

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
YUKI KAJIHARA IMAMURA

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE UMA BOMBA DE FLUXO PIEZELÉTRICA DE
DIAFRAGMA BASEADA NO PRINCÍPIO DO CAVALO MECÂNICO**

SÃO PAULO
Dezembro de 2010

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
YUKI KAJIHARA IMAMURA

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE UMA BOMBA DE FLUXO PIEZELÉTRICA DE
DIAFRAGMA BASEADA NO PRINCÍPIO DO CAVALO MECÂNICO**

Trabalho de formatura apresentado junto
ao curso de Engenharia Mecatrônica da
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do Título de
Engenheiro Mecatrônico.

SÃO PAULO
Dezembro de 2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Imamura, Yuki Kajihara

**Estudo de viabilidade de uma bomba de fluxo piezelétrica /
Y.K. Imamura. -- São Paulo, 2010.
91 p.**

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

**1. Atuadores piezelétricos 2. Simulação 3. Mecânica dos flui-
dos 4. Método dos elementos finitos I. Universidade de São Pau-
lo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica
e de Sistemas Mecânicos II. t.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor orientador Emílio Carlos Nelli Silva

Agradeço aos colegas Sandro Vatanabe e Andres Choi pelas constantes ajudas tanto nas simulações quanto na construção do protótipo.

Agradeço ao professor Oswaldo Horikawa pela fundamental ajuda no projeto do protótipo.

Finalmente, agradeço à minha família, principalmente à minha mãe, que me ajudou sempre que preciso.

RESUMO

Bombas de fluxo piezelétricas têm sido estudadas recentemente devido ao seu baixo custo, consumo, geração de ruído e tamanho reduzido. Suas aplicações são principalmente: dosagem de medicamentos e refrigeração de notebooks. O Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo faz estudos sobre os princípios do bombeamento de fluidos baseados em atuadores piezelétricos. Este trabalho estuda a viabilidade de uma bomba piezelétrica de diafragma do tipo valveless baseada no princípio de funcionamento de um cavalo mecânico. Esta bomba consiste numa câmara cilíndrica com um diafragma em uma de suas extremidades e um bocal/difusor em cada lado (ambos com o mesmo sentido e direção). Seu diafragma é acoplado a uma cerâmica piezelétrica, este par funcionando como um atuador. Este move o diafragma na direção longitudinal do cilindro e em ambos os sentidos. Este movimento gera uma diferença de volume no interior da câmara e um consequente gradiente de pressão. Os canais bocal/difusor favorecem o deslocamento do fluido apenas para um sentido, gerando um fluxo de fluido na direção desejada pela bomba.

Neste estudo serão feitas análises modais e harmônicas, para o estudo das características da bomba. Para isso, será utilizado o software de simulação ANSYS, onde será feita modelagem pelo Método dos Elementos Finitos. O escoamento de fluidos será estudado utilizando o Método dos Volumes Finitos também através do software ANSYS. Com estas ferramentas será feita análise de sensibilidade dos parâmetros considerados mais importantes para o desempenho da bomba.

Uma fundamentação teórica também será apresentada, para que sejam justificados e melhor compreendidos os estudos. Por fim, protótipos serão construídos e caracterizados para validação dos resultados computacionais. Serão apresentadas a metodologia empregada e a discussão dos resultados obtidos, de forma a analisar o princípio proposto e os fenômenos físicos em questão.

ABSTRACT

Piezoelectric flow pumps have been studied recently due to its low cost, consumption, generation of noise and reduced size. Its applications are mainly: drug delivery and refrigeration of notebooks. The Department of Mechatronic Engineering and Mechanical Systems of the Polytechnic School of the University of São Paulo develops studies on the principles of the fluid pumping based on piezoelectric actuators. This work studies the viability of a valveless piezoelectric diaphragm pump based in the operational principle of a pumpjack. This pump has of a cylindrical chamber with a diaphragm in one of its extremities ends and a diffuser/nozzle at each side (both with the same direction). Its diaphragm is connected to piezoelectric ceramics. This pair functions as an actuator, moving in the longitudinal direction of the cylinder and in both directions. This movement generates a difference of volume inside the chamber and consequently a pressure gradient. The diffuser/nozzle channels favor the movement of the fluid in only one direction, generating a fluid flow in the desired direction.

In this study modal and harmonic analyses are conducted, for the study of the characteristics of the pump. Therein, the simulation software ANSYS will be used to perform the Finite Element modeling. The fluid flow is also studied using the Finite Volume Method thought ANSYS software.

A theoretical recital is also presented, so that the modeling are justified and better understood. Finally, a prototype is built and characterized for validation of the computational results. The employed methodology and the discussion of the results are presented to analyze the considered principle and the physical phenomena in question.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Bomba Piezelétrica de Diafragma	10
1.1.1	Bomba de cavalo mecânico	12
1.2	Princípio de Funcionamento	14
1.3	Justificativa	15
1.4	Objetivos	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Bocal/Difusor	17
2.2	Cerâmicas Piezelétricas	18
2.3	Atuadores Piezelétricos	19
2.4	Método dos Elementos Finitos Piezelétrico	20
2.4.1	Análise Modal	21
2.4.2	Análise Harmônica	23
2.5	Método dos Volumes Finitos para Simulação de Escoamento de Fluido	23
3	MODELAGEM COMPUTACIONAL	24
3.1	Metodologia do estudo computacional	24
3.2	Descrição dos elementos utilizados no ANSYS	24
4	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	26
4.1	Protótipo	26
4.2	Fabricação do protótipo	26
4.3	Ensaio de Vazão	29
4.4	Ensaio de Pressão Estática	30
5	RESULTADOS COMPUTACIONAIS	30
5.1	Atuador no ar	31
5.1.1	Atuador no Ar com furo	34
5.2	Atuador na Água - Análise de Sensibilidade	35

5.2.1	Comprimento dos Bocais	38
5.2.2	Diâmetro da Câmara	39
5.2.3	Diâmetro do Bocal	41
5.2.4	Espessura da Parede do Bocal	44
5.2.5	Altura da Câmara	45
5.3	Análise de Sensibilidade Baseada nas Simulações de Escoamento de Fluido 46	
6	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	52
6.1	Curva de Vazão X Frequência.....	52
6.2	Curva de Vazão X Tensão.....	53
6.3	Curva de Pressão X Frequência.....	54
7	CONCLUSÕES.....	54
8	Bibliografia	55
	APÊNDICE A.....	57
	APÊNDICE B.....	59
	APÊNDICE C.....	69
	APÊNDICE D.....	86

1 INTRODUÇÃO

Bombas de fluxo piezelétricas são aplicadas atualmente para dosagem de medicamentos, jatos de tinta de cartuchos de impressoras e refrigeração de equipamentos eletrônicos.

O modo como medicamentos são dosados podem ter um efeito significativo na sua eficácia terapêutica. Isso porque a maioria dos medicamentos possui uma faixa ideal de concentração no corpo do paciente, dosagens maiores podem ser tóxicas e menores são ineficazes (KESWANI, RAJ e LEE, 2007).

