


02

ANDRES CHOI  
SANDRO LUIS VATANABE

nota final 10.0  
(dez e zero)  


ESTUDO DE VIABILIDADE DE BOMBAS DE FLUXO PIEZELÉTRICAS  
BASEADAS EM PRINCÍPIO OSCILATÓRIO

TRABALHO DE FORMATURA  
APRESENTADO À ESCOLA  
POLITÉCNICA PARA OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE ENGENHEIRO

SÃO PAULO  
2006

ANDRES CHOI  
SANDRO LUIS VATANABE

ESTUDO DE VIABILIDADE DE BOMBAS DE FLUXO PIEZELÉTRICAS  
BASEADAS EM PRINCÍPIO OSCILATÓRIO

TRABALHO DE FORMATURA  
APRESENTADO À ESCOLA  
POLITÉCNICA PARA OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE ENGENHEIRO

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:  
ENGENHARIA MECATRÔNICA 202

ORIENTADOR:  
PROF. DR. EMÍLIO CARLOS NELLI  
SILVA

SÃO PAULO

2006

TF-06  
C452e

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600012467

1575884

**FICHA CATALOGRÁFICA**

**Vatanabe, Sandro Luis**

**Estudo de viabilidade de bombas de fluxo piezelétricas baseadas em princípio oscilatório / S.L. Vatanabe, A. Choi. -- São Paulo, 2006.**

**106 p.**

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

**1.Método dos elementos finitos 2.Atuadores piezelétricos  
I.Choi, Andres II.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.  
Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas  
Mecânicos III.t.**

Aos nossos pais e familiares, que nos deram grande apoio  
e incentivo durante nossa jornada acadêmica.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos ao nosso orientador, Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli Silva, pelas importantes orientações recebidas durante a condução deste trabalho, por ter nos orientado pelos caminhos da pesquisa, e por inspirar grande confiança e motivação em seus alunos.

Agradecemos à INOVEO Automação de Sistemas, pelo suporte durante todo o andamento deste trabalho.

Agradecemos ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelas bolsas cedidas durante a realização deste trabalho.

Agradecemos às nossas famílias e amigos que indiretamente nos ajudaram na conclusão deste trabalho de formatura.

## RESUMO

As bombas de fluxo são instrumentos importantes em áreas que exigem refrigeração de componentes eletrônicos, bombeamento de fluidos em equipamentos de automação laboratorial, Bioengenharia, entre outras aplicações de Engenharia. Novos princípios para o bombeamento de fluidos estão sendo propostos no Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica. Materiais piezelétricos são materiais específicos que se contraem e se expandem de acordo com a tensão elétrica aplicada em seus terminais e vice-versa, gerando deformação de acordo com a excitação aplicada. Um atuador piezelétrico bilaminar é um dispositivo eletromecânico com alto grau de flexão, também conhecido por “cantilever” bilaminar, porque normalmente são montados como uma viga em balanço. O presente trabalho de formatura trata da utilização de atuadores piezelétricos bilaminares inseridos num fluido para geração de vazão. O objetivo deste projeto é estudar a viabilidade das configurações de atuadores em paralelo de parede, atuadores em paralelo, atuadores em série e atuadores em cardume das bombas de fluxo piezelétricas através da construção de protótipos e utilização de modelagem por Método de Elementos Finitos (MEF). O texto apresenta as metodologias empregadas e discute os resultados obtidos, de forma a analisar os fenômenos físicos em questão e validar estes novos princípios propostos.

## **ABSTRACT**

Flow pumps act as important instruments in areas that require cooling of electronic components, fluid pumping in automated laboratory equipments, Bioengineering, among other applications in Engineering. A new principle for pumping fluids has been proposed inside of the Department of Mechatronic Engineering and Mechanical Systems of the Polytechnic School. Piezoelectric materials are materials that contract or expand when an electric voltage is applied to its terminals or vice versa, generating deformation in the longitudinal and transversal direction in accordance to the applied excitement. A bilaminar piezoelectric actuator is an electromechanical device with high bending level, also known as bilaminar cantilever. In the current graduation project the use of bilaminar piezoelectric actuators inserted in a fluid are studied for flow generation. The main objective of this project is the study of viability of wall parallel actuators, parallel actuators, series actuators, and a shoal of piezoelectric flow pumps configurations through prototype construction and simulation by using Finite Element Method (FEM). The text presents methodologies employed and discusses the obtained results, as well as, a way of analyzing the physical phenomena and validating these new proposed principles.

## **SUMÁRIO**

### **LISTA DE FIGURAS**

### **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

### **LISTA DE SÍMBOLOS**

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO .....</b>	<b>3</b>
<b>3.1</b>	<b>Novas Configurações Propostas.....</b>	<b>7</b>
3.1.1	Configuração 1: Atuadores nas paredes em paralelo .....	7
3.1.2	Configuração 2: Atuadores em paralelo.....	8
3.1.3	Configuração 3: Atuadores em série .....	8
3.1.4	Configuração 4: Atuadores em forma de cardume .....	9
<b>4</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>9</b>
<b>4.1</b>	<b>Cerâmicas Piezelétricas .....</b>	<b>9</b>
<b>4.2</b>	<b>Atuadores Piezelétricos Bilaminares .....</b>	<b>10</b>
<b>4.3</b>	<b>MEF Piezelétrico .....</b>	<b>11</b>
4.3.1	Análise Estática.....	12
4.3.2	Análise Modal .....	12
4.3.3	Análise Harmônica.....	13
4.3.4	Análise Transiente.....	13
<b>5</b>	<b>MODELAGEM COMPUTACIONAL.....</b>	<b>14</b>
<b>5.1</b>	<b>Modelagem Computacional .....</b>	<b>14</b>
<b>5.2</b>	<b>Condições de Contorno Móveis .....</b>	<b>15</b>
<b>5.3</b>	<b>ANSYS (Software de Elementos Finitos).....</b>	<b>16</b>
<b>5.4</b>	<b>Linguagem APDL .....</b>	<b>18</b>
<b>5.5</b>	<b>Modelagem e Simulação no ANSYS.....</b>	<b>18</b>
5.5.1	Pré-Processamento .....	18
5.5.2	Solução.....	20
5.5.3	Pós-Processamento.....	21
<b>5.6</b>	<b>Autodesk Inventor Professional 10.....</b>	<b>21</b>
5.6.1	Modelagem.....	21



5.6.2	Montagem .....	22
5.6.3	Geração de Desenhos Técnicos.....	23
<b>6</b>	<b>RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL .....</b>	<b>24</b>
<b>6.1</b>	<b>Configuração 1: Atuadores nas paredes em paralelo .....</b>	<b>25</b>
<b>6.2</b>	<b>Configuração 2: Atuadores em paralelo .....</b>	<b>27</b>
<b>6.3</b>	<b>Configuração 3: Atuadores em série .....</b>	<b>30</b>
<b>6.4</b>	<b>Configuração 4: Atuadores em forma de cardume.....</b>	<b>33</b>
<b>6.5</b>	<b>Simulação com mais de dois atuadores em paralelo.....</b>	<b>35</b>
<b>6.6</b>	<b>Análise de sensibilidade da região de entrada.....</b>	<b>36</b>
<b>6.7</b>	<b>Análise de sensibilidade da inclinação do atuador.....</b>	<b>38</b>
<b>6.8</b>	<b>Análise de sensibilidade da espessura da cerâmica piezelétrica .....</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>MÉTODOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>42</b>
<b>7.1</b>	<b>Protótipo de Dois Atuadores de Parede em Paralelo.....</b>	<b>42</b>
7.1.1	Análise de Soluções .....	42
7.1.2	Fabricação dos Atuadores .....	45
7.1.3	Manuseio das Cerâmicas Piezelétricas .....	46
7.1.4	Fabricação da Bomba de Fluxo.....	49
7.1.5	Circuito de Acionamento do Primeiro Protótipo .....	50
7.1.6	Testes Preliminares do Primeiro Protótipo .....	51
7.1.7	Resultados Experimentais do Primeiro Protótipo .....	55
<b>7.2</b>	<b>Protótipo de Dois Atuadores em Paralelo.....</b>	<b>60</b>
7.2.1	Análise de Soluções .....	61
7.2.2	Fabricação da Bomba.....	63
7.2.3	Testes Preliminares do Segundo Protótipo .....	65
7.2.4	Resultados Experimentais do Segundo Protótipo .....	68
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>70</b>
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>71</b>

APÊNDICE A – DESENHOS TÉCNICOS DO PRIMEIRO PROTÓTIPO (DOIS ATUADORES DE PAREDE EM PARALELO)

APÊNDICE B – DESENHOS TÉCNICOS DO SEGUNDO PROTÓTIPO (DOIS ATUADORES EM PARALELO)

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1 – Bomba piezelétrica com diafragma. ....	2
Fig. 3.1 – Modos de nadar dos peixes. As áreas hachuradas contribuem para a locomoção. ....	4
Fig. 3.2 – Esteira de Karman para um cilindro (a) e para um perfil de asa (b). Rastro deixado pelo nadar de um peixe (c). Observa-se a formação de uma esteira de vórtices com direções de recirculação alternadas. ....	5
Fig. 3.3 – Reação em cadeia dos vórtices gerados. ....	5
Fig. 3.4 – Vista superior da formação em um cardume. ....	5
Fig. 3.5 – Princípio de funcionamento da bomba de fluxo proposta ....	6
Fig. 3.6 – Atuador Piezelétrico Bilaminar. ....	6
Fig. 3.7 – Atuadores nas paredes. ....	7
Fig. 3.8 – Atuadores em paralelo. ....	8
Fig. 3.9 – Atuadores em série. ....	8
Fig. 3.10 – Atuadores em forma de cardume. ....	9
Fig. 4.1 – Efeitos longitudinais (a) e transversais (b) das cerâmicas piezelétricas. ...	10
Fig. 4.2 – Atuador piezelétrico bilaminar. ....	11
Fig. 5.1 – Malha de Elementos em tempos diferentes. ....	15
Fig. 5.2 – Abordagem utilizada nas simulações. ....	16
Fig. 5.3 – Exemplo de malha gerada no ANSYS. ....	19
Fig. 5.4 – Função senoidal com diferentes discretizações: (a) 10 passos, (b) 30 passos e (c) 100 passos. ....	20
Fig. 5.5 – Exemplo de perfil gerado em uma Sketch 2D. ....	22
Fig. 5.6 – Exemplo de um sólido extrusado em uma Feature. ....	22
Fig. 5.7 – Exemplo de uma montagem gerada em arquivo *.iam. ....	23
Fig. 5.8 – Exemplo de um desenho técnico gerado em arquivo *.idw. ....	23
Fig. 6.1 – Modelo da bomba piezelétrica. ....	24
Fig. 6.2 – Curva Vazão Média x Tempo de referência. ....	25
Fig. 6.3 – Modelo computacional para os atuadores nas paredes. ....	25
Fig. 6.4 – Curva Vazão Média x Tempo dos atuadores nas paredes. ....	26
Fig. 6.5 – Modelo computacional para os atuadores em paralelo. ....	27
Fig. 6.6 – Atuadores em paralelo: oscilações (a) em fase; (b) defasadas em 180°. ...	28
Fig. 6.7 – Curva Vazão Média x Tempo dos atuadores em paralelo (em fase). ....	29
Fig. 6.8 – Curva de vazão dos atuadores em paralelo otimizados (em fase). ....	29
Fig. 6.9 – Dois atuadores em paralelo na mesma bomba de fluxo maximizam a vazão. (a) Duas bombas de fluxo de um único atuador, (b) bomba de fluxo de dois atuadores em paralelo. ....	30

Fig. 6.10 – Modelo computacional para os atuadores em série. ....	30
Fig. 6.11 – Curva Vazão Média x Tempo para os atuadores em série.....	31
Fig. 6.12 – Curvas de vazão dos atuadores em série com diferentes pressões de saída. .	32
Fig. 6.14 – Dois atuadores em série na mesma bomba de fluxo permitem a operação da bomba sob maiores pressões de saída. (a) Duas bombas de fluxo em série de um único atuador, (b) bomba de fluxo de dois atuadores em série.....	33
Fig. 6.15 – Modelo computacional para os atuadores em cardume. ....	33
Fig. 6.16 – Curva Vazão Média x Tempo para os atuadores em cardume. ....	34
Fig. 6.17 – Modelo computacional para os atuadores em paralelo.....	35
Fig. 6.18 – Curva Vazão Média x Tempo para três atuadores em paralelo. ....	36
Fig. 6.19 – Modelo computacional da bomba de fluxo estendida. ....	36
Fig. 6.20 – Curva Vazão Média x Tempo da bomba de fluxo (a) de referência e (b) com o duto estendido na região de entrada de fluido.....	37
Fig. 6.21 – Modelo computacional da bomba de fluxo com o atuador inclinado.....	38
Fig. 6.22 – Curva Vazão Média x Tempo da bomba de fluxo com o atuador inclinado.	39
Fig. 6.23 – Modelo do atuador piezelétrico bilaminar simulado. ....	40
Fig. 6.24 – Segundo modo de vibrar do atuador piezelétrico bilaminar. ....	40
Fig. 6.25 – Comparação entre atuador comercial e fabricado. ....	41
Fig. 7.1 – Ilustração da disposição dos dois atuadores .....	43
Fig. 7.2 – Ilustração dos perfis macho e fêmea do sistema de vedação .....	43
Fig. 7.3 – O’ring.....	44
Fig. 7.4 – Conjunto do protótipo de dois atuadores de parede em paralelo.....	44
Fig. 7.5 – Vista explodida do protótipo de dois atuadores de parede em paralelo.....	45
Fig. 7.6 –Atuadores após a colagem das cerâmicas.....	46
Fig. 7.7 – Atuadores após aplicação do verniz isolante.....	46
Fig. 7.8 – Preparação da cerâmica para o corte.....	47
Fig. 7.9 – Corte da cerâmica. ....	47
Fig. 7.10 – Fixação da cerâmica para corte.....	48
Fig. 7.11 – Fixação das cerâmicas para o lixamento.....	48
Fig. 7.12 – Componentes fabricados do primeiro protótipo. ....	49
Fig. 7.13 – Primeiro protótipo (vista superior). ....	50
Fig. 7.14 – Primeiro protótipo (vista isométrica).....	50
Fig. 7.15 – Esquema elétrico do circuito de acionamento. ....	50
Fig. 7.16 – Circuito de acionamento construído e cabo de ligação.....	51
Fig. 7.17 – Gráfico Impedância x Frequência para o meio ar.....	52
Fig. 7.18 – Detalhe do Gráfico Impedância x Frequência próximo ao 1º modo, no ar. ..	52
Fig. 7.19 – Detalhe do Gráfico Impedância x Frequência próximo ao 2º modo, no ar. .	53

Fig. 7.20 – Gráfico Impedância x Freqüência para o meio água. ....	53
Fig. 7.21 – Detalhe do Gráfico Impedância x Freqüência próximo ao 2o modo, na água. ....	54
Fig. 7.22 – Atuadores comerciais utilizados. ....	55
Fig. 7.23 – Primeiro protótipo com os atuadores comerciais.....	55
Fig. 7.24 – Gráfico Impedância x Freqüência para o meio ar.....	56
Fig. 7.25 – Detalhe do Gráfico Impedância x Freqüência próximo ao 1o modo, no ar. ....	57
Fig. 7.26 – Detalhe do Gráfico Impedância x Freqüência em torno do 2º modo para o meio ar.....	57
Fig. 7.27 – Gráfico Impedância x Freqüência para o meio água .....	58
Fig. 7.28 – Detalhe do Gráfico Impedância x Freqüência em torno do 2º modo para o meio água .....	58
Fig. 7.29 – Ensaio do primeiro protótipo no primeiro modo de vibrar (13 Hz).....	59
Fig. 7.30 – Ensaio do primeiro protótipo no segundo modo de vibrar (280 Hz).....	59
Fig. 7.31 – Ensaio para a freqüência de 303 Hz.....	60
Fig. 7.32 – Esboço da disposição dos dois atuadores em paralelo.....	61
Fig. 7.33 – Projeto do protótipo de dois atuadores em paralelo.....	62
Fig. 7.34 – Vista explodida do projeto do protótipo de dois atuadores em paralelo..	62
Fig. 7.35 – Componentes fabricados do segundo protótipo.....	63
Fig. 7.36 – Atuadores utilizados no segundo protótipo. ....	63
Fig. 7.37 – Segundo protótipo (vista superior). ....	64
Fig. 7.38 – Segundo protótipo (vista lateral). ....	64
Fig. 7.39 – Segundo protótipo (vista isométrica).....	64
Fig. 7.40 – Gráfico Impedância x Freqüência para o meio ar.....	65
Fig. 7.41 – Detalhe do Gráfico Impedância x Freqüência em torno do 1º modo para o meio ar.....	66
Fig. 7.42 – Detalhe do Gráfico Impedância x Freqüência em torno do 2º modo para o meio ar.....	66
Fig. 7.43 – Gráfico Impedância X Freqüência para o meio água .....	67
Fig. 7.44 – Detalhe do Gráfico Impedância X Freqüência em torno do 2º modo para o meio água .....	67
Fig. 7.45 – Ensaio do segundo protótipo no segundo modo de vibrar (416 Hz). ....	68

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

<b>PZT</b>	- Piezelétrico
<b>MEF</b>	- Método de Elementos Finitos
<b>ALE</b>	- “Arbitrary Lagrangian-Eulerian”
<b>APDL</b>	- “ANSYS Parametric Design Language”

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>T</b>	tensor de tensões
<b>e<sup>t</sup></b>	tensor de coeficientes piezelétricos
<b>S</b>	tensor de deformações
<b>ε<sup>S</sup></b>	tensor de permissividades elétricas medido com deformação constante
<b>D</b>	vetor deslocamento elétrico
<b>c<sup>E</sup></b>	tensor de rigidez medido com campo elétrico constante
<b>E</b>	vetor campo elétrico
<b>{U}</b>	vetor deslocamento
<b>{Φ}</b>	vetor potencial elétrico
<b>{F}</b>	vetor de esforços mecânicos
<b>{Q}</b>	vetor de cargas elétricas
<b>[M]</b>	matriz de massa
<b>[K]</b>	matriz de rigidez
<b>β</b>	constante de amortecimento multiplicadora da matriz de rigidez
<b>t</b>	tempo (s)
<b>x</b>	coordenada x
<b>y</b>	coordenada y
<b>R</b>	variável auxiliar
<b>U<sub>n</sub></b>	deslocamento na direção normal
<b>u</b>	vetor deslocamento
<b>n</b>	versor na direção normal
<b>U<sub>τ</sub></b>	deslocamento na direção tangente
<b>τ</b>	versor na direção tangente
<b>V<sub>n</sub></b>	velocidade na direção normal
<b>V<sub>τ</sub></b>	velocidade na direção tangente
<b>v</b>	vetor de velocidade
<b>h</b>	altura do duto da bomba piezelétrica
<b>f</b>	frequência de oscilação (Hz)
<b>A<sub>max</sub></b>	amplitude máxima de oscilação

$H, H_1, H_2$	Altura do canal
$L$	comprimento entre os atuadores
$L_{\text{atuador}}$	comprimento do atuador
$L_{\text{saída}}$	comprimento da região de saída
$h_{\text{entrada}}$	altura da entrada da bomba
$\rho_{\text{água}}$	densidade da água
$\mu_{\text{água}}$	viscosidade absoluta da água
$A$	área da seção de saída da bomba
$P_{\text{in}}$	pressão de entrada na seção de entrada
$P_{\text{out}}$	pressão de saída na seção de entrada

## 1 INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO

Dentre as aplicações de atuadores piezelétricos, uma que tem sido pesquisada recentemente é a construção de bombas de fluxo de pequena escala, ou seja, bombas de pequena potência para deslocamento de pequenos volumes de fluido e que sejam de baixo consumo de energia e de baixa emissão sonora. A Bioengenharia é a área que tem demonstrado grande interesse por este tipo de equipamento, seja para uma possível aplicação para bombeamento de sangue ou para dosagem de reagentes e medicamentos (Teymoori; Abbaspour-Sani, 2005), como por exemplo, injeção contínua de insulina em pacientes diabéticos durante o dia, eliminando surtos e déficits desta substância.

Novos princípios para bombeamento de fluidos visando aplicações na área biomédica vêm sendo pesquisados no Brasil e em todo o mundo. No Brasil, por exemplo, existe a proposta da Bomba Espiral (Andrade, et al., 1996), pesquisada e desenvolvida pelo Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia em conjunto com o Baylor College of Medicine (Houston, Texas) e que combina o princípio de duas bombas já conhecidas: a axial e a radial.

Estes novos princípios têm sido pesquisados como forma de se contornar os problemas presentes nas atuais técnicas de bombeamento de fluidos biológicos, sendo uma das mais relevantes, a morte de microorganismos e células durante este processo, seja pela pressão a que o fluido é submetido ou mesmo a turbulência no escoamento. Por exemplo, nas atuais técnicas de bombeamento sangüíneo as taxas de hemólise (morte das hemáceas) são relativamente elevadas, o que, sem dúvida é prejudicial à área médica. Acredita-se que com essas novas técnicas, este problema possa ser minimizado (Andrade, et al., 1996).

Maiores detalhes sobre as diferentes técnicas e princípios utilizados no desenvolvimento de novas bombas de fluxo pode ser encontrado em Laser; Santiago (2004), onde foi realizado um amplo estudo sobre os princípios utilizados em microbombas de fluxo. Também foram feitas comparações qualitativas e quantitativas, através da análise de valores máximos de vazão e pressão geradas pelas diferentes bombas analisadas e também de parâmetros como fatores de escala, eficiência termodinâmica e frequência de bombeamento próprio (um parâmetro que



relaciona a vazão máxima da bomba de fluxo com as suas dimensões).

Outra potencial aplicação prática para esta categoria de bombas de fluxo reside na indústria eletrônica, como componentes essenciais em sistemas de resfriamento de equipamentos eletrônicos (Singhal; Garimella; Raman, 2004). Estes constituem métodos de resfriamento que vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos como alternativa ao método convencionalmente utilizado que consiste no uso de ventilação a ar. Muitas vezes estes sistemas tradicionais não são dimensionados adequadamente, o que torna o equipamento eletrônico instável, podendo, conseqüentemente, ocasionar a sua falha. Frente a esses e outros problemas da atual técnica de resfriamento por meio de ventilação, os sistemas de resfriamento a água oferecem como diferenciais, maior capacidade de dissipação térmica, redução na emissão de ruídos, potencial de miniaturização, menor vibração mecânica, além de um número reduzido de peças e partes móveis.

Um exemplo de bomba piezelétrica é a bomba com diafragma, que utiliza o material piezelétrico como o atuador que move o diafragma, sendo a direção do fluxo garantida por válvulas que permitem o fluxo em um único sentido.

Na fig. 1.1 podemos ver que a cerâmica piezelétrica age como um pistão: movendo o diafragma para cima, a válvula de saída se fecha e a válvula de entrada se abre permitindo a entrada de líquido, na situação contrária, com o diafragma descendo, a válvula de entrada se fecha enquanto a de saída se abre, fazendo com que o fluido interno seja expulso. Assim, consegue-se fluxo num só sentido. Trata-se da bomba de fluxo apresentada por González; Moussa (2002).

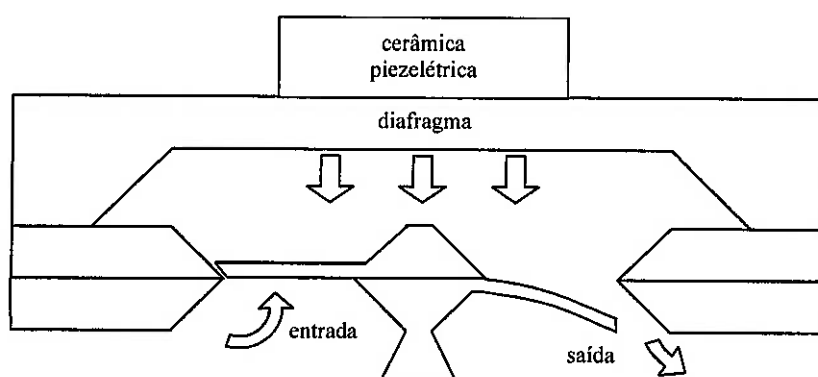


Fig. 1.1 – Bomba piezelétrica com diafragma.

Uma vez que não existem modelos teóricos para um corpo oscilando em meio fluido, faz-se necessário utilizar a simulação computacional. Além disso, é também uma forma de se caracterizar o sistema (como o cálculo de vazão média, por exemplo), reduzindo a necessidade de se construir protótipos, agilizando os ciclos de projetos. Para o estudo de configurações geométricas esta importância fica ainda mais nítida, pois seria inviável construir um número de protótipos que permitisse o levantamento da sensibilidade de parâmetros geométricos para a bomba.

## **2 OBJETIVOS**

O presente trabalho de formatura tem como objetivo aplicar a modelagem através do método de elementos finitos para análise de novas configurações de bombas de fluxo piezelétricas baseadas no princípio oscilatório descritas a seguir, realizar suas otimizações, bem como construir modelos e protótipos para verificação de seu funcionamento.

## **3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO**

Os princípios de funcionamento de bombas de fluxo estudados neste trabalho buscam representar um fenômeno observado na natureza: o nadar de um peixe. Este fenômeno é estudado por autores como Videler et al. 1999; Pedley et al. 1999; Drucker et al. 2001; Trintafyllou et al. 1992; e Sfakiotakis et al. 1999.

Em seu trabalho, Sfakiotakis et al (1999) sugere uma classificação para as diversas espécies de peixes surgidas durante a evolução em dois grandes grupos, considerando o mecanismo de propulsão que utilizam: aqueles no qual sua propulsão é originada por meio de movimentos de seu corpo ou cauda (fig. 3.1(a)), e outros, cuja propulsão ocorre devido às suas nadadeiras medianas e/ou em pares (dorsal, anal, peitorais ou pélvicas), conforme é mostrado na fig. 3.1(b).

Dentro do grupo dos peixes cujo mecanismo de propulsão ocorre devido aos movimentos de seu corpo ou cauda (fig. 3.1(a)), encontram-se animais que executam movimentos desde “ondulatórios” (exemplo: enguia, lampréia, arraia) nos quais se observa uma onda propagante ao longo de seus corpos e outros que executam movimentos “oscilatórios” (exemplo: ostraciídeos), balançando simplesmente seu

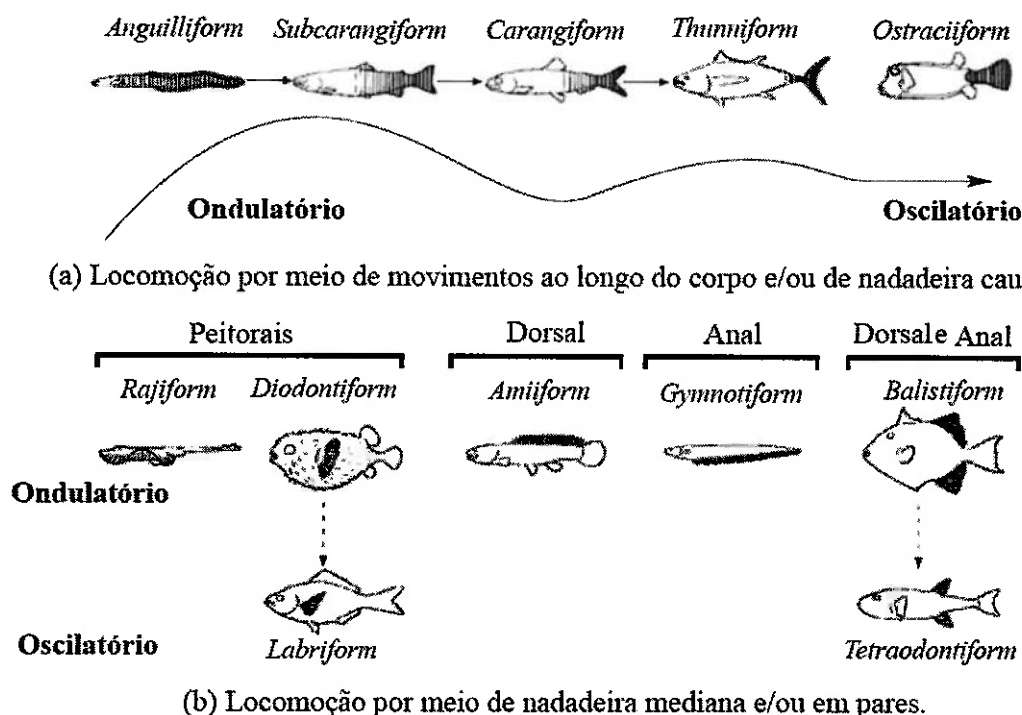


Fig. 3.1 – Modos de nadar dos peixes. As áreas hachuradas contribuem para a locomoção.

corpo e cauda, deslocando-se para frente, sem que seja observada a formação de onda. Existem, ainda, aqueles que apresentam uma combinação de ambos os tipos de movimentos, conforme nota-se na fig. 3.1 (a).

O rastro deixado pelos peixes que nadam devido a movimentos ondulatórios e/ou oscilatórios de seu corpo e cauda consiste numa esteira de vórtices discretos de sinal alternado, gerados devido ao movimento da cauda (Sfakiotakis; Lane; Davies, 1999). Esta esteira de vórtices possui orientação contrária à esteira de vórtices de Karman, a qual produz arrasto (Sfakiotakis; Lane; Davies, 1999), (Triantafyllou; Triantafyllou; Grosenbaugh, 1993) em torno de corpos colocados numa corrente livre. Pode-se observar o fluxo gerado na direção contrária, entre os vórtices, na fig. 3.2.

Assim, o que ocorre é a formação cíclica de vórtices com sentidos alternados, semelhante ao que acontece quando se vibra uma lâmina de cobre, conforme fig. 3.3. A importância deste fato é que cada vórtice gerado impulsiona o que foi gerado anteriormente, na direção contrária ao atuador. Como resultado o fluido é empurrado para a direita, segundo o princípio da ação e reação.

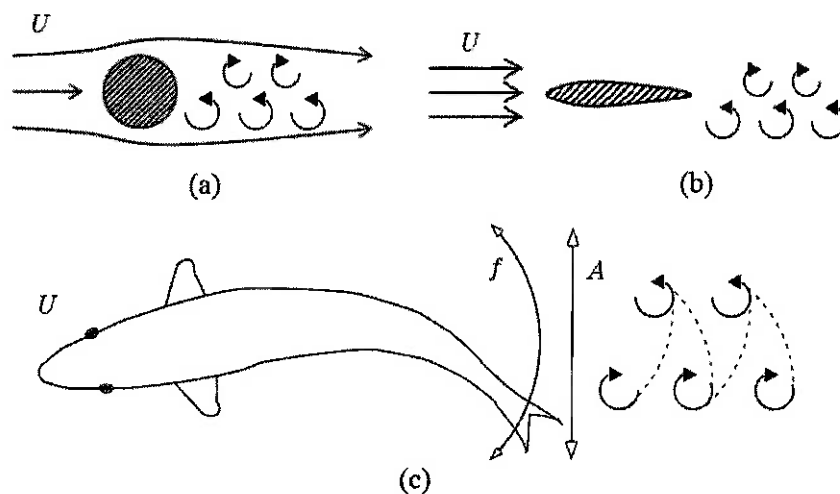


Fig. 3.2 – Esteira de Karman para um cilindro (a) e para um perfil de asa (b). Rastro deixado pelo nadar de um peixe (c). Observa-se a formação de uma esteira de vórtices com direções de recirculação alternadas.

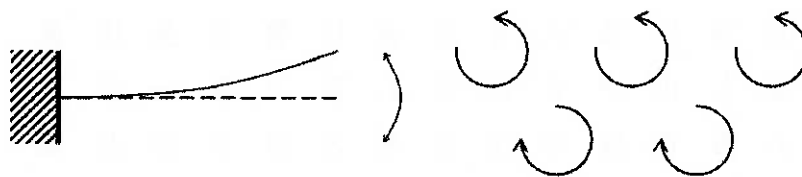


Fig. 3.3 – Reação em cadeia dos vórtices gerados.

Segundo Sfakiotakis et al. (1999), é bastante comum em um cardume a formação dos peixes em forma de diamante (fig. 3.4). Essa formação é eficiente devido ao impulso gerado pelos vórtices dos peixes frontais aos peixes traseiros.

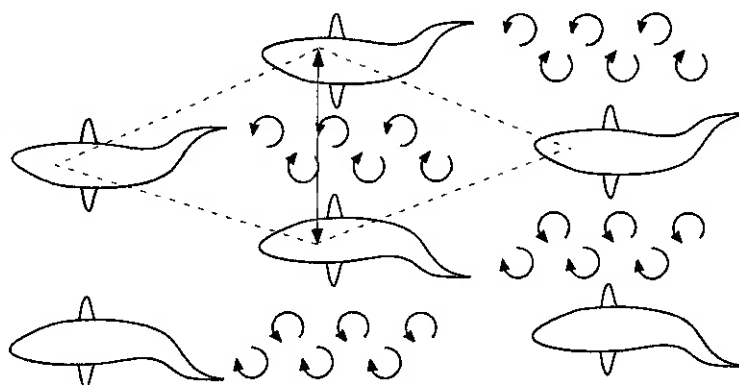


Fig. 3.4 – Vista superior da formação em um cardume.

Um princípio pouco estudado e que contribui para minimizar a morte de microorganismos é o princípio de bombeamento baseado em movimentos oscilatórios, como o nadar de peixes. Para nadar, os peixes realizam movimentos oscilatórios ou ondulatórios, balançando seu corpo ou cauda de forma a se deslocar para frente (fig. 3.5). Mas o que aconteceria ao mantermos o peixe fixo enquanto ele tenta nadar? Provavelmente teríamos o fluido se movimentando em sentido contrário, ou seja, ele estaria desempenhando o papel de uma bomba de fluxo como descrito na fig. 3.5.

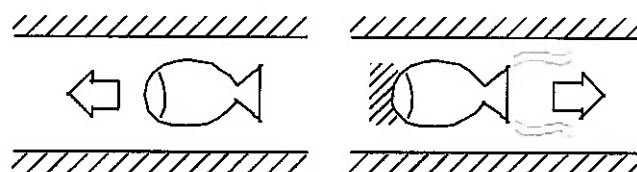


Fig. 3.5 – Princípio de funcionamento da bomba de fluxo proposta

Uma forma de emular essa ação dos peixes é a utilização de um atuador piezelétrico bilaminar para reproduzir este movimento oscilatório para geração de vazão em um meio fluido. Este tipo de atuador possui o formato de uma lâmina e, quando acionado com uma tensão elétrica alternada, produz o movimento desejado, conforme ilustra a fig. 3.6.

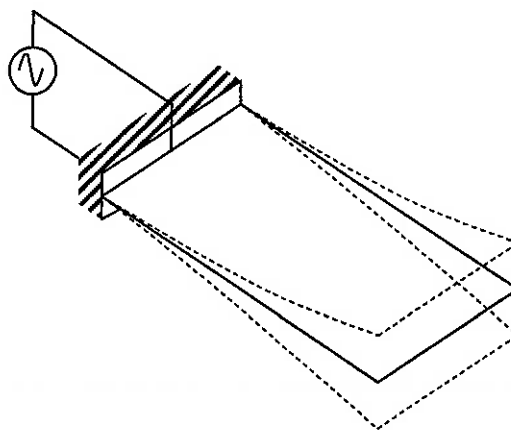


Fig. 3.6 – Atuador Piezelétrico Bilaminar.

