica, pois o modelo analítico apresenta complexidade muito elevada e necessita de hipóteses simplificadoras que podem comprometer o resultado final. O uso de software de simulação computacional facilita também automatizar a análise de diferentes configurações devido à velocidade de cálculo e a possibilidade de alterar parâmetros.

A simulação computacional consiste em três etapas: pré-processamento, solução e pós-processamento. Estas etapas serão detalhadas a seguir.

- **Pré-processamento:** Nesta fase é definida a geometria do modelo, as propriedades dos materiais e é criada a malha de elementos. Para o modelo de disco metálico plano, utilizou-se o elemento do tipo “Shell281” (vide Figura 5.1a) com graus de liberdade em x, y e z. Porém, este tipo não é compatível com características de materiais piezelétricos, de modo que para o modelo de anel metálico com cerâmicas piezelétricas acopladas, é necessário utilizar o elemento do tipo “Solid226” (vide Figura 5.1b), que possui graus de liberdade em x,y,z, e tensão.

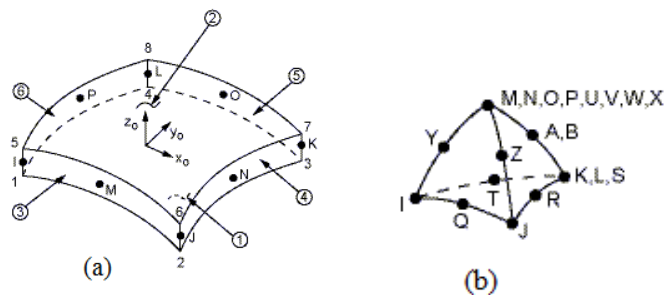


Figura 5.1 - Elementos utilizados: (a) Shell281, (b) Solid226 (ANSYS, 2010)

- **Solução:** Nesta etapa determina-se qual análise que deve ser executada e realiza-se a simulação. Neste trabalho utilizou-se análise modal e harmônica.
- **Pós-processamento:** Consiste na visualização dos resultados, através de gráficos, tabelas ou animações.

### 5.1.1 Linguagem APDL

O software ANSYS permite que as etapas de simulação computacional sejam realizadas através de sua interface gráfica ou utilizando uma linguagem chamada APDL (ANSYS Parametric Design Language).

Para realizar as simulações da bomba piezelétrica, utilizou-se a linguagem APDL, pois esta facilita a reprodução de simulações similares através de pequenas alterações no código-fonte. Além disto, possibilita operações matemáticas, definição de vetores e matrizes e o uso de estruturas lógicas como “if-then-else” e laços de repetição.

### 5.1.2 Condições de Contorno Móveis (ALE)

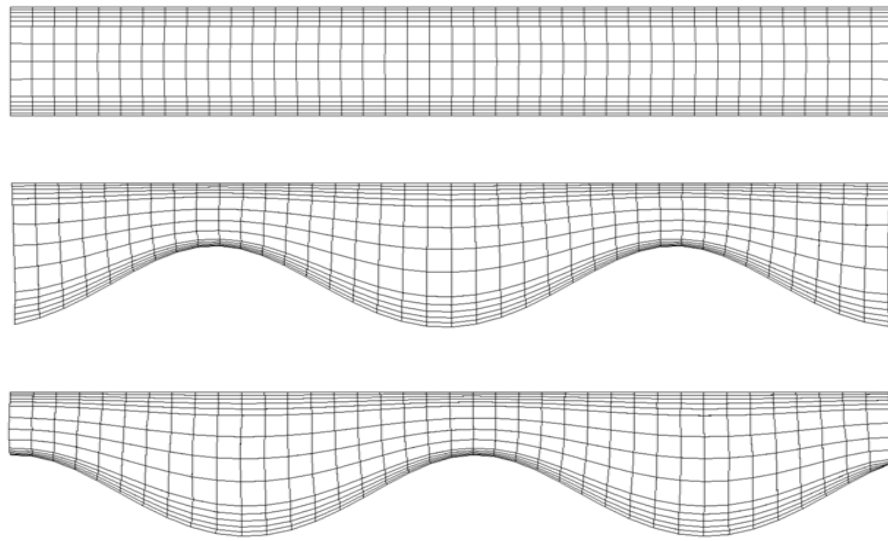
Na interface fluido-estrutura, é necessário descrever o movimento fluido através da formulação Langreana-Euleriana Arbitrária (ALE).

Na descrição Lagrangeana, o movimento de meio contínuo se dá em função da configuração inicial e do tempo (referência fixa), sendo aplicada principalmente à mecânica dos sólidos, em que se deseja determinar deslocamentos de um ponto de um corpo a partir da forma inicial.

Já na descrição Euleriana, o movimento é definido em função da configuração deformada e do tempo, sendo esta descrição muito utilizada em mecânica dos fluidos, onde as incógnitas são velocidades e não deslocamentos.

Na bomba estudada, o disco apresenta movimento ondulatório, de modo que o domínio se altera ao longo do tempo, e por consequência, a malha de elementos finitos também. Desta forma, utilizou-se a formulação ALE para que a malha de elementos possa ser rearranjada ao longo da simulação, possibilitando o uso de condições de contorno de deslocamento e velocidade variáveis no tempo.

A Figura 5.2 mostra o modelo linear fluídico em três instantes de tempos distintos, o domínio inicial sem deformação e duas configurações deformadas (a deformação foi ampliada 950 vezes).



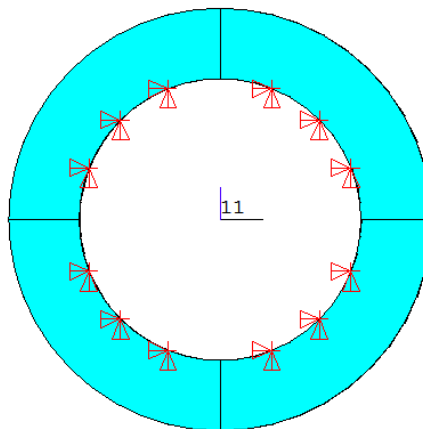
**Figura 5.2 - Deformação da malha de elementos finitos em tempos distintos.**

## **5.2 Criação de Modelos**

### **5.2.1 Disco Bidimensional**

Para uma primeira abordagem da modelagem do disco foi escolhido um modelo plano sem o acoplamento dos elementos piezelétricos, visando dominar a técnica para posteriormente incrementar e implementar um modelo mais complexo.

Para a criação do disco inicial utilizado na simulação, utilizou-se essencialmente a linguagem APDL, cujo código se encontra no apêndice A.1, obtendo-se a o modelo da Figura 5.3. O disco representado possui as seguintes dimensões: Raio interno 12 mm, Raio externo 18 mm e espessura 0,5 mm, apresentando a linha interior engastada.



**Figura 5.3 - Modelo do disco bidimensional.**

### 5.2.2 Configurações Propostas

Para o projeto da bomba piezelétrica foi necessário inicialmente efetuar a análise modal do disco metálico, a fim de escolher um modo de vibrar adequado, pois, com isto, define-se, arbitrariamente, o comprimento de onda desejado. Esta análise é mostrada na seção 9.1.

O comprimento de onda escolhido fornece o espaçamento a ser utilizado entre as pastilhas piezelétricas, mas não limita a distribuição destas no disco, isto é, não define sua configuração.

Outro fator importante considerado na concepção das configurações são as orientações da polarização das cerâmicas, pois a matriz piezelétrica é diretamente dependente desta direção. Portanto, é imprescindível a utilização de pastilhas polarizadas na direção  $z$  (perpendicular ao plano do disco).

Assim, duas configurações foram simuladas, uma, presente na revisão bibliográfica, em que os atuadores estão separados em dois grandes grupos de pastilhas justapostas (BARCOHEN; CHANG, 2001), e outra não encontrada na pesquisa realizada, em que os atuadores piezelétricos estão colocados de forma a reforçarem pontualmente os picos e vales da onda.

#### Configuração de Dois Arrays

Nesta configuração, cada cerâmica piezelétrica possui comprimento equivalente a meio comprimento da onda definido, sendo que estas estão dispostas em dois grandes grupos, um excitado com uma entrada senoidal e outro excitado com uma entrada cossenoidal, e cerâmicas adjacentes possuem polarização reversa. Além disso, os grupos estão defasados, em uma extremidade de um quarto de comprimento de onda e em outra de três quartos de comprimento de onda, conforme a Figura 5.4. O código gerador desta configuração está presente no apêndice A.2.

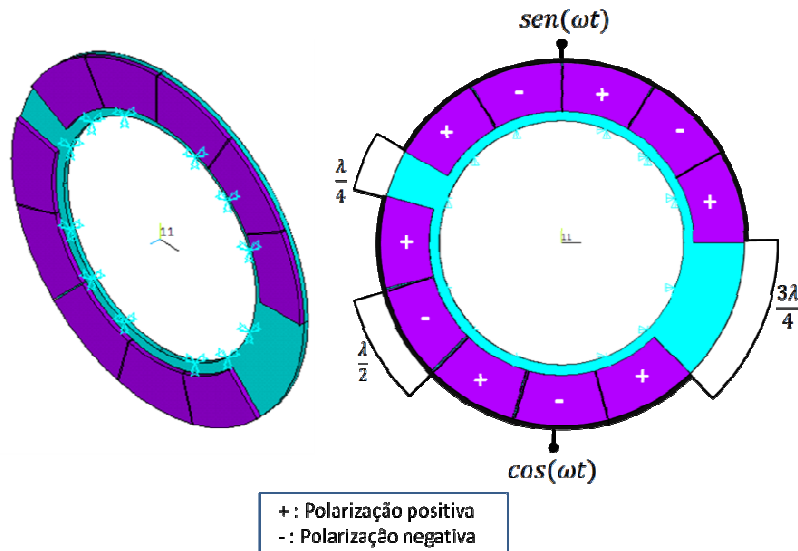


Figura 5.4 - Disposição de cerâmicas piezoelétricas sobre o disco na configuração com dois arrays.

### Configuração com distribuição uniforme

Para esta configuração, a distância entre as pastilhas é o fator determinante para a formação de ondas, assim, a distribuição das cerâmicas sobre o disco deve obedecer à separação de um quarto do comprimento de onda entre os centros das pastilhas. Além disso, visando estudar a influência da largura da pastilha, iniciou-se com a largura de um oitavo do comprimento de onda, e os resultados desta análise estão apresentados na seção 7.4. A Figura 5.5 ilustra a configuração e o código de criação está no apêndice A.3.

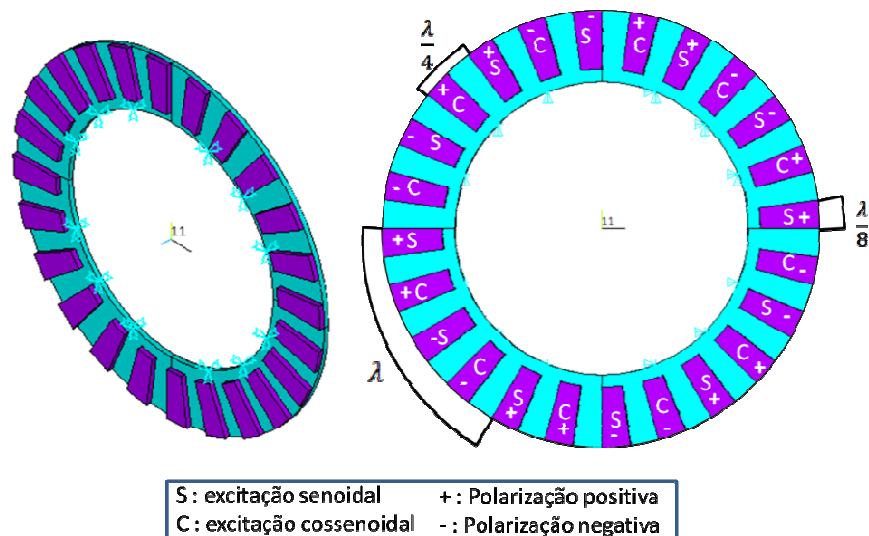


Figura 5.5 - Configuração com a distribuição uniforme.



### 5.3 Procedimento de simulação e coleta de dados

As simulações são realizadas utilizando-se o script para o ANSY APDL (Apêndice A: Listagem APDL), editando os parâmetros desejados, entre eles, tipo de análise, modal ou harmônica, dimensões do disco e da cerâmica etc. Em seguida, é necessário editar os arquivos de saída do ANSYS, para tanto, se utiliza um software desenvolvido em Java para obter-se a formatação desejada (Apêndice B: Códigos Java). Por fim, utilizam-se os códigos em MatLab (Apêndice C: Códigos Matlab) para o pós-processamento e plotagens.

### 5.4 Simulação do Escoamento de Fluido

A simulação computacional do escoamento de fluido tem como objetivo observar o comportamento do sistema, em termos de vazão e pressão gerada na bomba e realizar análise de sensibilidade em função dos parâmetros geométricos da câmara de fluido: altura, largura e diâmetro dos bocais.

Foram analisados dois modelos para representar a câmara de fluido, um simplificado com configuração linear bidimensional (Figura 5.8), para avaliar a influência da altura da câmara no escoamento, com menor custo computacional, e um modelo tridimensional completo, de formato circular (Figura 5.9), representando toda a camada de fluido que está sobre o atuador, que possibilita a análise dos parâmetros da bomba, como vazão e pressão.

Realizou-se análise transiente do escoamento, observando o tempo necessário até que o sistema atinja o regime permanente, onde a variação da vazão mássica média torna-se inferior a 5% e avaliando as grandezas desejadas a partir deste instante. Optou-se por utilizar incrementos de tempo de  $5\mu\text{s}$ , aproximadamente um décimo do período da onda, a partir da análise de convergência dos resultados.

As seguintes condições de contorno foram adotadas: pressões nulas nos nós da entrada e da saída da bomba de fluxo, deslocamentos e as velocidades são nulas na face superior, e, para emular o comportamento do atuador piezelétrico, são impostos deslocamentos e velocidades senoidais, cujo equacionamento encontra-se descrito na seção 5.4.1.

### 5.4.1 Equacionamento do Movimento da Face Inferior

Na face inferior do modelo, foi emulado o movimento realizado pela onda propagante no disco, definindo esta face como uma parede sem escorregamento, com deslocamento especificado em função do instante de tempo e posição, como mostra a Figura 5.6.

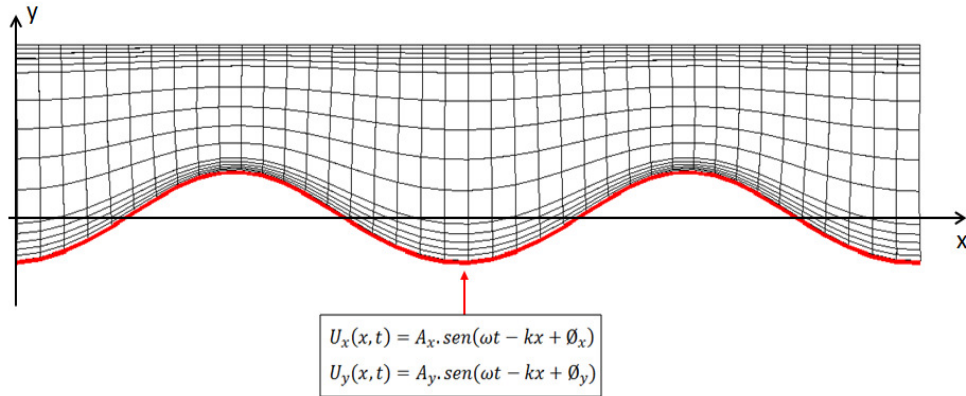


Figura 5.6 - Onda propagante na face inferior do modelo.

Para o modelo linear, o deslocamento da malha encontra-se em função da coordenada  $x$  (direção longitudinal) e possui a seguinte forma de onda, cuja amplitude e fase são obtidas através de análise harmônica.

$$U_x(x, t) = A_x \cdot \text{sen}(\omega t - kx + \varphi_x) \quad (5.1)$$

$$U_y(x, t) = A_y \cdot \text{sen}(\omega t - kx + \varphi_y) \quad (5.2)$$

onde:

$$\omega = 2\pi f$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \text{número de onda}$$

$$A = \text{amplitude}$$

$$\varphi = \text{fase}$$

No modelo completo em forma de disco, o deslocamento é dado em função do ângulo  $\theta$  em relação ao eixo  $x$  (direção axial) e a coordenada radial  $r$ . Para o modo de vibrar que apresenta 6 picos de onda, temos:

$$kx = \frac{2\pi x}{\lambda} = \frac{2\pi r \theta}{\frac{\pi r}{6}} = 6\theta \quad (5.3)$$

Deste modo, a expressão do deslocamento senoidal imposto torna-se:

$$u(r, \theta, t) = A(r) \cdot \text{sen}(\omega t - 6\theta + \varphi) \quad (5.4)$$

onde:

$$A(r) = a \cdot r + b \quad (5.5)$$

representa a amplitude em função do raio, obtida através de interpolação linear, entre os deslocamentos obtidos no modelo mecânico, tomados os raios interno e externo como pontos de controle.

#### 5.4.2 Cálculo vazão média mássica

A vazão mássica gerada pela bomba é senoidal, acompanhando os picos e vales da onda propagante gerada no disco. Deste modo, deseja-se avaliar através das simulações, a vazão mássica média, que é definida, na forma contínua, por:

$$\bar{Q} = \frac{\int_{t_0}^{t_1} Q(t) dt}{\int_{t_0}^{t_1} dt} \quad (5.6)$$

Obtém-se, porém, uma função discreta da vazão no tempo como resultado de simulação, cuja média pode ser calculada utilizando integração pelo método de trapézios, resultando em:

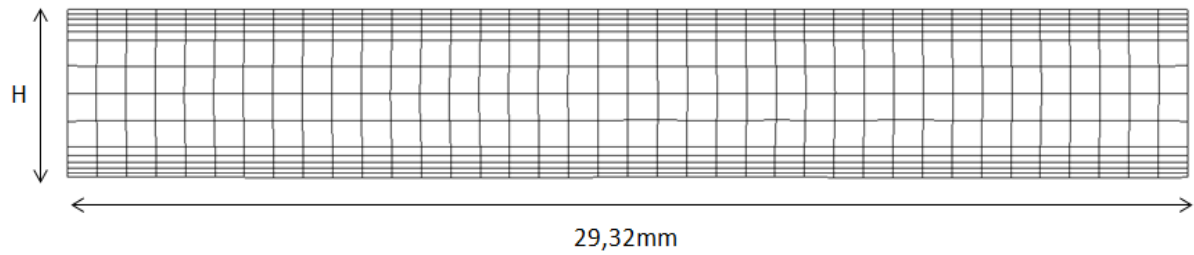
$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=0}^N Q_i}{\Delta t} \quad (5.7)$$

Optou-se por avaliar a média da vazão a cada intervalo de tempo  $\Delta t = 0,025s$ , tomando a seção de entrada da bomba como referência. Como só há uma seção entrada e uma seção de saída, esta vazão corresponde à vazão mássica total da bomba.

#### 5.4.3 Estudo de escoamento em duto retilíneo

Para simplificar a modelagem e diminuir o custo computacional inerente a simulação da onda propagante, realizou-se a modelagem de uma onda propagante, em um duto retilíneo bidimensional, cuja dimensão longitudinal corresponde a dois comprimentos de onda obtidos no raio médio do disco e a altura é um parâmetro variável que se deseja estudar.

A malha de elementos finitos utilizada, que se encontra na Figura 5.7, possui regiões mais discretizadas próximas às superfícies inferior e superior, para melhor observação dos efeitos de camada limite.



**Figura 5.7 - Malha de elementos finitos de duto retilíneo.**

Os parâmetros relevantes para definição da geometria e equacionamento estão listados na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1 - Parâmetro da simulação de duto retilíneo.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Raio Médio (Rm)	14 mm
Comprimento de onda médio ( $\lambda$ )	14,66 mm
Frequência (f)	14570 Hz
Velocidade Angular ( $\omega$ )	91546 rad/s
Número de onda (k)	428,57 1/m

As amplitudes de excitação foram retiradas da simulação harmônica, feita através do software ANSYS Mechanical APDL, escolhendo-se o nó de coordenada  $x=0$  e  $y=14$  mm (raio médio do disco). As equações de propagação de onda correspondentes a este nó são dadas por:

$$U_x = -2,1539 \times 10^{-7} \times \text{sen}(91546.t - 428,57.x + 0,80848) \quad (5.8)$$

$$U_y = 1,6558 \times 10^{-6} \times \text{sen}(91546.t - 428,57.x - 0,74397) \quad (5.9)$$

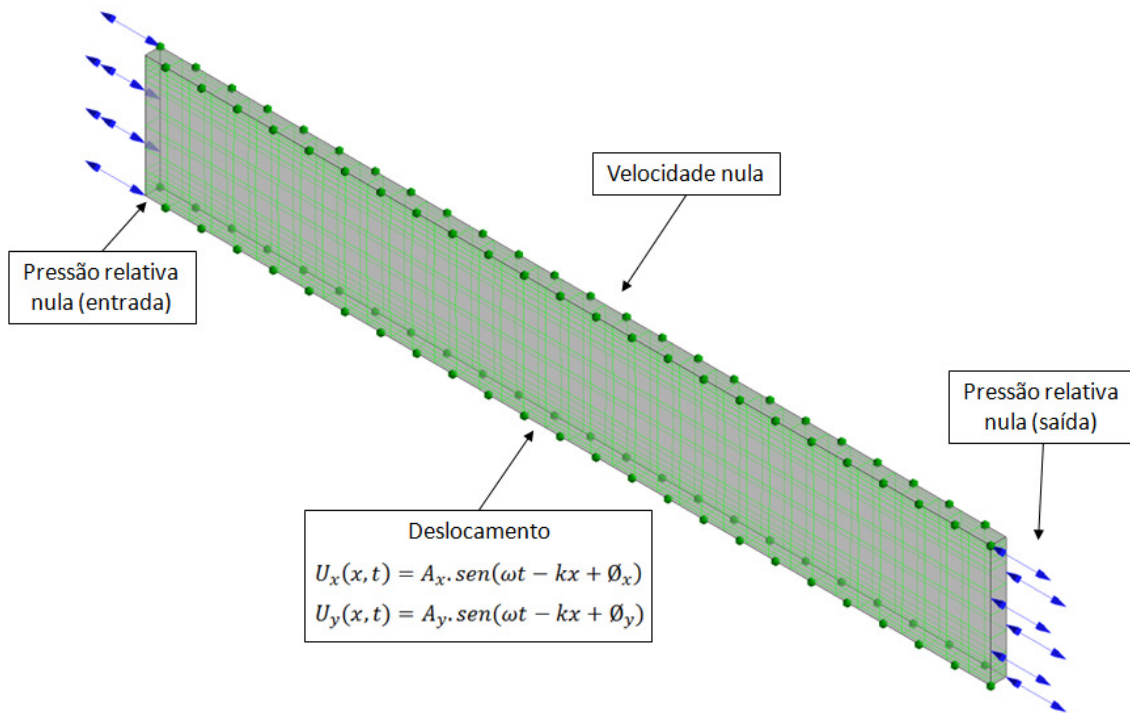


Figura 5.8 - Condições de contorno modelo linear.

#### 5.4.4 Estudo de escoamento em modelo tridimensional circular

Deseja-se analisar parâmetros de eficiência da bomba piezelétrica, com modelo mais detalhado da câmara de fluido, que inclui também os bocais de entrada e saída. As dimensões do modelo tridimensional estão listadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Dimensões de modelo circular.