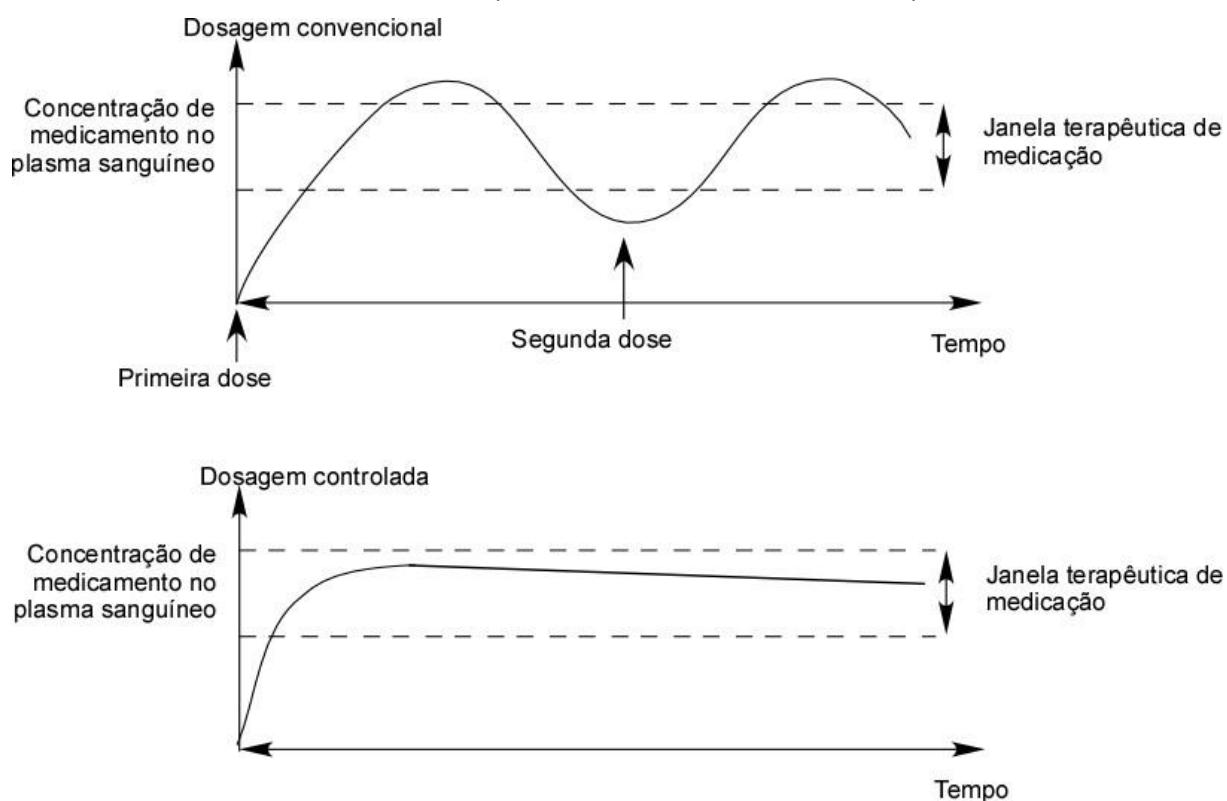


Figura 1.1: Comparação entre os modos convencional e controlado de dosagem de medicamentos. Em (a) os picos e vales decorrentes da dosagem convencional. Em (b) a concentração de medicamento se mantém na faixa terapêutica (TEO, SHEARWOOD, *et al.*, 2006).

Outros medicamentos são mais efetivos quando liberados em pulsos, e não com liberação constante (Figura 1.2), mimetizando a forma como o corpo produz alguns componentes, como a insulina.

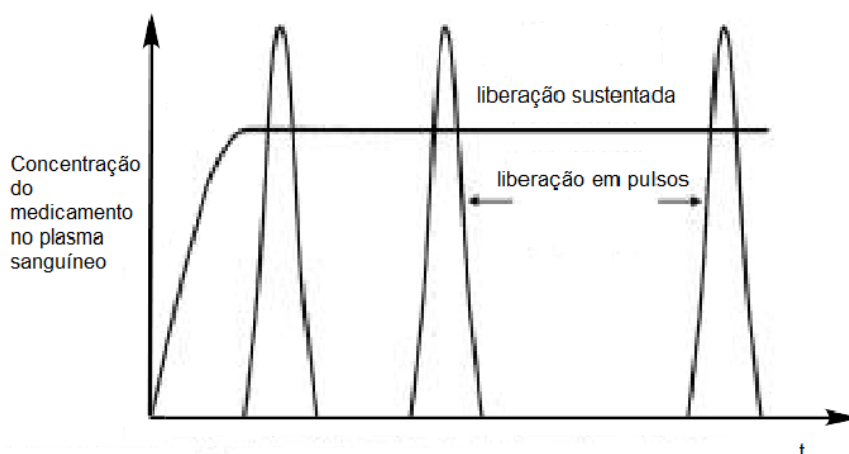


Figura 1.2: Liberação de medicamento em pulsos.

Assim, o modo convencional de dosagem (através de pílulas, injeções, comprimidos comuns, etc.) mostra-se pouco eficiente. Para resolver este problema são utilizados elementos de controle de fluxo. Estes podem ser classificados em dois tipos: micro-válvulas e micro-bombas (Figura 1.3). O primeiro tipo controla a vazão de fluido contido em um recipiente para o exterior. O segundo pode controlar a vazão e gerar uma pressão para forçar o fluido para fora. É neste grupo que estão classificadas as bombas de fluxo piezelétricas.

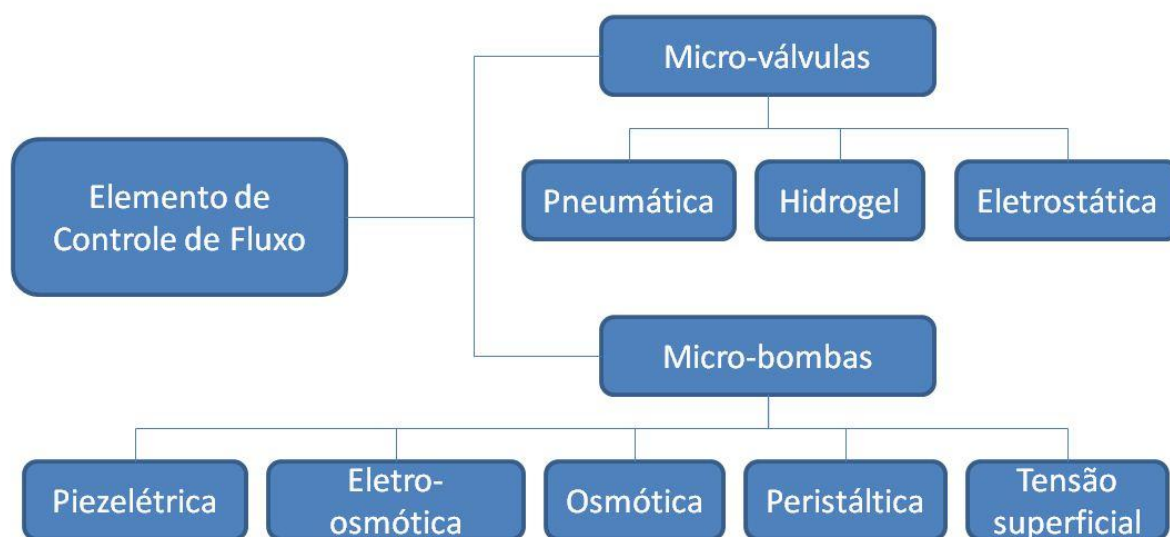


Figura 1.3: Elementos de Controle de Fluxo.

Assim, bombas de fluxo piezelétricas de fluxo de alta precisão são ideais, pois além de possuírem alta precisão podem ser implantados ou acoplados ao paciente (como as bombas de insulina para pacientes diabéticos).

Alguns cartuchos de tinta de impressoras utilizam bombas piezelétricas para expelir a tinta sobre o papel. Estes cartuchos conseguem imprimir com uma excelente resolução, se comparados com os cartuchos térmicos, que utilizam uma resistência para aquecer a tinta e impeli-la.

Bombas piezelétricas são também aplicadas em refrigeração de equipamentos eletrônicos, como notebooks e computadores de alto desempenho. Uma vez que a potência dissipada nos processadores tende a crescer e o sistema de refrigeração a ar torna-se insuficiente, ineficiente, ou gera muito ruído nestes casos. O sistema de refrigeração por fluido, circulado através de bomba piezelétrica torna-se neste caso uma solução mais adequada.