Esse fenômeno já vem sendo estudado por outros pesquisadores como é o caso de Bürmann et al. (2003); Açikalin et al. (2003); e Basak et al. (2005), sendo que a aplicação desenvolvida por esses pesquisadores tem o foco voltado à utilização de um atuador piezelétrico bilaminar para o resfriamento de componentes eletrônicos

apresentando um estudo da resposta dinâmica do atuador. Kim et al. (2004), apresentam alguns resultados analíticos e computacionais sobre o fluxo gerado através de um atuador bilaminar piezelétrico. Loh et al (2002) utiliza um atuador piezelétrico para movimentar uma barra produzindo um movimento oscilatório e estuda os efeitos do fluxo gerado no aumento da transferência de calor por convecção. Os autores citados utilizam, no entanto, ar como fluido de trabalho, visando aplicações em refrigeração.

Nakasone (2006), em seu trabalho de Mestrado, estudou a viabilidade de uma bomba com um atuador piezelétrico bilaminar em um meio aquático, concluindo que é viável utilizar uma bomba de fluxo baseada neste princípio de funcionamento.

Pires et al (2006) demonstraram a obtenção de maiores vazões com um atuador bilaminar piezelétrico engastado em um canal de acrílico, através da excitação do bilaminar em seu segundo modo de vibrar.

### 3.1 Novas Configurações Propostas

Em vista disto, a proposta deste Trabalho de Formatura tem como objetivo o estudo de viabilidade de novas configurações de bombas piezelétricas, as quais são descritas a seguir.

#### 3.1.1 Configuração 1: Atuadores nas paredes em paralelo

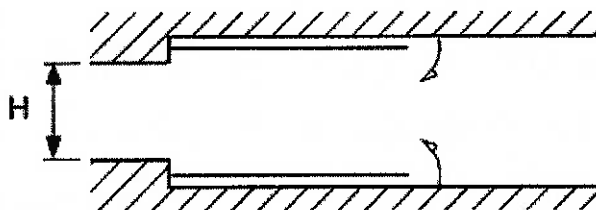


Fig. 3.7 – Atuadores nas paredes.

A idéia principal desta configuração é a miniaturização da bomba piezelétrica, a qual explora a formação das duas camadas horizontais de vórtices individualmente, possibilitando o distanciamento entre elas e também a influência das paredes em relação ao impulso gerado pelos próprios vórtices. O parâmetro analisado será a altura do canal de entrada ( $H$ ).

### 3.1.2 Configuração 2: Atuadores em paralelo

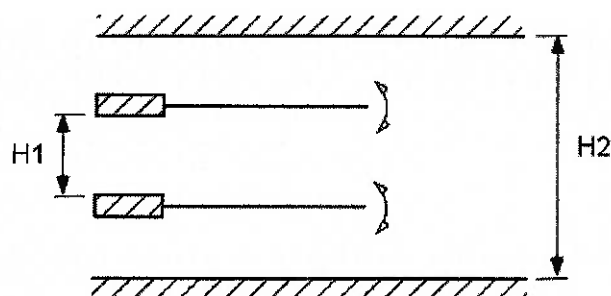


Fig. 3.8 – Atuadores em paralelo.

A idéia desta configuração é obter uma maior vazão em relação à bomba piezelétrica de um único atuador. Esta configuração explora o escoamento gerado por dois atuadores em paralelo, visando à maximização da vazão. Os parâmetros que serão analisados são a distância entre os atuadores ( $H1$ ), altura do canal ( $H2$ ) e a frequência de oscilação dos atuadores, em fase ou defasados de  $180^\circ$ .

### 3.1.3 Configuração 3: Atuadores em série

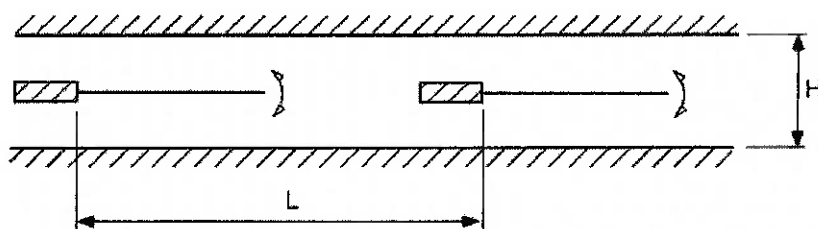


Fig. 3.9 – Atuadores em série.

Esta configuração explora o escoamento gerado por atuadores em série, visando à maximização da diferenças de pressão da seção de entrada e saída, ou seja, o aumento da potência da bomba piezelétrica. Os parâmetros que serão analisados são a distância entre os atuadores ( $L$ ), a altura do canal ( $H$ ) e a frequência de oscilação dos atuadores, em fase e defasados de  $180^\circ$ .

### 3.1.4 Configuração 4: Atuadores em forma de cardume

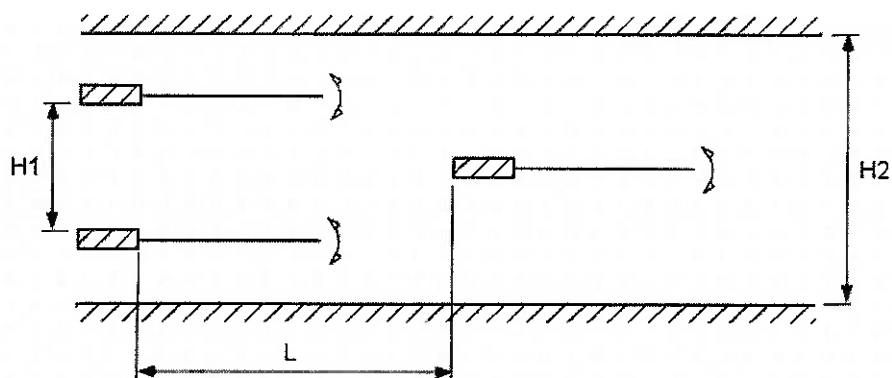


Fig. 3.10 – Atuadores em forma de cardume.

A idéia desta configuração é baseada na formação do cardume e explora o escoamento gerado por atuadores em forma triangular, visando à maximização da vazão e diferenças de pressão da seção de entrada e saída. Os parâmetros que serão analisados são as distâncias entre os atuadores ( $L$  e  $H1$ ), a altura do canal ( $H2$ ).

## 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Abaixo estão descritos os principais conceitos abordados neste trabalho de forma resumida para uma melhor compreensão do trabalho realizado.

### 4.1 Cerâmicas Piezelétricas

Os materiais piezelétricos são materiais específicos que se contraem e se expandem de acordo com a tensão elétrica aplicada em seus terminais e vice-versa, gerando deformação no sentido longitudinal e transversal de acordo com a excitação aplicada, como mostra a fig. 4.1. Devido a essa característica, os materiais piezelétricos são geralmente usados em acelerômetros, sensores de pressão e força, transdutores de ultra-som, atuadores, nanoposicionadores, giroscópios, entre outros dispositivos de mecânica de precisão.



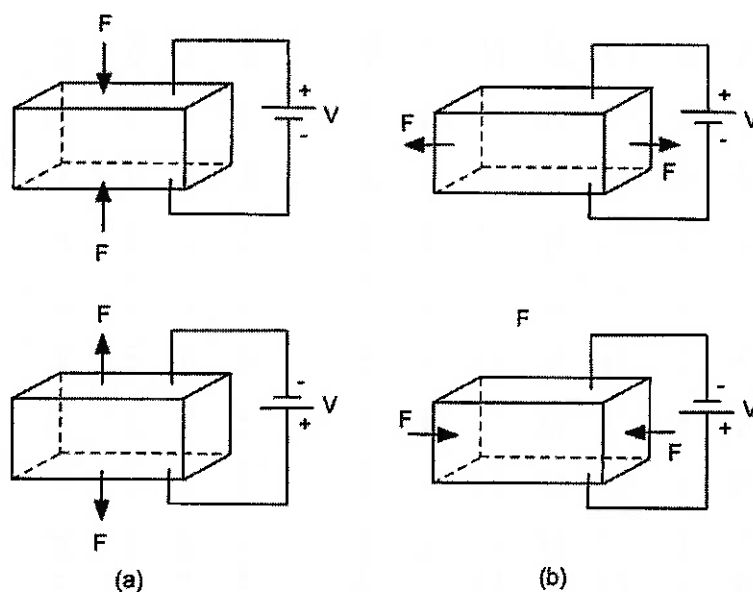


Fig. 4.1 – Efeitos longitudinais (a) e transversais (b) das cerâmicas piezelétricas.

As equações constitutivas do efeito piezelétrico são:

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

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

onde:

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

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

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

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

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

$\epsilon^S$  = tensor dielétrico medido com deformação constante;

$\mathbf{E}$  = vetor campo elétrico.

## 4.2 Atuadores Piezelétricos Bilaminares

Um piezoatuador bilaminar é um dispositivo eletromecânico com alto grau de flexão, também conhecido por *cantiléver* bilaminar, porque normalmente são montados como uma viga em balanço. O seu funcionamento é similar ao de um termostato bimetalico, no qual uma tira metálica é alocada entre duas tiras piezocerâmicas, normalmente um tipo de PZT. Quando é aplicada uma tensão elétrica nas piezocerâmicas, o substrato metálico inclina-se com um movimento

proporcional a tensão elétrica aplicada. Um piezoatuador bilaminar pode apresentar deslocamentos em torno de 1 mm, no entanto produz forças muito pequenas. Um bilaminar possui uma resposta típica de deslocamento na ordem de 10  $\mu\text{m}/\text{V}$  em regime de excitação estático. Na frequência de ressonância, que é da ordem de 80Hz, o deslocamento pode atingir até 50  $\mu\text{m}/\text{V}$ .

A fig. 4.2 mostra a combinação de um bilaminar (PZT/metalo/PZT) que possibilita esses deslocamentos devido ao fato das cerâmicas piezelétricas operarem em modos opostos (podendo ser ligadas em série ou em paralelo), ou seja, enquanto uma das cerâmicas é expandida a outra é contraída, produzindo uma inclinação do cantiléver bilaminar.

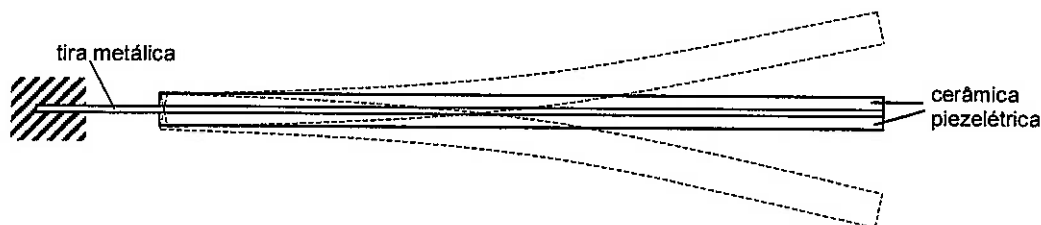


Fig. 4.2 – Atuador piezelétrico bilaminar.

### 4.3 MEF Piezelétrico

Para modelagem de atuadores piezelétricos no ANSYS é usado o Método de Elementos Finitos (MEF). A seguir, é discutida sua aplicação para elementos piezelétricos e o desenvolvimento de suas equações.

A formulação do MEF piezelétrico pode ser escrito em termos do deslocamento  $\{U\}$  e do potencial elétrico  $\{\Phi\}$  para cada nó, sendo que os esforços mecânicos são expressos em termos de  $\{F\}$  e as cargas elétricas em termos de  $\{Q\}$ , resultando nas equações abaixo:

$$[M_{uu}]\{\ddot{U}\} + [C_{uu}]\{\dot{U}\} + [K_{uu}]\{U\} + [K_{u\phi}]\{\phi\} = \{F\} \quad (4.3)$$

$$[K_{u\phi}]^T \{U\} + [K_{\phi\phi}]\{\phi\} = \{Q\} \quad (4.4)$$

Essa mesma expressão pode também ser expressa na seguinte forma matricial:

$$\begin{bmatrix} [M_{uu}] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U} \\ \ddot{\phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{uu}] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U} \\ \dot{\phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{uu}] & [K_{u\phi}] \\ [K_{u\phi}]^T & [K_{\phi\phi}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ \phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ Q \end{Bmatrix} \quad (4.5)$$

onde:

$$\text{Matriz de rigidez mecânica: } [\mathbf{K}_{uu}] = \iiint_{\Omega_e} [\mathbf{B}_u]^T [\mathbf{c}] [\mathbf{B}_u] dV \quad (4.6)$$

$$\text{Matriz de acoplamento piezelétrico: } [\mathbf{K}_{u\phi}] = \iiint_{\Omega_e} [\mathbf{B}_u]^T [\mathbf{e}] [\mathbf{B}_\phi] dV \quad (4.7)$$

$$\text{Matriz de rigidez elétrica: } [\mathbf{K}_{\phi\phi}] = \iiint_{\Omega_e} [\mathbf{B}_\phi]^T [\boldsymbol{\varepsilon}] [\mathbf{B}_\phi] dV \quad (4.8)$$

$$\text{Matriz de massa: } [\mathbf{M}_{uu}] = \rho \iiint_{\Omega_e} [\mathbf{N}_u]^T [\mathbf{N}_u] dV \quad (4.9)$$

$$\text{Matriz de amortecimento: } [\mathbf{C}_{uu}] = \alpha [\mathbf{M}_{uu}] + \beta [\mathbf{K}_{uu}] \quad (4.10)$$

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

#### 4.3.1 Análise Estática

Para a análise estática, efeitos inerciais e de amortecimento são ignorados com exceção de efeitos como a gravidade. Nesse caso, as eq. 4.3 e 4.4 se reduzem à:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{uu} & \mathbf{K}_{u\phi} \\ \mathbf{K}_{u\phi}^T & \mathbf{K}_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U} \\ \boldsymbol{\Phi} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{Q} \end{Bmatrix} \quad (4.11)$$

A solução da eq. 4.11 fornece os deslocamentos e os potenciais em todos os nós (Lerch, 1990).

#### 4.3.2 Análise Modal

Para análise de atuadores piezelétricos é necessário, primeiramente, descobrir algumas de suas frequências naturais. Para isso utiliza-se a análise modal. Essa análise consiste na solução das eq. 4.3 e 4.4 na forma de um problema de autovalores e auto-vetores.

Assim, reduzindo as eq. 4.3 e 4.4, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{uu} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{U}} \\ \ddot{\boldsymbol{\Phi}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{uu} & \mathbf{K}_{u\phi} \\ \mathbf{K}_{u\phi}^T & \mathbf{K}_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U} \\ \boldsymbol{\Phi} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{Q} \end{Bmatrix} \quad (4.12)$$

Para  $\{\mathbf{Q}\} = \mathbf{0}$  na equação acima, obtém-se um problema de autovalor e auto-vetor que permite calcular a frequência de anti-ressonância. Para a obtenção da frequência de ressonância, basta curto-circuitar os eletrodos ( $\Phi_{\text{eletrodo}} = 0$ ) e após

considerar o sistema da eq. 4.12, eliminando-se as equações que envolvem os nós dos eletrodos, obtém-se o problema de autovalor e autovetor correspondente.

### 4.3.3 Análise Harmônica

As cerâmicas piezelétricas dos atuadores são excitadas com ondas de tensão elétricas senoidais (harmônicas), o que faz necessário o uso da análise harmônica para obtenção dos resultados. A análise harmônica permite a investigação da estrutura piezelétrica sob a influência de força, cargas elétricas, deslocamentos e/ou voltagens harmônicas.

Forças e cargas elétricas podem ser expressas da seguinte forma:

$$\{\mathbf{F}(t)\} = \{\mathbf{F}\} e^{j\omega t}; \quad \{\mathbf{Q}(t)\} = \{\mathbf{Q}\} e^{j\omega t} \quad (4.13)$$

Dessa forma, os deslocamentos e o potencial elétrico são dados por:

$$\{\mathbf{U}(t)\} = \{\mathbf{U}\} e^{j\omega t}; \quad \{\Phi(t)\} = \{\Phi\} e^{j\omega t} \quad (4.14)$$

onde  $\omega$  é a frequência de excitação.

Vale lembrar que esses valores de  $\{\mathbf{U}\}, \{\Phi\}, \{\mathbf{F}\}, \{\mathbf{Q}\}$  apresentam números reais quando não há amortecimento e, números complexos quando há amortecimento no sistema, o que significa a adição de um deslocamento de fase.

Substituindo as eq. 4.13 e 4.14 nas equações de equilíbrio piezelétricas 4.3 e 4.4, obtêm-se:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{uu} + j\omega\mathbf{C}_{uu} - \omega^2\mathbf{M}_{uu} & \mathbf{K}_{u\phi} \\ \mathbf{K}_{u\phi}^T & \mathbf{K}_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{\mathbf{U}} \\ \hat{\Phi} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \hat{\mathbf{F}} \\ \frac{1}{j\omega}\hat{\mathbf{I}} \end{Bmatrix} \quad (4.15)$$

Sendo que  $\hat{\phantom{x}}$  representa matrizes complexas.

A análise harmônica permite determinar a resposta em frequência das características da estrutura piezelétrica (Ostergaard et al, 1986; Lerch, 1990).

### 4.3.4 Análise Transiente

Essa análise consiste em se resolver as eq. 4.3 e 4.4 em que  $\mathbf{F}(t)$  e  $\mathbf{Q}(t)$  são funções quaisquer no tempo. Deve-se, então, definir a função de excitação, especificando-se o valor da função para diferentes incrementos de tempo. A função é dividida nos chamados passos de carga, cada um contendo um ou mais incrementos de tempo.

Para a solução do problema transiente o ANSYS utiliza o método numérico de Newmark (Ostergaard et al, 1986). Trata-se de um método de integração direta implícito, em que as eq. 4.3 e 4.4 são resolvidas entre um instante de tempo e o próximo. O que o método faz é interpretar  $[M_{uu}]\{\dot{U}\}$  e  $[C_{uu}]\{\dot{U}\}$ , como forças de inércia e viscosa respectivamente, e impor o equilíbrio estático em cada instante de tempo seguinte.

## 5 MODELAGEM COMPUTACIONAL

### 5.1 Modelagem Computacional

A utilização do método de elementos finitos é justificada em situações nas quais a solução analítica de um dado problema é demasiadamente complexa ou mesmo quando não há uma formulação analítica disponível.

Uma formulação analítica do problema da bomba seria demasiadamente complexa, inviabilizando a sua solução e exigindo a adoção de restrições e hipóteses que acabariam por comprometer os resultados. Além disso, um item importante refere-se à caracterização do equipamento, feita de maneira bem mais simples através de simulação computacional, havendo assim, uma diminuição do número de protótipos a serem construídos e ensaiados, além da possibilidade de determinação de parâmetros ótimos de funcionamento e curvas de resposta.

Um exemplo bastante prático da utilização de simulações é a análise de sensibilidade. Para mapear o comportamento do sistema para um determinado parâmetro (geométrico, por exemplo) em 10 ou 20 pontos dentro de um domínio, basta alterar a variável desejada e rodar novamente a simulação. A situação análoga quando se pensa na construção de protótipos seria a construção de 10 ou 20 protótipos, o que de imediato é inviável.

Neste projeto o MEF é utilizado como ferramenta para a simulação e análise do problema da bomba e posteriormente para a sua otimização pelo fato de ser um método genérico e poderoso, muito usado na Engenharia atualmente.

As etapas de uma simulação utilizando MEF consistem em:

- **pré-processamento:** consiste na definição das geometrias e das propriedades dos materiais, bem como a criação da malha de elementos finitos que será utilizada no processo de cálculo;
- **solução:** consiste na aplicação de condições de contorno e carregamentos, envolvendo também toda a parte de cálculo numérico para obtenção dos resultados;
- **pós-processamento:** é feita a visualização dos resultados obtidos, através das mais variadas formas de representação gráfica ou tabelas.

## 5.2 Condições de Contorno Móveis

Problemas de simulação de fluidos frequentemente envolvem fronteiras móveis. No caso estudado, o atuador dentro do duto tem um movimento oscilatório (outros exemplos poderiam ser superfícies externas ou superfícies livres). Em casos como este, o domínio em estudo se altera com o decorrer do tempo e a malha de elementos finitos deve ser alterada de forma a satisfazer esta condição. Para tanto é feito o uso da formulação ALE (“Arbitrary Lagrangian-Eulerian”), implementada no software ANSYS. A formulação ALE é responsável por realocar a malha de elementos finitos de forma a satisfazer às condições de contorno impostas a cada instante.

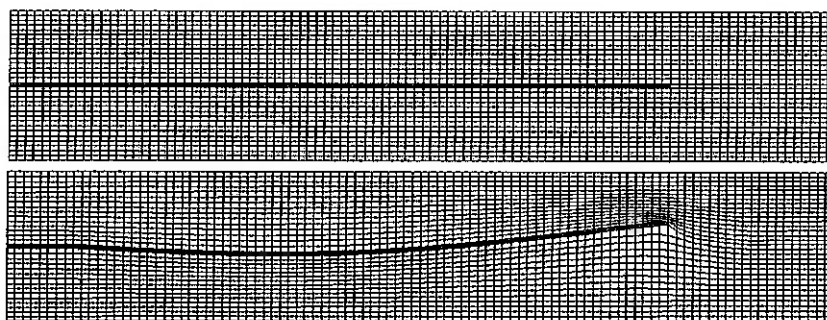


Fig. 5.1 – Malha de Elementos em tempos diferentes.

A figura 5.3 é um exemplo da aplicação dessa formulação, mostrando como a malha é realocada durante a simulação. Através de uma simulação como esta podemos levantar vários tipos de informações, tais como pressão e velocidade, as principais grandezas a serem avaliadas no caso da bomba de fluxo piezelétrica.

### 5.3 ANSYS (Software de Elementos Finitos)

Para a simulação da bomba piezelétrica é utilizado o software ANSYS de Elementos Finitos. O software conta com uma vasta biblioteca de elementos para a simulação dos mais diversos tipos de sistemas, incluindo sistemas multidisciplinares, através do pacote “Multiphysics”. Os modelos que serão construídos, descritos no item 3.1, podem ser divididos em duas etapas, que são: simulações do atuador piezelétrico e simulações fluídicas (fig. 5.2). A primeira etapa consiste na simulação do atuador piezelétrico propriamente dito, onde serão obtidos os modos e as frequências de ressonância, assim como as dimensões ótimas que maximizam a amplitude de oscilação. A segunda etapa consiste na simulação do comportamento do líquido a ser bombeado no interior do canal da bomba de fluxo, onde será possível visualizar a formação dos vórtices gerados pelos atuadores, obter curvas de vazão e realizar estudos de sensibilidade dos parâmetros geométricos da bomba de fluxo.

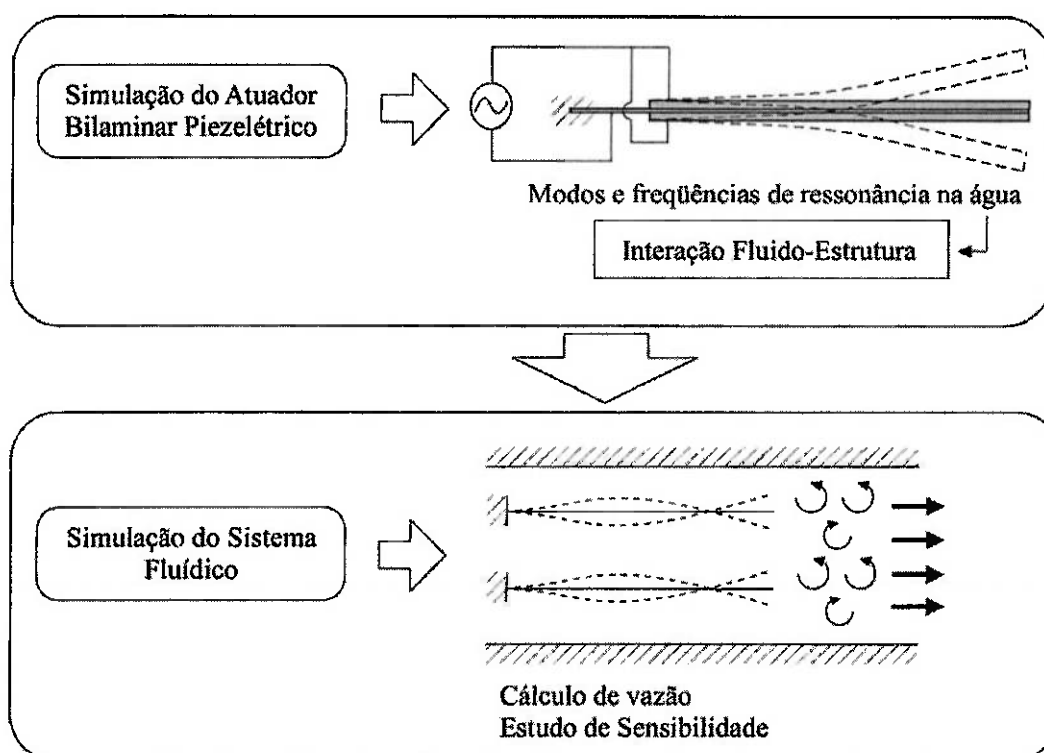


Fig. 5.2 – Abordagem utilizada nas simulações.

Para simular o comportamento do atuador bilaminar é necessário criar um modelo acústico do canal interno da bomba de fluxo (ANSYS, 2005), utilizando-se o elemento

“FLUID42” com as propriedades da água (densidade específica e velocidade de propagação do som) e em seu interior modela-se o atuador piezelétrico bilaminar, utilizando-se o elemento “PLANE13”, que é capaz de simular no plano bi-dimensional materiais estruturais, como o cobre, e também materiais piezelétricos. Os graus de liberdade do “FLUID42” são os deslocamentos em ‘x’ e ‘y’; do “PLANE13” são: deslocamentos em ‘x’ e ‘y’, temperatura e voltagem aplicada. Para as simulações fluidicas, será utilizado o elemento “FLUID141”, que é capaz de simular regimes permanentes ou transientes e escoamentos laminares ou turbulentos. Os graus de liberdade deste elemento são: velocidades em ‘x’ e ‘y’, pressão, temperatura e energia cinética.

As simulações no ANSYS são realizadas com o software operando em modo ‘batch’, ou seja, utilizando um arquivo de texto em linguagem APDL (“ANSYS Parametric Design Language”) contendo os comandos necessários para definição de geometrias, malha, condições de contorno e solução do sistema. Desta forma economiza-se tempo na análise de sensibilidade e no estudo de parâmetros, pois, estando o modelo pronto, basta alterar os valores e executar o software novamente para obter novos resultados.

Na simulação, essencialmente o software resolve as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, eqs. (5.1), (5.2) e (5.3), respectivamente:

$$\left. \frac{dM}{dt} \right)_{sistema} = 0 \quad (5.1)$$

$$\vec{F} = \left. \frac{d\vec{P}}{dt} \right)_{sistema} = 0 \quad (5.2)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \left. \frac{dE}{dt} \right)_{sistema} \quad (5.3)$$

onde:

$$M_{sistema} = \int_{massa(sistema)} dm = \int_V \rho dV \quad (5.4)$$

$$\vec{P}_{sistema} = \int_{massa(sistema)} \vec{V} dm = \int_{V(sistema)} \vec{V} \rho dV \quad (5.5)$$

$$E_{sistema} = \int_{V(sistema)} e \rho dV \quad (5.6)$$



$$e = u + \frac{V^2}{2} + g.z \quad (5.7)$$

As propriedades utilizadas acima são:

$\rho$ : densidade $\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$	$k$ : condutividade térmica $\left[ \frac{W}{m.K} \right]$
$\mu$ : viscosidade $\left[ \frac{N.s}{m^2} \right]$	$c_p$ : calor específico $\left[ \frac{J}{kg.K} \right]$

## 5.4 Linguagem APDL

Para a simulação da bomba piezelétrica foi utilizada a linguagem APDL (ANSYS Parametric Design Language), uma linguagem utilizada para automatizar funções comuns ou mesmo para a construção de um modelo a partir de seus parâmetros ou variáveis. O APDL possibilita ainda a realização de uma série de outras funcionalidades, tais como: repetição de comandos, macros, condições “if-then-else”, loops, além de operações com vetores e matrizes. Esta linguagem foi utilizada para dinamizar a criação de modelos computacionais para a bomba piezelétrica, uma vez que para alterar um determinado parâmetro, basta editar o arquivo do código-fonte e refazer a simulação, ao invés de realizar novamente toda a montagem do modelo utilizando a interface gráfica do programa.

## 5.5 Modelagem e Simulação no ANSYS

### 5.5.1 Pré-Processamento

Primeiramente definimos as posições dos nós e posteriormente, as linhas e áreas correspondentes. O próximo passo é a geração da malha de elementos finitos que será utilizada para a simulação. Deve-se ressaltar a importância da discretização da malha, uma vez que uma malha pouco refinada nos dá um resultado pouco preciso, ao passo que uma malha demasiadamente refinada elevará o custo computacional da simulação.

Após a definição da geometria do modelo e a geração da malha de elementos, devemos definir as condições de contorno para o problema, ou seja, as condições das

quais temos um conhecimento prévio e que servem de ponto de partida para a solução do problema. Para cada modelo a ser analisado é necessário definir as condições de contorno para as fronteiras do duto onde o escoamento ocorre, bem como as condições de contorno móveis representando o comportamento do atuador piezelétrico.

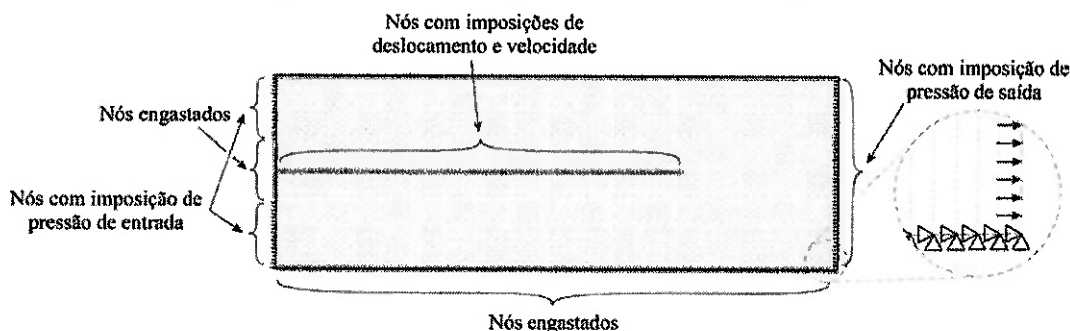


Fig. 5.3 – Exemplo de malha gerada no ANSYS.

Na fig. 5.3 vê-se a representação das condições de contorno na região de entrada impostas pelo problema da bomba de fluxo piezelétrica. Nos nós das fronteiras superior e inferior do duto são impostos deslocamentos e velocidades nulas e nos nós do atuador bilaminar são impostos deslocamentos e velocidades de acordo com o modo de vibrar desejado, obtidos de uma análise computacional acústica do atuador. Na entrada é definida uma pressão relativa nula, ou seja, o fluido entra no duto com a mesma pressão ambiente a que estiver submetido, e na seção de saída pode-se variar a pressão a fim de avaliar a potência gerada pelo atuador bilaminar.

Tendo definido as condições de contorno, um dos passos finais antes de realizar a simulação propriamente dita é a definição das propriedades do elemento utilizado para a simulação, no caso, o FLUID141. Para a simulação da bomba, precisa-se definir a densidade e a viscosidade do fluido. A condutividade térmica e o calor específico não são necessários uma vez que não há interesse no comportamento térmico do sistema neste momento. O fluido utilizado foi a água, cujo peso específico é  $1000 \text{ kg/m}^3$  e viscosidade cinemática  $0,001 \text{ N.s/m}^2$ .

Por fim, deve-se especificar a natureza do escoamento, turbulento e ativar a análise transiente, bem como a formulação ALE, para que a malha seja rearranjada a cada iteração, adequando-se às condições impostas. A idéia é observar o comportamento do sistema, ou seja, a vazão gerada na saída da bomba ao longo do tempo e determinar um valor médio para a vazão no momento em que o fluxo se estabilizar.

### 5.5.2 Solução

Tendo definido toda a geometria, a malha, as condições de contorno, propriedades do elemento e demais configurações necessárias, faz-se a simulação propriamente dita. Esta etapa tem duração média de 25 horas, pois depende da discretização da malha e dos parâmetros de convergência adotados.

É importante lembrar que a oscilação do atuador varia senoidalmente e para realizar a simulação computacional é necessário discretizar esse movimento. Para avaliar a qualidade dessa discretização, pôde-se ver o aspecto de uma senóide gerada a partir de diferentes números de passos na fig. 5.4.

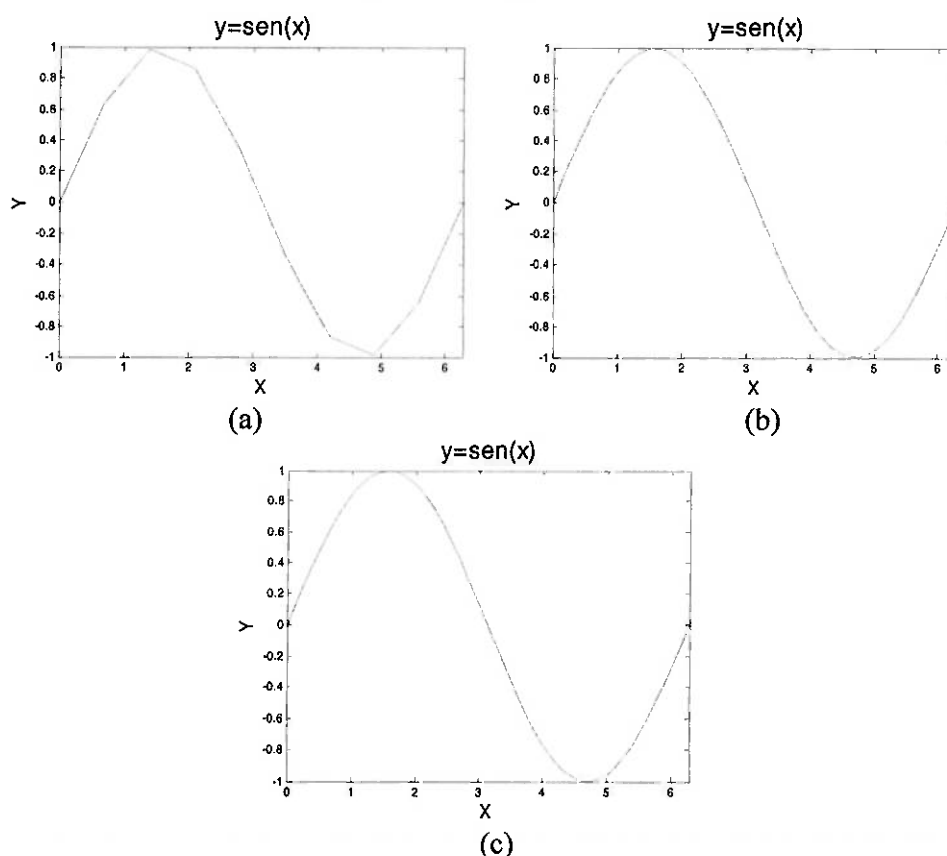


Fig. 5.4 – Função senoidal com diferentes discretizações: (a) 10 passos, (b) 30 passos e (c) 100 passos.

