

PAULO HENRIQUE NAKASONE

ROGÉRIO FELIPE PIRES

Note final
9,0 (muito bom)

[Signature]

22/01/04

ESTUDO DA VIABILIDADE DE UMA BOMBA DE FLUXO PIEZELÉTRICA

TRABALHO DE FORMATURA

APRESENTADO À ESCOLA

POLITÉCNICA PARA OBTENÇÃO DO

TÍTULO DE BACHAREL EM

ENGENHARIA

SÃO PAULO

2003

PAULO HENRIQUE NAKASONE
ROGÉRIO FELIPE PIRES

ESTUDO DA VIABILIDADE DE UMA BOMBA DE FLUXO PIEZELÉTRICA

TRABALHO DE FORMATURA
APRESENTADO À ESCOLA
POLITÉCNICA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE BACHAREL EM
ENGENHARIA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
ENGENHARIA MECATRÔNICA

ORIENTADOR:
PROF. DR. EMÍLIO CARLOS NELLI
SILVA

SÃO PAULO

2003

À nossos pais e amigos, que sempre nos apoiaram e
incentivaram durante esses anos.

À Escola Politécnica, por todo nosso aprendizado e
incentivo em trilhar os rumos do conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli Silva pelas diretrizes seguras e permanente incentivo.

A nossos pais, que não mediram esforços em nos apoiar no decorrer de nossa graduação.

À Smarttech, pelo auxílio e espaço aberto que possibilitaram a concretização deste projeto.

À todos, que de maneira direta ou indireta colaboraram na execução deste trabalho.

RESUMO

As bombas de fluxo, além das aplicações clássicas em engenharia, são instrumentos importantes em áreas como a biologia, farmácia e medicina. Um novo princípio para o bombeamento de fluidos está sendo proposto dentro do Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica. O presente trabalho de formatura trata deste princípio: a utilização de um atuador piezelétrico bilaminar inserido num fluido para geração de vazão. O objetivo deste projeto é estudar a viabilidade desta bomba piezelétrica através da construção de protótipos e com a 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 este novo princípio proposto.

ABSTRACT

Flow pumps, in addition to its classical applications in engineering, act as important instruments in areas such as Biology, Pharmacy and Medicine. A new principle for pumping fluids is being proposed inside of the Department of Mechatronic Engineering and Mechanical Systems of the Polytechnic School. The present graduation project is referred to this principle: the use of a bilaminar piezoelectric actuator inserted in a fluid for flow generation. The main objective of this project is the study of viability of this pump through prototypes constructions and simulation using Finite Element Method (FEM). The text presents methodologies employed and discusses the obtained results, as a way of analyze the physical phenomena and validate this new proposed principle.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	
LISTA DE SÍMBOLOS	
1. INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO	1
2. O PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	4
3. ASPECTOS TEÓRICOS.....	5
3.1. Atuadores Piezelétricos Bilaminares.....	5
3.2. Modelagem Computacional	7
3.3. Modelo da bomba piezelétrica	8
3.4. Problema do Espelho Torsional	9
3.5. Condições de Contorno Móveis	10
3.6. Otimização	12
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
4.1. ANSYS (Software de Elementos Finitos)	14
4.2. Linguagem APDL	16
4.3. Altair Hyperstudy (Software de Otimização)	16
4.3.1. Configurando o ANSYS no Hyperstudy.....	17
4.3.2. Criando um “template”	18
4.4. Modelo Computacional	19
4.4.1. Pré-processamento	19
4.4.2. Solução do Problema	24
4.4.3. Pós-processamento.....	26
5. RESULTADOS COMPUTACIONAIS.....	34
5.1. Simulação do espelho torsional.....	34
5.2. Primeira modelagem para a bomba piezelétrica	35
5.3. Modelagem do protótipo de prova de princípio.....	41

5.4. Novo modelo para a bomba piezelétrica.....	44
5.5. Sensibilidade da Bomba Piezelétrica.....	51
5.5.1. Sensibilidade em relação à altura do duto.....	51
5.5.2. Sensibilidade em relação à frequência.....	53
5.5.3. Sensibilidade em relação à amplitude de oscilação.....	54
5.6. Considerações a respeito da malha de elementos finitos.....	57
5.7. Otimização.....	60
5.8. Resultados da otimização.....	64
5.9. Caracterização da bomba piezelétrica.....	69
6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	72
6.1. Viabilidade do Princípio de Funcionamento.....	72
6.2. Protótipo em Acrílico.....	75
6.3. Protótipo em Alumínio.....	77
6.4. Testes em Água com o Protótipo em Alumínio.....	79
6.5. Modelo de MEF do Atuador Bilaminar Piezelétrico.....	81
6.5. Circuito Amplificador.....	82
6.6. Protótipo definitivo da bomba piezelétrica.....	84
6.7. Testes da bomba piezelétrica.....	86
7. CONCLUSÕES.....	91
8. ANEXOS.....	92
8.1. Código-fonte do arquivo 'bomba.ans'.....	92
8.2. Código-fonte de 'calc_vazao.m'.....	102
8.3. Desenhos de fabricação dos protótipos em AutoCAD 2002.....	103
9. REFERÊNCIAS.....	106

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1 – Princípio da bomba ultra-sônica com ondas propagantes.	2
Fig. 1.2 – Possível configuração de uma bomba de fluxo ultra-sônica.	2
Fig. 1.3 – Bomba piezelétrica com diafragma.	3
Fig. 2.1 – Princípio de funcionamento da bomba de fluxo proposta.	4
Fig. 3.1 – Atuador piezelétrico bilaminar.	6
Fig. 3.2 – Esquema da bomba de fluxo piezelétrica.	8
Fig. 3.3 – Modelo Simplificado da bomba utilizando atuador articulado.	8
Fig. 3.4 – Problema do espelho torsional.	9
Fig. 3.5 – Condições de contorno móveis.	11
Fig. 3.6 – Malha de elementos para diferentes passos no tempo.	11
Fig. 3.7 – Parâmetros da bomba.	13
Fig. 3.8 – Problema de otimização.	13
Fig. 4.1 – Elemento FLUID141.	14
Fig. 4.2 – Integração dos softwares de otimização e elementos finitos.	16
Fig. 4.3 – Funcionamento do software de otimização.	17
Fig. 4.4 – Modelo computacional para a bomba piezelétrica.	19
Fig. 4.5 – Modelo da bomba piezelétrica no ANSYS.	20
Fig. 4.6 – Malha de elementos finitos para a bomba piezelétrica.	20
Fig. 4.7 – Condições de contorno para o sistema.	21
Fig. 4.8 – Detalhe das condições de contorno em uma das paredes.	21
Fig. 4.9 – Detalhe da condição de contorno na entrada.	22
Fig. 4.10 – Detalhe das condições de contorno no atuador.	22
Fig. 4.11 – Função senoidal com diferentes discretizações.	25
Fig. 4.12 – Vetores de velocidade na saída do duto.	26
Fig. 4.13 – Linha criada com o comando 'PATH'.	27
Fig. 4.14 – Gráfico de vazão ao longo da seção de saída (altura).	29
Fig. 5.1 – Campo de pressões no espelho torsional.	34
Fig. 5.2 – Velocidades em no eixo 'x' no espelho torsional.	34
Fig. 5.3 – Representação da malha de elementos em posições deslocadas.	35
Fig. 5.4 – Campo de pressões para a bomba piezelétrica.	36

Fig. 5.5 – Campo de velocidades no eixo x.	36
Fig. 5.6 – Vetores de velocidade (detalhe).....	37
Fig. 5.7 – Perfil de velocidades para a bomba piezelétrica.....	37
Fig. 5.8 – Escoamento não-desenvolvido.	38
Fig. 5.9 – Orientação dos eixos coordenados.....	40
Fig. 5.10 – Perfil de velocidades para o protótipo de prova de princípio.	41
Fig. 5.11 – Vetores de velocidade para o protótipo de prova de princípio.	42
Fig. 5.12 – Vetores de velocidade na região de saída.....	43
Fig. 5.13 – Novo modelo para bomba piezelétrica.....	44
Fig. 5.14 – Vetores de velocidade na região de saída da bomba.....	45
Fig. 5.15 – Detalhe da região de entrada inferior da bomba.	46
Fig. 5.16 – Detalhe da região de entrada superior da bomba.....	46
Fig. 5.17 – Refluxo na região de entrada.....	47
Fig. 5.18 – Gráfico da velocidade média em função do tempo (passos).	48
Fig. 5.19 – Determinação da velocidade média.	49
Fig. 5.20 – Gráfico da vazão em função da altura do duto.	52
Fig. 5.21 – Variação da vazão com a frequência.....	54
Fig. 5.22 – Variação da vazão com a amplitude de oscilação (30 a 100 μ m).....	55
Fig. 5.23 – Variação da vazão com a amplitude de oscilação (50 a 1000 μ m).....	57
Fig. 5.24 – Malha com elementos demasiadamente distorcidos.	58
Fig. 5.25 – Vetores de velocidade incoerentes.....	58
Fig. 5.26 – Malha com elementos igualmente refinados em todo o domínio.	59
Fig. 5.27 – Malha com elementos refinados nas regiões de fronteira.	59
Fig. 5.28 – Definição das variáveis.	60
Fig. 5.29 – Variáveis de projeto.	61
Fig. 5.30 – Formato do template.....	62
Fig. 5.31 – Determinação da Vazão.....	63
Fig. 5.32 – Conferindo o valor da expressão.....	63
Fig. 5.33 – Evolução da função objetivo.	66
Fig. 5.34 – Variação da altura do duto nas iterações.....	66
Fig. 5.35 – Variação da frequência de oscilação nas iterações.....	67
Fig. 5.36 – Variação da amplitude de oscilação nas iterações.....	67

Fig. 5.37 – Função objetivo e amplitude de oscilação normalizadas.	68
Fig. 5.38 – Curva da bomba.	71
Fig. 6.1 – Modelo em acrílico.	72
Fig. 6.2 – Vista superior.	73
Fig. 6.3 – Escoamento através do canal em acrílico. Entradas laterais de água.	73
Fig. 6.4 – Escoamento através do canal em acrílico. Entrada única de água.	74
Fig. 6.5 – Escoamento através do canal em acrílico. Entrada única de água e prolongamento do canal na região anterior à lâmina articulada.	74
Fig. 6.6 – Atuador piezelétrico bilaminar preparado para utilização no protótipo.	75
Fig. 6.7 – Canal da bomba construído em acrílico e atuador bilaminar.	76
Fig. 6.8 – Protótipo da bomba piezelétrica em acrílico.	76
Fig. 6.9 – Componentes do segundo protótipo da bomba piezelétrica construído em alumínio. Engaste através de dois parafusos e arruelas.	78
Fig. 6.10 - Protótipo em alumínio.	78
Fig. 6.11 – Protótipo em alumínio. Vista lateral.	79
Fig. 6.12 – Aparato experimental para testes com o protótipo em alumínio.	80
Fig. 6.13 – Modelo 2D de MEF do atuador bilaminar piezelétrico.	81
Fig. 6.14 – Resultados da simulação. Deslocamento obtido na extremidade direita do atuador $D = 2,86 \times 10^{-6}$ m.	81
Fig. 6.15 – Curva de deslocamento da extremidade do atuador para frequência de excitação de 0Hz a 104Hz.	82
Fig. 6.16 – Circuito Amplificador construído para aumentar o deslocamento do atuador bilaminar piezelétrico.	83
Fig. 6.17 – Componentes da bomba piezelétrica.	85
Fig. 6.18 – Bomba piezelétrica. Presença de duas partes distintas: - uma em alumínio e outra em acrílico.	85
Fig. 6.19 – Bomba piezelétrica. Vista superior.	86
Fig. 6.20 – Aparato experimental para testes com a bomba piezelétrica.	87
Fig. 6.21 – Fluxo de água induzido pela bomba piezelétrica.	88
Fig. 6.22 – Evolução do fluxo de água gerado pela bomba piezelétrica.	88
Fig. 6.23 - Fluxo de água induzido pela bomba piezelétrica. Vista superior.	89
Fig. 6.24 – Assimetrias presentes no escoamento de água induzido pela bomba.	89

LISTA DE TABELAS

Tab.5.1 – Velocidade média na seção de saída para diferentes passos no tempo	39
Tab.5.2 – Vazão para diferentes amplitudes de oscilação.	43
Tab.5.3 – Sensibilidade da bomba em relação à altura do duto	51
Tab.5.4 – Sensibilidade da bomba em relação à frequência	53
Tab.5.5 – Sensibilidade em relação à amplitude de oscilação (30 a 100 μ m)	55
Tab.5.6 – Sensibilidade em relação à amplitude de oscilação (50 a 1000 μ m).....	56
Tab.5.7 – Resultados da Otimização	65
Tab.5.8 – Resposta da bomba a diferentes pressões de saída	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PZT	- Piezelétrico
MEF	- Método de Elementos Finitos
ALE	- Arbitrary Lagrangian-Eulerian
APDL	- ANSYS Parametric Design Language

LISTA DE SÍMBOLOS

T	tensor de tensões
e	tensor de coeficientes piezelétricos
S	tensor de deformações
ϵ^s	tensor de permissividades elétricas medido com deformação constante
D	vetor deslocamento elétrico
c^E	tensor de rigidez medido com campo elétrico constante
E	vetor campo elétrico
θ	ângulo do atuador
θ_0	ângulo máximo do atuador
ω	frequência de oscilação (rad/s)
t	tempo (s)
$\dot{\theta}$	velocidade angular
x	coordenada x
y	coordenada y
x_0	coordenada x da articulação
y_0	coordenada y da articulação
x_r	coordenada x no instante inicial
UX	deslocamento em x
UY	deslocamento em y
R	variável auxiliar
U_n	deslocamento na direção normal
u	vetor deslocamento
n	versor na direção normal
U_τ	deslocamento na direção tangente
τ	versor na direção tangente
V_n	velocidade na direção normal
V_τ	velocidade na direção tangente
v	vetor de velocidade

h	altura do duto da bomba piezelétrica
f	frequência de oscilação (Hz)
$A_{\max}$	amplitude máxima de oscilação
Q	vazão (mL/min)
M	massa do sistema
$\vec{F}$	vetor força
$\vec{P}$	vetor quantidade de movimento
$\dot{Q}$	calor inserido no sistema
$\dot{W}$	trabalho realizado pelo sistema
E	energia total do sistema
ρ	densidade (kg/m ³)
∇	volume de sistema
e	energia
g	aceleração da gravidade
μ	viscosidade (N.s/m ²)
k	condutividade térmica (W/m.K)
c_p	calor específico (J/kg.K)
L_{entrada}	comprimento da região de entrada
$L_{\text{lâmina}}$	comprimento do atuador
$L_{\text{saída}}$	comprimento da região de saída
$\rho_{\text{água}}$	densidade da água
$\mu_{\text{água}}$	viscosidade absoluta da água
A	área da seção de saída da bomba
$\bar{Q}$	vazão média
d	profundidade do canal da bomba

1. INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO

Dentre as aplicações de atuadores piezelétricos, uma que tem sido pesquisada recentemente é a construção de bombas de fluxo de precisão, ou seja, bombas de pequena potência para deslocamento de pequenos volumes de fluido. A bioengenharia é a área que tem demonstrado grande interesse por este tipo de equipamento, seja numa possível aplicação para bombeamento de sangue ou para dosagem de reagentes e medicamentos, como por exemplo, injeção contínua de insulina em pacientes diabéticos durante o dia, eliminando surtos e déficits desta substância, dentre outras possíveis aplicações.

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 de 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 um dos mais relevantes, a morte de microorganismos ou células contidas no fluido 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 sanguíneo as taxas de hemólise (morte das hemáceas) são relativamente elevadas, o que, sem dúvida é prejudicial à área médica. Procura-se com o estudo dessas novas técnicas, minimizar este problema.

Um princípio de bombeamento que vem sendo estudado nesse sentido baseia-se no uso de atuadores piezelétricos. Um dos exemplos de bombas de fluxo piezelétricas é a bomba ultra-sônica de Bar-Cohen; Chang (1999), que utiliza estatores feitos de material elástico atuado por cerâmicas piezelétricas e que movimenta o fluido através do princípio da propagação de onda. Na fig. 1.1 podemos ver melhor este princípio de funcionamento: o líquido é arrastado devido ao movimento da onda propagante no meio sólido. Na fig. 1.2 temos uma possível configuração para esta bomba, utilizando

dois estatores e gerando um efeito semelhante ao peristaltismo observado no esôfago ou intestino humanos.

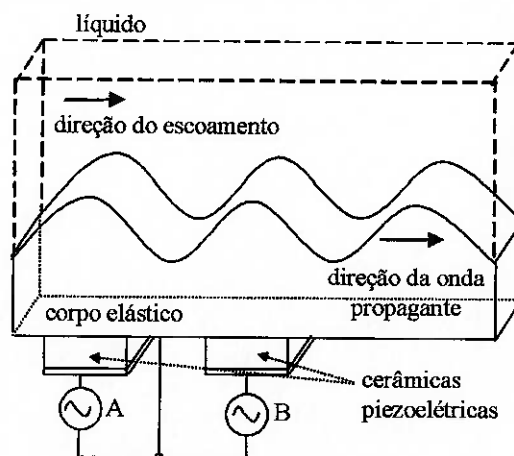


Fig. 1.1 – Princípio da bomba ultra-sônica com ondas propagantes.

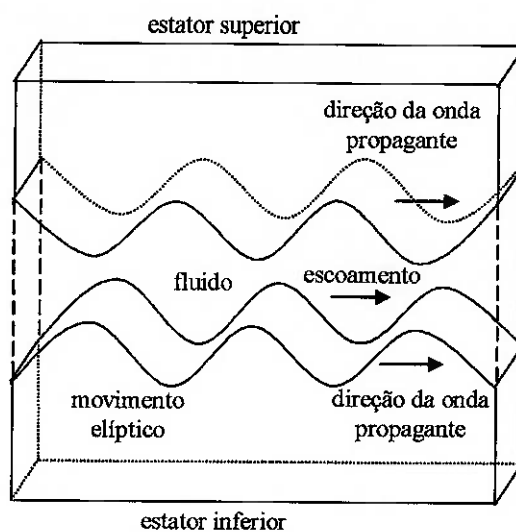


Fig. 1.2 – Possível configuração de uma bomba de fluxo ultra-sônica.

Outro exemplo de bomba piezoelétrica é a bomba com diafragma, que utiliza o material piezoelétrico como o atuador que move o diafragma, sendo a direção do fluxo garantida por válvulas que permitem o fluxo em um só sentido.

Na fig.1.3 podemos ver que a cerâmica piezoelétrica 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).

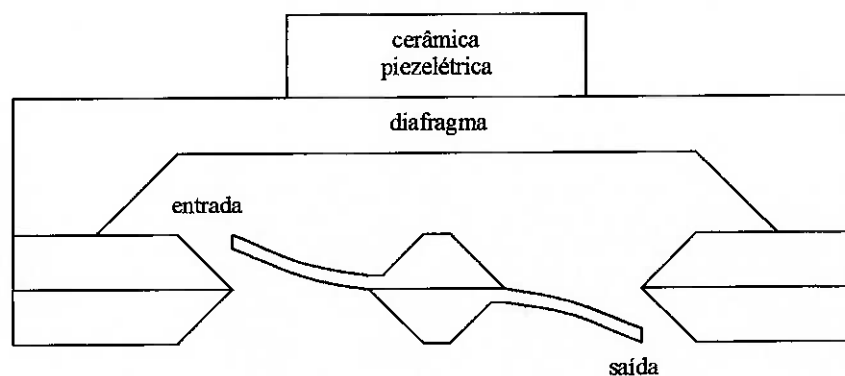


Fig. 1.3 – Bomba piezelétrica com diafragma.

A simulação computacional tem sido uma ferramenta extremamente usada no estudo dessas bombas de fluxo piezelétricas.

Nesse sentido, o presente trabalho de formatura visou aplicar a modelagem através do método de elementos finitos para análise de uma nova configuração de bomba piezelétrica descrita a seguir, sua otimização, bem como a construção de modelos e protótipos para verificação de seu funcionamento.

2. O PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Nas publicações sobre formas alternativas de bombeamento, até o momento não foi encontrada nenhuma referência a bombas com o princípio de funcionamento proposto neste trabalho de formatura, que buscou basicamente representar um fenômeno observado na natureza: o nadar de um peixe.

A fig.2.1 nos ajuda a ilustrar o princípio de funcionamento da bomba.

Como sabemos, para nadar o peixe realiza um movimento oscilatório, balançando seu corpo e cauda de forma a se deslocar para frente. Mas o que aconteceria ao mantermos o peixe fixo enquanto ele tenta nadar? Provavelmente teríamos o fluido se movimentando, ou seja, ele estaria desempenhando o papel de uma bomba de fluxo.

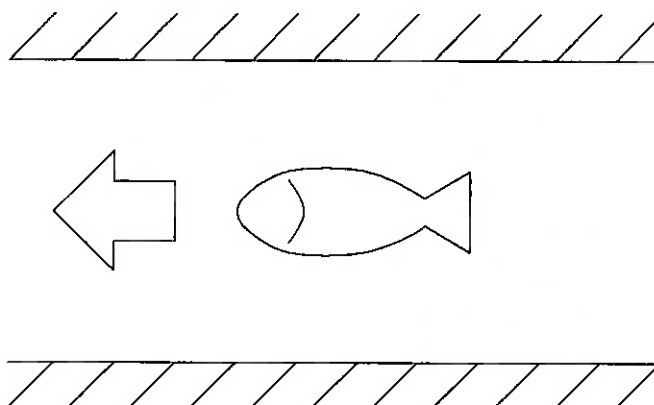


Fig. 2.1 – Princípio de funcionamento da bomba de fluxo proposta.

A proposta da bomba piezelétrica é utilizar um atuador piezelétrico bilaminar para emular este comportamento oscilatório do peixe e mesmo de um corpo oscilante em meio fluido visando a geração de fluxo. Este atuador possui formato de lâmina e, quando acionado com uma tensão elétrica alternada, reproduz o movimento desejado.

3. ASPECTOS TEÓRICOS

3.1. Atuadores Piezelétricos Bilaminares

Para emular o efeito do corpo do peixe oscilando, será utilizado um atuador piezelétrico bilaminar. Um material piezelétrico é basicamente um material que, submetido a uma certa tensão sofre uma deformação, ou ainda, quando submetido a uma determinada deformação, gera uma tensão elétrica. Trata-se, portanto, de um material capaz de converter energia elétrica em mecânica, ou vice-versa.

As equações constitutivas do efeito piezelétrico são:

$$\mathbf{T} = \mathbf{c}^E \mathbf{S} - \mathbf{e}^P \mathbf{E} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{e}^P \mathbf{S} + \boldsymbol{\varepsilon}^S \mathbf{E} \quad (3.2)$$

onde:

$\mathbf{T}$ = tensor de tensões;

$\mathbf{e}^P$ = tensor de coeficientes piezelétricos;

$\mathbf{S}$ = tensor de deformações;

$\boldsymbol{\varepsilon}^S$ = tensor de permissividades elétricas medido com deformação constante;

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

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

$\mathbf{E}$ = vetor campo elétrico.

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 $\mu\text{m/V}$ em regime de excitação

estático. Na frequência de ressonância, que é da ordem de 80Hz, pode atingir até 50 $\mu\text{m}/\text{V}$.

A fig. 3.1 mostra a combinação de um bilaminar (PZT/metal/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.

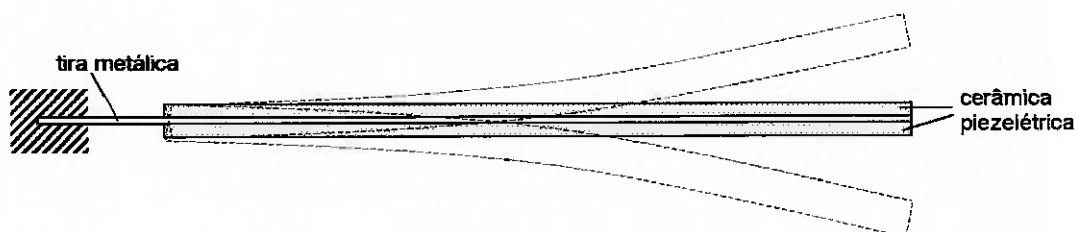


Fig. 3.1 – Atuador piezelétrico bilaminar.

3.2. 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, o que não gera nenhum tipo de problema. A situação análoga quando se pensa na construção de protótipos seria a construção de 10 ou 20 protótipos, o que de imediato é inviável.

Na literatura e em publicações científicas também é possível notar a importância da simulação computacional na bioengenharia. Em CFDRC (2003) é possível visualizar vários exemplos de simulação computacional de sistemas de bioengenharia

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. Embora a implementação do MEF não esteja no escopo deste plano, é necessário um conhecimento básico sobre este método.

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.

3.3. Modelo da bomba piezelétrica

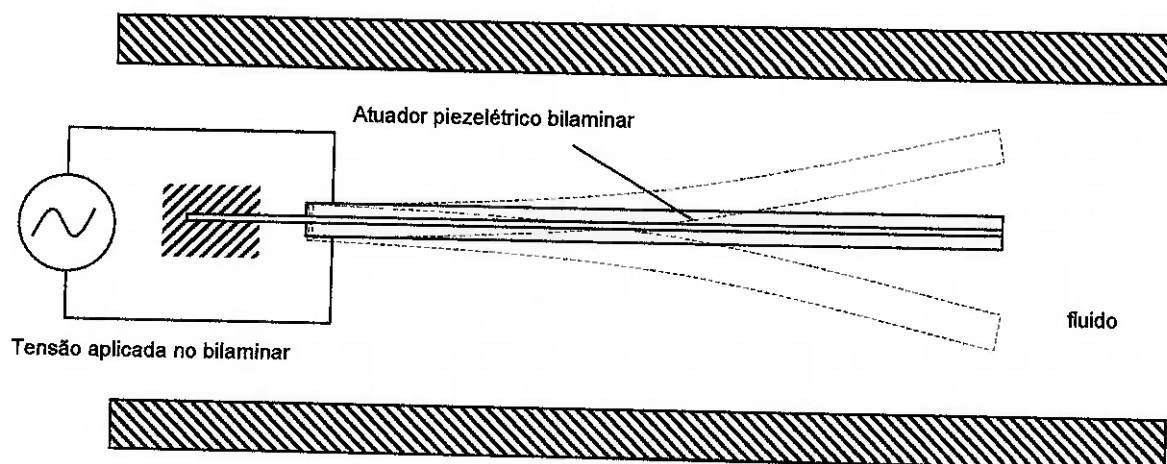


Fig. 3.2 – Esquema da bomba de fluxo piezelétrica.

A bomba piezelétrica pode ser representada pelo modelo proposto na fig. 3.2. Na figura é possível notar o atuador piezelétrico bilaminar engastado em uma das extremidades e sendo excitado com uma tensão senoidal, de forma a produzir o movimento desejado.

Para fins de simulação será adotado um modelo simplificado da bomba piezelétrica, como o representado na fig. 3.3.

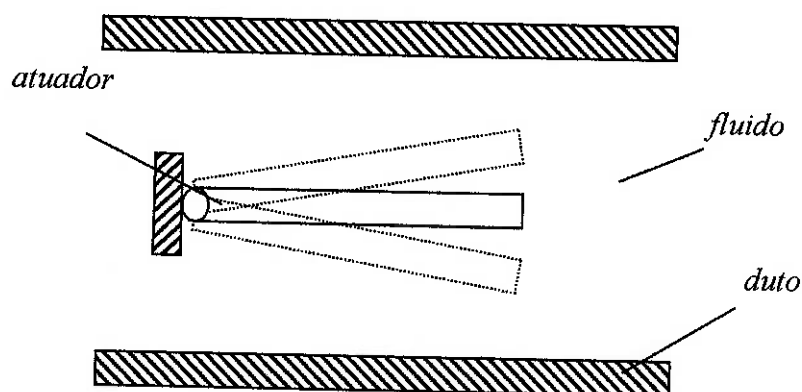


Fig. 3.3 – Modelo Simplificado da bomba utilizando atuador articulado.

3.4. Problema do Espelho Torsional

Para efeitos de estudo, foi utilizado o exemplo do espelho torsional ('torsional mirror'), disponível na documentação do software ANSYS. Este exemplo foi selecionado por apresentar certa semelhança com o problema da bomba piezelétrica, portanto, a sua modelagem é bastante semelhante à que, num passo seguinte, é feita para a simulação do sistema.

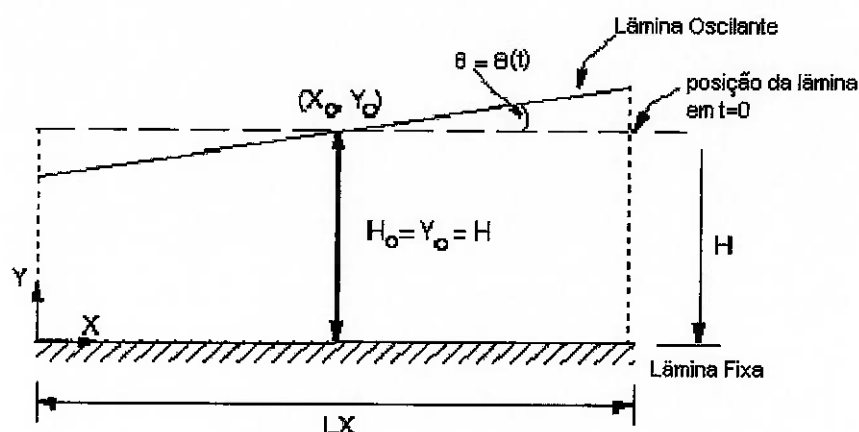


Fig. 3.4 – Problema do espelho torsional.

Neste caso, temos uma lâmina fixa na parte inferior e uma lâmina móvel na parte superior realizando um movimento como o indicado na fig. 3.4.

O ângulo de rotação da lâmina superior é:

$$\theta = \theta_0 \sin(\omega t) \quad (3.3)$$

Derivando, temos a sua velocidade angular:

$$\dot{\theta} = \omega \theta_0 \cos(\omega t) \quad (3.4)$$

Podemos, então, escrever a posição de um ponto qualquer da lâmina em função das suas coordenadas:

$$x(t) = x_0 + R \cos \theta \quad (3.5)$$

$$y(t) = y_0 + R \sin \theta \quad (3.6)$$

Onde:

$$R = x_r - x_0 \quad (3.7)$$

e x_r é a coordenada x quando $t = 0$.

Os deslocamentos (em relação às posições iniciais) serão dados por:

$$UX(t) = x(t) - x(0) = x - x_R \quad (3.8)$$

$$UY(t) = y(t) - y(0) = y - y_0 \quad (3.9)$$

Substituindo as expressões eq.(3.5) e eq.(3.6) em eq.(3.7) e eq.(3.8), respectivamente, temos:

$$UX(t) = R(\cos \theta - 1) \quad (3.10)$$

$$UY(t) = R \sin \theta \quad (3.11)$$

Considerando pequenos ângulos de deslocamento $\theta \sim 0$:

$$UX(t) \sim 0 \quad (3.12)$$

$$UY(t) \sim R\theta \quad (3.13)$$

Derivando as expressões de velocidade, eq.(3.10) e eq.(3.11), temos:

$$VX(t) = (-R \sin \theta) \dot{\theta} \quad (3.14)$$

$$VY(t) = R \dot{\theta} \cos \theta \quad (3.15)$$

3.5. Condições de Contorno Móveis

Problemas de simulação de fluidos freqüentemente 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 se alterar de forma a satisfazer esta condição. Para tanto é feito o uso da formulação ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian). Esta formulação encontra-se implementada no software ANSYS.

A fig. 3.5 mostra um corpo rígido em movimento inserido num meio fluido. A formulação ALE permite que essas condições de contorno variáveis sejam aplicadas ao problema. No decorrer da simulação, a malha de elementos finitos se altera, possibilitando a solução do problema.

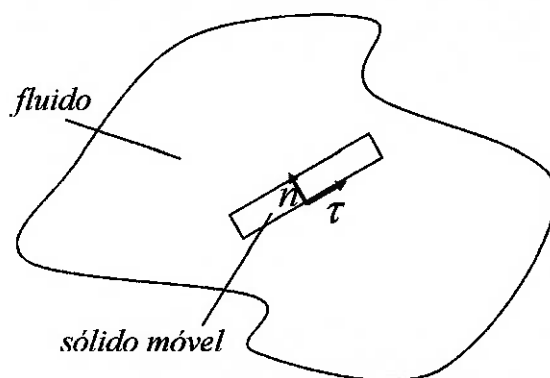


Fig. 3.5 – Condições de contorno móveis.