Existem, na indústria automotiva, injetores de combustível piezelétricos. Ao invés de utilizar solenóides eles utilizam uma fileira de cristais piezelétricos alinhados. Essa mudança permite um controle mais rápido e preciso sobre o processo de injeção. Assim, consegue-se uma diminuição do consumo e das emissões dos automóveis.



Figura 1.4: Injetor piezelétrico Bosch.

1.1 Bomba Piezelétrica de Diafragma

Existem diferentes configurações para bombas piezelétricas de diafragma. Van Lintel et al. (1988) propôs uma bomba de fluxo com estrutura de sanduíche vidro/silício/vidro, onde são usadas duas ou três válvulas de diafragma de silicone. As duas primeiras válvulas com a função de direcionar o fluxo. A terceira (opcional) funciona como válvula de segurança, impedindo que fluxo indesejado ocorra no caso de haver pressão na entrada maior que na saída.

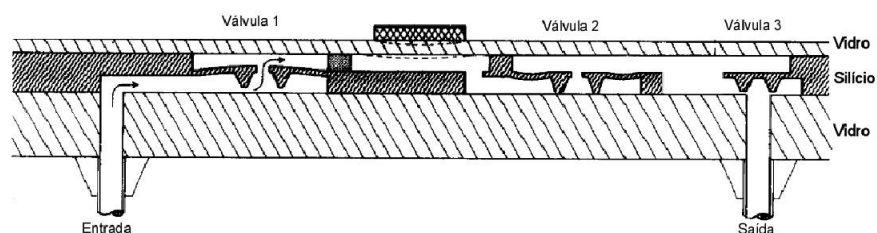


Figura 1.5: Bomba piezelétrica de Van Lintel et al (1988).

Esashi et al. (1989) apresentou um bomba de fluxo que utiliza válvulas do tipo “tampão”, onde o diafragma é “empurrado” por um atuador linear piezelétrico.

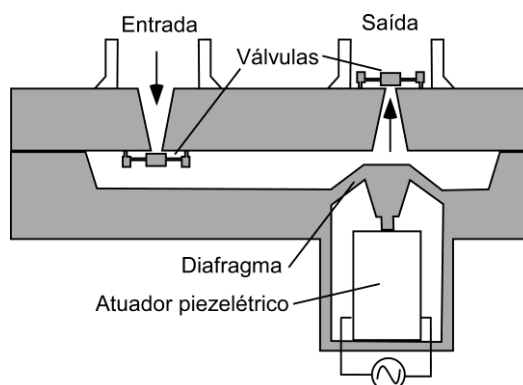


Figura 1.6: Bomba piezelétrica de Esashi et al (1989).

Uma bomba de fluxo com válvulas de esfera feita através de litografia foi proposta em 1995 (CARROZZA, CROCE, *et al.*, 1995). Esta bomba foi desenvolvida de forma a otimizar o desempenho hidráulico retificando o fluxo. Além disso, este tipo de válvula possui resistência à fadiga suficiente para que ela não seja o fator limitante da vida útil da bomba.

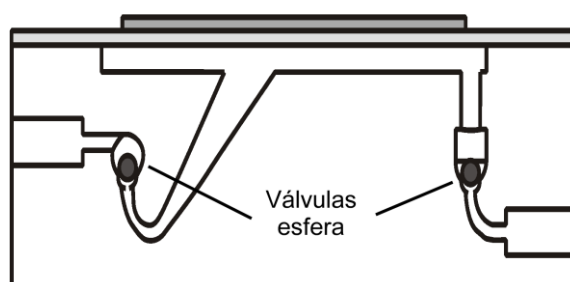


Figura 1.7: Bomba piezelétrica de Carozza et al (1995).

Bombas com válvulas do tipo cantilever foram estudadas por Koch et al. (1997) entre outros.

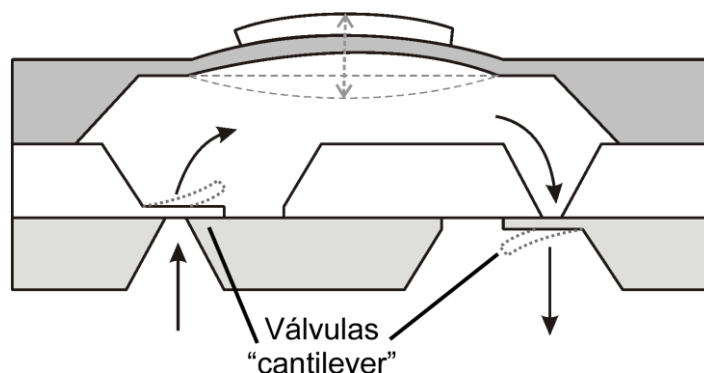


Figura 1.8: Bomba piezométrica com válvulas do tipo “cantilever”. (KOCH, HARRIS, *et al.*, 1997).

Foram também propostas bombas piezométricas de diafragma com válvulas do tipo “cantilever” e válvulas de esfera (para retificar o fluxo).

Estas bombas, no entanto, por possuírem partes móveis podem sofrer de problemas como alta queda de pressão, desgaste e fadiga na válvula. O que pode causar diminuição da vida útil e da confiabilidade. Além disso, há o risco da bomba causar danos a um fluido sensível (STEMME e STEMME, 1993). Por isso, este trabalho estuda uma bomba do tipo “valveless” utilizando o princípio do bocal/difusor. Uma configuração deste tipo de bomba foi estudada anteriormente por CHOI (2009). Sua bomba utilizava bocal/difusores na direção transversal da mesma.

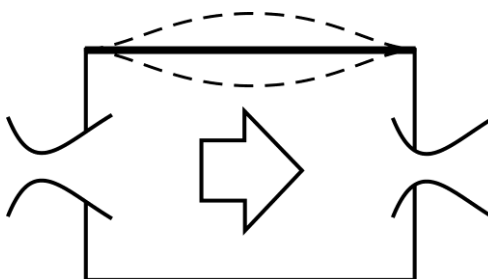


Figura 1.9: Bomba piezométrica de diafragma estudada por Andres (ANDRES, 2009). Cavalo Mecânico.

1.1.1 Bomba de cavalo mecânico

Para a extração do petróleo dos poços em terra onde não há pressão para o petróleo subir à superfície são utilizados os cavalos mecânicos: máquinas que fazem um pistão mover-se ciclicamente para cima e para baixo puxando o petróleo para cima.