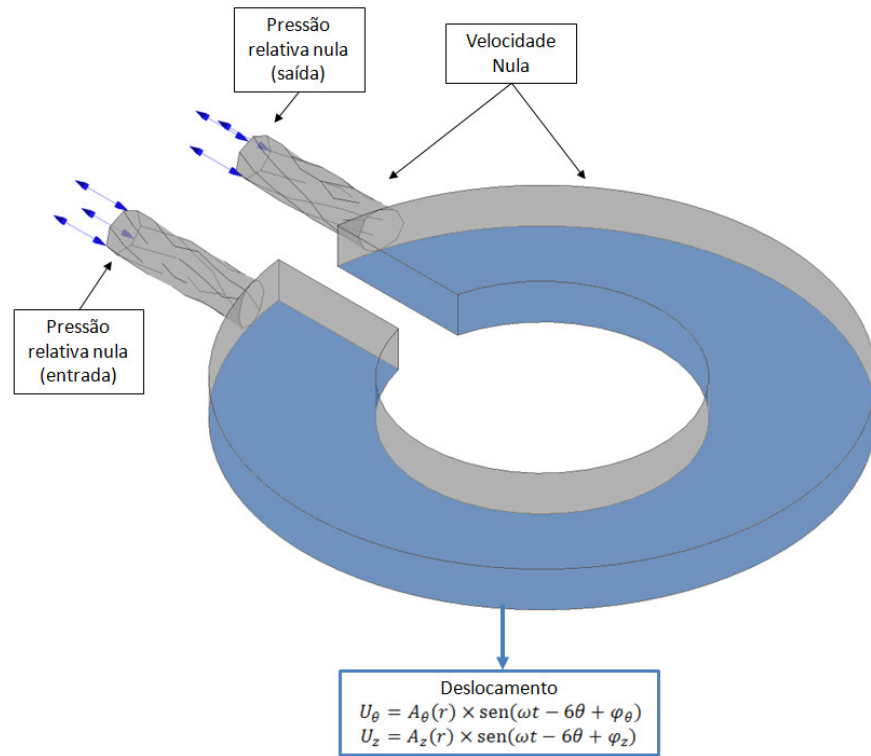
Dimensão	Valor
Raio Externo	10 mm
Raio Interno	20 mm
Raio do bocal	3 mm
Altura	3 mm

As amplitudes de excitação foram retiradas da simulação harmônica, feita através do software ANSYS Mechanical APDL, escolhendo-se nós sobre o disco de coordenadas  $x=0$  e  $y$  positivo, utilizando aproximação linear do módulo das amplitudes e média das fases. As equações de propagação de onda correspondentes a este nó são dadas, em coordenadas cilíndricas, por:

$$U_z = (306,2 * r - 3) \times 10^{-6} \times \text{sen}(91546.t - 6\theta - 2,7) \quad (5.10)$$

$$U_\theta = (237 * r - 2,1) \times 10^{-7} \times \text{sen}(91546.t - 6\theta + 0,013) \quad (5.11)$$

As condições de contorno, apresentadas na Figura 5.9, são similares às do modelo linear, apresentando duas faces com aberturas de pressão relativa nula, a face inferior com deslocamentos senoidais e as demais superfícies com velocidades nulas.



**Figura 5.9 - Condições de contorno modelo circular.**

## 6. PROJETO CONSTRUTIVO

Nesta seção são apresentadas análises construtivas gerais e diretrizes da fabricação e montagem dos protótipos.

### 6.1 Requisitos de Projeto

#### 6.1.1 Adesivo

O estator é constituído de um disco de alumínio com cerâmicas piezelétricas acopladas, e possui duas configurações, conforme apresentado anteriormente na Figura 5.4 e na Figura 5.5. Para fixar as cerâmicas ao disco deve-se usar um adesivo que atenda aos seguintes requisitos da Tabela 6.1:

<b>Tabela 6.1 - Requisitos do Adesivo.</b>
Requisitos do adesivo
Alta capacidade de fixação metal-cerâmica
Tempo de cura inferior a 24 horas
Ativado por reação química ou por calor

#### 6.1.2 Suporte do estator

As ondas propagantes que percorrem o disco não possuem nós estacionários, com isso, tornam-se uma dificuldade no projeto da fixação do estator, além disso, é necessária a condição de engastamento no centro do disco, com isso, definem-se os requisitos da Tabela 6.2.

<b>Tabela 6.2 - Requisitos do Suporte do disco.</b>
Requisitos do Suporte
Apresentar alta rigidez
Oferecer suporte uniforme aos pontos de apoio
Não interferir na oscilação inerente a propagação da onda

### 6.1.3 Carcaça

A bomba piezelétrica trabalhará imersa em fluido, deste modo, são necessários cuidados no projeto da carcaça que envolve o disco piezelétrico e a câmara de fluido, para evitar vazamentos e vedar os condutores elétricos e cerâmicos. Além disto, esta deve ser preferencialmente constituída de material translúcido, para que seja possível observar o escoamento fluido em seu interior.

### 6.1.4 Sistema elétrico

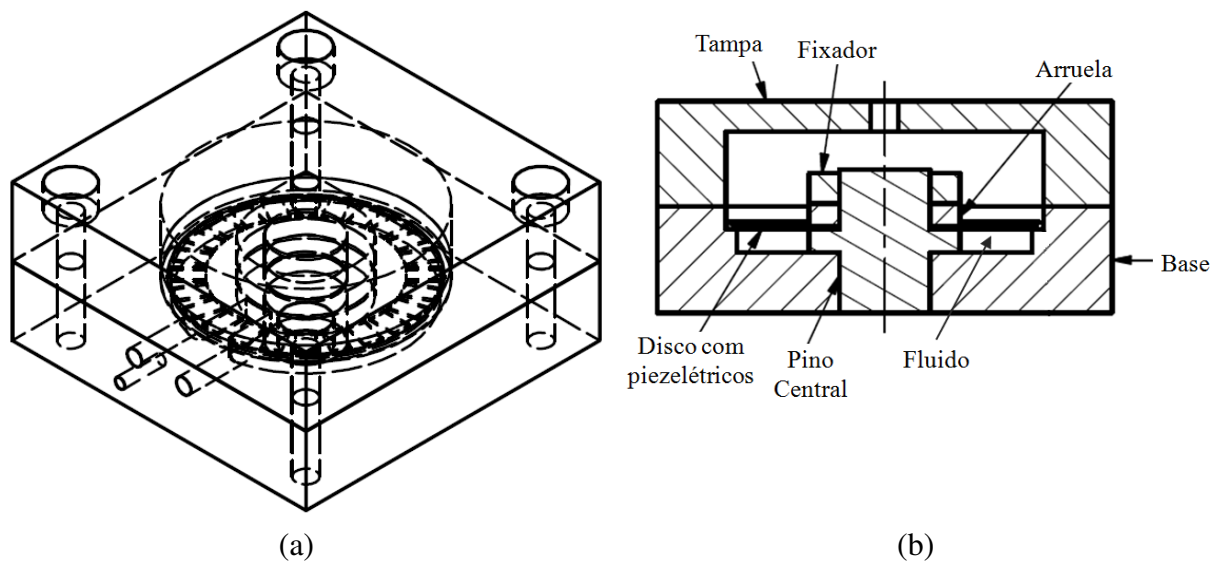
O acionamento da bomba piezelétrica deve operar em frequências elevadas, da ordem de 15 a 20 kHz, para obtenção do modo de vibrar desejado, e fornecer amplitudes de tensão da ordem de 80V (pico a pico). Além disso, o sistema deve apresentar alta sincronia entre as fontes, pois a defasagem entre os sinais senoidais deve estar contida no intervalo entre  $88^\circ$  e  $92^\circ$ . Assim, os requisitos deste sistema podem ser resumidos na Tabela 6.3.

<u>Tabela 6.3 - Requisitos do Sistema elétrico.</u>
<u>Requisitos do Sistema elétrico</u>
Boa precisão
Baixo ruído elétrico
Gerar funções seno e cosseno
<u>Gerar frequências da ordem de 20kHz</u>

## 6.2 Modelo do Protótipo

Com base nos requisitos apresentados anteriormente, foi elaborado o modelo do protótipo a ser construído. A bomba piezelétrica projetada consiste dos seguintes componentes, ilustrados esquematicamente na Figura 6.1: câmara de condução de fluido, fixador do disco, estator (disco metálico com pastilhas), carcaça e vedação.





**Figura 6.1 - Desenho de conjunto da bomba piezelétrica: (a) Vista Isométrica. (b) Corte Transversal.**

Os desenhos de fabricação do protótipo encontram-se no Apêndice D - Desenhos de Fabricação.

## 7. FABRICAÇÃO

### 7.1 Construção do Estator

O estator constitui-se de um disco metálico de alumínio, de raio externo 20 mm e raio interno 6 mm, com 24 pastilhas cerâmicas retangulares acopladas. Os desenhos de conjunto e de fabricação deste encontram-se no Apêndice D - Desenhos de Fabricação. As seguintes etapas são necessárias para construção do estator: corte do disco, corte das cerâmicas, colagem das cerâmicas e fiação.

A usinagem do material piezelétrico (PZT-5A) foi feita através de uma máquina de corte com disco diamantado, onde foram feitas pastilhas de dimensões 3 mm de largura por 5 mm de altura, com precisão de 0,1 mm.

Para um correto posicionamento das cerâmicas no disco, optou-se pelo uso de um gabarito auxiliar. Tanto o disco quanto o gabarito foram usinados a partir de corte a laser em uma chapa de alumínio de 0,5mm de espessura. As peças usinadas estão mostradas na Figura 7.1.

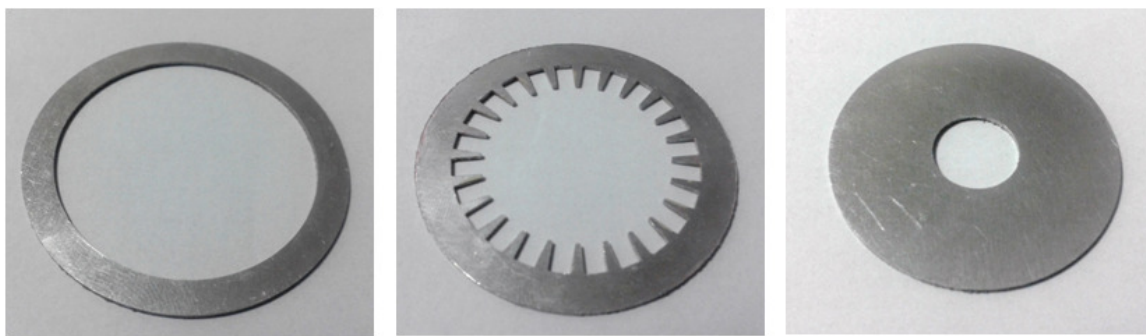
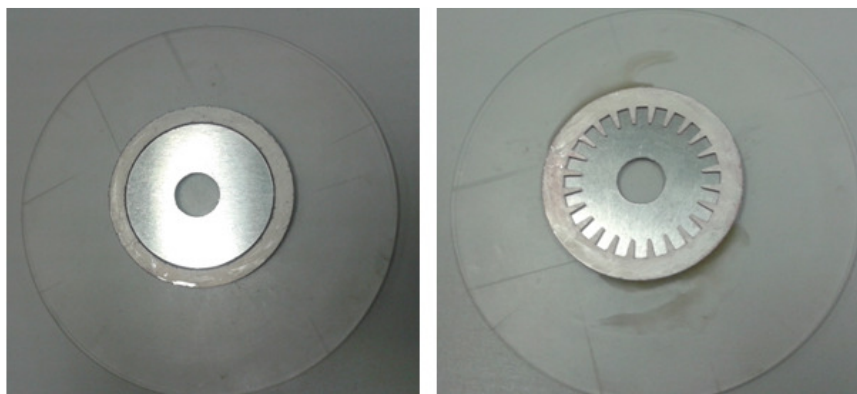


Figura 7.1 - Peças usinadas através de corte a laser.

Para colar as cerâmicas ao disco, utilizou-se resina epóxi condutiva, de modo que o disco de alumínio seja o terra comum para o circuito. Na Figura 7.2 e Figura 7.3 é mostrado o posicionamento das cerâmicas com auxílio do gabarito, revestido com agente desmoldante (Renlease QZ 511) no gabarito para evitar a fixação das cerâmicas neste. Após colar as cerâmicas, o conjunto permaneceu em um forno a 60° durante aproximadamente duas horas para acelerar o processo de cura da resina epóxi.



**Figura 7.2 - Gabarito, disco e suporte auxiliar de posicionamento.**



**Figura 7.3 - Posicionamento das cerâmicas com auxílio de gabarito.**

O estator finalizado, disco de alumínio com cerâmicas piezelétricas, encontra-se na Figura 7.4



**Figura 7.4 - Estator da bomba piezelétrica de fluxo.**

Foram confeccionados dois estatores, devido as diferenças de polarização e excitação das cerâmicas piezelétricas entre as duas configurações propostas. A Figura 7.5 mostra a disposição da fiação em cada um dos estatores, para satisfazer as condições excitação de cada

configuração. O aterramento encontra-se no disco de alumínio e a fiação está ligada através da fixação metálica deste.

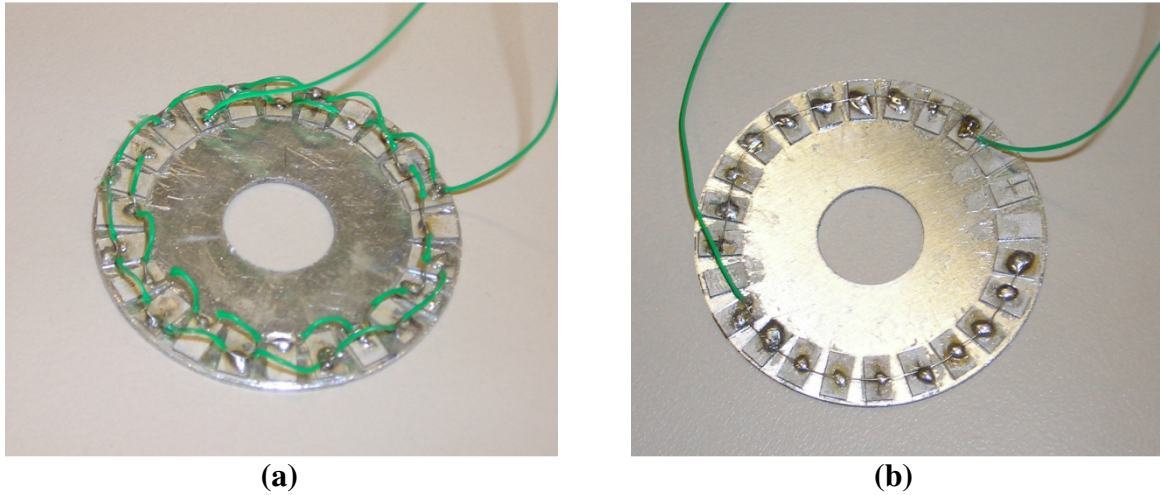


Figura 7.5 - Fiação do disco piezelétrico. (a) Configuração distribuída. (b) Configuração Dois Arranjos.

## 7.2 Montagem do Protótipo

As peças constituintes da carcaça, que foram usinadas em acrílico no centro de usinagem CNC da Escola Politécnica, estão apresentadas na Figura 7.6. O conjunto de fixação do disco foi feito em aço inoxidável, devido a suas propriedades mecânicas e pelo fato de não oxidar em contato com a água. As três peças estão mostradas na Figura 7.7.

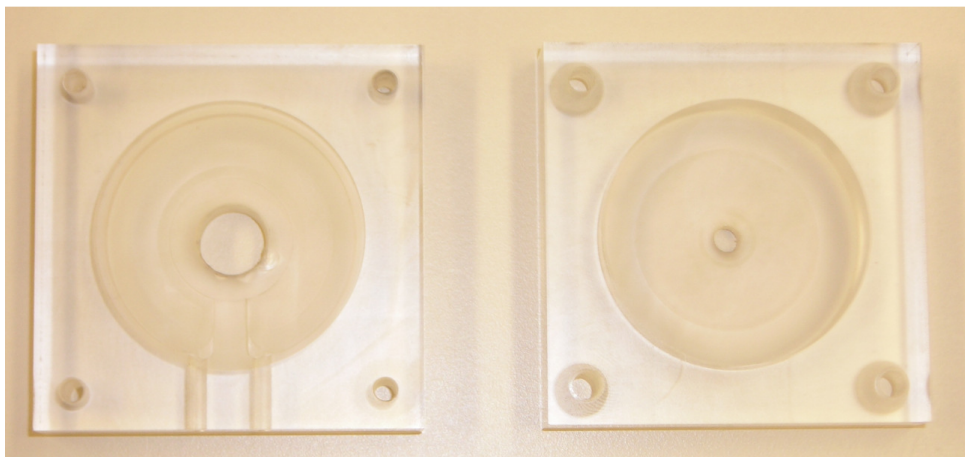


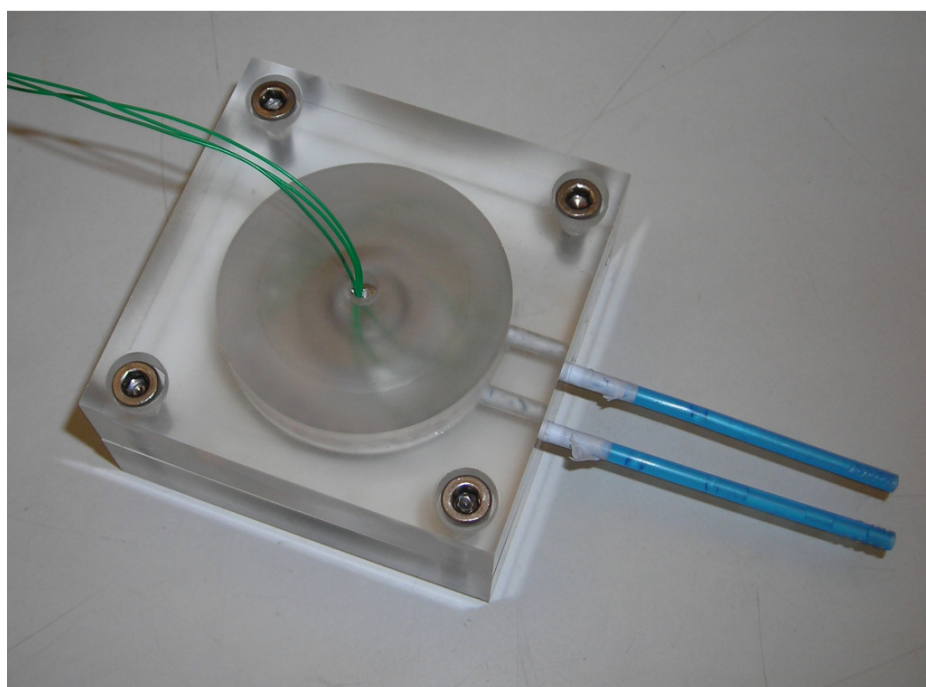
Figura 7.6 - Carcaça da bomba piezelétrica de fluxo.





**Figura 7.7 - Elementos de fixação do disco piezelétrico.**

Na montagem do protótipo, foram necessários cuidados especiais com a vedação da bomba piezelétrica. Optou-se por revestir as circunferências interna e externa do disco com material que apresenta baixa rigidez, reduzindo sua influência na onda propagante gerada no estator. O protótipo montado encontra-se na Figura 7.8.



**Figura 7.8 - Protótipo da bomba piezelétrica montado.**

## 8. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

### 8.1 Equipamentos Utilizados

Em todos os ensaios realizados, foram utilizados os seguintes aparelhos para excitação das cerâmicas (apresentados em Figura 8.1):

- Gerador de funções Agilent 33500 B com dois canais de saída, onde é possível controlar a defasagem entre os dois sinais.
- Dois amplificadores de tensão AR Worldwide, de potência 800W e faixa de operação em frequências entre 10KHz a 3Mhz, para que a tensão de excitação seja de 80V pico a pico.
- Um osciloscópio para monitoração dos sinais de tensão, verificação e ajuste da defasagem real entre os dois sinais.



Figura 8.1 - Aparato experimental para excitação das cerâmicas.

## 8.2 Montagem experimental

A Figura 8.2 mostra esquematicamente as conexões realizadas para o acionamento das cerâmicas piezelétricas com sinais senoidais com defasagem controlada. A conexão entre a tensão terra de referência, presente entre todos os equipamentos, não está representada. No estator da bomba piezelétrica, o terra encontra-se conectado ao disco de alumínio.

Apesar dos dois canais do gerador de funções estarem sincronizados, os amplificadores introduzem atrasos no sistema que modificam a defasagem entre os dois sinais, o que prejudica a formação de uma onda propagante. Deste modo, torna-se necessária a monitoração da diferença de fase entre os dois sinais de excitação através de um osciloscópio.

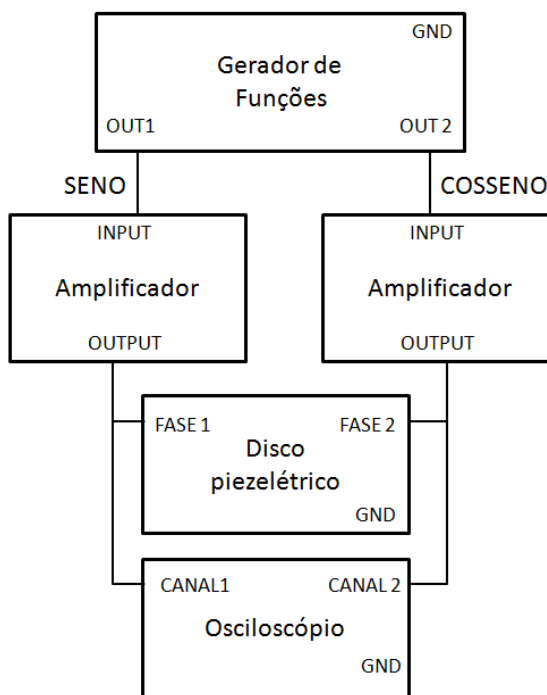


Figura 8.2 - Diagrama de blocos da ligação elétrica.

## 8.3 Ensaios

### 8.3.1 Varredura de Frequências de Ressonância

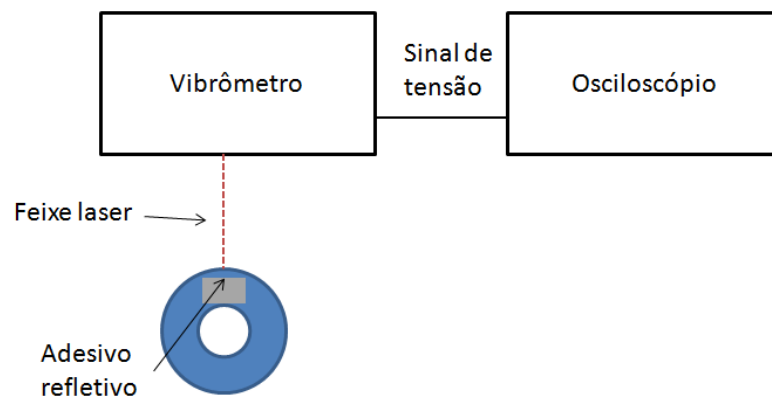
Primeiramente, realizou-se um teste para verificar as frequências de ressonância do protótipo e validar que os resultados de simulação computacional correspondem à realidade do protótipo construído, ou verificar possíveis erros relevantes de fabricação e montagem. O teste consiste em variar a frequência de excitação do estator, utilizando o gerador de funções, até que se

observe a maior amplitude de vibração, medida através do vibrômetro a laser Polytec OFV-5000, mostrado na Figura 8.3.



**Figura 8.3 - Vibrômetro a laser Polytec OFV-5000**

Para tanto, cola-se um adesivo refletivo na superfície no disco metálico, sobre o qual é focalizado o feixe de laser. O vibrômetro gera sinal de tensão proporcional a velocidade de deslocamento neste ponto, que é observado por meio de um osciloscópio, conforme mostrado esquematicamente na Figura 8.4.



**Figura 8.4 - Diagrama de blocos de medição utilizando vibrômetro.**

Por tratar-se de um sinal senoidal, cuja derivada é conhecida, é possível obter a amplitude do deslocamento através da amplitude velocidade medida por meio da seguinte relação:

$$A = \frac{V}{\omega}$$

onde  $\omega$  é a velocidade angular.



### 8.3.2 Pressão Estática

Neste ensaio, o protótipo deve ser mantido na horizontal e seu bocal de saída associado a um duto em "L", de modo que seja possível medir a altura de coluna d'água formada, e obter assim, a pressão dada pela bomba, conforme a Figura 8.5.

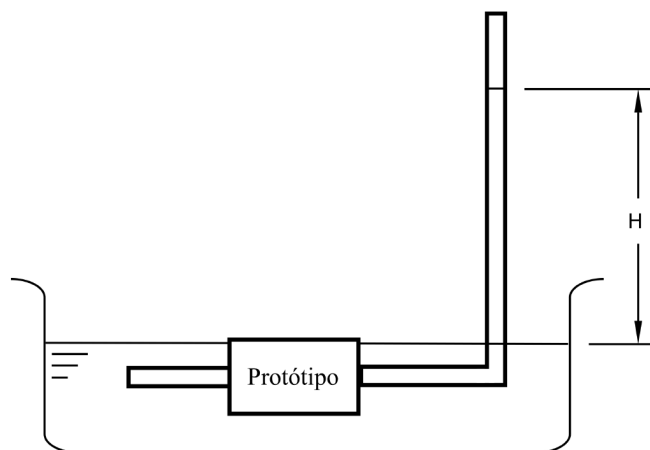


Figura 8.5 - Aparato experimental do ensaio de pressão.

### 8.3.3 Vazão

Para determinar a vazão bombeada, o protótipo deve ser colocado na horizontal em reservatório de grandes dimensões, de modo que não haja diferença de pressão. Em série com o bocal de deve-se acoplar um tubo cuja área e comprimentos são conhecidos e observar o intervalo de tempo que fluido com corante leva para atravessar um comprimento conhecido, conforme a Figura 8.6.