Para a simulação, devemos especificar, no caso bidimensional, os deslocamentos na direção normal e tangente às fronteiras do sólido móvel:

$$U_n = u \cdot n, \text{ e} \quad (3.14)$$

$$U_\tau = u \cdot \tau, \quad (3.15)$$

bem como as velocidades nessas mesmas direções:

$$V_n = v \cdot n \quad (3.16)$$

$$V_\tau = v \cdot \tau \quad (3.17)$$

A formulação ALE é responsável por realocar a malha a cada iteração de modo a adequá-la às condições de contorno impostas para as fronteiras móveis.

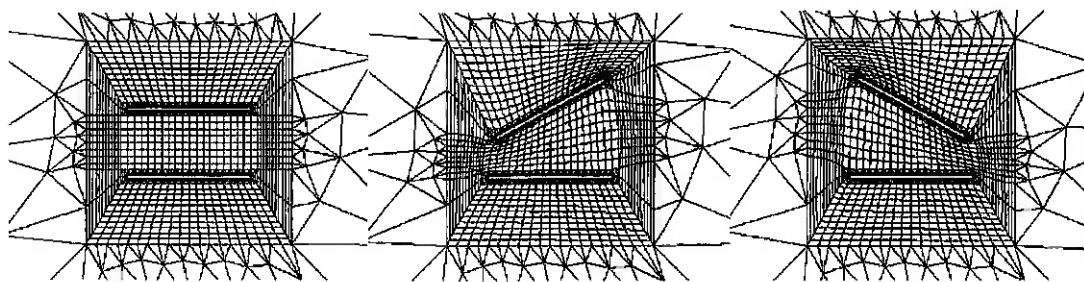


Fig. 3.6 – Malha de elementos para diferentes passos no tempo.

A fig. 3.6 é um exemplo da aplicação dessa formulação, mostrando como a malha é realocada durante a simulação. Trata-se de um exemplo encontrado na documentação do ANSYS sobre o espelho torsional: uma placa plana realizando movimento oscilatório sobre uma outra que permanece fixa no espaço. 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 piezelétrica.

3.6. Otimização

Os problemas encontrados na área de engenharia muitas vezes recaem sobre múltiplas variáveis. Tomando como exemplo um problema estrutural que tenha 10 variáveis dentre altura, espessura, momentos de inércia, material da estrutura, etc, podemos analisar a complexidade de se chegar a valores ótimos para um caso como este.

Considerando, por exemplo, que se deseja otimizar a estrutura de forma a obter maior rigidez e menor peso, uma abordagem intuitiva seria executar várias simulações utilizando elementos finitos de forma a mapear as diversas combinações possíveis dos parâmetros citados. Tomando apenas 3 dos parâmetros e supondo que eles possam tomar 10 valores distintos, teríamos 10^3 análises de MEF, ao custo computacional de 10 segundos por análise: $T_{total} = 10^3 \cdot 10 = 10^4 s \approx 2,8hs$. Levando agora em consideração todas as 10 variáveis de projeto, temos: $T_{total} = 10^{10} \cdot 10 = 10^{11} s \approx 3200anos$, ou seja, esta abordagem seria inviável.

Para o caso da bomba piezelétrica, podemos definir uma série de variáveis, como frequência de oscilação, altura do duto de escoamento, amplitude de oscilação, comprimento do atuador e área da seção de entrada e saída. Inicialmente podemos considerar apenas os 3 primeiros parâmetros, conforme indicado na fig.3.7. No caso de uma simulação fluidica e transiente, o tempo computacional de uma única análise pode chegar facilmente à ordem de 10^4s . Como ainda não há um conhecimento mais aprofundado sobre os domínios do problema, pode ser suposto que cada variável assuma até 20 valores pré-estabelecidos. Assim, o tempo total de otimização seria: $T_{total} = 20^3 \cdot 10^4 = 8 \cdot 10^7 \approx 900dias$. Portanto, para análises com alto custo computacional, até mesmo a solução de problemas com um número reduzido de variáveis pode tornar-se inviável.

A solução, então é partir para uma busca racionalizada através de algoritmos numéricos de otimização capazes de reduzir drasticamente o tempo para se encontrar uma solução ótima.

Na formulação de um problema de otimização estão presentes os seguintes conceitos: variáveis de projeto, função objetivo, restrições e domínio viável.

São definidas como variáveis de projeto os parâmetros do problema que podem ser alterados para otimizar o sistema. No caso em questão, os principais parâmetros, que se acredita influenciar o problema, podem ser observados na figura a seguir:

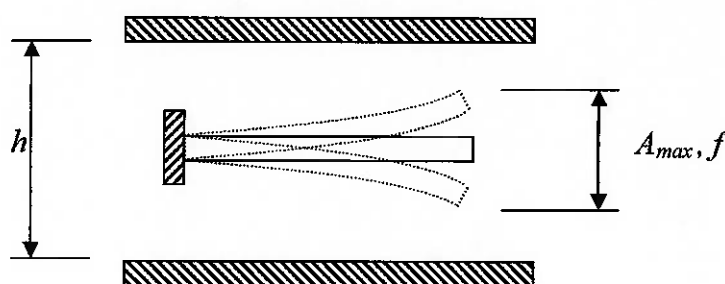


Fig. 3.7 – Parâmetros da bomba.

Onde: h : altura do duto; f : frequência de oscilação; A_{max} : amplitude máxima de oscilação.

Para a formulação de um problema de otimização, além das variáveis de projeto, precisamos ter definidos: a função objetivo e as restrições. A função objetivo é responsável por quantificar o resultado que desejamos otimizar. Para o problema da bomba, a função objetivo poderia ser “maximizar o fluxo médio no canal (Q)”. As restrições correspondem às limitações impostas para se obter o resultado desejado. No caso da bomba, temos que a amplitude de oscilação não pode exceder a altura do duto no qual o atuador está inserido.

Tendo definido variáveis de projeto, função objetivo e restrições, o problema de otimização da bomba é formulado da seguinte forma:

Maximizar $Q(f, h, A)$	
f, h, A	
tal que:	$f_{min} \leq f \leq f_{max}$
	$h_{min} \leq h \leq h_{max}$
	$A_{min} \leq A \leq h$

Fig. 3.8 – Problema de otimização.

Este problema de otimização foi resolvido utilizando um software específico para esta finalidade.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. ANSYS (Software de Elementos Finitos)

Para a simulação da bomba piezelétrica foi usado 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”. O elemento a ser utilizado foi o FLUID141 (fig. 4.1), que é capaz de simular regimes permanentes ou transientes e escoamentos laminares ou turbulentos. Na fig.3.5, do item anterior, é possível observar uma malha de elementos finitos criada no software.

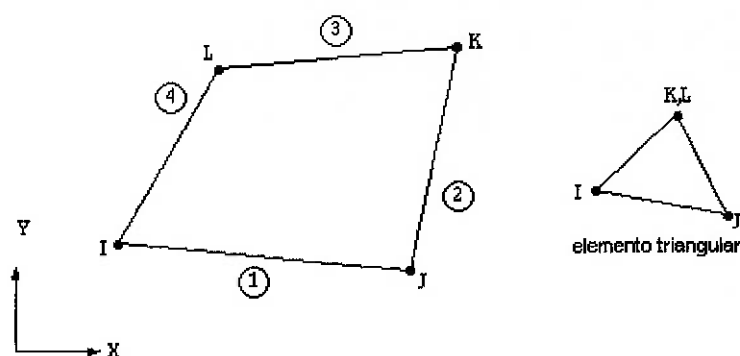


Fig. 4.1 – Elemento FLUID141.

Os graus de liberdade deste elemento são: velocidades em ‘x’ e ‘y’; pressão; temperatura; energia cinética.

Na simulação, essencialmente o software resolve as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, eqs. (4.1), (4.2) e (4.3), respectivamente:

$$\left(\frac{dM}{dt} \right)_{\text{sistema}} = 0 \quad (4.1)$$

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} \bigg|_{\text{sistema}} = 0 \quad (4.2)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dE}{dt} \bigg|_{\text{sistema}} \quad (4.3)$$

onde:

$$M_{\text{sistema}} = \int_{\text{massa(sistema)}} dm = \int_{\forall} \rho d\forall \quad (4.4)$$

$$\vec{P}_{\text{sistema}} = \int_{\text{massa(sistema)}} \vec{V} dm = \int_{\forall(\text{sistema})} \vec{V} \rho d\forall \quad (4.5)$$

$$E_{\text{sistema}} = \int_{\forall(\text{sistema})} e \rho d\forall \quad (4.6)$$

$$e = u + \frac{V^2}{2} + g.z \quad (4.7)$$

Podemos definir as seguintes propriedades para o elemento FLUID141:

$$\rho: \text{densidade} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\mu: \text{viscosidade} \left[\frac{N.s}{m^2} \right]$$

$$k: \text{condutividade térmica} \left[\frac{W}{m.K} \right]$$

$$c_p: \text{calor específico} \left[\frac{J}{kg.K} \right]$$

4.2. 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.

4.3. Altair Hyperstudy (Software de Otimização)

Para a etapa de otimização da bomba piezelétrica foi utilizado o software Altair Hyperstudy, capaz de realizar estudo de efeitos em problemas complexos bem como a otimização paramétrica para um dado sistema. O software é capaz de se comunicar com diversos softwares de elementos finitos, dentre eles o próprio ANSYS, que foi utilizado durante este trabalho de formatura.

A integração dos softwares de otimização e de elementos finitos se dá da seguinte forma:

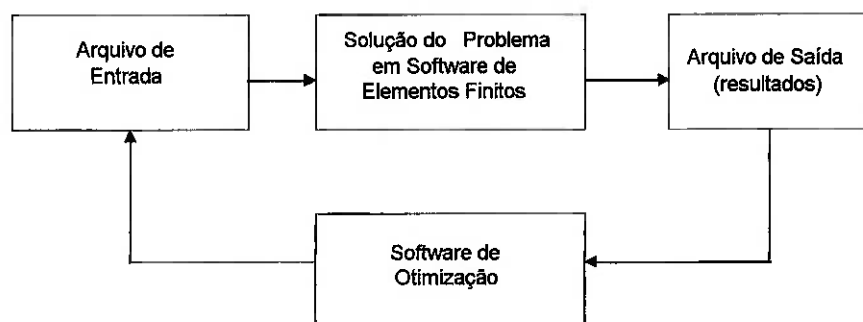


Fig. 4.2 – Integração dos softwares de otimização e elementos finitos.

Primeiramente define-se no software de simulação o problema de otimização, determinando-se as variáveis de projeto, a função objetivo e as restrições. Em

seguida, o software de otimização gera um arquivo de entrada para o ANSYS (software de elementos finitos), com valores iniciais definidos pelo usuário. A simulação numérica então é feita e um arquivo de saída com os resultados da simulação é gerado. O otimizador recebe então este arquivo e interpreta o seu resultado.

Dá-se então início à otimização propriamente dita, esquematizada na fig. 4.3, os valores de entrada são alterados automaticamente pelo otimizador e após a simulação ele avalia se a performance geral do sistema melhorou ou piorou. Caso tenha piorado, os resultados são descartados e uma nova combinação de parâmetros é testada. Caso tenha melhorado, o software verifica em seu critério de convergência se aquele valor já pode ser considerado ótimo. Em caso negativo, uma nova combinação será determinada de acordo com o algoritmo de otimização implementado. Em caso positivo, a otimização é finalizada e os parâmetros ótimos do sistema são entregues.

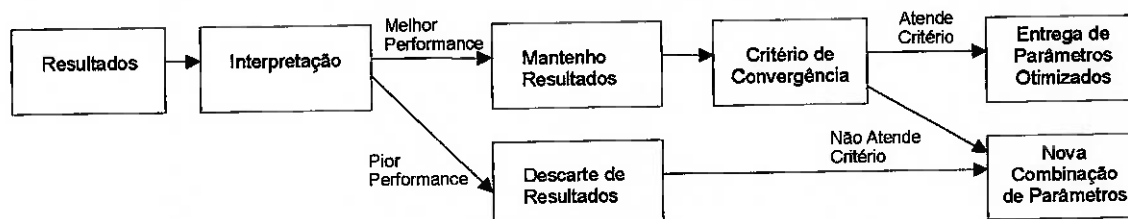


Fig. 4.3 – Funcionamento do software de otimização.

4.3.1. Configurando o ANSYS no Hyperstudy

Para a utilização do ANSYS como “solver” no software HyperStudy é necessário primeiramente fazer a configuração do mesmo. O primeiro passo é realizar o registro do programa como um solver, e isto é feito através da edição do arquivo ‘preferences.mvw’. Deve-se incluir a seguinte linha (em destaque) na área apropriada:

```

*RegisterSolverScript(os,      "OptiStruct", { getenv("ALTAIR_HOME")
+ "/optistruct/bin/optistruct.bat" })
*RegisterSolverScript(templex, "Templex",    { getenv("ALTAIR_HOME")
+ "/templex/bin/templex.exe" })
*RegisterSolverScript(hf,      "HyperForm",  { getenv("ALTAIR_HOME")
+ "/hf/bin/hfsol.bat" })
*RegisterSolverScript(Ansys ,  "Ansys",      {"c:\Arquivos de
Programas\ANSYS60\bin\intel\ansys60.exe" })

```

Este procedimento faz com que o ANSYS passe a ser uma opção de solver para a simulação computacional de problemas a serem estudados e otimizados.

4.3.2.Criando um “template”

O passo seguinte é a criação de uma template, ou seja, um arquivo de entrada para o software Hyperstudy que dá ao software as informações sobre o sistema a ser simulado.

Na template estão especificados basicamente os parâmetros do sistema e os domínios dessas variáveis. Através deste arquivo o Hyperstudy é capaz de criar automaticamente arquivos de entrada para o ANSYS, alterando os parâmetros conforme seja necessário.

4.4. Modelo Computacional

4.4.1. Pré-processamento

O modelo computacional adotado pode ser representado da seguinte forma (fig.4.4):

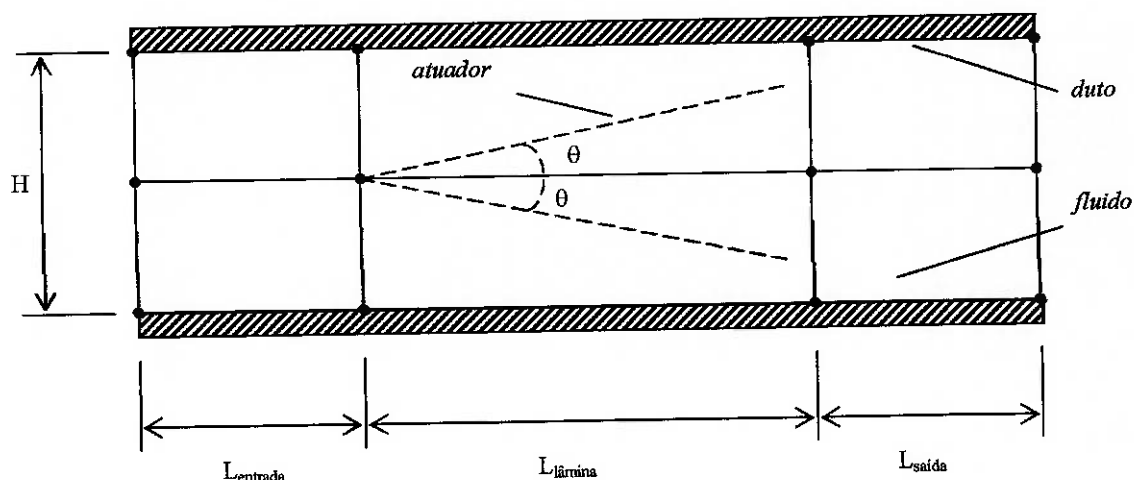


Fig. 4.4 – Modelo computacional para a bomba piezelétrica.

Na figura pode-se ver a definição das dimensões da bomba piezelétrica, sendo $L_{lâmina}$, o comprimento do atuador piezelétrico, e $L_{entrada}$ e $L_{saída}$, os comprimentos das regiões de entrada e de saída, respectivamente. O atuador piezelétrico utilizado para a montagem de protótipos possui um comprimento de 35mm. A altura do duto considerada corresponde a algo em torno de 4mm. Os comprimentos das regiões de entrada e saída devem 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.

Este modelo foi implementado em ANSYS utilizando a linguagem APDL. Para tanto, primeiramente definimos as posições dos nós e posteriormente, as linhas e áreas correspondentes. A visualização deste modelo é feita na fig.4.5.

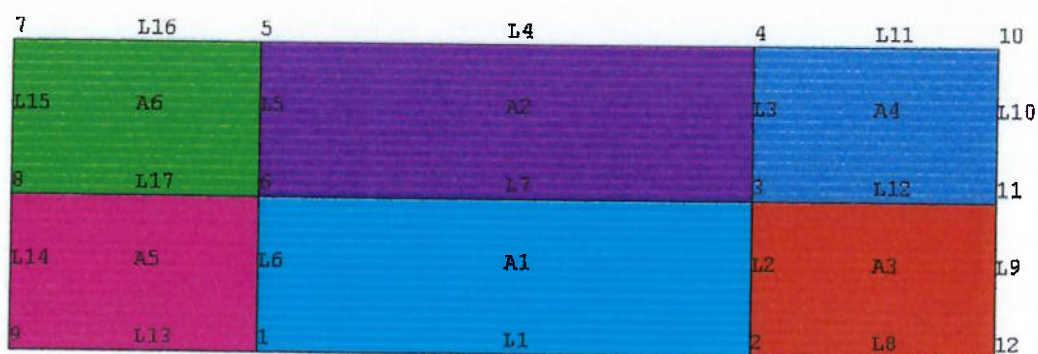


Fig. 4.5 – Modelo da bomba piezelétrica no ANSYS.

Na fig.4.5, podemos ver os nós e linhas definidos para o modelo. O passo seguinte é a geração da malha de elementos finitos que será utilizada para a simulação do sistema. Devemos atentar à discretização dessa 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. Um exemplo de malha gerada para a simulação da bomba piezelétrica está mostrada na fig.4.6. As malhas de elementos utilizadas para as simulações possuem em torno de 5000 elementos.

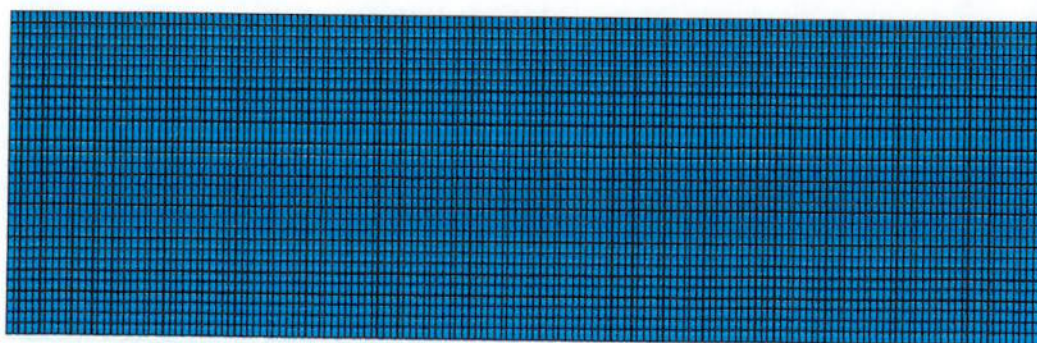


Fig. 4.6 – Malha de elementos finitos para a bomba piezelétrica.

Após a definição da geometria do modelo e a criação 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.

Voltando à fig.4.5 e analisando o modelo proposto na fig.4.4, concluímos que 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. Além disso, uma condição de contorno que não pode ser observada na fig.4.4 é a relativa à pressão, tanto na entrada como na saída do duto.

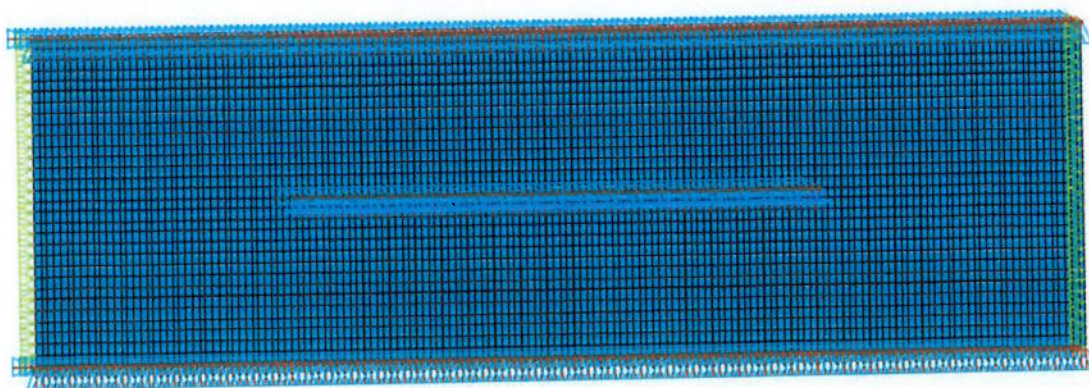


Fig. 4.7 – Condições de contorno para o sistema.

Na fig.4.7 vê-se a representação de todas as condições de contorno impostas pelo problema da bomba piezelétrica.



Fig. 4.8 – Detalhe das condições de contorno em uma das paredes.

Na fig. 4.8 vê-se em detalhe as condições de contorno impostas na parede do duto. Nestas fronteiras os deslocamentos e as velocidades são nulas.



Fig. 4.9 – Detalhe da condição de contorno na entrada.

Na fig.4.9 vê-se a condição de contorno de pressão imposta na entrada do duto. Analogamente, tem-se uma condição de pressão definida na saída do duto. A pressão aqui definida é relativa, ou seja, em relação à pressão externa. Na entrada é definida uma pressão relativa nula, ou seja, o fluido entra no duto com a mesma pressão ambiente a que estiver submetido. Na seção de saída, num primeiro momento, optou-se por impor uma pressão também nula, uma vez que ainda não havia uma idéia da ordem de grandeza da pressão que poderia ser gerada por essa configuração de bomba. Desta forma, com pressão nula na saída, avaliou-se somente se a bomba é capaz de gerar um fluxo de fluido.



Fig. 4.10 – Detalhe das condições de contorno no atuador.

Na fig.4.10 pôde-se ver as condições de contorno impostas pelo movimento do atuador piezelétrico. Os valores definidos aqui são os de deslocamentos e

velocidades nas direções dos eixos coordenados, conforme as expressões das equações eq.(3.10), eq.(3.11), eq.(3.14) e eq.(3.15), mostradas anteriormente.

É fácil notar a validade das equações do espelho torsional para o caso da bomba piezelétrica, já que, visualizando a fig.3.3, vê-se que, considerando metade da lâmina oscilante, tem-se exatamente a simplificação adotada para a bomba piezelétrica através do atuador rígido articulado.

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, com as seguintes propriedades:

$$\rho_{\text{água}} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

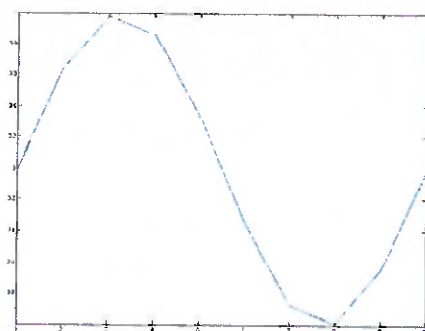
$$\mu_{\text{água}} = 0.001 \frac{\text{N.s}}{\text{m}^2}$$

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.

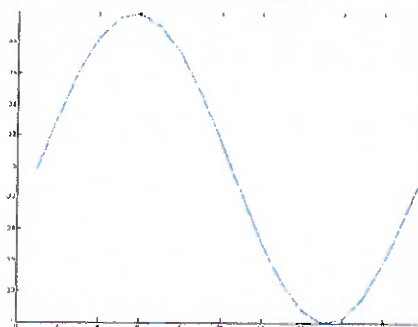
4.4.2. Solução do Problema

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 pode levar de 30 a 300 minutos, dependendo da discretização da malha e dos parâmetros de convergência adotados.

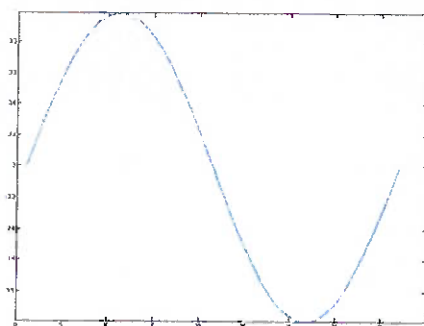
É importante lembrar que a oscilação do atuador é dado por um ângulo que, conforme a eq.3.3, varia senoidalmente. Para realizar a simulação computacional é necessário discretizar esse movimento. Outro ponto importante é o referente ao número de oscilações (períodos) que são necessárias até a obtenção de um regime permanente. Foi observado que ao simular 12 períodos, o fluxo gerado pela bomba chega a um regime aproximadamente constante, assim, a maior parte das simulações foi feita utilizando 12 períodos de oscilação. No entanto, o primeiro ponto levantado ainda permanece sem solução. É necessário definir a discretização desse movimento. Foi utilizado um número de passos igual a 500 para toda a simulação, portanto, cada período de oscilação foi discretizado em aproximadamente 42 passos. Para avaliar a qualidade dessa discretização, pôde-se ver o aspecto de uma senóide gerada a partir de diferentes números de passos na fig.4.11.



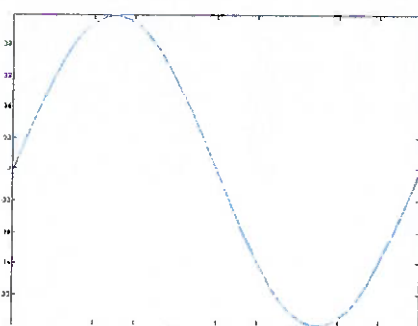
a) 10 passos



b) 20 passos



c) 42 passos



d) 500 passos

Fig. 4.11 – Função senoidal com diferentes discretizações.

Nessa figura pôde-se notar a diferença de aspecto gerado pelas diferentes discretizações. Para 10 passos (fig.4.11.a) a discretização parece ser bastante precária, sendo possível observar as imperfeições do gráfico; para 20 passos (fig.4.11.b), o aspecto melhora, mas uma análise mais atenta ainda permite observar as suas imperfeições; para 42 passos (fig.4.11.c), o número utilizado, há uma grande melhora, sendo mais difícil observar qualquer tipo de imperfeição, bastando comparar com a curva gerada com 500 passos (fig.4.11.d) para perceber que há pouca diferença entre as mesmas, sendo que esta última elevaria demasiadamente o custo computacional para esta simulação.

4.4.3. 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 são as velocidades na seção de saída do duto, através da qual pôde-se determinar a vazão de fluido que está sendo gerada pela bomba.

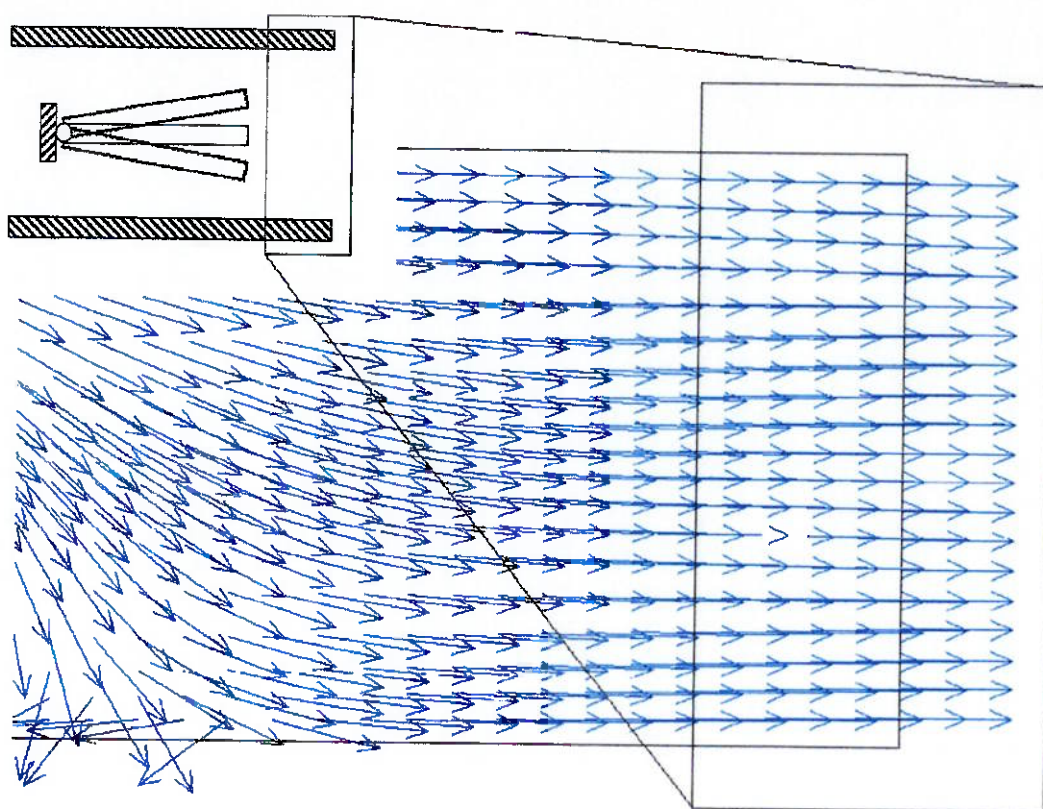


Fig. 4.12 – Vetores de velocidade na saída do duto.

Um exemplo de forma de visualização dos resultados está representado na fig.4.12, onde é possível ver os vetores de velocidade na saída do duto da bomba piezelétrica. Outro recurso disponível e bastante interessante de ser utilizado é a definição de uma linha dentro da geometria em questão, sendo possível 'mapear' e visualizar uma determinada grandeza ao longo desta linha. Trata-se do comando 'PATH' do Ansys,

onde, através de dois pontos, pode ser definida uma linha na qual é possível visualizar, por exemplo, a velocidade do fluido.

Na fig.4.13 pode ser visualizada uma linha criada com o comando 'path', em destaque, e sobre a qual será mapeada a velocidade do fluido.

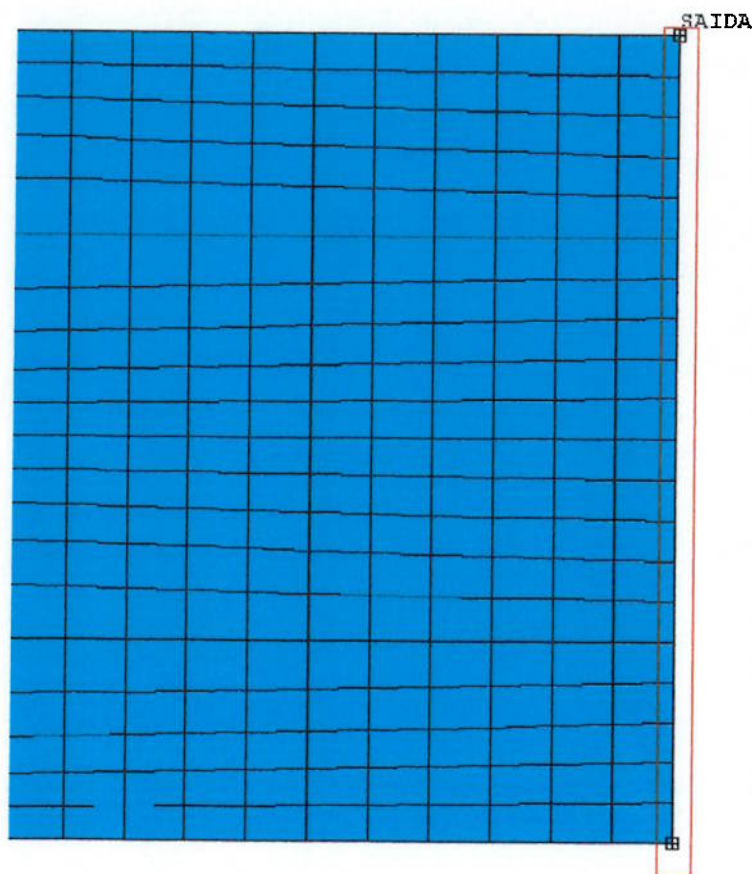


Fig. 4.13– Linha criada com o comando 'PATH'.