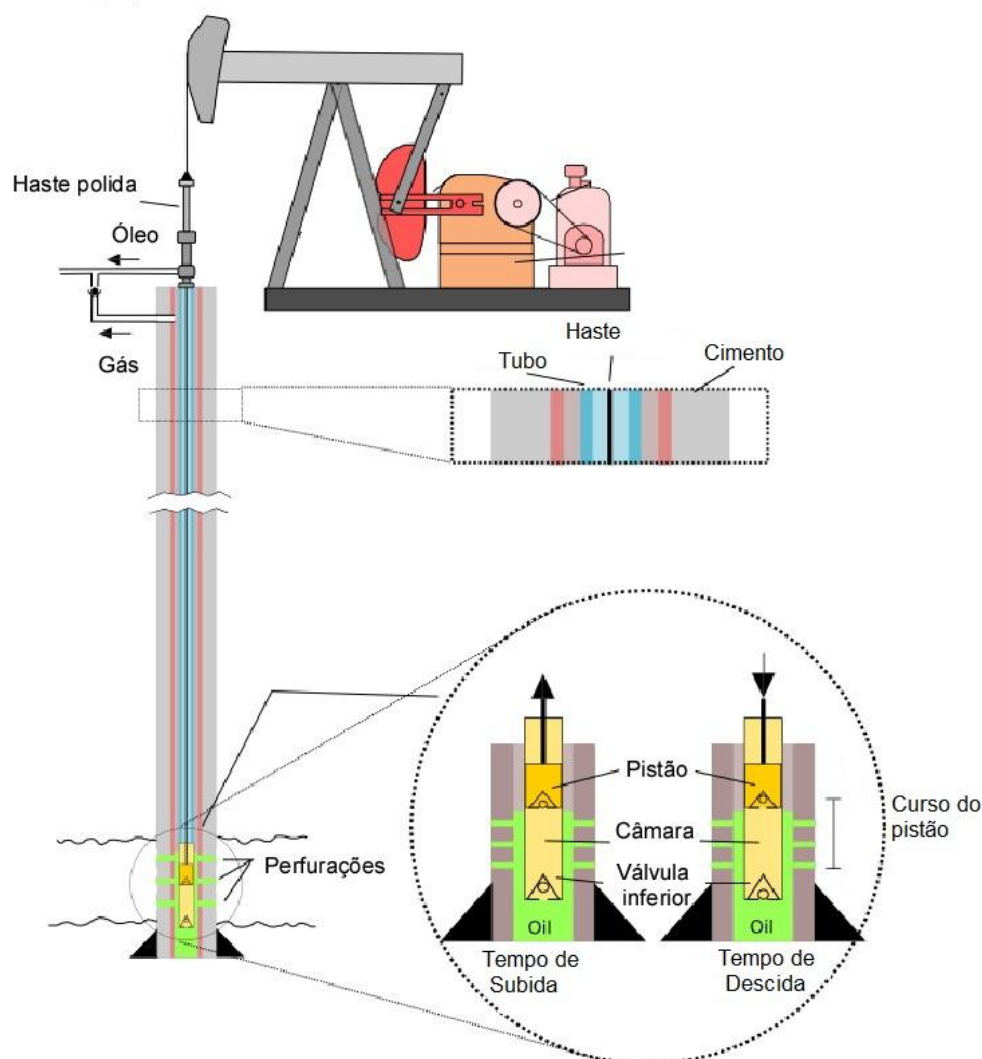


Figura 1.10: Cavalo mecânico. Bomba de pistão em destaque: pistão em subida e em descida.

Esta máquina consiste basicamente em um motor, um volante, um duto e uma haste conectados a um pistão e um barril onde este pistão está inserido. Este barril e o pistão possuem na sua extremidade inferior uma válvula unidirecional de retenção simples, que permite movimento de fluxo apenas para cima. O espaço entre as paredes do barril e inferior do pistão forma uma câmara. O volume de fluido bombeado é definido pela área de sua seção transversal e o curso do pistão.

Seu funcionamento é basicamente utilizar o movimento dado a um pistão através de uma haste a ele conectado (pelo sistema biela manivela), provocando uma mudança no volume interno da câmara. Quando o pistão é puxado para cima, sua válvula se fecha e o volume da câmara aumenta. Isso gera uma pressão negativa que força o fluido externo a entrar pela válvula inferior (do barril) e preencher a câmara. O fluido que estava no duto também sobe junto com o movimento do pistão (por serem solidários) trazendo fluido à superfície até o fim de

curso de subida. O pistão se move, então, para baixo, sua válvula se abre e a do barril se fecha. O fluido da câmara começa então a fluir da câmara para o tubo (através da válvula deslizante) até o fim do curso de descida. E assim sucessivamente.

No caso da bomba em estudo, no entanto, será utilizado o sistema sem válvulas ao invés das válvulas de retenção simples utilizadas no cavalo mecânico. Isto será justificado a seguir.

1.2 Princípio de Funcionamento

A bomba piezelétrica de diafragma em estudo consiste numa câmara cilíndrica, com um fundo rígido e outro com um atuador piezelétrico. Ambos os lados possuem bocais no seu centro, para a passagem de fluido, e ambos com o mesmo sentido (para cima, ou para baixo). Como dito anteriormente, ela tem seu funcionamento baseado no cavalo mecânico. Realizando a tarefa do pistão, há o atuador piezelétrico, e das válvulas há os bocal/difusores. Os atuadores fazem uma membrana de latão (diafragma) se deformar para cima e para baixo (como o pistão do cavalo mecânico), de forma que o volume da câmara seja alterado e haja, conseqüentemente um deslocamento de fluido.

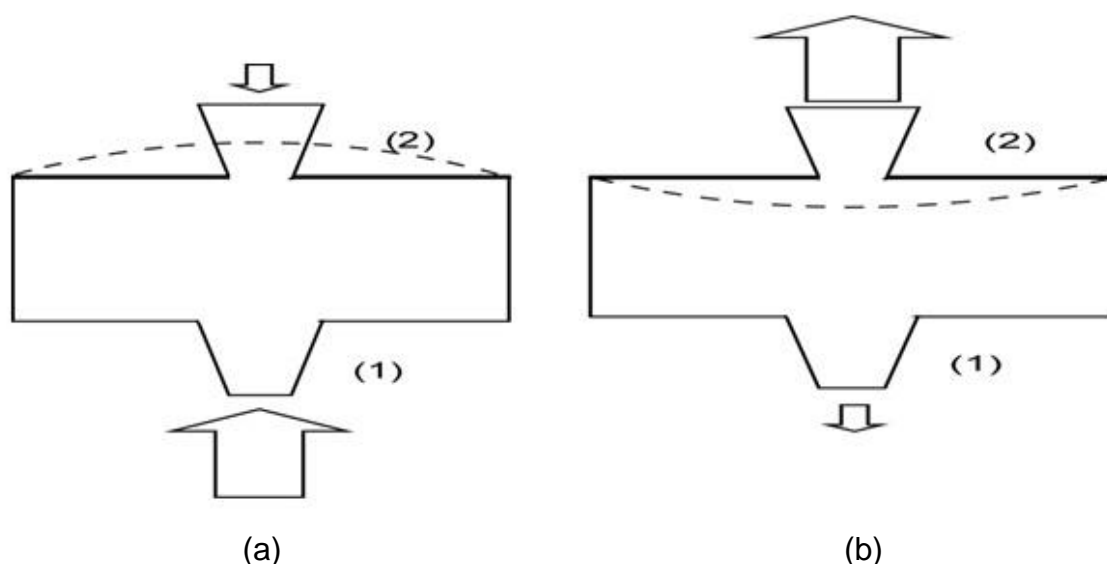


Figura 1.11: Etapas de sucção e descarga do fluido.

Na fase de sucção, Figura 1.11 (a), a câmara se expande e a entrada (1) produz uma pequena resistência ao fluxo de entrada, a saída torna-se uma grande resistência à entrada de fluido, embora não a impeça por completo. Na fase de descarga, Figura 1.11 (b), a câmara se contrai e o fluido tende a sair por ambos os

canais, mas a entrada gera uma grande resistência à saída de fluido e a saída representa apenas uma pequena restrição à saída de fluido. Desta forma, ambos os canais (entrada e saída) permitem fluxo para ambos os sentidos, mas preferencialmente para um (o sentido do fluxo desejado da bomba), gerando um fluxo de fluido no sentido desejado.

1.3 Justificativa

Muitos estudos de bombas piezelétricas de fluxo têm sido feitos. Mas ainda há muito potencial de novas descobertas.

Existe ainda um mercado potencial grande para refrigeração de equipamentos eletrônicos e um real crescimento do mercado de dosagem de medicamentos, que é bilionário (LANGER, 1998). Favorecendo os estudos na área de bombas piezelétricas de precisão.

As simulações computacionais são de grande importância, uma vez que nos permitem obter resultados que analiticamente seriam inviáveis. Elas são essenciais para que sejam feitas as análises de sensibilidade, evitando que seja necessária a construção de muitos protótipos e economizando tempo. Embora elas não substituam os protótipos, podem servir de guia para definir os parâmetros dos mesmos.