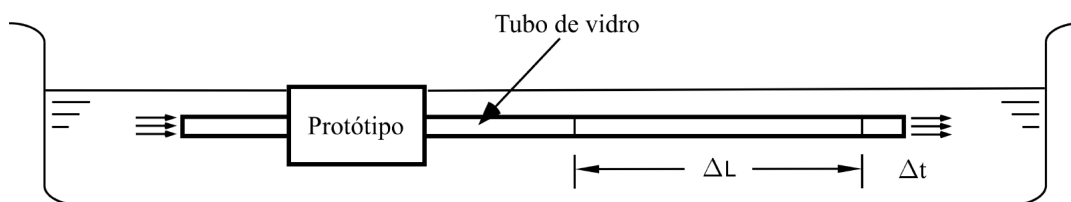


Figura 8.6 - Aparato experimental do ensaio de vazão.

## 9. RESULTADOS

### 9.1 Simulação Computacional

Os resultados apresentados nesta seção utilizam-se das configurações propostas na seção 5, a fim de obter as frequências naturais (análise modal) dos sistemas e verificar a propagação das ondas sob estas frequências. A frequência obtida com a análise modal será utilizada para a realização da análise harmônica, que fornecerá as amplitudes de deslocamento sob determinada excitação.

O material piezelétrico utilizado neste projeto é a cerâmica PZT-5A (titanato zirconato de chumbo), de classe de simetria de 6 mm e direção de polarização: eixo Z, e o disco metálico é constituído de alumínio. As propriedades destes materiais, adotadas nas simulações, estão listadas na Tabela 9.1.

Tabela 9.1 - Propriedades de material piezelétrico PZT-5A e de alumínio (VATANABE, 2008).

Material	Constante	Símbolo	Valor	Unidade
PZT-5A	Elásticas	$c_{11}$	$12,5 \times 10^{10}$	$N/m^2$
		$c_{12}$	$7,54 \times 10^{10}$	$N/m^2$
		$c_{13}$	$7,52 \times 10^{10}$	$N/m^2$
		$c_{33}$	$11,1 \times 10^{10}$	$N/m^2$
		$c_{44}$	$2,11 \times 10^{10}$	$N/m^2$
		$c_{55}$	$2,48 \times 10^{10}$	$N/m^2$
		$c_{66}$	$2,48 \times 10^{10}$	$N/m^2$
	Elétricas	$e_{15}$	12,3	$C/m^2$
		$e_{31}$	-5,4	$C/m^2$
		$e_{33}$	15,8	$C/m^2$
	Dielétricas	$\varepsilon_{11}$	$8,1066 \times 10^{-9}$	$F/m$
		$\varepsilon_{22}$	$7,3455 \times 10^{-9}$	$F/m$
		$\varepsilon_{33}$	$8,1066 \times 10^{-9}$	$F/m$
	Massa específica	$\rho$	7750	$kg/m^3$
Alumínio	Densidade	$\rho$	2700	$kg/m^3$
	Coefficiente de Poisson	$\nu$	0,3	-
	Módulo de Elasticidade	E	70	GPa

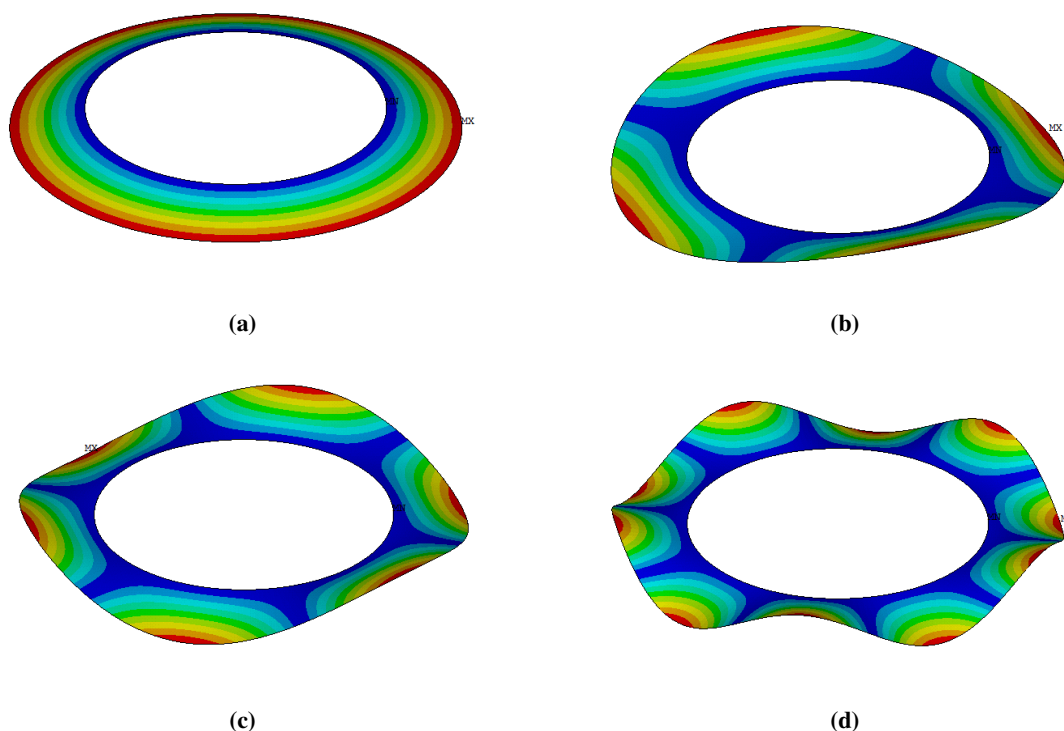
As amplitudes obtidas na análise harmônica serão usadas como condições de contorno na simulação de escoamento fluido, onde será emulada uma onda propagante. A simulação fluídica fornece importantes informações sobre a eficiência de bombeamento esperada. Considerou-se taxa de amortecimento constante de 2%. Nas simulações e ensaios de escoamento utilizou-se como fluido água a temperatura de 25° e pressão de 1 atm, cujas propriedades estão listadas na Tabela 9.2.

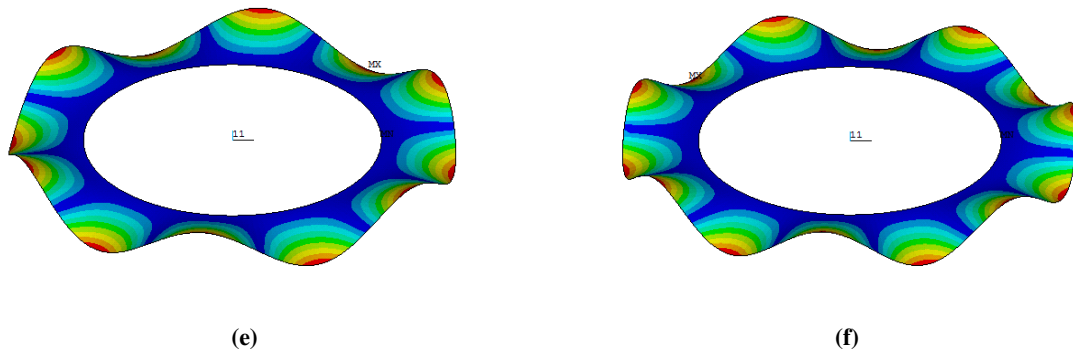
**Tabela 9.2 - Propriedades da água.**

Constante	Símbolo	Valor	Unidade
Massa específica	$\rho$	998	$kg/m^3$
Viscosidade Dinâmica	$\mu$	0,001003	$Pa.s$
Velocidade propagação de onda	$c_{H_2O}$	1500	$m/s$

### 9.1.1 Análise do disco bidimensional

Realizou-se a análise modal do disco, conforme descrito na seção 5.2.1, utilizando o código APDL do apêndice A.1, para selecionar o modo de vibrar no qual o disco irá operar. Para a condição de contorno imposta, de deslocamento nulo na linha interna, conforme a Figura 5.3, foram obtidos diversos modos de vibrar apresentados na Figura 9.1.

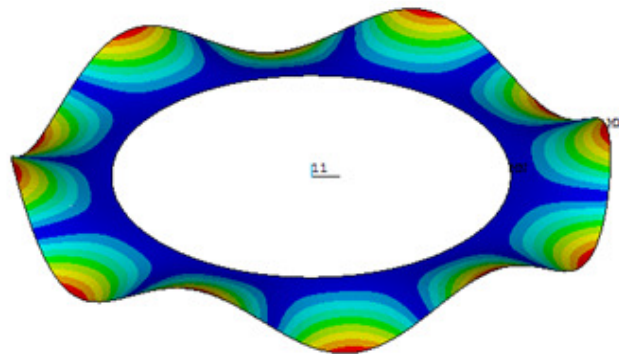




**Figura 9.1 - Modos de vibrar do disco plano de alumínio. (a) Primeiro modo. (b) Quarto modo. (c) Sexto modo. (d) Décimo primeiro modo. (e) Décimo segundo modo. (f) Décimo quarto modo.**

Determinou-se a operação da bomba no modo de vibrar que apresenta seis ondas. Nesta situação, o comprimento de onda  $\lambda$  é dado por:

$$\lambda = \frac{2\pi R_{ext}}{6} = 18,86 \text{ mm}.$$



**Figura 9.2 - Modos de vibrar escolhido.**

Foi feita análise comparativa do modo de vibrar escolhido, através de análise harmônica, para três diferentes materiais para o disco: alumínio, cobre e aço, conforme a Tabela 9.3. Para gerar a onda propagante, foram adicionadas duas forças de módulo unitário defasadas de  $90^\circ$  no tempo (seno e cosseno) e um quarto de comprimento de onda espacialmente. Confirmou-se que o uso de alumínio é a melhor alternativa, pois apresenta o maior deslocamento.

Tabela 9.3 - Modo de vibrar de 6 ondas para diferentes materiais.

Material	Frequência Ressonância (kHz)	Amplitude de Deslocamento ( $\mu\text{m}$ )
Alumínio	22,26	15,26
Cobre	15,27	9,93
Aço	22,69	5,08

### 9.1.2 Análise Modal da configuração com Dois Arrays

Tendo o modo de seis ondas como o desejado, efetuou-se a análise do modal para a configuração com dois arrays visando obter a frequência que será utilizada para realizar-se a análise harmônica, apresentada na seção 5.2.2, cujo código APDL encontra-se no apêndice A.2. Assim, a simulação foi efetuada sob a condição de deslocamento zero na linha interior do disco, obtendo-se o modo para a frequência de 24 kHz, mostrada na Figura 9.3.

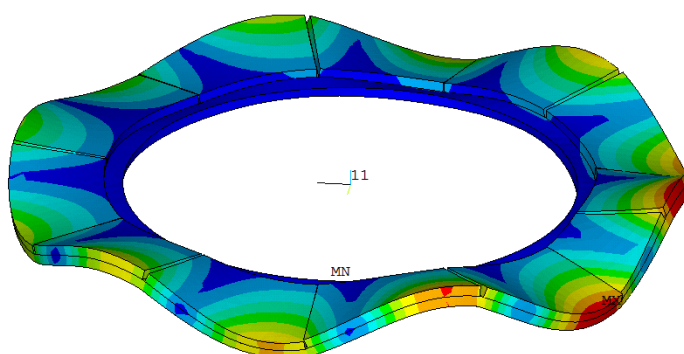


Figura 9.3 - Modo de vibrar com seis ondas para a configuração de dois arrays.

### 9.1.3 Análise Modal da configuração com Distribuição Uniforme

Novamente, buscando-se o modo de vibrar que apresente seis ondas, para obter-se a frequência a ser utilizada na simulação harmônica, efetuou-se a análise modal da configuração mostrada na Figura 5.5, utilizando-se o código do apêndice A.3, com a condição de contorno de engastamento da linha interior do disco central, obtendo-se o modo desejado na frequência de 18,62 kHz, conforme a Figura 9.4.

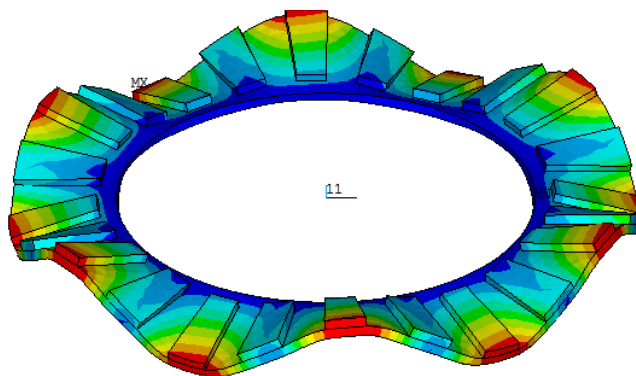


Figura 9.4 - Modo de vibrar com seis ondas para a configuração com Distribuição Uniforme.

## 9.2 Análise Harmônica da Configuração com Dois Arrays

Com a frequência de ressonância de 24 kHz, obtida através da análise modal, descrita na seção 5.2.2, executou-se a análise harmônica, que consiste na simulação da resposta dinâmica a excitações harmônicas na frequência dada. Como condições de contorno, foram impostos deslocamentos nulos na linha interior do disco e tensões senoidais e cossenoidais de 40 V, conforme polarização das cerâmicas e a distribuição de excitações mostradas na Figura 5.4, e o código fonte encontra-se no apêndice A.2. Adotou-se taxa constante de amortecimento de 2%.

Verificou-se a formação de onda propagante ao longo do disco, com amplitude de deformação de  $1\mu\text{m}$ , na direção z, cuja forma de onda encontra-se na Figura 9.5.

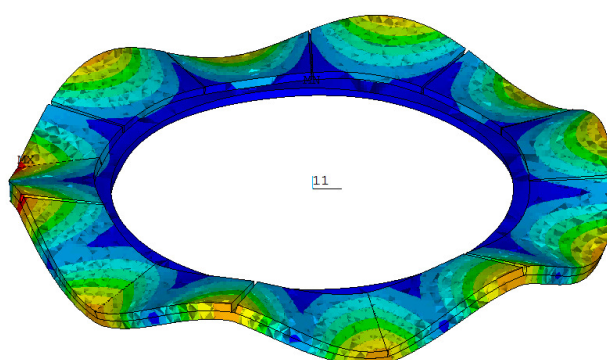
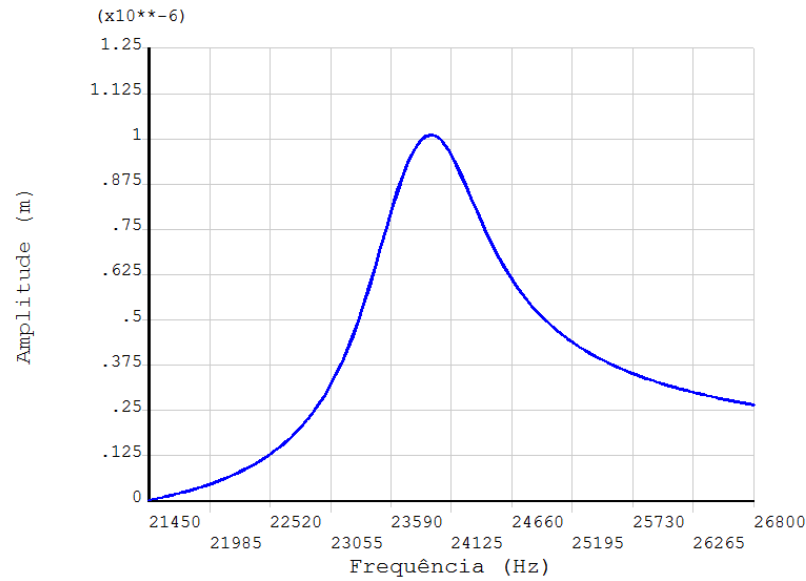


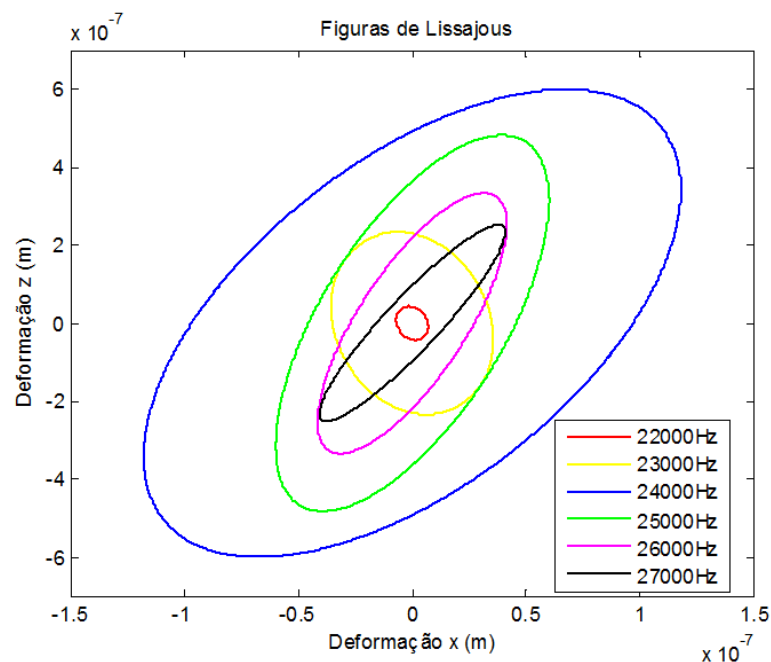
Figura 9.5 - Forma de onda propagante para excitação harmônica com  $f=24\text{ kHz}$ .

A fim de observar a variação da amplitude de deformação em função da frequência de excitação, observou-se a amplitude máxima de deslocamento na direção z de um nó do disco, para diferentes frequências, como mostrado na Figura 9.6. Observa-se que em frequências próximas a de ressonância do sistema, o disco vibra no modo de seis ondas, como desejado, porém a amplitude decai à medida que se afasta da ressonância.



**Figura 9.6 - Variação da amplitude em frequências próximas a ressonância.**

Observaram-se os deslocamentos complexos de um nó, relativos aos eixos x e z, e sua variação com a frequência, resultando nas figuras de Lissajous apresentadas na Figura 9.7. No nó analisado a direção x é tangente ao disco.



**Figura 9.7- Figuras de Lissajous para Configuração com Dois Arrays.**

Verifica-se que na frequência de ressonância, tanto a amplitude de deslocamento no eixo z quanto no eixo x são amplificadas. Logo, ao excitar o disco nesta frequência, espera-se obter maiores deslocamentos, e consequentemente, maior volume de fluido bombeado.

### 9.2.1 Análise Harmônica da Configuração com Distribuição Uniforme

Simulou-se o comportamento dinâmico desta configuração com a frequência de ressonância do modo de vibrar que apresenta 6 comprimentos de onda, 18,62 Hz, obtido conforme a seção. As condições de contorno impostas são de deslocamento nulo na linha central do disco e excitações harmônicas senoidais e cossenoidais nas faces das cerâmicas piezelétricas, mostradas na Figura 5.5 e a taxa de amortecimento adotada é de 2%. O código que gera a análise harmônica está apresentado no apêndice A.3. Assim, o resultado obtido está ilustrado na Figura 9.8.

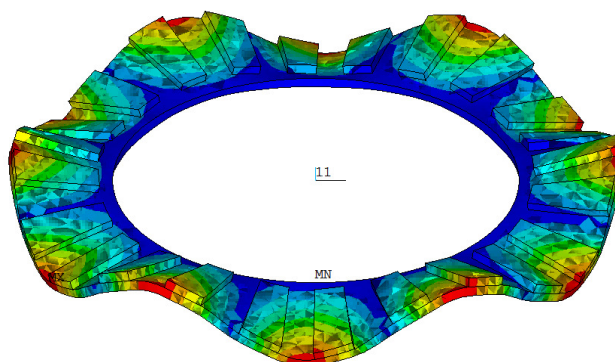


Figura 9.8 - Forma de onda propagante para excitação harmônica com  $f=18,62$  kHz.

Assim como na configuração anterior, formou-se uma onda que se propaga no sentido horário ao longo do disco, que possui amplitude máxima de deslocamento igual a  $1,4 \mu\text{m}$ .

Observou-se também a variação da amplitude de deformação no eixo z em frequências em torno da ressonância, numa faixa de frequências de excitação que produzem modos de vibrar de seis ondas.

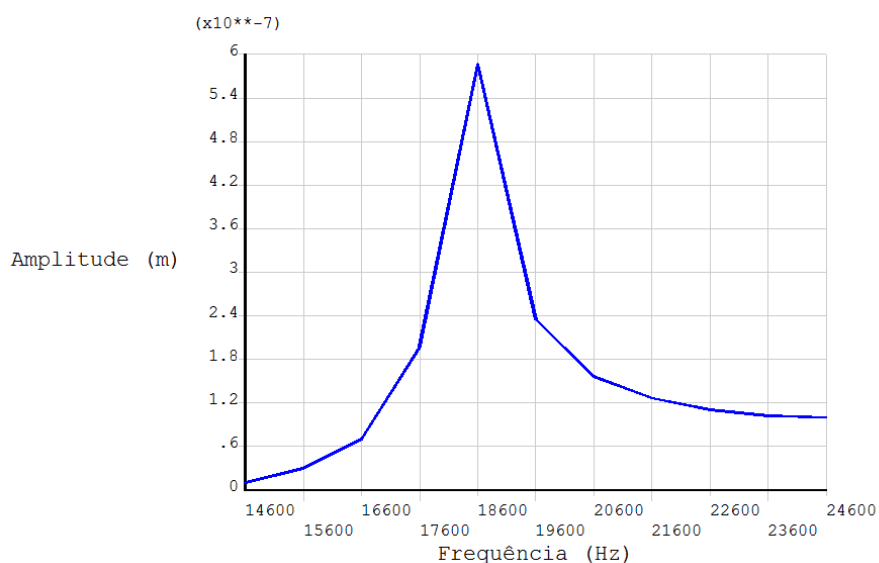
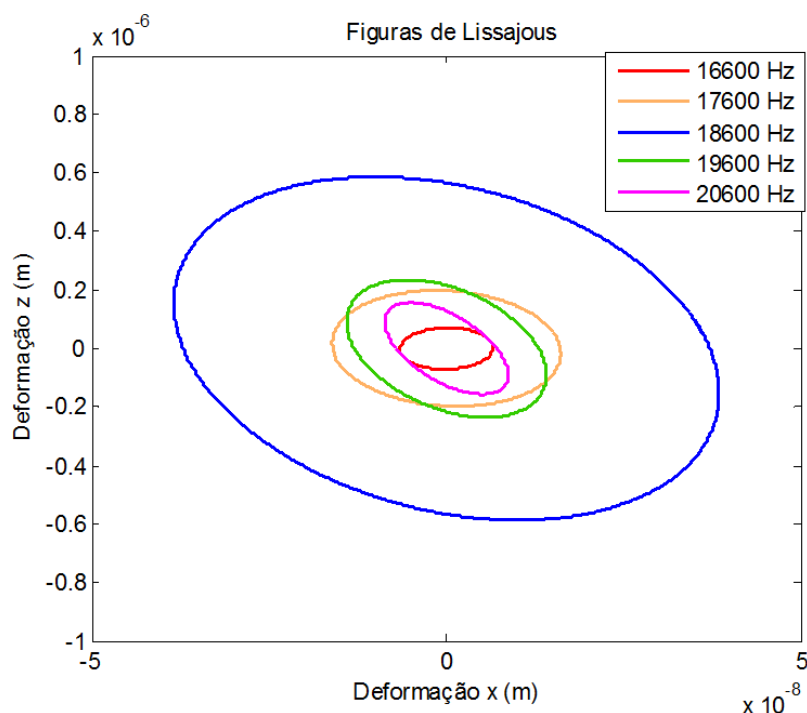


Figura 9.9 - Variação da amplitude em frequências em torno da ressonância.



Verifica-se, na Figura 9.9, que a maior amplitude encontra-se na frequência aproximada de 18,6 kHz, como esperado.

Analisando os deslocamentos complexos para um nó na extremidade do disco, em diferentes frequências de excitações, obtêm-se as figuras de Lissajous mostradas na Figura 9.10.



**Figura 9.10 - Figuras de Lissajous para configuração com distribuição uniforme.**

Assim, percebe-se que a frequência que apresenta o maior deslocamento é a frequência de ressonância (aproximadamente 18,6 kHz). Portanto, esta será frequência de excitação a ser utilizada para se obter a maior vazão decorrente da onda propagante, pois um maior deslocamento nodal representa uma maior amplitude de onda e consequentemente um maior deslocamento de fluido.