O 'path' pode ser definido através do GUI (Graphic User Interface), através dos menus:

» General Postproc » Path Operations » Define Path » By Nodes

Selecionando no mínimo dois pontos distintos, define-se uma linha sobre a qual é possível realizar um mapeamento de grandezas variadas.

O mesmo 'path' pode ser definido dentro de um arquivo batch em linguagem APDL através das seguintes instruções:

PATH, NAME, nPts, nSets, ndiv

Onde:

‘PATH’ é a chamada da função que criará o path;

‘NAME’ é o nome do path criado;

‘nPts’ é o número de pontos que será utilizado para a definição do path;

nSets é o número de variáveis (dados) que poderão ser mapeados com este path (por exemplo, deslocamentos, velocidades e pressão);

‘ndiv’ é o número de subdivisões utilizadas entre pontos adjacentes. Os dois últimos parâmetros podem ser omitidos e, assim, o software assume valores padrão para os mesmos.

Para a definição dos pontos extremos desse path é utilizado o seguinte comando:

PPATH, POINT, NODE, X, Y, Z, CS

Onde:

‘PPATH’ é a chamada da função;

‘POINT’ designa o número do ponto sendo determinado (‘nPts’ pontos);

‘NODE’ é uma das formas de se determinar o ponto, sabendo o número do nó referente ao ponto desejado, basta utilizar este valor (neste caso os parâmetros posteriores serão ignorados);

‘X’, ‘Y’ e ‘Z’ são as coordenadas do ponto;

‘CS’, que designa o sistema de coordenadas utilizado.

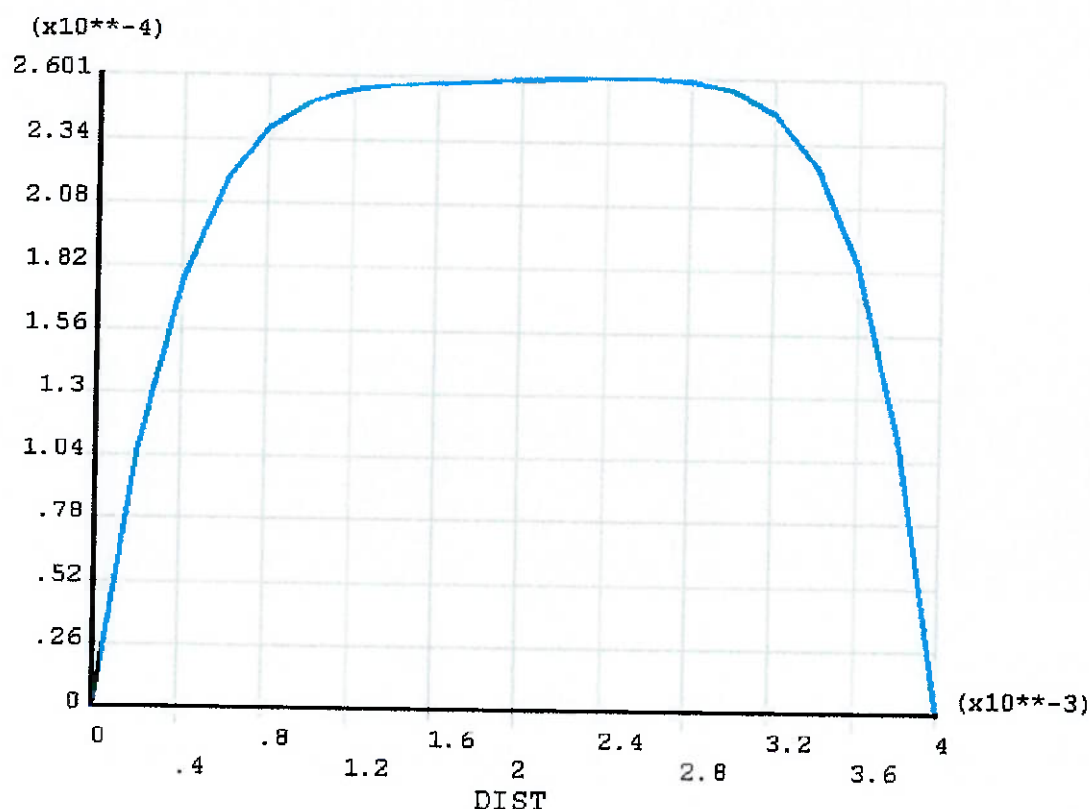


Fig. 4.14 – Gráfico de vazão ao longo da seção de saída (altura).

A fig.4.14 mostra o gráfico de vazão ao longo da seção de saída do duto, ou seja, no path mostrado na fig.4.13.

De acordo com a teoria de mecânica dos fluidos, a vazão é assim definida:

$$Q = \int_A \vec{V} d\vec{A} \quad (4.8)$$

Como a simulação foi realizada para um problema plano, assumimos uma largura contante para o canal e para o cálculo da vazão torna-se, então, necessário realizar a integração da velocidade ao longo da altura do duto.

Os resultados mostrados até este ponto, no entanto representam o sistema em um determinado instante de tempo, ou seja, algo como uma 'fotografia' do sistema em um determinado instante.

Para determinar um valor médio de vazão, que é o desejado, é necessário observar o comportamento dessa velocidade ao longo do tempo, ou seja, é necessário fazer essa integração a cada instante e posteriormente, determinar um valor médio.

Devido à complexidade em realizar todas essas operações dentro do próprio ANSYS, optou-se por escrever um arquivo ASCII contendo os valores de velocidade para, posteriormente, realizar todos os cálculos necessários utilizando o software MATLAB, através de uma função desenvolvida dentro do mesmo.

Para a geração de um arquivo de dados foi utilizado o comando *VWRITE. O primeiro passo para se escrever um arquivo é definir seu nome e sua extensão, tornando-o então disponível para receber os dados desejados. Este passo é realizado utilizando o comando *CFOPEN, cuja sintaxe é dada a seguir:

***CFOPEN, Fname, Ext, Dir, Loc**

onde:

‘*CFOPEN’ é a chamada da função;

‘Fname’ é o nome do arquivo a ser gerado;

‘Ext’ é a extensão do arquivo;

‘Dir’ é a localização do arquivo;

‘Loc’ define se o arquivo será sobrescrito ou se os novos dados serão anexados caso já exista um arquivo com o nome e extensão especificados.

Para realizar a escrita dos dados no arquivo é utilizado o comando:

***VWRITE, Par1, Par2, Par3, Par4, Par5, Par6, Par7, Par8, Par9, Par10**

Onde:

'*VWRITE' é a chamada da função;

'Par1' a 'Par10' são os parâmetros que devem ser escritos no arquivo.

Sobre esta função é importante mencionar a importância de se especificar o formato dos números sendo escritos no arquivo de saída, uma vez que, sem essa especificação não é possível gerar o arquivo conforme o desejado. Um exemplo está dado a seguir:

***vwrite,R(1,1), R(2,1), R(3,1), R(4,1), R(5,1), R(6,1), R(7,1), R(8,1), R(9,1),
R(10,1)
(1x,10(2pe17.5))**

A primeira linha chama a função e passa os parâmetros que devem ser escritos no arquivo. A segunda linha dá a especificação do formato em que esses parâmetros devem ser escritos (esta especificação é feita através dos formatos utilizados em linguagem FORTRAN). A função VWRITE tem uma limitação quanto ao número de parâmetros que é possível escrever em uma linha de um dado arquivo, sendo possível escrever apenas dez parâmetros a cada chamada da função.

O arquivo ASCII é escrito num formato de matriz de dimensão MxN, ou seja, com M linhas e N colunas, onde M representa o número de passos no tempo e N, o número de nós na saída do duto.

Fixando um valor de M, ou seja, para um dado instante de tempo, tem-se N valores de velocidade nos nós da seção de saída do duto. É necessário realizar a integração destes valores para a obtenção do valor médio de velocidade.

Para a realização desta integração foi empregado o método dos trapézios.

$$\bar{Q} = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{[v_i + v_{i+1}]}{2} A_i \quad (4.9)$$

No entanto, a simulação foi feita considerando apenas o problema bidimensional, desta forma, $A_i = h_i d_i$, onde h_i é a altura de cada elemento e d_i , é a profundidade, que pode ser considerada constante para o sistema simulado. Considerando ainda um passo constante para a altura, tem-se:

$$\bar{Q} = h d \sum_{i=1}^{N-1} \frac{[v_i + v_{i+1}]}{2} \quad (4.10)$$

Expandindo o termo da somatória, tem-se:

$$\sum_{i=1}^{N-1} \frac{v_i + v_{i+1}}{2} = \left[\frac{v_1}{2} + \frac{v_2}{2} \right] + \left[\frac{v_2}{2} + \frac{v_3}{2} \right] + \dots + \left[\frac{v_{N-2}}{2} + \frac{v_{N-1}}{2} \right] + \left[\frac{v_{N-1}}{2} + \frac{v_N}{2} \right] \quad (4.11)$$

Pelas condições de contorno impostas para o problema, tem-se que: $v_1 = 0$ e $v_N = 0$, portanto, não interferem matematicamente nos cálculos. Assim, com a informação de passo constante na altura, temos: $h = \frac{H}{N}$, onde H é a altura do tudo. Lembrando que $A = H.d$, pode-se reescrever a eq.(4.10):

$$\bar{Q} = \frac{A}{N-1} \sum_{i=1}^N v_i \quad (4.12)$$

Ou ainda:

$$\bar{Q} = A \frac{N}{N-1} \bar{v} \quad (4.13)$$

onde: $\bar{v}$ é o valor médio da velocidade na saída da bomba.

Desta forma pode-se obter o valor da velocidade para um determinado instante de tempo. Variando agora o valor de M, variamos o tempo para o qual calcula-se o valor da velocidade.

No entanto, dada a limitação da função *VWRITE não foi possível escrever um arquivo ASCII com mais de 10 colunas. A solução encontrada foi 'quebrar' as M colunas em várias linhas com 10 elementos e realizar as alterações de forma a se obter uma matriz $M \times N$ através do próprio MATLAB.

Outra maneira de se trabalhar com esses dados, mais simples e prática, é realizar o cálculo do valor médio da velocidade dentro do próprio ANSYS e escrever um arquivo de saída contendo somente os valores médios, desta forma, importando os dados no MATLAB, tem-se um vetor com N elementos contendo os valores médios. Dentre os comandos utilizados no MATLAB, convém mencionar o 'DLMREAD', cuja sintaxe é representada a seguir, e que faz a leitura de um arquivo ASCII transcrevendo as informações contidas no mesmo para uma matriz.

DADOS = DLMREAD ('nomearq');

Onde:

'DLMREAD' é a chamada da função;

'DADOS' é a matriz que recebe os elementos do arquivo lido;

'nomearq' é o nome do arquivo que contém os dados a serem lidos.

5. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

5.1. Simulação do espelho torsional

Os primeiros resultados obtidos são provenientes da simulação do problema do espelho torsional.

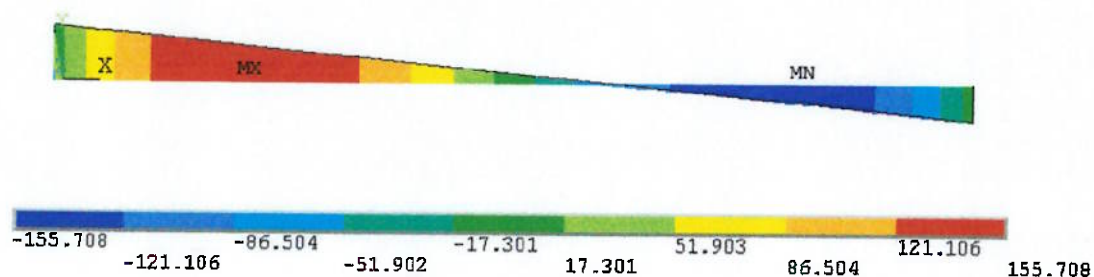


Fig. 5.1 – Campo de pressões no espelho torsional.

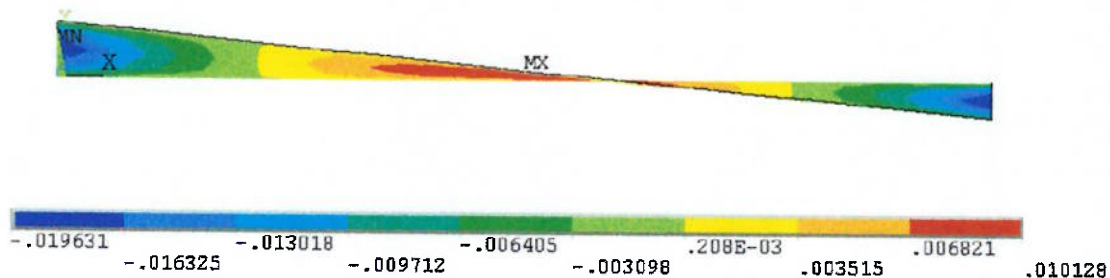


Fig. 5.2 – Velocidades em no eixo 'x' no espelho torsional.

Na fig.5.1 pode-se notar ver o comportamento do campo de pressões no problema do espelho torsional.

Na fig.5.2 é possível observar o campo de velocidades no eixo 'x', evidenciando que de fato ocorre uma movimentação do fluido em torno da placa oscilante.

A utilização deste exemplo é bastante conveniente dada a semelhança geométrica entre este sistema e o da bomba piezelétrica. Além disso, neste problema tem-se também a formulação ALE sendo utilizada, ou seja, trata-se de um exemplo bastante elucidativo em relação à metodologia utilizada para as simulações da bomba piezelétrica.

5.2. Primeira modelagem para a bomba piezelétrica

Tendo em mãos todo o ferramental necessário para a realização de uma simulação utilizando condições de contorno móveis, foram feitas as primeiras adaptações para o problema da bomba piezelétrica.

Nas primeiras simulações realizadas as dimensões utilizadas ainda não correspondiam às dimensões reais do protótipo. A idéia inicial foi verificar a possibilidade de implementação da geometria do problema e das suas condições de funcionamento. As dimensões consideradas foram: $h=100\text{mm}$, (com a seção do duto quadrada), lâmina atuadora com 500mm de comprimento, amplitude máxima de oscilação (pico-a-pico) de 50mm e frequência de oscilação de 50Hz .

O modelo empregado pode ser visto na fig.4.4. Os resultados obtidos serão mostrados a seguir:

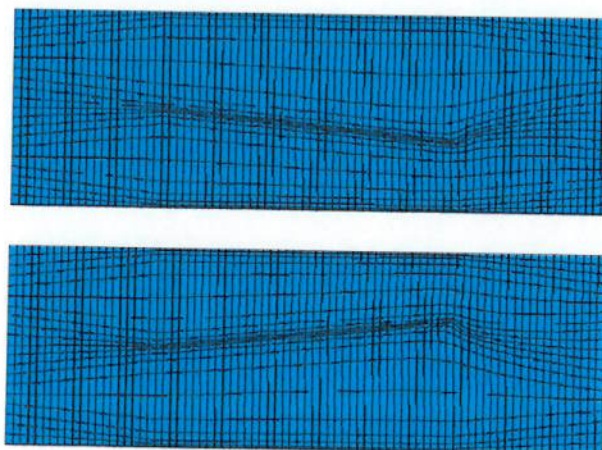


Fig. 5.3 – Representação da malha de elementos em posições deslocadas.

Na fig.5.3 vê-se a malha de elementos finitos modificada de forma a se adaptar às condições de contorno impostas pelo atuador (fronteira móvel).

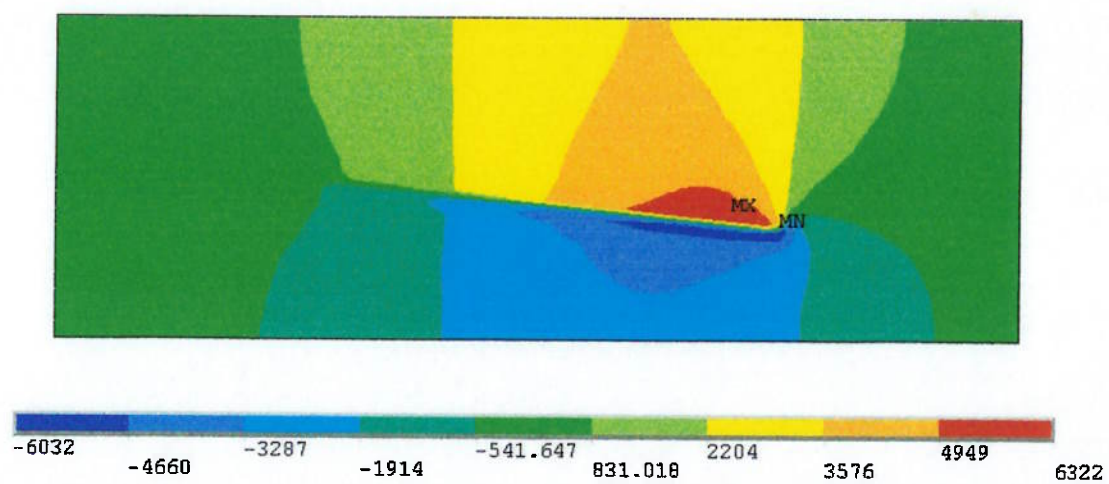


Fig. 5.4 – Campo de pressões para a bomba piezelétrica.

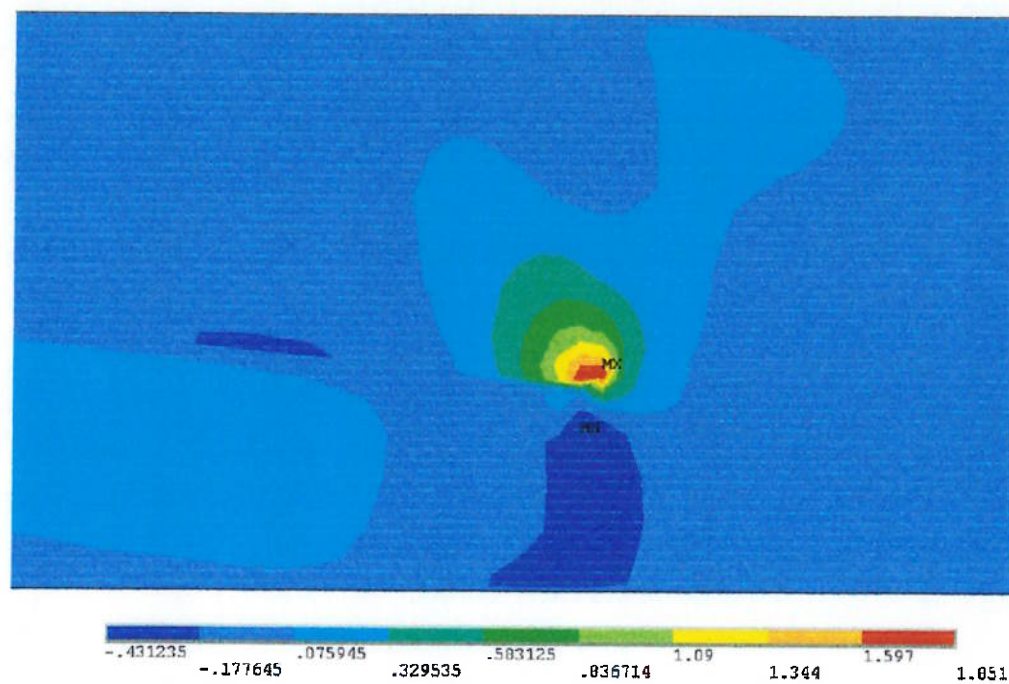


Fig. 5.5 – Campo de velocidades no eixo x.

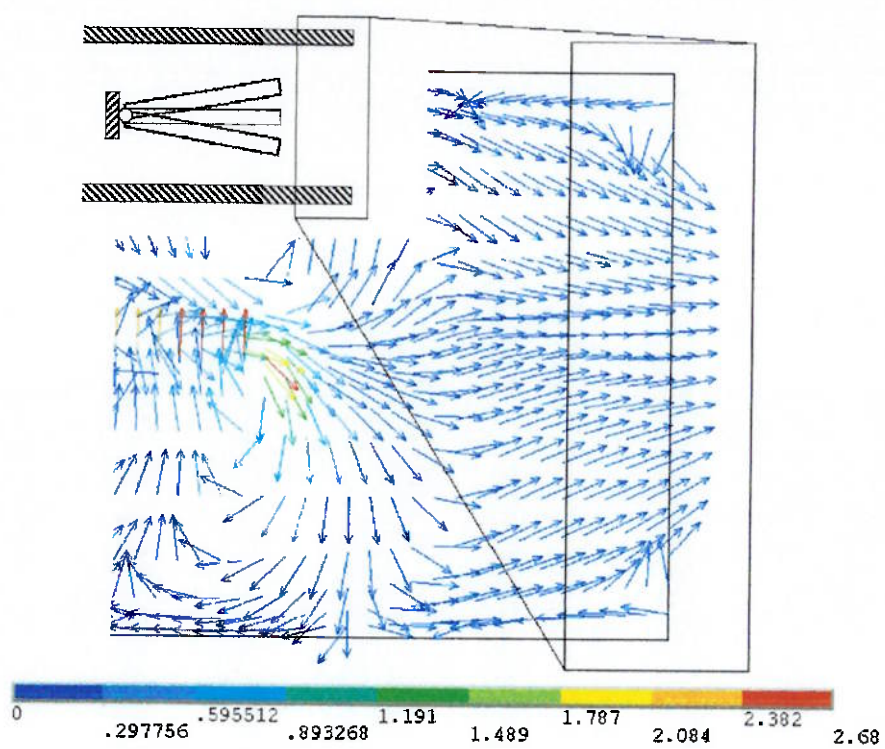


Fig. 5.6 – Vetores de velocidade (detalhe).

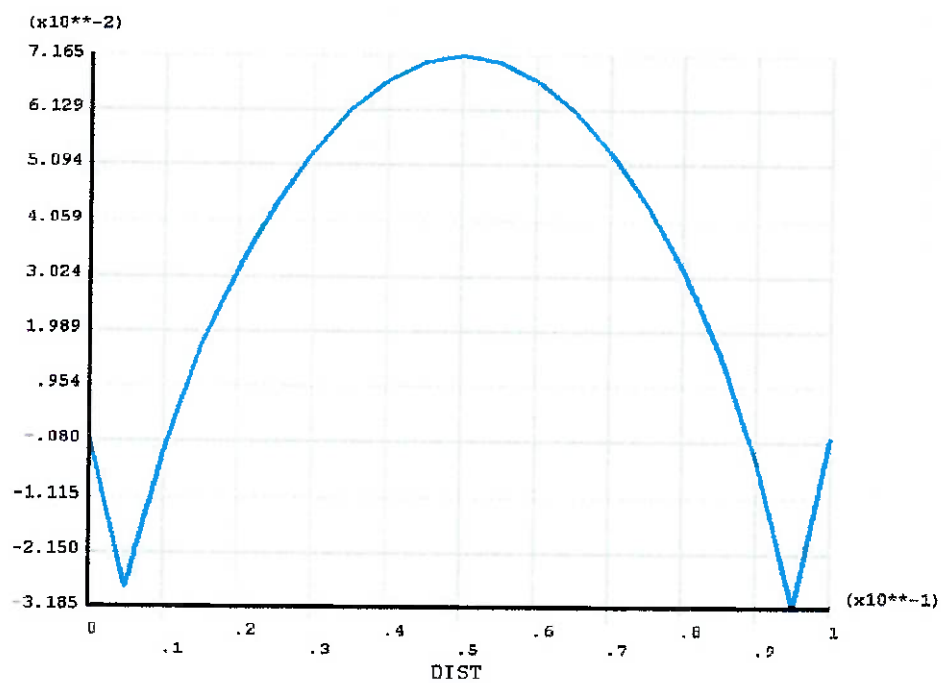


Fig. 5.7 – Perfil de velocidades para a bomba piezelétrica.

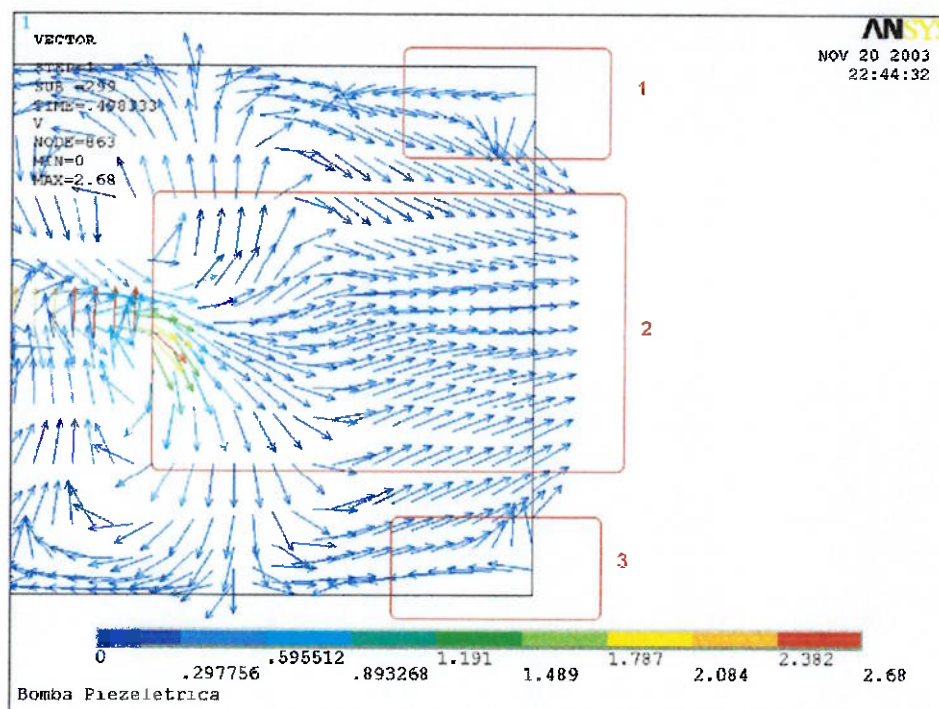


Fig. 5.8 – Escoamento não-desenvolvido.

Na fig.5.4 vê-se o campo de pressões gerado no fluido através da movimentação do atuador.

Nas figuras fig.5.5 e fig.5.6 são mostradas duas formas de se fazer a representação da velocidade no software ANSYS. Na fig.5.5, está sendo representado o campo de pressões no eixo x, ou seja, na direção em que o escoamento deve ocorrer. Esta representação permite uma análise geral da grandeza observada, dando uma idéia da grandeza dos valores envolvidos. Já na fig.5.6 estão representados os vetores de velocidade (em detalhe), esta visualização é mais adequada para se analisar o comportamento de fluido em uma dada região.

O perfil de vazão obtido para este primeiro modelo pode ser observado na fig.5.7. Nota-se que as condições de contorno estão sendo obedecidas uma vez que a velocidade é nula nas extremidades. No entanto, o comportamento deste perfil difere do esperado uma vez que apresenta uma tendência a valores negativos nas regiões periféricas e positivos somente na região central da seção. Este comportamento pode ser explicado observando-se a fig.5.8. Observa-se que nas região 2, próxima ao atuador, há uma tendência do fluxo seguir na direção positiva do eixo 'x' e nas regiões 1 e 3, uma tendência a seguir na direção negativa. Como a seção de saída

ainda está próxima a estas regiões, o escoamento ainda não se encontra totalmente desenvolvido e pode, então, ocorrer este tipo de resultado.

Uma vez obtido o perfil de velocidades, para determinar a vazão tem-se a eq.4.8. Como o problema é bidimensional, a dimensão na coordenada 'z' é constante e a integral passa ser feita não na área, mas sim na linha de saída. Calculando a integral através do ANSYS e multiplicando pela dimensão na coordenada 'z', obtém-se os resultados, para diferentes passos no tempo, expressos na tab.5.1.

Tab.5.1 – Velocidade média na seção de saída para diferentes passos no tempo.

<i>Passo</i>	<i>Velocidade Média (m/s)</i>
400	-0.010511
399	-0.011791
398	-0.012547
397	-0.012698
396	-0.012071
395	-0.010735
394	-0.008874
393	-0.006583
392	-0.004467
391	-0.002351

Note que o resultado para a vazão neste modelo contraria a idéia intuitiva de que o fluido deve seguir pela direção positiva do eixo 'x' representado na fig.5.9. Isso ocorre devido às dimensões escolhidas.

Com as dimensões deste modelo, a vazão média de fluido foi calculada como sendo de 400mL/min, no sentido negativo do eixo x, indicado na fig.5.9.

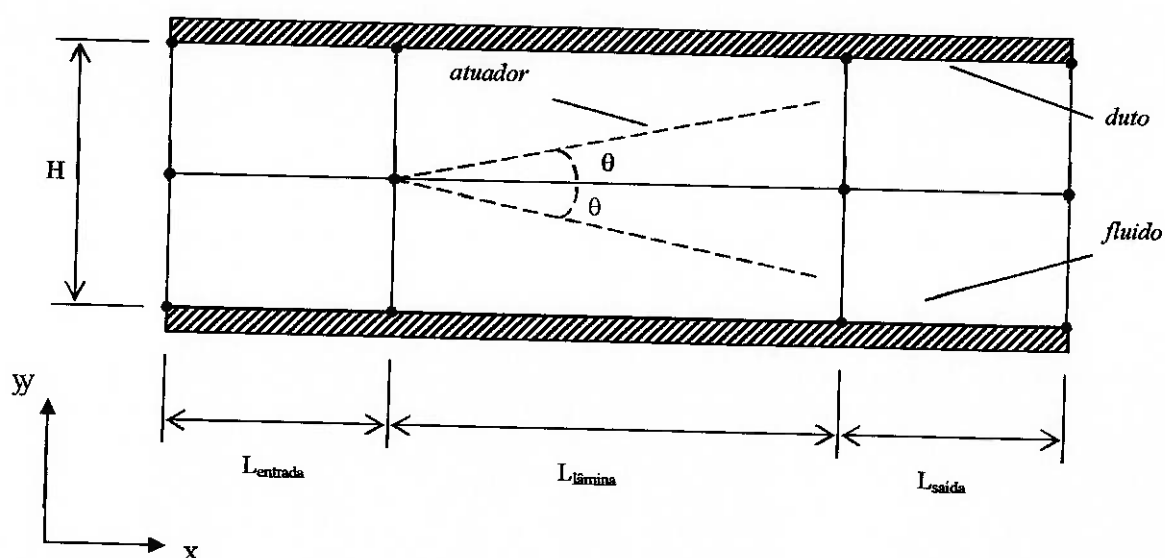


Fig. 5.9 – Orientação dos eixos coordenados.

Para comprovar a hipótese de que o comportamento do escoamento observado fora causado realmente pelas dimensões do modelo, o mesmo foi refeito de modo a se adequar às dimensões do atuador piezelétrico utilizado nos protótipos, bem como às dimensões aproximadas dos protótipos construídos.

Este segundo modelo foi simulado segundo os seguintes parâmetros:

$h=4\text{mm}$;

$L_{lâmina}=35\text{mm}$;

$f=80\text{Hz}$;

$A_{\max}=30\mu\text{m}$.

Foi obtido um valor de vazão de $53\mu\text{L}/\text{min}$ para este modelo, valor três ordens de grandeza menor, mas que apresentou um comportamento condizente com a intuição física do sistema, ou seja, o escoamento se deu no sentido positivo do eixo 'x', ou seja, para as dimensões reais do protótipo o escoamento deve ocorrer o escoamento de fluido segundo o esperado.

5.3. Modelagem do protótipo de prova de princípio

Para comprovação do princípio de funcionamento proposto, foi construído um protótipo em acrílico com uma lâmina de alumínio articulada para a emulação do comportamento oscilatório desejado. A construção deste protótipo será apresentada com mais detalhes na seção 6.1, sobre a viabilidade de funcionamento.

Dada a contrariedade em relação à idéia intuitiva de que o fluido se moveria na direção positiva do eixo 'x', foi realizada uma simulação para este modelo com as dimensões utilizadas no modelo em acrílico construído para a verificação da validade do princípio proposto. O modelo simulado representa fielmente este modelo, uma vez que o atuador é um corpo rígido articulado, como pode ser visto na fig.6.1.

Para esta simulação foi considerado um comprimento da lâmina de 50mm, e o duto, uma seção quadrada de dimensões 30x30mm. A frequência de oscilação imposta foi de 3Hz, valor que parece adequado para a atuação manual empregada no experimento.

A seguir, na fig.5.10, tem-se o perfil de velocidades para o modelo. Como pode ser visto, trata-se de um perfil de velocidades já desenvolvido, uma vez que foi considerada uma região de saída maior, com o comprimento equivalente ao triplo da altura, de forma a permitir o completo desenvolvimento do escoamento.