Este trabalho realiza ainda o estudo de uma configuração até agora não utilizada em bombas piezelétricas, o sistema do cavalo mecânico, que é utilizado para a extração de petróleo em terra.

1.4 Objetivos

Neste trabalho deseja-se estudar a viabilidade de uma bomba de fluxo piezelétrica de diafragma sem válvula, baseada no princípio do cavalo mecânico utilizando-se de simulações computacionais, construção e caracterização de protótipos e posterior validação.

Para tanto, foram traçados objetivos intermediários:

- Estudar o princípio de funcionamento de um cavalo mecânico;
- Estudar o princípio de funcionamento de uma bomba piezelétrica de diafragma utilizando a configuração acima citada;
- Realizar simulações utilizando o Método dos Elementos Finitos para uma análise de sensibilidade da bomba;

- Construção de protótipos e realização de testes experimentais;
- Validação das análises de sensibilidade através da comparação com os testes.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Uma vez entendido o princípio de funcionamento da bomba como um todo, será introduzido o princípio de funcionamento de cada parte mais detalhadamente, e então serão explicados os estudos executados neste projeto.

2.1 Bocal/Difusor

O bocal/difusor é um canal que, devido ao seu formato gera um sentido preferencial de fluxo. Quando a pressão do fluido tenta gerar um fluxo no sentido A→B o canal age como um bocal, com uma pequena queda de pressão e criando uma pequena resistência ao fluxo. Já quando a pressão está no sentido contrário (B→A), o canal funciona como um difusor e gera uma grande queda de pressão e consequente resistência ao movimento do fluido. Desta forma, num ciclo completo de bombeamento há uma vazão no sentido A→B.

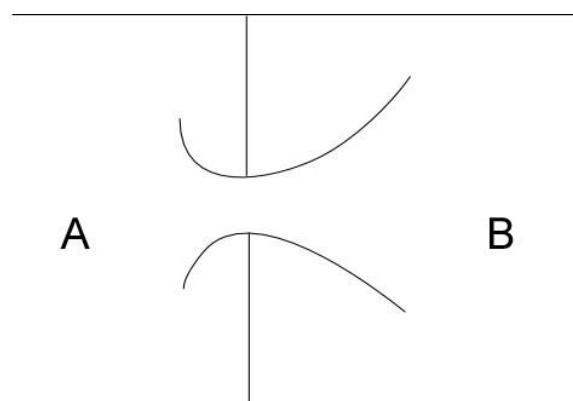


Figura 2.1: Esquema de um bocal/difusor.

A queda de pressão no bocal e difusor é respectivamente (STEMME e STEMME, 1993):

$$\Delta P_b = \frac{\rho v_b^2}{2} \xi_b \quad (2.1)$$

e

$$\Delta P_d = \frac{\rho v_d^2}{2} \xi_d \quad (2.2)$$

onde:

ρ = densidade do fluido;

v_b = velocidade do fluido na parte mais estreita do bocal;

v_d = velocidade do fluido na parte mais estreita do difusor;

ξ_b = coeficiente de queda de carga no bocal;

ξ_d = coeficiente de queda de carga no difusor;

ξ_d e ξ_b dependem da relação entre os diâmetros $D1/D0$ (Figura 2.3), do ângulo α , do formato da entrada e saída e do número de Reynolds (STEMME e STEMME, 1993).

Portanto, para que tenhamos efetivamente um sentido preferencial para o fluxo de fluido, devemos ter $\xi_b > \xi_d$. Sendo que para maior eficiência do ciclo de bombeamento, esta diferença deverá ser a maior possível. No entanto, é importante considerar as quedas de pressão provocadas por ξ_b alto.

Para geometria como a esquematizada a seguir temos:

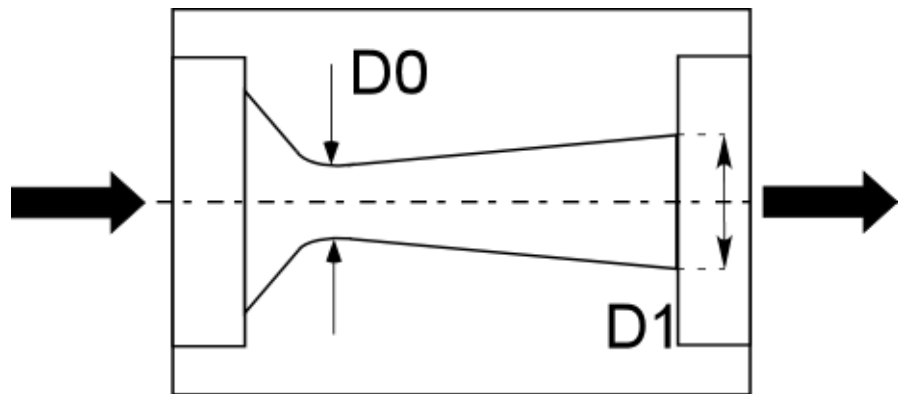


Figura 2.2: Bocal/Difusor comum.

Para regime estacionário, $0,2 < \xi_d < 1$ e $\xi_b = 1$ (STEMME e STEMME, 1993).

2.2 Cerâmicas Piezelétricas

As cerâmicas piezelétricas são materiais que se deformam quando aplicadas a um campo elétrico. Isso ocorre, pois em sua estrutura o centro de simetria das cargas elétricas positivas não coincide com o centro de simetria das cargas negativas, dando origem a um dipolo elétrico. Assim, um campo elétrico gera uma deformação mecânica no material. As cerâmicas utilizadas neste trabalho são do tipo PZT (titano-zirconato de chumbo). Estas cerâmicas possuem relação linear do campo elétrico com a deformação, tornando-a facilmente regulável.

As equações que caracterizam as cerâmicas piezelétricas são:

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

$$\mathbf{D} = \boldsymbol{\epsilon}^S \mathbf{E} + \mathbf{e} \mathbf{S}$$

onde:

\mathbf{T} = tensor de tensão mecânica;

\mathbf{D} = vetor deslocamento elétrico;

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

\mathbf{S} = tensor de deformação mecânica;
 \mathbf{e} = tensor de coeficientes piezelétricos de tensão mecânica;
 $\boldsymbol{\varepsilon}^S$ = tensor dielétrico medido com deformação constante;
 \mathbf{E} = vetor campo elétrico.
 e são dados por IKEDA (1996).

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^S = \begin{bmatrix} \varepsilon_{D_{11}} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{D_{11}} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{D_{33}} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{c}^E = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$S_{jk} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_j} \right) \quad (2.6)$$

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

onde ϕ é o potencial elétrico

As cerâmicas piezelétricas são também afetadas pela temperatura (BROUNS, 1957). Quando submetidas a altas temperaturas elas perdem sensibilidade permanentemente. Esse efeito é desprezível para temperaturas inferiores a 50°C, moderado entre 50° e 80°C e aumentam continuamente até 105°C (temperatura correspondente à total despolarização da cerâmica). Estes dados são referentes à BaTiO₃, mas podem ser extrapolados/aproveitados qualitativamente para o nosso estudo, onde usamos o PZT-5A.

2.3 Atuadores Piezelétricos

O atuador da bomba é constituído por um disco cerâmico piezelétrico e um disco de latão, um colado ao outro. Quando se aplica uma tensão sobre o conjunto,

como mostra a figura 2.5, um campo elétrico é gerado perpendicularmente ao atuador e a cerâmica se deforma. Então, por um princípio semelhante ao das placas bi-metálicas no processo de dilatação térmica, o atuador se deforma, tornando-se côncavo ou convexo (dependendo da polaridade da tensão).