### 9.2.2 Simplificação do Formato das Cerâmicas

Tendo como objetivo otimizar o aproveitamento do material cerâmico disponível e facilitar o processo de corte das cerâmicas piezelétricas, optou-se por utilizar pastilhas de formato retangular no lugar de pastilhas de com forma de arco de disco (Figura 9.11 a). No novo modelo de disco, apresentado na Figura 9.11 b, foram alterados também o raio interno para 6 mm e o raio externo para 20mm.

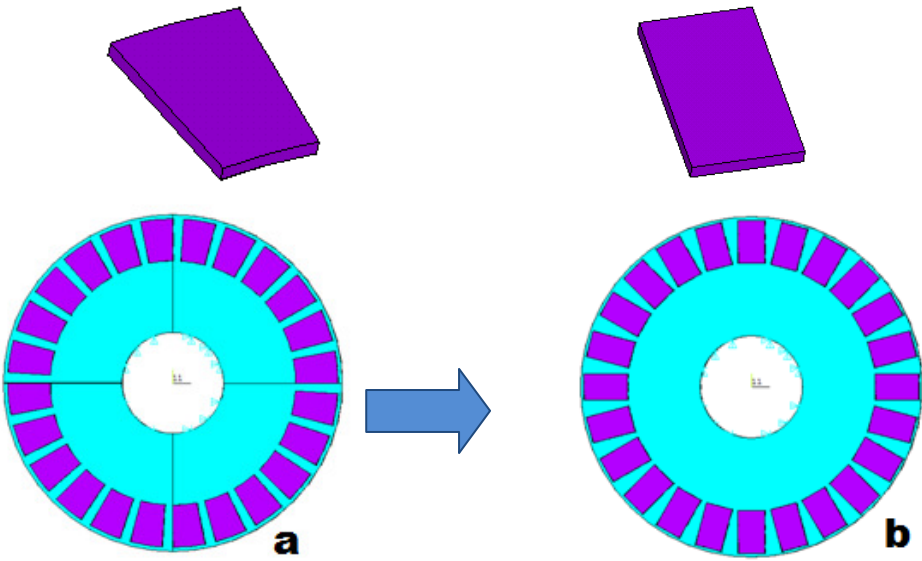
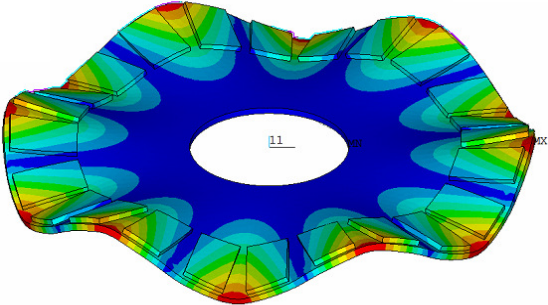
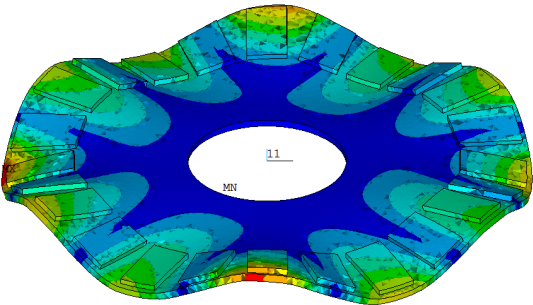


Figura 9.11 - Disco com pastilhas piezeléctricas: a) com curvatura b) retangulares.

Após modificação nas dimensões do disco de alumínio e no formato das cerâmicas piezeléctricas, tornou-se necessário reavaliar as frequências de ressonância do sistema, e sua resposta à excitação harmônica. Verificou-se que as amplitudes máximas de deformação permanecem na mesma ordem de grandeza, conforme a Tabela 9.4.

Tabela 9.4 - Amplitudes para as pastilhas retangulares.

Configuração Uniforme	Configuração Dois Arranjos
	
Amplitude: 3,20 $\mu\text{m}$ Frequência: 14567,6 Hz	Amplitude: 2,71 $\mu\text{m}$ Frequência: 14567,6 Hz

### 9.2.3 Influência das dimensões do disco piezelétrico na propagação da onda

Visando-se obter a melhor onda possível, isto é, a que apresente a maior amplitude de deslocamento e formato de onda constante durante a propagação (baixa variação de amplitude), executaram-se simulações variando-se as dimensões da pastilha. Assim, realizou-se o estudo da variação de uma dimensão (espessura, largura e comprimento, conforme a Figura 9.12) por vez. Porém, mantendo-se fixa a configuração de seis ondas, o tamanho do disco metálico, a amplitude de excitação em 40 V e o material das pastilhas.

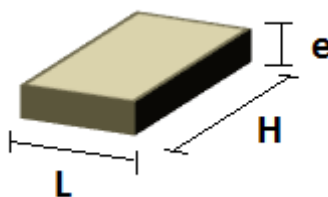


Figura 9.12 - Dimensões da cerâmica piezelétrica.

Deste modo, excetuando-se os parâmetros que são variados nas seções seguintes individualmente, os demais são mantidos constantes conforme a Tabela 9.5

Tabela 9.5 - Dimensões mantidas constantes para as simulações.

Dimensão	Valor
Amplitude de excitação	40 V
Diam. Int. do Disco	12 mm
Diam. Ext. do Disco	20 mm
Espessura do Disco	0,5 mm
Comprimento da pastilha	5 mm
Largura da Pastilha	3 mm
Espessura da Pastilha	0,4 mm

#### *Variação da Espessura da Cerâmica Piezelétrica*

Foi realizado o estudo dos efeitos da variação da espessura sobre a amplitude da onda propagante, para tanto, fixaram-se as dimensões do disco metálico, a largura e o comprimento da pastilha em valores arbitrários, conforme a Tabela 9.5. Além disso, as espessuras avaliadas foram escolhidas dentro das opções de cerâmicas disponíveis para este projeto, que variam de 0,2 mm a 1 mm. Portanto, realizaram-se as simulações e montou-se a Tabela 9.6 que está representada na Figura 9.13.

Tabela 9.6 - Variação da espessura da cerâmica piezelétrica.

Espessura da Cerâmica (mm)	Amplitude de Deslocamento ( $\mu\text{m}$ )
0,2	6,46
0,3	4,09
0,4	3,21
0,5	2,55
0,6	2,03
0,7	1,46
0,8	1,45
0,9	1,28
1	1,07

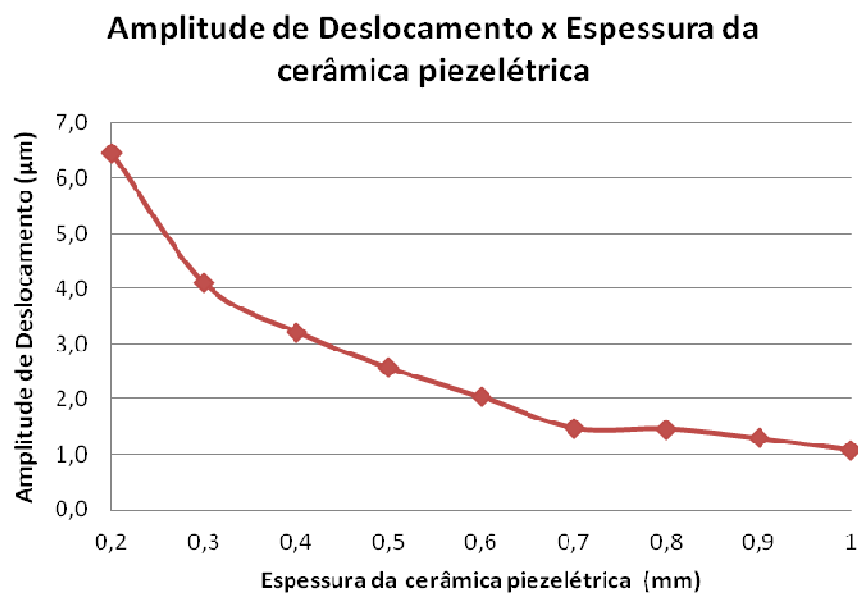


Figura 9.13 - Amplitude de deslocamento por espessura da cerâmica.

Observando-se a Figura 9.13, nota-se que a maior amplitude ocorre para a cerâmica de espessura 0,2 mm.

#### *Variação da Largura da Cerâmica Piezelétrica*

Utilizando-se os parâmetros da Tabela 9.5, realizou-se o estudo da variação da amplitude de deformação conforme a largura da pastilha (L). A largura limite máxima foi obtida da modelagem CAD, sendo que 3,5 mm é a maior largura que não causa sobreposição de pastilhas. Assim, obteve-se a Tabela 9.7, ilustrada pela Figura 9.14.

Tabela 9.7 - Variação da amplitude devido a alteração da largura da pastilha.

Largura (mm)	Amplitude de Deslocamento ( $\mu\text{m}$ )
3,5	3,05
3,0	3,21
2,5	3,00
2,0	2,56
1,5	1,93
1,0	1,35
0,5	2,41

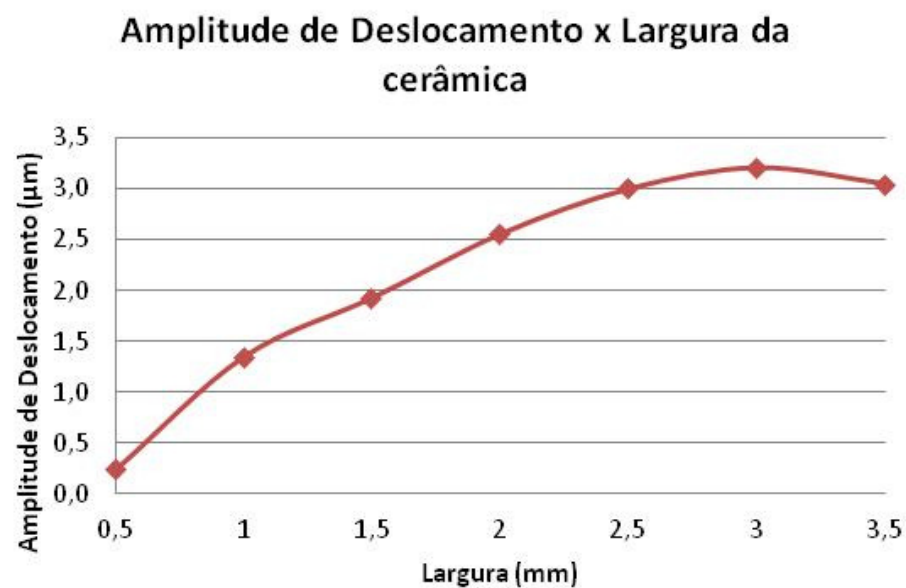


Figura 9.14 - Amplitude de Deslocamento por Largura da cerâmica piezelétrica.

Observando-se a Figura 9.14, nota-se que a maior amplitude ocorre para a cerâmica de largura 3 mm.

#### *Variação do Comprimento da Cerâmica Piezelétrica*

Tendo novamente fixados os parâmetros da Tabela 9.5, variando-se apenas o comprimento (H) da cerâmica piezelétrica, sendo que o comprimento máximo para que não haja o contato entre pastilhas é de 7 mm. Assim, pode-se então montar a Tabela 9.8 e o gráfico da Figura 9.15.

Tabela 9.8 - Variação da amplitude devido a alteração do comprimento da pastilha.

Comprimento (H) [mm]	Amplitude de Deslocamento [ $\mu\text{m}$ ]
7	3,50
6	3,39
5	3,21
4	3,00
3	2,72
2	2,31
1	1,63

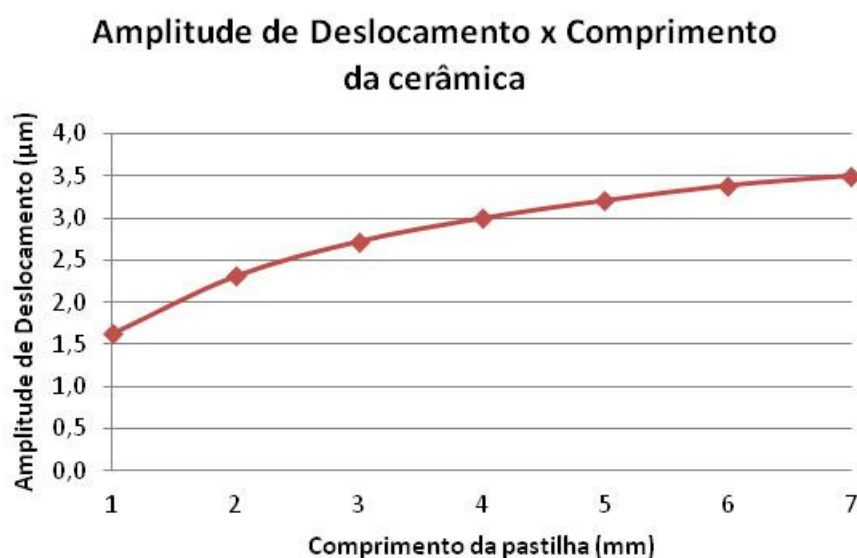


Figura 9.15 - Amplitude de Deslocamento por Comprimento da cerâmica piezelétrica.

Observando-se a Figura 9.15, nota-se que a maior amplitude de deslocamento ocorre para o comprimento de 7 mm.

#### 9.2.4 Influência de Erros de Montagem

Tendo definido o modelo com pastilhas piezelétricas em forma de paralelepípedos e com as dimensões que apresentam as maiores deformações, pode-se, então, realizar simulações que apresentassem uma modelagem dos desvios no posicionamento das pastilhas devido a erros durante a montagem.

Assim, visando estimar os erros devido a problemas de localização das pastilhas na superfície do disco, optou-se por discretizar o espaçamento entre as pastilhas em até 3 graus de diferença, em dois sentidos, da posição ideal, conforme a Figura 9.16.

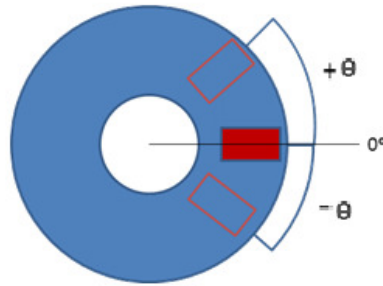


Figura 9.16 - Definição do ângulo de desvio de posicionamento.

Deste modo, coletando-se as amplitudes para os diferentes erros de posicionamento pode-se montar a figura de Lissajous (Figura 9.17).

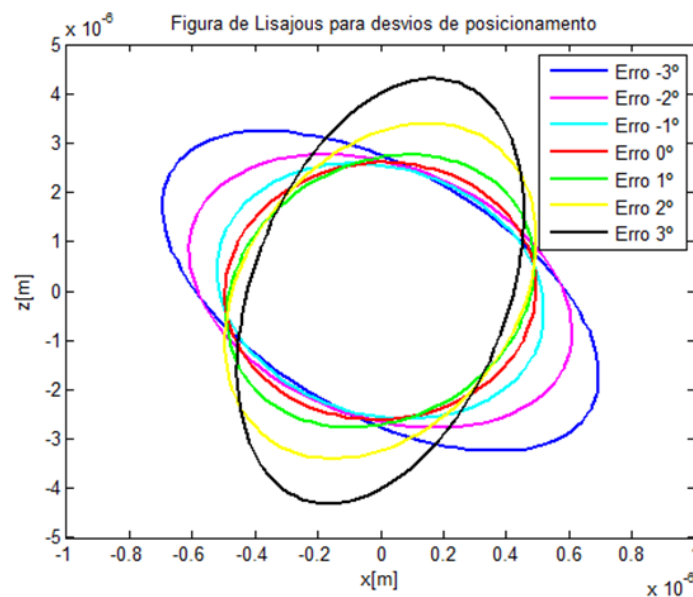


Figura 9.17 - Figura de Lissajous para erros de montagem.

Nota-se que apesar de deformar a elipse de movimentação, os erros de até 2 graus não têm influência significativa sobre a propagação da onda.

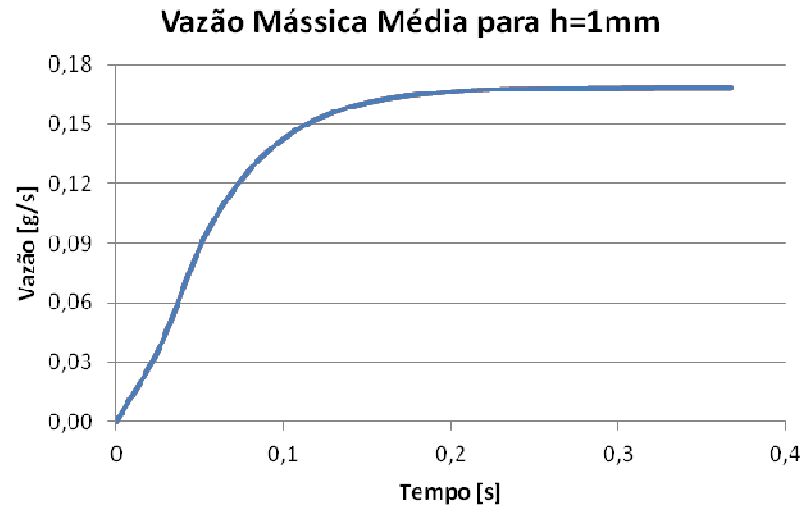
### 9.2.5 Simulação de escoamento em duto retilíneo

A fim de decidir qual a melhor altura da câmara de fluido da bomba piezelétrica de fluxo, simulou-se o comportamento do fluido ao qual é imposto uma onda propagante, para domínios de cinco alturas diferentes (1,2,3,4 e 5 mm).

Observa-se a resposta temporal da vazão mássica média na superfície de entrada para cada uma das alturas estudadas, calculada conforme a equação 5.7, até que o regime permanente seja atingido. A vazão apresenta comportamento senoidal, cuja frequência

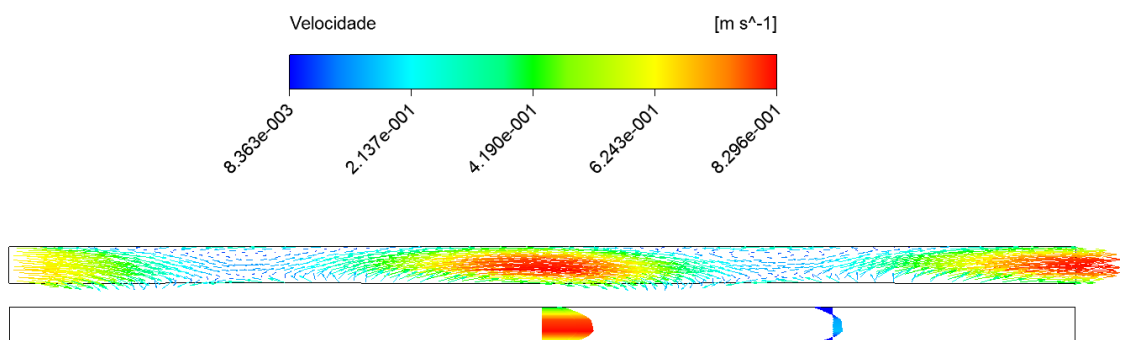
corresponde a excitação imposta. Deste modo, apresentam-se os vetores de velocidades em instantes de tempo em que a vazão possui valor máximo e mínimo.

Para a altura de 1 mm, obtém-se a resposta temporal da vazão média na superfície de entrada apresentada na Figura 9.18.

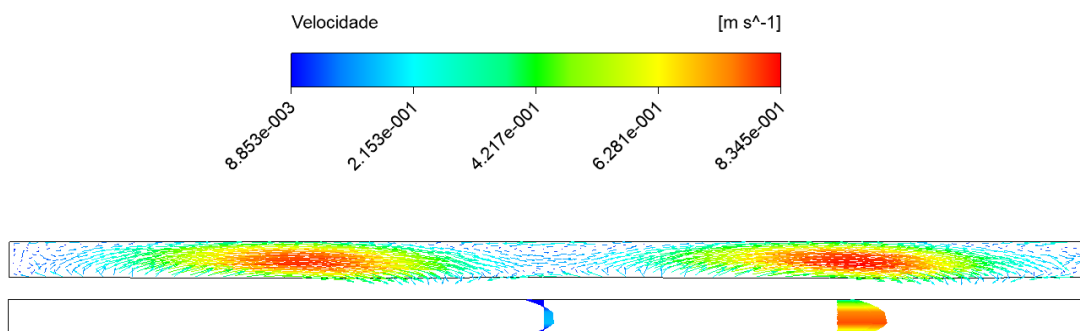


**Figura 9.18 - Vazão mássica média em função do tempo para altura de 1mm.**

A Figura 9.19 e a Figura 9.20 mostram os vetores de velocidade em instantes de tempo em que a vazão mássica é máxima e mínima, respectivamente, e o perfil de velocidades em um pico e um vale de onda.



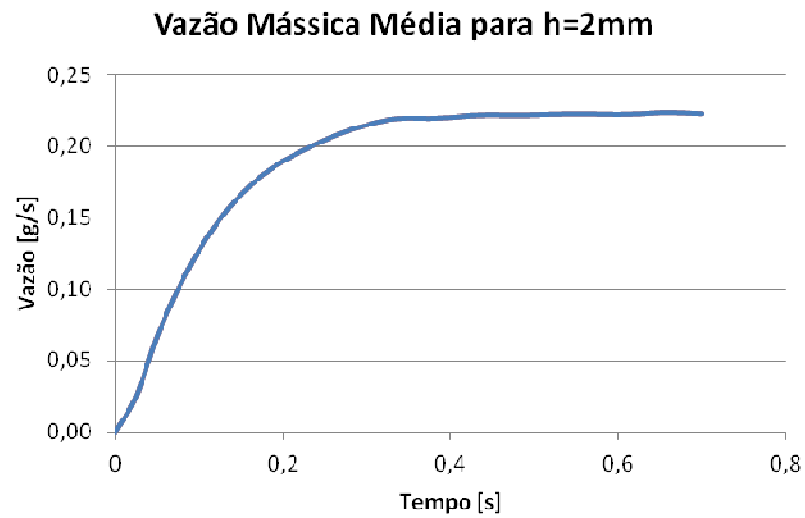
**Figura 9.19 - Vetores de velocidade para vazão mássica máxima ( $t=0,369796\text{s}$ ).**



**Figura 9.20 - Vetores de velocidade para vazão mássica mínima ( $t=0,369826\text{s}$ ).**

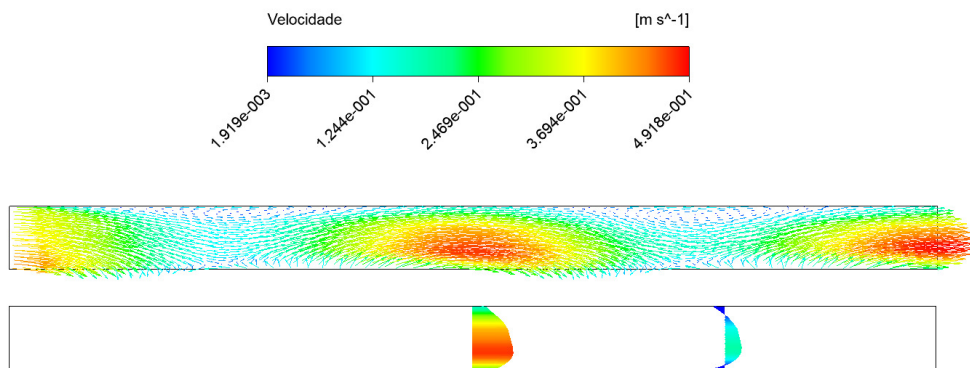


Para a altura de 2 mm, obtém-se a resposta temporal da vazão média na superfície de entrada apresentada na Figura 9.21.

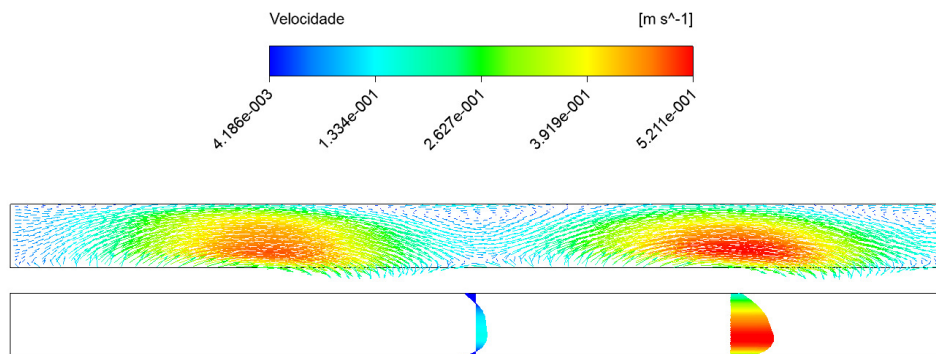


**Figura 9.21 - Vazão mássica média em função do tempo para altura de 2mm.**

A Figura 9.22 e a Figura 9.23 mostram os vetores de velocidade em instantes de tempo em que a vazão mássica é máxima e mínima, respectivamente.