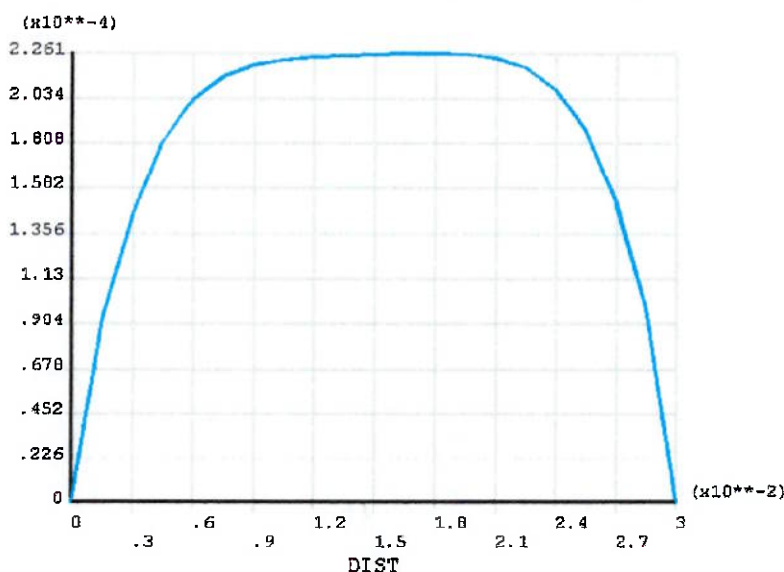


Fig. 5.10 – Perfil de velocidades para o protótipo de prova de princípio.

Na fig.5.11 vê-se os vetores de velocidade na região próxima a extremidade da lâmina oscilante. Os vetores em vermelho representam as maiores magnitudes de velocidade no sistema, sendo encontrada nesta região a extremidade da lâmina. Observa-se também que na região posterior há diferentes comportamentos para o fluido. Na parte superior o fluido segue na direção positiva e na inferior, na direção negativa. Na fig.5.12, já se tem o escoamento desenvolvido, com o fluido se movimentando somente na direção positiva do eixo 'x'.

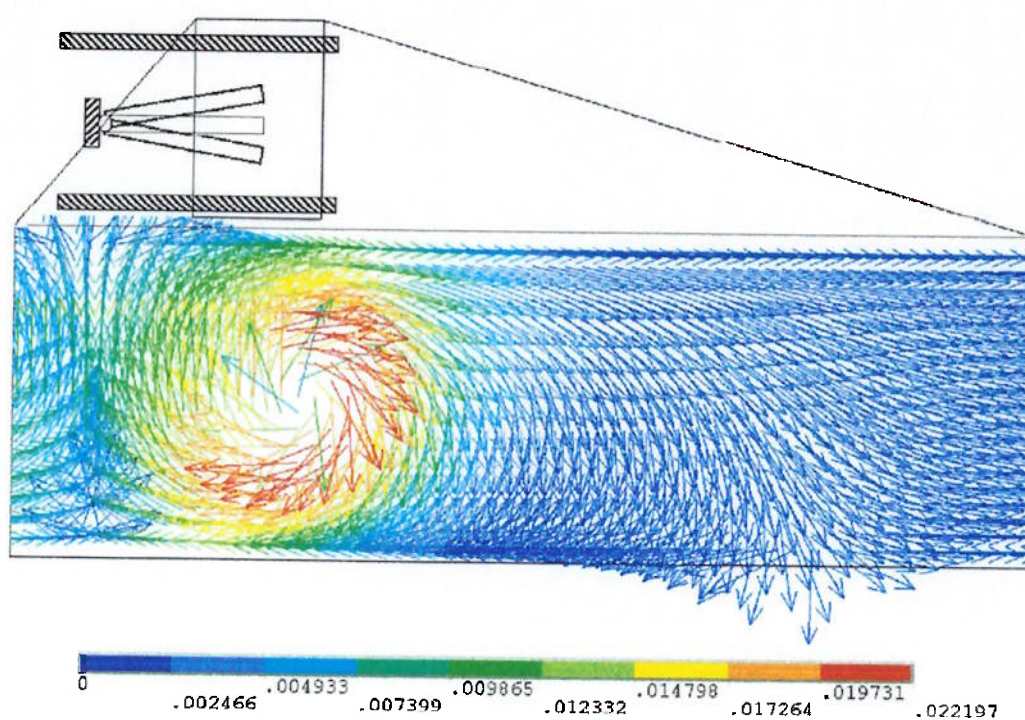


Fig. 5.11 – Vetores de velocidade para o protótipo de prova de princípio.

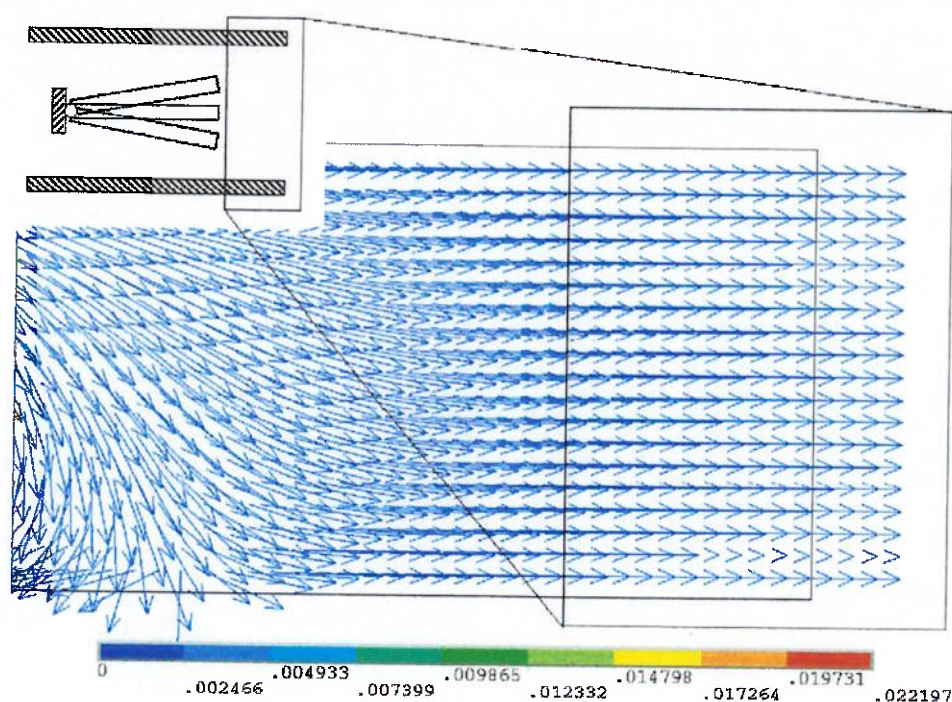


Fig. 5.12 – Vetores de velocidade na região de saída.

Foram realizadas, na realidade, duas simulações para este modelo, diferindo somente na amplitude de oscilação. No primeiro modelo, θ_0 foi escolhido de forma a se obter uma amplitude de oscilação máxima de 10mm e no segundo modelo, a amplitude utilizada foi de 12mm. A amplitude máxima utilizada na simulação não corresponde exatamente à amplitude de oscilação que foi conseguida através do protótipo, uma vez que durante o experimento, a extremidade da lâmina chegava a se encostar às paredes do duto. Outro ponto um pouco destoante do modelo é o comprimento da lâmina, uma vez que o protótipo apresenta uma lâmina de 40mm enquanto a simulação considerou uma lâmina de 50mm. Essa variabilidade, no entanto, não prejudica a avaliação dos resultados, uma vez que a idéia, neste ponto, é validar qualitativamente os resultados computacionais, equiparando-os com o fenômeno observado.

Tab.5.2 – Vazão para diferentes amplitudes de oscilação.

<i>Amplitude de Oscilação (mm)</i>	<i>Vazão Média (mL/min)</i>
10	117,2
12	159,3

Na tab.5.2 estão expressos os resultados para essas simulações. Qualitativamente os resultados estão coerentes, pois houve fluxo de fluido no mesmo sentido do observado experimentalmente. Quantitativamente não há dados para se efetuar uma comparação, mas a ordem de grandeza de vazão obtida parece ser adequada ao fenômeno observado. Para efeitos de comparação: um copo plástico pequeno tem capacidade de 200mL e uma lata de refrigerante, capacidade de 350mL. Portanto, o fenômeno observado durante o experimento de prova de princípio foi reproduzido computacionalmente, tendo sido comprovada a validade dos resultados das simulações.

5.4. Novo modelo para a bomba piezelétrica

Por questões construtivas, foi observado que o funcionamento do modelo inicial, representado na fig.5.9, estava bastante comprometido em razão da forma que foi feita a fixação do atuador piezelétrico dentro do canal da bomba. Portanto, houve uma alteração no modelo computacional de forma a se adequar ao formato do novo protótipo proposto, que solucionou o problema da fixação.

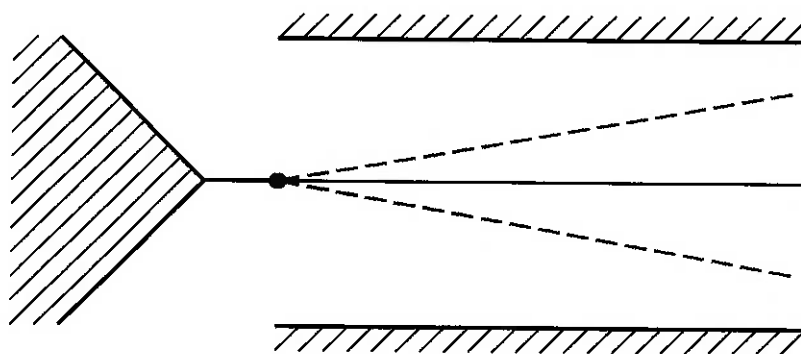


Fig. 5.13 – Novo modelo para bomba piezelétrica.

Neste novo modelo, mostrado na fig.5.13, a entrada do fluido não mais se dá na região traseira do sistema, mas sim em duas aberturas na parte superior e inferior do

modelo. Desta forma, a região traseira é utilizada para garantir um engastamento adequado do atuador.

Para este novo modelo já foram consideradas as dimensões reais do protótipo, com altura do canal de 4mm, comprimento do atuador de 35mm, frequência de oscilação de 80Hz e amplitude de oscilação pico-a-pico de $30\mu\text{m}$. Os dados referentes à frequência e amplitude máxima de oscilação foram obtidos do relatório de determinação de amplitude de vibração de transdutores piezelétricos por interferometria laser de Shirahige (2002).

Os resultados da simulação utilizando estes dados estão demonstrados a seguir.

Na fig.5.14, temos a representação dos vetores de velocidade na saída da bomba piezelétrica. Como pode ser notado, nesta região o escoamento já se encontra desenvolvido.

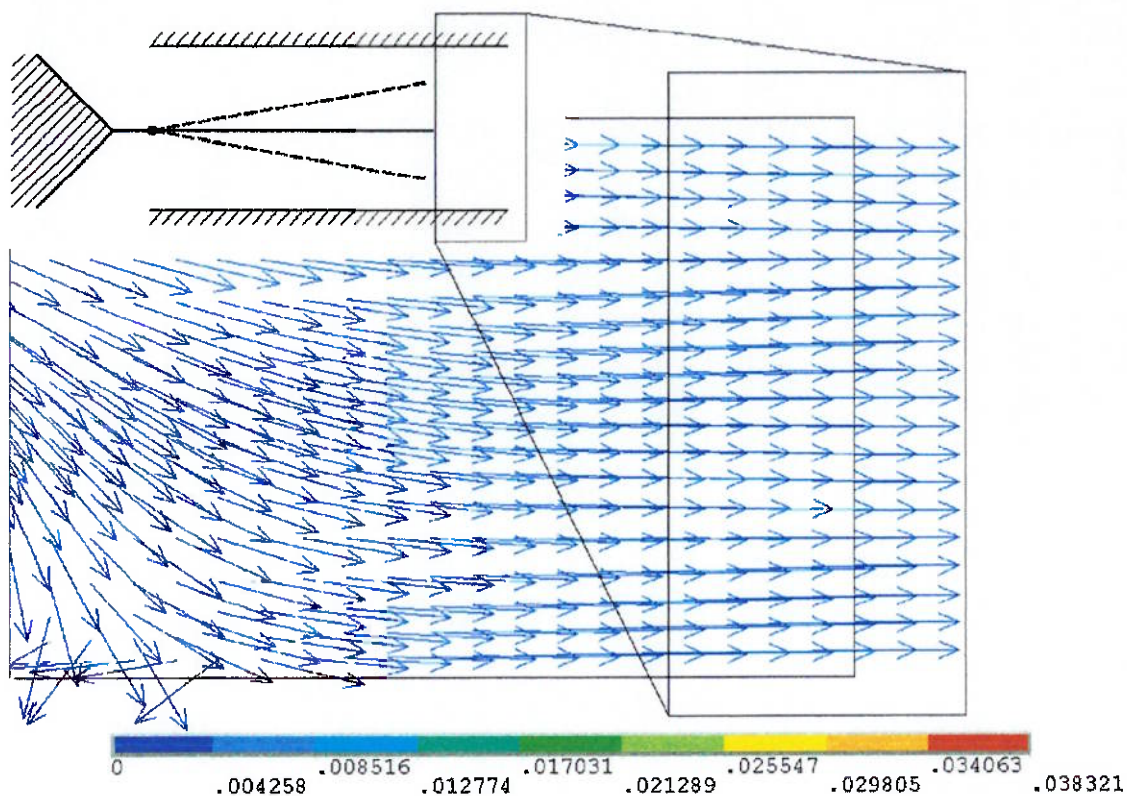


Fig. 5.14 – Vetores de velocidade na região de saída da bomba.

Nas figuras fig.5.15 e 5.16, vêem-se, respectivamente, a região de entrada inferior e superior da bomba. Na parte inferior nota-se que ocorre um fluxo de fluido entrando na bomba, como o esperado. No entanto, na parte superior, há um fluxo de fluido saindo da bomba.

Este refluxo é causado pela geometria da bomba e seu modo de funcionamento. Quando o atuador está em movimento ascendente, há uma tendência a 'sugar' o fluido pela região inferior, mas ao mesmo tempo, comprime-se a região superior, o fluido então, tende a sair em parte pela região que se considera como entrada. Esta ocorrência está exemplificada na fig.5.17a. Analogamente, a situação mostrada na fig.5.17b pode ser explicada.

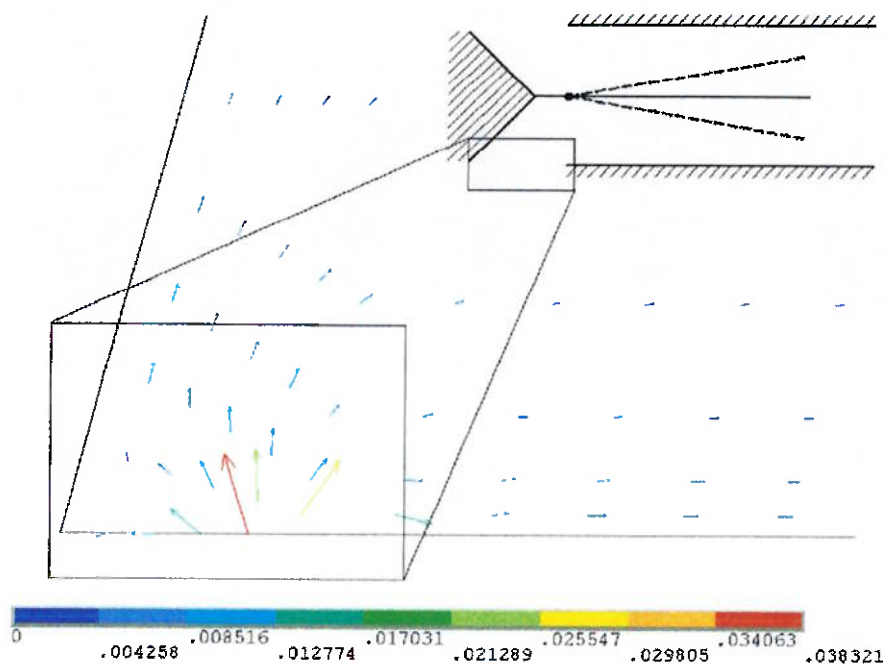


Fig. 5.15 – Detalhe da região de entrada inferior da bomba.

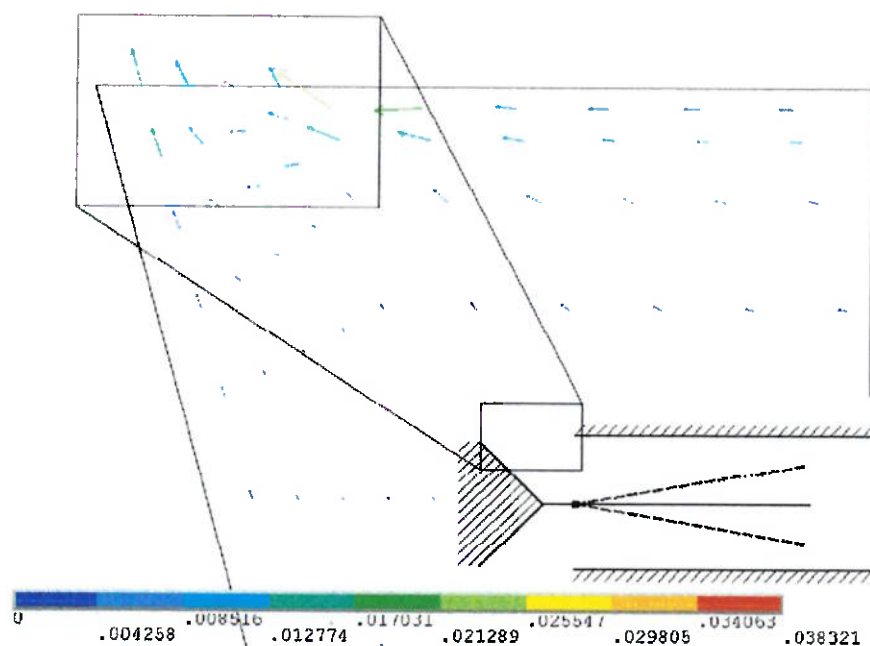


Fig. 5.16 – Detalhe da região de entrada superior da bomba.

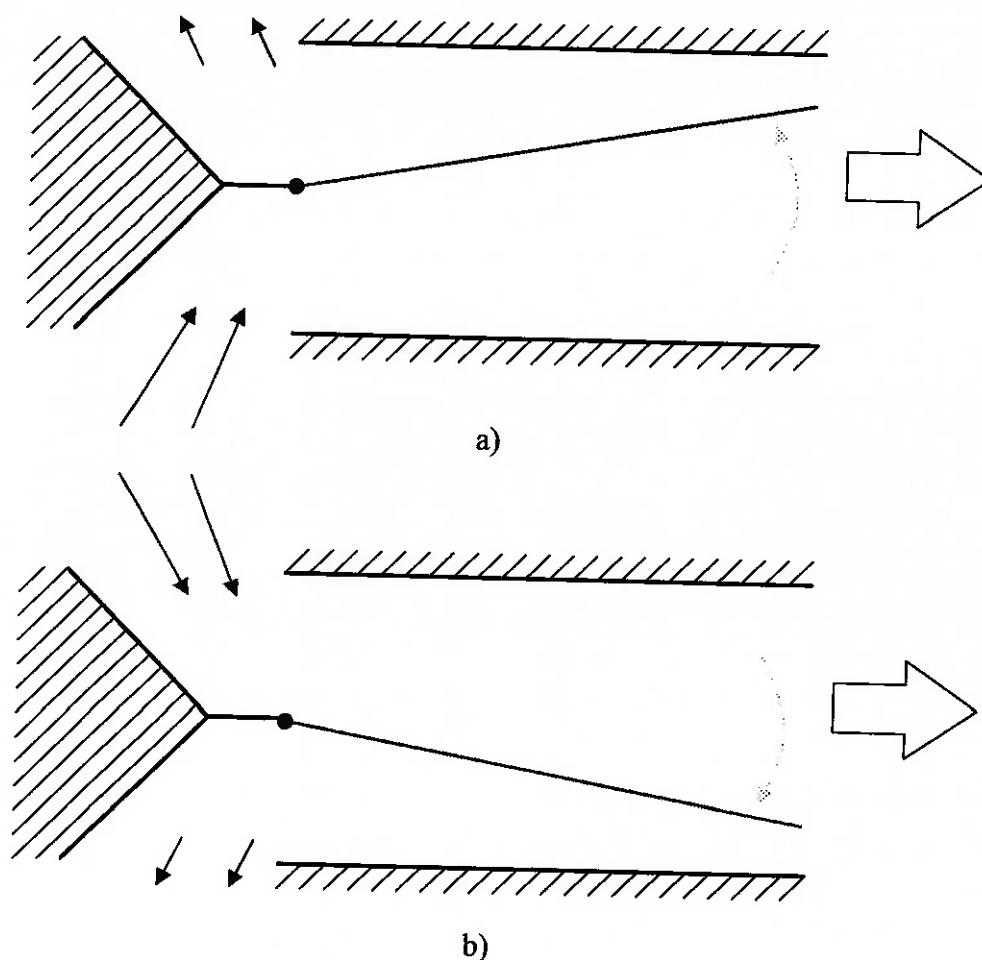


Fig. 5.17 – Refluxo na região de entrada

A partir desta simulação o cálculo da vazão passou a ser sistematizado, ou seja, feito de maneira automática, e não da forma que vem sendo demonstrada através do gráfico e integração pelo ANSYS.

Neste momento, passou-se a escrever um arquivo contendo os valores médios das velocidades em cada instante. Este procedimento possibilitou a verificação do comportamento da vazão ao longo do tempo. Desta forma, pôde-se avaliar o tempo de simulação necessário até que o transiente do sistema fosse superado e o escoamento se tornasse permanente.

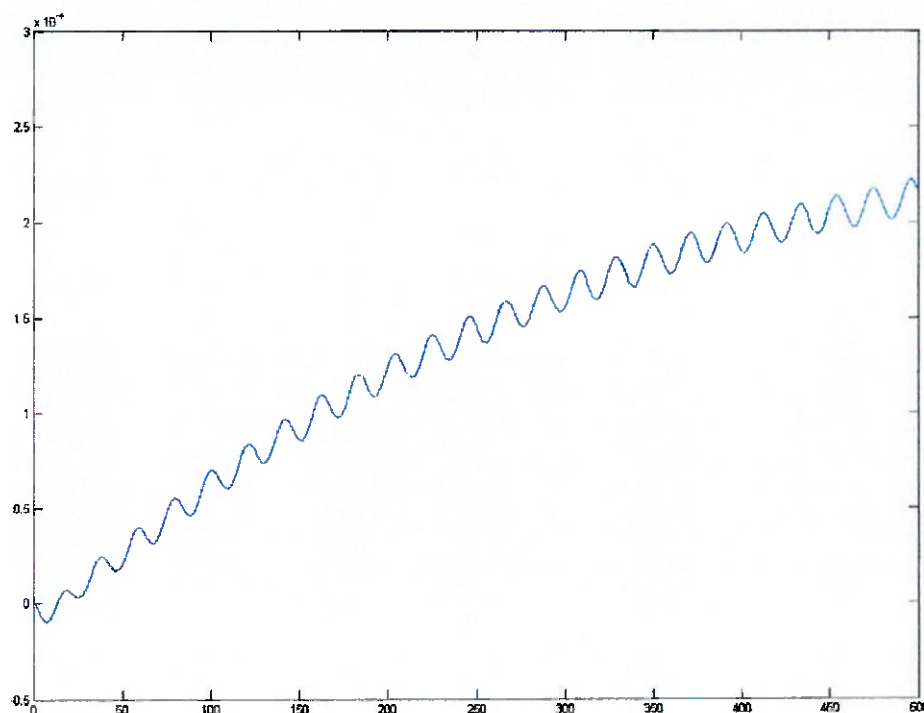


Fig. 5.18 – Gráfico da velocidade média em função do tempo (passos).

O gráfico da fig.5.18 mostra o comportamento da velocidade média em função dos passos no tempo. Foram simuladas 12 oscilações do atuador para a obtenção deste resultado. Como se pode ver, ao final da simulação ainda não temos um valor de velocidade completamente estabilizado, no entanto, já é possível notar uma tendência à estabilização, podendo então, este valor, ser considerado como muito próximo ao valor de regime.

O comportamento oscilatório observado deve ser proveniente do modo de operação da bomba. Para determinar o valor médio de regime, uma saída seria fazer um cálculo integral dentro de um período de oscilação e dividir pelo intervalo de tempo, conforme a equação seguinte:

$$\bar{v} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{T} v(t) \cdot dt \quad (5.1)$$

Uma maneira mais simples de se obter este valor é determinar uma linha de tendência para a velocidade. A partir desta linha fica simples determinar a velocidade média do fluido.

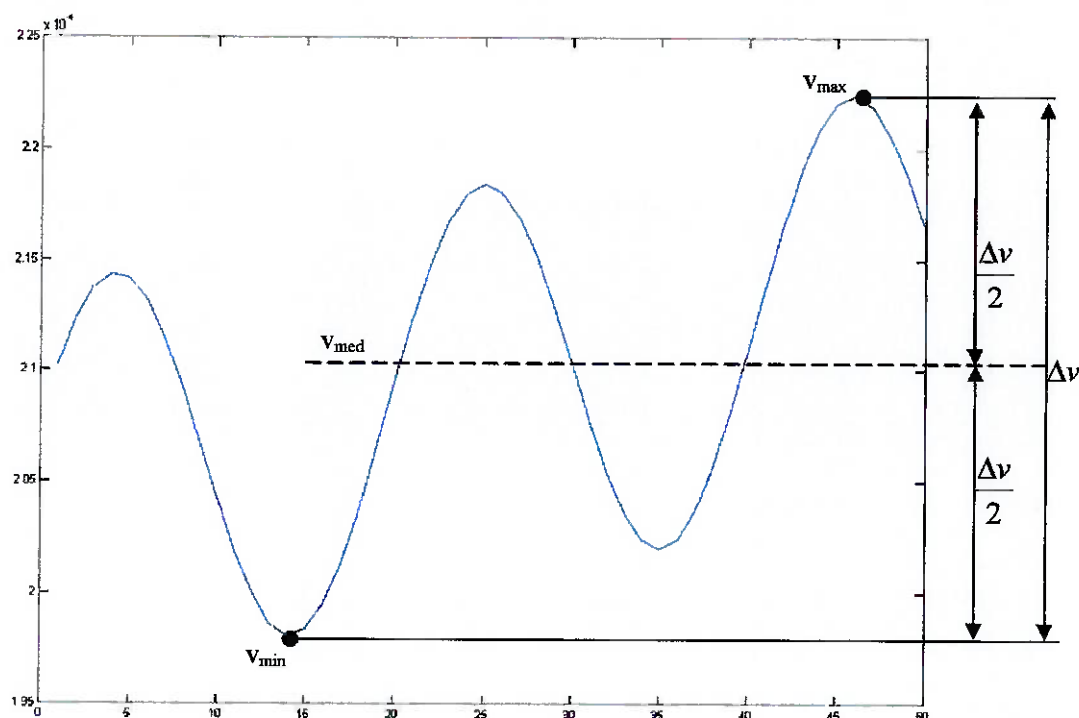


Fig. 5.19 – Determinação da velocidade média.

Considerando que no final da simulação o fluxo já seja aproximadamente constante, a linha de tendência será uma reta horizontal. Para achar o seu valor médio, basta achar a média entre o valor máximo e mínimo neste intervalo, conforme a expressão da eq.5.2.

$$\bar{v} = \frac{\max(v(n)) + \min(v(n))}{2} \quad (5.2)$$

Para o cálculo da vazão, utiliza-se a expressão da eq.4.13. Vale frisar que, do modo como o algoritmo foi implementado em ANSYS, basta multiplicar o valor médio lido pela área de saída para obter-se o fluxo médio.

Utilizando unidades do S.I., pode-se calcular a vazão da bomba piezelétrica para as condições impostas.

$$\bar{Q} = A_{saída} \cdot v_{med} \quad (5.3)$$

Onde: $A_{saída} = 0,004.0,020 = 8.10^{-5} m^2$, e $v_{med} = 2,103.10^{-4}$, portanto a vazão média da bomba será de $1,6824.10^{-8} \frac{m^3}{s}$.

Pode-se ver que a partir deste valor não é possível tirar qualquer conclusão sobre a bomba, uma vez que é difícil ter uma noção quantitativa sobre o resultado. Para uma bomba de fluxo deste porte, a utilização de $\left[\frac{m^3}{s} \right]$ como unidade de vazão volumétrica não é adequada, uma vez que é intuitivo dizer que esta unidade vai muito além da capacidade de uma bomba com estas dimensões. Para analisar os resultados, a unidade utilizada foi $\left[\frac{mL}{min} \right]$. A conversão entre essas unidades é feita da seguinte forma:

$$\left[\frac{mL}{min} \right] = \left[\frac{m^3}{s} \right] [60s.1000000mL] \quad (5.4)$$

Assim, utilizando a eq.5.4, a vazão para este modelo fica:

$$\bar{Q} = 1,6828.10^{-9}.60.10^6 = 1,0094 \frac{mL}{min}$$

5.5. Sensibilidade da Bomba Piezelétrica

O passo seguinte correspondeu ao estudo da sensibilidade da bomba piezelétrica em relação aos seus parâmetros construtivos, ou seja, como a vazão é alterada quando se muda a frequência de oscilação, por exemplo.

Os parâmetros considerados mais relevantes para o problema da bomba piezelétrica são os mostrados na fig.3.6, ou seja, altura do duto, frequência de oscilação e amplitude de oscilação.

5.5.1. Sensibilidade em relação à altura do duto

O primeiro parâmetro avaliado foi a altura do duto, para isto, foi considerado um domínio de projeto entre 3 e 5 milímetros, ou seja, uma variação para mais ou menos de 1mm em relação à configuração original. Os resultados obtidos estão expressos na tabela a seguir (tab.5.3):

Tab.5.3 – Sensibilidade da bomba em relação à altura do duto.

<i>Altura do duto (mm):</i>	<i>Vazão (mL/min):</i>
3,00	0,5522
3,25	0,6627
3,50	0,7765
3,75	0,8923
4,00	1,0094
4,25	1,1276
4,50	1,2461
4,75	1,3646
5,00	1,4815

Como pode ser visto, quanto maior a altura do duto considerado, maior a vazão, até o valor máximo considerado. Essa variação pode ser vista também na forma gráfica a seguir (Fig.5.20).

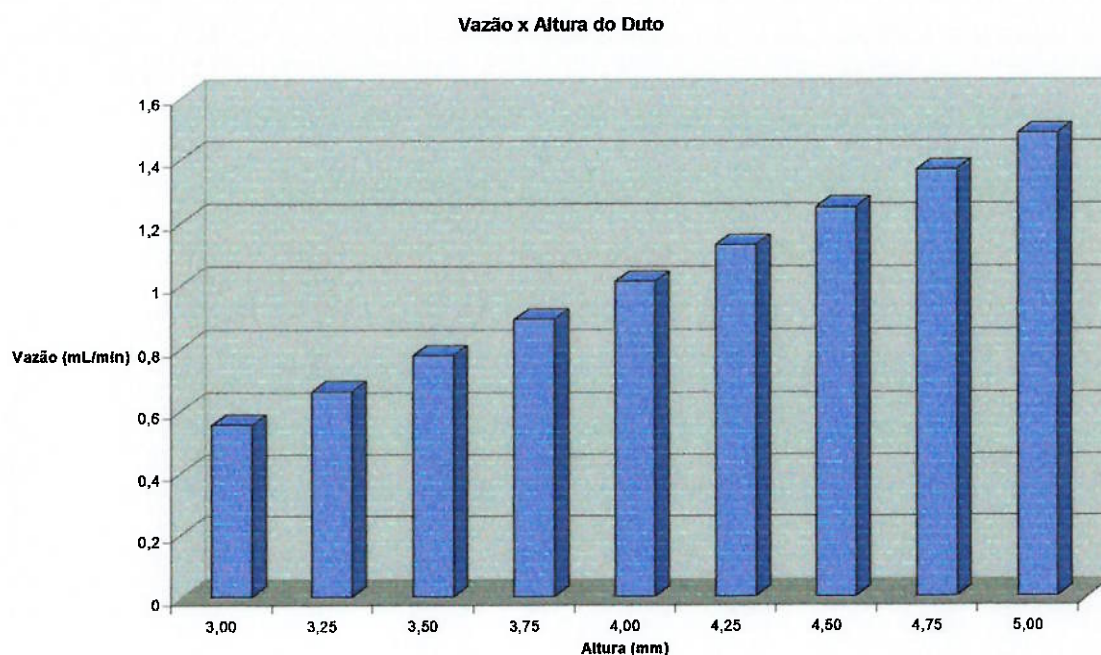


Fig. 5.20 – Gráfico da vazão em função da altura do duto.