Para 10 passos (fig. 5.4.a) a discretização parece ser bastante precária, sendo possível observar as imperfeições do gráfico; para 30 passos (fig. 5.4.b), o número utilizado, há uma grande melhora, sendo mais difícil observar qualquer tipo de imperfeição, bastando comparar com a curva gerada com 100 passos (fig. 5.4.c) para

perceber que há pouca diferença entre as mesmas, sendo que esta última elevaria demasiadamente o custo computacional para esta simulação.

### **5.5.3 Pós-Processamento**

Após a conclusão da simulação propriamente dita, dá-se início à etapa de pós-processamento. Nesta etapa os resultados obtidos podem ser visualizados através de gráficos, tabelas ou outro meio apropriado. Para o caso da bomba piezelétrica, a grandeza mais importante a ser observada é a vazão de fluido que está sendo gerada pela bomba na seção de saída do duto. Como a simulação foi realizada para um problema plano, foi assumida uma largura constante de 20 mm para o canal.

## **5.6 Autodesk Inventor Professional 10**

Para a etapa de projeto dos protótipos das bombas piezelétricas foi utilizado o software Autodesk Inventor Professional 10, capaz de gerar modelos 3D complexos de forma eficiente. O software diminui dramaticamente a possibilidade de erros no projeto que poderiam atrasar a etapa de fabricação dos protótipos. Além disso, a modelagem 3D associada às simulações no ANSYS, que também foi utilizado durante este trabalho de formatura, permitem o refinamento dos projetos das bombas antes que elas entrem no estágio de fabricação, diminuindo os custos com fabricação de protótipos.

### **5.6.1 Modelagem**

A modelagem de uma peça genérica é feita em arquivos de extensão \*.ipt. O primeiro passo é gerar um Sketch 2D. Sketch 2D é um desenho que pode ser criado em qualquer plano de trabalho ou face plana de um sólido. O objetivo é criar perfis ou contornos que serão usados na criação de um sólido. De forma geral, ele define as geometrias principais da peça. A fig. 5.5 mostra um exemplo de perfil gerado em uma Sketch 2D.

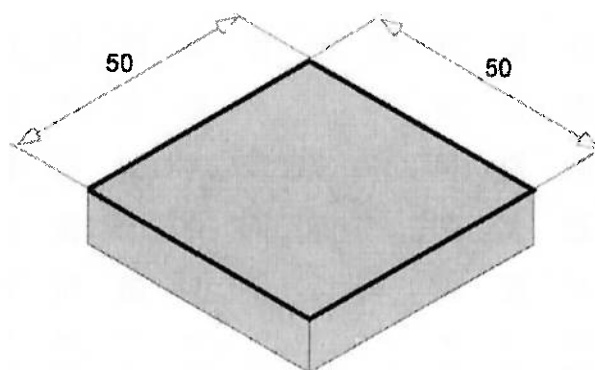


Fig. 5.5 – Exemplo de perfil gerado em uma Sketch 2D.

Após a geração de uma Sketch 2D, deve-se criar uma Feature. Feature é um ambiente para geração de sólidos e superfícies e é acessado quando se termina uma Sketch 2D. A Feature permite ao usuário gerar extrusões, revoluções, furos, chanfros, raios de arredondamento, roscas, etc. A fig. 5.6 mostra um exemplo de um sólido extrusado gerado em uma Feature.

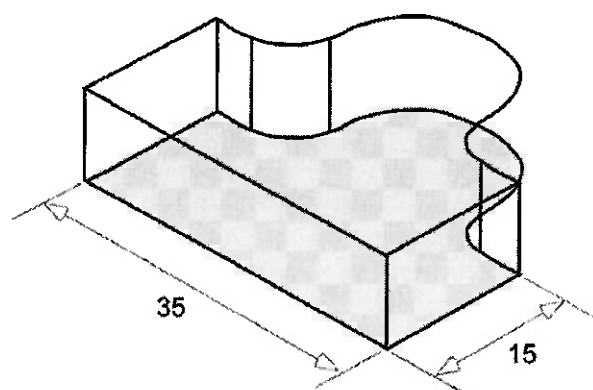


Fig. 5.6 – Exemplo de um sólido extrusado em uma Feature.

### 5.6.2 Montagem

Com todas as peças modeladas é possível gerar uma montagem total do protótipo em questão. A realização das montagens no Autodesk Inventor Professional 10 visa visualizar possíveis erros de projeto, assim como as interferências entre as peças que constituem o protótipo. As montagens são realizadas em arquivos \*.iam. Para a realização da montagem é necessário definir restrições como, por exemplo, restrições de eixos, faces e arestas coincidentes. A definição de restrições tem o

propósito de definir as posições de cada peça que compõem o mecanismo. A fig. 5.7 mostra um exemplo de uma montagem gerada em arquivo \*.iam.

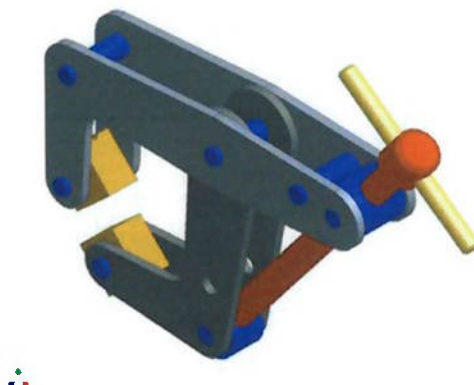


Fig. 5.7 – Exemplo de uma montagem gerada em arquivo \*.iam.

### 5.6.3 Geração de Desenhos Técnicos

A geração de desenhos técnicos no Autodesk Inventor Professional 10 é feita em arquivos de extensão \*.idw. Nesse ambiente 2D é possível gerar vistas de base, ortogonais, isométricas, de cortes e de detalhes. Além disso, pode-se gerar cotas de forma automática ou manual. A fig. 5.8 mostra um exemplo de um desenho técnico gerado em arquivo \*.idw.

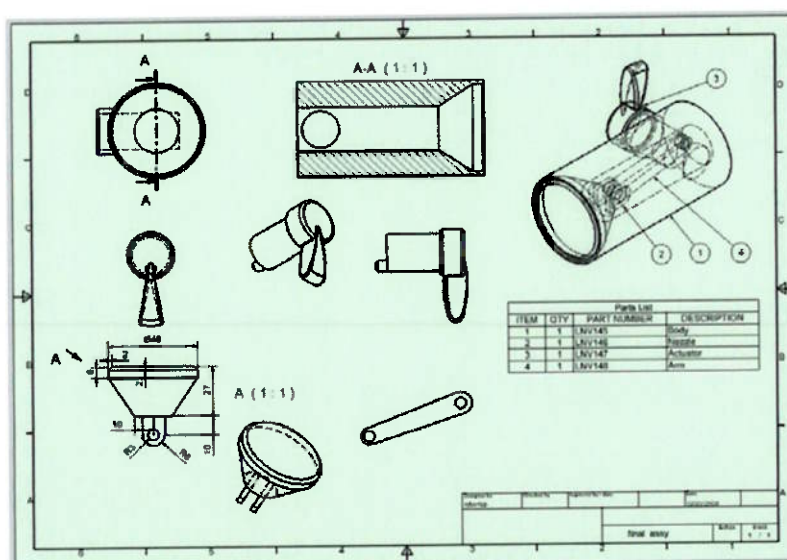


Fig. 5.8 – Exemplo de um desenho técnico gerado em arquivo \*.idw.

## 6 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Para validar a eficiência das novas configurações estudadas neste trabalho faz-se uso dos resultados obtidos pelos alunos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Paulo Nakasone e Rogério Felipe Pires, demonstrados nas suas dissertações de Mestrado (Nakasone, 2006), cujo assunto principal é a simulação e fabricação de uma bomba piezelétrica de um único atuador bilaminar, cujas características são descritas abaixo:

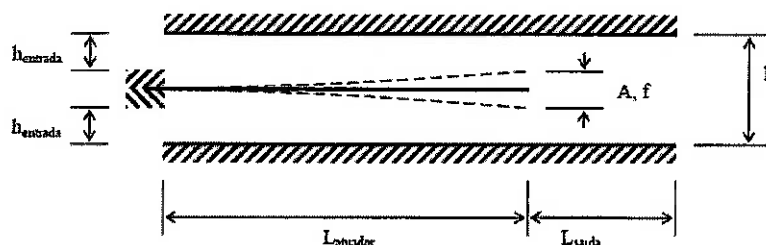


Fig. 6.1 – Modelo da bomba piezelétrica.

Tabela 6.1 – Parâmetros da simulação de um único atuador.

Frequência (f):	278 Hz
Amplitude (A):	0,3 mm
Altura do duto (h):	6,0 mm
Largura do duto:	20,0 mm
Altura da entrada ( $h_{entrada}$ ):	2,0 mm
Comprimento do atuador ( $L_{atuador}$ ):	36,0 mm
Pressão nas seções de entrada e saída:	1 atm
Tempo total de simulação ( $t_{final}$ ):	1,5 s
Número de iterações (N):	75.000
Quantidade de elementos:	5.082
Malha:	triangular

Para esta simulação foi obtida uma vazão média de 35 cm<sup>3</sup>/min, como pode ser visto na fig. 6.2.

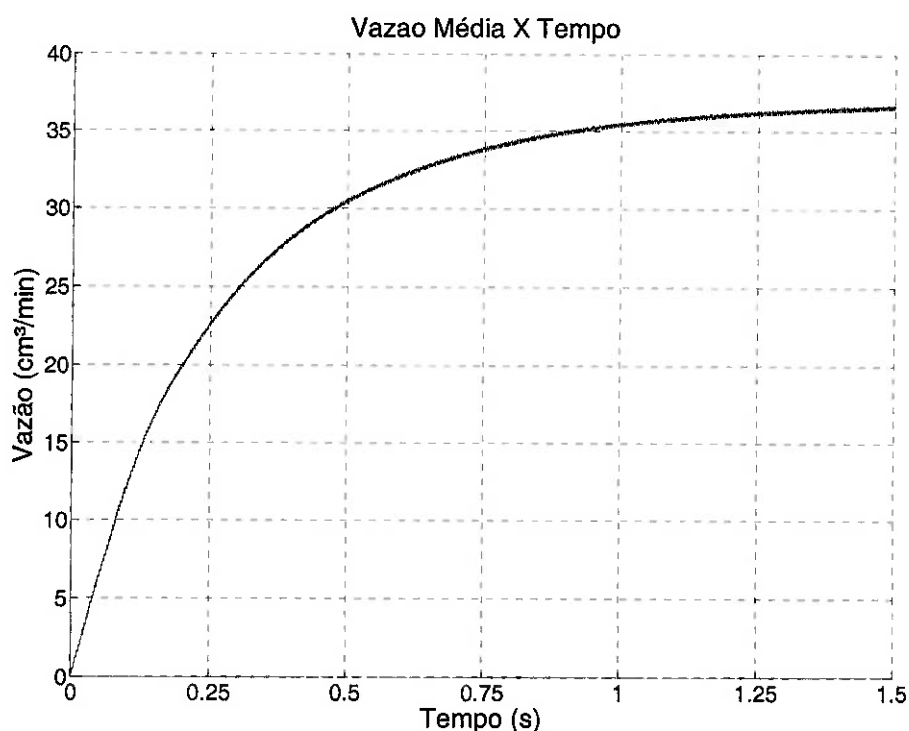


Fig. 6.2 – Curva Vazão Média x Tempo de referência.

As simulações foram feitas até 1,5 segundo, pois neste intervalo já se atingia o regime permanente, como pode ser visto na fig. 6.2. Este modelo é usado como referência nas comparações de vazão dos modelos estudados neste relatório.

A seguir, são apresentadas as simulações computacionais das configurações descritas no item 3.1.

### 6.1 Configuração 1: Atuadores nas paredes em paralelo

O modelo computacional adotado para a configuração 1 pode ser representado da seguinte forma (fig. 6.3):

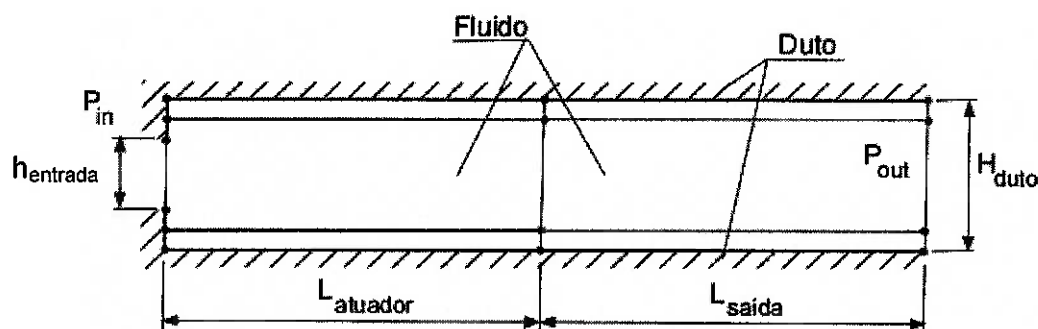


Fig. 6.3 – Modelo computacional para os atuadores nas paredes.



Tabela 6.2 – Parâmetros da simulação dos atuadores nas paredes.

Frequência:	278 Hz
Amplitude:	0,3 mm
Altura do duto ( $H_{duto}$ ):	4,0 mm
Largura do duto:	20,0 mm
Altura da entrada ( $h_{entrada}$ ):	2,5 mm
Comprimento do atuador ( $L_{atuador}$ ):	36,0 mm
Pressão nas seções de entrada e saída:	1 atm

Na fig. 6.3 pode-se ver um esboço da bomba piezelétrica com dois atuadores, sendo  $L_{atuador}$ , o comprimento do atuador piezelétrico, e  $L_{saída}$  e  $H_{duto}$ , o comprimento da região de saída e altura do duto, respectivamente. O modelo do atuador piezelétrico possui um comprimento de 36 mm e altura do duto de 4 mm. O comprimento da região de saída deve ser da ordem de três vezes a altura do duto para que possa ser observado um completo desenvolvimento do escoamento, ou seja, a determinação do seu valor busca proporcionar uma melhor visualização dos resultados de escoamento, não devendo influenciar diretamente no desempenho da bomba. A forma de acionamento dos atuadores utilizada foi uma onda senoidal de tensão dividida em duas meia-ondas, para cada atuador, defasada em  $180^\circ$ .

O gráfico da vazão em função do tempo pode ser visto na fig. 6.4:

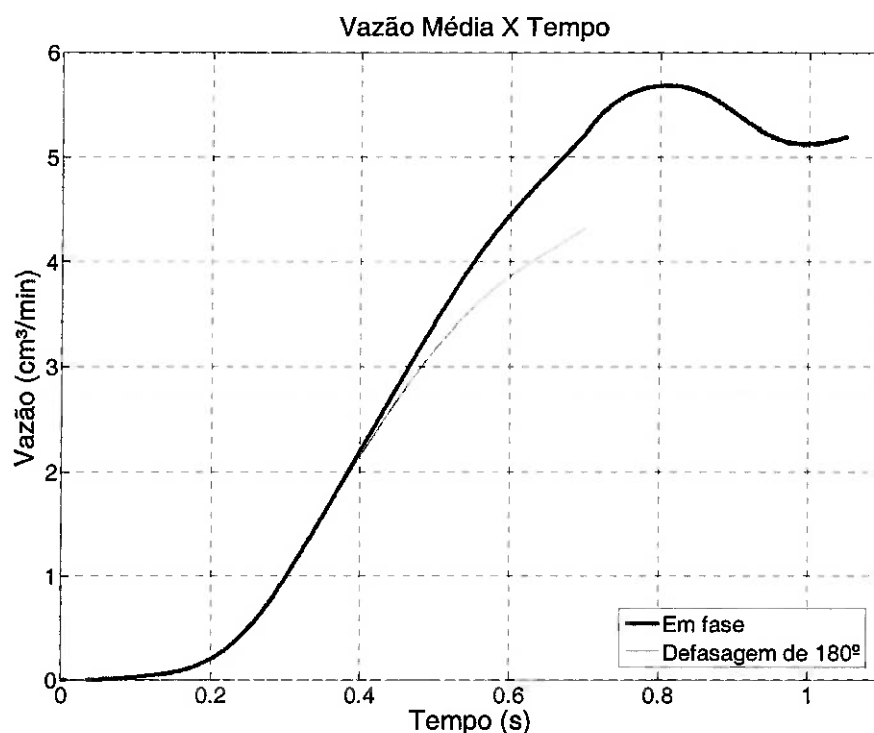


Fig. 6.4 – Curva Vazão Média x Tempo dos atuadores nas paredes.

Da fig. 6.4 é possível ver que a vazão obtida nesta configuração é bem abaixo da vazão de referência, de  $35 \text{ cm}^3/\text{min}$  (fig. 6.2), tanto para oscilações em fase ou defasadas de  $180^\circ$ . Devido a estes resultados, optou-se por interromper as simulações antes de entrar em regime de escoamento permanente, visto que esta configuração não atende o objetivo deste trabalho, que é a maximização da vazão. Esses resultados foram comprovados experimentalmente pela construção de um protótipo, detalhado na seção 7.1.

## 6.2 Configuração 2: Atuadores em paralelo

O modelo computacional adotado para a configuração 2 pode ser representado da seguinte forma (fig. 6.5):

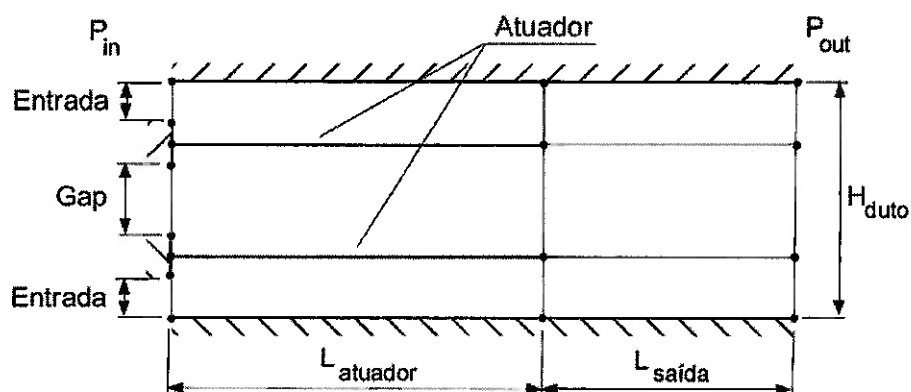


Fig. 6.5 – Modelo computacional para os atuadores em paralelo.

Tabela 6.3 – Parâmetros da simulação dos atuadores em paralelo.

Frequência:	278 Hz
Amplitude:	0,3 mm
Largura do duto:	20,0 mm
Altura do duto ( $H_{duto}$ ):	15,0 mm
Comprimento do atuador ( $L_{atuador}$ ):	36,0 mm
Pressão nas seções de entrada e saída:	1 atm

A diferença deste modelo em relação ao anterior é que os atuadores estão mais afastados do duto e há três regiões de entrada do fluido, duas entre os atuadores e o próprio duto e uma terceira entre os atuadores (“gap”). Outro detalhe é a onda de excitação dos atuadores, que passa a ser uma onda senoidal de tensão em cada atuador.

A grande vantagem de se utilizar atuadores nesta configuração é o aproveitamento em conjunto dos vórtices gerados a cada oscilação. São geradas duas esteiras de vórtices quando os atuadores em paralelo oscilam; porém, há uma grande diferença se os atuadores estão em fase ou defasados de  $180^\circ$ . No primeiro caso, que pode ser visto na fig. 6.6a, os vórtices gerados pelos atuadores estão intercalados na região central, o que favorece o escoamento do fluido para a direita, isto é, para a seção de saída.

Já para o segundo caso (ver fig. 6.7b), onde os atuadores oscilam defasados de  $180^\circ$ , os vórtices gerados na região central estão alinhados verticalmente e o efeito obtido é uma diminuição no escoamento do fluido na direção de saída (direita). Isto significa que a vazão obtida é menor quando os atuadores não estão em fase.

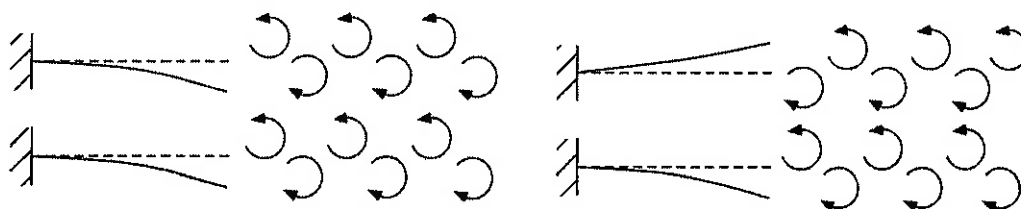


Fig. 6.6 – Atuadores em paralelo: oscilações (a) em fase; (b) defasadas em  $180^\circ$ .

Para otimizar o aproveitamento destes vórtices é necessário avaliar qual o melhor posicionamento dos atuadores, isto é, qual a melhor dimensão da entrada e da distância vertical entre os atuadores ('gap'), conforme a fig. 6.5. Assim, fixou-se a altura total da bomba de fluxo em 15 mm e escolheu-se diversos valores de entrada da bomba de fluxo, em um total de 9 casos. Estas simulações foram realizadas até o instante 0,5 segundo, devido ao alto custo computacional envolvido. As curvas de vazão destas simulações podem ser vistos na fig. 6.7.

Deste gráfico é possível ver que algumas curvas têm uma taxa de crescimento mais rápido; porém, o valor máximo de vazão alcançado nem sempre corresponde à curva de maior inclinação. No intervalo de tempo adotado (0 a 0,5s) é possível ver que a partir do instante 0,5 s as curvas já apresentam um comportamento previsível e a configuração que atingiu a maior vazão tem como dimensões 4,5 mm de entrada e 2 mm de 'gap'. Para avaliar a vazão desta configuração em regime permanente, simulou-se este caso ótimo descrito acima até o instante 2 s, cujo resultado pode ser visto na fig. 6.8.

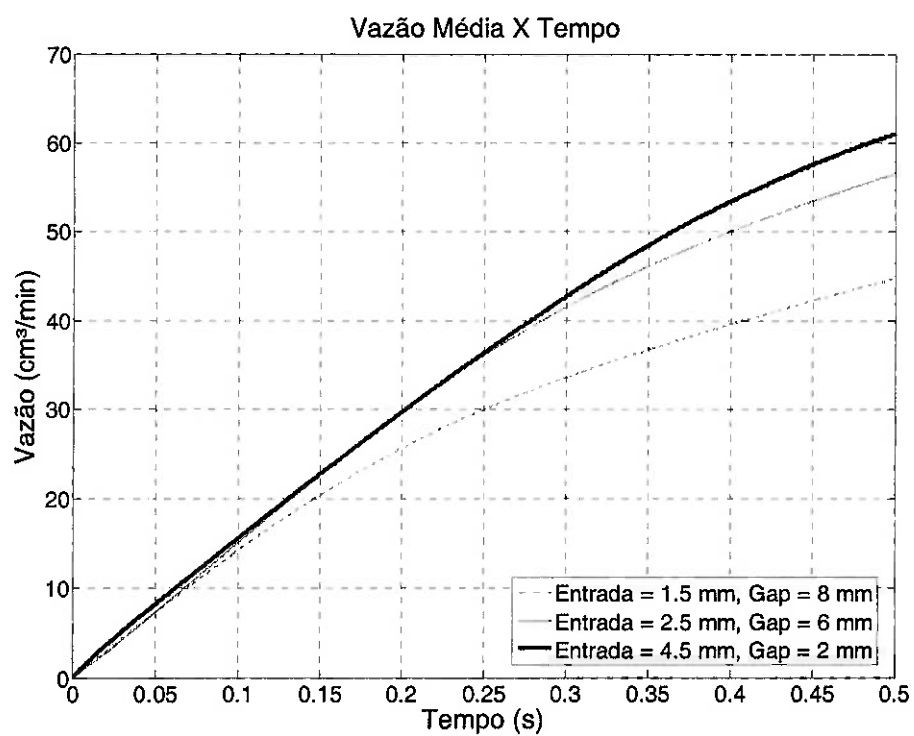


Fig. 6.7 – Curva Vazão Média x Tempo dos atuadores em paralelo (em fase).

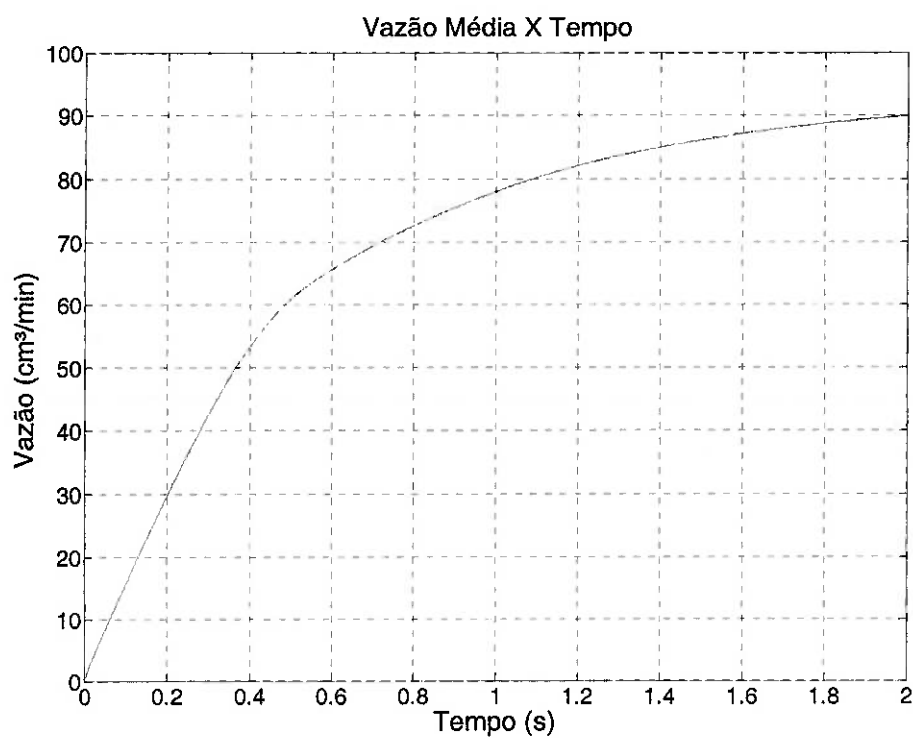


Fig. 6.8 – Curva de vazão dos atuadores em paralelo otimizados (em fase).

Da fig. 6.8 é possível notar que se atinge uma vazão aproximada de  $90 \text{ cm}^3/\text{min}$ . Portanto, o uso de dois atuadores em uma mesma bomba de fluxo gera maiores vazões do que o uso de duas bombas de um único atuador, pois a vazão obtida neste último caso seria de aproximadamente  $70 \text{ cm}^3/\text{min}$ , como pode ser visto na fig. 6.9.

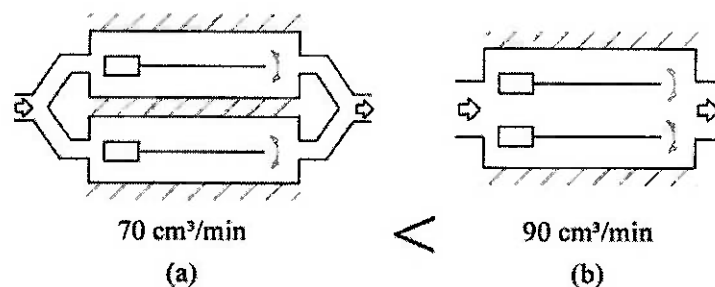


Fig. 6.9 – Dois atuadores em paralelo na mesma bomba de fluxo maximizam a vazão. (a) Duas bombas de fluxo de um único atuador, (b) bomba de fluxo de dois atuadores em paralelo.

### 6.3 Configuração 3: Atuadores em série

O modelo computacional adotado para a configuração 3 pode ser representado da seguinte forma (fig. 6.10):

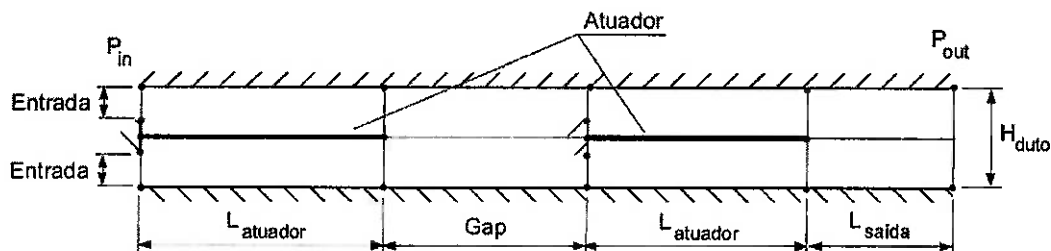


Fig. 6.10 – Modelo computacional para os atuadores em série.

Tabela 6.4 – Parâmetros da simulação dos atuadores em série.

Frequência:	278 Hz
Amplitude:	0,3 mm
Largura do duto:	20,0 mm
Altura do duto ( $H_{duto}$ ):	6,0 mm
Altura da entrada ( $h_{entrada}$ ):	2,0 mm
Distância dos atuadores (Gap):	60,0 mm
Comprimento do atuador ( $L_{atuador}$ ):	36,0 mm
Pressão nas seções de entrada e saída:	1 atm

Neste modelo é simulado o uso de dois atuadores em série, isto é, ambos os atuadores são posicionados na mesma direção horizontal, espaçados de 60 mm. Os atuadores são excitados por uma onda senoidal de tensão em cada atuador. O objetivo desta configuração é o aumento da potência da bomba, que pode ser medido através do aumento da diferença de pressão nas seções de entrada e saída da bomba.

O gráfico da vazão em função do tempo para o modelo dos atuadores em série excitados em fase e defasados em  $180^\circ$  pode ser visto na fig. 6.11:

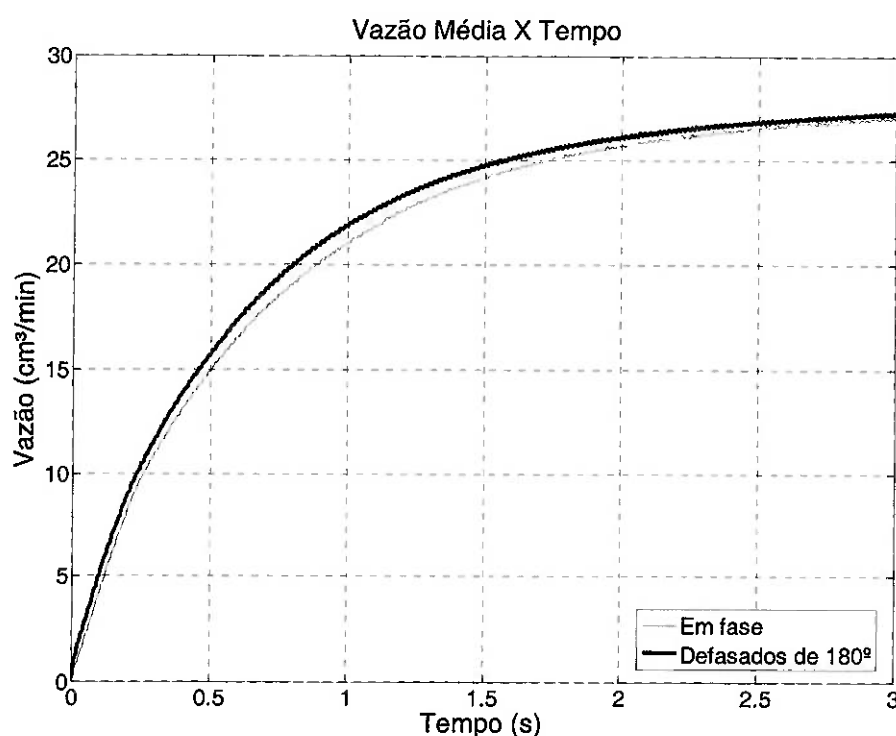


Fig. 6.11 – Curva Vazão Média x Tempo para os atuadores em série.

Deste gráfico é possível notar que não há diferença significativa nas vazões obtidas para os dois modos de vibrar e, comparado com a simulação de referência, as vazões caem de  $35 \text{ cm}^3/\text{min}$  para aproximadamente  $27 \text{ cm}^3/\text{min}$ . Entretanto, analisando-se a sensibilidade deste modelo em função da pressão de saída da bomba de fluxo (fig. 6.12), verifica-se que com os atuadores em série é possível operar a bomba de fluxo sob maiores pressões de saída (fig. 6.13).

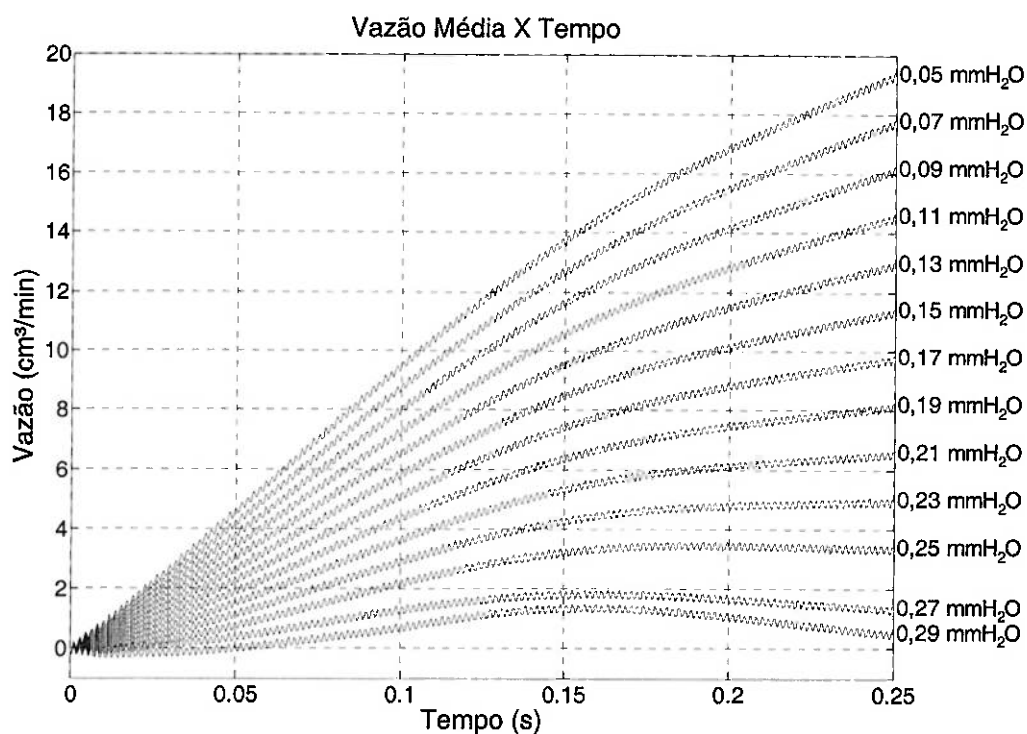


Fig. 6.12 – Curvas de vazão dos atuadores em série com diferentes pressões de saída.

Na fig. 6.13 é possível ver as curvas de vazão em função da pressão de saída, tanto da bomba de um único atuador quanto da configuração em série. Nota-se que para o primeiro caso a vazão é nula para um valor menor de pressão de saída (0,07 mmH<sub>2</sub>O) quando comparada com a configuração em série (0,29 mmH<sub>2</sub>O).