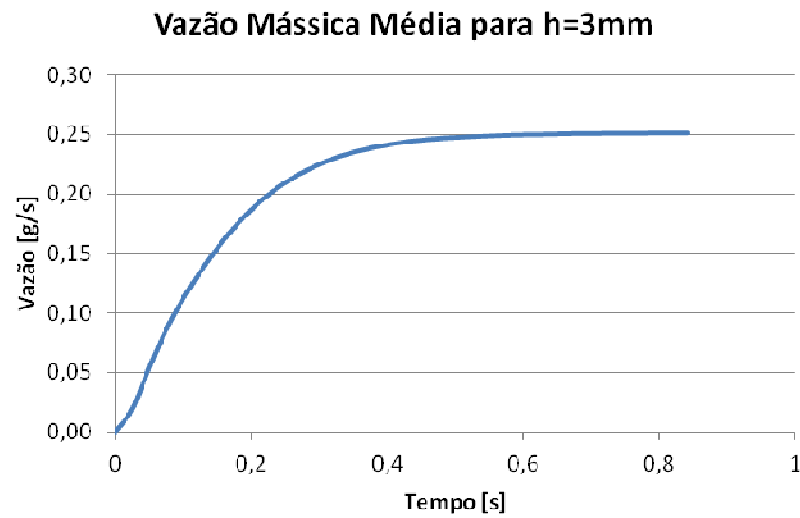


**Figura 9.22 - Vetores de velocidade para vazão mássica máxima ( $t=0,699441\text{s}$ ).**



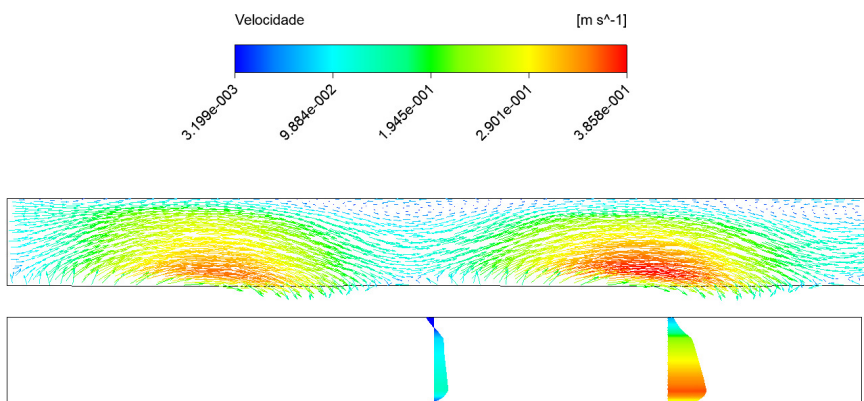
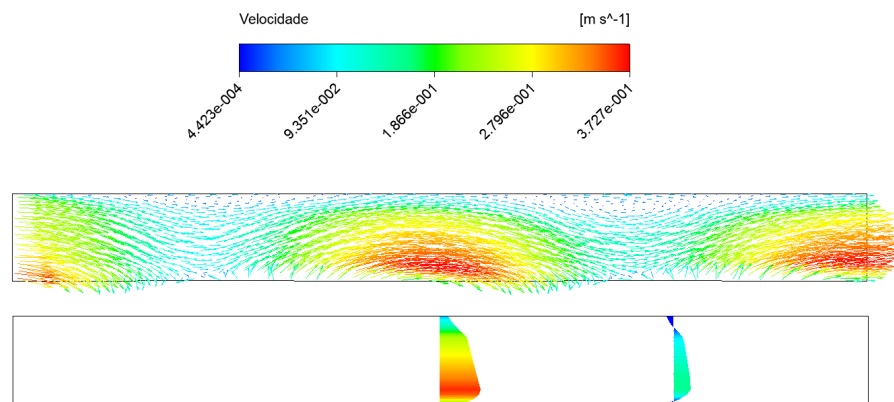
**Figura 9.23 - Vetores de velocidade para vazão mássica mínima ( $t=0,696441\text{s}$ ).**

Para a altura de 3 mm, obtém-se a resposta temporal da vazão média na superfície de entrada apresentada na Figura 9.24.

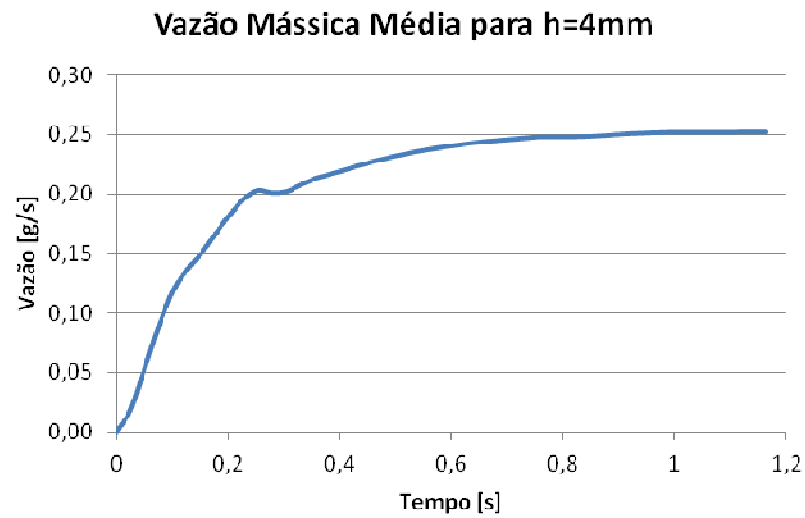


**Figura 9.24 - Vazão mássica média em função do tempo para altura de 3mm.**

A Figura 9.25 e a Figura 9.26 mostram os vetores de velocidade em instantes de tempo em que a vazão mássica é máxima e mínima, respectivamente.

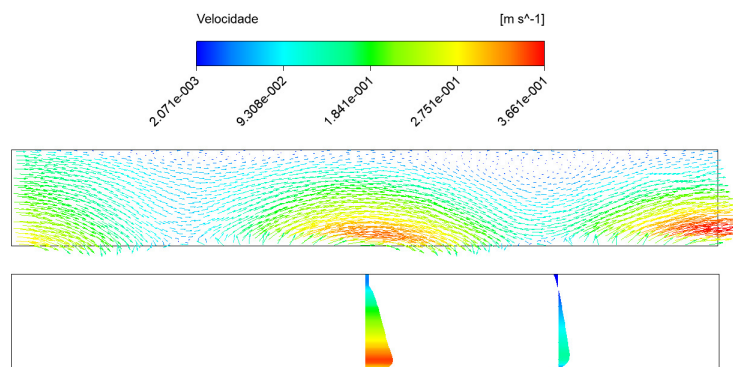


Para a altura de 4 mm, obtém-se a resposta temporal da vazão média na superfície de entrada apresentada na Figura 9.27.

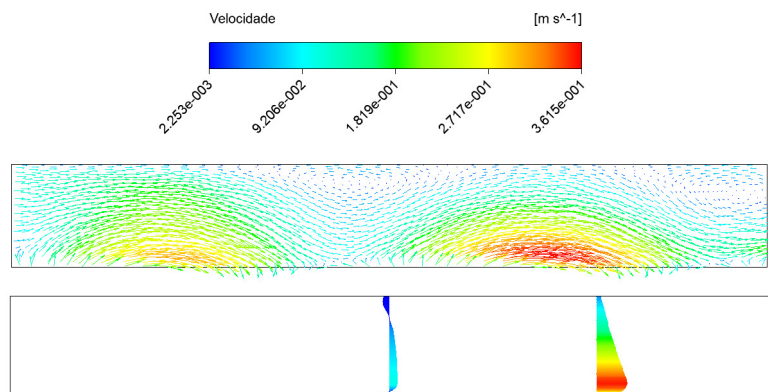


**Figura 9.27 - Vazão mássica média em função do tempo para altura de 4mm.**

A Figura 9.28 e a Figura 9.29 mostram os vetores de velocidade em instantes de tempo em que a vazão mássica é máxima e mínima, respectivamente.



**Figura 9.28 - Vetores de velocidade para vazão mássica máxima ( $t=1,6060\text{s}$ ).**



**Figura 9.29 - Vetores de velocidade para vazão mássica mínima ( $t=1,6063\text{s}$ ).**

Para a altura de 5 mm, obtém-se a resposta temporal da vazão média na superfície de entrada apresentada na Figura 9.30.

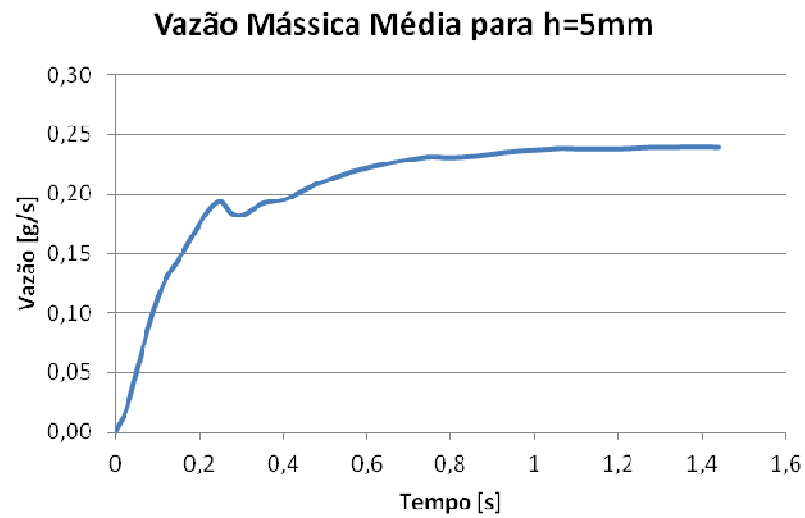


Figura 9.30 - Vazão mássica média em função do tempo para altura de 5mm.

A Figura 9.31 e a Figura 9.32 mostram os vetores de velocidade em instantes de tempo em que a vazão mássica é máxima e mínima, respectivamente.

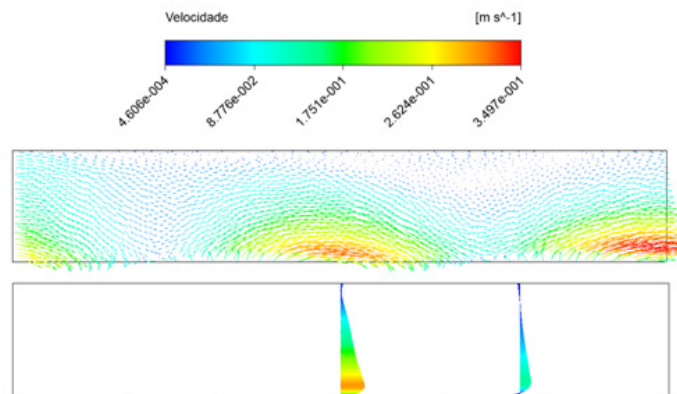


Figura 9.31 - Vetores de velocidade para vazão mássica máxima ( $t=1,36814\text{s}$ ).

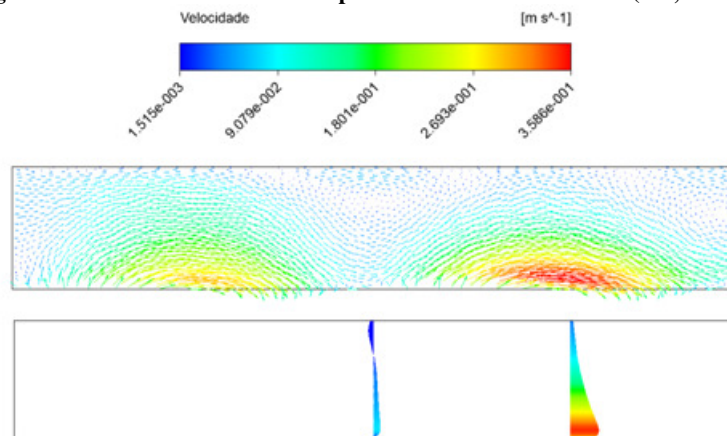
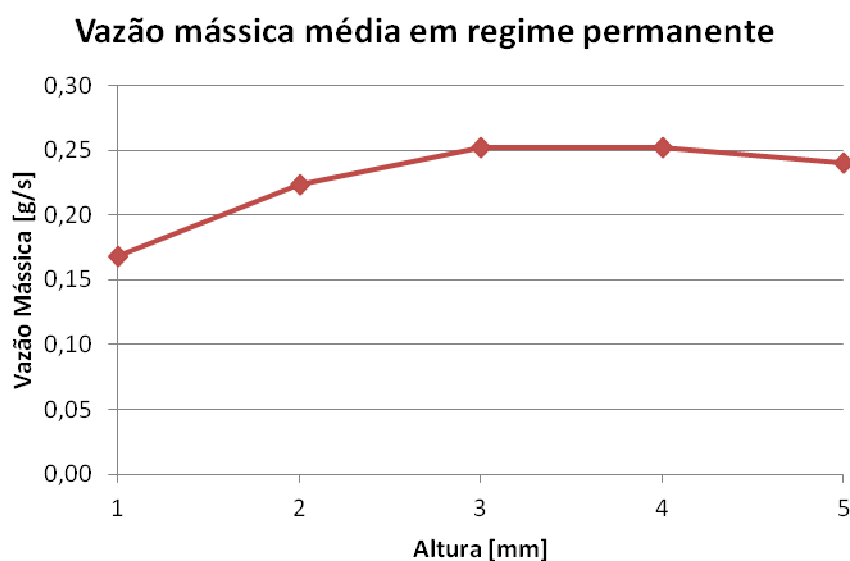


Figura 9.32 - Vetores de velocidade para vazão mássica mínima ( $t=1,36818\text{s}$ ).

A Tabela 9.9 e a Figura 9.33 mostram a vazão média em regime permanente em função da altura da câmara de fluido.

**Tabela 9.9 - Vazão mássica média em função da altura.**

Altura [mm]	Vazão Média [g/s]
1	0,168
2	0,223
3	0,252
4	0,252
5	0,240



**Figura 9.33 - Vazão mássica média em função da altura**

Observa-se que para as alturas de 3 e 4mm, obtém-se as maiores vazões mássicas médias. Através da análise dos perfis de velocidade obtidos em cada caso e do tempo de estabilização da vazão do sistema, optou-se pela construção de protótipo a altura da câmara de fluido de 3mm, que apresenta maior velocidade normal às regiões de entrada e saída e atinge o regime permanente mais rapidamente.

### 9.3 Simulação de Escoamento em Modelo Tridimensional Circular

Realizou-se análise transiente do escoamento fluido no interior da câmara de fluido e dos bocais de saída da bomba piezelétrica, conforme descrito na seção 5.4.4, com o objetivo de verificar a eficiência do movimento de fluido através do contato de líquido com uma superfície sólida em que há propagação de onda mecânica.

Observou-se o comportamento da vazão mássica média em função do tempo, cuja curva está apresentada na Figura 9.34, para analisar o escoamento fluido em regime permanente de trabalho, ou seja, após a variação da vazão mássica tornar-se inferior a 5%. Verificou-se que após aproximadamente 0,9s pode-se considerar que a bomba trabalha em regime estático.

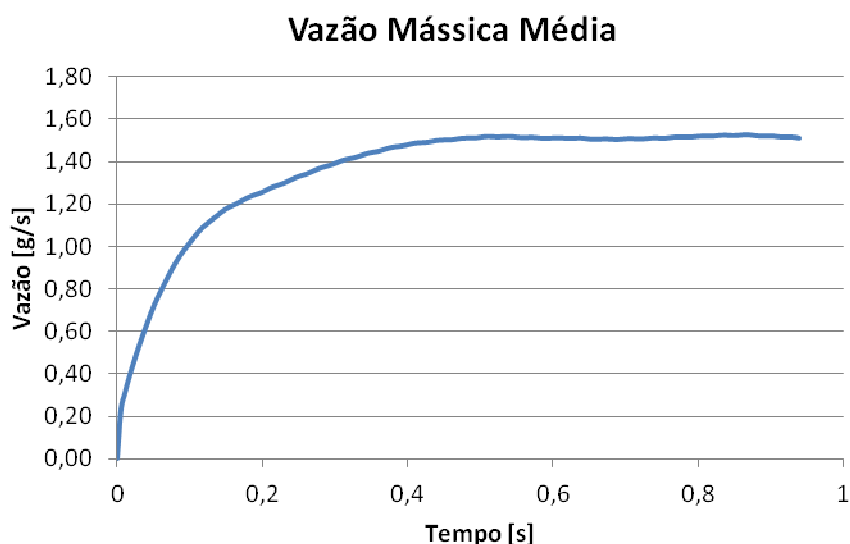


Figura 9.34 - Vazão mássica média em função do tempo.

Em regime permanente, a vazão mássica e a pressão na saída na bomba apresentam resposta senoidal com média constante, conforme mostrado na Figura 9.35 e na Figura 9.36. A vazão mássica média da bomba piezelétrica é de 1,48g/s e a amplitude de pressão máxima é de 5,8 kPa.

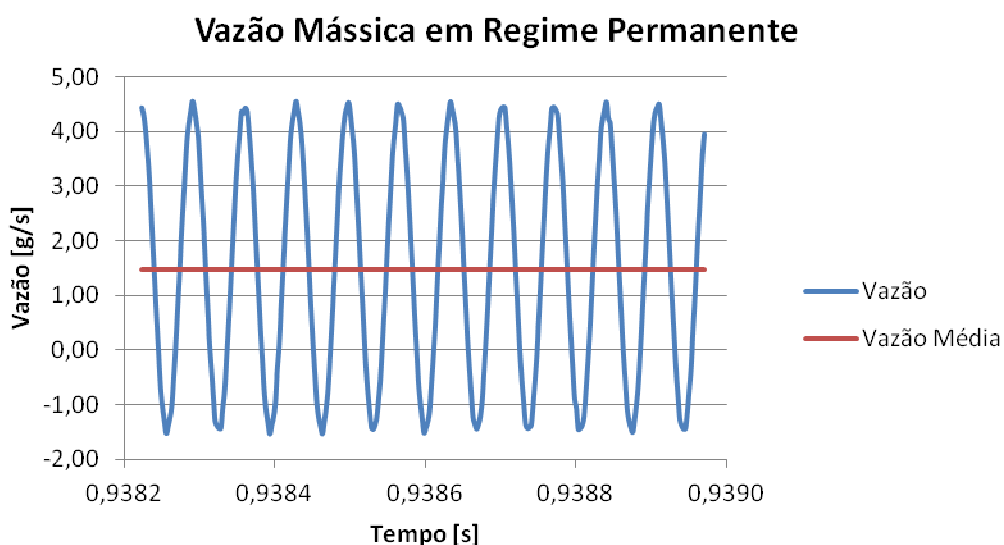
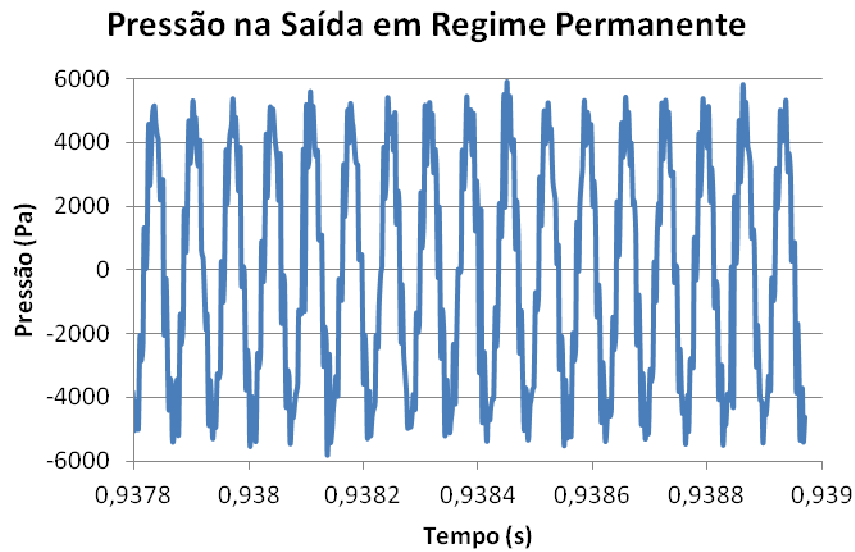
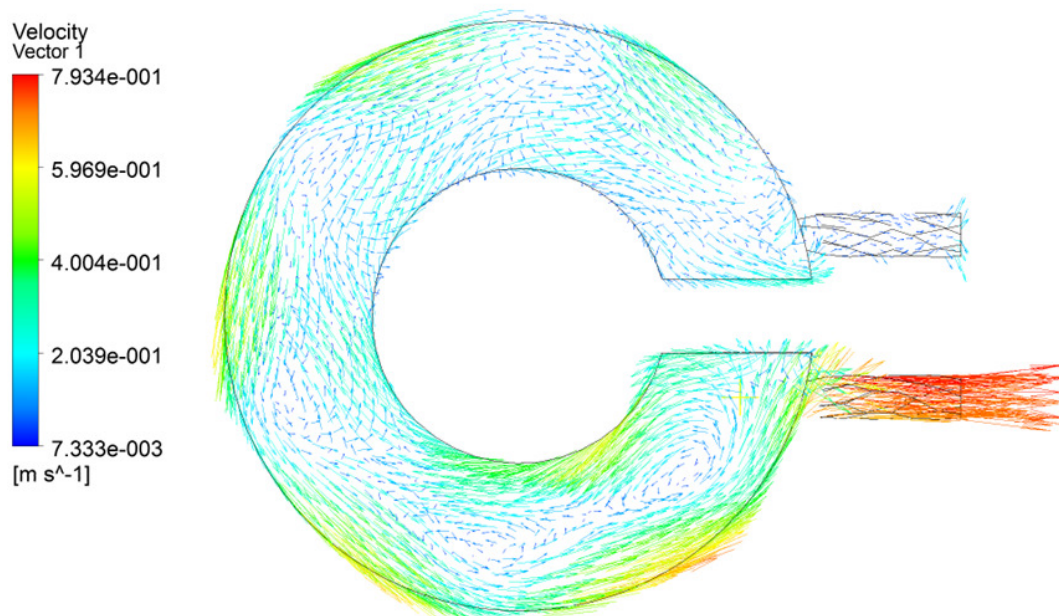


Figura 9.35 - Vazão mássica na saída da bomba em regime permanente.



**Figura 9.36 - Pressão na saída da bomba em regime permanente.**

Na Figura 9.37 e na Figura 9.38 estão apresentadas as distribuições de velocidade do fluido para instantes de vazão mássica máxima e mínima, respectivamente. É possível observar que o fluido apresenta direção preferencial de escoamento e que são formadas, ao longo da circunferência do disco, seis regiões em que a velocidade é mais elevada, correspondente aos vales da onda propagante no disco metálico.



**Figura 9.37 - Vetores de velocidade para vazão mássica máxima (t=0,938953s)**



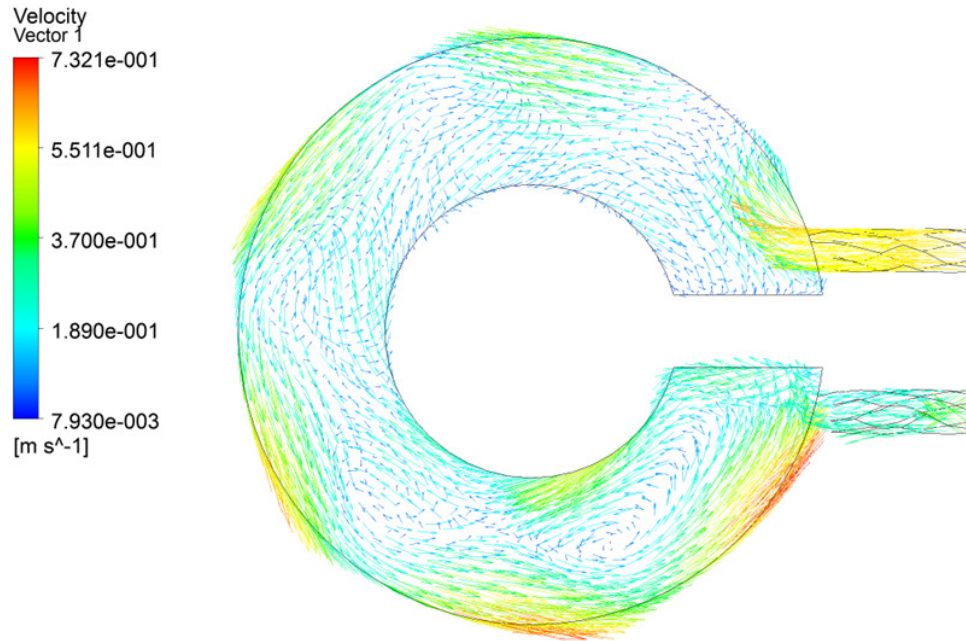


Figura 9.38 - Vetores de velocidade para vazão mássica máxima ( $t=0,938918s$ )

A Figura 9.39 mostra como a distribuição de pressões no fluido varia ao longo de meio ciclo de bombeamento, do instante de vazão mássica mínima e ao instante em que ocorre a maior vazão mássica. Observa-se que o pico de pressão desloca-se ao longo da circunferência da câmara de fluido, acompanhando a onda propagante formada no disco metálico.