A variação da vazão parece ser linear com a variação da altura do duto, ou seja, a vazão cresce na razão direta em que se aumenta a altura.

Para a determinação deste gráfico foram realizadas 9 simulações, cada uma considerando uma altura distinta e sendo mantido os demais parâmetros. A amplitude de oscilação foi de $30\mu m$ e a frequência de oscilação, 80Hz.

O aumento da vazão parece ser bastante expressivo, uma vez que houve uma variação de 168% entre os casos extremos.

5.5.2. Sensibilidade em relação à frequência

A segunda análise de sensibilidade foi feita em torno da frequência de oscilação do atuador. Variando a frequência de oscilação entre 5Hz e 80Hz, obteve-se os seguintes resultados:

Tab.5.4 – Sensibilidade da bomba em relação à frequência.

<i>Frequência (Hz):</i>	<i>Vazão (mL/min):</i>
5	0,1430
10	0,3585
15	0,5541
20	0,7170
25	0,8454
30	0,9422
35	1,0074
40	1,0583
45	1,0836
50	1,0997
55	1,0993
60	1,0935
65	1,0761
70	1,0654
75	1,0356
80	1,0094

Novamente, as simulações foram feitas mantendo-se constantes a amplitude de oscilação e a altura do duto. Os resultados estão expressos na tab.5.4.

Como pode ser notado, a vazão cresce com a frequência até cerca de 35Hz, a partir daí há uma pequena flutuação em torno de 1mL.

É interessante observar neste caso a presença de um valor ótimo para a frequência de oscilação em torno de 50Hz, como pode ser visto no gráfico da fig.5.21

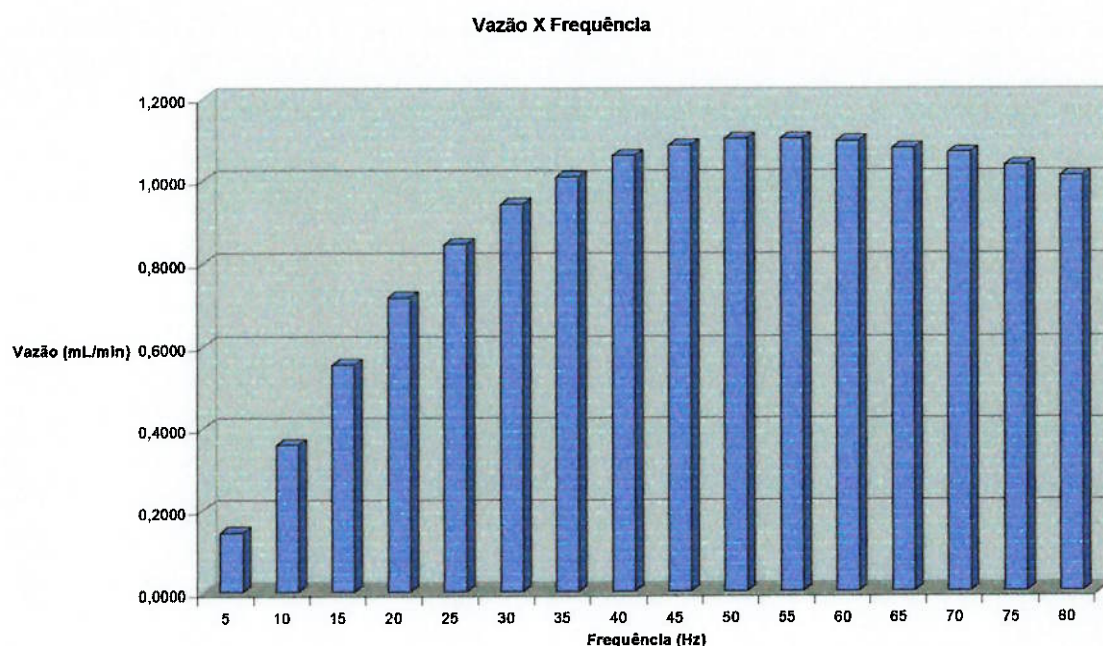


Fig. 5.21 – Variação da vazão com a frequência

5.5.3. Sensibilidade em relação à amplitude de oscilação

Por fim, foi feita a variação da amplitude de oscilação a fim de se verificar a sensibilidade da bomba a este parâmetro.

Como nas outras análises, somente a amplitude de oscilação foi alterada e se observou o desempenho do sistema, ou seja, a sua vazão.

O domínio de projeto para a amplitude de oscilação (pico-a-pico) variou de $30\mu\text{m}$ a $1000\mu\text{m}$, ou seja, até a amplitude de 1mm. Este valor máximo foi escolhido observando-se o comportamento do atuador bilaminar quando foi utilizado um amplificador para excitá-lo. Uma medida mais precisa não foi efetuada, mas a amplitude de oscilação observada seguramente foi da ordem de 1mm ou até mais.

Os resultados obtidos estão mostrados a seguir:

Tab.5.5 – Sensibilidade em relação à amplitude de oscilação (30 a 100 μm).

<i>Amplitude (μm):</i>	<i>Vazão (mL/min):</i>
30	1,0094
40	1,6626
50	2,4038
60	3,2054
70	4,0506
80	4,9322
90	5,8371
100	6,7584

Dado o domínio amplo, primeiramente são apresentados os resultados para uma variação de 10 em 10 μm até o valor de 100 μm .

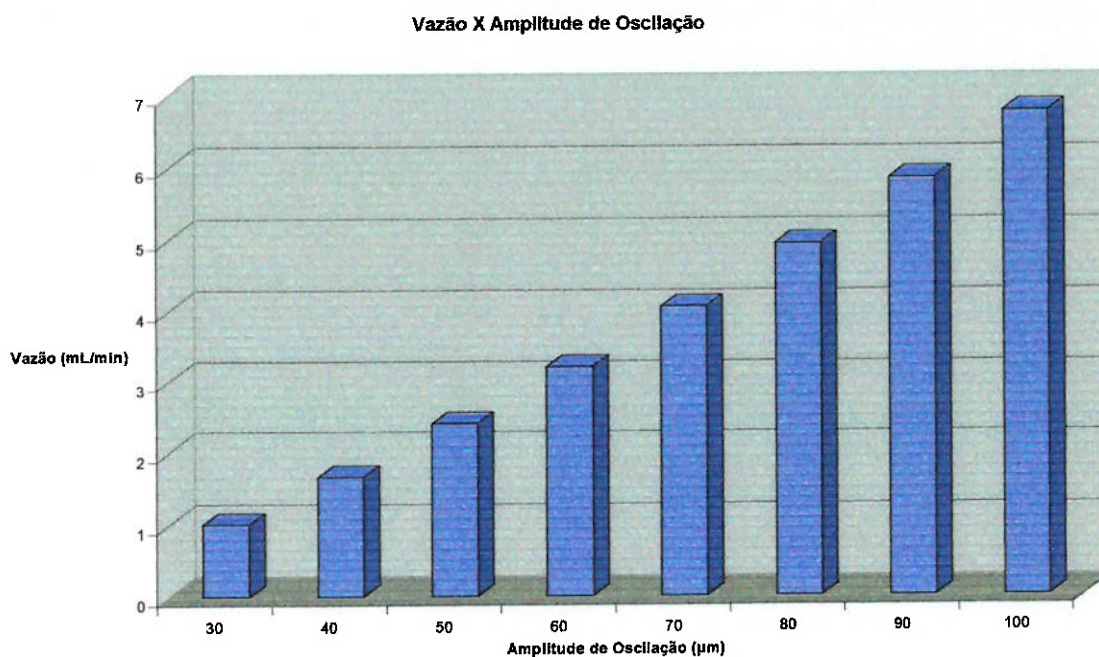


Fig. 5.22 – Variação da vazão com a amplitude de oscilação (30 a 100 μm).

O comportamento nessa região parece ser linear, com a vazão crescendo na razão direta da amplitude de oscilação.

A seguir os resultados com amplitudes de até 1000 μm .

Tab.5.6 – Sensibilidade em relação à amplitude de oscilação (50 a 1000 μm).

<i>Amplitude (μm):</i>	<i>Vazão (mL/min):</i>
50	2,4038
100	6,7584
150	11,4316
200	16,0257
250	20,4073
300	24,5130
350	28,3791
400	31,9940
450	35,3811
500	38,6021
550	41,6322
600	44,4642
650	47,1473
700	49,6555
750	52,0602
800	54,3179
850	56,4400
900	58,4004
950	60,2044
1000	61,8406

A tab.5.6 traz os valores obtidos para as simulações com diferentes amplitudes de oscilação, em passos de 50 μm , até 1000 μm .

No gráfico da fig.5.23 pode-se ter uma melhor idéia do comportamento geral da vazão conforme a amplitude de oscilação é alterada. A idéia anterior de que a relação entre os dois parâmetros é linear parece errônea, pois é possível notar uma pequena concavidade nesta curva.

A amplitude de oscilação, através desta análise parece ser o fator que mais altera a vazão do sistema, uma vez que o valor da vazão variou mais de 6000% entre os casos extremos.

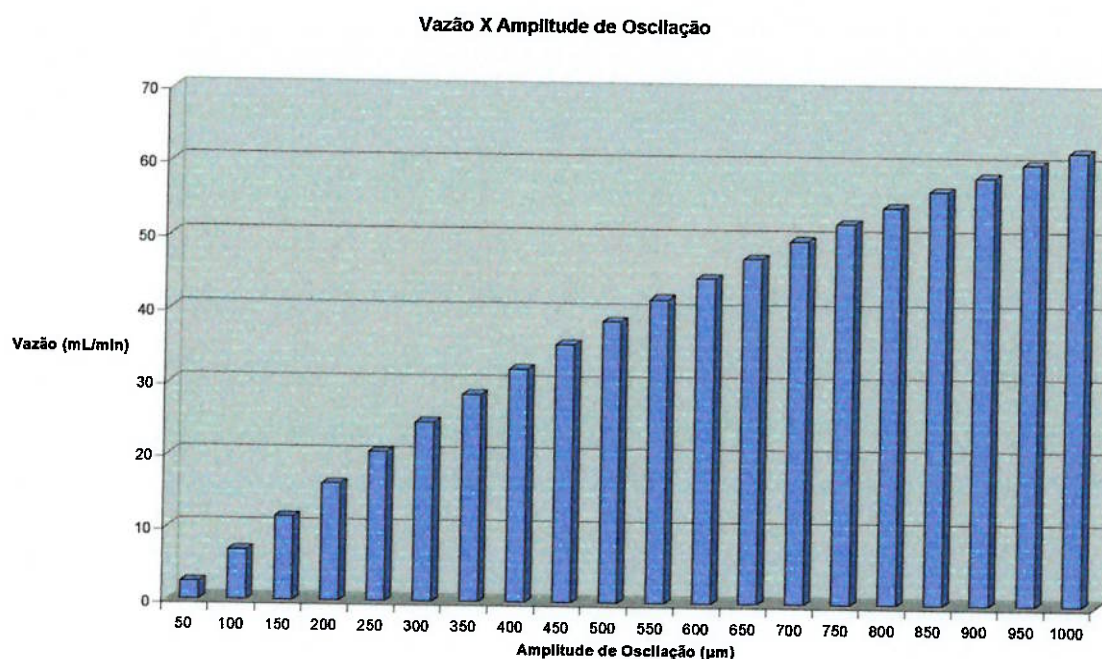


Fig. 5.23 – Variação da vazão com a amplitude de oscilação (50 a 1000 μm).

5.6. Considerações a respeito da malha de elementos finitos

Um aspecto importante a se notar na modelagem utilizando elementos finitos é a definição da malha de elementos. Uma malha inadequada pode distorcer e até mesmo comprometer os resultados obtidos pelas simulações.

O primeiro exemplo é em relação à distorção do elemento, quando mesmo tem o tamanho dos lados muito diferente dos outros.

As figuras fig.5.24 e fig.5.25 mostram um exemplo de malha que comprometeu os resultados de simulações computacionais realizadas durante o projeto. Os vetores de velocidade nessas figuras demonstram claramente a incoerência dos resultados obtidos em tais simulações.

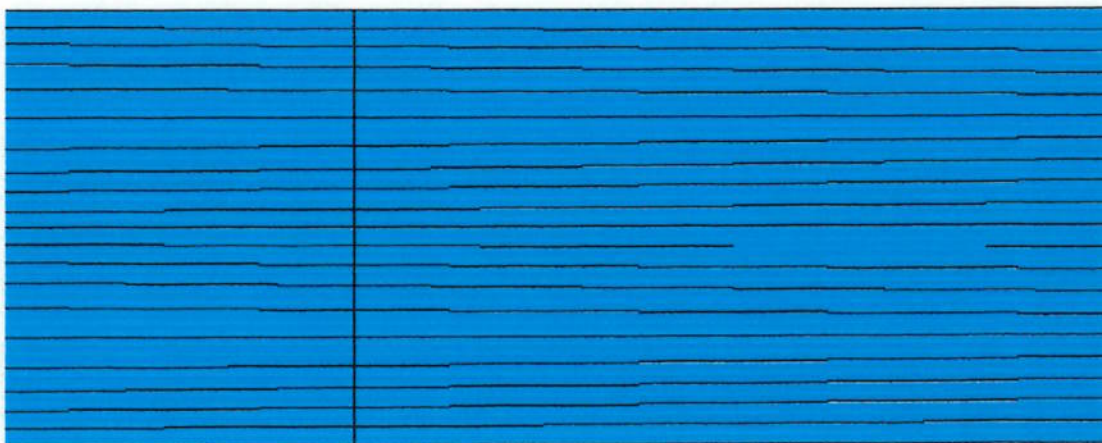


Fig. 5.24 – Malha com elementos demasiadamente distorcidos.

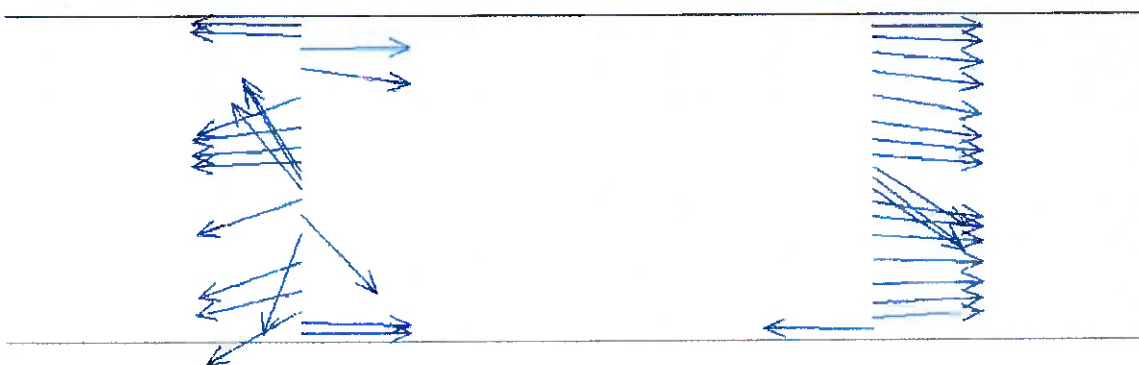


Fig. 5.25 – Vetores de velocidade incoerentes.

Uma segunda consideração a respeito da malha de elementos é a necessidade de refinamento em regiões de fronteira, no caso da bomba piezelétrica, nas proximidades da parede e do atuador (fronteira oscilante). A fig.5.26 mostra uma malha montada com elementos todos iguais, atitude tomada no momento em que foi constatado o problema anterior. No entanto, apesar de qualitativamente coerentes, os resultados obtidos com essa malha apresentam ordem de grandeza diferentes do que quando adotamos uma malha como a da fig.5.27, com um refino maior nas regiões de fronteira.

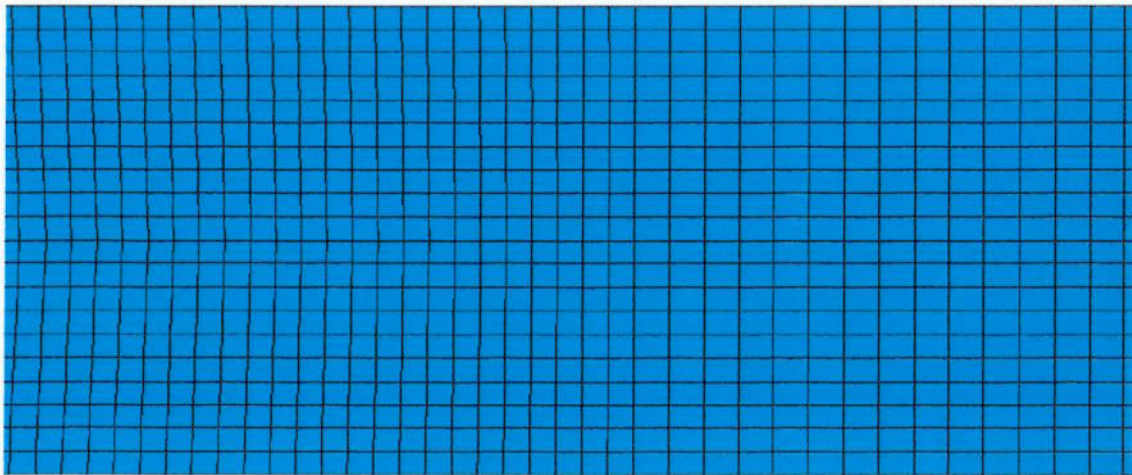


Fig. 5.26 – Malha com elementos igualmente refinados em todo o domínio.

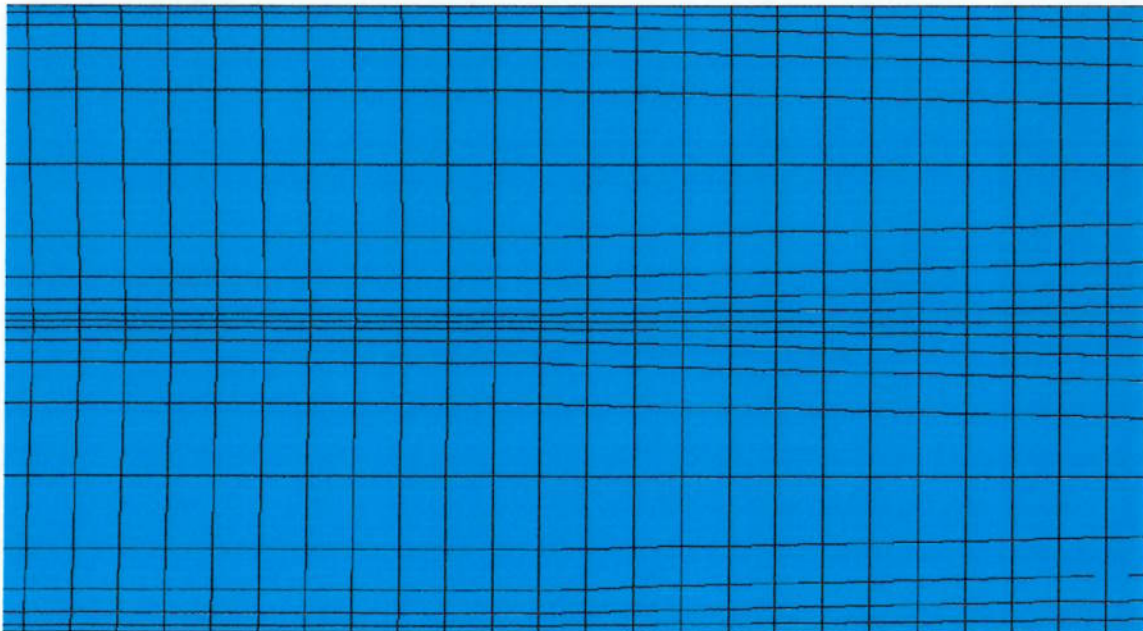


Fig. 5.27 – Malha com elementos refinados nas regiões de fronteira.

5.7. Otimização

Após o estudo da sensibilidade do sistema foi realizada a otimização da bomba piezelétrica.

Para tanto foi feito o uso do software Altair Hyperstudy. Conforme mencionado anteriormente, o primeiro passo é a criação de um template contendo as informações sobre o sistema que vai ser simulado.

Dentro do menu do Hyperstudy:

» **Tools » Create Template...**

Uma nova janela se abre, dentro dela é que é criado o template.

» **File » Import**

Deve-se, agora, selecionar o arquivo batch escrito em APDL que contém as instruções para a simulação da bomba piezelétrica. O arquivo batch será então aberto e aparecerá a listagem das instruções da bomba piezelétrica.

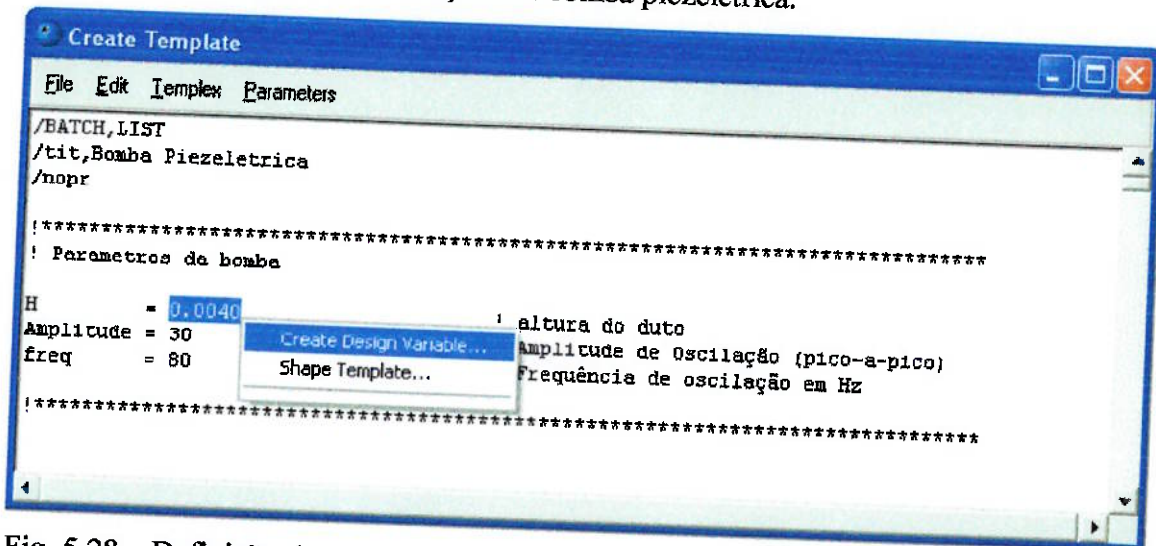


Fig. 5.28 – Definição das variáveis.

Os valores das variáveis devem ser selecionados e, pressionando o botão direito do mouse deverá aparecer um menu onde deve ser selecionado (fig.5.28):

» Create Design Variable

É aberta, então, uma janela onde se define o nome desta variável bem como o seu domínio. Deve-se repetir o processo para as 3 variáveis consideradas. A janela de programa deverá ficar da seguinte forma (fig.5.29):

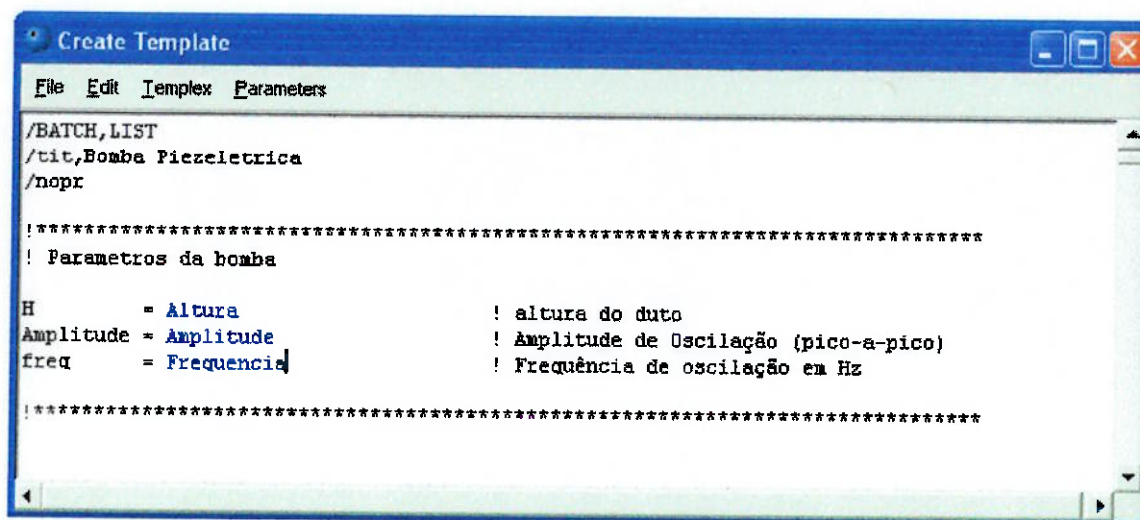


Fig. 5.29 – Variáveis de projeto.

No lugar dos valores previamente definidos, aparecerão agora os nomes das variáveis criadas.

Pode-se ainda verificar o formato em que o template realmente ficou:

» Templex » Show Templex

O conteúdo da janela terá então o seguinte formato (fig.5.30):

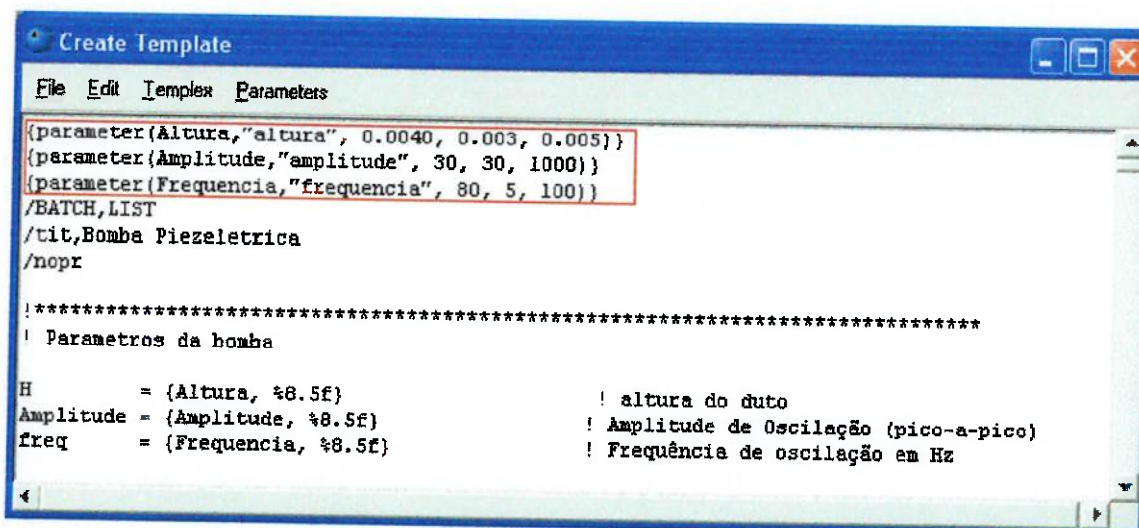


Fig. 5.30 – Formato do template.

Na fig.5.30 tem-se em destaque a definição das variáveis de projeto bem como os domínios definidos para essas variáveis.

O último passo para a criação do template é exportar esse arquivo através de:

» File » Export

Deve-se definir o nome do template e em seguida salvá-lo.

O passo seguinte é seleccionar o arquivo de preferências anteriormente editado, através de:

» File » Set Preference File

A partir deste ponto a utilização do software é relativamente simples. Quando solicitado deve-se seleccionar o template criado. Estas etapas ainda não correspondem à otimização propriamente dita, é necessário antes executar a simulação uma primeira vez. Este passo é essencial, pois após esta simulação é que se criam as respostas do sistema, neste caso, a única resposta a ser criada é relativa a vazão.

Como o arquivo de saída gerado é de velocidades, deve-se definir a vazão conforme as expressão das eq.5.3 e eq.5.4.

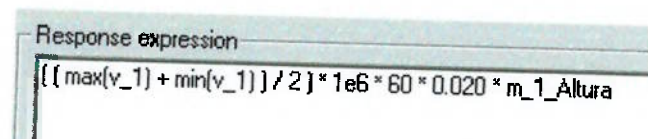


Fig. 5.31 – Determinação da Vazão.

Para conferir o valor numérico da expressão criada, basta selecionar:

» **Evaluate response expression**

Através deste comando será mostrado o valor destacado na fig.5.32.

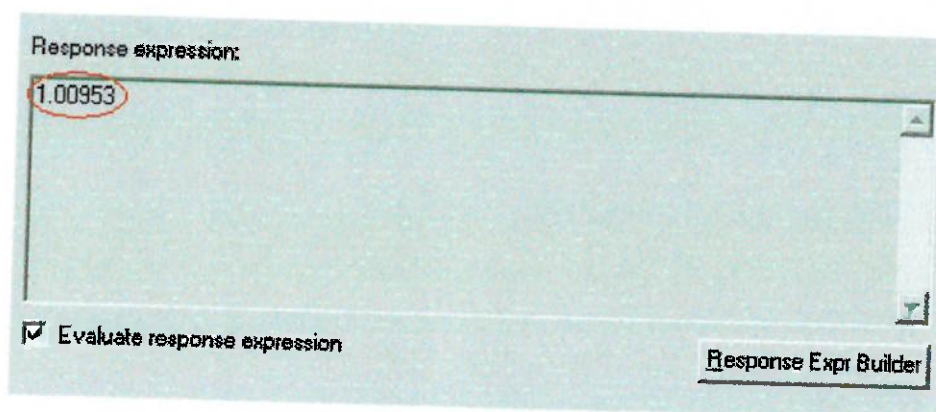


Fig. 5.32 – Conferindo o valor da expressão.

Seguindo com a otimização, ocorre a definição dos domínios de projeto para as variáveis, bem como definição das restrições e da função objetivo. O uso do software é bastante intuitivo àqueles familiarizados com a teoria de otimização.

Para o problema da bomba não foram definidas restrições, uma vez que as únicas restrições presentes seriam aquelas já definidas como domínio das variáveis de projeto. A função objetivo do problema é a maximização da vazão. Todas essas definições condizem com o problema de otimização proposto na fig.3.7.

Tendo definido todo o problema de otimização dá-se início à otimização propriamente dita. O processo de otimização é algo relativamente demorado e que depende muito do equipamento utilizado.

Uma simulação da bomba piezelétrica leva cerca de 30 minutos num computador com velocidade de 1.8GHz. A otimização, no entanto, foi realizada num

equipamento operando a 700MHz, sendo que uma simulação neste equipamento leva cerca de 100 minutos.

A otimização foi realizada com 30 iterações, o tempo computacional de todo o processo ficou em torno de 50 horas (mais de 2 dias).

5.8. Resultados da otimização

Os resultados numéricos da otimização estão mostrados na tab.5.7.

Como pode ser notado foi bastante expressivo o aumento da vazão, passando de um valor inicial de pouco mais de 1mL/min para um valor de mais de 158mL/min.

Para uma melhor análise destes resultados, pode-se colocar a evolução da função objetivo com as sucessivas iterações, como visto na fig.5.33.

Tab.5.7 – Resultados da Otimização.