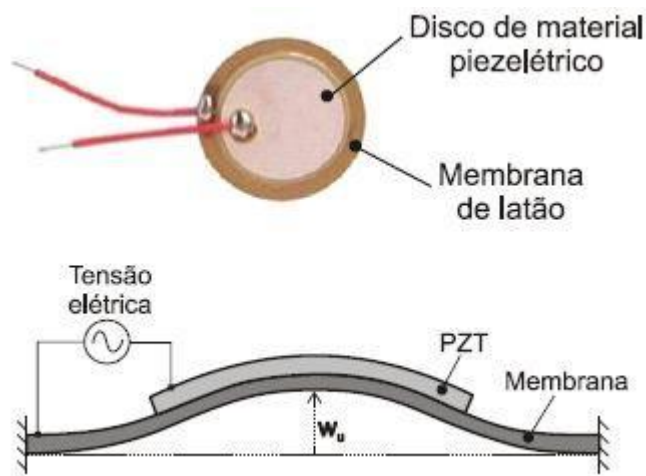


Figura 2.3: Atuador Piezelétrico.

Quando é aplicado um potencial elétrico maior na membrana que na cerâmica, esta se expande, gerando uma tensão de cisalhamento na parede de contato entre as partes que força a deformação do atuador para cima (ou para baixo, dependendo da polarização da cerâmica). Já se a tensão aplicada tiver o sentido oposto, o mesmo ocorrerá com a deformação. Desta forma, aplicando-se uma tensão alternada teremos um atuador que altera o volume da câmara. É importante lembrar que a frequência da tensão aplicada será a mesma frequência de vibração natural do atuador.

2.4 Método dos Elementos Finitos Piezelétrico

Para que possamos obter os modos de vibrar, frequências de ressonância e anti-ressonância e respostas do equipamento à excitações harmônicas são utilizadas as análises modais e harmônicas. Para isso, será utilizado o Método dos Elementos Finitos. Este método consiste em dividir o objeto em estudo em elementos menores (cada um com alguns nós) e, dadas as equações e parâmetros que regem o estudo, achar uma solução aproximada. Esta aproximação é melhor quanto maior for o número de elementos.

A formulação do MEF do material piezelétrico envolve:

U = Deslocamento do nó

Φ = Potencial elétrico do nó

\mathbf{F} = Esforços mecânicos

\mathbf{Q} = Cargas elétricas

Assim, temos o equacionamento, dado por (LERCH, 1990):

$$[\mathbf{M}_{uu}]\{\ddot{\mathbf{U}}\} + [\mathbf{K}_{uu}]\{\mathbf{U}\} + [\mathbf{K}_{u\phi}]\{\Phi\} = \{\mathbf{F}\} \quad (2.8)$$

$$[\mathbf{K}_{u\phi}]^T \{\mathbf{U}\} + [\mathbf{K}_{\phi\phi}]\{\Phi\} = \{\mathbf{Q}\} \quad (2.9)$$

Essa expressão pode, também, ser expressa na forma matricial:

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

onde, para cada elemento e temos:

Matriz de rigidez mecânica:

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

Matriz de acoplamento piezelétrico:

$$[\mathbf{K}_{u\phi}]_e = \iiint_{\Omega_e} [\mathbf{B}_u]^T [\mathbf{e}] [\mathbf{B}_\phi] dV_e \quad (2.12)$$

Matriz de rigidez elétrica:

$$[\mathbf{K}_{\phi\phi}]_e = \iiint_{\Omega_e} [\mathbf{B}_\phi]^T [\boldsymbol{\varepsilon}] [\mathbf{B}_\phi] dV_e \quad (2.13)$$

Matriz de massa:

$$[\mathbf{M}_{uu}]_e = \rho \iiint_{\Omega_e} [\mathbf{N}_u]^T [\mathbf{N}_u] dV_e \quad (2.14)$$

Para este estudo estamos desconsiderando os efeitos de amortecimento.

2.4.1 Análise Modal

O material piezelétrico possui duas frequências de destaque: ressonância e anti-ressonância. Na frequência de ressonância a impedância do atuador é a mínima que se pode obter, e tem-se, portanto, os máximos valores de corrente e potência. Já na frequência de anti-ressonância (um pouco mais alta que a de ressonância) a impedância do atuador é máxima e a corrente e a potência diminuem.

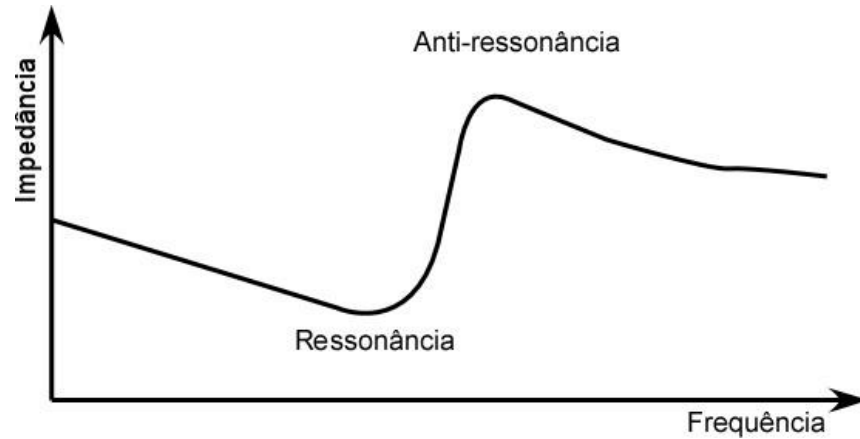


Figura 2.4: Frequências de ressonância e anti-ressonância.

Para que possamos obter estes valores, assim como os modos de vibrar do atuador será feita a análise modal do mesmo. Na análise modal utiliza-se $\mathbf{F} = 0$, desta forma, a equação 2.11 fica:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{uu} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{U}} \\ \ddot{\Phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{uu} & \mathbf{K}_{u\phi} \\ \mathbf{K}_{u\phi}^T & \mathbf{K}_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U} \\ \Phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \mathbf{Q} \end{Bmatrix} \quad (2.15)$$

Para obter a frequência de ressonância devemos curto-circuitar os eletrodos, ou seja, aplicar como condição de contorno o mesmo potencial (zero, neste caso, ou $\Phi = 0$) nos dois eletrodos (Figura 2.5 a). Já para a frequência de anti-ressonância basta impor $\mathbf{Q} = \mathbf{0}$ (Figura 2.5 b). (VINHAIS, 2002)



Figura 2.5 - Potencial elétrico em cerâmicas piezelétricas para obtenção de: (a) frequências de ressonância e (b) anti-ressonância.

Resolvendo o problema de autovalor e auto-vetor são obtidos vários valores, deve-se então, pegar os menores valores de autovalor (estes serão as frequências de ressonância e anti-ressonância, respectivamente) e os auto-vetores correspondentes (modos de vibrar). Deve-se levar em conta que a análise não diferencia os modos piezelétricos dos mecânicos (que não nos interessam para este estudo). Eles são identificados por serem autovalores iguais para as duas condições de contorno citadas acima, o que significa que são independentes das condições de contorno elétricas, ou seja, são modos de vibrar puramente mecânicos.

2.4.2 Análise Harmônica

Como o atuador será excitado por uma tensão senoidal, devemos realizar a análise harmônica para saber como é a resposta da estrutura em relação a forças, deslocamentos e tensões e cargas elétricas. Eles podem ser escritos, respectivamente como se segue:

$$\{\mathbf{F}(t)\} = \{\mathbf{F}\}e^{j\omega t} \quad (2.16)$$

$$\{\mathbf{Q}(t)\} = \{\mathbf{Q}\}e^{j\omega t} \quad (2.17)$$

$$\{\mathbf{U}(t)\} = \{\mathbf{U}\}e^{j\omega t} \quad (2.18)$$

$$\{\Phi(t)\} = \{\Phi\}e^{j\omega t} \quad (2.19)$$

onde ω é a frequência de excitação

Assim, pode-se obter a curva de impedância elétrica Z através de:

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{V}{i\omega Q} \quad (2.20)$$

onde:

V = diferença de potencial elétrico

I = corrente elétrica

ω = frequência de excitação

Q = carga elétrica

2.5 Método dos Volumes Finitos para Simulação de Escoamento de Fluido

Para o estudo do escoamento de fluido devemos levar em conta duas equações: conservação da massa e Navier-Stokes. Considerando que utilizaremos um fluido incompressível, temos a equação de conservação de massa:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (2.21)$$

ou, para um plano ortogonal (x, y, z) :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.22)$$

onde u, v e w são as componentes de velocidade de um ponto fluido nas direções x, y e z , respectivamente. É importante notar que esta equação vale tanto para escoamentos em regime permanente quanto em regime transitório, uma vez que teremos, neste estudo, este último caso.