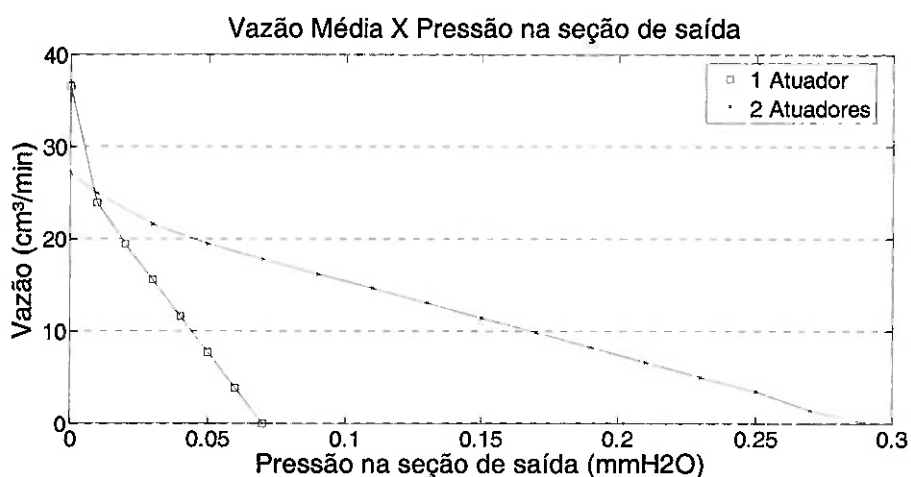


Fig. 6.13 – Curvas de pressão para os atuadores em série quando imposta pressão na seção de saída da bomba de fluxo.

Esta análise comprova a eficácia da configuração em série de gerar uma maior potência em relação à bomba de um único atuador, ou até mesmo duas bombas de fluxo interligadas em série (fig. 6.14).

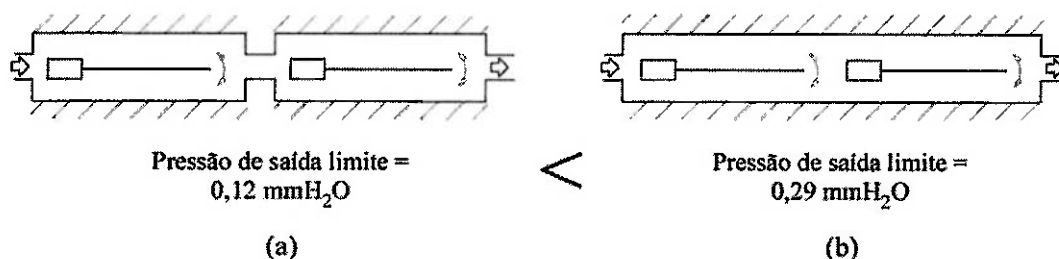


Fig. 6.14 – Dois atuadores em série na mesma bomba de fluxo permitem a operação da bomba sob maiores pressões de saída. (a) Duas bombas de fluxo em série de um único atuador, (b) bomba de fluxo de dois atuadores em série.

#### 6.4 Configuração 4: Atuadores em forma de cardume

O modelo computacional adotado para a configuração 4 pode ser representado da seguinte forma (fig. 6.12):

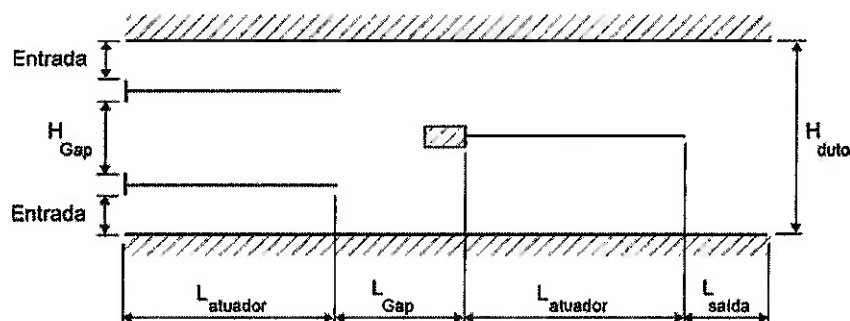


Fig. 6.15 – Modelo computacional para os atuadores em cardume.

Tabela 6.5 – Parâmetros da simulação dos atuadores em cardume.

Frequência:	278 Hz
Amplitude:	0,3 mm
Largura do duto:	20,0 mm
Altura do duto ( $H_{duto}$ ):	20,0 mm
Distância dos atuadores (Gap):	60,0 mm
Comprimento do atuador ( $L_{atuador}$ ):	36,0 mm
Pressão nas seções de entrada e saída:	1 atm



A altura total do duto foi adotada em 20 mm e foram escolhidos valores de entrada e distância vertical entre os atuadores ( $H_{gap}$ ) que atendessem esta altura total do duto. Os valores escolhidos podem ser vistos na tabela 6.6:

Tabela 6.6 – Dimensões das entradas de água para a configuração 4.

Simulação	Entrada (mm)	$H_{gap}$ (mm)
1	6,0	2,0
2	5,5	2,5
3	5,0	3,0
4	4,5	3,5
5	4,0	4,0
6	3,5	4,5
7	3,0	5,0

As vazões obtidas para estas simulações foram praticamente as mesmas e o maior valor obtido pode ser visto na fig. 6.16. É possível ver que o desempenho desta configuração é menor do que o alcançado com a configuração 2 (atuadores em paralelo).

Como esta configuração tem um altíssimo custo computacional devido à sua geometria e complexidade do problema, além de possuir mais variáveis para análise de sensibilidade, e também devido aos resultados obtidos não serem satisfatórios como o esperado, optou-se por encerrar as análises desta configuração.

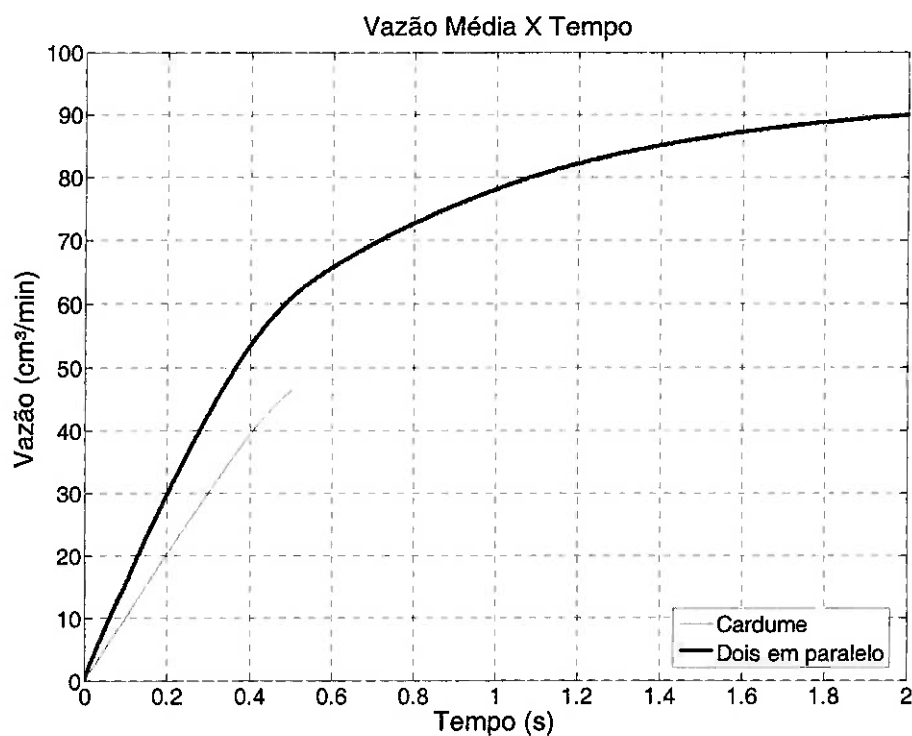


Fig. 6.16 – Curva Vazão Média x Tempo para os atuadores em cardume.

### 6.5 Simulação com mais de dois atuadores em paralelo

Como na configuração 2 (dois atuadores em paralelo) foram obtidas vazões bastante satisfatórias, optou-se por expandir o conceito desta configuração e foram realizadas novas simulações com três atuadores em paralelo, conforme a fig. 6.17:

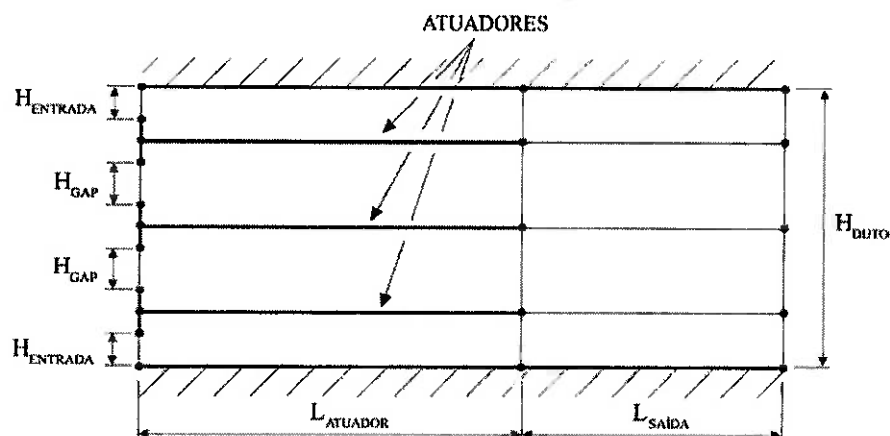


Fig. 6.17 – Modelo computacional para os atuadores em paralelo.

Tabela 6.7 – Parâmetros da simulação dos atuadores em paralelo.

Frequência:	278 Hz
Amplitude:	0,3 mm
Largura do duto:	20,0 mm
Altura do duto ( $H_{duto}$ ):	14,0 mm
Entrada de fluido ( $H_{entrada}$ ):	2,0 mm
Distância entre os atuadores ( $H_{gap}$ ):	2,0 mm
Comprimento do atuador ( $L_{atuador}$ ):	36,0 mm
Pressão nas seções de entrada e saída:	1 atm

A distância entre os atuadores ( $H_{gap}$ ) e as entradas de fluido ( $H_{entrada}$ ) foram estimadas segundo as dimensões ótimas da configuração 2. O gráfico da vazão pode ser visto na fig. 6.18.

Deste gráfico é possível notar que houve um ganho de 200% na vazão em relação à configuração 2 e uma diminuição de 1 mm na altura do duto. Já se for realizada uma comparação com a bomba de fluxo com um único atuador (fig. 6.2), observa-se que o ganho em vazão é de aproximadamente 510% para um aumento de 2,3 na altura do duto. Isso mostra que ainda há meios de aumentar ainda mais a vazão, sem comprometer a dimensão total da bomba de fluxo.

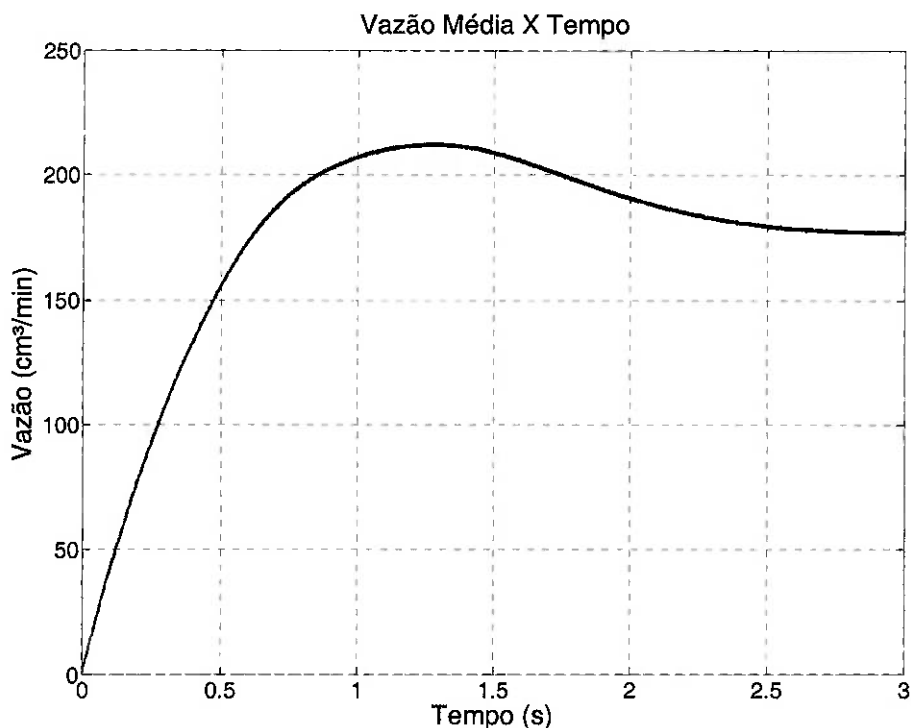


Fig. 6.18 – Curva Vazão Média x Tempo para três atuadores em paralelo.

## 6.6 Análise de sensibilidade da região de entrada

As simulações realizadas neste trabalho têm como objetivo indicar a melhor solução do ponto de vista qualitativo. Para avaliar o desempenho de um modo mais fiel ao modelo real da bomba de fluxo, simulou-se um modelo estendido da bomba de um único atuador a fim de avaliar a influência da perda de carga na região anterior à entrada de fluido. Foi escolhida a bomba de fluxo de um único atuador devido ao seu custo computacional ser menor do que as demais configurações.

O modelo simulado computacionalmente pode ser visto na fig. 6.19:

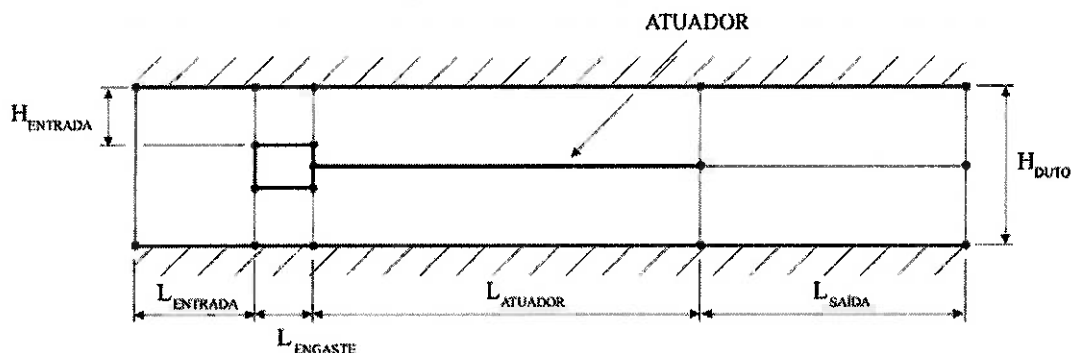


Fig. 6.19 – Modelo computacional da bomba de fluxo estendida.

Tabela 6.8 – Parâmetros da simulação da bomba de fluxo estendida.

Frequência:	278 Hz
Amplitude:	0,3 mm
Largura do duto:	20,0 mm
Altura do duto ( $H_{duto}$ ):	6,0 mm
Entrada de fluido ( $H_{entrada}$ ):	1,0 mm
Comprimento da entrada ( $L_{entrada}$ ):	10,0 mm
Comprimento do atuador ( $L_{atuador}$ ):	36,0 mm
Comprimento do engaste ( $L_{engaste}$ ):	10,0 mm
Pressão nas seções de entrada e saída:	1 atm

O gráfico da vazão pode ser visto na fig. 6.20:

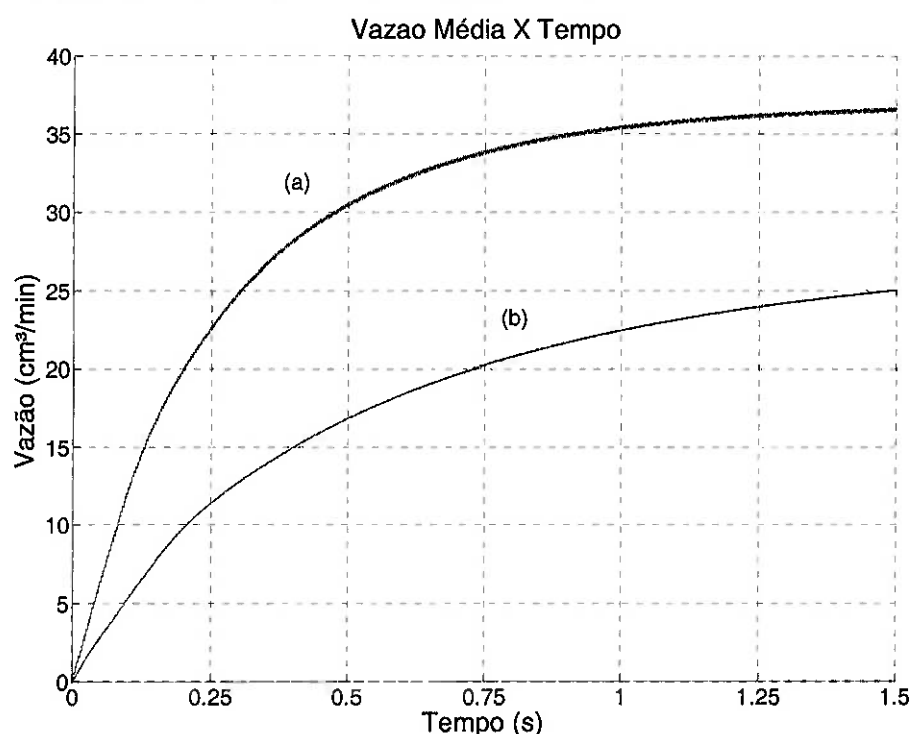


Fig. 6.20 – Curva Vazão Média x Tempo da bomba de fluxo (a) de referência e (b) com o duto estendido na região de entrada de fluido.

Da fig. 6.20 observa-se que a vazão obtida é menor que  $35 \text{ cm}^3/\text{min}$ , devido à perda de carga gerada pelo engaste do atuador. Porém, o escoamento gerado no interior do duto foi semelhante ao obtido nas outras configurações, sem que houvesse a inversão no escoamento ou refluxo na região ao redor do atuador bilaminar.

### 6.7 Análise de sensibilidade da inclinação do atuador

Um detalhe observado durante a fabricação do primeiro protótipo (mostrado adiante) foi a dificuldade em garantir o paralelismo dos atuadores no interior da bomba de fluxo, fato que poderia causar uma inversão de fluxo ou até o refluxo de fluido em torno dos atuadores. Assim, simulou-se um modelo da bomba de fluxo de um único atuador, onde este se encontrava inclinado em relação às paredes do duto, a fim de avaliar a sensibilidade da inclinação dos atuadores. Foi escolhida a bomba de fluxo de um único atuador devido ao seu custo computacional ser menor do que as demais configurações.

O modelo simulado computacionalmente pode ser visto na fig. 6.21.

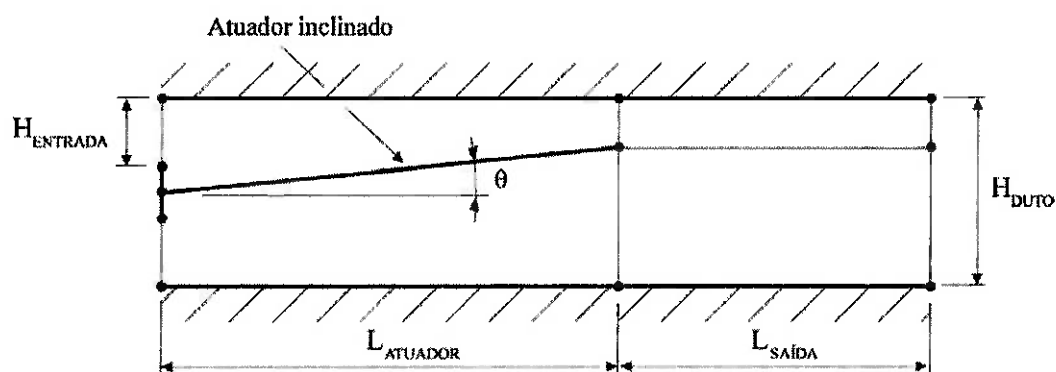


Fig. 6.21 – Modelo computacional da bomba de fluxo com o atuador inclinado.

Tabela 6.9 – Parâmetros da simulação da bomba de fluxo com o atuador inclinado.

Frequência:	278 Hz
Amplitude:	0,3 mm
Largura do duto:	20,0 mm
Altura do duto ( $H_{duto}$ ):	6,0 mm
Entrada de fluido ( $H_{entrada}$ ):	2,0 mm
Comprimento do atuador ( $L_{atuador}$ ):	36,0 mm
Pressão nas seções de entrada e saída:	1 atm

O gráfico da vazão pode ser visto na fig. 6.22:

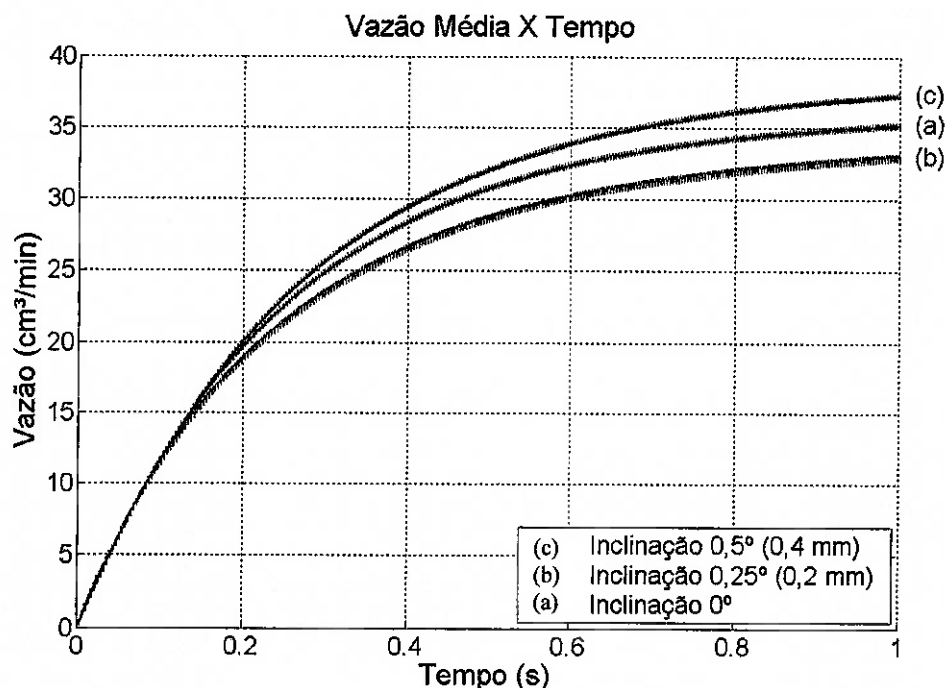


Fig. 6.22 – Curva Vazão Média x Tempo da bomba de fluxo com o atuador inclinado.

Da fig. 6.22 observa-se que a vazão obtida com o atuador não-inclinado é de aproximadamente 35 cm³/min. Já para os casos com os atuadores inclinados, o que se observa é uma variação na vazão média, tanto para mais quanto para menos, embora não seja significativa. O escoamento gerado no interior do duto foi semelhante ao obtido nas outras configurações, sem que houvesse a inversão no escoamento ou refluxo na região ao redor do atuador bilaminar. Esta informação é de grande valia no momento da montagem dos protótipos, pois evita perder tempo com detalhes insignificantes.

## 6.8 Análise de sensibilidade da espessura da cerâmica piezelétrica

Um dos objetivos propostos neste trabalho foi estudar a viabilidade de fabricação de atuadores piezelétricos bilaminares, a fim de dar mais liberdade na geometria e dimensão dos atuadores. Portanto, foram realizadas simulações computacionais para analisar a influência da espessura das cerâmicas piezelétricas no desempenho de atuadores bilaminares fabricados, em comparação aos atuadores comerciais.

Os atuadores piezelétricos bilaminares encontrados comercialmente apresentam, como característica, espessuras da ordem de  $2 \cdot 10^{-1}$  mm e são fabricados através de processos de deposição. Já as cerâmicas piezelétricas mais comumente encontradas no mercado são da ordem de  $4 \cdot 10^{-1}$  mm, pois para espessuras menores a dificuldade no manuseio é muito maior.

O modelo computacional utilizado pode ser visto na fig. 6.23 e na tabela 6.10 estão listadas as dimensões do modelo:

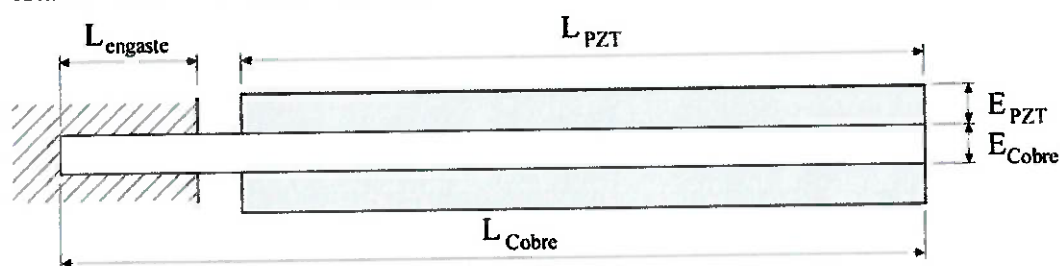


Fig. 6.23 – Modelo do atuador piezelétrico bilaminar simulado.

Tabela 6.10 – Parâmetros da simulação da bomba de fluxo com o atuador inclinado.

Meio:	água
Comprimento do cobre ( $L_{\text{cobre}}$ ):	40,0 mm
Comprimento da cerâmica ( $L_{\text{PZT}}$ ):	35,0 mm
Espessura do cobre ( $E_{\text{cobre}}$ ):	0,4 mm
Espessura da cerâmica ( $E_{\text{PZT}}$ ):	0,4 mm
Voltagem aplicada:	60 Volts

Nos intervalos de frequência simulados o atuador bilaminar opera no segundo modo de vibrar, conforme a fig. 6.24.



Fig. 6.24 – Segundo modo de vibrar do atuador piezelétrico bilaminar.

Na fig. 6.25 podem-se ver os gráficos das impedâncias elétricas e dos deslocamentos da extremidade livre do atuador comercial e fabricado. Os gráficos de impedância elétrica mostram as regiões de ressonância e anti-ressonância do atuador bilaminar e logo abaixo é possível ver a amplitude máxima que cada atuador pode atingir, quando excitados nas suas frequências de ressonância. Nos gráficos de

deslocamento é claro o melhor desempenho do atuador comercial (ganho de aproximadamente quatro vezes em relação ao atuador fabricado). Portanto, o desempenho dos atuadores piezelétricos bilaminares é bastante sensível quanto à espessura das cerâmicas piezelétricas, isto é, quanto menor a espessura, maior a amplitude.

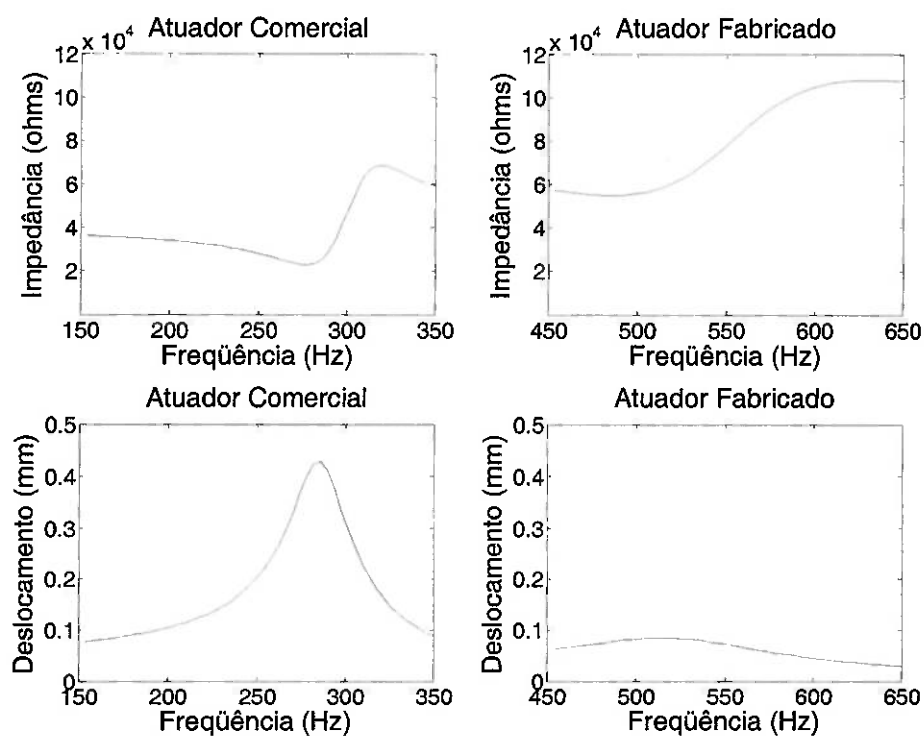


Fig. 6.25 – Comparação entre atuador comercial e fabricado.



## **7 MÉTODOS EXPERIMENTAIS**

Após validação através das simulações computacionais, foram projetados e fabricados dois protótipos experimentais das bombas piezelétricas. A fabricação de protótipos justifica-se pela necessidade de validação dos resultados computacionais e também pela verificação da viabilidade de construção do protótipo, o que nem sempre é possível. Além disso, é possível verificar através de ensaios a ocorrência de fenômenos não considerados nas simulações computacionais, especialmente por serem realizadas em duas dimensões.

As carcaças de todos os protótipos foram usinadas em acrílico, a fim de permitir a fácil visualização do escoamento do fluido. Tentou-se não fazer uso de adesivos e vedantes para permitir que os protótipos pudessem ser desmontados para análise. Portanto, adotou-se parafusos como elementos de fixação em todos os protótipos. Os elementos de fixação dos atuadores foram feitos em alumínio, devido à fácil usinagem, alta resistência contra corrosão e rigidez necessária para não interferir de modo significativo nos modos de vibrar dos atuadores.

### **7.1 Protótipo de Dois Atuadores de Parede em Paralelo**

Apesar de a simulação computacional apontar uma pequena vazão para a bomba de fluxo de dois atuadores de parede em paralelo (ver item 6.1), decidiu-se pela construção do protótipo para validar a análise computacional. Além disso, outros objetivos desse protótipo foram:

- Estudar a viabilidade do princípio de funcionamento proposto;
- Projetar um mecanismo de vedação eficiente para a bomba de fluxo piezelétrica e
- Analisar a capacidade de miniaturização do dispositivo.

#### **7.1.1 Análise de Soluções**

As dimensões do protótipo são ligeiramente diferentes das dimensões adotadas na simulação computacional, pois nem sempre é possível reproduzir fielmente o modelo teórico devido aos detalhes construtivos. Os atuadores desse protótipo estão

dispostos em paralelo com espaçamento de 0,5 mm das paredes do duto que conduz o fluido e espaçamento de 4,68 mm entre os atuadores, já descontados as espessuras de 0,16 mm dos dois atuadores, como ilustrado na figura fig. 7.1.

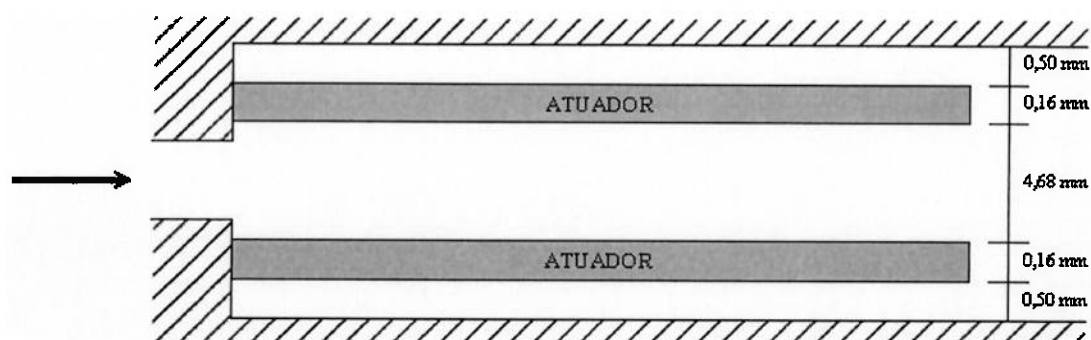


Fig. 7.1 – Ilustração da disposição dos dois atuadores

O sistema de vedação adotado para o primeiro protótipo foi a vedação por interferência. Perfis triangulares macho e fêmea foram usinados na carcaça inferior e superior, respectivamente. O aperto dos parafusos de fixação pressiona o perfil macho contra o perfil fêmea gerando a interferência necessária para garantir a vedação. Este sistema tem as vantagens de ser simples, sem a necessidade de adesivos ou vedantes e de servir como guia na montagem do protótipo. Entretanto, este sistema tem como desvantagem a necessidade de alta precisão na usinagem, pois um pequeno desvio compromete a eficácia da vedação. A fig. 7.2 ilustra os perfis do sistema de vedação em questão.



Fig. 7.2 – Ilustração dos perfis macho e fêmea do sistema de vedação

Para garantir a vedação entre a carcaça da bomba de fluxo e da conexão onde será encaixada a mangueira externa foram utilizados O’rings (ilustrado na fig. 7.3),

que são anéis de borracha de silicone amplamente utilizados comercialmente, pois garantem vedação de forma segura e eficiente. Eles são encontrados em diversos tamanhos padronizados, necessitando de adaptações de projeto para um determinado tamanho de O'ring.



Fig. 7.3 – O'ring.

A miniaturização foi considerada um requisito de projeto no primeiro protótipo, pois uma das motivações é a aplicação na microeletrônica. Porém, visto que o projeto previa futuras desmontagens, o requisito de miniaturização foi substituído pelo requisito de robustez. Parafusos como elementos de fixação e o sistema de vedação adotado limitam a possibilidade de miniaturização, pois são substituíveis por adesivos, o que viabilizaria o projeto de um menor protótipo. As dimensões do protótipo de dois atuadores de parede em paralelo são 86 x 42 x 18 mm. A fig. 7.4 exibe o conjunto do protótipo projetado no software Inventor e a fig.7.5 mostra a vista explodida.

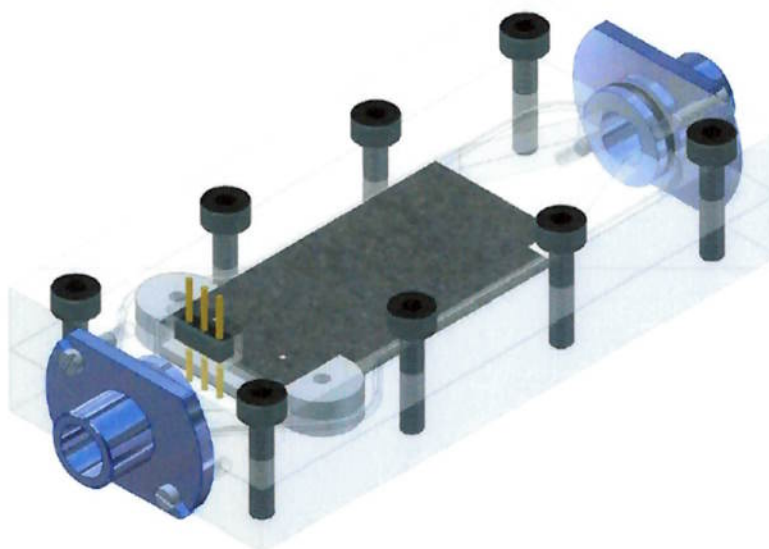


Fig. 7.4 – Conjunto do protótipo de dois atuadores de parede em paralelo.