<i>Altura(mm):</i>	<i>Altura(mm):</i>	<i>Amplitude (μm):</i>	<i>Frequência (Hz):</i>	<i>Vazão (mL/min):</i>
1	4,00	30,00	80	1,01
2	4,88	30,00	80	1,43
3	4,00	36,60	80	1,43
4	4,00	30,00	62	1,09
5	4,76	36,00	64	2,01
6	4,51	43,56	52	2,58
7	4,50	51,84	42	3,28
8	4,57	62,20	50	4,63
9	4,75	75,27	60	6,71
10	5,00	89,57	72	9,36
11	5,00	107,48	82	11,89
12	5,00	130,05	66	16,16
13	5,00	154,76	52	20,29
14	5,00	185,71	42	24,68
15	5,00	224,71	50	32,23
16	5,00	267,41	60	40,09
17	5,00	320,89	60	49,34
18	5,00	388,28	58	49,34
19	3,95	462,05	70	36,21
20	4,51	465,93	70	55,20
21	4,73	435,17	84	57,33
22	4,47	517,86	100	54,28
23	4,56	417,10	94	47,95
24	4,68	526,56	68	69,86
25	5,00	626,61	80	99,68
26	5,00	751,93	90	117,44
27	5,00	909,83	88	144,05
28	5,00	1000,00	90	158,17
29	5,00	1000,00	90	158,17
30	5,00	1000,00	90	158,17

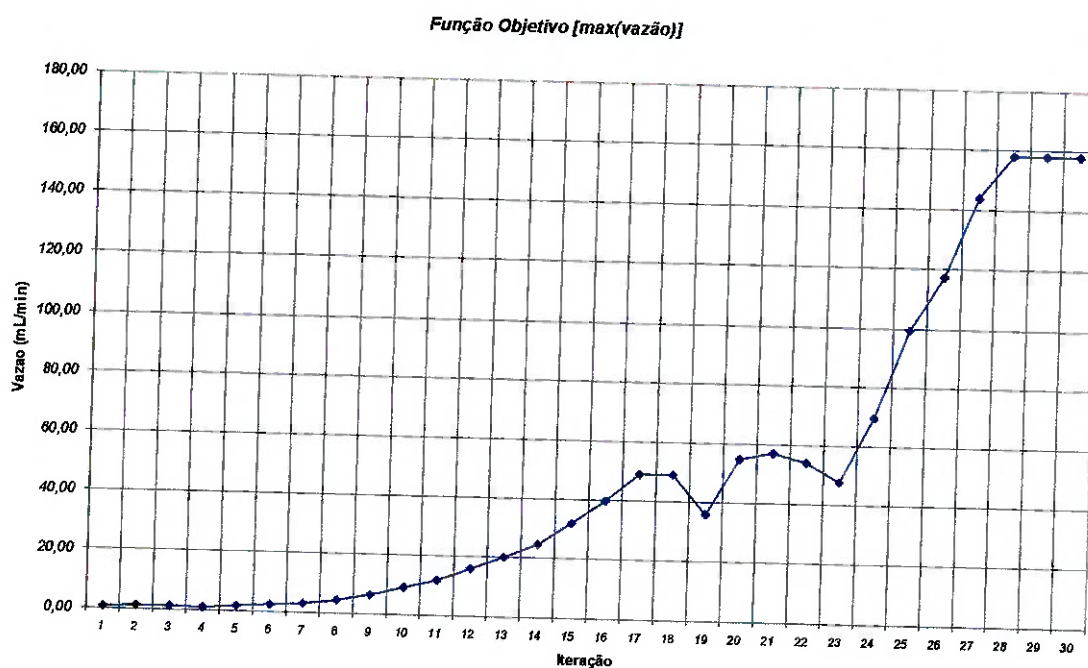


Fig. 5.33 – Evolução da função objetivo.

Pode-se também observar a evolução dos valores das variáveis de projeto nas figuras: fig.5.34, fig.5.35 e fig.5.36, mostrando os valores para altura do duto, frequência de oscilação e amplitude de oscilação, respectivamente.

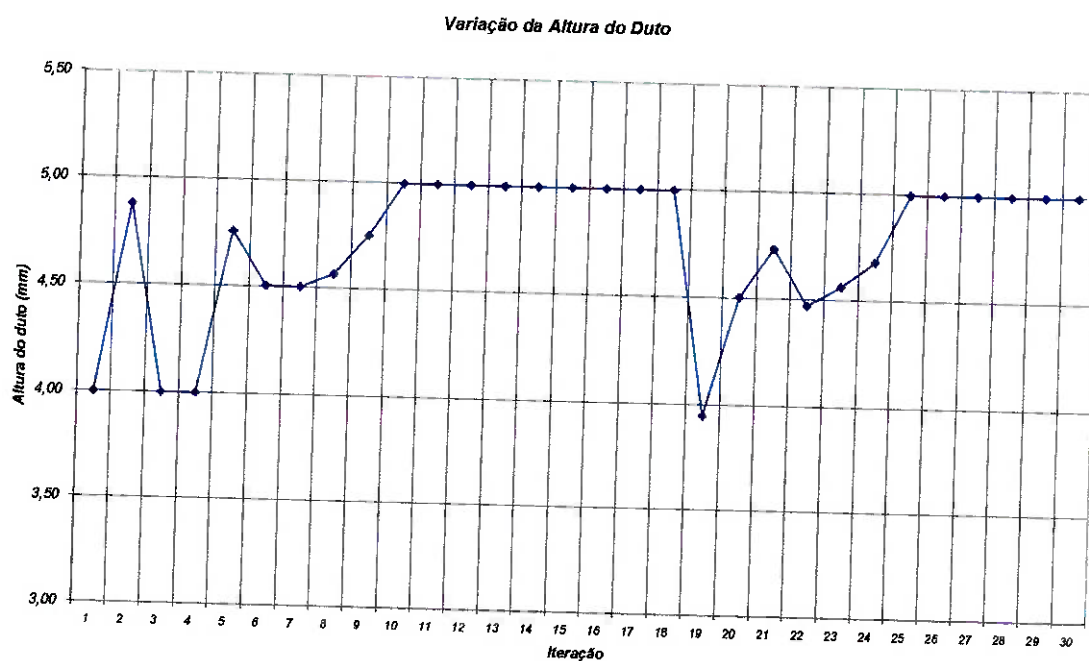


Fig. 5.34 – Variação da altura do duto nas iterações.

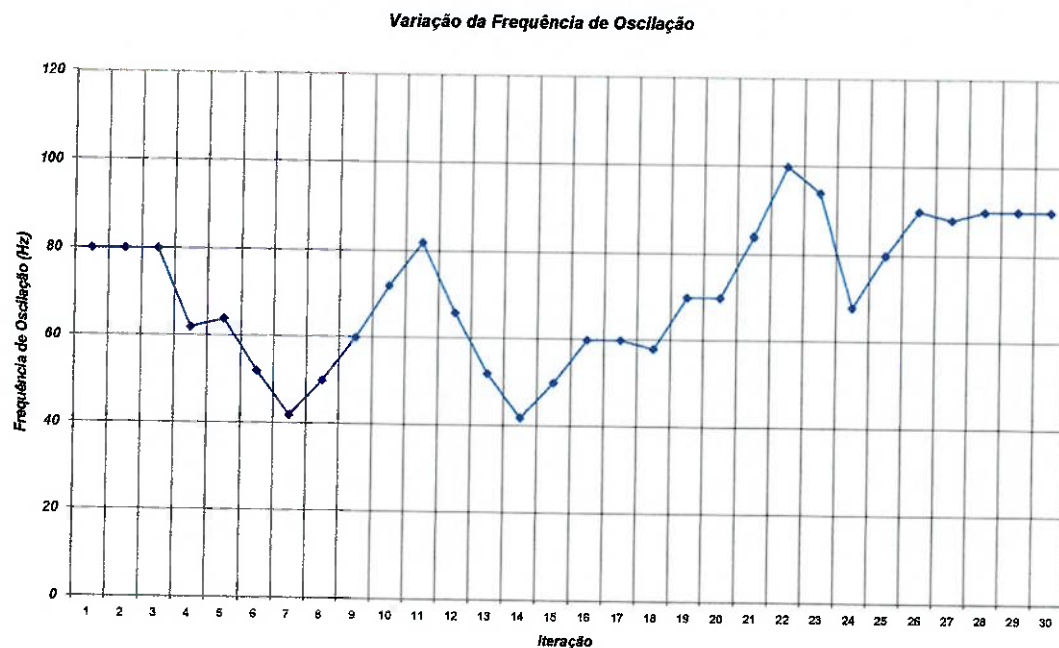


Fig. 5.35 – Variação da frequência de oscilação nas iterações.

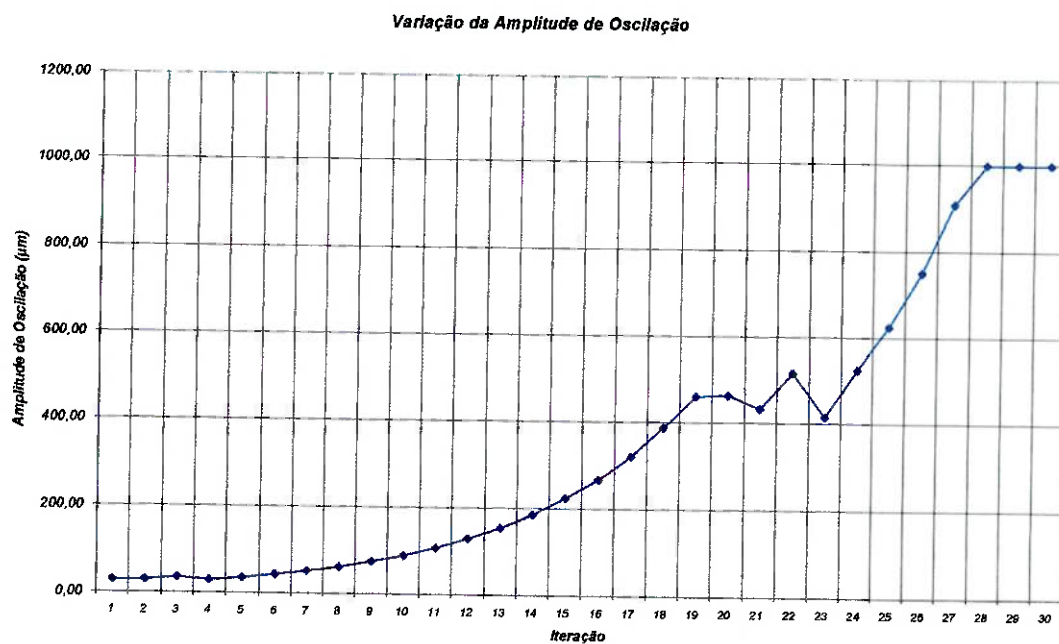


Fig. 5.36 – Variação da amplitude de oscilação nas iterações.

Através da análise destes gráficos nota-se que o formato da curva de evolução da amplitude de oscilação é bastante parecido com o da função objetivo. Isto indica que

a amplitude de oscilação é o parâmetro de maior relevância para a determinação da performance da bomba.

Para mostrar com maior clareza essa relação, pode-se observar o gráfico da fig.5.37, que mostra num mesmo plano os valores da função objetivo e da amplitude de oscilação normalizados de forma a ser possível notar a relação entre as duas.

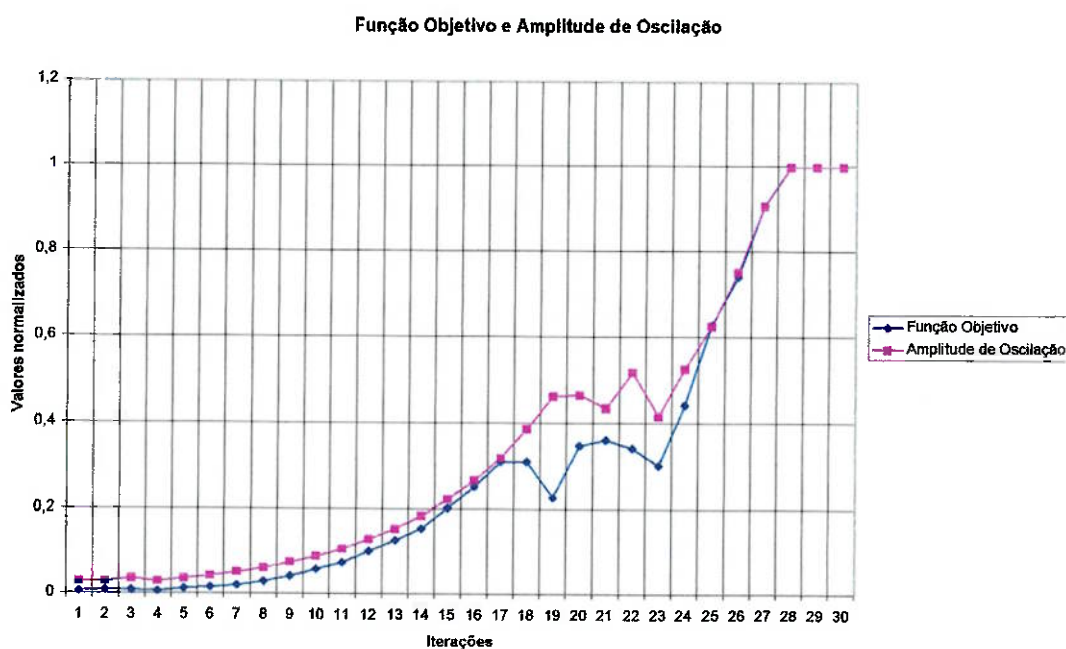


Fig. 5.37 – Função objetivo e amplitude de oscilação normalizadas.

Em resumo, os parâmetros ótimos obtidos para o funcionamento da bomba foram:

$f = 90\text{Hz}$;

$A_{\text{max}} = 1\text{mm}$;

$H = 5\text{mm}$.

A combinação desses parâmetros proporcionou à bomba uma vazão de 158,17mL/min. No entanto, vale ressaltar que a otimização foi realizada utilizando o modelo de corpo rígido da lâmina e portanto pode não representar ainda um ótimo real.

5.9. Caracterização da bomba piezelétrica

A parte final das simulações numéricas envolve a caracterização da bomba piezelétrica. Como forma de caracterizar a bomba, foram feitas simulações de forma a se determinar o valor máximo de pressão que a bomba pode gerar.

A princípio as simulações foram realizadas somente para verificar qual a maior vazão gerada pela bomba, mantida pressões relativas nulas nas regiões de entrada e de saída.

Tendo em mãos os valores otimizados da bomba, foram feitas simulações para determinar qual a sua faixa de operação relativa a pressão, ou seja, em que faixa de pressões ela pode operar.

Com os parâmetros otimizados da bomba mantidos constantes, foi feita a variação da pressão de saída da mesma, observando-se qual o seu valor limite, ou seja, o valor a partir do qual o fluxo inverte seu sentido.

Os resultados dessas simulações estão mostrados a seguir:

Tab.5.8 – Resposta da bomba a diferentes pressões de saída.

<i>Pressão na saída (Pa):</i>	<i>Vazão (mL/min)</i>
0,0	158,60
0,5	158,29
5,0	155,50
10,0	152,40
15,0	149,30
20,0	146,20
25,0	143,10
30,0	140,01
35,0	136,92
40,0	133,83
45,0	130,74
50,0	127,66
60,0	121,49
70,0	115,38
80,0	109,19
90,0	103,05
100,0	96,91
110,0	90,79
120,0	84,67
130,0	78,56
140,0	72,46
150,0	66,36
160,0	60,27
170,0	54,18
180,0	48,11
190,0	42,03
200,0	35,96
210,0	29,90
220,0	23,85
230,0	17,79
240,0	11,75
250,0	5,71

A pressão máxima suportada pela bomba foi de $250Pa$, ou o equivalente a $25,5mmH_2O$. A curva da bomba pode ser observada na fig.5.38.

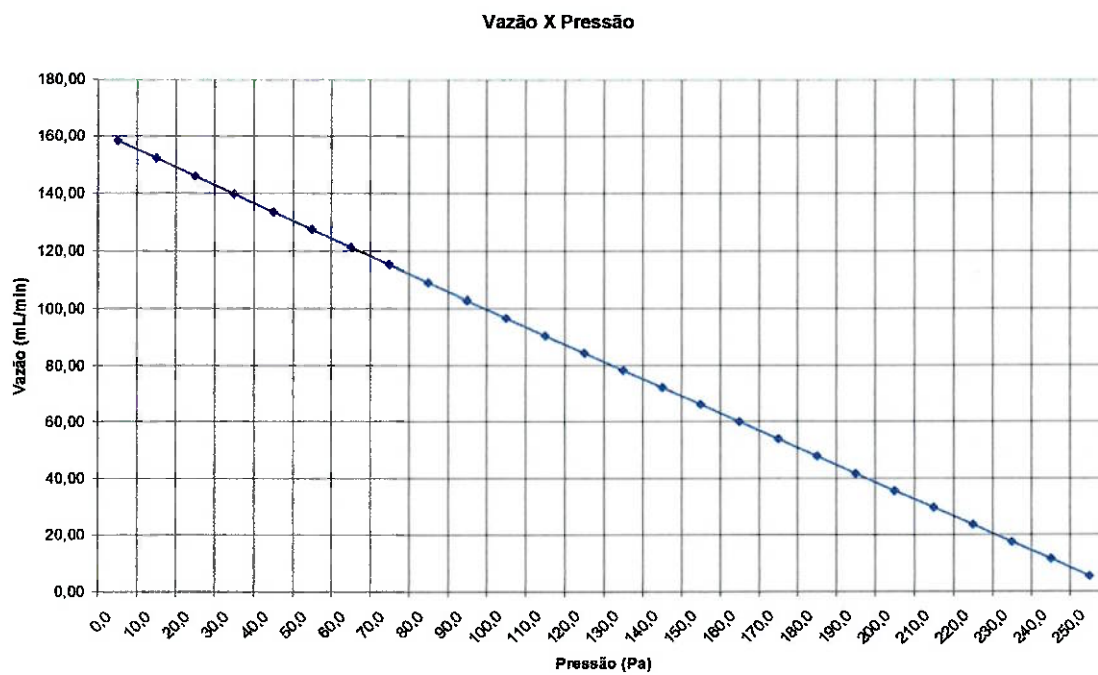


Fig. 5.38 – Curva da bomba.

A relação entre a pressão e a vazão da bomba tem comportamento linear, podendo ser expressa pela relação (eq.5.5):

$$Q = -6,144.P + 164,36 \quad (5.5)$$

Onde:

Q = vazão, medida em $\left[\frac{mL}{min} \right]$

P = pressão, medida em $[Pa]$

6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Em paralelo à simulação computacional, foi realizada a fabricação de modelos e protótipos experimentais da bomba piezelétrica. A realização de testes experimentais utilizando estes protótipos justifica-se pela necessidade de estudo dos detalhes construtivos do equipamento bem como da viabilidade de aplicação do atuador bilaminar piezelétrico no mesmo, detalhes que não seriam avaliados somente com as simulações.

6.1. Viabilidade do Princípio de Funcionamento

Com o objetivo de estudar a viabilidade do princípio de funcionamento proposto na condução de líquidos, inicialmente foi confeccionado um modelo em acrílico com uma lâmina de alumínio articulada, que emulou o comportamento oscilatório do peixe. O modelo é apresentado nas figuras seguintes:

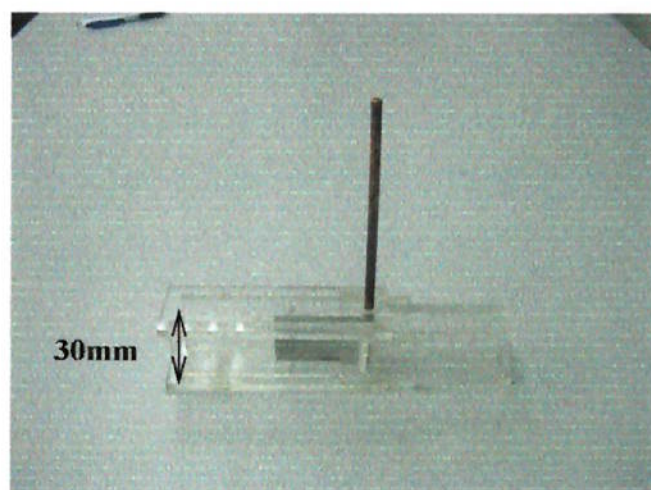


Fig. 6.1 – Modelo em acrílico.

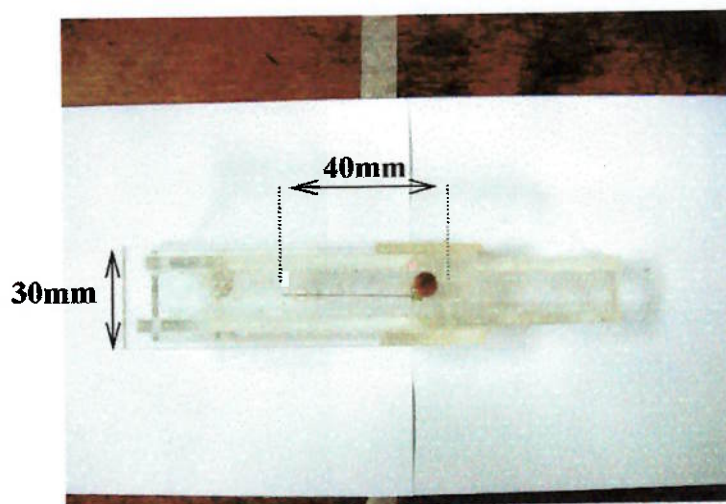


Fig. 6.2 – Vista superior.

O modelo foi submerso num recipiente com água. Para a visualização do escoamento, utilizou-se permanganato de potássio (KMnO_4), substância que confere cor vermelha à água.

Os testes realizados foram de três tipos:

- **Articulação no início do canal e entradas laterais de água:**

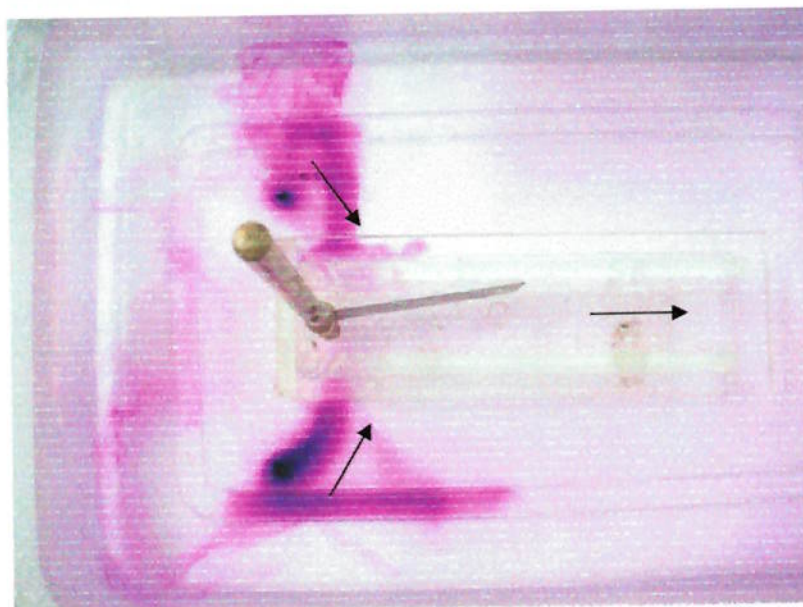


Fig. 6.3 – Escoamento através do canal em acrílico.
Entradas laterais de água.

- Articulação no início do canal e entrada única de água por trás da articulação:

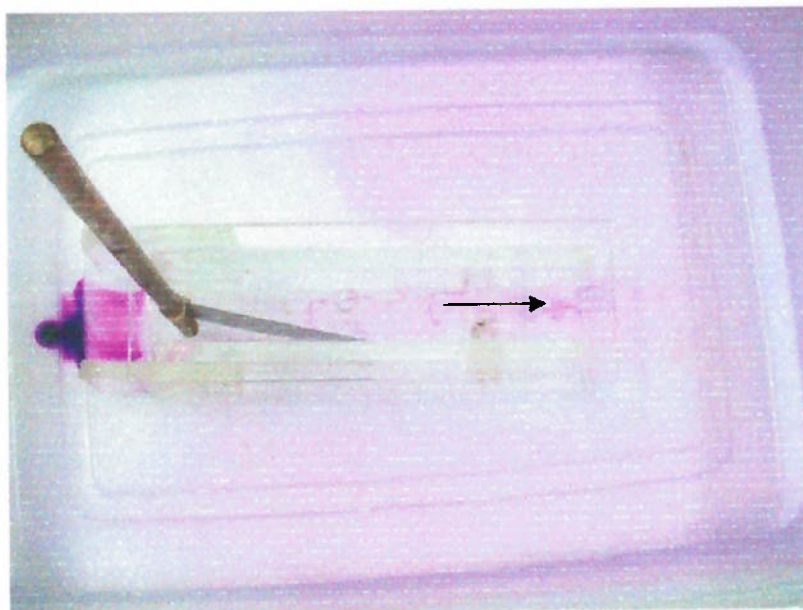


Fig. 6.4 – Escoamento através do canal em acrílico.
Entrada única de água.

- Articulação no meio do canal e entrada única de água por trás da articulação:

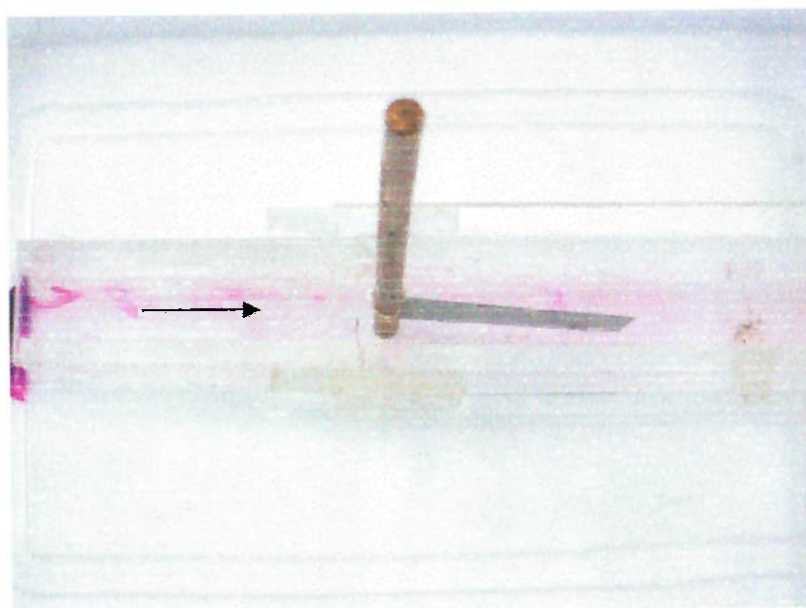


Fig. 6.5 – Escoamento através do canal em acrílico.
Entrada única de água e prolongamento do canal na região
anterior à lâmina articulada.

Para as três condições estudadas, houve escoamento, como pode ser visto através das figuras fig. 6.3 a fig. 6.5, com maior vazão observada na montagem contendo prolongamento do canal na região anterior à lâmina e entrada única de água. Com este modelo, comprovou-se a viabilidade do princípio de bombeamento proposto neste trabalho.

O próximo passo foi a utilização de um atuador piezelétrico bilaminar para emular o comportamento oscilatório do peixe. Esse atuador, descrito no item 3.1, tem formato de lâmina e, quando acionado com uma tensão elétrica alternada, reproduz o movimento desejado.

6.2. Protótipo em Acrílico

O primeiro protótipo da bomba, utilizando o atuador bilaminar piezelétrico foi construído em acrílico.

Inicialmente, preparou-se o atuador bilaminar a ser utilizado no protótipo. Utilizando uma pequena placa metálica fixada com o auxílio de cola condutiva, colocou-se em curto-circuito as camadas piezocerâmicas. Em seguida, soldou-se um fio elétrico na cerâmica e outro na camada metálica do atuador, como é mostrado na fig. 6.6:

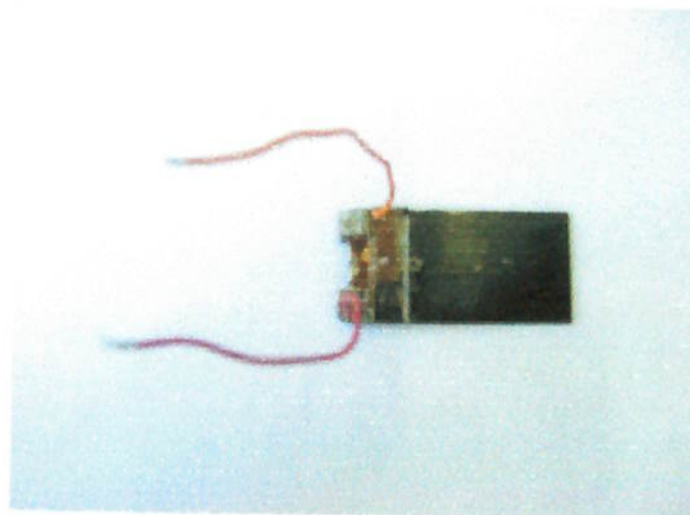


Fig. 6.6 – Atuador piezelétrico bilaminar preparado para utilização no protótipo.

Posteriormente, foi projetado e construído o canal da bomba em acrílico. Veja a fig. 6.7.

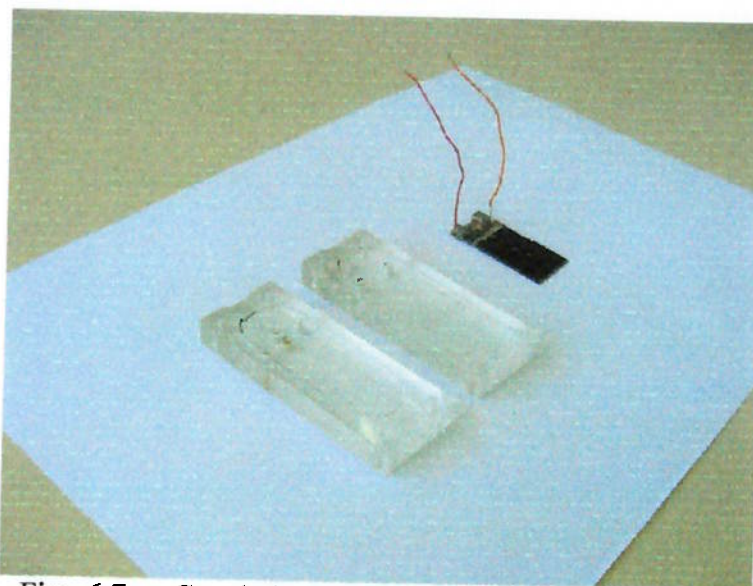


Fig. 6.7 – Canal da bomba construído em acrílico e atuador bilaminar.

Com o atuador e as peças do canal prontas, o primeiro protótipo foi montado e preparado para os primeiros testes. Os primeiros testes objetivaram verificar o deslocamento do atuador no interior do canal. O protótipo montado é apresentado na fig. 6.8.

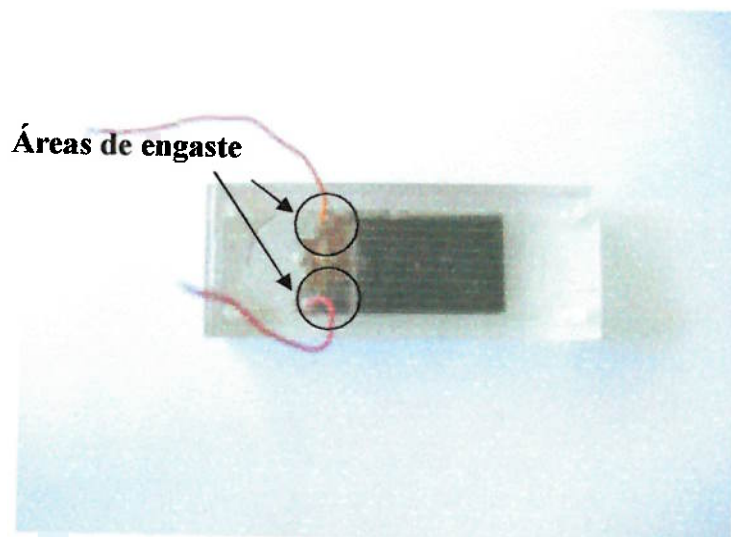


Fig. 6.8 – Protótipo da bomba piezelétrica em acrílico.

Como pode-se visualizar na figura, o bilaminar comporta-se como uma viga em balanço, engastada em suas extremidades através de pequenas placas auxiliares de alumínio de, aproximadamente, 25mm^2 de área. Através dos terminais, o protótipo foi ligado a um gerador de funções. Foram enviadas ondas de $5 V_{pp}$ de amplitude e frequência variando de 10 Hz a 1000 Hz.

Dos testes realizados com o protótipo em acrílico, verificou-se os seguintes problemas:

- a montagem em acrílico não apresentou rigidez suficiente ao engaste do atuador, impossibilitando seu deslocamento;
- a forma de engaste proposta, através de pequenas placas de alumínio de 25mm^2 , não se mostrou eficiente na obtenção de deslocamento do atuador bilaminar, tanto pela forma quanto pela enorme área engastada.