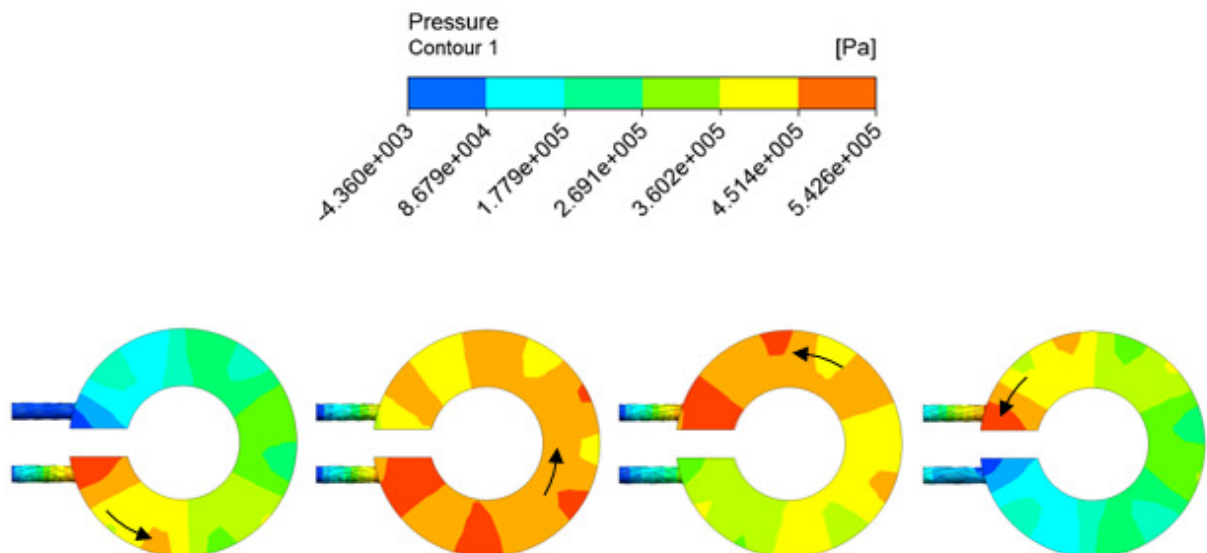


Figura 9.39 – Variação da distribuição de pressão na condução do fluido.



## 9.4 Ensaios Realizados

Serão apresentados os resultados de testes experimentais realizados com o protótipo, conforme descritos na seção 8.

### 9.4.1 Varredura de frequências de ressonância

Primeiramente, variando a frequência de excitação imposta às cerâmicas piezelétricas, observou-se a resposta do disco coberto por pó de vidro para visualizar o modo de vibrar e obter uma aproximação da frequência de ressonância. Nas condições deste ensaio, os discos encontram-se fora da carcaça da bomba piezelétrica, fixados apenas pela circunferência interna.

Ao excitar os dois conjuntos de cerâmicas com tensão senoidal de mesma amplitude e fase, observou-se a formação de uma onda estacionária, conforme a Figura 9.40. Defasando a excitação de um dos conjuntos de cerâmicas em  $90^\circ$ , observa-se deslocamento do pó de vidro em uma direção preferencial, a qual pode ser invertida ao mudar a defasagem desta excitação para  $-90^\circ$ .

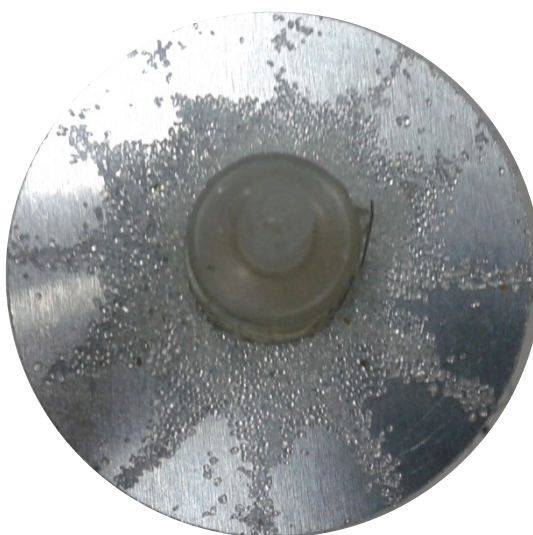


Figura 9.40 - Forma de onda estacionária

Utilizando o vibrômetro para medir qual a maior amplitude de deslocamento, realizou-se um ajuste mais preciso da frequência de ressonância de cada disco. Obteve-se frequência de 18,15 kHz para a configuração de dois arranjos, com amplitude máxima de deslocamento de  $1,1\mu\text{m}$ , como mostrado na Figura 9.41, e 18 kHz para a configuração distribuída, com deslocamento máximo de  $0,7\mu\text{m}$ , conforme a Figura 9.42.

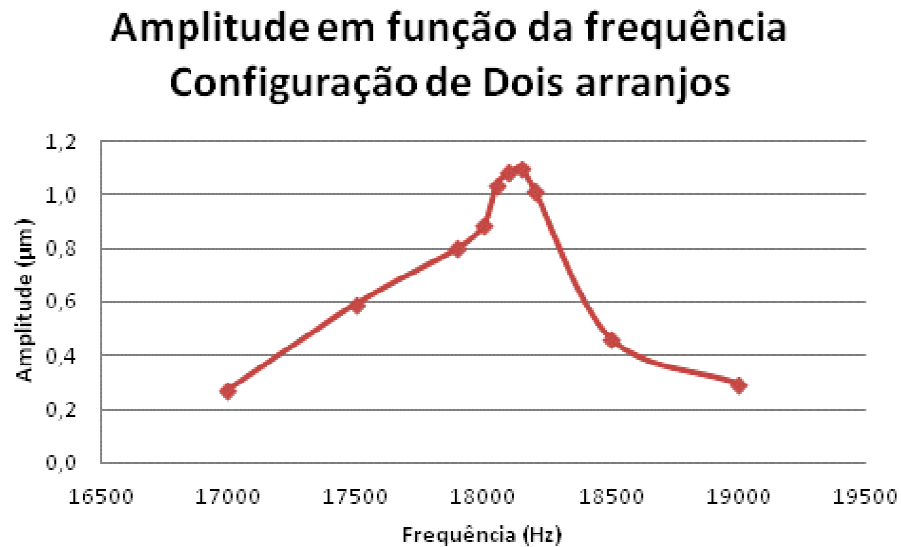


Figura 9.41 - Variação da amplitude em frequências em torno da ressonância para a configuração de dois arranjos.

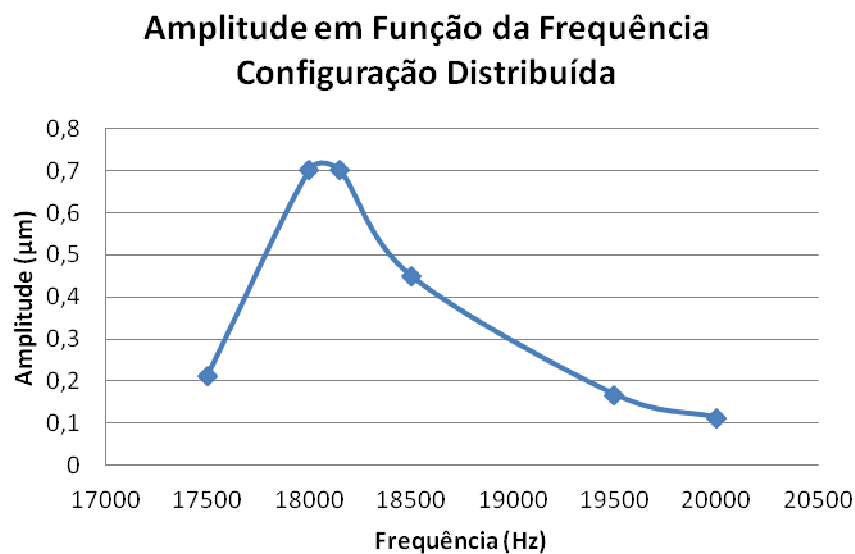


Figura 9.42 - Variação da amplitude em frequências em torno da ressonância para a configuração distribuída.

A variação apresentada na frequência de ressonância dos dois discos deve-se principalmente a erros de fabricação e montagem. Para a variação da amplitude esperada de deslocamento, devem-se considerar, além destes fatores, divergências nas constantes de amortecimento adotadas para o sistema modelado.

Com o disco montado no protótipo e sob influência dos efeitos da vedação, que limita os movimentos na circunferência externa no disco, mediu-se novamente a amplitude máxima de deslocamento. Observou-se variação pequena na frequência de ressonância do sistema,

com redução significativa da amplitude máxima de deslocamento, que se tornou cerca de dez vezes menor, representando grande impacto na eficiência de bombeamento do protótipo.

#### 9.4.2 Ensaio de condução

Primeiramente, realizou-se um ensaio para demonstrar o funcionamento do protótipo, utilizando o disco de configuração distribuída. Na Figura 9.43 pode-se visualizar o comportamento senoidal de escoamento de fluido, que acompanha os picos (faixa em vermelho) e vales (faixas incolores) da onda propagante no disco.

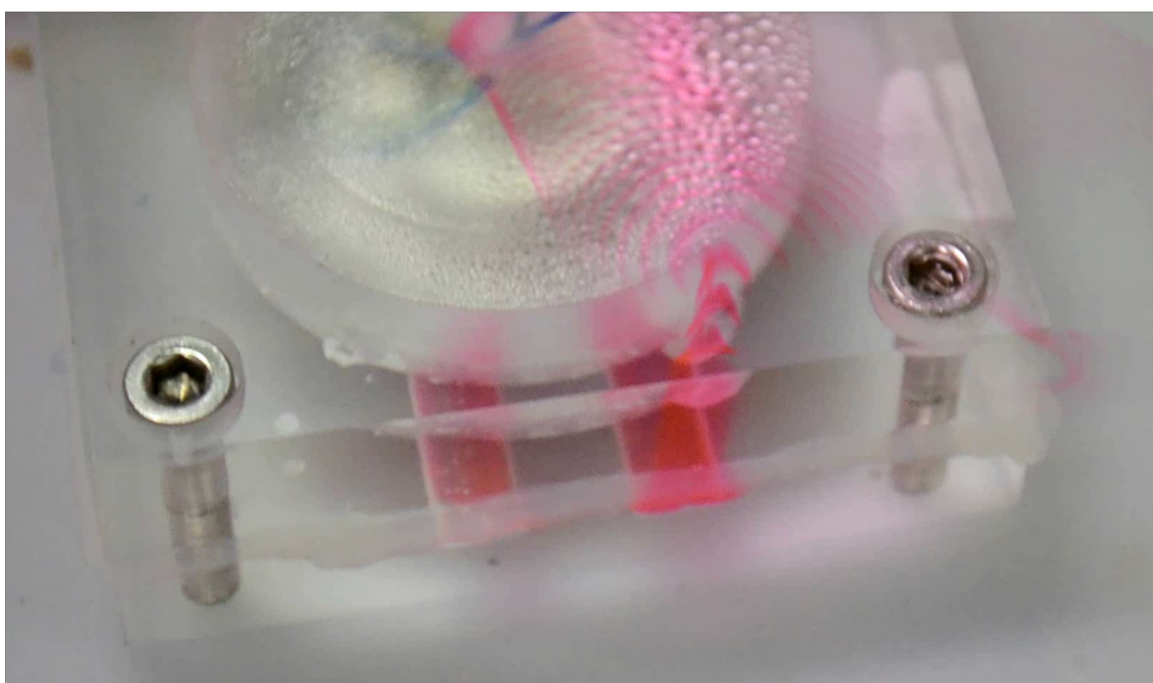
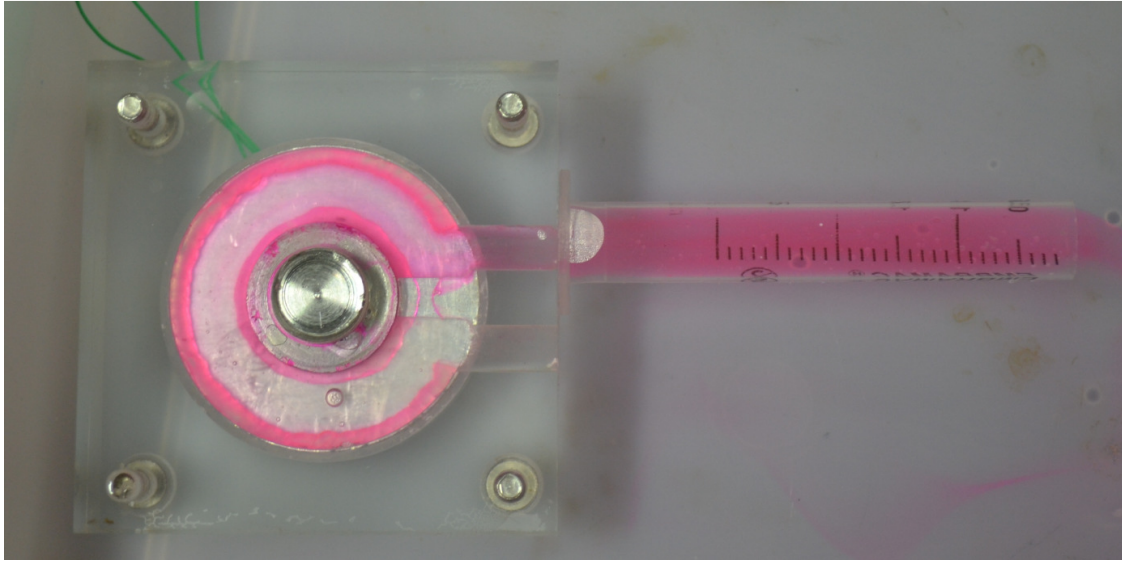


Figura 9.43 - Protótipo em funcionamento.

#### 9.4.3 Ensaio de Vazão

O aparato experimental, ilustrado na Figura 9.44, foi montado conforme a seção 8.3.3, utilizando o disco de configuração de dois arranjos, pois este apresentou maior amplitude de deslocamento medida através do vibrômetro. O duto possui 63 mm de comprimento e a área transversal do bocal é de  $37,7 \text{ mm}^2$ .



**Figura 9.44 - Ensaio de Vazão.**

O líquido colorido demorou um intervalo de tempo de 280s para percorrer o comprimento total do duto. Deste modo, a vazão obtida foi de  $8,5 \text{ mm}^3/\text{s}$ .

#### **9.4.4 Ensaio de Pressão**

A pressão gerada pela bomba não suficiente para superar a perda de carga encontrada no duto de formato em "L", deste modo não foi possível medir a altura de coluna de água formada.

## 10. CONCLUSÕES

Observou-se que a propagação da onda ocorre de modo satisfatório somente para defasagens corretas de excitação e de distribuição espacial das pastilhas, além disso, a amplitude de onda é proporcional ao número de atuadores ativos na bomba de fluxo, sendo que quanto maior o número de atuadores, maior a amplitude de saída.

As simulações computacionais se mostraram importantes como complemento à construção do protótipo, permitindo a comparação de resultados obtidos computacionalmente com o modelo real, pois estes resultados fornecem exemplos do que esperar da realização dos ensaios.

Além disso, durante os ensaios foi observada a sensibilidade da onda formada devido à falhas na montagem do atuador, por exemplo a não reprodução de um engaste perfeito na linha interna do disco, e a resistência imposta ao movimento do disco devido à vedação, resultando em redução significativa da amplitude de deslocamento.

## 11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS, INC. *Release 13.0 Documentation for ANSYS*. [S.1.], 2010.

BAR-COHEN Y.; CHANG Z., **Piezelectrically Actuated Miniature Peristaltic Pump**, *Proceedings of SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, Paper No.3992-103, 2001.

CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY. BAR-COHEN, Y.; JOFFE, B.; LIH, S. **Travelling Wave Pump Employing Eletroactive Atuators**. US 5971298, 25 Jun, 1996.

CHOI, Andres. **Desenvolvimento de uma bomba de fluxo piezelétrica de diafragma**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Controle e Automação Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

GARIMELLA, S. V.; SINGHAL, V.; LUI, D. **On-Chip Thermal Management With Microchannel Heat Sinks and Integrated Micropumps**. *Proceedings of the IEEE* , vol.94, no.8, pp.1534,1548, Ago. 2006.

GONZÁLEZ, U.F., MOUSSA, W. A.; **Simulation of MEMS piezoelectric micropump fpr biomedical applications**. Pittsburg, PA, 2002.

GUANG-MING, C.; PENG, L.; PING, Z.; JING-SHI, D.; FANG-FANG, S.; **Piezoelectric Pump Used in Bionic Underwater Propulsion Unit**. *Journal of Bionic Engineering*, Volume 4, Issue 3, Pages 159-164, September 2007.

IHARA, A.; WATANABE, H. **On the flow around flexible plates, oscillating with large-amplitude**. *Journal of Fluids And Structures*, v.8, n. 6, p. 601-619, ago. 1994.

LASER, D. J.; SANTIAGO, J.G. **A Review of Micropumps**. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. v.14, n.6, p. R35-R64, jun. 2004.

LERCH, R. **Simulation of Piezoelectric Devices by Two- and Three-Dimensional Finite Elements**, *IEEE, Transactions on Ultrasonics Ferroelectric and Frequency Control*, Vol.37, n°2, pp.237-246, maio, 1990.

LIANG, L.; ZHANG, T.; MA, X.; WEN, L.; **Piezoelectric Peristaltic Pump Driven by Circumferential Traveling-Wave**. *Advanced Materials Research*, 314-316, 457, 2011.

MIYAZAKI, S.; KAWAI, T.; ARARAGI, M., **A piez-electric pump driven by a flexural progressive wave**, *Micro Electro Mechanical Systems, 1991, MEMS '91, Proceedings. An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots. IEEE* , vol., no., pp.283,288, 30 Jan-2 Feb 1991.

NAKASONE, P. **Estudo de Viabilidade de uma Bomba de Fluxo Piezelétrica Utilizando Utilizando Simulação Computacional**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

NISAR, A.; FZULPURKAR, N.; MAHAISAVARIYA, B.; TUANTRANONT, A. **MEMS-based micropumps in drug delivery and biomedical applications**. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 130, Issue 2, Pages 917-94, 28 March 2008.

SFAKIOTAKIS, M.; LANE, D.M.; DAVIES, J.B.C. **Review of fish swimming modes for aquatic locomotion**. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v.24, n.2, p. 237-252, abr. 1999.

UCHINO, K., **Piezoelectric ultrasonic motors: overview**. *Smart Mater. Struct*, v7 i3. 273-285, 1997.

VAN LINTEL, H. T. G.; VAN DE POL, F. C. M.; BOUWSTRA, S. **A Piezoelectric Micropump Based on Micromachining of Silicon**. *Sens. Actuators*, n.15, p. 153-167, 1988.

VATANABE, Sandro Luis. **Estudo de viabilidade de atuadores piezelétricos bilaminares para bombeamento de líquidos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Controle e Automação Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

XU, Liang; YANG, Ming; OU, Wen-chu; FU, Sang-di. **Design of a double cavities piezoelectric peristaltic pump with finite element method**. *Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA), 2012 Symposium on* , vol., no., pp.26,28, 23-25 Nov. 2012.

YE, F.; WANG, S.; CHENG, W.; XIA, Q.; ZHANG, J.; **Present situation and classification of piezoelectric pump**. *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, 420-429. Higher Education Press. 2009-12-01.

## APÊNDICE A: LISTAGEM APDL

### A.1 Análise modal do disco bidimensional

```

FINISH
/CLEAR
/CONFIG,NRES,1000000
/TRIAD,OFF
*ULIB,jack,mplib
ABBRES,NEW,'FAVORITOS2'
/PREP7

!-----
! DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS
!-----
Rint = 0.020           ! Raio interno (mm)
Rext = 0.060           ! Raio externo (mm)
esp = 0.001           ! Espessura (mm)
ModE = 70E9           ! Módulo de Elasticidade - alumínio (Pa)
pois = 0.3            ! Coeficiente de poisson
dens = 2700           ! Densidade (kg/mm^3)
nelr = 20             ! Número de elementos radiais
nelt = 50             ! Número de elementos em theta

MODO  = 1             ! Análise: 1 = Modal;
NMODOS = 200

PI = 3.1415926535897932384626433832795

/PREP7
!-----
! DEFINIÇÃO DO MATERIAL
!-----
MP,EX,1,ModE
MP,NUXY,1,pois
MP,DENS,1,dens

!-----
! DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA
!-----
CYL4,0,0,Rint,0,Rext,90
CLOCAL,11,1
WPCSYS,1,11
AGEN,2,1,,,,,90,0
AGEN,2,1,,,,,180,0
AGEN,2,1,,,,,270,0
AGLUE,ALL
NUMCMP,ALL

!-----
! DEFINIÇÃO DO ELEMENTO E GERAÇÃO DA MALHA
!-----
ET,1,SHELL281
R,1,esp

```



```

LSEL,S,,,1,3,2
LSEL,A,,,7,12
LESIZE,ALL,,,ne1t
ALLS

LSEL,S,,,2
LSEL,A,,,4,6
LESIZE,ALL,,,ne1r
ALLS
AMESH,ALL

!-----
! APLICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO
!-----
LSEL,S,,,3
LSEL,A,,,8,12,2
NSLL,S,1
D,ALL,ALL
ALLS

!-----
! SOLUÇÃO
!-----
/SOLU

! MODAL
!-----
ANTYPE,MODAL
MODEOPT,LANB,NMODOS

SOLVE

!-----
! PÓS-PROCESSAMENTO
!-----
/POST1
/ANG,1,-60,XS,1
/REP,FAST
SET,FIRST
/EFACET,1
/DSCALE,ALL,AUTO
*IF,MODO,EQ,1,THEN
PLNSOL,U,SUM,0,1
*ELSEIF,MODO,EQ,2,THEN
PLNS,U,SUM
ANHARM,20,0.1
*ENDIF

```

## A.2 Análises Modal e Harmônica da Configuração com Dois Arrays

```

FINISH
/CLEAR                ! limpa memória e database
/CONFIG,NRES,1000000   ! max de substeps no result file
/TRIAD,OFF            ! mostra eixo coord global
*ULIB,jack,mllib       ! mudar diretório do ansys! File\change directory
ABBRES,NEW,'FAVORITOS2' ! mudar pasta tbm

/PREP7

!-----
! DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS
!-----
Rint = 0.012           ! Raio interno (m)
Rext = 0.018           ! Raio externo (m)
RintP = 0.013          ! Raio interno Piezoelétrico(m)
RextP = 0.018          ! Raio externo Piezoelétrico(m)
distP = 1.5            ! Distancia entre piezoelétricos, em multiplos de teta, usar 1, 1.1 etc
esp = 0.0005           ! Espessura Disco(m)
espP = 0.0002          ! Espessura do Piezoelétrico (m)
teta = 30              ! lambda/2

!-----
! MATERIAIS
!-----
ModE = 70E9            ! Módulo de Elasticidade - alumínio (Pa)
pois = 0.3             ! Coeficiente de poisson
dens = 2700            ! Densidade (kg/m^3)

MODO = 2               ! Análise: 1 = Modal; 2 = Harmônica
FREQ = 22200
NMODOS = 20

/PREP7

!-----
! DEFINIÇÃO DO MATERIAL DISCO
!-----
MP,EX,1,ModE           !define prop material: MatProp(MP),mod elasticidade, referencia(1), valor
MP,NUXY,1,pois         !NUXY: minor coef poisson
MP,DENS,1,dens         !densidade
ET,1,SOLID226,11

ET,2,SOLID226, 1001,,0 !sólido 3D, 1001 =piezoeletrico

!=====
! PROPRIEDADES DO PIEZOELETRICO
!=====

! CONSTANTES PIEZELÉTRICAS
!-----

```

e31=-5.4  
e33=15.8  
e15=12.3

!TB (Data table), matriz piezoeletrica, núm. material  
TB,PIEZ,2                   !\* PZT-5A - classe de simetria 6mm

!TBDATA (preenche matriz), início, valor [1 a 6]

TBDATA,1,0,0,e31	!*   0 -5.4 0	0 e31 0
TBDATA,4,0,0,e31	!*   0 15.8 0	0 e33 0
TBDATA,7,0,0,e33	!*   0 -5.4 0	0 e31 0
TBDATA,10,0,0,0	!*   12.3 0 0	=   e15 0 0
TBDATA,13,0,0,e15,0	!*   0 0 12.3	0 0 e15
TBDATA,16,e15,0,0	!*   0 0 0	0 0 0

! Constantes elásticas a campo elétrico constante

!-----

c11=12.5E10  
c12=7.54E10  
c13=7.52E10  
c33=11.1E10  
c44=2.11E10  
c66=.5\*(c11-c12)

!TB,elem. anisotrópico, número do material

TB,ANEL,2	!* PZT-5A - classe de simetria 6mm (*10^10)
TBDATA,1,c11,c12,c13,0,0,0	!*   12.5 7.52 7.54 0 0 0     c11 c13 c12 0 0 0
TBDATA,7,c11,c13,0,0,0	!*   11.1 7.52 0 0 0     c33 c13 0 0 0
TBDATA,12,c33,0,0,0	!*   12.5 0 0 0     c11 0 0 0
TBDATA,16,c66,0,0	!*   2.11 0 0   =   c44 0 0
TBDATA,19,c44,0	!*   2.11 0     c44 0
TBDATA,21,c44	!*   2.26       c66

! Constantes dieletricas a strain (S) constante

!-----

e00=8.85E-12  
eps1=916\*8.85E-12  
eps3=830\*8.85E-12       !\* PZT-5A - classe de simetria 6mm (\*10^-9)

!MP= material property, PERX= permitividade em X, numero material

MP,PERX,2,eps1	!*   8.1066 0 0	eps11 0 0
MP,PERY,2,eps1	!*   0 7.3455 0	=   0 eps33 0
MP,PERZ,2,eps3	!*   0 0 8.1066	0 0 eps11
MP,DENS,2,7650	!densidade	

!-----FIM MAT PROP-----

!-----

! DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA

!-----

!--Cria Disco--!