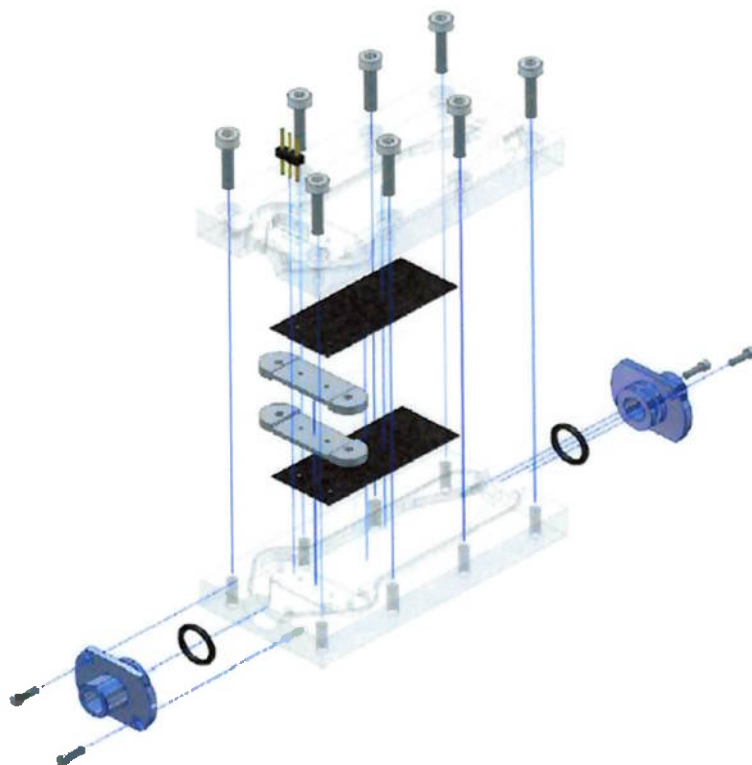


Fig. 7.5 – Vista explodida do protótipo de dois atuadores de parede em paralelo.

### 7.1.2 Fabricação dos Atuadores

Ao invés de usar atuadores comerciais disponíveis no mercado, optou-se pela fabricação dos atuadores do protótipo de dois atuadores de parede em paralelo, pois o domínio de fabricação de atuadores piezelétricos bilaminares dá mais flexibilidade ao projeto de novas configurações de bombas de fluxo, permitindo o uso de geometrias e dimensões de acordo com a necessidade do projeto, sem depender dos modelos padronizados dos atuadores encontrados comercialmente.

Como as dimensões das pastilhas disponíveis eram menores do que o necessário para preencher todo o atuador, foi necessário fazer um mosaico de PZT's. Após o corte das pastilhas, as cerâmicas foram coladas no atuador de cobre de 0,20 mm de espessura utilizando cola condutiva epoxy modelo 186-3616, da marca RS. Para o contato positivo das cerâmicas, foi utilizado fio esmaltado de 34 AWG (0,16 mm de diâmetro). O fio, por ter pequeno diâmetro, interfere de modo insignificante nos modos de vibrar e evita que os atuadores apresentem assimetrias. A fig. 7.6 mostra os atuadores após colagem das cerâmicas.

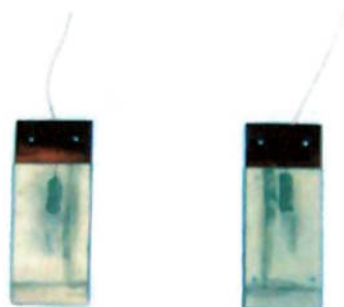


Fig. 7.6 – Atuadores após a colagem das cerâmicas.

Como isolante foi utilizado verniz para acabamento de circuito impresso Isotec da marca Implastec. A fig 7.7 mostra os atuadores após aplicação do verniz isolante.

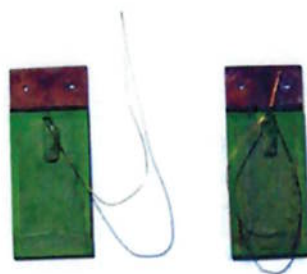


Fig. 7.7 – Atuadores após aplicação do verniz isolante.

### 7.1.3 Manuseio das Cerâmicas Piezelétricas

A seguir, são descritos os procedimentos empregados no corte e na colagem das cerâmicas piezelétricas.

#### a) Corte da Cerâmica

Para o corte da cerâmica piezelétrica, deve-se proceder do seguinte modo:

- Apoiar a cerâmica sobre uma superfície rígida, plana, lisa e isolante, como, por exemplo, acrílico, vidro ou granito;
- Marcar as direções de polarização em cada pedaço de cerâmica com uma caneta de ponta porosa, para facilitar a identificação após o corte;
- Riscar as linhas de corte (ver fig. 7.8) com um objeto de ponta fina (por exemplo, agulha de seringa);

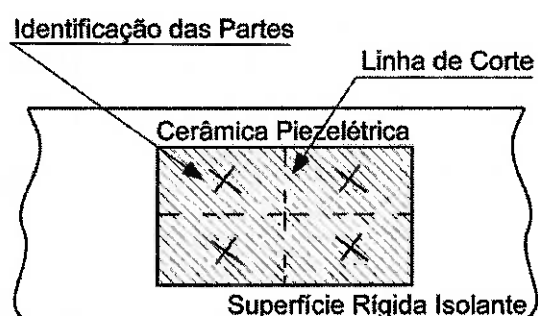


Fig. 7.8 – Preparação da cerâmica para o corte.

- Riscar a cerâmica nas linhas de corte com um objeto metálico pontiagudo, usando um esquadro. Esse procedimento tem como objetivo abrir um rasgo na camada metalizada da cerâmica, impedindo o contato simultâneo entre a lâmina de corte e as camadas metálicas da cerâmica. Isso impede a ocorrência de um curto-circuito na cerâmica, pois, no momento do corte, a cerâmica está sob efeito de um carregamento e, conseqüentemente, há um potencial elétrico induzido (fig. 7.9);

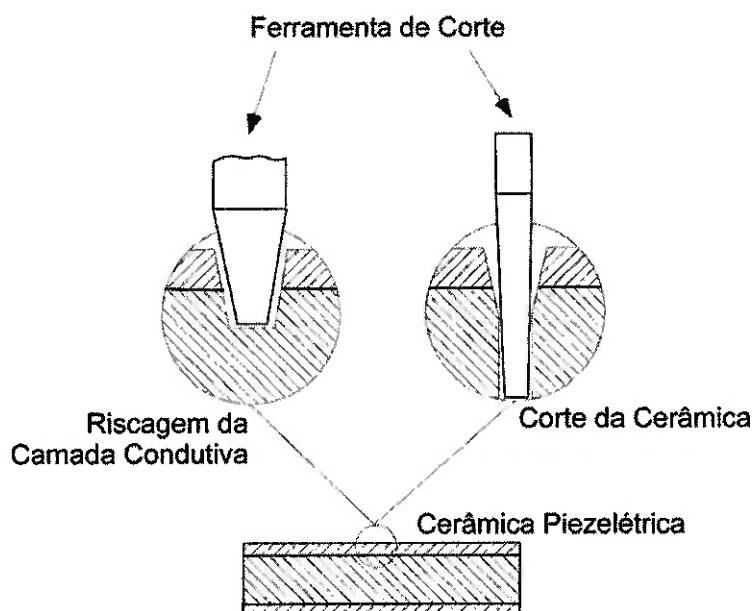


Fig. 7.9 – Corte da cerâmica.

- Cortar a cerâmica com uma lâmina bem afiada, apoiando-a entre duas superfícies rígidas (fig. 7.10);

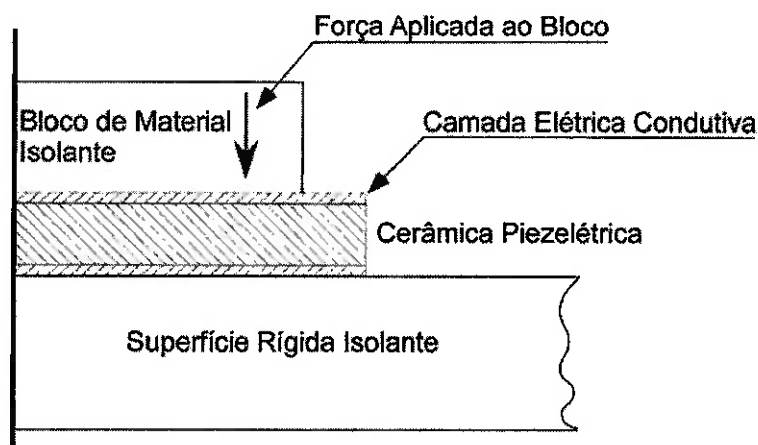


Fig. 7.10 – Fixação da cerâmica para corte.

- Dar acabamento na superfície cortada usando uma lixa para metal grão 400. Para o lixamento, a cerâmica deve ser colocada entre duas superfícies isolantes (figura 7.11).

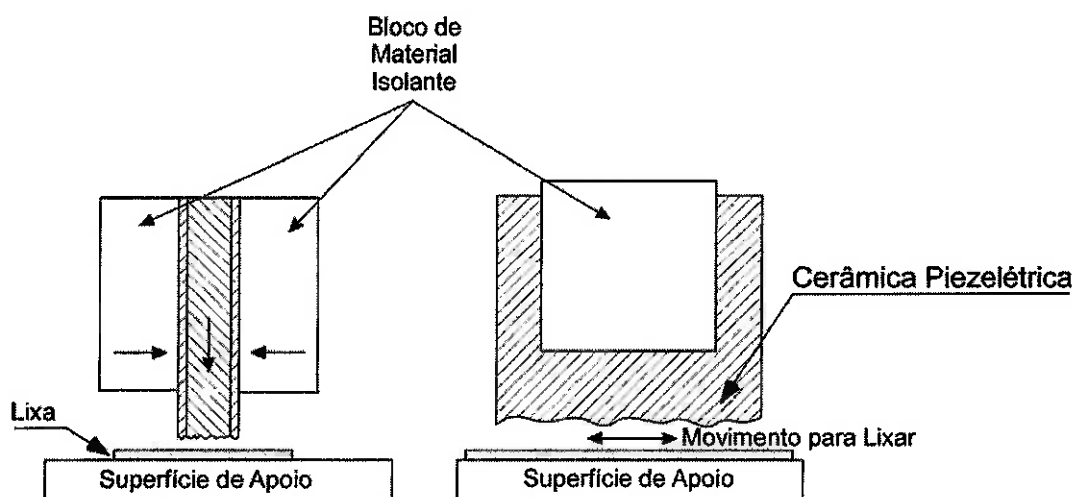


Fig. 7.11 – Fixação das cerâmicas para o lixamento.

#### b) Colagem de Cerâmica

Para realizar a colagem da cerâmica no atuador devem-se seguir os seguintes procedimentos:

- Limpar mecanicamente as superfícies da cerâmica e do cobre para retirada de resíduos sólidos e poeira;
- Limpar quimicamente as superfícies da cerâmica e do cobre com álcool isopropílico, para retirada de graxas, gorduras e óleos;

- Espalhar uma camada fina e uniforme do adesivo condutivo (RS 186-3616) ao longo da cerâmica;
- Posicionar a cerâmica sobre o cobre e pressioná-los utilizando uma placa de material isolante;
- Utilizar um peso para manter pressão entre a cerâmica e a superfície até que ocorra a cura do adesivo;
- por fim, proceder com a limpeza final do conjunto, atuador e cerâmica piezelétrica.

#### 7.1.4 Fabricação da Bomba de Fluxo

O protótipo de dois atuadores de parede em paralelo foi usinado no centro de usinagem CNC Deckel Maho, presente no Departamento de Engenharia Mecânica e Sistemas Mecatrônicos da Escola Politécnica. A fig. 7.12 mostra os componentes da bomba usinados.

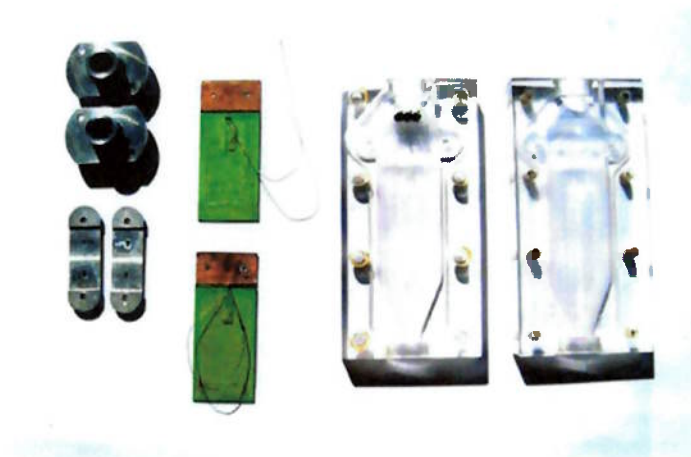


Fig. 7.12 – Componentes fabricados do primeiro protótipo.

O protótipo da bomba de fluxo montado é apresentado nas fig. 7.13 e 7.14.



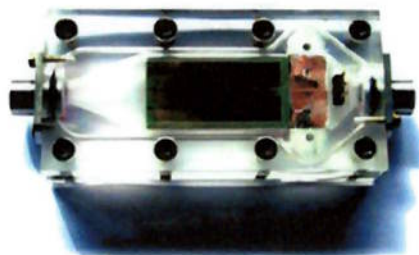


Fig. 7.13 – Primeiro protótipo (vista superior).



Fig. 7.14 – Primeiro protótipo (vista isométrica).

### 7.1.5 Circuito de Acionamento do Primeiro Protótipo

Como os atuadores nesse protótipo atuam com defasagem de  $180^\circ$ , foi necessário um circuito que dividisse uma onda senoidal em duas meias-ondas. A fig. 7.15 mostra o projeto desse circuito.

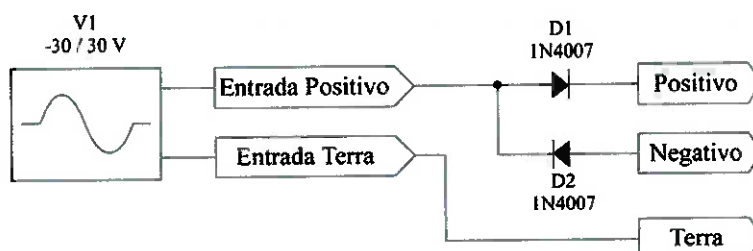


Fig. 7.15 – Esquema elétrico do circuito de acionamento.

A fig. 7.16 mostra o circuito de acionamento construído e o cabo de alimentação do primeiro protótipo..

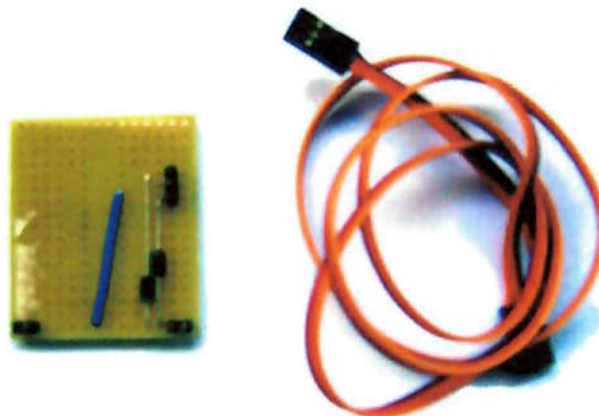


Fig. 7.16 – Circuito de acionamento construído e cabo de ligação.

#### 7.1.6 Testes Preliminares do Primeiro Protótipo

Após a construção da bomba, foi utilizado um impedômetro para mapear as frequências de ressonância dos atuadores para o meio ar e o meio água. Primeiramente, foi ensaiado um atuador por vez, separadamente. Em seguida, foram conduzidos ensaios para os dois atuadores ligados em paralelo. As frequências encontradas foram:

Tabela 7.1 –Ensaio dos atuadores piezelétricos fabricados (impedômetro).

Meio	1º Modo	2º Modo
Ar	115 e 120 Hz	1260 e 1280 Hz
Água	–	350 e 420 Hz

Obs.: Não foi possível levantar o 1º modo pois o impedômetro realiza a varredura a partir de 100 Hz.

As fig. 7.17 a 7.21 mostram os ensaios realizados no impedômetro para meio ar e o meio água.

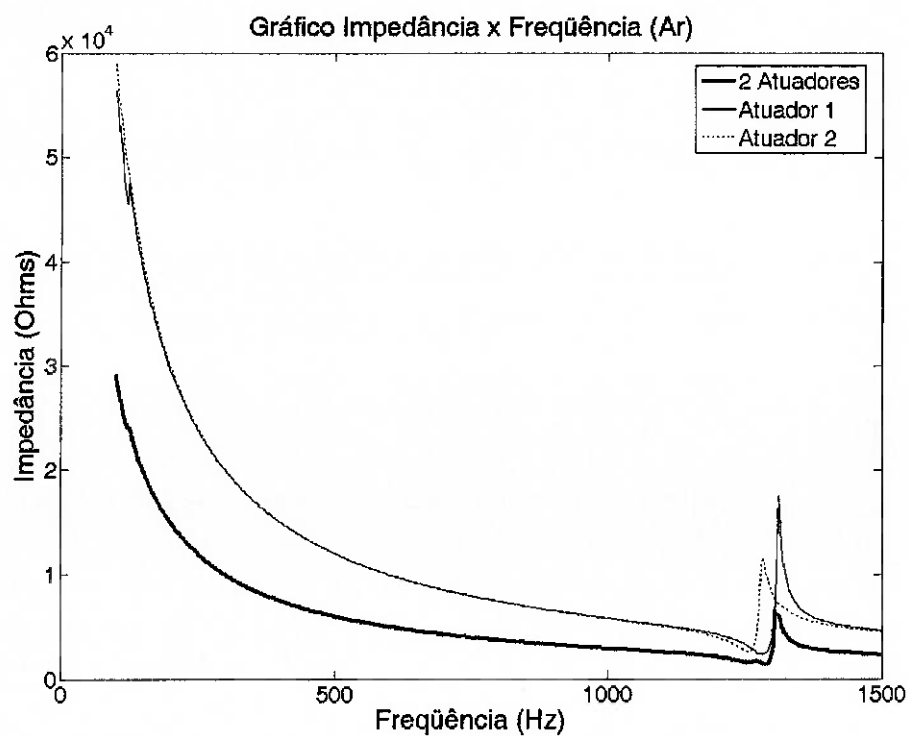


Fig. 7.17 – Gráfico Impedância x Frequência para o meio ar.

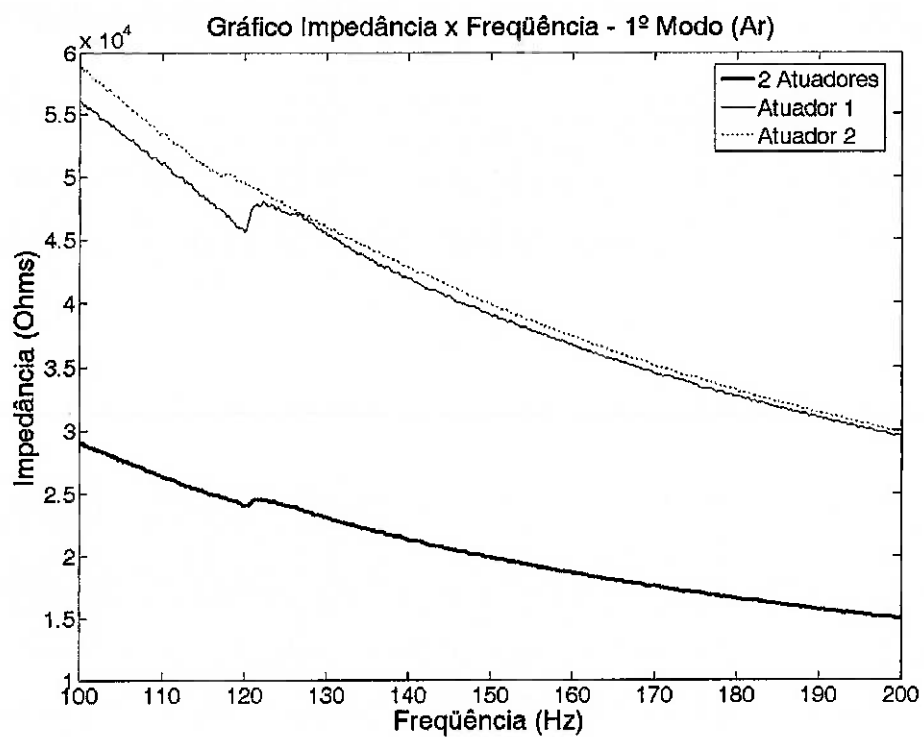


Fig. 7.18 – Detalhe do Gráfico Impedância x Frequência próximo ao 1º modo, no ar.

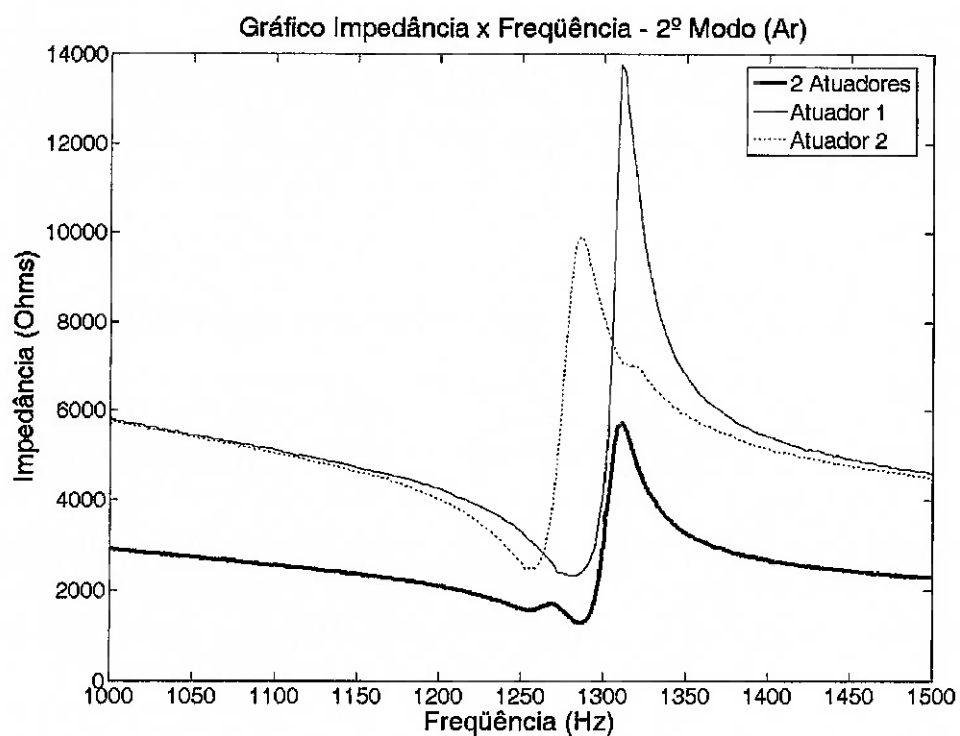


Fig. 7.19 – Detalhe do Gráfico Impedância x Frequência próximo ao 2º modo, no ar.

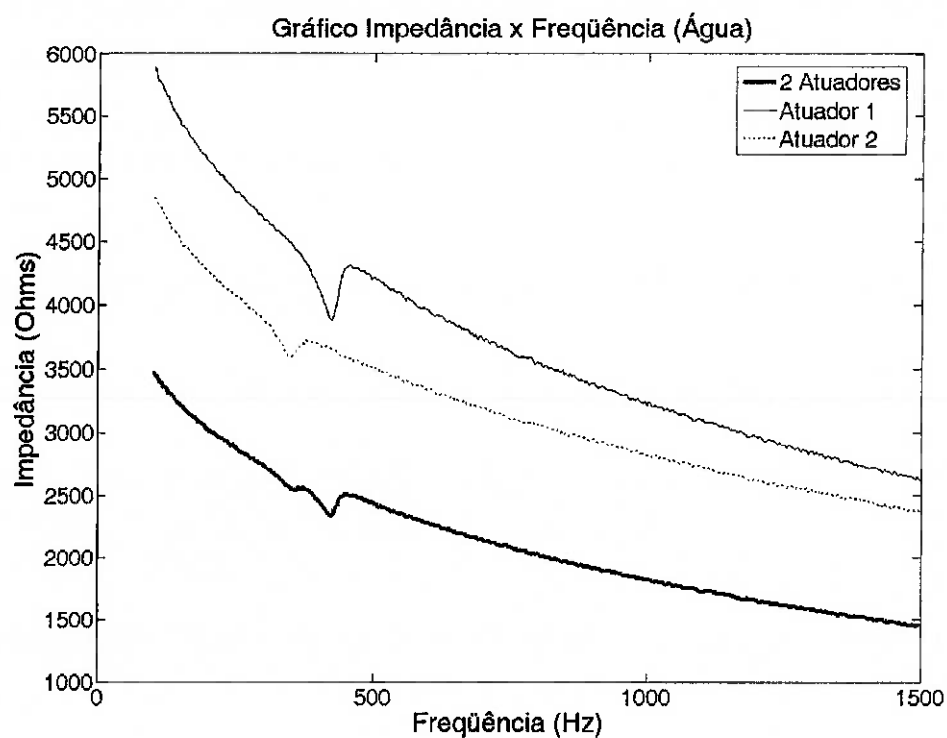


Fig. 7.20 – Gráfico Impedância x Frequência para o meio água.

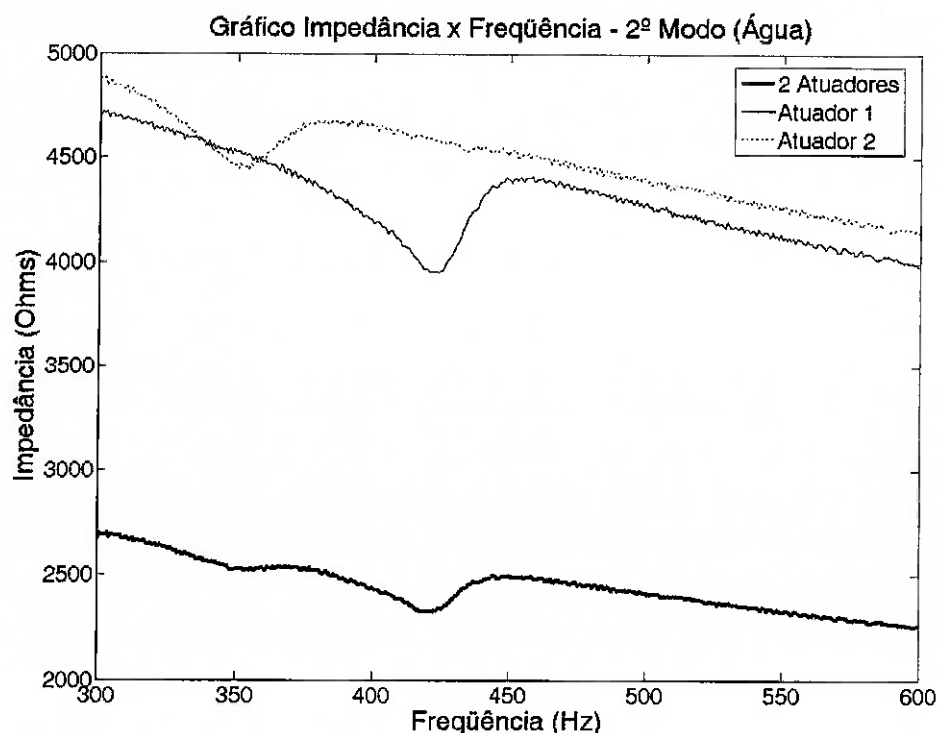


Fig. 7.21 – Detalhe do Gráfico Impedância x Frequência próximo ao 2º modo, na água.

Encontradas as frequências de ressonância, os atuadores foram excitados com uma onda senoidal de 60 Volts, pico a pico. Apesar dos atuadores se movimentarem, a amplitude foi insuficiente para gerar um fluxo no interior do duto. As hipóteses levantadas para justificar o baixo desempenho dos atuadores foram:

- Os atuadores foram feitos com um mosaico de PZTs. Acredita-se haver perdas nas junções das pastilhas.
- Acredita-se que haja perdas na colagem, pois a cola utilizada é muito viscosa (quase pastosa), impedindo a aplicação de um filme bem fino. Além disso, nos atuadores comerciais, a cerâmica é depositada.
- As pastilhas utilizadas têm 0,4 mm de espessura e, em contrapartida, os atuadores comerciais possuem cerâmicas de 0,2 mm espessura. Quanto menor a espessura, maior a dilatação da cerâmica e, conseqüentemente, maior a amplitude de oscilação. A influência da espessura das cerâmicas foi comprovada por simulação computacional (ver item 6.8). Acredita-se que esta seja a causa do baixo desempenho dos atuadores fabricados.

Como os atuadores fabricados não apresentaram resultados satisfatórios, optou-se por utilizar atuadores comerciais no protótipo de dois atuadores de parede em paralelo. A fig. 7.22 mostra uma foto dos atuadores comerciais.

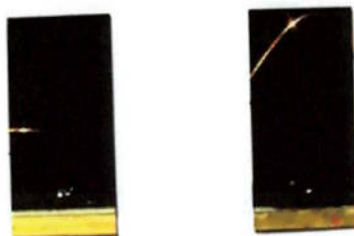


Fig. 7.22 – Atuadores comerciais utilizados.

A fig. 7.23 mostra o protótipo com os atuadores comerciais.

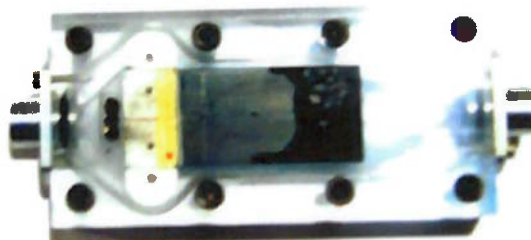


Fig. 7.23 – Primeiro protótipo com os atuadores comerciais.

#### 7.1.7 Resultados Experimentais do Primeiro Protótipo

Após a instalação dos atuadores comerciais, foi utilizado o impedômetro para mapear as frequências de ressonância dos atuadores no meio ar e no meio água. Primeiramente, foi ensaiado um atuador por vez, separadamente. Em seguida, foram conduzidos ensaios para os dois atuadores ligados em paralelo. As frequências encontradas foram:

Tabela 7.2 – Ensaio dos atuadores piezelétricos comerciais (impedômetro).

Meio	1º Modo	2º Modo
Ar	140 e 155 Hz	1080 e 1130 Hz
Água	13 Hz *	250 e 310 Hz

\* determinado experimentalmente, pois não foi possível levantar o 1º modo no impedômetro, já que este realiza a varredura a partir de 100 Hz.

Na tabela 7.2 nota-se que as frequências de ressonância dos atuadores comerciais são próximas às frequências obtidas com os atuadores fabricados (ver tabela 7.1), fato que demonstra a eficácia no processo de fabricação dos atuadores.

As fig. 7.24 a 7.28 mostram os ensaios dos atuadores comerciais realizados no impedômetro para meio ar e o meio água.

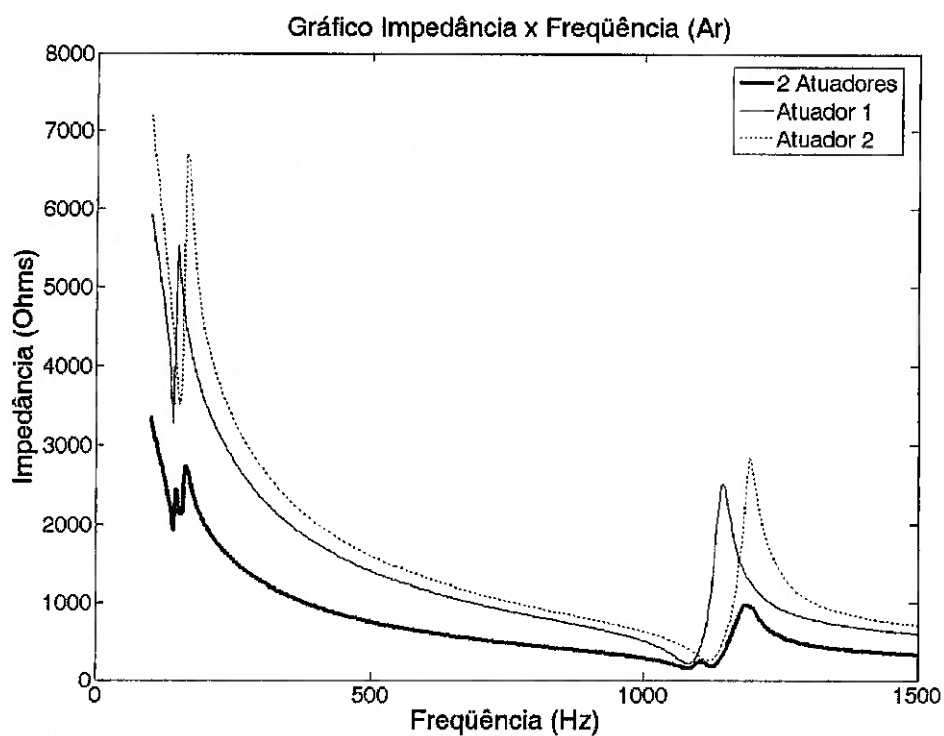


Fig. 7.24 – Gráfico Impedância x Frequência para o meio ar.

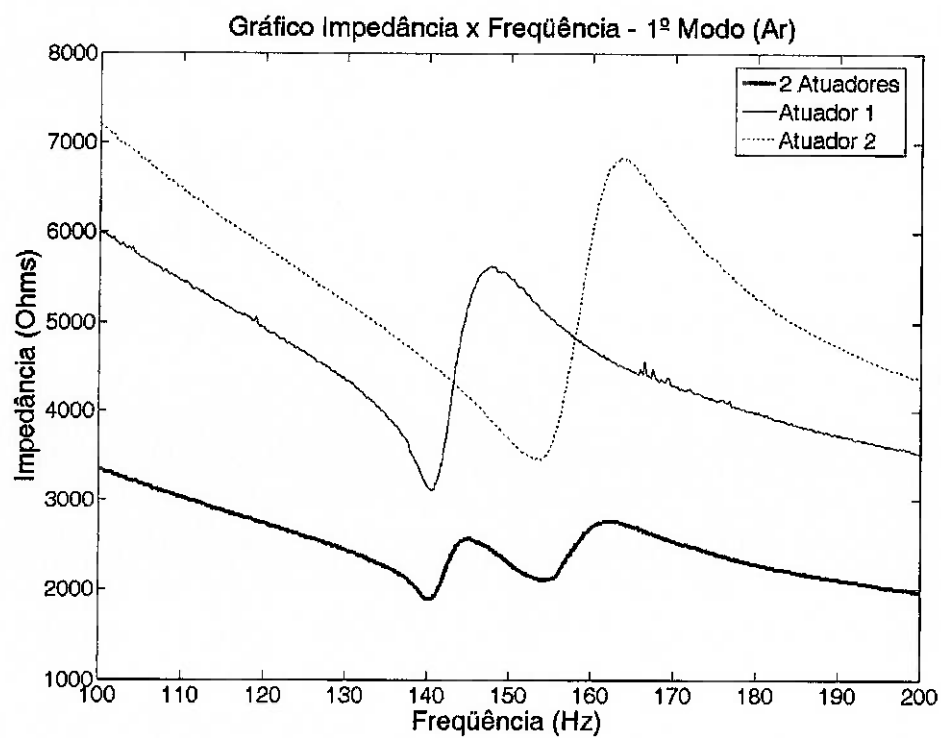


Fig. 7.25 – Detalhe do Gráfico Impedância x Frequência próximo ao 1º modo, no ar.