6.3. Protótipo em Alumínio

A fim de solucionar os problemas de rigidez do material e engaste observados no protótipo em acrílico, foi projetado e construído o segundo protótipo da bomba piezelétrica em alumínio, que, além da troca de material, contou com as seguintes alterações em relação ao anterior:

- as dimensões referentes a largura e comprimento do canal foram ligeiramente ampliadas, permitindo maior liberdade ao atuador;
- a área de engaste diminuída, sendo constituída de dois parafusos M4 que, através de arruelas, pressionam os cantos do atuador, como é mostrado na fig. 6.9.

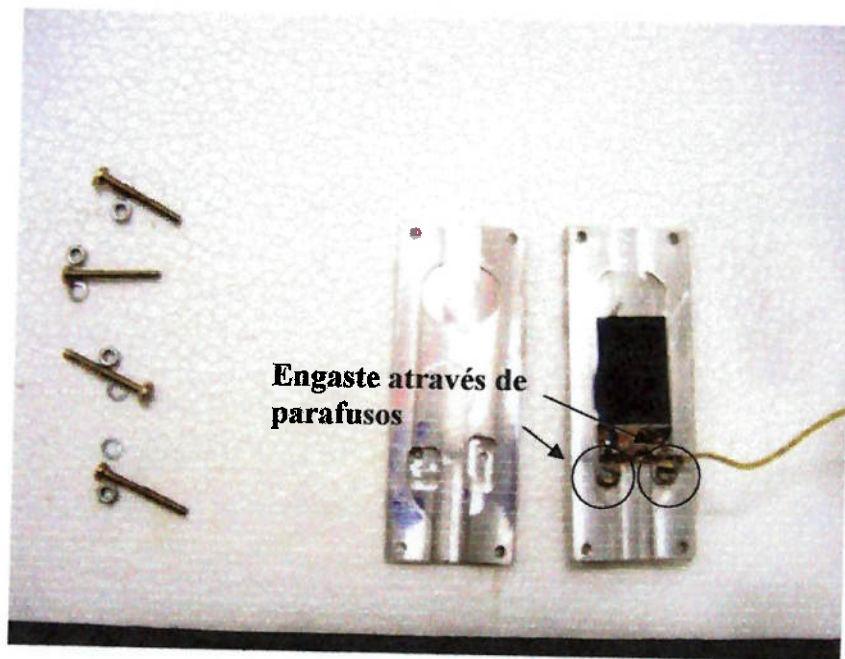


Fig. 6.9 – Componentes do segundo protótipo da bomba piezelétrica construído em alumínio. Engaste através de dois parafusos e arruelas.

Com o protótipo construído, esperava-se resolver os problemas apresentados pelo canal construído em acrílico e também realizar os primeiros testes imersos em água, detectando a presença de fluxo. O protótipo é mostrado nas figuras fig. 6.10 e fig. 6.11.

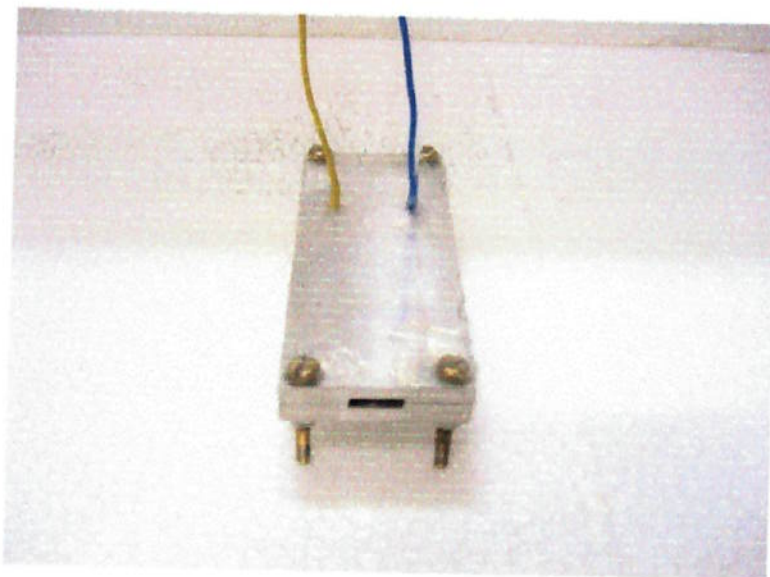


Fig. 6.10 - Protótipo em alumínio.

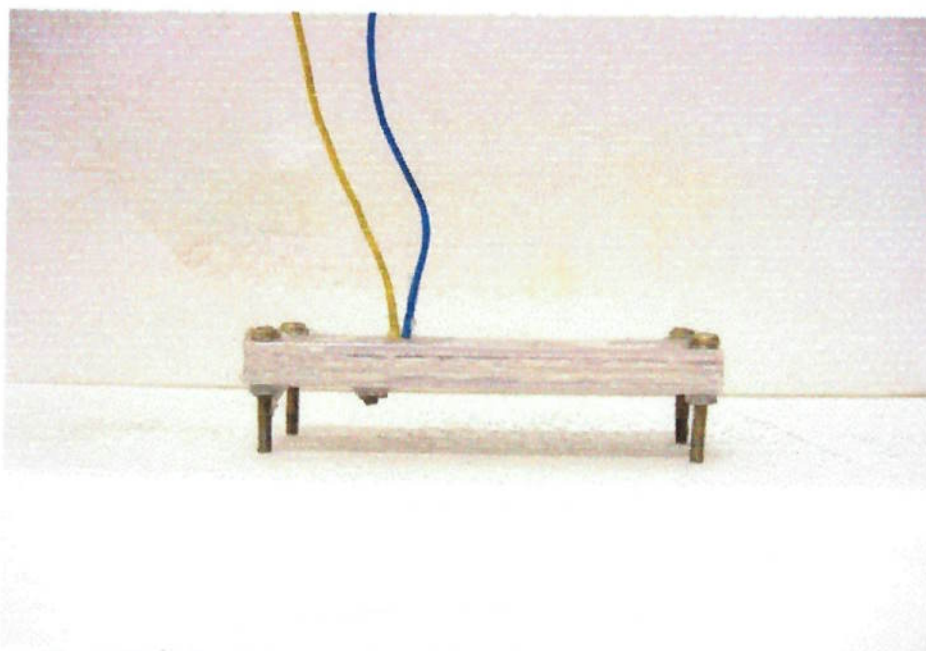


Fig. 6.11 – Protótipo em alumínio. Vista lateral.

6.4. Testes em Água com o Protótipo em Alumínio

Para os testes, foram utilizados os seguintes materiais:

- Gerador de funções AGILENTE 33120A ;
- Cola de silicone.
- Béquer;
- Água;

Após montado, colocou-se cola de silicone nas fendas do protótipo para vedação e isolamento dos contatos elétricos, a fim de evitar que a água não causasse curto-circuito durante o funcionamento.

Os testes consistiram em submergir o protótipo na água, verificando o deslocamento do atuador e a possível presença de fluxo. O aparato experimental utilizado é apresentado na fig. 6.12.

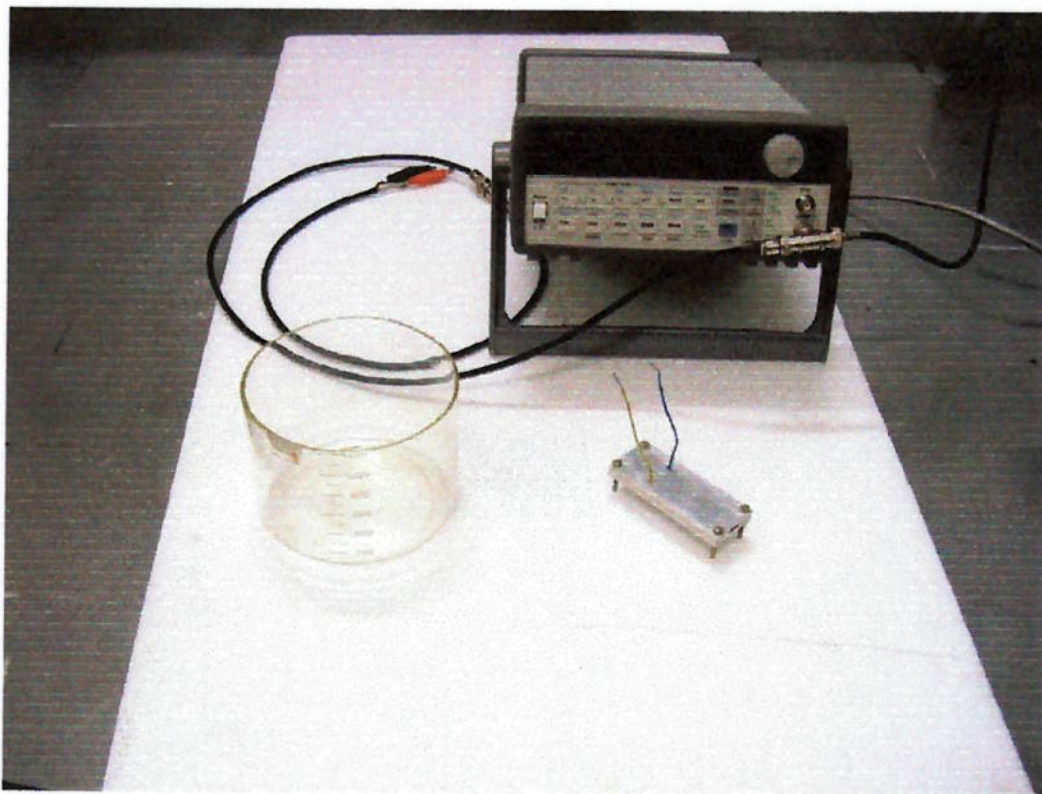


Fig. 6.12 – Aparato experimental para testes com o protótipo em alumínio.

Os resultados obtidos nesta fase foram os seguintes:

- o alumínio se mostrou, quanto a rigidez, um bom material para a constituição do canal;
- o novo tipo de engaste proporcionou um deslocamento do atuador bilaminar estimado em $200\mu\text{m}$, para uma onda senoidal de 112 Hz e $10V_{pp}$, porém, este deslocamento não foi suficiente para ocasionar um fluxo visível de água através do canal.

Frente a esses primeiros resultados positivos, ficou evidente que os próximos passos consistiam na otimização do deslocamento do atuador, com a finalidade de obter um fluxo visível de água através da bomba.

As idéias propostas para se atingir esse objetivo foram a realização de alterações da forma de engaste no projeto do protótipo final, mediante informações obtidas na realização de um modelo de MEF do atuador bilaminar piezelétrico, além do projeto de um circuito para amplificação da voltagem senoidal emitida pelo gerador de funções. Atividades que serão detalhadas nos itens a seguir.

6.5. Modelo de MEF do Atuador Bilaminar Piezelétrico

Com o intuito de se estudar a influência da forma de engaste no deslocamento do atuador, foi confeccionado um modelo de MEF do mesmo com o auxílio do software ANSYS para a realização de simulações. O modelo é mostrado na fig. 6.13.

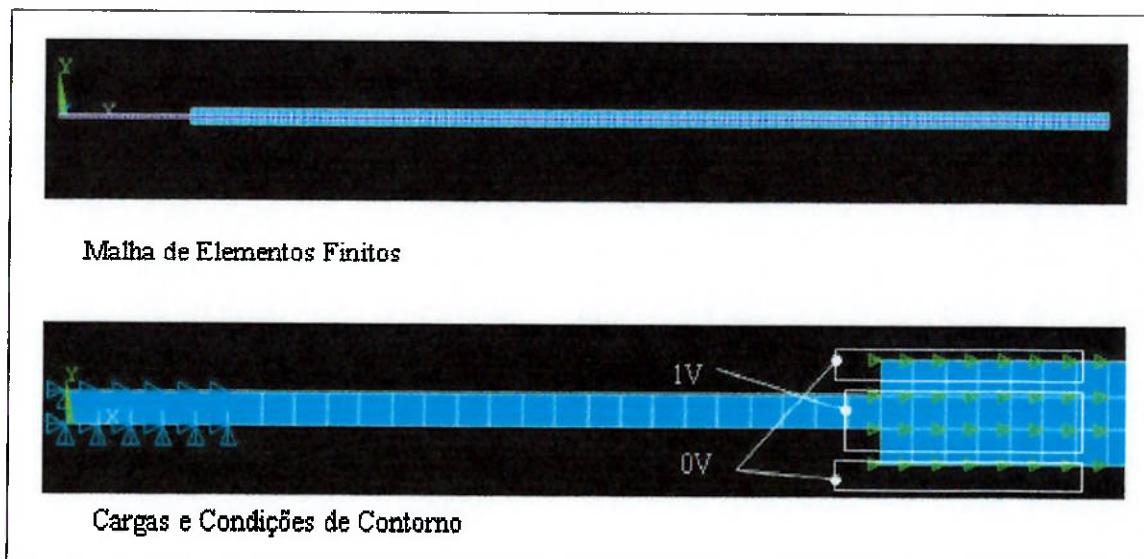


Fig. 6.13 – Modelo 2D de MEF do atuador bilaminar piezelétrico.

Pode – se visualizar através da fig. 6.13 as principais cargas e condições de contorno do problema estudado, constituídas por restrições ao deslocamento da extremidade esquerda do atuador nas direções horizontal e vertical num comprimento de 1mm, além da aplicação de uma tensão elétrica em ambas as camadas de cerâmica.

Terminado o modelo, e definidas as condições de contorno, foram processadas análises do mesmo.



Fig. 6.14 – Resultados da simulação. Deslocamento obtido na extremidade direita do atuador $D = 2,86 \times 10^{-6} \text{ m}$.

Como resultado desta análise, obteve-se, para um comprimento engastado de 1mm, e uma diferença de potencial elétrico de 1V em cada camada de cerâmica, um deslocamento da extremidade livre do atuador de $2,86 \mu\text{m}$.

Em seguida, levantou-se também a curva de deslocamento da extremidade livre do atuador na faixa de 0Hz a 104Hz de frequência de excitação. O resultado é mostrado na fig. 6.15.

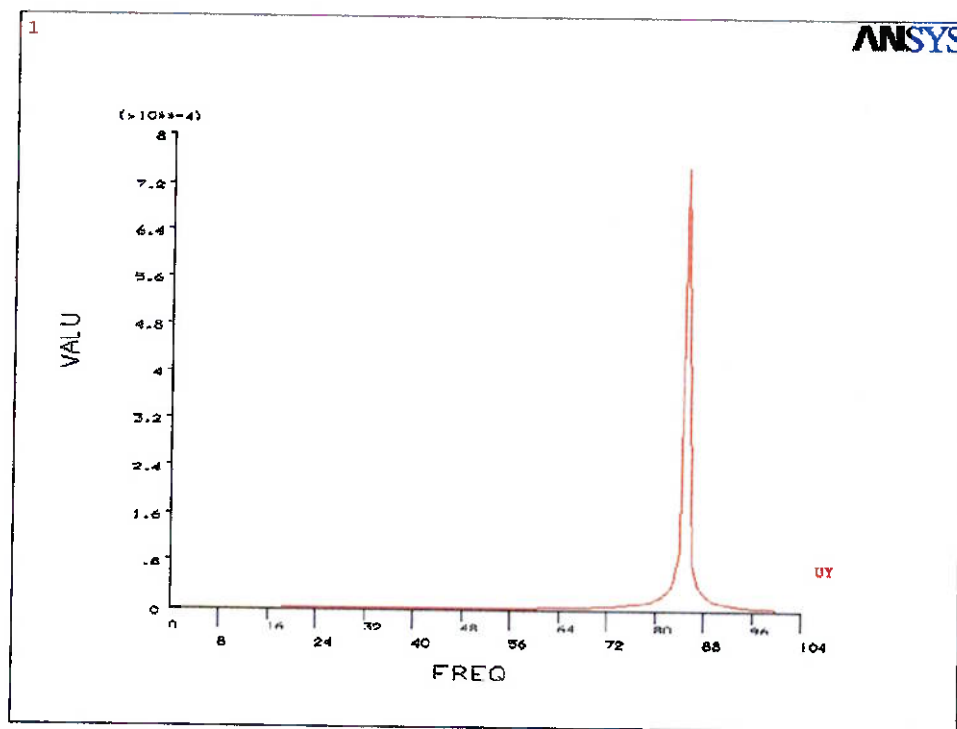


Fig. 6.15 – Curva de deslocamento da extremidade do atuador para frequência de excitação de 0Hz a 104Hz.

Para as condições de contorno definidas neste modelo, e sem amortecimento, o deslocamento máximo obtido foi de 800 μ m para uma frequência de excitação de 85Hz.

Pôde-se concluir destas simulações que o valor de 1mm para o comprimento engastado na extremidade do atuador mostrou ser um bom valor para a obtenção do deslocamento ótimo do mesmo.

6.5. Circuito Amplificador

Embora o alumínio tenha se revelado um bom material para o canal do protótipo, constatou-se que o deslocamento obtido estimado em 200 μ m não foi suficiente para gerar um bom fluxo de água. Além disso, devido ao fato do atuador bilaminar

suportar voltagens da ordem de até $80V_{pp}$, de acordo com APC International (2003), decidiu-se projetar um circuito para amplificação da amplitude do sinal senoidal recebido pelos terminais da cerâmica piezelétrica, até então limitado a $10V_{pp}$. O projeto do circuito amplificador é apresentado na fig. 6.16.

Os requisitos para o projeto do circuito amplificador foram os seguintes:

- Para o Transistor TIP 122, $\beta = 1000$
- Supondo corrente no coletor $I_c = 1A$
- Tensão de $50V_{pp}$ aplicada à cerâmica

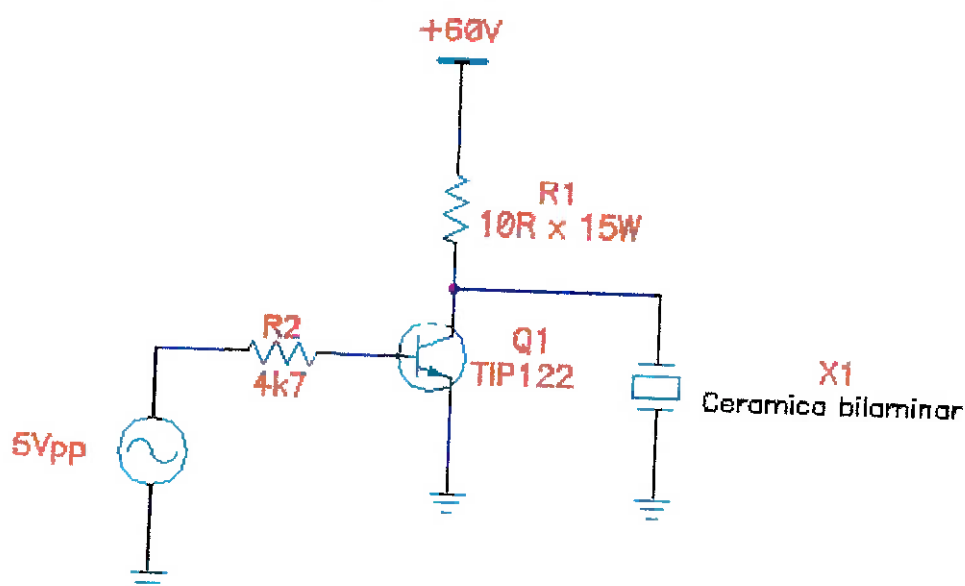


Fig. 6.16 – Circuito Amplificador construído para aumentar o deslocamento do atuador bilaminar piezelétrico.

Cálculo dos resistores:

$$R_1 = \frac{(60 - 50)V}{1A} = 10\Omega$$

Para o cálculo de R_2 é necessária a determinação da corrente de base:

$$I_{BASE} = \frac{1}{1000} A = 1mA$$

$$R_2 = \frac{(5 - 0,7)V}{0,001A} = 4300\Omega$$

Após concluído o projeto do circuito amplificador, o mesmo foi montado sobre uma placa. Para suprir o potencial de 60V, foi utilizada uma fonte DC.

Em seguida, foram realizados testes com a cerâmica piezelétrica e obteve-se deslocamentos estimados em 1,5 mm, comprovando-se a eficiência do circuito projetado. Porém, ainda há a possibilidade de otimização do projeto do circuito, haja vista a grande quantidade de potência dissipada sobre alguns componentes, principalmente sobre o resistor de 10 Ohms.

6.6. Protótipo definitivo da bomba piezelétrica

Devido a todos os experimentos realizados com os dois protótipos anteriores, às simulações, e tendo em vista os requisitos a serem alcançados que consistiam em obter uma forma de engaste que ocasionasse o ótimo deslocamento do atuador bilaminar e obter um fluxo visível de água, reuniu-se uma gama de informações necessárias ao projeto e construção do protótipo final da bomba piezelétrica. É importante ressaltar que o protótipo definitivo da bomba não foi construído com base nos valores obtidos na otimização computacional.

O protótipo foi constituído de 2 (duas) partes:

- a primeira, que englobava a área de engaste em toda a largura do atuador bilaminar e 1mm do comprimento do mesmo, as saídas dos terminais e, além disso, o começo do canal, que se estende até, aproximadamente, três quartos do comprimento do atuador, feita em alumínio;
- e a segunda parte, construída em acrílico que abrigava o final do canal ao longo de um quarto do comprimento do atuador e um prolongamento de 15mm. Permite ótima visualização do fluxo de água.

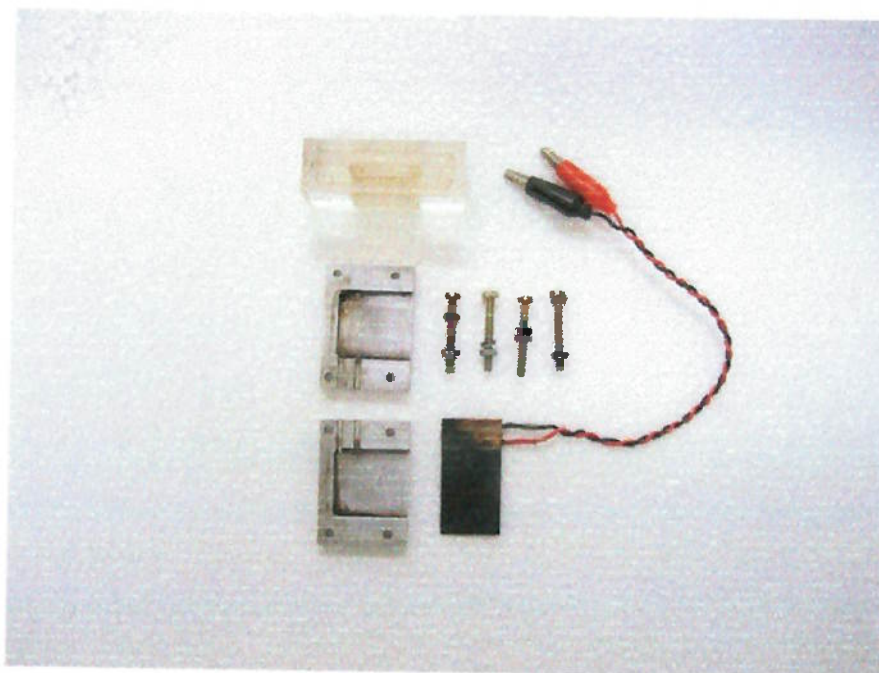


Fig. 6.17 – Componentes da bomba piezelétrica.

As duas partes principais da bomba são apresentadas nas figuras a seguir.

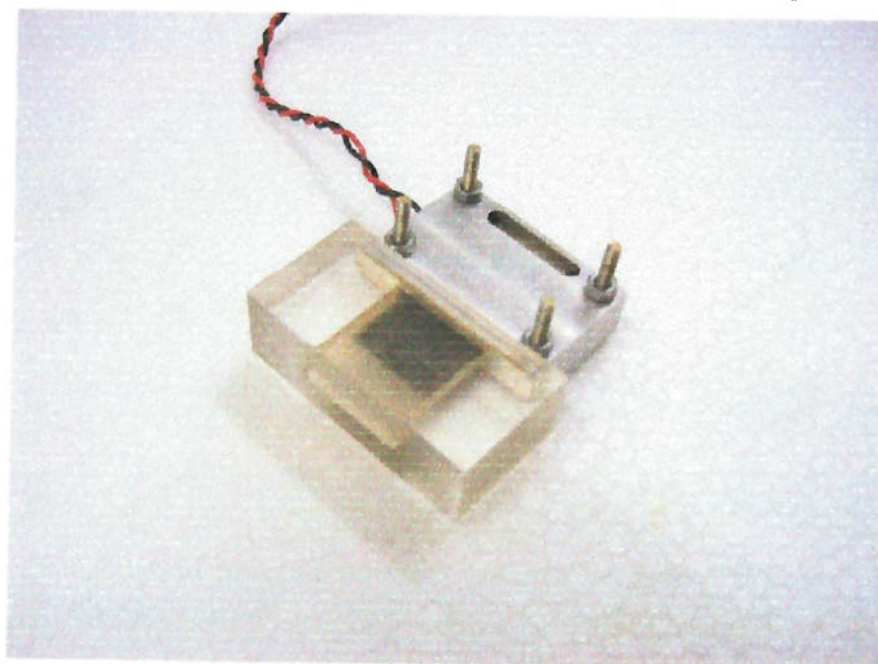


Fig. 6.18 – Bomba piezelétrica. Presença de duas partes distintas: - uma em alumínio e outra em acrílico.

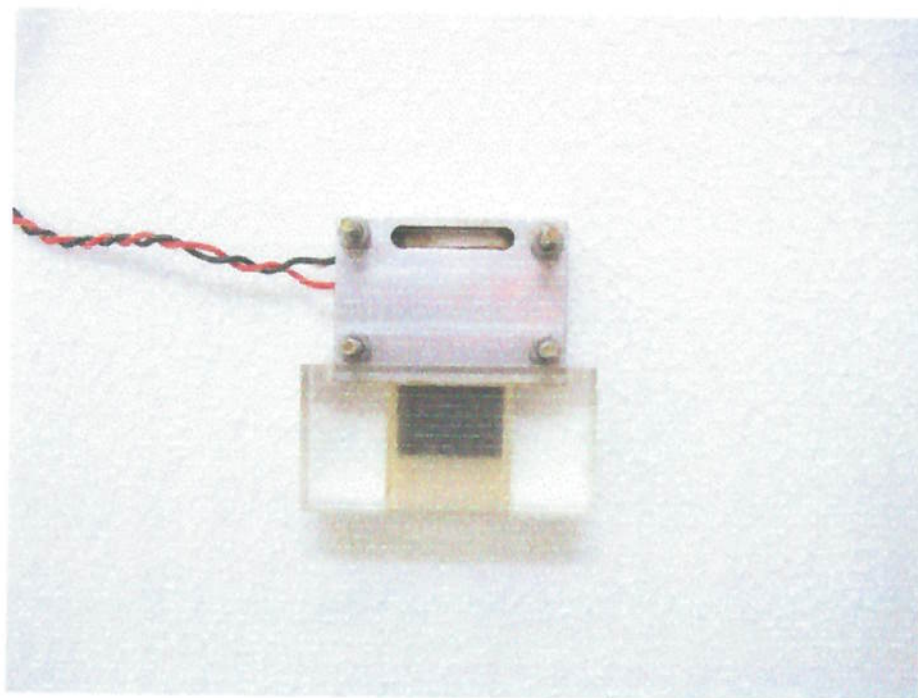


Fig. 6.19 – Bomba piezelétrica. Vista superior.

6.7. Testes da bomba piezelétrica

Para os testes com a bomba piezelétrica, foram utilizados os seguintes materiais:

- Gerador de funções AGILENTE 33120A;
- Fonte de 60V DC AGILENTE E3649A;
- Cola de silicone;
- Suporte em acrílico;
- Béquer;
- Água;
- Permanganato de Potássio.

Após montado, colocou-se cola de silicone nas fendas do protótipo para vedação e isolamento dos contatos elétricos, a fim de evitar que a água não causasse curto-circuito durante o funcionamento. A fim de evitar que o movimento oscilatório do atuador piezelétrico não se dissipasse sob a forma de vibrações através das peças e do recipiente, a bomba foi fixada com o auxílio de um suporte em alumínio.

Os testes consistiram em submergir o protótipo na água, verificando o deslocamento do atuador e o fluxo gerado. O aparato experimental utilizado é apresentado na fig. 6.20.

Nas entradas laterais de água da bomba foram colocados comprimidos de permanganato de potássio, que conferiu cor vermelha à água, auxiliando na visualização do fluxo.

Estando imersa em água, por meio do circuito amplificador, a bomba foi acionada e, finalmente, obteve-se um fluxo visível de água, como é mostrado nas figuras fig. 6.21 e 6.22.

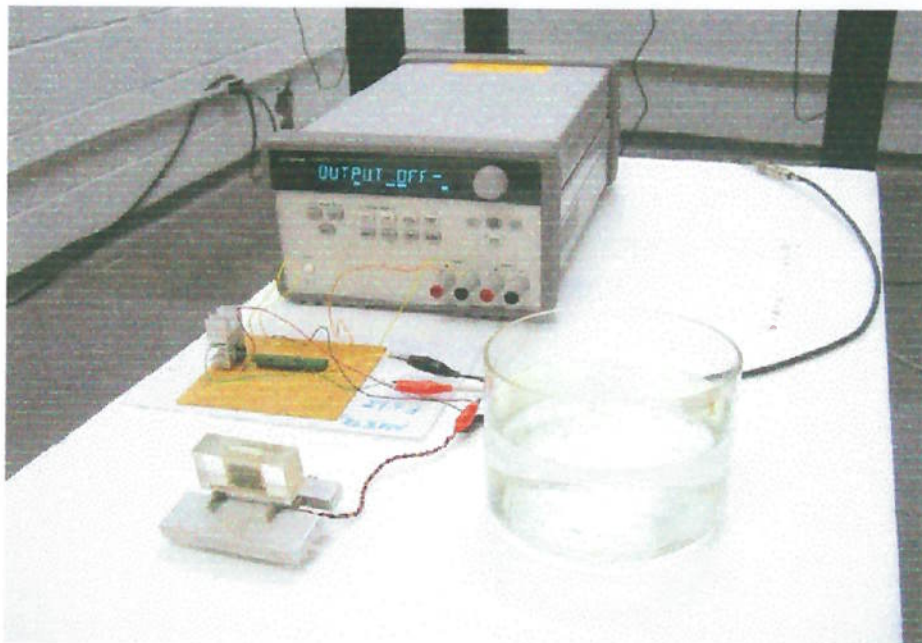


Fig. 6.20 – Aparato experimental para testes com a bomba piezelétrica.

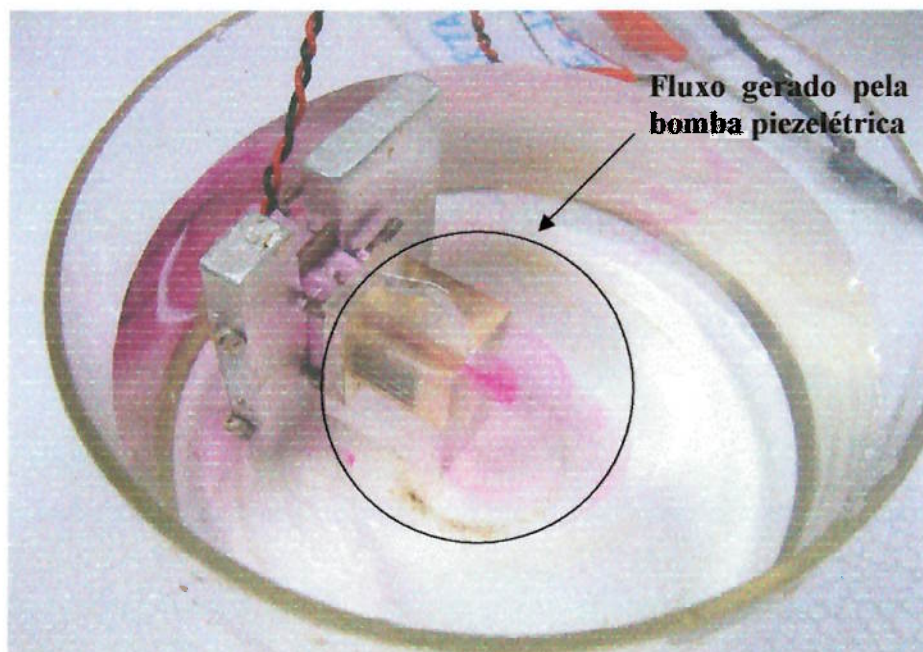


Fig. 6.21 – Fluxo de água induzido pela bomba piezelétrica

Nota-se através da fig. 6.21 o começo do escoamento de água no interior do canal da bomba, devido ao comportamento oscilatório do atuador bilaminar piezelétrico, confirmando a viabilidade da bomba de fluxo piezelétrica proposta nesse trabalho de formatura. A evolução deste escoamento continua sendo mostrada nas figuras seguintes.