3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

3.1 Metodologia do estudo computacional

Para fazer um estudo da bomba deve-se primeiro saber a faixa de operação da mesma, ou seja, a banda de frequência em que ela vai trabalhar. Para isso são feitas análises modal e harmônica do atuador na água utilizando o programa ANSYS. A análise modal fornece a frequência e o modo de vibrar. A partir desta frequência é feita uma análise harmônica em torno da mesma e são obtidas as curvas de admitância e de deslocamento do atuador

Estes dados são utilizados na análise flúida com o software CFX. A análise flúida compreende estudar as vazão e pressão médias da bomba e buscar uma geometria de válvula que forneça a maior vazão possível.

3.2 Descrição dos elementos utilizados no ANSYS

Para este trabalho tanto nas análises modais, quanto nas análises de sensibilidade acústica foram realizadas simulações axissimétricas, dada a geometria do problema. Foram, portanto utilizados elementos que suportam axissimetria: “PLANE223”, “PLANE182” e “FLUID29”.

Para a cerâmica piezelétrica foi utilizado o elemento PLANE223, que é capaz de modelar elementos piezelétricos e possui até 4 graus de liberdade por nó (são utilizados 8 nós), são eles: deslocamento em ‘x’ e ‘y’, tensão aplicada e temperatura (este último não é utilizado).

Para o latão e o alumínio foi utilizado o elemento PLANE182, feito para modelar estruturas sólidas. Ele é mais simples que o PLANE223, possuindo apenas 2 graus de liberdade: deslocamento em ‘x’ e ‘y’. E possui 3 ou 4 nós.

Para modelar a água foi utilizado o elemento FLUID29, feito para modelar líquidos e a interação do fluido com a estrutura. Ele possui 3 graus de liberdade por nó: deslocamento em ‘x’ e ‘y’ e pressão, sendo que os deslocamentos são somente aplicados aos nós na interface.

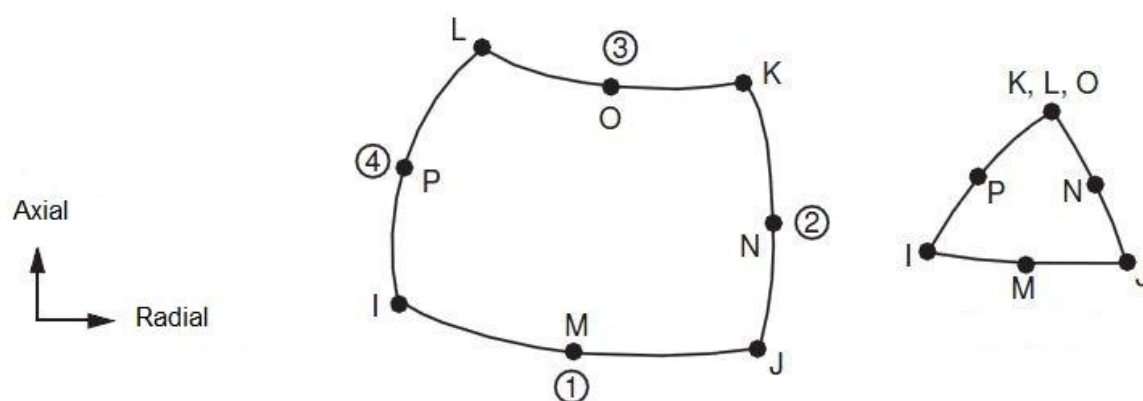


Figura 3.1: Elemento PLANE223 em suas duas configurações – 8 e 6 nós.

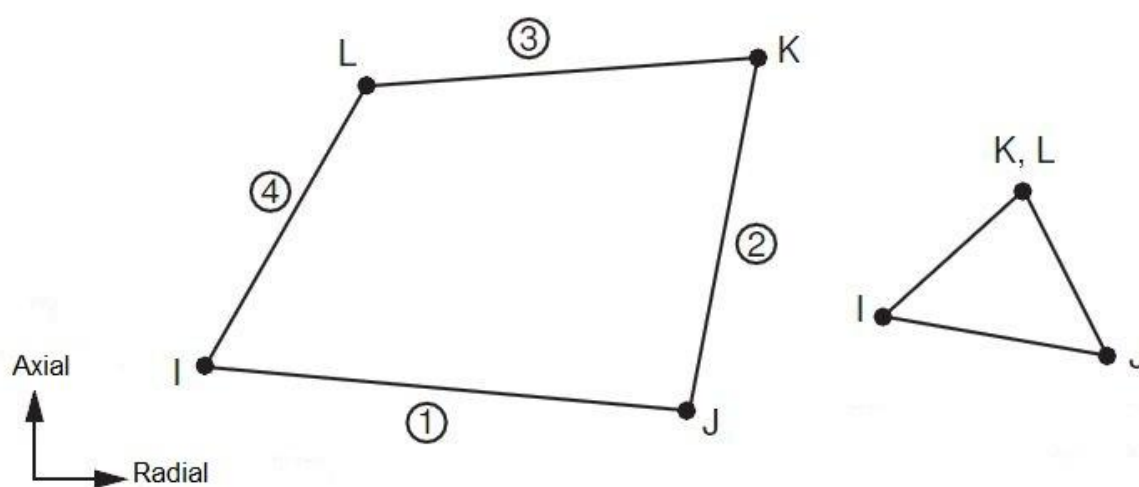


Figura 3.2: Elemento PLANE182 em suas duas configurações – 4 e 3 nós.

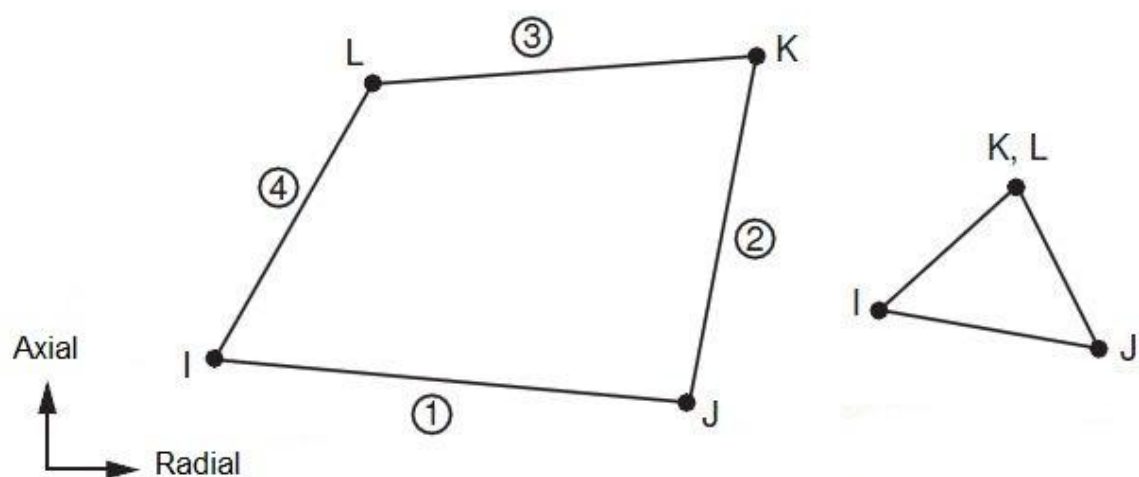


Figura 3.3: Elemento FLUID29 em suas duas configurações – 4 e 3 nós.