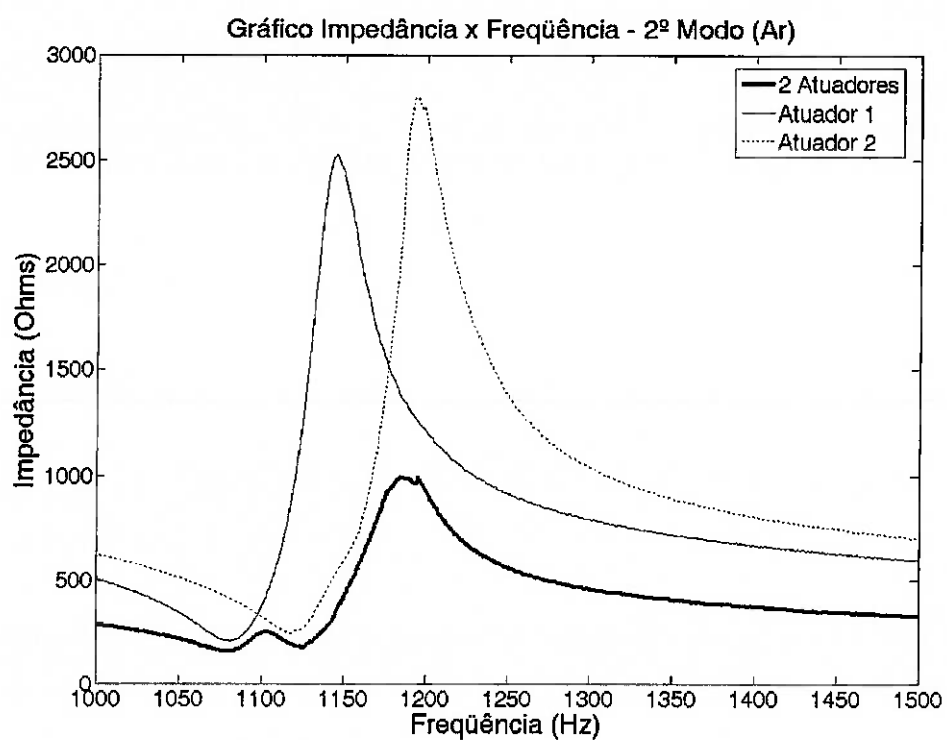


Fig. 7.26 – Detalhe do Gráfico Impedância x Frequência próximo ao 2º modo, meio ar.



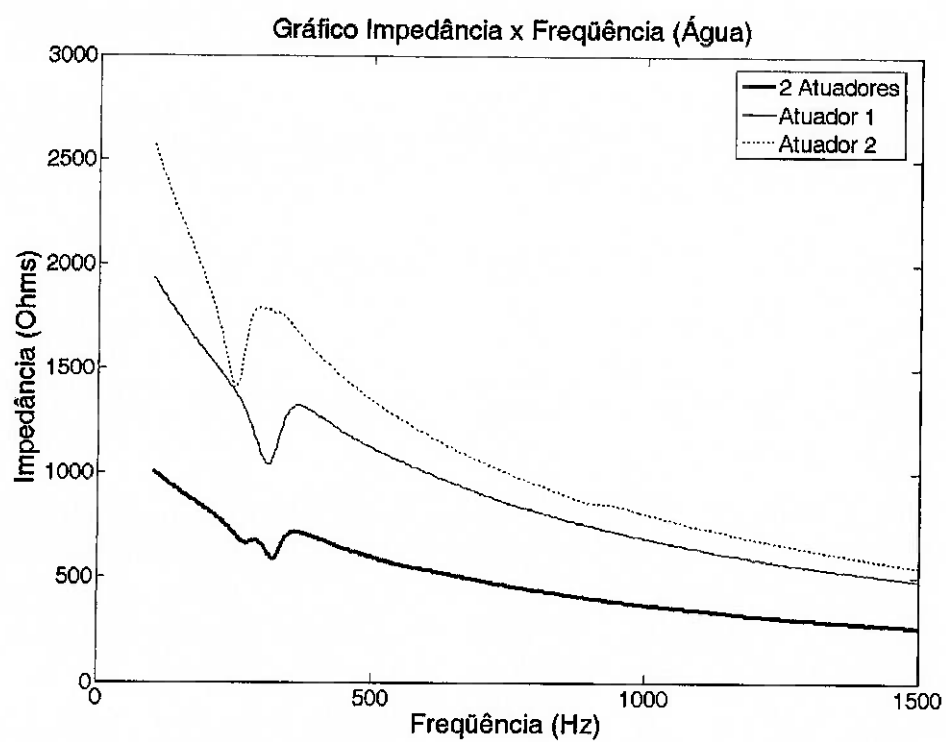


Fig. 7.27 – Gráfico Impedância x Frequência para o meio água.

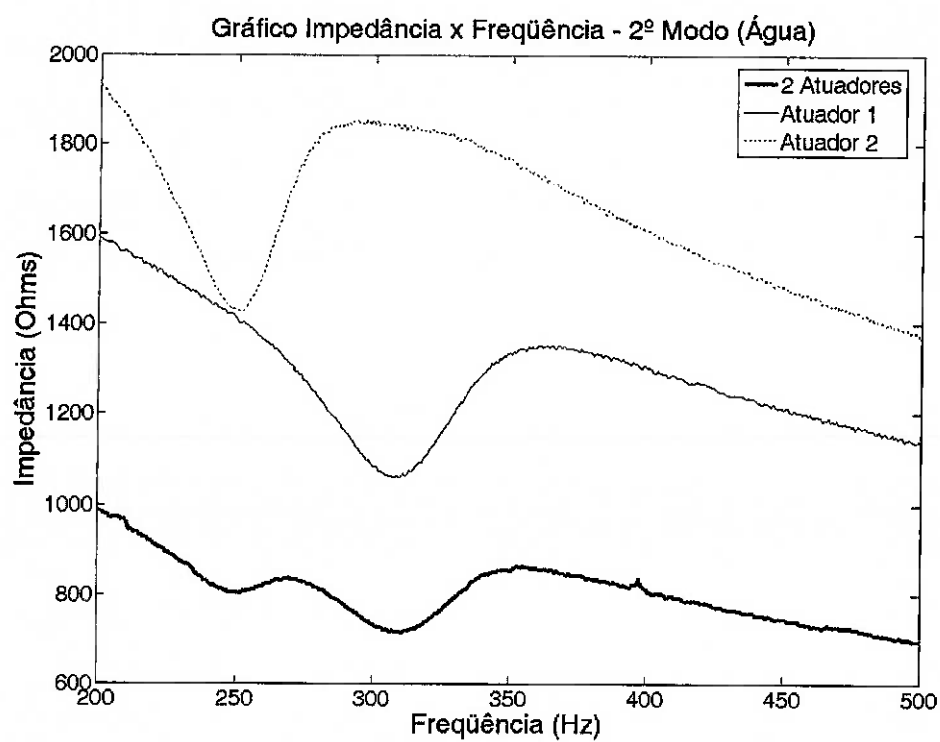


Fig. 7.28 – Detalhe do Gráfico Impedância x Frequência em torno do 2º modo para o meio água.

Após o levantamento das frequências de ressonância, foram feitos ensaios práticos do protótipo em questão. A frequência foi varrida para se encontrar as frequências de ressonância. No primeiro modo de vibrar (frequência de 13 Hz), pode-se notar uma pequena vazão, no sentido contrário, conforme ilustrado na fig. 7.29.

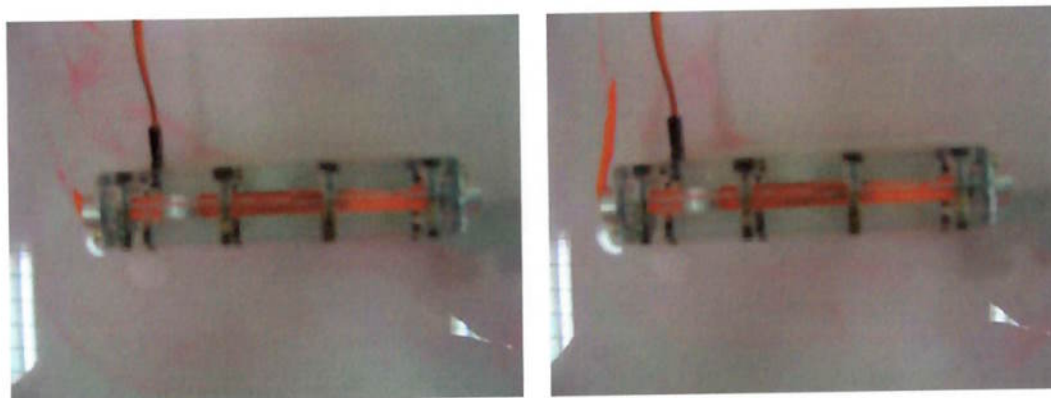


Fig. 7.29 – Ensaio do primeiro protótipo no primeiro modo de vibrar (13 Hz).

Para o primeiro modo, o protótipo gerou uma vazão muito baixa que não pode ser medida, já que o dispositivo de mede vazão gerava uma perda de carga muito grande e, portanto, impedia o funcionamento do protótipo.

Para o segundo modo (frequência de 280 Hz), notou-se que o protótipo gerou uma vazão um pouco maior do que a obtida no primeiro modo, embora o fluxo continuasse no sentido contrário. A fig. 7.30 ilustra o ensaio.

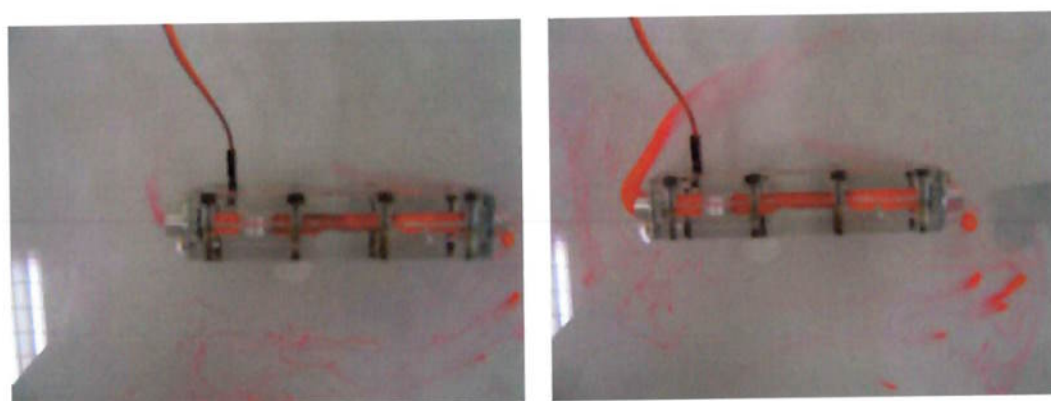


Fig. 7.30 – Ensaio do primeiro protótipo no segundo modo de vibrar (280 Hz).

Foi interessante notar que para uma excitação de frequência de 303 Hz o fluxo ocorreu no sentido desejado, mas a vazão permaneceu muito baixa, como nos ensaios anteriores. A fig. 7.31 ilustra o ensaio.

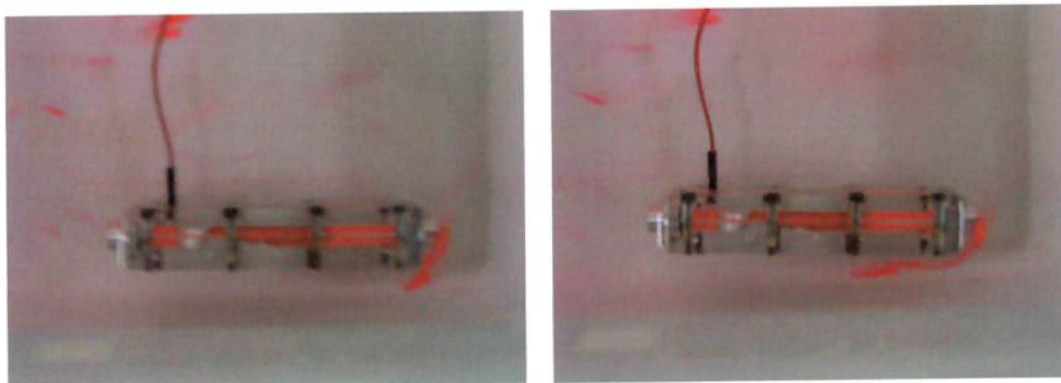


Fig. 7.31 – Ensaio para a frequência de 303 Hz.

Por fim, com base nos ensaios experimentais, pode-se concluir que:

- O protótipo de dois atuadores de parede em paralelo atendeu a curva de baixa vazão obtida pela simulação computacional (ver item 6.1), fato que valida o modelo computacional;
- A frequência com a qual se excita os atuadores pode interferir no sentido de escoamento do fluido;
- O protótipo foi testado até uma pressão de 12 kPa, comprovando a eficácia dos sistemas de vedação por interferência e de vedação por O’rings;
- O sistema de conectores facilitou a operação do protótipo, mas não é adequado para essa aplicação, pois há muita geração de bolhas provenientes da hidrólise da água.

## 7.2 Protótipo de Dois Atuadores em Paralelo

Conforme descrito na análise computacional (item 6.2.), a simulação apontou que a configuração de dois atuadores em paralelo em uma mesma bomba de fluxo gera maiores vazões do que o uso de duas bombas de fluxo de um único atuador.

Portanto, optou-se pela construção do protótipo para validar a análise computacional e avaliar a viabilidade da configuração proposta.

### 7.2.1 Análise de Soluções

Os atuadores desse protótipo foram dispostos em paralelo com entrada de 4,5 mm e distância de 2 mm entre os dois engastes. Os engastes possuem 2 mm de espessura. Decidiu-se empregar estas dimensões na fabricação do protótipo, pois esta configuração foi a que atingiu a maior vazão nas simulações computacionais (ver item 6.2.), como ilustrado na fig. 7.32. Atuadores comerciais serão utilizados neste protótipo. Os dois atuadores serão excitados em fase.

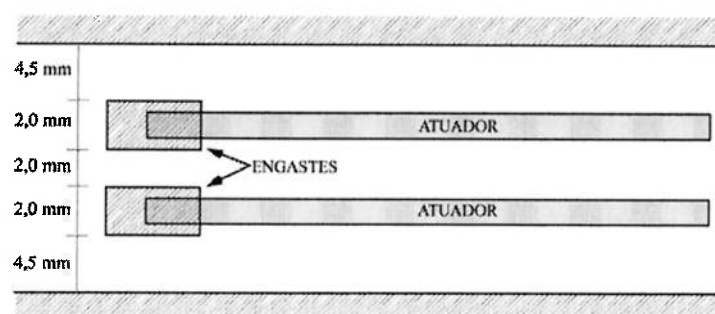


Fig. 7.32 – Esboço da disposição dos dois atuadores em paralelo

Embora o sistema de vedação por interferência (ver item 7.1.1.) adotado para o primeiro protótipo ter se mostrado eficiente, decidiu-se por usar uma manta de borracha para garantir a vedação entre as duas carcaças. Os perfis triangulares macho/fêmea usinados nas carcaças tem o propósito de guiar a montagem do protótipo de dois atuadores em paralelo.

Manta de borracha e O’rings foram utilizados como sistema de vedação para garantir a vedação entre a carcaça da bomba e a conexão onde será encaixada a mangueira externa. A vedação por O’rings se mostrou eficiente no protótipo anterior, por isso o sistema também foi adotado neste protótipo. A fig. 7.33 mostra o projeto do protótipo e a fig. 7.34 mostra a vista explodida do projeto.

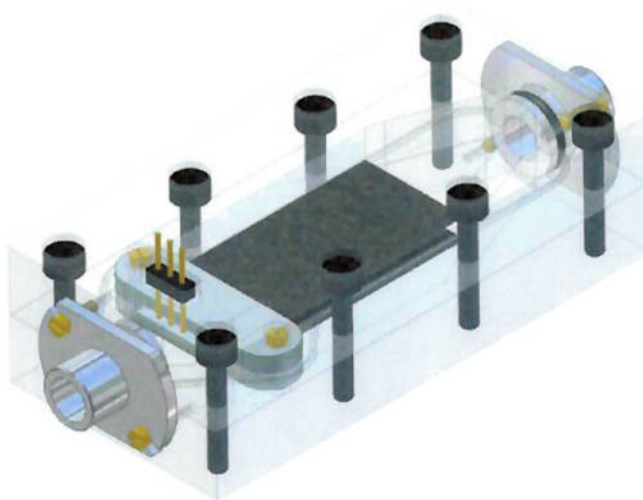


Fig. 7.33 – Projeto do protótipo de dois atuadores em paralelo.

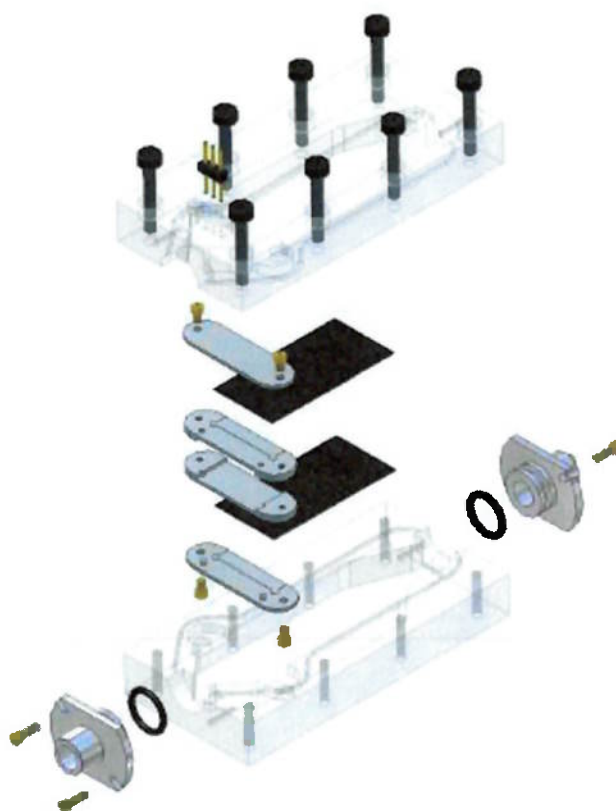


Fig. 7.34 – Vista explodida do projeto do protótipo de dois atuadores em paralelo.

### 7.2.2 Fabricação da Bomba

O protótipo de dois atuadores em paralelo também foi usinado no centro de usinagem CNC Deckel Maho, presente no Departamento de Engenharia Mecânica e Sistemas Mecatrônicos da Escola Politécnica. A fig. 7.35 mostra os componentes fabricados para a montagem do segundo protótipo.



Fig. 7.35 – Componentes fabricados do segundo protótipo.

Para colar os eletrodos nos atuadores, foi utilizado cabo envernizado 38 AWG 10 vias, diferente do utilizado no primeiro protótipo. Este cabo apresenta maior flexibilidade e maior resistência à fadiga. A fig. 7.36 exhibe os atuadores comerciais utilizados.

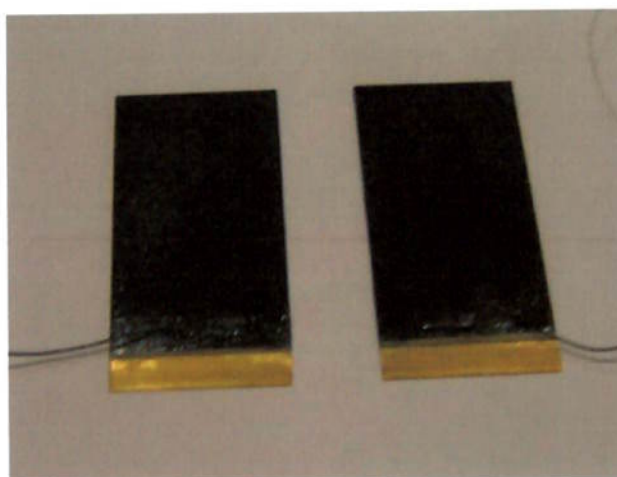


Fig. 7.36 – Atuadores utilizados no segundo protótipo.

O segundo protótipo montado pode ser visto nas figuras 7.37 a 7.39.

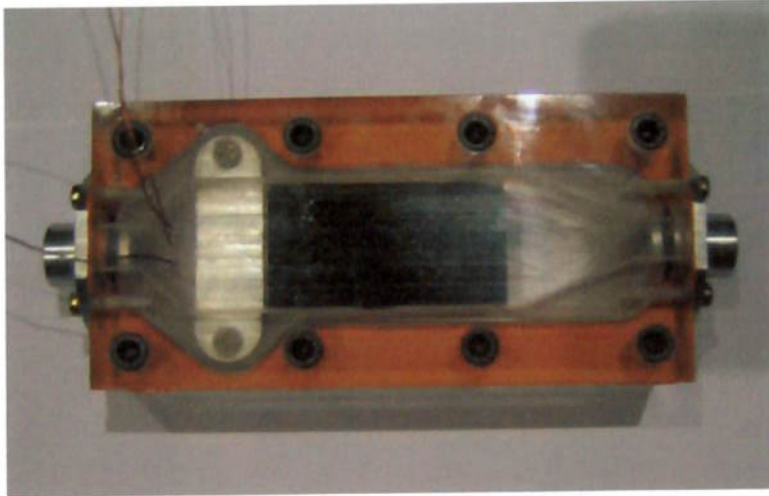


Fig. 7.37 – Segundo protótipo (vista superior).

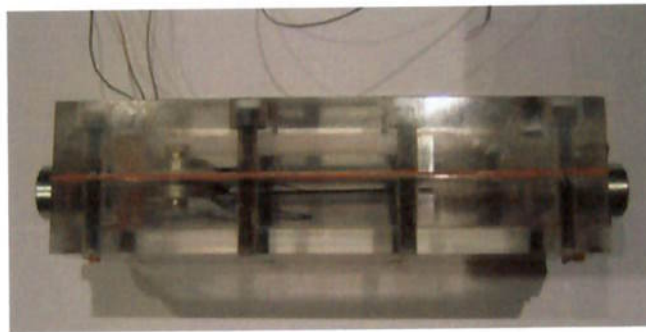


Fig. 7.38 – Segundo protótipo (vista lateral).



Fig. 7.39 – Segundo protótipo (vista isométrica).

### 7.2.3 Testes Preliminares do Segundo Protótipo

Após a construção da bomba, foi utilizado um impedômetro para mapear as frequências de ressonância dos atuadores comerciais para o meio ar e o meio água. Primeiramente, foi ensaiado um atuador por vez, separadamente. Em seguida, foram conduzidos ensaios para os dois atuadores ligados em paralelo. As frequências encontradas foram:

Tabela 7.3 – Ensaio dos atuadores piezelétricos do segundo protótipo (impedômetro).

Meio	1º Modo	2º Modo
Ar	115 e 140 Hz	1050 e 1120 Hz
Água	–	430 e 430 Hz

Obs: Não foi possível levantar o 1º modo pois o impedômetro realiza a varredura a partir de 100 Hz.

As fig. 7.40 a 7.44 mostram os ensaios realizados no impedômetro para meio ar e o meio água.

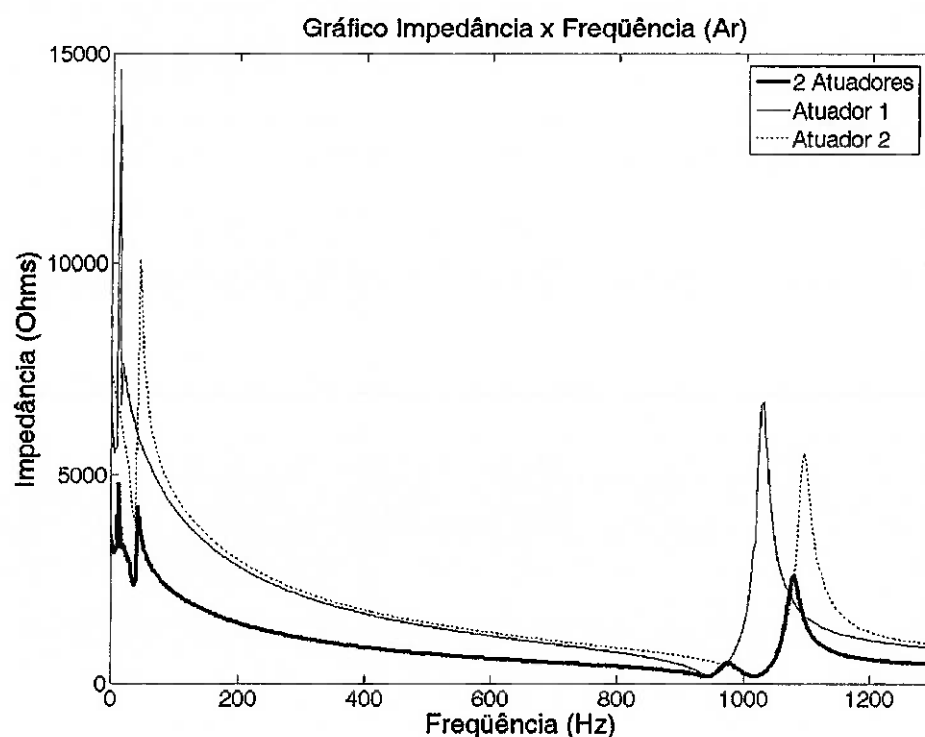


Fig. 7.40 – Gráfico Impedância x Frequência para o meio ar



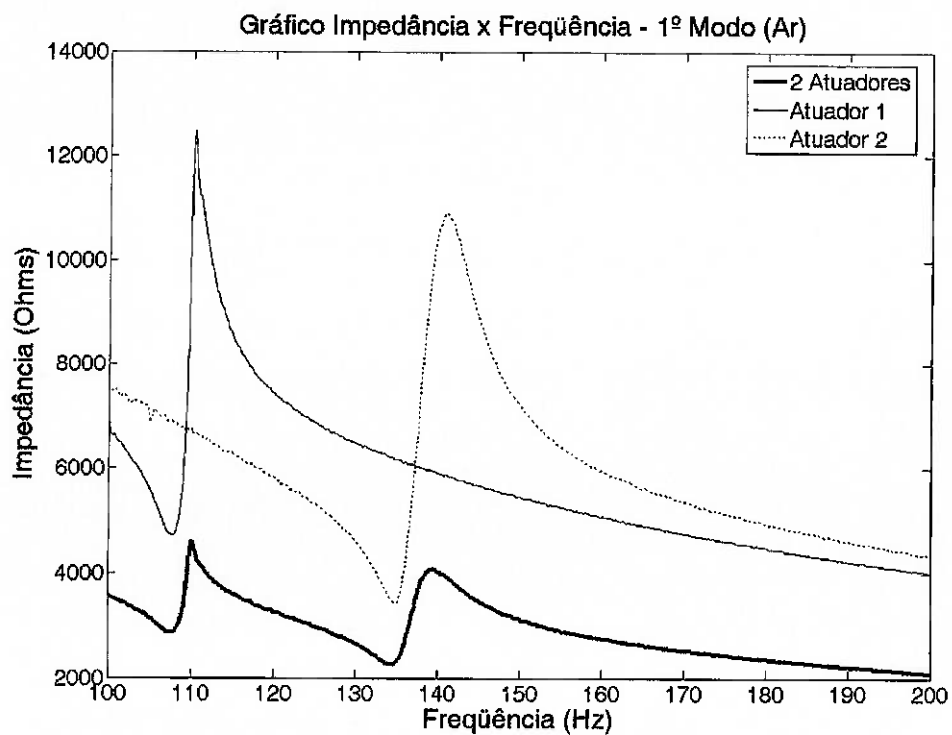


Fig. 7.41 – Detalhe do Gráfico Impedância x Frequência em torno do 1º modo para o meio ar.

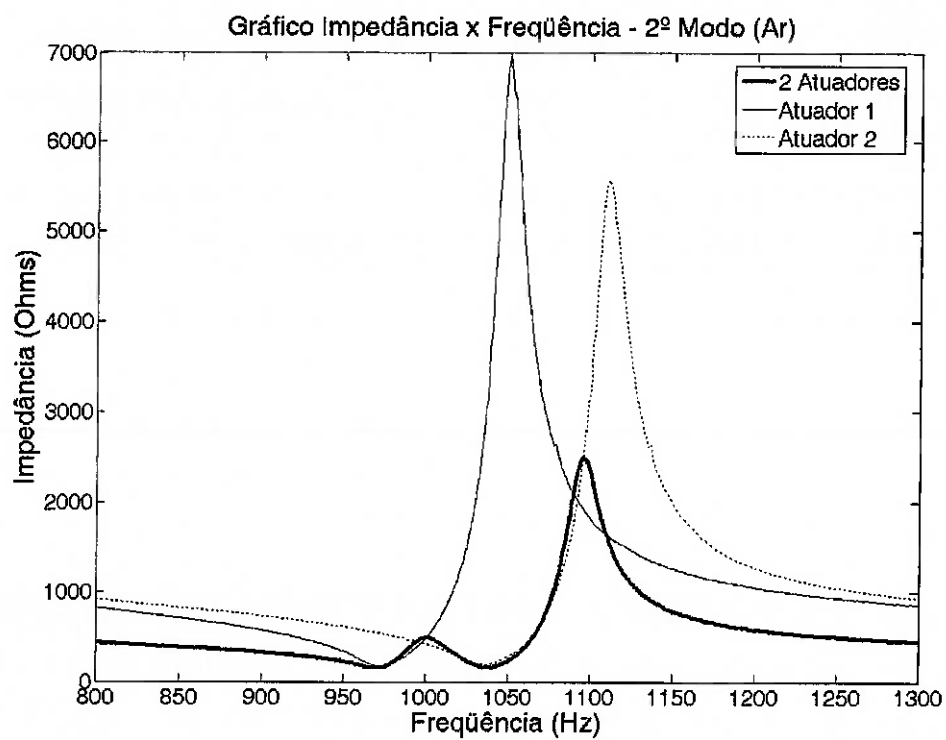


Fig. 7.42 – Detalhe do Gráfico Impedância x Frequência em torno do 2º modo para o meio ar.

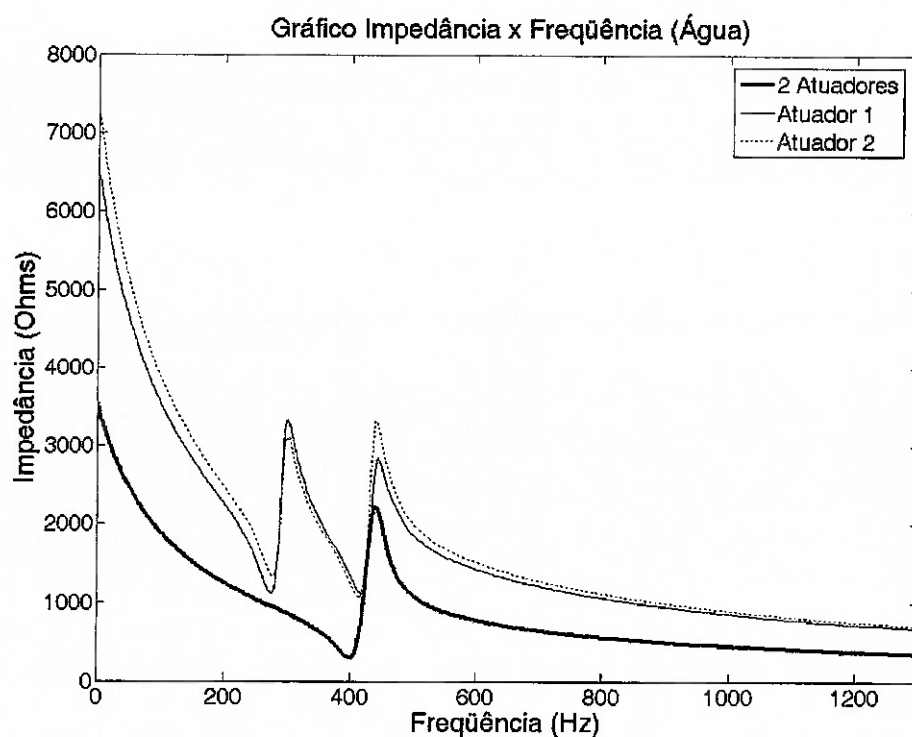


Fig. 7.43 – Gráfico Impedância X Frequência para o meio água.

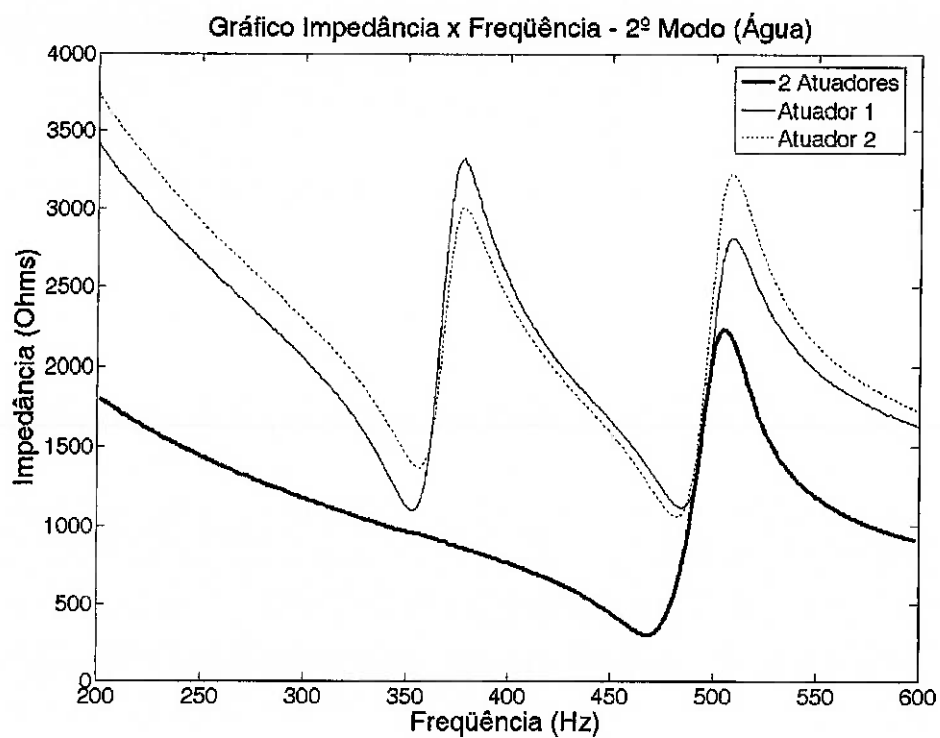


Fig. 7.44 – Detalhe do Gráfico Impedância X Frequência em torno do 2º modo para o meio água.

### 7.2.4 Resultados Experimentais do Segundo Protótipo

A frequência foi varrida para se encontrar as frequências de ressonância. As frequências de ressonância para o meio água encontradas experimentalmente foram:

Tabela 7.2 – Ensaio dos atuadores piezelétricos comerciais (impedômetro).

Meio	1º Modo	2º Modo
Água	41 Hz *	416 Hz

\* determinado experimentalmente, pois não foi possível observar o 1º modo no impedômetro, uma vez que este realiza a varredura a partir de 100 Hz.