CYL4,0,0,Rint,0,Rext,360                   !cil, x centro, y centro, raio1, ang1, raio2, ang2, profundid. Os raios e

```

                                !ângulos podem se colocados em qlq ordem (><)
                                !coord local: (maior q 10), cilindrica
CLOCAL,11,1
WPCSYS,1,11

!-----CONDIÇÕES DE CONTORNO SOBRE LINHA INTERIOR-----!
LSEL,S,,,5,8
DL,ALL,,UX,0
DL,ALL,,UY,0
DL,ALL,,UZ,0
LSEL,ALL

!--Extrudar Disco--!
VOFFST,1,-esp                                !Extruda de esp
NUMCMP,ALL

!--Cria elementos piezoelétricos--!
CYL4,0,0,RintP,0,RextP,teta-0.5
loop=0
flag=1
numero = 180/teta-1
total = 360- 1.5*teta

*DOWHILE,flag
    loop=loop+1
    *IF, loop, EQ, numero,THEN
        loop=loop+0.5
    *ENDIF
    *IF,(loop*teta),GE,total,EXIT
        AGEN,2,11,,,,loop*teta,0                !Gera área deslocada de loop*teta
    *ENDDO

contaArea=10                                !area teta -1
loop=0
flag=1
*DOWHILE,flag
    contaArea=contaArea+1
    VOFFST,contaArea,espP
    loop=loop+1
    *IF, loop, EQ, numero,THEN
        loop=loop+0.5
    *ENDIF
    *IF,(loop*teta),GE,total,EXIT
    *ENDDO

AOVLAP,ALL

!-----FIM GEOMETRIA-----!

!=====
!      ATRIBUIÇÃO DOS ELEMENTOS AOS VOLUMES
!=====

VSEL,ALL
VGLUE,ALL

NUMCMP,VOLU

```

```

VSEL,S,,,11
VATT,1,,1

VSEL,ALL
VSEL,U,,,11
VATT,2,,2

ALLS

!-----Controle de Malha-----
SMRTSIZE,4
MSHAPE,1,3D
VMESH,ALL

!=====
!               Condições de contorno EM VOLT
!=====
*IF,MODO,EQ,2,THEN

ASEL,S,,,21,41,10 !Seno polarizado pra cima
ASEL,A,,,73        !Seno polarizado pra baixo
ASEL,A,,,12
NSLA,S,0
CP,1,VOLT,ALL
*GET,V1,NODE,0,NUM,MIN
D,V1,VOLT,0,40
ALLS

ASEL,S,,,46,66,10    !Cosseno polarizado pra cima
ASEL,A,,,74          !Cosseno pra baixo
ASEL,A,,,86
NSLA,S,0
CP,2,VOLT,ALL
*GET,V2,NODE,0,NUM,MIN
D,V2,VOLT,40
ALLS

ASEL,S,,,26,36,10    !Terra - seno polarizado para baixo
ASEL,A,,,15          !Terra - seno polarizado para cima
ASEL,A,,,71,72
ASEL,A,,,51,61,10    !Terra - cosseno polarizado para cima
ASEL,A,,,85          !Terra - cosseno polarizado para baixo
ASEL,A,,,75,76
NSLA,S,0
CP,3,VOLT,ALL
*GET,V3,NODE,0,NUM,MIN
D,V3,VOLT,0
ALLS

*ENDIF

!-----
! SOLUÇÃO
!-----
/SOLU                !Entra no solution processor

```

```

*IF,MODO,EQ,1,THEN

! MODAL
!-----
ANTYPE,MODAL
MODOPT,UNSYMM,NMODOS

*ELSEIF,MODO,EQ,2,THEN

! HARMONIC
!-----
ANTYPE,HARMIC           !Analysis type
HARFRQ,15000,29000      !freq em Hz; HARFRQ,Fb,Fe: percorre as freqs de Fb até Fe, se
                        !Fe=blank fica com Fb
NSUBST,13               !number of substeps;
DMPRAT,0.02

*ENDIF

SOLVE

!-----
! PÓS-PROCESSAMENTO
!-----
/POST1
/ANG,1,-60,XS,1
/REP,FAST
SET,FIRST
/EFACET,1
/DSCALE,ALL,AUTO
*IF,MODO,EQ,1,THEN
PLNSOL,U,SUM,0,1
*ELSEIF,MODO,EQ,2,THEN
PLNS,U,SUM
ANHARM,20,0.1
*ENDIF

```

### A.3 Análises Modal e Harmônica da Configuração com Distribuição Uniforme

```

FINISH
/CLEAR                                ! limpa memória e database
/CONFIG,NRES,1000000                  ! max de substeps no result file
/TRIAD,OFF                            ! mostra eixo coord global
*ULIB,jack,mllib                      ! mudar diretório do ansys! File\change directory
ABBRES,NEW,'FAVORITOS2'              ! mudar pasta tbm

/PREP7
!-----
! DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS
!-----
Rint = 0.012                          ! Raio interno (m)
Rext = 0.018                          ! Raio externo (m)
RintP = 0.013                         ! Raio interno Piezoelétrico(m)
RextP = 0.018                         ! Raio externo Piezoelétrico(m)
esp = 0.0005                         ! Espessura Disco(m)
espP = 0.0005                        ! Espessura do Piezoelétrico (m)

lambda2 = 30                         !"lambda/2" para 6 ondas em graus = 360/6
lambda4 = lambda2/2                  !lambda/4 = Espaçamento entre piezeletricos
lambda8 = lambda2/4                  !lambda/8 = Tamanho do piezelétrico
tamPiezo=lambda8*1.5

!-----
!                               Constantes de Materiais
!-----
ModE = 70E9                          ! Módulo de Elasticidade - alumínio (Pa)
pois = 0.3                           ! Coeficiente de poisson
dens = 2700                          ! Densidade (kg/m^3)

!-----
!                               Configurações de modos
!-----

MODO  = 2                            ! Análise: 1 = Modal; 2 = Harmônica
FREQ  = 22000
NMODOS = 40

/PREP7
!-----
! DEFINIÇÃO DO MATERIAL DISCO
!-----
MP,EX,1,ModE                          !define prop material: MatProp(MP),mod elasticidade, referencia(1), valor
MP,NUXY,1,pois                       !NUXY: minor coef poisson
MP,DENS,1,dens                       !densidade
ET,1,SOLID226,11

ET,2,SOLID226, 1001,,0                !sólido 3D, 1001 =piezoelétrico
!=====
! PROPRIEDADES DO PIEZOELETRICO
!=====

```

```

! Piezo constants
!-----
e31=-5.4
e33=15.8
e15=12.3

!TB data table, matrix piezo, núm. material
TB,PIEZ,2          !* PZT-5A - classe de simetria 6mm

!TBDATA preenche matrix, início, valor [1 a 6]
TBDATA,1,0,0,e31      !* | 0 -5.4 0 | | 0 e31 0 |
TBDATA,4,0,0,e31      !* | 0 15.8 0 | | 0 e33 0 |
TBDATA,7,0,0,e33      !* | 0 -5.4 0 | | 0 e31 0 |
TBDATA,10,0,0,0       !* | 12.3 0 0 | = | e15 0 0 |
TBDATA,13,0,e15,0     !* | 0 0 12.3 | | 0 0 e15 |
TBDATA,16,e15,0,0     !* | 0 0 0 | | 0 0 0 |

! Elastic constants at E cst
!-----
c11=12.5E10
c12=7.54E10
c13=7.52E10
c33=11.1E10
c44=2.11E10
c66=.5*(c11-c12)

!TB,elem. anisotrópico, mat num
TB,ANEL,2          !* PZT-5A - classe de simetria 6mm (*10^10)
TBDATA,1,c11,c12,c13,0,0,0 !* | 12.5 7.52 7.54 0 0 0 | | c11 c13 c12 0 0 0 |
TBDATA,7,c11,c13,0,0,0 !* | 11.1 7.52 0 0 0 | | c33 c13 0 0 0 |
TBDATA,12,c33,0,0,0 !* | 12.5 0 0 0 | | c11 0 0 0 |
TBDATA,16,c66,0,0 !* | 2.11 0 0 | = | c44 0 0 |
TBDATA,19,c44,0 !* | 2.11 0 | | c44 0 |
TBDATA,21,c44 !* | 2.26 | | c66 |

! Constantes dieletricas a strain (S) constante
!-----
e00=8.85E-12
eps1=916*8.85E-12
eps3=830*8.85E-12      !* PZT-5A - classe de simetria 6mm (*10^-9)

!MP= material property, PERX= permitividade em X, numero material
MP,PERX,2,eps1      !* | 8.1066 0 0 | | eps11 0 0 |
MP,PERY,2,eps1      !* | 0 7.3455 0 | = | 0 eps33 0 |
MP,PERZ,2,eps3      !* | 0 0 8.1066 | | 0 0 eps11 |
MP,DENS,2,7650      !densidade

!-----FIM MAT PROP-----

!-----
! DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA
!-----
!-- Cria Disco Metálico --!
CYL4,0,0,Rint,0,Rext,90
CLOCAL,11,1          !coord local: (maior q 10), cilindrica
WPCSYS,1,11

```



```

AGEN,2,1,,,,90,0
AGEN,2,1,,,,180,0
AGEN,2,1,,,,270,0

AGLUE,1,2,3,4
NUMCMP,all

!-----CONDIÇÕES DE CONTORNO SOBRE LINHA INTERIOR-----!
LSEL,S,,,3
LSEL,A,,,8,12,2
DL,ALL,,UX,0
DL,ALL,,UY,0
DL,ALL,,UZ,0
LSEL,ALL

!--Extrudar Disco--!
VOFFST,1,-esp                      !Extruda de esp
VOFFST,2,-esp
VOFFST,3,-esp
VOFFST,4,-esp
VADD,ALL
AGLUE,ALL
NUMCMP,ALL

!--Cria elementos piezoelétricos--!
CYL4,0,0,RintP,0,RextP,tamPiezo    !Gera semi-circulos de tamanho tamPiezo
AGEN,2,17,,,,lambda4              !Copia o semi-circulo espaçado de lambda/4

flag=1                              !flag de saída de loop
areaSeno=17
areaCoseno=18
cont=0                              !Contador
*DOWHILE,flag
    cont=cont+1
    anguloPercorrido= cont*lambda2
    *IF,(anguloPercorrido),GE,360,EXIT
    AGEN,2,areaSeno,areaCoseno,,,cont*lambda2,0    !Copia o par piezoelétrico deslocado de
                                                    ! lambda/2

*ENDDO

contaArea=16                        !area teta -1
flag=1
cont=0
*DOWHILE,flag
    anguloPercorrido= cont*lambda2
    *IF,(anguloPercorrido),GE,360,EXIT
    contaArea=contaArea+1    !seno
    VOFFST,contaArea,espP
    contaArea=contaArea+1    !cosseno
    VOFFST,contaArea,espP
    cont=cont+1
*ENDDO
AOVLAP,ALL

!-----FIM GEOMETRIA-----!

```

```

=====
!      ATRIBUIÇÃO DOS ELEMENTOS AOS VOLUMES
=====
VSEL,ALL
VGLUE,ALL

NUMCMP,VOLU
VSEL,S,,,25
VATT,1,,1

VSEL,ALL
VSEL,U,,,25
VATT,2,,2

ALLS

!-----Controle de Malha-----
SMRTSIZE,4
MSHAPE,1,3D
VMESH,ALL

=====
!      Condições de contorno EM VOLT
=====
*IF,MODO,EQ,2,THEN

ALLS

ASEL,S,,,41,141,20      !SENO polarizado pra cima
ASEL,A,,,163,183,4      !SENO polarizado pra baixo
NSLA,S,0
CP,1,VOLT,ALL
*GET,V1,NODE,0,NUM,MIN
D,V1,VOLT,0,40

ALLS

ASEL,S,,,46,146,20      !COSSENO polarizado pra cima
ASEL,A,,,164,184,4      !COSSENO polarizado pra baixo
NSLA,S,0
CP,2,VOLT,ALL
*GET,V2,NODE,0,NUM,MIN
D,V2,VOLT,40

ALLS

ASEL,S,,,51,151,20      !terra-seno polarizado pra baixo
ASEL,A,,,56,156,20      !terra-cosseno baixo
ASEL,A,,,161,181,4      !terra-seno polarizado pra cima
ASEL,A,,,162,182,4      !terra-cosseno cima
NSLA,S,0
CP,3,VOLT,ALL
*GET,V3,NODE,0,NUM,MIN
D,V3,VOLT,0

ALLS

```

```

*ENDIF

ALLS

!-----
! SOLUÇÃO
!-----
/SOLU                !Entra no solution processor

*IF,MODO,EQ,1,THEN

! MODAL
!-----
ANTYPE,MODAL
MODOPT,UNSYMM,NMODOS

*ELSEIF,MODO,EQ,2,THEN

! HARMONIC
!-----
ANTYPE,HARMIC        !Analysis type
HARFRQ,FREQ          !Freq. em Hz; HARFRQ,Fb,Fe: percorre as freqs de Fb até Fe, se Fe=blank fica
                     !com Fb.
NSUBST,1             !number of substeps;
DMPRAT,0.02

*ENDIF

SOLVE

!-----
! PÓS-PROCESSAMENTO
!-----
/POST1
/ANG,1,-60,XS,1
/REP,FAST
SET,FIRST
/EFACET,1
/DSCALE,ALL,AUTO
*IF,MODO,EQ,1,THEN
PLNSOL,U,SUM,0,1
*ELSEIF,MODO,EQ,2,THEN
PLNS,U,SUM
ANHARM,20,0.1
*ENDIF

```

## APÊNDICE B: CÓDIGOS JAVA

### B.1 Formatador de saída ANSYS

Para facilitar a análise de dados obtidos através das simulações realizadas no software ANSYS, em que se listam os resultados de deslocamentos nodais, criou-se um programa que formata os arquivos gerados através do ANSYS (extensão “.txt”) para que sirvam de entrada para o programa de pós- processamento desenvolvido em Matlab.

#### *IHM*

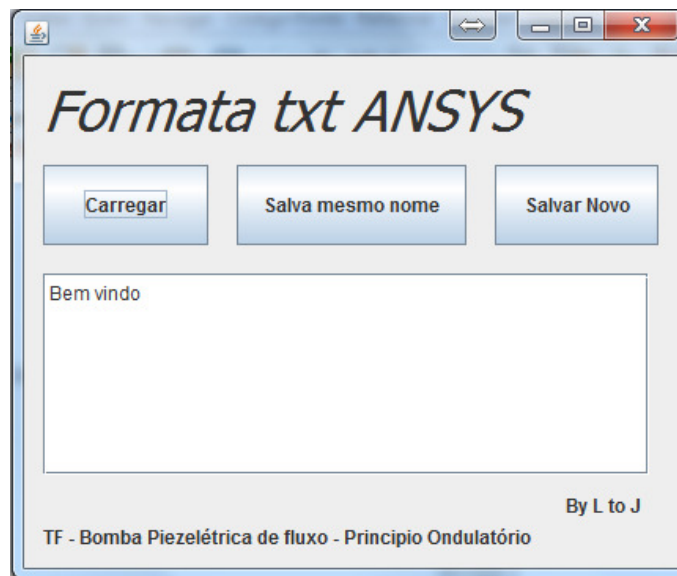


Figura B.0.1 - IHM do formatador de saída ANSYS

#### *Classe principal*

```
package editatxt;
import java.util.*;
import java.io.*;

public class ManipulaArquivo {
    String d[] = new String[1000000];

    void ManipulaArquivo(){
        for(int i=0; i< d.length; i++){
            d[i]=null;
        }
    }
}
```

```

void LimpaBuffer(){
    for(int i=0; i< d.length; i++){
        d[i]=null;
    }
}

//Verify INteger
public static boolean isInteger(String str) {
    try {
        Integer.parseInt(str);
        return true;
    } catch (NumberFormatException nfe) {
        return false;
    }
}

//CARREGAR ARQUIVO
public void CarregaArquivo(String arquivo) {

    this.LimpaBuffer();

    //LerArquivo
    try {
        FileReader file = new FileReader(arquivo);
        BufferedReader br = new BufferedReader(file);
        String line = "";
        String aux;

        int linha=0;

        while (line != null) {

            line = br.readLine();

            if (line!=null){
                if( line.length() > 7){ //Verifique se tem mais de 7 posições
                    if( isInteger(Character.toString(line.charAt(7))) ){
                        aux=line;
                        if( aux.length() > 8){
                            if(aux.charAt(8) != ' ' ){ //Insere espaço para separar o "-" do
ANALYSIS
                                aux = new StringBuilder(line).insert(8, " ").toString();
                            }
                        }
                        if( aux.length() > 21){
                            aux = new StringBuilder(aux).insert(21, " ").toString();
                        }
                        if( aux.length() > 34){
                            aux = new StringBuilder(aux).insert(35, " ").toString();
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        if( aux.length() > 48){
            aux = new StringBuilder(aux).insert(49 , " ").toString();
        }
        d[linha]=aux;
        //System.out.println("d"+ linha + " "+d[linha]);
        linha++;
    }
}
}
}
br.close();
file.close();
} catch (IOException e) {
    System.out.println("Arquivo Nao encontrado \n");
}
} //FIM CARREGAR
//SALVAR
public void SalvaArquivo(String arquivo) {
    FileWriter fw;
    int i=0;

    try {
        fw = new FileWriter(arquivo);

        while(d[i]!=null){
            fw.write(d[i]+ "\r\n");
            i++;
        }
        fw.close();

    } catch (IOException e) {
        System.out.println("Nao foi possivel salvar");
    }
} //fim do escreve
}

```

## APÊNDICE C: CÓDIGOS MATLAB

### C.1 Influência de variação das dimensões

Este código é utilizado para o pós-processamento automatizado dos dados obtidos nas análises harmônicas realizada em software ANSYS. Tendo as componentes real e imaginária das soluções nodais, calcula a fase e módulo destes e permite encontrar o nó cujo deslocamento possui maior amplitude.

```
%% Inicializa
clc;
clear all;
close all;
format long;

%% Setup
tipo = 'H'; %Tipo = ED H L EC EM

%Formato: a = n1(primeiro arquivo), n2(segundo arquivo), passo(incremento)
if ( strcmp(tipo, 'H'))
    a=[1 7 1];
elseif( strcmp(tipo,'L'))
    a=[5 35 5];
elseif( strcmp(tipo,'ED'))
    a=[2 10 1];
elseif( strcmp(tipo,'EC'))
    a=[2 10 1];
elseif( strcmp(tipo,'EM'))
    a=[-3 3 1];
end

n1=a(1);
n2=a(2);
passo=a(3);

Max=zeros(1, (n2-n1)/passo+1);
Row=zeros(1, (n2-n1)/passo+1);
variavel=zeros(1, (n2-n1)/passo+1);

%% Leitura de arquivos;
j=1;
for i=n1:passo:n2
    n=int2str(i);

    switch tipo
```

```

case 'H'
    %Para variação de H
    caminho='.\Ampli H';
    Lreal=strcat(caminho,'h',n,'mm_real');
    Limag=strcat(caminho,'h',n,'mm_imag');
    real=load(Lreal);
    imag=load(Limag);
case 'L'
    %%PARA VARIA L
    caminho='.\Ampli L';
    Lreal=strcat(caminho,'Ampli-L',n,'.txt');
    Limag=strcat(caminho,'Ampli-L',n,'imag.txt');
    real=load(Lreal);
    imag=load(Limag);
case 'ED'
    %PARA VARIA H
    caminho='.\Ampli Esp Disco';
    Lreal=strcat(caminho,'AmpliDisco',n,'.txt');
    Limag=strcat(caminho,'AmpliDisco',n,'imag.txt');
    real=load(Lreal);
    imag=load(Limag);
case 'EC'
    %PARA VARIA Esp Ceramica
    caminho='.\Ampli Esp Ceramica';
    Lreal=strcat(caminho,'Eceramica_0',n,'mm_real.txt');
    Limag=strcat(caminho,'Eceramica_0',n,'mm_imag.txt');
    real=load(Lreal);
    imag=load(Limag);
case 'EM'
    %Para erros de montagem
    caminho='.\Ampli Erros Montagem';
    Lreal=strcat(caminho,'amplisErro',n,'.txt');
    Limag=strcat(caminho,'amplisErro',n,'imag.txt');
    real=load(Lreal);
    imag=load(Limag);
end

%Tratamento dos dados
X=complex(real(1:size(imag,1),5),imag(:,5));

modulo=abs(X);
fase=phase(X);

variavel(j)=n1+(j-1)*passo;
Max(j)=max(modulo);
Row(j)=find(modulo==max(modulo));

j=j+1;
end

```



```

%% Saida
Config={ tipo, n1, n2 }
Max = Max'

%% PLOT
cor='r';
forma='o-';
linha=strcat(cor,forma);
figure(1)
plot(variavel/10,Max,linha);
title(strcat('Deslocamento ',tipo));
xlabel(strcat(tipo,' (mm)'));
ylabel('Deslocamento (m)');
legend('Deslocamento');
set(gca,'Xlim',[0 (n2+1)/10]);
set(gca,'Ylim',[0 max(Max)+1e-6]);
grid;

```

## C.2 Figura de Lissajous – Erro de Montagem

Código utilizado para gerar as figuras de Lissajous a partir dos deslocamentos nodais obtidos em software ANSYS.

```

%% Inicializa
clc;
clear all;
close all;

f=14568;
T=1/f;
dt=T/100;
node=4763;

cor=['b' 'm' 'c' 'r' 'g' 'y' 'k' 'w'];

%OBS: Linhas P =
%Preal = [erro node   xr       yr       zr       somar]
Pr(1,:) = [-3 4544 -0.28805E-06 -0.31499E-06 0.32176E-05 0.32458E-05];
Pr(2,:) = [-2 4058 -0.39135E-06 -0.25558E-06 0.25521E-05 0.25946E-05];
Pr(3,:) = [-1 4082 -0.36835E-06 -0.18750E-06 0.21050E-05 0.21452E-05];
Pr(4,:) = [ 0 4090 -0.34761E-06 -0.15556E-06 0.18137E-05 0.18533E-05];
Pr(5,:) = [ 1 4090 -0.32749E-06 -0.13271E-06 0.16710E-05 0.17079E-05];
Pr(6,:) = [ 2 4061 -0.26717E-06 -0.17333E-06 0.21661E-05 0.21894E-05];
Pr(7,:) = [ 3 4540 -0.13208E-06 -0.28990E-06 0.33848E-05 0.33998E-05];

xr=Pr(:,3);
yr=Pr(:,4);