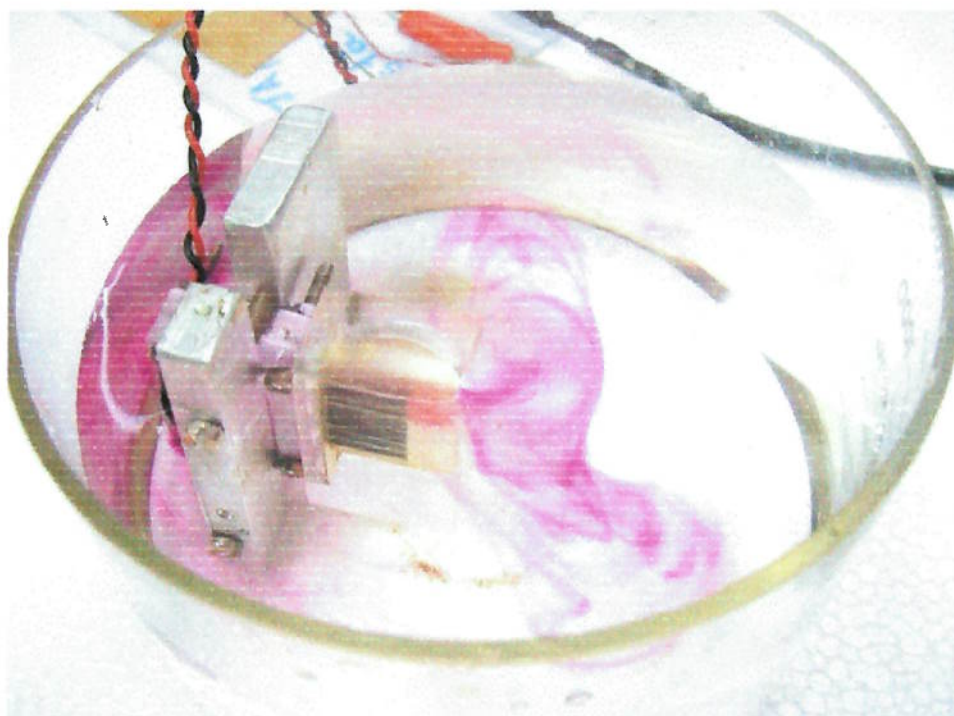


Fig. 6.22 – Evolução do fluxo de água gerado pela bomba piezelétrica

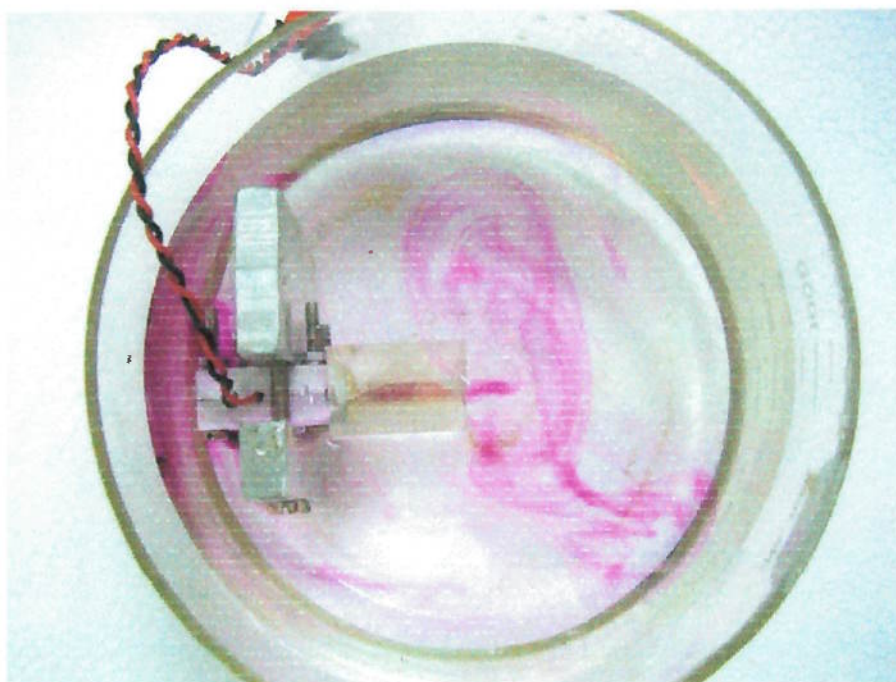


Fig. 6.23 - Fluxo de água induzido pela bomba piezelétrica. Vista superior.

Apesar de apresentar um fluxo visível de água, a bomba piezelétrica necessita ainda de ajustes finos devido a assimetrias apresentadas durante o escoamento. Essa característica pode ser vista na Figura 6.24.

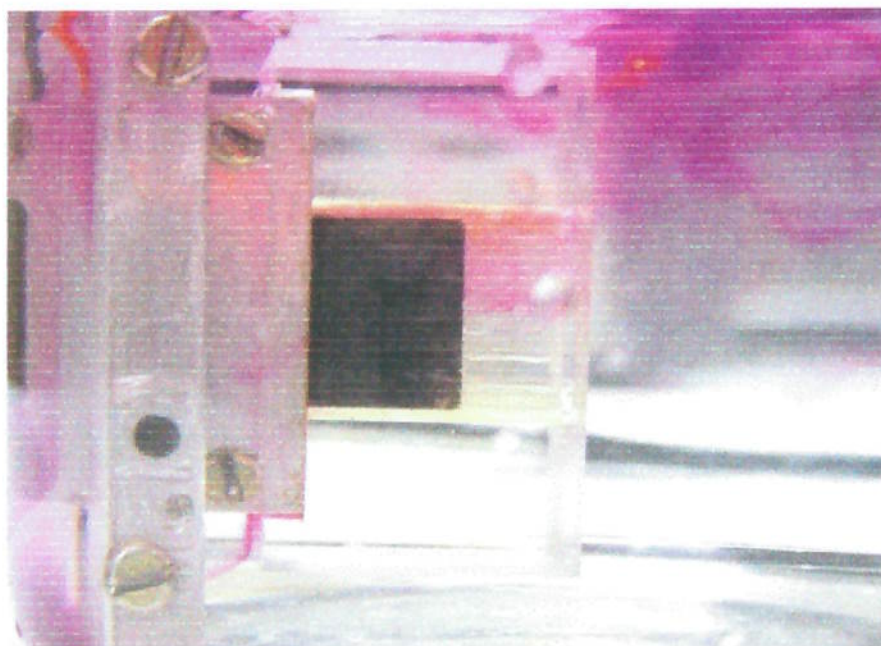


Fig. 6.24 - Assimetrias presentes no escoamento de água induzido pela bomba.

As causas possíveis para a ocorrência dessas assimetrias podem ser:

- descentralização do atuador piezelétrico no canal;
- irregularidades na área de engaste devido a precisão obtida na usinagem;
- assimetria na escolha dos locais em que foram encrustrados os comprimidos de permanganato de potássio;
- assimetria na oscilação do atuador devido às massas dos fios soldados à cerâmica.

Após serem feitos esses ajustes finos o protótipo da bomba estará pronto para ser caracterizado. Esta caracterização consistirá no levantamento quantitativo de pressão e vazão do equipamento.

7. CONCLUSÕES

Ao término deste trabalho de formatura pôde-se chegar às seguintes conclusões:

- O princípio de funcionamento proposto neste trabalho é de fato viável e mostrou-se eficiente no bombeamento de água, fato justificado tanto pelas simulações computacionais como pelos testes com protótipos.
- O atuador bilaminar piezelétrico se mostrou adequado para a emulação do comportamento oscilatório desejado, gerando um fluxo visível de fluido, comprovando a viabilidade da bomba de fluxo piezelétrica.
- A utilização de simulação computacional se mostrou realmente importante para o estudo deste novo princípio uma vez que não existia qualquer tipo de referência ao sistema em questão, bem como no auxílio à parte experimental, fornecendo parâmetros importantes e dispensando a elaboração de um grande número de protótipos.
- A elaboração de protótipos para testes mostrou-se também importante como complemento das simulações computacionais, ratificando seus resultados e permitindo o estudo de fatores não considerados apenas com as simulações.

8. ANEXOS

8.1. Código-fonte do arquivo 'bomba.ans'

A seguir segue o código-fonte utilizado para as simulações feitas utilizando ANSYS através do uso de linguagem APDL.

```
/BATCH,LIST
/tit,Bomba Piezeletrica
/nopr

!*****
! Parametros da bomba

H          = 0.0030                ! altura do duto
Amplitude = 30                    ! Amplitude de Oscilação (pico-a-pico)
freq       = 80                   ! Frequência de oscilação em Hz

!*****

LLAMINA = 0.035                  ! Comprimento da lâmina
NDX      = 160                   ! subdivisoes em X
NDY      = 10                    ! subdivisoes em Y
POUT     = 0.0                   ! pressão relativa de saída
PR_IN    = 0.0                   ! pressão relativa de entrada
RHO      = 1000.0000             ! densidade do fluido
MU        = 0.001                ! viscosidade dinâmica ou absoluta
nts       = 500                  ! numero de passos no tempo
*AFUN,RAD                          ! angulos em radianos
AMAX = ((Amplitude*0.001)/2)/35  ! Amplitude Angular (um - 0.000001m)
OMEGA = freq*2*3.14159           ! Frequência em radianos
LX = 2 * LLAMINA

!time = 12*(1/freq)              ! tempo total de simulacao

*if, freq, EQ, 2, THEN
time = 6.0
*endif

*if, freq, EQ, 4, THEN
time = 3.0
*endif
```

```
*if, freq, EQ, 5, THEN  
time = 2.5  
*endif
```

```
*if, freq, EQ, 6, THEN  
time = 2.0  
*endif
```

```
*if, freq, EQ, 8, THEN  
time = 1.5  
*endif
```

```
*if, freq, EQ, 10, THEN  
time = 1.2  
*endif
```

```
*if, freq, EQ, 12, THEN  
time = 1.0  
*endif
```

```
*if, freq, EQ, 14, THEN  
time = 0.86  
*endif
```

```
*if, freq, EQ, 15, THEN  
time = 0.80  
*endif
```

```
*if, freq, EQ, 16, THEN  
time = 0.75  
*endif
```

```
*if, freq, EQ, 18, THEN  
time = 0.67  
*endif
```

```
*if, freq, EQ, 20, THEN  
time = 0.60  
*endif
```

```
*if, freq, EQ, 22, THEN  
time = 0.55  
*endif
```

```
*if, freq, EQ, 24, THEN  
time = 0.5  
*endif
```

```
*if, freq, EQ, 25, THEN  
time = 0.48  
*endif
```

```
*if, freq, EQ, 26, THEN  
time = 0.47  
*endif
```

```
*if, freq, EQ, 28, THEN  
time = 0.43  
*endif
```

```
*if, freq, EQ, 30, THEN  
time = 0.40  
*endif
```

```
*if, freq, EQ, 32, THEN  
time = 0.38  
*endif
```

```
*if, freq, EQ, 34, THEN  
time = 0.36  
*endif
```

```
*if, freq, EQ, 35, THEN  
time = 0.35  
*endif
```

```
*if, freq, EQ, 36, THEN  
time = 0.34  
*endif
```

```
*if, freq, EQ, 38, THEN  
time = 0.32  
*endif
```

```
*if, freq, EQ, 40, THEN  
time = 0.30  
*endif
```

```
*if, freq, EQ, 42, THEN  
time = 0.29  
*endif
```

```
*if, freq, EQ, 44, THEN  
time = 0.28  
*endif
```

```
*if, freq, EQ, 45, THEN
```

```
time = 0.27
*endif

*if, freq, EQ, 46, THEN
time = 0.27
*endif

*if, freq, EQ, 48, THEN
time = 0.25
*endif

*if, freq, EQ, 50, THEN
time = 0.24
*endif

*if, freq, EQ, 52, THEN
time = 0.24
*endif

*if, freq, EQ, 54, THEN
time = 0.23
*endif

*if, freq, EQ, 55, THEN
time = 0.22
*endif

*if, freq, EQ, 56, THEN
time = 0.22
*endif

*if, freq, EQ, 58, THEN
time = 0.21
*endif

*if, freq, EQ, 60, THEN
time = 0.20
*endif

*if, freq, EQ, 62, THEN
time = 0.20
*endif

*if, freq, EQ, 64, THEN
time = 0.19
*endif

*if, freq, EQ, 65, THEN
time = 0.19
```

*endif

*if, freq, EQ, 66, THEN
time = 0.19
*endif

*if, freq, EQ, 68, THEN
time = 0.18
*endif

*if, freq, EQ, 70, THEN
time = 0.18
*endif

*if, freq, EQ, 72, THEN
time = 0.17
*endif

*if, freq, EQ, 74, THEN
time = 0.17
*endif

*if, freq, EQ, 75, THEN
time = 0.16
*endif

*if, freq, EQ, 76, THEN
time = 0.16
*endif

*if, freq, EQ, 78, THEN
time = 0.16
*endif

*if, freq, EQ, 80, THEN
time = 0.15
*endif

*if, freq, EQ, 82, THEN
time = 0.15
*endif

*if, freq, EQ, 84, THEN
time = 0.15
*endif

*if, freq, EQ, 86, THEN
time = 0.14
*endif

```

*if, freq, EQ, 88, THEN
time = 0.14
*endif

*if, freq, EQ, 90, THEN
time = 0.14
*endif

*if, freq, EQ, 92, THEN
time = 0.14
*endif

*if, freq, EQ, 94, THEN
time = 0.13
*endif

*if, freq, EQ, 96, THEN
time = 0.13
*endif

*if, freq, EQ, 98, THEN
time = 0.13
*endif

*if, freq, EQ, 100, THEN
time = 0.12
*endif

delta = time/nts                ! time step size
appf = delta                    ! append results every time step

X0 = LX/2                      ! pivot point x-coord

*DIM, UXTAB, TABLE, 6, 4, 1
UXTAB(0,0,1) = 0.0, -999, 1, X0 , AMAX, 0.0, 0.0
UXTAB(0,1,1) = 1.0, -1 , 0, 1.0 , 27 , 2 , 17 ! Radius = XR - X0
UXTAB(0,2,1) = 0.0, -2 , 9, OMEGA, 1 , 3 , 18 !
Angle=amax*sin(omega*t)
UXTAB(0,3,1) = 0.0, -3 , 10, 1.0 , -2 , 3 , -1 ! Radius*cos(Angle)
UXTAB(0,4,1) = 0.0, 99 , 0, 1.0 , -3 , 2 , -1 ! Radius*cos(Angle)-
Radius

*DIM, UYTAB, TABLE, 6, 3, 1
UYTAB(0,0,1) = 0.0, -999, 1, X0 , AMAX, 0.0, 0.0
UYTAB(0,1,1) = 1.0, -1 , 0, 1.0 , 27 , 2 , 17 ! Radius = XR - X0

```

```

UYTAB(0,2,1) = 0.0, -2 , 9, OMEGA, 1 , 3 , 18 !
Angle=amax*sin(omega*t)
UYTAB(0,3,1) = 0.0, 99 , 9, 1.0 , -2 , 3 , -1 ! Radius*sin(Angle)

```

```
*DIM,VXTAB,TABLE,6,5,1
```

```

VXTAB(0,0,1) = 0.0, -999, 1, X0 , AMAX, OMEGA*AMAX, 0.0
VXTAB(0,1,1) = 1.0, -1 , 0, -1.0 , 27 , 1 , 17 ! -Radius = -
(XR-X0)
VXTAB(0,2,1) = 0.0, -2 , 9, OMEGA, 1 , 3 , 18 !
Angle=amax*sin(omega*t)
VXTAB(0,3,1) = 0.0, -3 , 10, OMEGA, 1 , 3 , 19 !
Anglespeed=amax*omega*cos(omega*t)
VXTAB(0,4,1) = 0.0, -4 , 9, 1.0 , -2 , 3 , -1 ! -
Radius*sin(angle)
VXTAB(0,5,1) = 0.0, 99 , 0, 1.0 , -4 , 3 , -3 !-
Radius*sin(angle)*anglespeed

```

```
*DIM,VYTAB,TABLE,6,5,1
```

```

VYTAB(0,0,1) = 0.0, -999, 1, X0 , AMAX, OMEGA*AMAX, 0.0
VYTAB(0,1,1) = 1.0, -1 , 0, 1.0 , 27 , 2 , 17 !Radius = XR - X0
VYTAB(0,2,1) = 0.0, -2 , 9, OMEGA, 1 , 3 , 18
!Angle=amax*sin(omega*t)
VYTAB(0,3,1) = 0.0, -3 , 10, OMEGA, 1 , 3 , 19
!Anglespeed=amax*omega*cos(omega*t)
VYTAB(0,4,1) = 0.0, -4 , 10, 1.0 , -2 , 3 , -1
!Radius*cos(angle)
VYTAB(0,5,1) = 0.0, 99 , 0, 1.0 , -4 , 3 , -3
!Radius*cos(angle)*anglespeed

```

```
/PREP7 $smrt,off
```

```
et,1,141 ! 2D XY
```

```
keyopt,1,4,1
```

```
esha,2 ! elementos quadrados
```

```

K, 1, LX/2 - LX/128 , 0
K, 2, LX , 0
K, 3, LX , H/2
K, 4, LX , H
K, 5, LX/2 - LX/128 , H
K, 6, LX/2 , H/2

```

```

K, 7, LX/2 - LX/64 , H
K, 8, LX/2 - LX/128 , H/2
K, 9, LX/2 - LX/64 , 0
K, 10, LX + 3*H , H
K, 11, LX + 3*H , H/2
K, 12, LX + 3*H , 0

```

```

L, 1, 2      ! Linha 01
L, 2, 3      ! Linha 02
L, 3, 4      ! Linha 03
L, 4, 5      ! Linha 04
L, 5, 6      ! Linha 05
L, 6, 1      ! Linha 06
L, 6, 3      ! Linha 07
L, 2, 12     ! Linha 08
L, 12, 11    ! Linha 09
L, 11, 10    ! Linha 10
L, 10, 4     ! Linha 11
L, 3, 11     ! Linha 12
L, 9, 1      ! Linha 13
L, 9, 8      ! Linha 14
L, 8, 7      ! Linha 15
L, 7, 5      ! Linha 16
L, 8, 6      ! Linha 17

```

```

AL, 1, 2, 7, 6
AL, 7, 3, 4, 5
AL, 2, 8, 9, 12
AL, 3, 12, 10, 11
AL, 13, 6, 17, 14
AL, 5, 16, 15, 17

```

```

lesize, 1,,, NDX,
lesize, 2,,, NDY, -10
lesize, 3,,, NDY, -10
lesize, 4,,, NDX,
lesize, 5,,, NDY, -10
lesize, 6,,, NDY, -10
lesize, 7,,, NDX,
lesize, 8,,, NDX/4,
lesize, 9,,, NDY,
lesize, 10,,, NDY,
lesize, 11,,, NDX/4,
lesize, 12,,, NDX/4,
lesize, 13,,, NDX/32,
lesize, 14,,, NDY,
lesize, 15,,, NDY,
lesize, 16,,, NDX/32,
lesize, 17,,, NDX/32,

```

```

alls
amesh, all

```

```

lssel,s,,,1                                ! Parte inferior do duto
lssel,a,,,8
nsl1,s,1
d,all,vx,
d,all,vy,
d,all,ux,0.0
d,all,uy,0.0

lssel,s,,,4                                ! Parte superior do duto
lssel,a,,,11
nsl1,s,1
d,all,vx,
d,all,vy,
d,all,ux,0.0
d,all,uy,0.0

lssel,s,,,9                                ! Entrada e saída do duto
lssel,a,,,10
nsl1,s,1
d,all,pres,POUT

lssel,s,,,13
lssel,a,,,16
nsl1,s,1
d,all,pres,PR_IN

lssel,s,,,14                                ! Novo formato
lssel,a,,,15
lssel,a,,,17
nsl1,s,1
d,all,vx,0.0
d,all,vy,0.0
d,all,ux,0.0
d,all,uy,0.0

lssel,s,,,7                                ! lamina oscilante
nsl1,s,1
d,all,VX,%VXTAB%
d,all,VY,%VYTAB%
d,all,enke,-1
d,all,ux,%UXTAB%
d,all,uy,%UYTAB%

alls
fini

/SOLU
FLDA,NOMI,DENS,RHO                        ! densidade

```

```

FLDA,NOMI,VISC,UM          ! viscosidade
flda,quad,momd,2
flda,quad,moma,2
flda,quad,moms,2
flda,quad,prsd,2
flda,quad,prss,2
flda,solu,tran,t
flda,time,step,delta
flda,time,numb,nts
flda,time,tend,time
flda,time,glob,10
flda,time,appe,appf

flda,solu,ale,t            ! Formulacao ALE
flda,solu,turb,t          ! Escoamento Turbulento

save
SOLVE
fini

/post1

N      = 500
NCICLO = 500

! F = 80Hz
! 1/F = 0.0125
! Ciclos simulados = .15/.0125 = 12
! 500 / 12 = 42 iteracoes num ciclo.

*dim, R1, array, 21, 1
*dim, R2, array, 1, 1
*cfopen, resultados82, txt

*do, aux, N-NCICLO, N
set,, aux

R1(1,1) = VX(3422)
R1(2,1) = VX(3423)
R1(3,1) = VX(3424)
R1(4,1) = VX(3425)
R1(5,1) = VX(3426)
R1(6,1) = VX(3427)
R1(7,1) = VX(3428)
R1(8,1) = VX(3429)
R1(9,1) = VX(3430)
R1(10,1) = VX(3431)
R1(11,1) = VX(3382)
R1(12,1) = VX(3862)

```

```

R1(13,1) = VX(3863)
R1(14,1) = VX(3864)
R1(15,1) = VX(3865)
R1(16,1) = VX(3866)
R1(17,1) = VX(3867)
R1(18,1) = VX(3868)
R1(19,1) = VX(3869)
R1(20,1) = VX(3870)
R1(21,1) = VX(3822)

R2(1,1) = 0.0

*do,aux1,1,21

! media = ( 0.5*V(1) + V(2) + V(3) + ... + V(20) + 0.5*V(21) ) / 20
! mas V(1) e V(21) = 0 ... 0.5 * 0.0 = 0.0
! (tanto faz... multiplicar por 0.5 ou nao)

R2(1,1) = R2(1,1) + R1(aux1,1)
*enddo

R2(1,1) = R2(1,1)/20
*vwrite,R2(1,1)
(1x,1(2pe17.5))
*enddo

```

8.2. Código-fonte de 'calc_vazao.m'

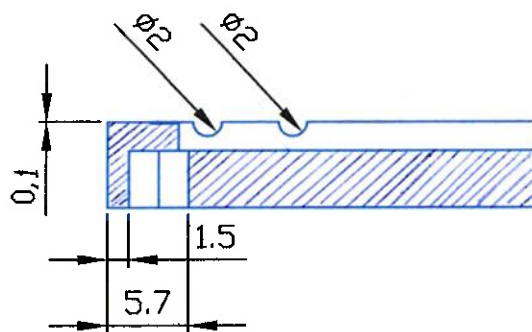
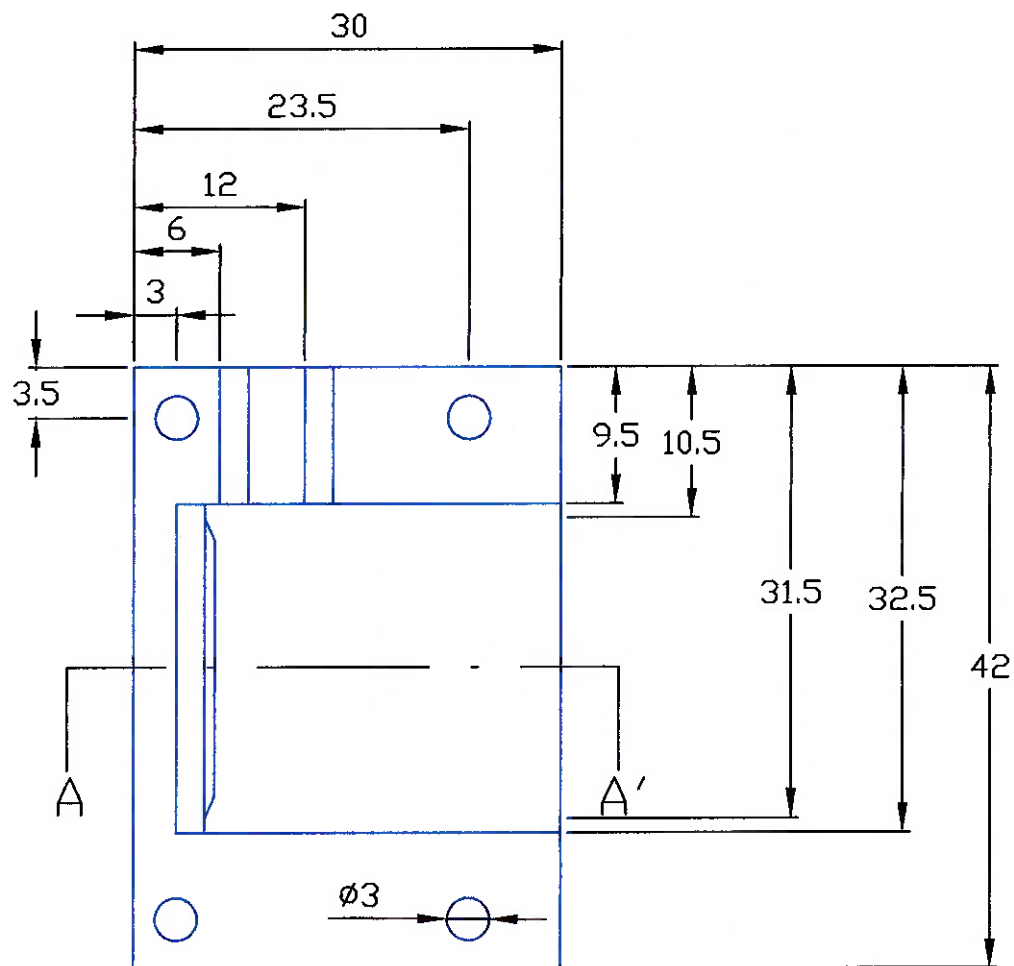
A seguir, o código-fonte da função implementada em MATLAB para a leitura de um arquivo ASCII contendo as informações sobre as velocidades do fluido na seção de saída da bomba.

```

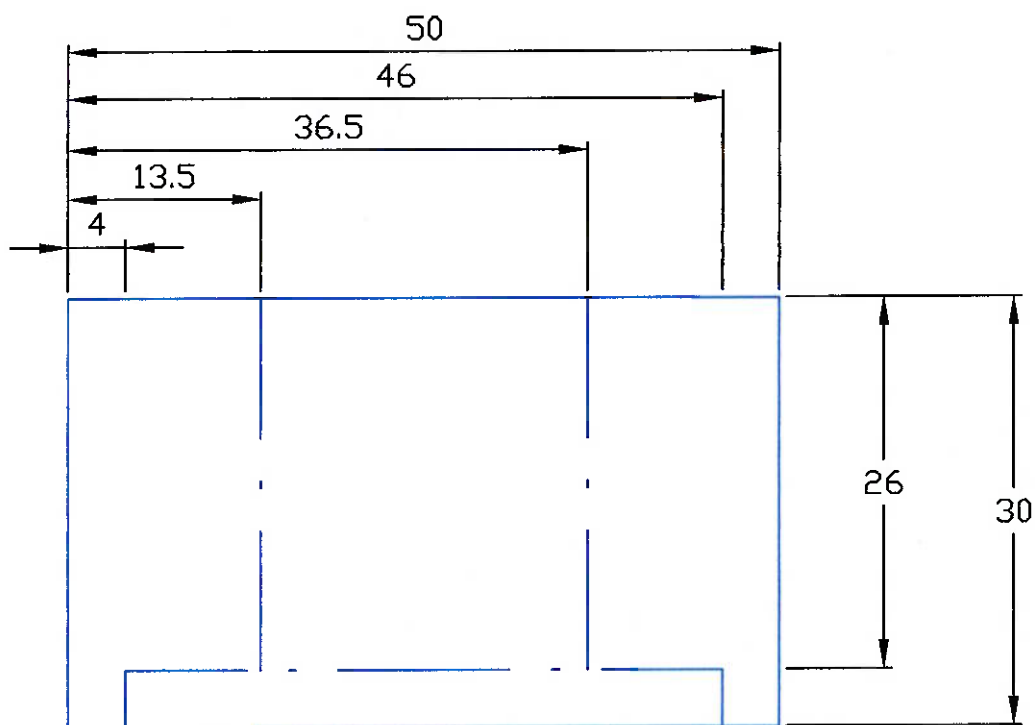
clear;
nomearq = input('Nome do arquivo.... ');
altura = input('Altura do duto..... ');
res = dlmread(nomearq);
for i = 1 : 50
    res1 (i) = res(450+i);
end
vmedia = ( max(res1)+min(res1) ) / 2;
vazao = vmedia*1e6*0.020*altura*60

```

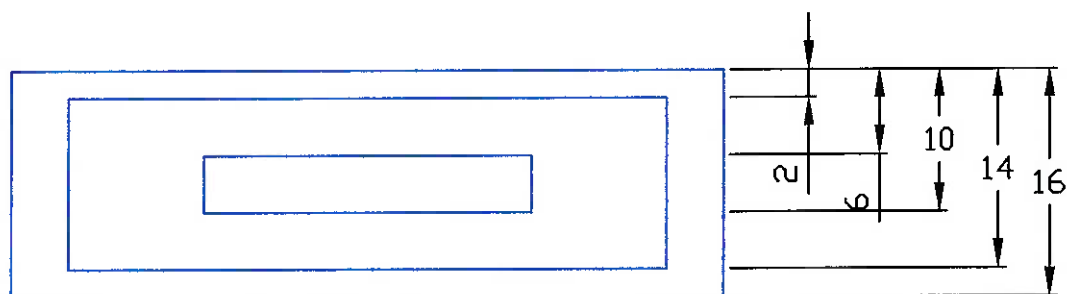
8.3. Desenhos de fabricação dos protótipos em AutoCAD 2002



Itemref	Quant.	Title/Name, material, designation, dimension			Article No./Reference	
1	1	Canal-Bomba Pzt, placa alumínio 1mm altura				
Designed by Rogério Pires		Checked by	Approved by-date	Filename Canal.dwg	Date: 01/12/03	Scale 2:1
E. Politécnica			Canal-Bomba Pzt.			



Vista Superior



Vista Frontal

Itemref	Quant.	Title/Name, material, designation, dimension				Article No./Reference	
1	1	Canal-Peça 2-Bomba Pzt, Acrílico, 16mm Altura					
Designed by Rogério Pires		Checked by	Approved by-date	Filename Canal_peça_2deg	Date: 01/12/03	Scale 2:1	
E. Politécnica			Canal-Peça 2-Bomba Pzt.				

9. REFERÊNCIAS

ANSYS, version 6.0. ANSYS, 2001

Altair Hyperstudy, version 6.0. Altair Engineering, 2003.

MATLAB, release12. The Mathworks, 2000.

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

GONZÁLEZ, U.F.; MOUSSA, W.A. **Simulation of MEMS piezoelectric micropump for biomedical applications.** Pittsburg, PA, 2002. Simulação de bomba piezelétrica para aplicações médicas. Disponível em <<http://www.algor.com>>. Acesso em 10 de setembro de 2003.

Multidisciplinary Engineering Solutions. Huntsville, AL, 2003. Exemplos de problemas de CFD. Disponível em <<http://www.cfdrc.com>>. Acesso em 10 de setembro de 2003.

APC International. Mackeyville, PA, 2003. Informações sobre atuadores piezelétricos bilaminares (“Stripe Actuators”). Disponível em <<http://www.americanpiezo.com>> . Acesso em 30 de novembro de 2003.

ANDRADE, A.; BISCEGLI, J.; SOUSA, J.E.; OHASHI, Y.; HEMMINGS, S. GLUECK, J.; KAWAHITO, K.Ç NOSÉ, Y. **Characteristics of a Blood Pump Combining the Centrifugal and Axial Pumping Principles: The Spiral Pump.** In: Artificial Organs, Blackwell Society, Inc, Boston, 1996

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

FOX, R.W; MCDONALD, A.T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981