O protótipo gerou uma vazão muito baixa no primeiro modo de vibrar, a qual não pôde ser medida, já que o instrumento de medição de vazão possuía uma perda de carga muito grande, impedindo assim o funcionamento do protótipo.

Já no segundo modo de vibrar (frequência de 416 Hz), pôde-se observar que o protótipo gerou uma vazão muito maior (44 cm<sup>3</sup>/min) em relação ao primeiro protótipo, embora o fluxo tenha continuado no sentido contrário. A fig. 7.45 ilustra o ensaio.

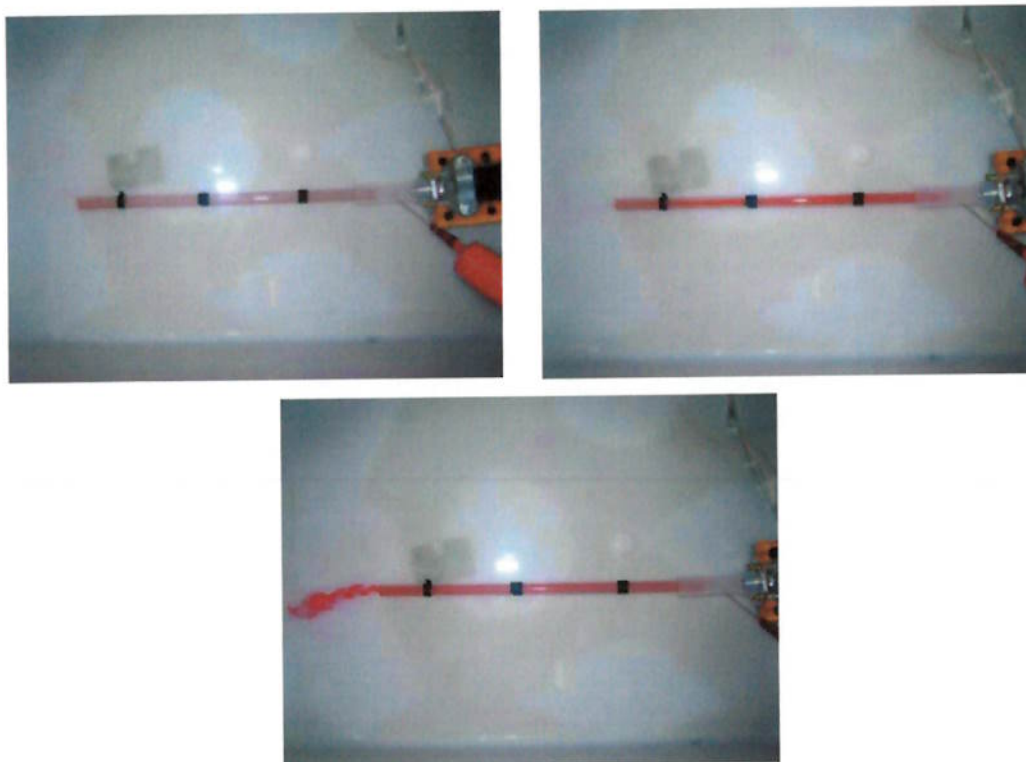


Fig. 7.45 – Ensaio do segundo protótipo no segundo modo de vibrar (416 Hz).

Por fim, com base nos ensaios experimentais, pode-se concluir que:

- O protótipo de dois atuadores em paralelo não atendeu a curva de vazão obtida pela simulação computacional, uma vez que o protótipo apresentou vazão máxima de  $44 \text{ cm}^3/\text{min}$  ao invés de  $90 \text{ cm}^3/\text{min}$  obtida computacionalmente. Uma hipótese para este fato é a ocorrência de fenômenos inexistentes nas simulações bidimensionais realizadas;
- O sentido de escoamento deu-se no sentido contrário ao esperado. Estima-se que o sentido de escoamento esteja relacionado vórtices 3D espúrios que não podem ser previstos na simulação computacional 2D. O sentido de escoamento será estudado em trabalhos futuros;
- O protótipo foi testado até a pressão de 40 kPa e os sistemas de vedação por manta de borracha e de vedação por O'rings funcionaram de maneira satisfatória;
- A hidrólise da água observada no primeiro protótipo não ocorreu neste segundo protótipo, mostrando que os eletrodos de cabo envernizado 38 AWG 10 vias são mais adequados a este tipo de aplicação.

## 8 CONCLUSÕES

Ao término deste trabalho de formatura foi possível verificar que a configuração de dois atuadores em paralelo proposta neste trabalho é viável, embora os testes realizados com o segundo protótipo não tenham atendido as curvas de vazão obtidas computacionalmente. Uma hipótese é a ocorrência de vórtices espúrios que surgem nas superfícies dos atuadores e que dificultam o escoamento, observados nos testes do segundo protótipo.

Outra conclusão importante foi a influência da espessura das cerâmicas piezelétricas no desempenho dos atuadores bilaminares, pois quanto menor for a espessura, maior será a amplitude de oscilação do atuador bilaminar e, conseqüentemente, melhor será o seu desempenho. Este fato foi comprovado tanto nas simulações computacionais quanto nos testes realizados com atuadores fabricados e comerciais.

A utilização da simulação computacional mostrou-se ser bastante importante no estudo de viabilidade, pois permite análises de sensibilidade que direcionam a pesquisa de forma ágil, rápida e econômica. A fabricação de protótipos também se mostrou importante como complemento das simulações computacionais, permitindo a verificação dos resultados obtidos computacionalmente e análise de fenômenos não considerados nos modelos computacionais.

O assunto abordado neste trabalho não está esgotado e ainda há possibilidades de aumento de vazão utilizando bombas de fluxo com atuadores piezelétricos bilaminares. Uma das possíveis soluções é a utilização de mais de dois atuadores em paralelo, conforme mostrado anteriormente. Este tema será tratado futuramente em um trabalho de mestrado.

Os autores deste trabalho de formatura deixam como sugestão de trabalhos futuros o estudo do sentido de escoamento em bombas de fluxo piezelétricas de princípio oscilatório, uma vez que foi observada a inversão do sentido de escoamento nos protótipos fabricados. Outro tópico bastante promissor é o estudo de viabilidade de bombas de fluxo piezelétricas operando com mais de dois atuadores em paralelo, pois foram obtidos resultados bastante satisfatórios nas simulações computacionais. Também é sugerido o estudo de bombas de fluxo de diafragma, que tem sido bastante pesquisado atualmente e possui um vasto campo de aplicações.

## 9 REFERÊNCIAS

ANSYS, "Release 10.0 Documentation for ANSYS", ANSYS, 2005.

ACIKALIN, T.; RAMAN, A.; GARIMELLA, S. V. **Two-dimensional streaming flows induced by resonating, thin beams.** *J. Acoustical Society of America*, v. 114 (4), p. 1785–1795, 2003.

ANDRADE, A.; BISCEGLI, J.; SOUSA, J.E.; OHASHI, Y.; HEMMINGS, S. GLUECK, J.; KAWAHITO, K.; NOSÉ, Y. **Characteristics of a Blood Pump Combining the Centrifugal and Axial Pumping Principles: The Spiral Pump,** *Artificial Organs*, Boston, v.20, 6, p. 605-612, jun. 1996.

BAR-COHEN Y.; CHANG Z. **Piezoelectrically Actuated Miniature Peristaltic Pump.** *In: 8<sup>th</sup> Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, Newport, CA, 2001.

BASAK, S.; RAMAN, A.; GARIMELLA, S. V. **Dynamic response optimization of piezoelectrically excited thin resonant beams.** *Transactions of the ASME - Journal of Vibrations and Acoustics*, v. 127, p. 18–27, 2005.

BÜRMANN P., R. A. G. S. V. **Dynamics and topology optimization of piezoelectric fans.** *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, v. 25, p. 592–600, 2003.

EYMOORI, M.M.; ABBASPOUR-SANI, E. **Design and Simulation of a novel Electrostatic Peristaltic Micromachined Pump for Drug Delivery Applications,** *Sensors and Actuator A-Physical*, Lausanne, v.117, f.2, p. 222-229, jan. 2005.

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

KIM, Y.; WERELY, S.; CHUN, C. **Phase-resolved flow field produced by a vibrating cantilever plate between two endplates.** *Physics of Fluids*, v. 16(1), p. 145–162, 2004.

LASER, D.J.; SANTIAGO, J.G. **A Review of Micropumps,** *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Bristol, v. 14, f.6, p. 35-64, 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.

LOH, B.G.; HYUN, S.; RO, P.I.; KLEINSTREUER, C. **Acoustic Streaming Induced By Ultrasonic Flexural Vibrations and Associated Enhancement of Convective Heat Transfer.** *Journal of the Acoustical Society of America*. Melville, v. 111, f. 2, p. 875-883, fev. 2002.

MIYAZAKI, S. I.; KAWAI, T.; ARARAGI, M. **A piezo-electric pump driven by a flexural progressive wave.** *In: IEEE*. [S.l.: s.n.], 1991.

NAKASONE, P.H.; **Estudo de viabilidade de uma bomba de fluxo piezelétrica utilizando simulação computacional,** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006. Tese de Mestrado.

OSTERGAARD, D.F., PAWLAK, T.P., **Three-Dimensional Finite Element for Analysing Piezoelectric Structures,** *Swanson Analysis System, Inc., IEEE, Ultrasonics Symposium*, pp. 639-644, Houston, EUA, 1986.

PIRES, R.F.; NAKASONE, P.H.; LIMA, C.R.; SILVA, E.C.N. **A Miniature Bimorph Piezoelectrically Actuated Flow Pump.** *SPIE 13<sup>th</sup> Annual Symposium on Smart Structures and Materials*, 2006, San Diego. *Proceedings of the SPIE 13<sup>th</sup> Annual Symposium on Smart Structures and Materials*. 2006.

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, 1999.

SHIRAHIGE, A.B.; SILVA, E.C.N. **Determinação de Amplitude de Vibração de Transdutores Piezelétricos por Interferometria Laser.** São Paulo: EPUSP, 2002.

SINGHAL, V.; GARIMELLA, S. V.; RAMAN, A. **Microscale pumping technologies for microchannel cooling systems.** *Applied Mechanics Reviews*, v. 57, p. 191–221, 2004.

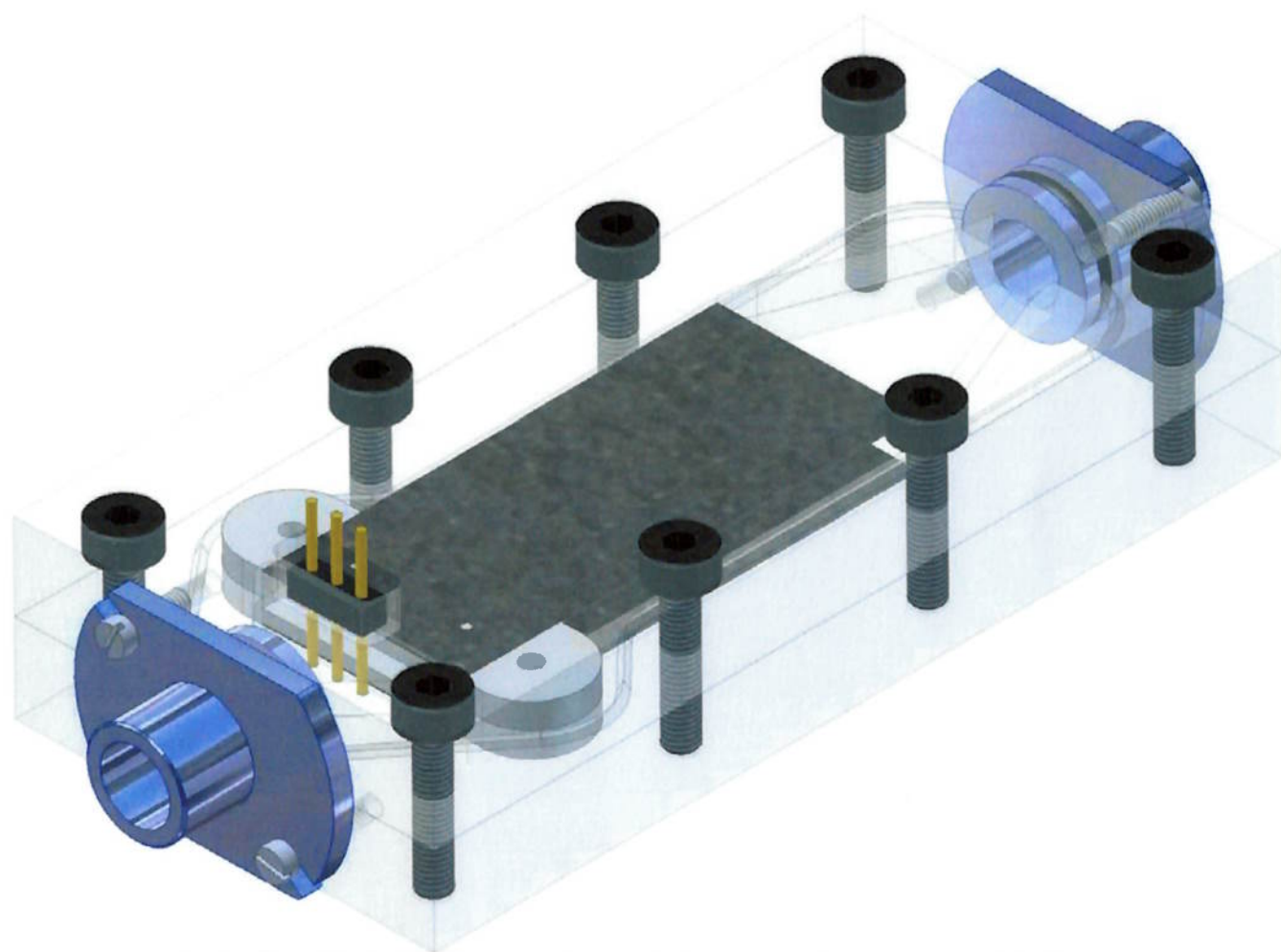
TRIAANTAFYLLOU, G. S.; TRIANTAFYLLOU, M. S.; GROSENBAUGH, M. A. **Optimal thrust development in oscillating foils with application to fish propulsion.** *Journal of Fluids and Structures*, v. 7, n. 2, p. 205–224, 1993.

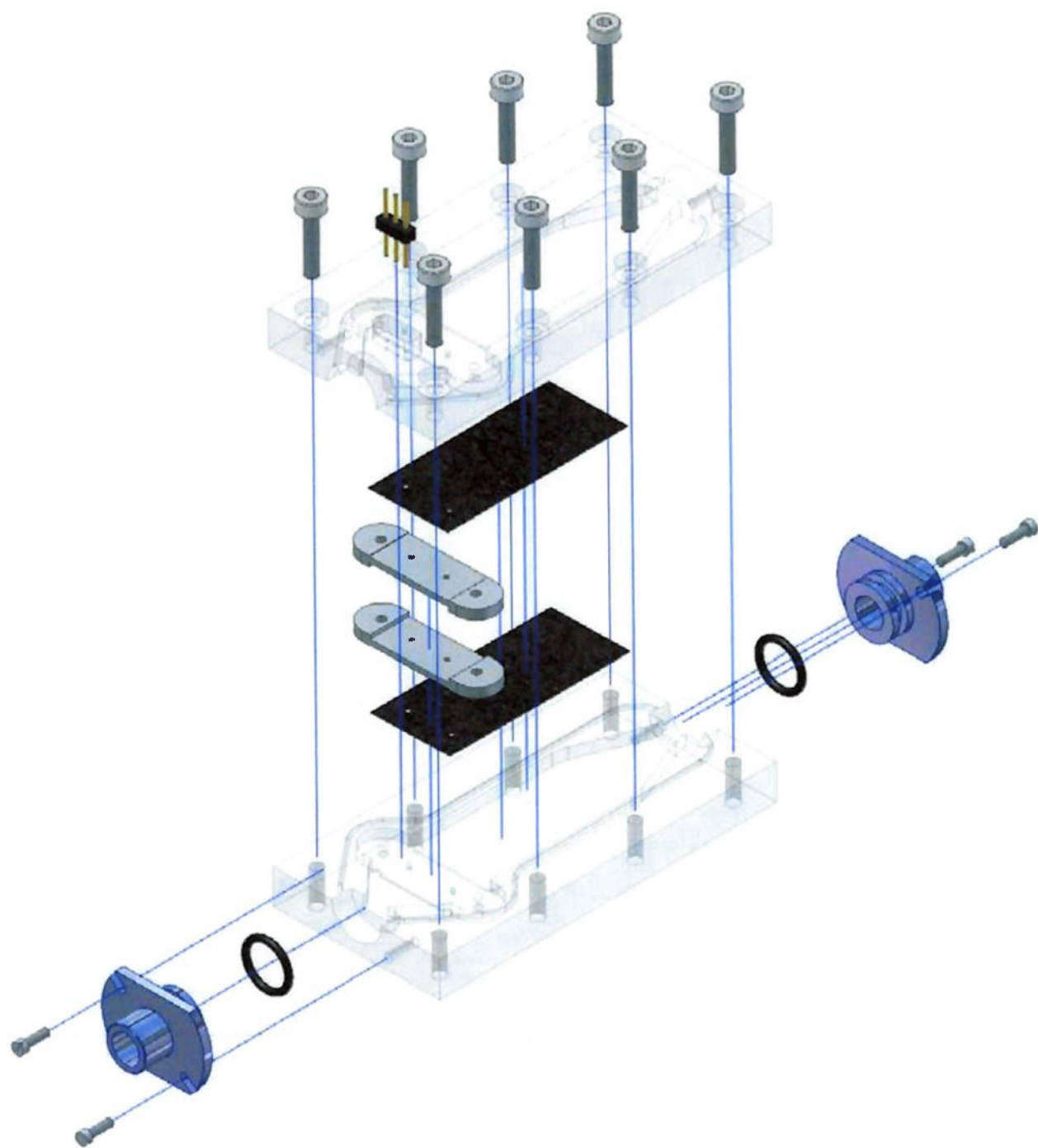
VIDELER, J. J.; MULLER, U. K.; STAMHUIS, E. J. **Aquatic Vertebrate Locomotion: Wakes from Body Waves.** *Journal of Experimental Biology*, v. 202, n. 23, p. 3423–3430, 1999.

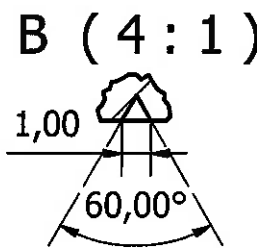


## **APÊNDICE A – DESENHOS TÉCNICOS DO PRIMEIRO PROTÓTIPO (DOIS ATUADORES DE PAREDE EM PARALELO)**

Neste apêndice encontram-se os desenhos técnicos utilizados na fabricação do protótipo de dois atuadores de parede em paralelo.

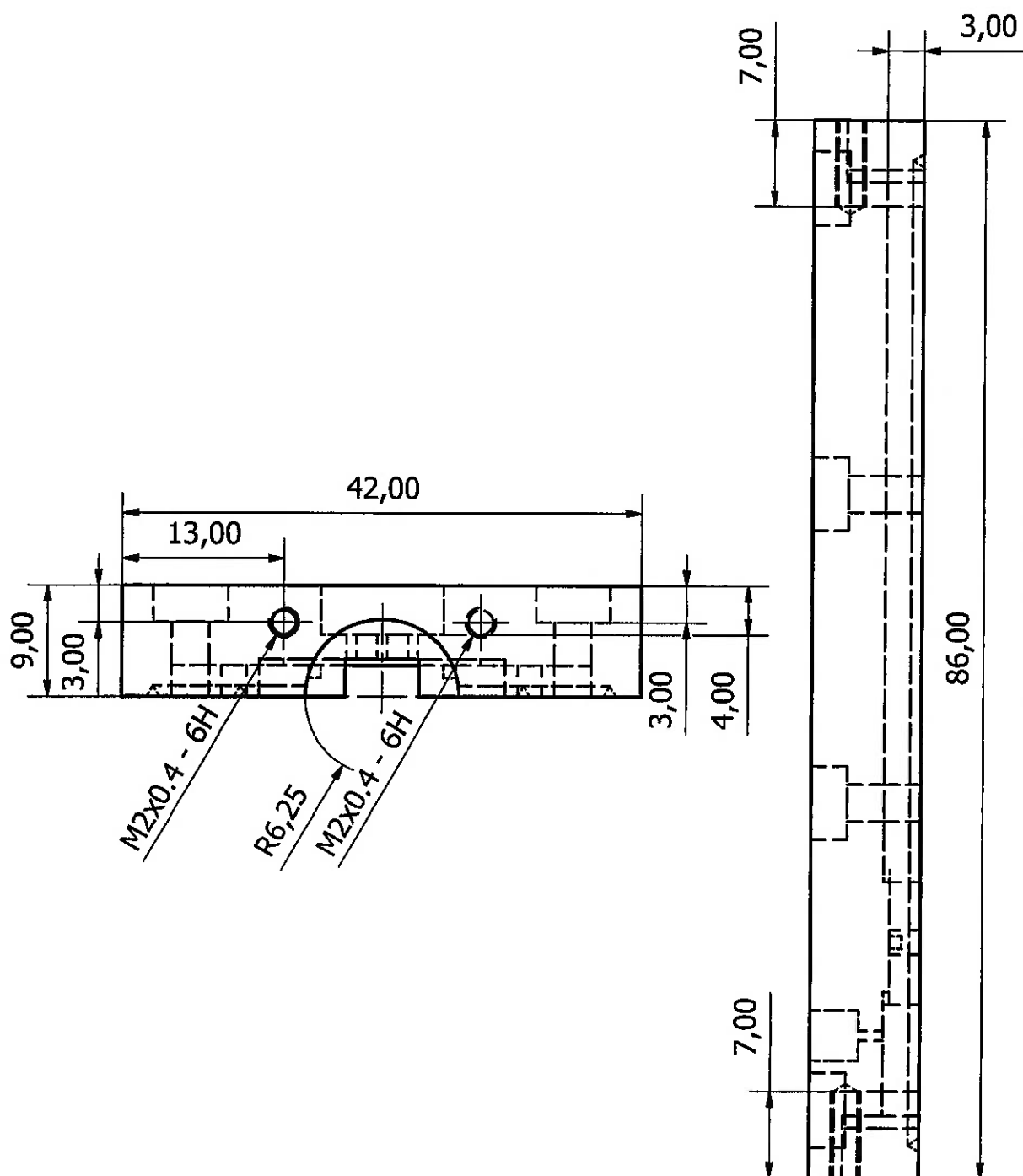






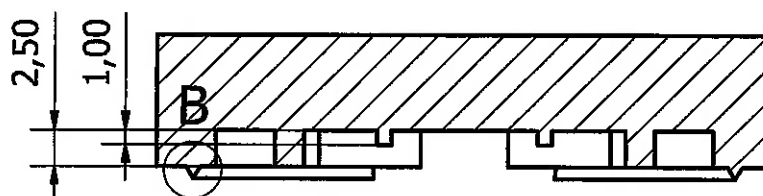
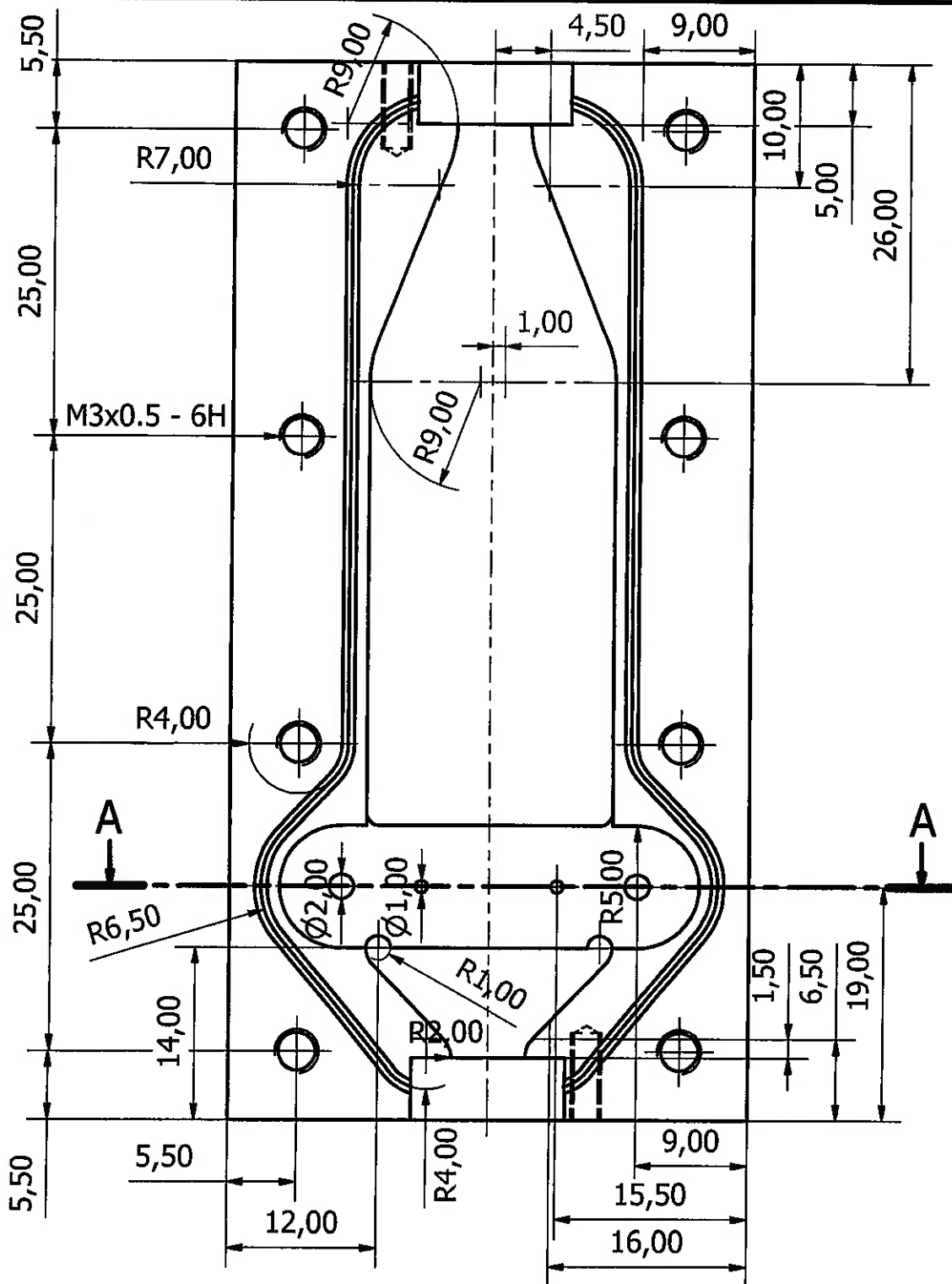
A-A (2:1)

Designed by Andres Choi	Approved by Sandro Vatanabe	Escala <b>2:1</b>	Date 13/4/06	Date 13/4/06	Material Acrílico
Escola Politécnica da USP		P1-UPPERASSEMBLY			
PMR 2500				Edition 0	Sheet 1 / 2

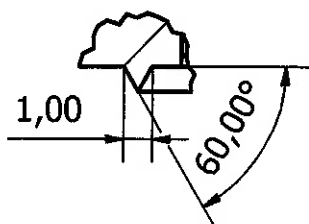


Medida em milímetros.

Designed by Andres Choi	Approved by Sandro Vatanabe	Escala <b>2:1</b>	Date 13/4/06	Date 13/4/06	Material Acrílico
Escola Politécnica da USP		P1-UPPERASSEMBLY			
PMR 2500		Edition 0		Sheet 2 / 2	

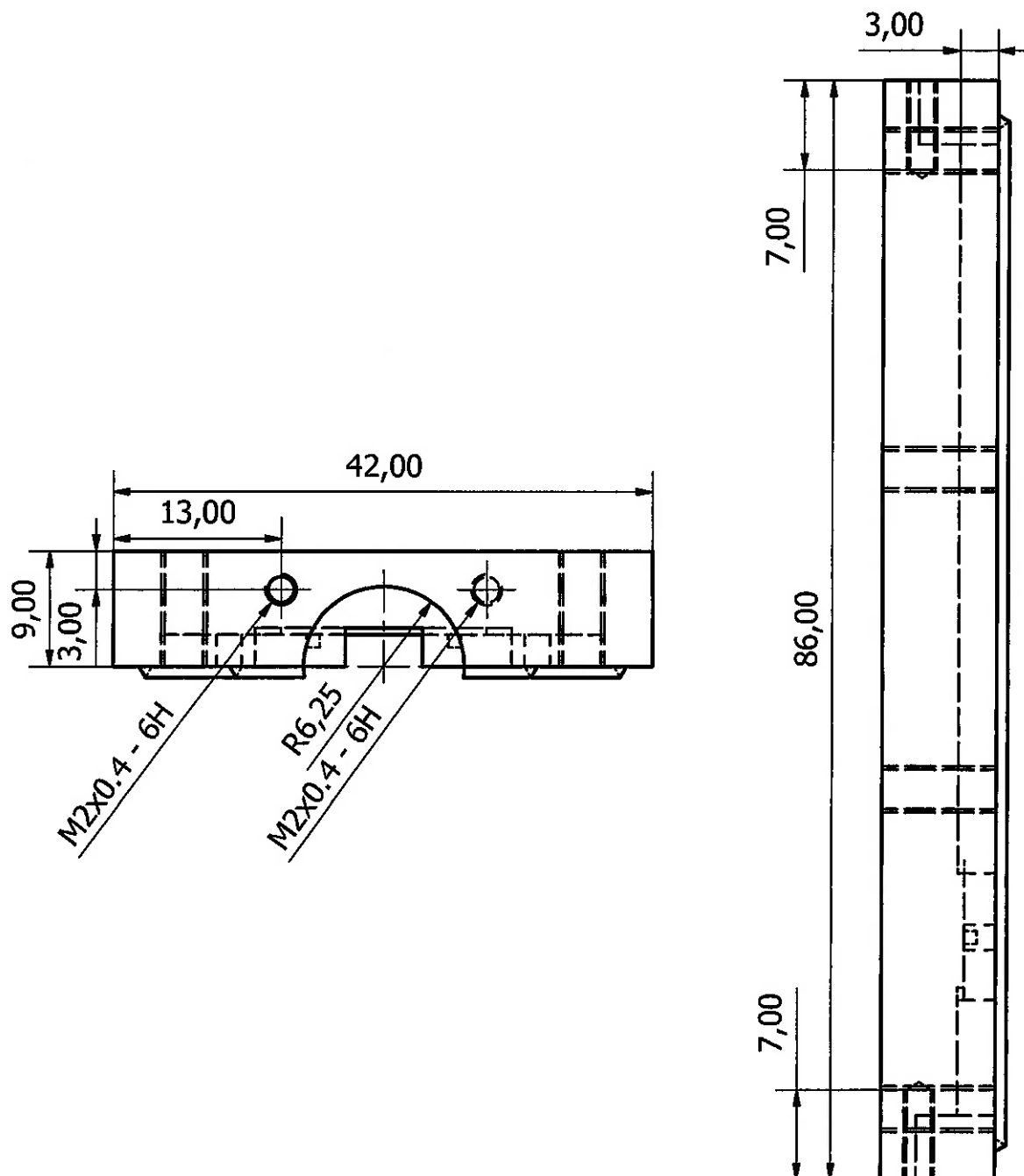


B (4:1)



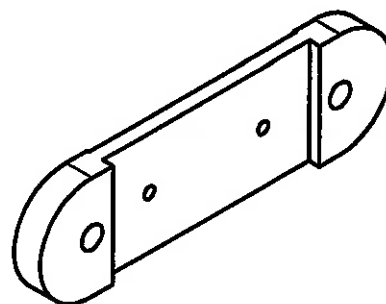
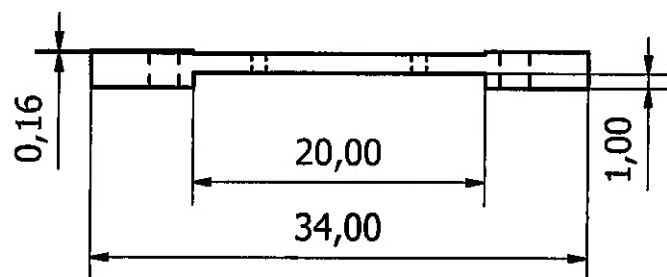
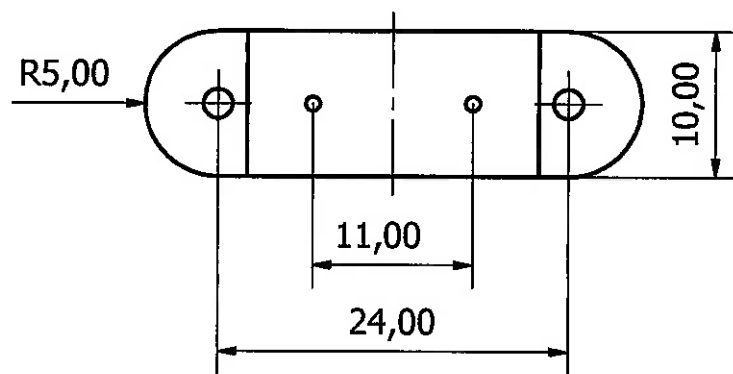
Medida em milímetros.

Designed by Andres Choi	Approved by Sandro Vatanabe	Escala 2:1	Date 13/4/06	Date 13/4/06	Material Acrílico
Escola Politécnica da USP		P1 - LOWERASSEMBLY			
PMR 2500		P1-LOWERASSEMBLY		Edition 0	Sheet 1 / 2



Medida em milímetros.