```

```

zr=Pr(:,5)';
somar=Pr(:,6)';

%Pimagnario = [erro node xi yi zi somai]
Pi(1,:) = [-3 4544 -0.63264E-06 -0.36164E-07 0.41862E-06 0.75946E-06];
Pi(2,:) = [-2 4058 -0.46753E-06 0.99911E-07 -0.10778E-05 0.11791E-05];
Pi(3,:) = [-1 4082 -0.36828E-06 0.16104E-06 -0.15081E-05 0.15607E-05];
Pi(4,:) = [ 0 4090 -0.35282E-06 0.19896E-06 -0.18707E-05 0.19140E-05];
Pi(5,:) = [ 1 4090 -0.36410E-06 0.23706E-06 -0.21987E-05 0.22412E-05];
Pi(6,:) = [ 2 4061 -0.41799E-06 0.28763E-06 -0.26166E-05 0.26653E-05];
Pi(7,:) = [ 3 4540 -0.43714E-06 0.31082E-06 -0.26715E-05 0.27248E-05];

xi=Pi(:,3)';
yi=Pi(:,4)';
zi=Pi(:,5)';
somai=Pi(:,6)';

X=complex(xr,xi);
Y=complex(yr,yi);
Z = complex(zr,zi);
SOMA=complex(somar,somai);

t=-dt;
xplot=zeros(1,(T/dt+1));
zplot=zeros(1,(T/dt+1));

for j=1:size(Pr,1)
    for i=1:(T/dt+1)
        t=t+dt;
        xplot(i) = abs(X(j))*sin(2*pi*f*t+phase(X(j)));
        % yplot(i) = abs(Y)*sin(2*pi*f*t+phase(Y));
        zplot(i) = abs(Z(j))*sin(2*pi*f*t+phase(Z(j)));
        %
    end

    figure(1);
    plot(xplot,zplot,cor(j));
    hold on;
end

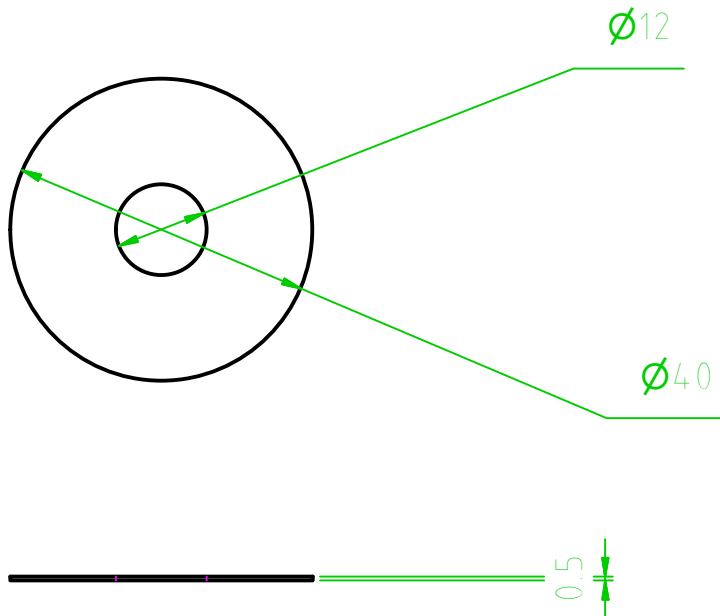
title('Figura de Lisajou para desvios de posicionamento');
xlabel('x[m]');
ylabel('z[m]');
legend('Erro -3°','Erro -2°','Erro -1°','Erro 0°','Erro 1°','Erro 2°','Erro 3°');
set(gca,'Ylim',[-5e-6 5e-6]);
set(gca,'Xlim',[-1e-6 1e-6]);

```

## **APÊNDICE D - DESENHOS DE FABRICAÇÃO**

Os seguintes desenhos de fabricação estão presentes nesta seção:

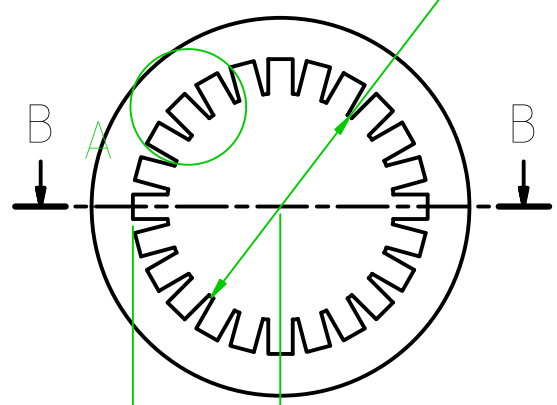
- Disco
- Gabarito
- Base
- Eixo Central
- Fixador
- Tampa
- Desenho de conjunto



Designed by L	Checked by	Approved by	Date	Date 26/08/2013	
			Disco - laser		
			Edition	Sheet 1 / 1	

50

Ø30



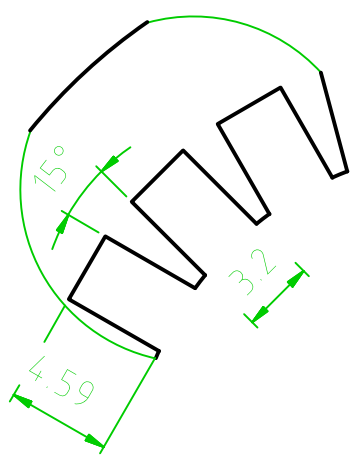
19.5

B-B ( 1 : 1 )

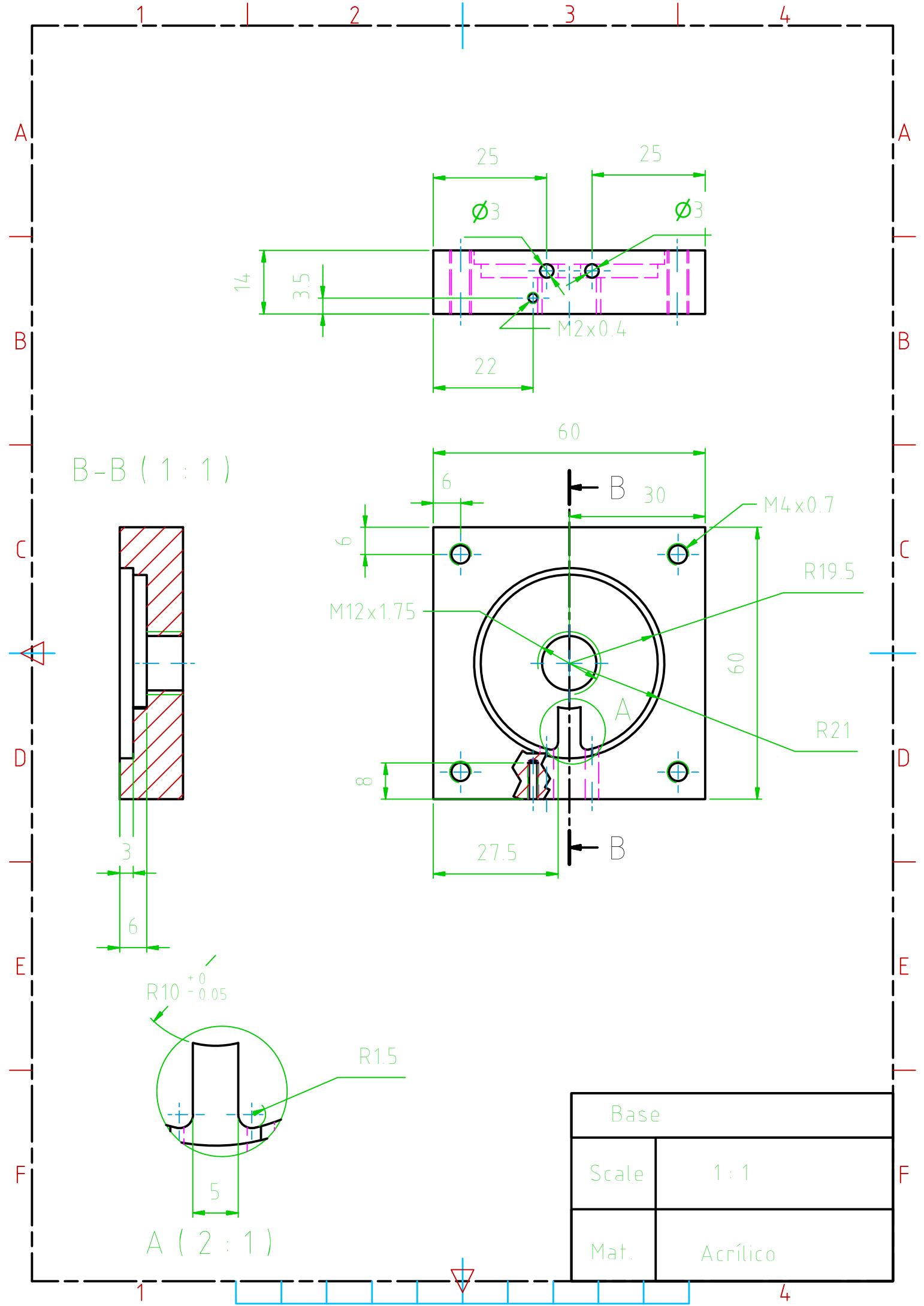


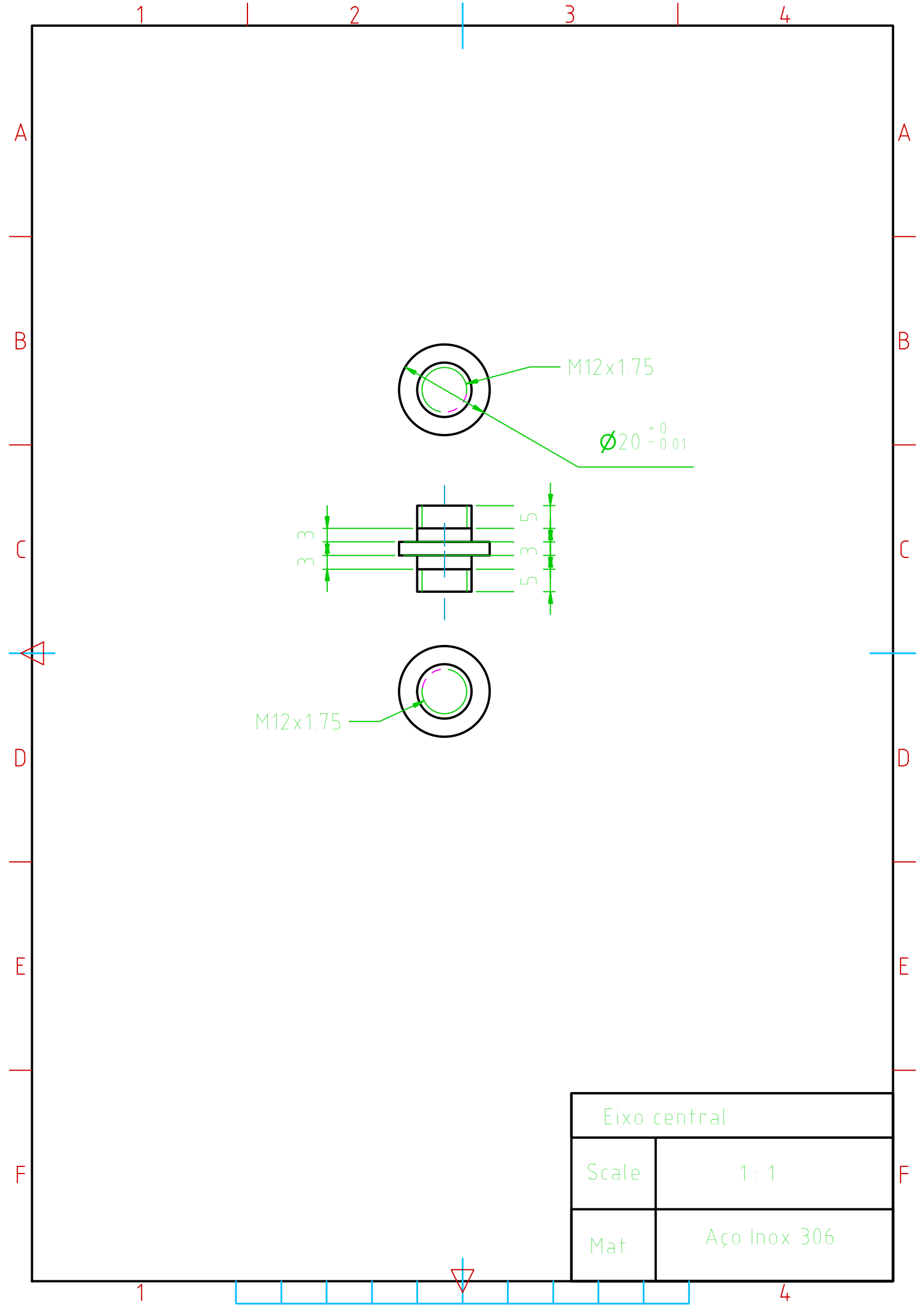
0.5

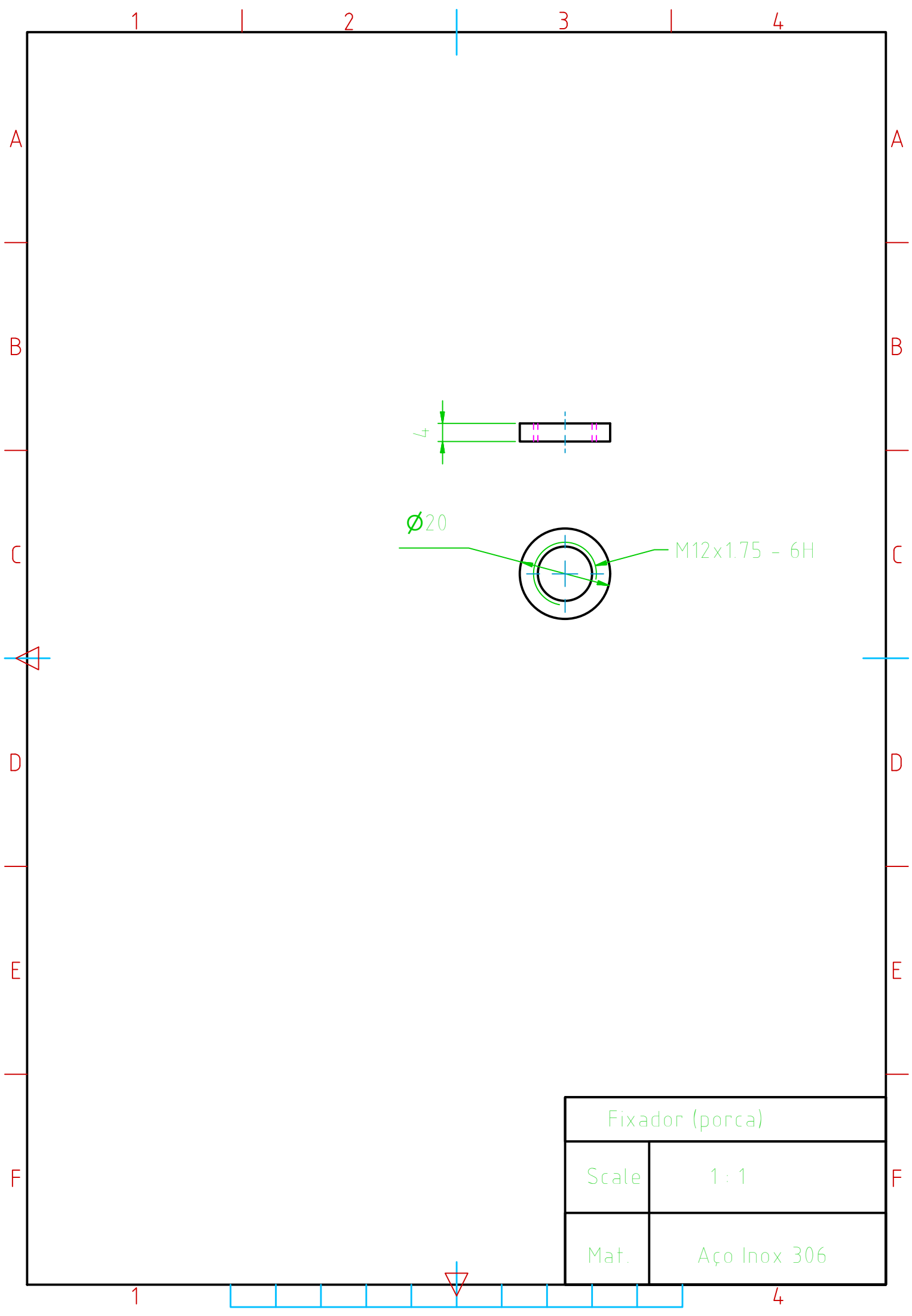
A ( 3 : 1 )



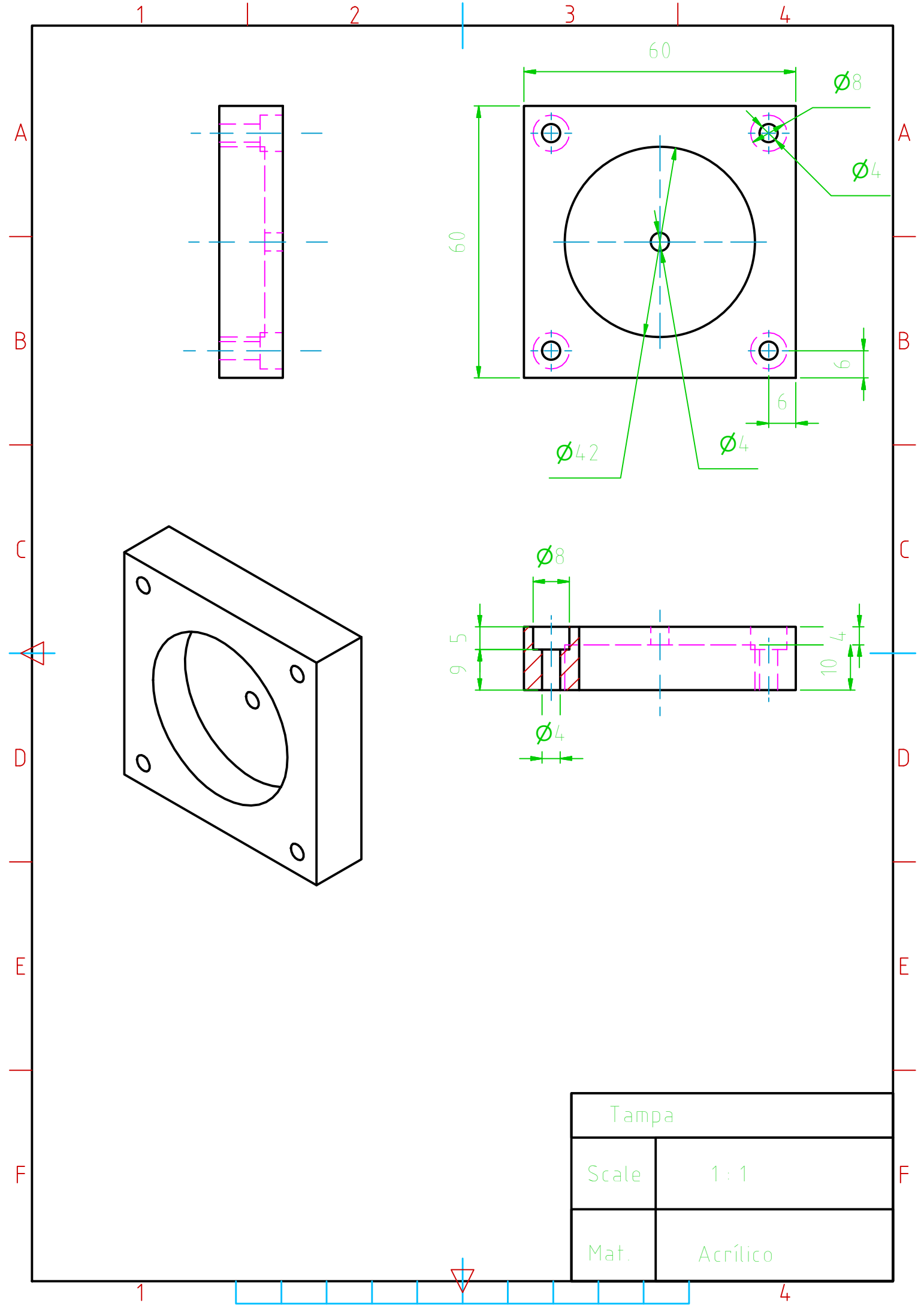
FILE NAME	FSCM NO	SHEET	SCALE
Gabarito piezo			1:1
SIZE			
DRAWN	26/08	L	
CHECK			
APPR.			
ISSUED			
REV		DWG NO	
CONTRACT NO		-	

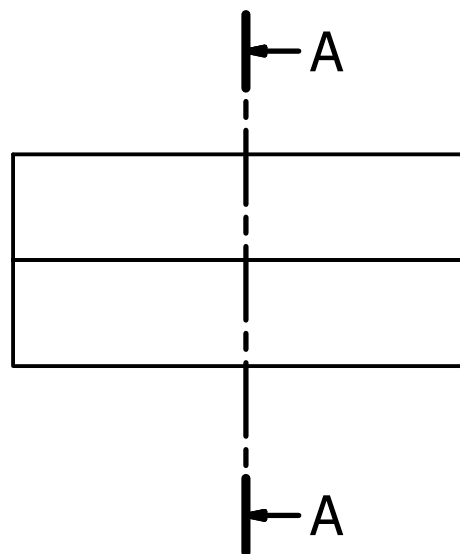
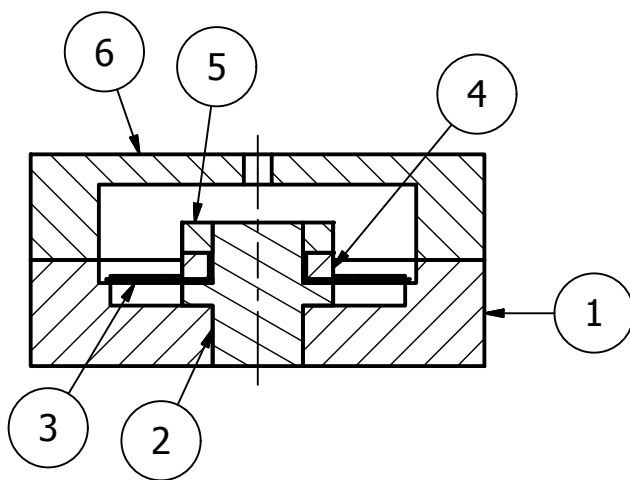
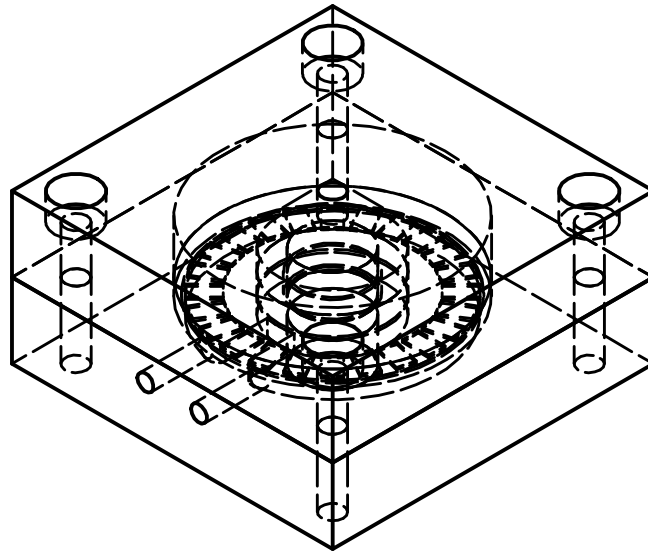
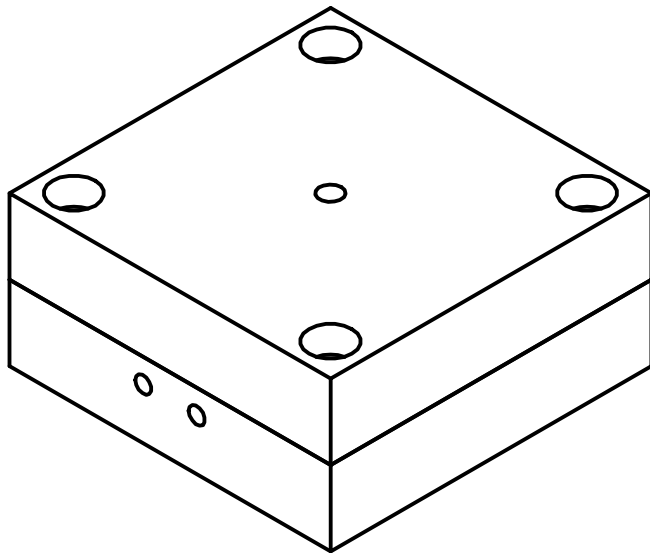












#### PARTS LIST

ITEM	PART NUMBER
1	Base
2	Pino central
3	Disco com piezelétricos
4	Arruela
5	Fixador
6	Tampa

Designed by L	Checked by	Approved by	Date	Date 09/10/2013	
			Desenho de conjunto		
			Conjunto Bomba quadrada B	Edition	Sheet 1 / 1