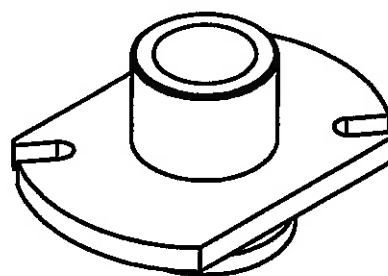
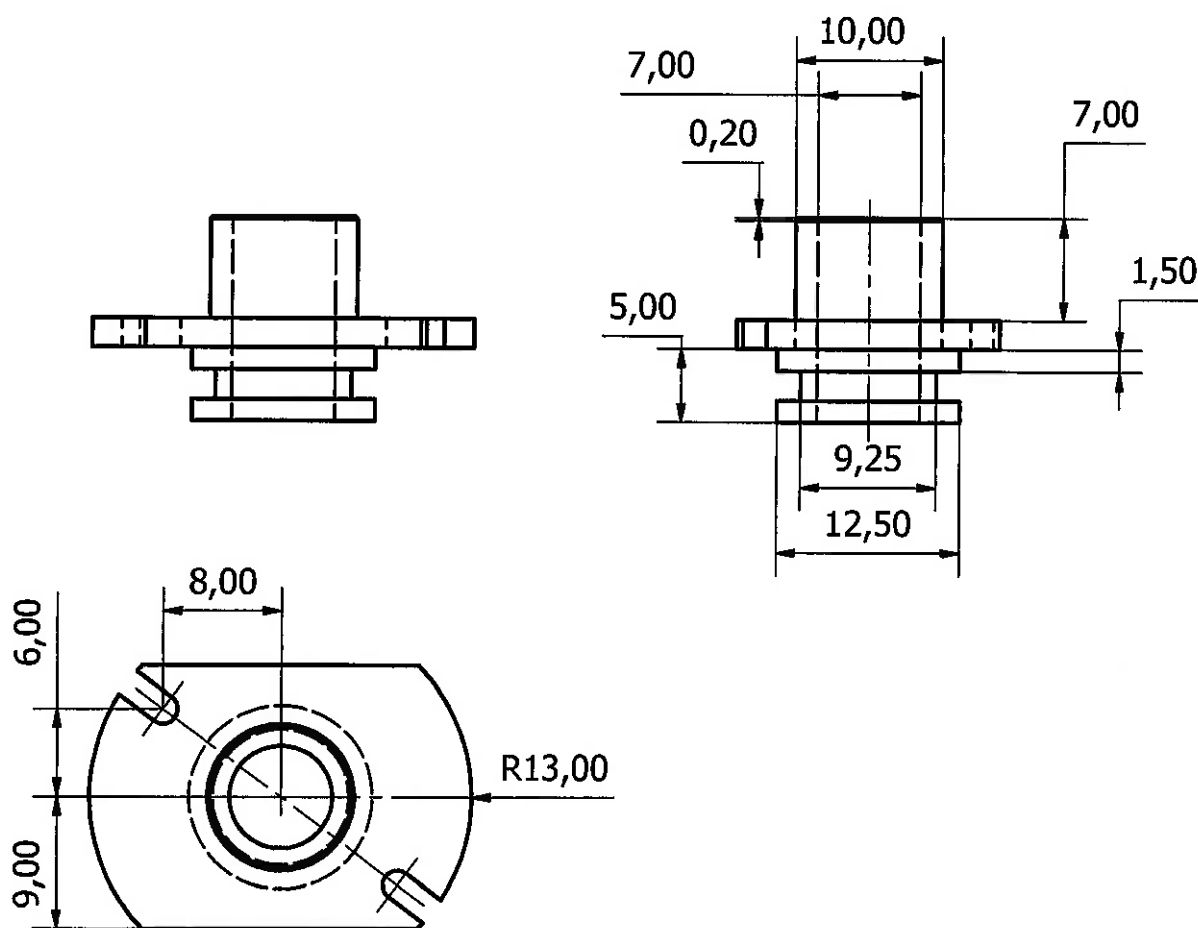
Designed by Andres Choi	Approved by Sandro Vatanabe	Escala <b>2:1</b>	Date 13/4/06	Date 13/4/06	Material Acrílico
Escola Politécnica da USP		P1 - LOWERASSEMBLY			
PMR 2500		P1-LOWERASSEMBLY		Edition 0	Sheet 2 / 2



Medidas em milímetros.

Designed by Andres Choi	Approved by Sandro Vatanabe	Escala <b>2:1</b>	Date 13/4/06	Date 13/4/06	Material Alumínio
Escola Politécnica da USP		P1 - ENGASTE			
PMR 2500		P1-ENGASTE		Edition 0	Sheet 1 / 1



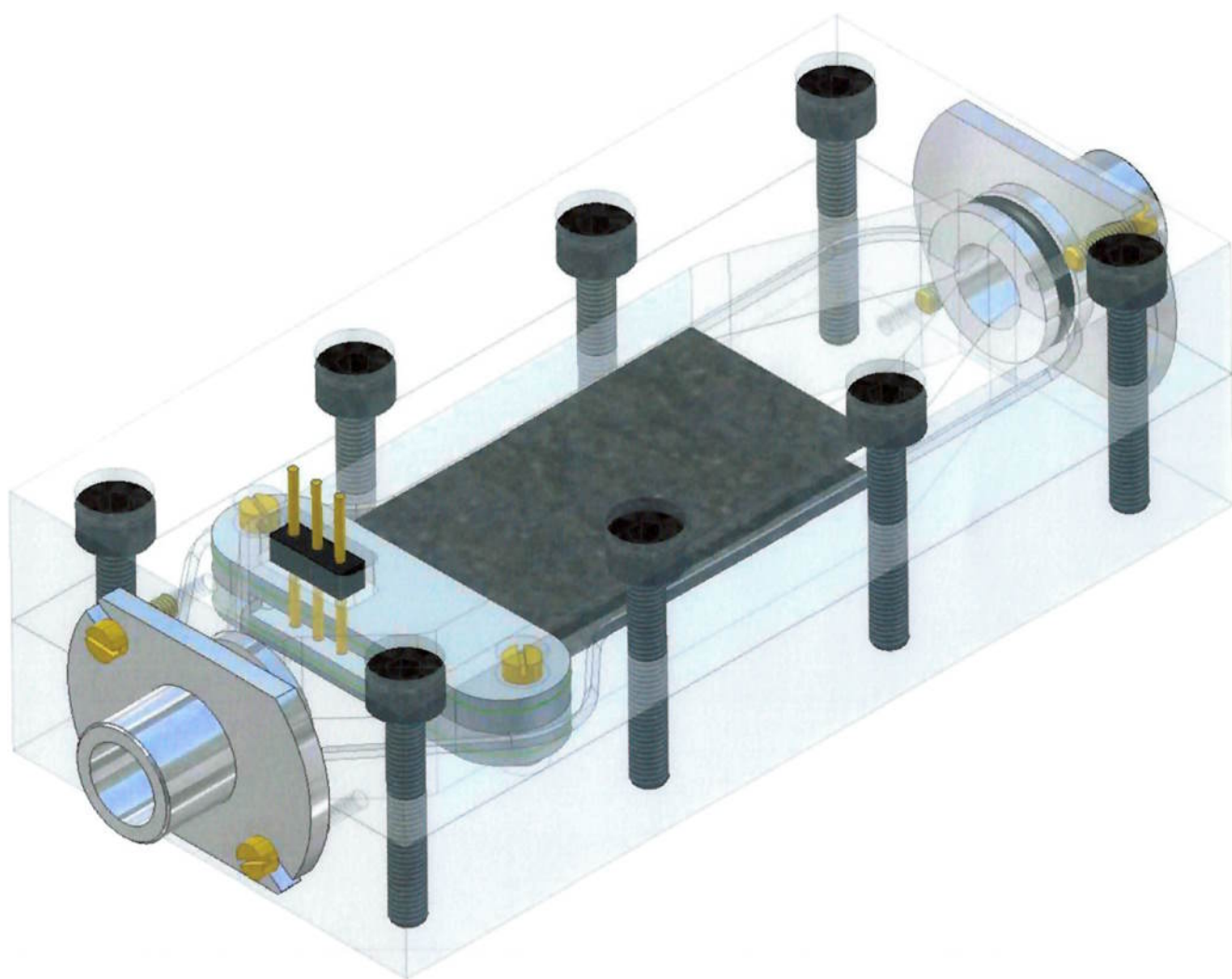


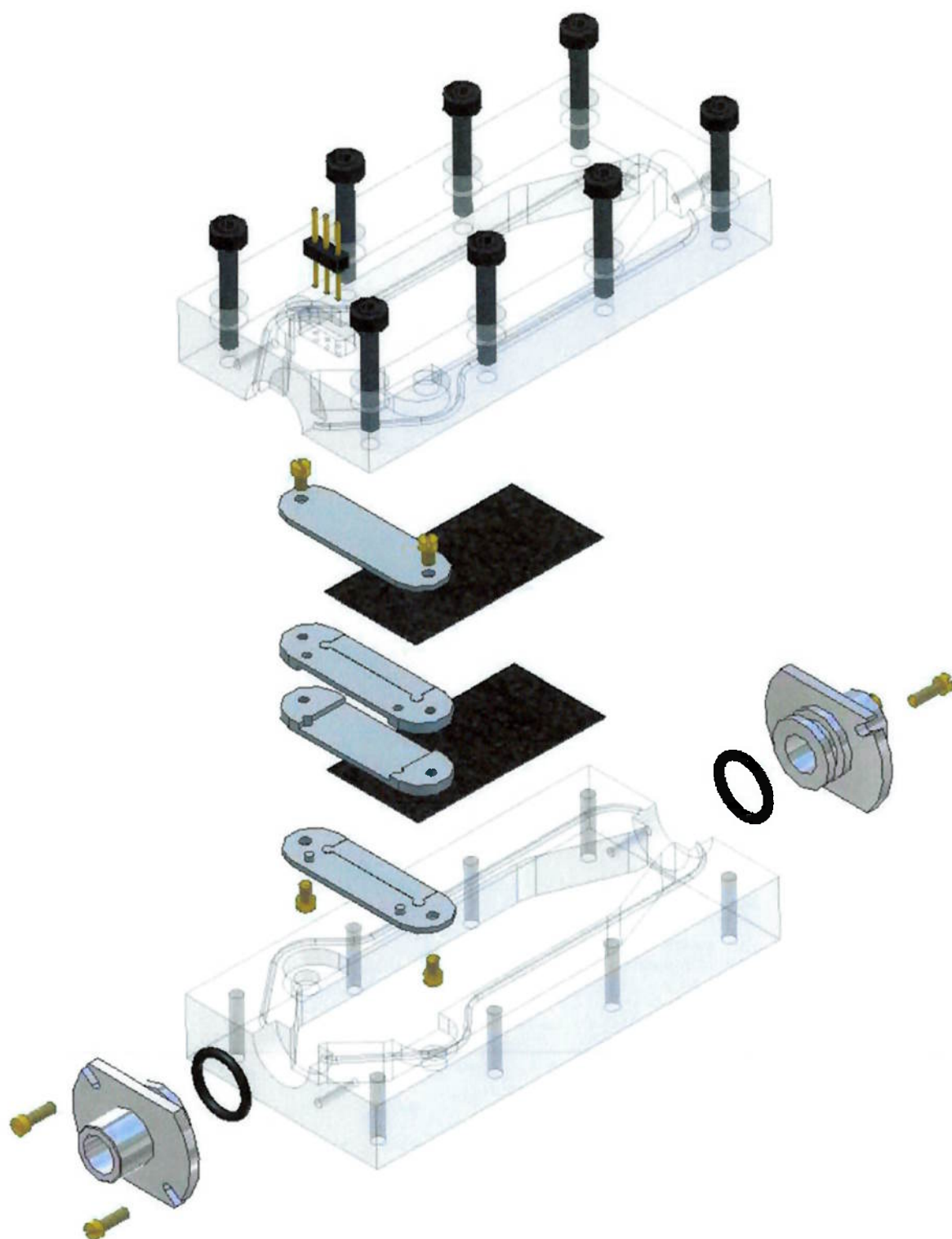
Medida em milímetros.

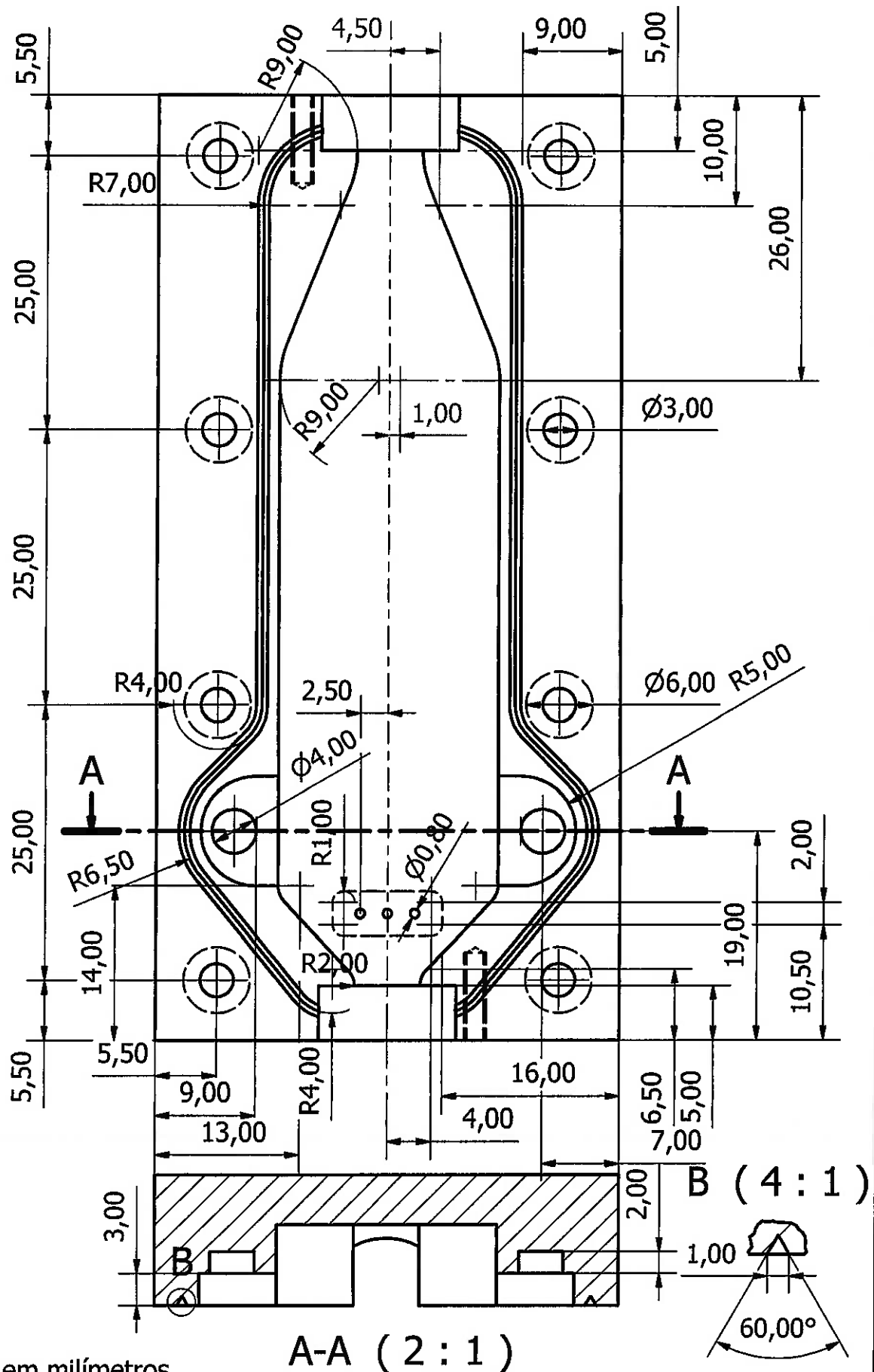
Designed by Andres Choi	Approved by Sandro Vatanabe	Escala <b>2:1</b>	Date 13/4/06	Material Alumínio
Escola Politécnica da USP		P1 - FITTING		
PMR 2500			Edition 0	Sheet 1 / 1

## **APÊNDICE B – DESENHOS TÉCNICOS DO SEGUNDO PROTÓTIPO (DOIS ATUADORES EM PARALELO)**

Neste apêndice encontram-se os desenhos técnicos utilizados na fabricação do protótipo de dois atuadores em paralelo.





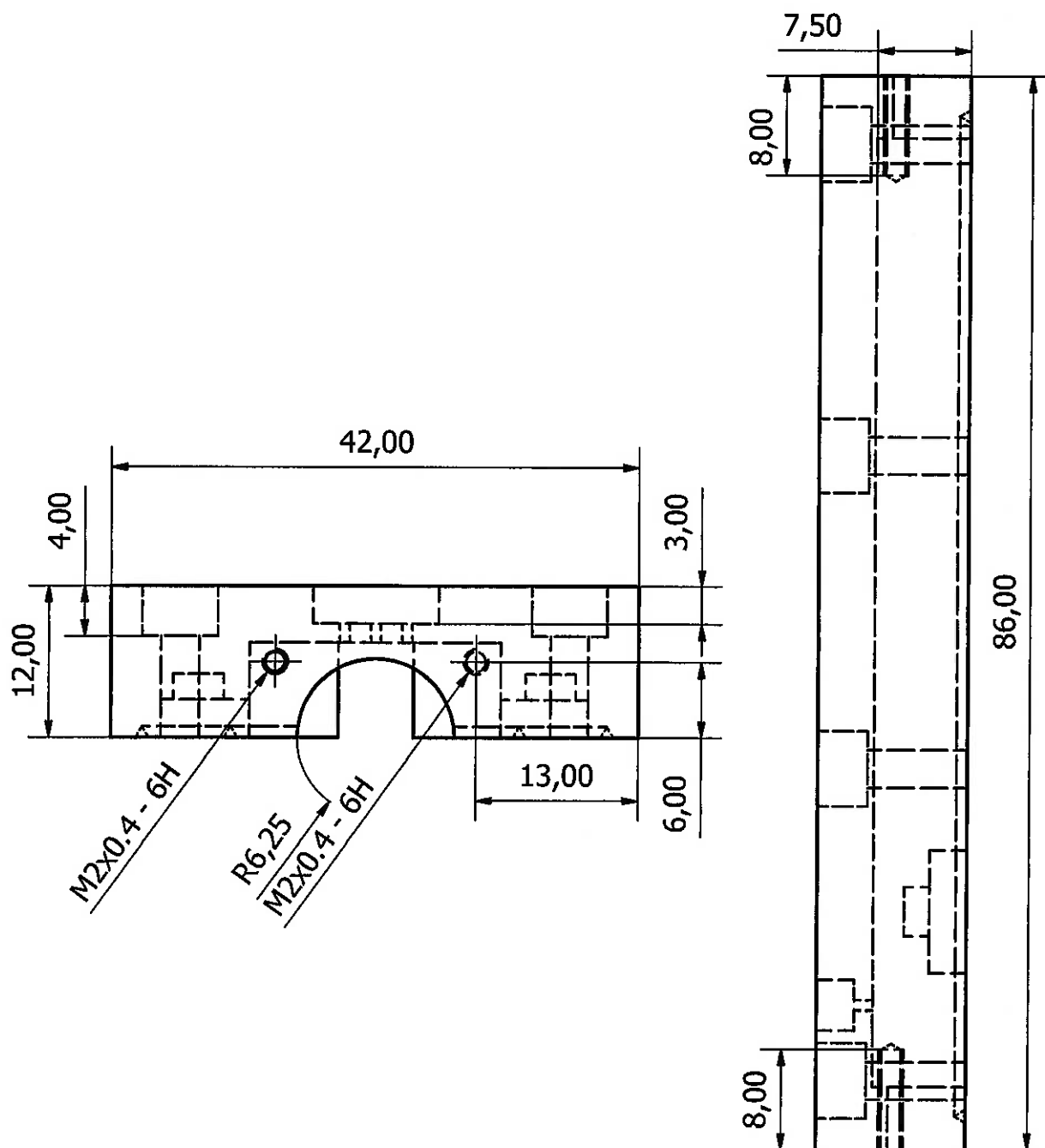


Medidas em milímetros.

A-A ( 2 : 1 )

B ( 4 : 1 )

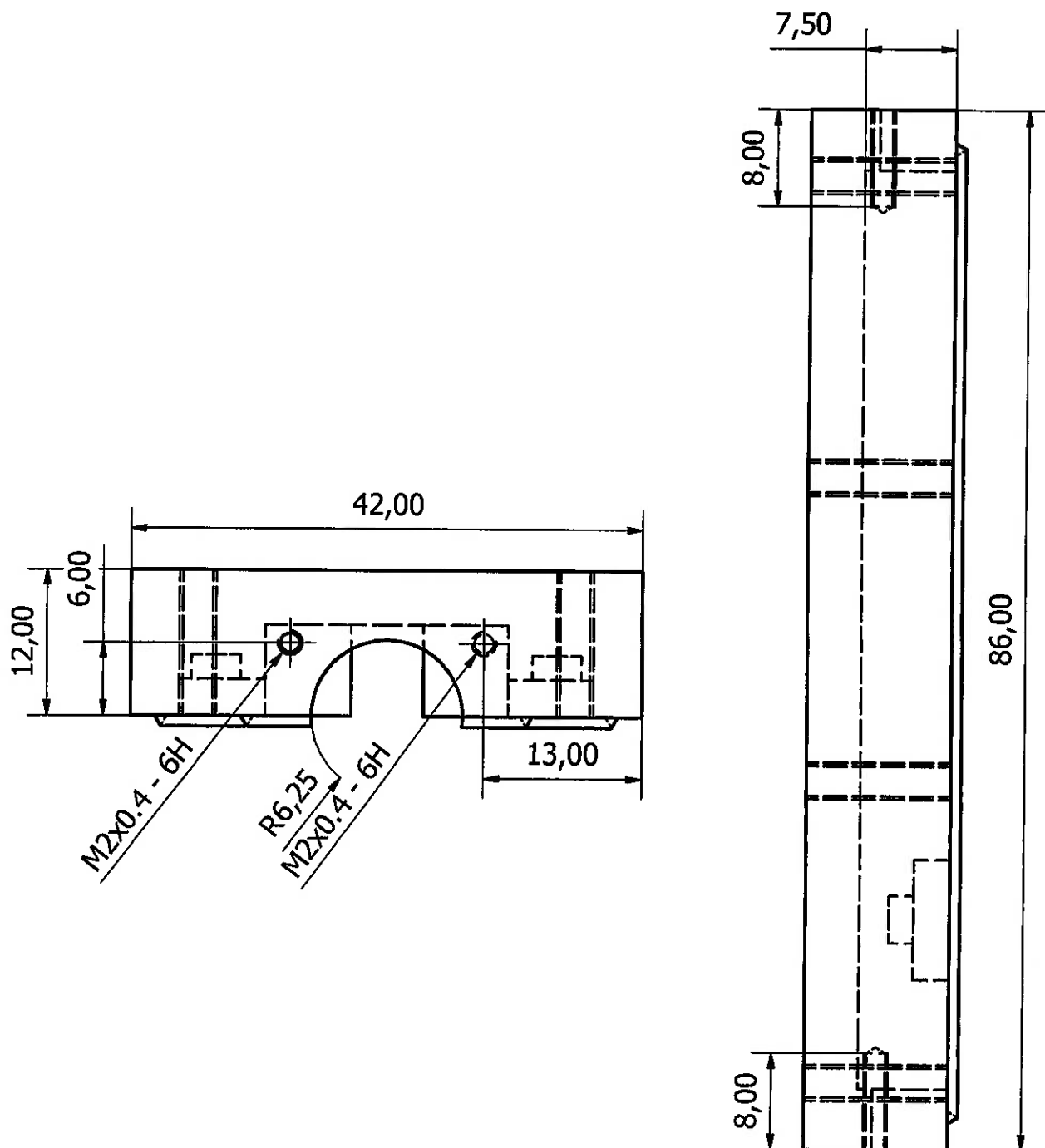
Designed by Andres	Checked by Sandro Vatanabe	Escala 2:1	Date 2/10/2006	Material Acrílico
Escola Politécnica da USP		P2 - UPPERASSEMBLY		
PMR 2550		P2-UPPERASSEMBLY	Edition 0	Sheet 1 / 2



Medidas em milímetros.

Designed by Andres	Checked by Sandro Vatanabe	Escala 2:1	Date 2/10/2006	Material Acrílico
Escola Politécnica da USP		P2 - UPPERASSEMBLY		
PMR 2550		P2-UPPERASSEMBLY	Edition 0	Sheet 2 / 2

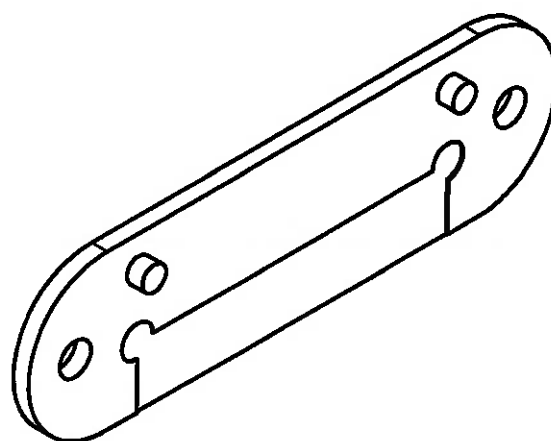
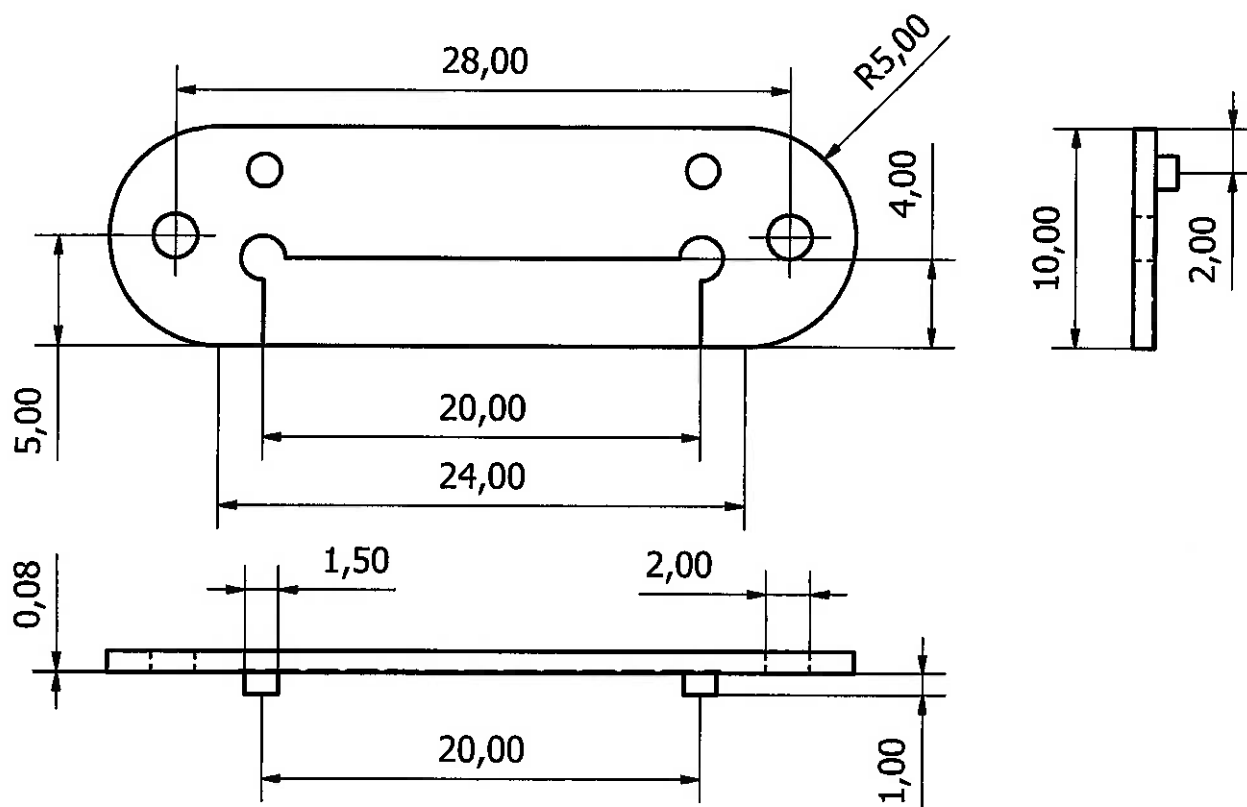
Designed by Andres Choi	Checked by Sandro Vatanabe	Escala 2:1	Date 2/10/2006	Material Acrílico
Escola Politécnica da USP		P2 - LOWERASSEMBLY		
PMR 2550		P2-LOWERASSEMBLY	Edition 0	Sheet 1 / 2



Medidas em milímetros.

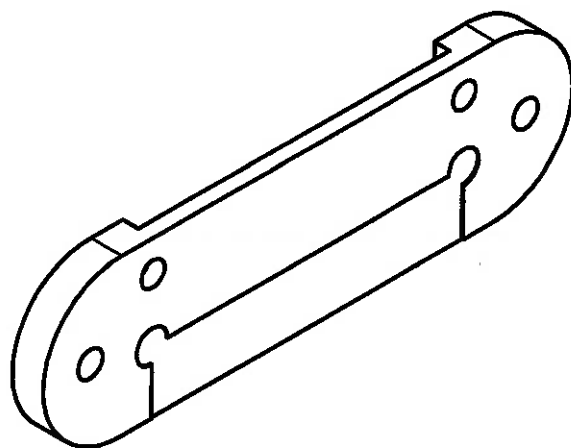
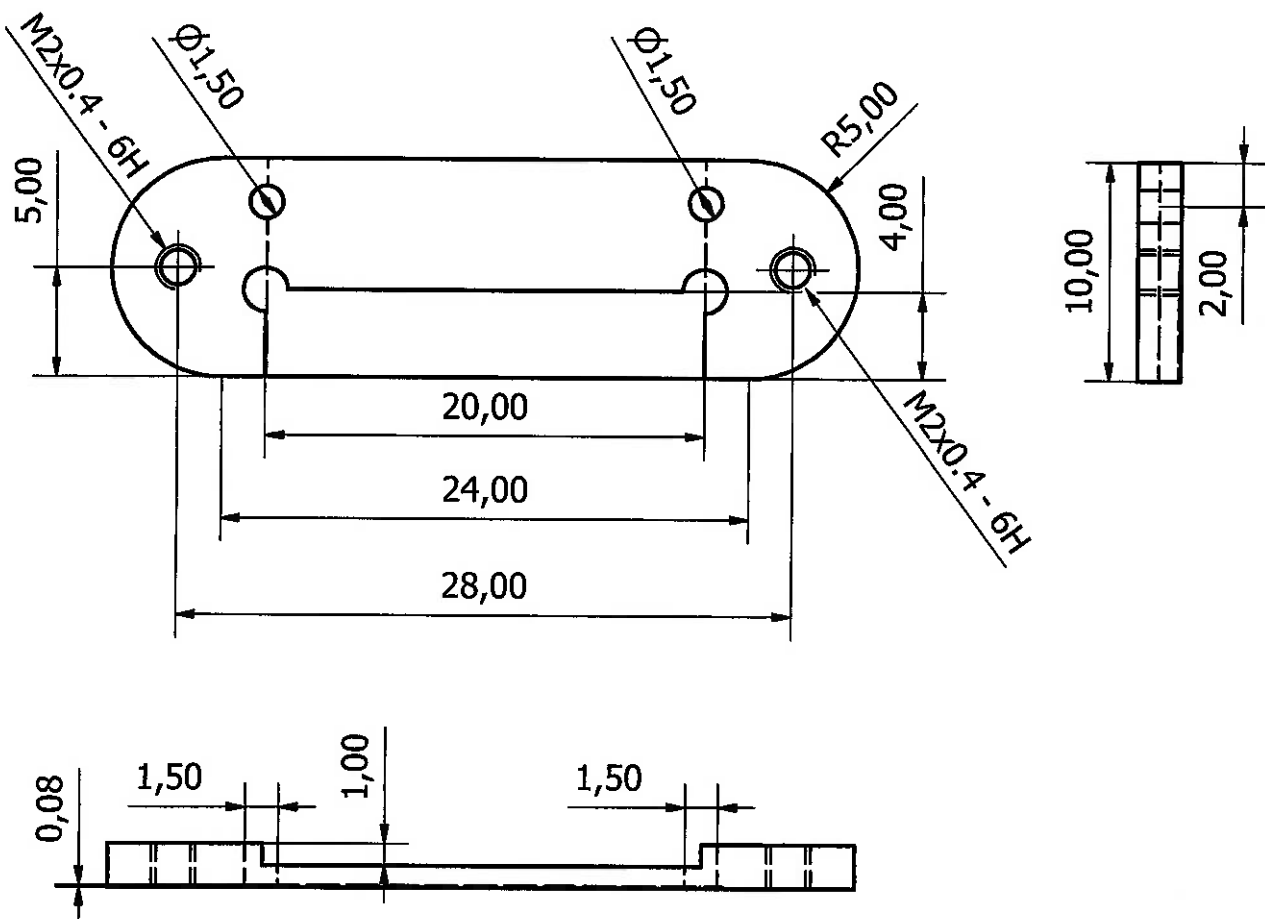
Designed by Andres Choi	Checked by Sandro Vatanabe	Escala 2:1	Date 2/10/2006	Material Acrílico
Escola Politécnica da USP		P2 - LOWERASSEMBLY		
PMR 2550		P2-LOWERASSEMBLY	Edition 0	Sheet 2 / 2





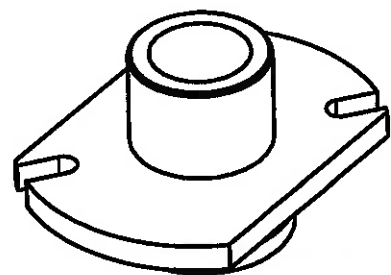
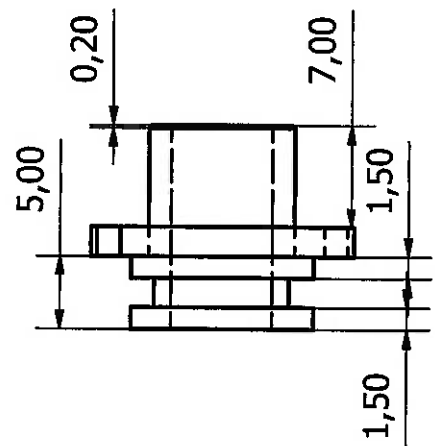
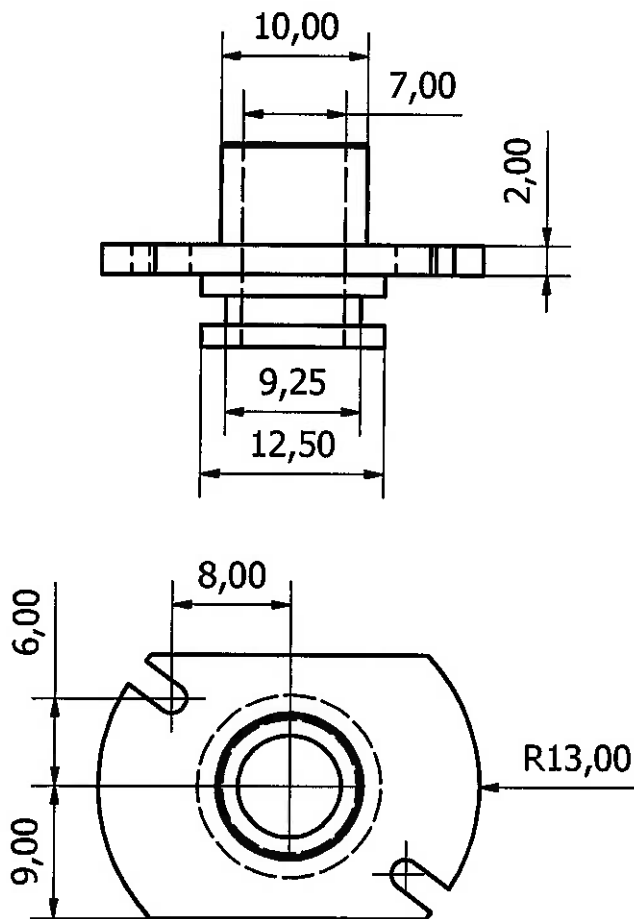
Medidas em milímetros.

Designed by Andres Choi	Checked by Sandro Vatanabe	Escala 3:1	Date 2/10/2006	Material Alumínio
Escola Politécnica da USP		P2 - ENGASTE 1		
PMR 2550		P2-ENGASTE1	Edition 0	Sheet 1 / 1



Medidas em milímetros.

Designed by Andres	Checked by Sandro Vatanabe	Escala 3:1	Date 2/10/2006	Material Alumínio
Escola Politécnica da USP		P2-ENGASTE2		
PMR 2550		P2-ENGASTE2	Edition 0	Sheet 1 / 1



Medidas em milímetros.

Designed by Andres Choi	Checked by Sandro Vatanabe	Escala 2:1	Date 2/10/2006	Material Alumínio
Escola Politécnica da USP		P2 - FITTING		
PMR 2550		P2-FITTING	Edition 0	Sheet 1 / 1