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Um protótipo foi fabricado para a validação dos resultados das análises computacionais. Este protótipo é apresentado aqui, assim como são os ensaios realizados.

4.1 Protótipo

O protótipo foi projetado com base na bomba de (CHOI, 2009) e nas simulações computacionais. Foi utilizado o software de CAD Autodesk Inventor Professional. A construção do mesmo visa validar as simulações e verificar na prática a viabilidade da bomba de fluxo.

4.2 Fabricação do protótipo

Embora uma das motivações seja a aplicação na escala micro, protótipo foi feito de forma a facilitar a sua montagem e diminuir custos. Assim, foi dada preferência à utilização de peças existentes no mercado, como bexiga, espigão e perfil de alumínio. As dimensões do protótipo são 100 X 50 X 70 mm. A Figura 4.1 mostra o conjunto do protótipo, a Figura 4.2 mostra a foto e a Figura 4.3 mostra uma vista explodida. Ele consiste em uma base em “U” com espigões nas paredes externas e fechada com paredes laterais de acrílico. Numa parede interna, no lado oposto a um espigão há um bocal cônico, seguido de uma câmara cilíndrica. Logo após vem o atuador piezelétrico e prendendo-o está o cabeçote. O conjunto base, câmara-bocal e cabeçote é preso por parafusos M3 e porcas. O atuador possui um furo no seu centro de Ø1mm, atravessando-o axialmente. Conectado a ele e seguindo o furo é colado um bocal cônico, com geometria apresentada no APÊNDICE D. Finalmente a ligação entre este bocal e o espigão de saída é feita utilizando-se uma bexiga, escolhida devido às suas dimensões serem bem próximas das necessárias e por ser bastante flexível. A Figura 4.4 mostra com mais detalhes este percurso.

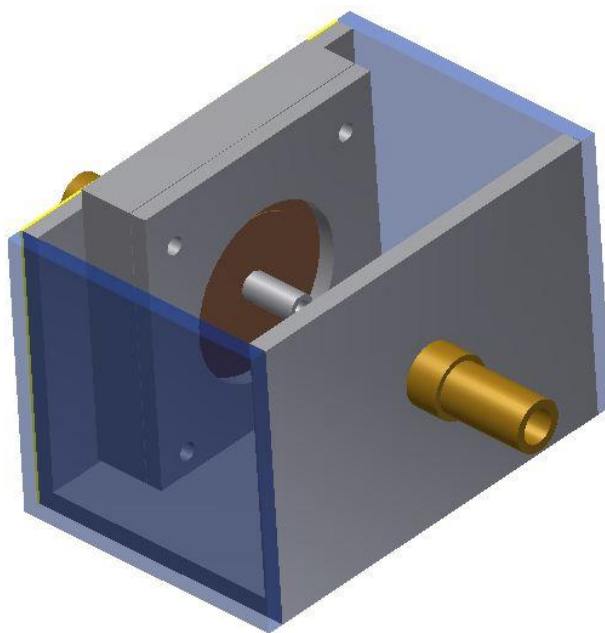


Figura 4.1: Conjunto do Protótipo.

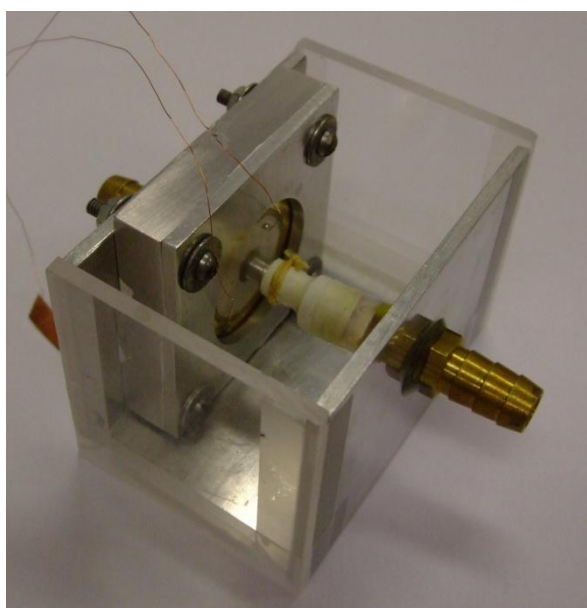


Figura 4.2: Foto do Protótipo.

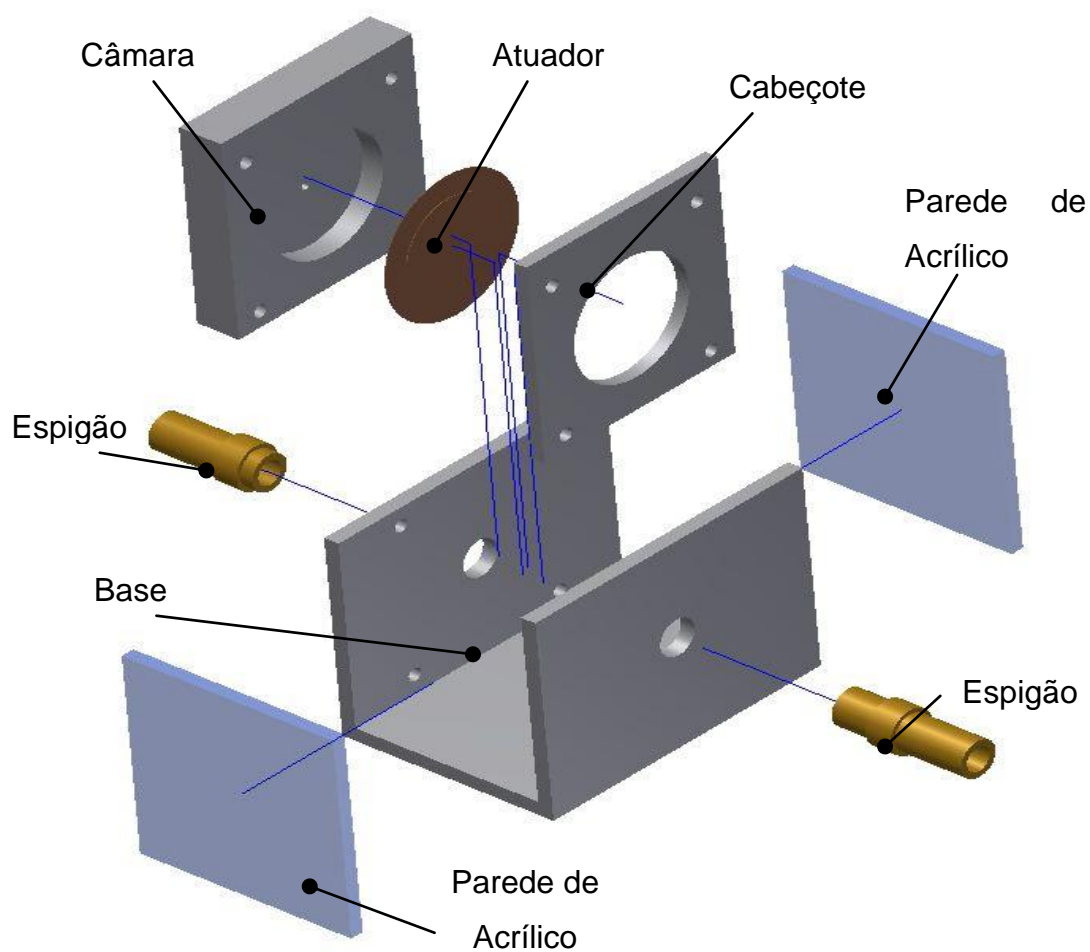


Figura 4.3: Desenho em vista explodida do protótipo.

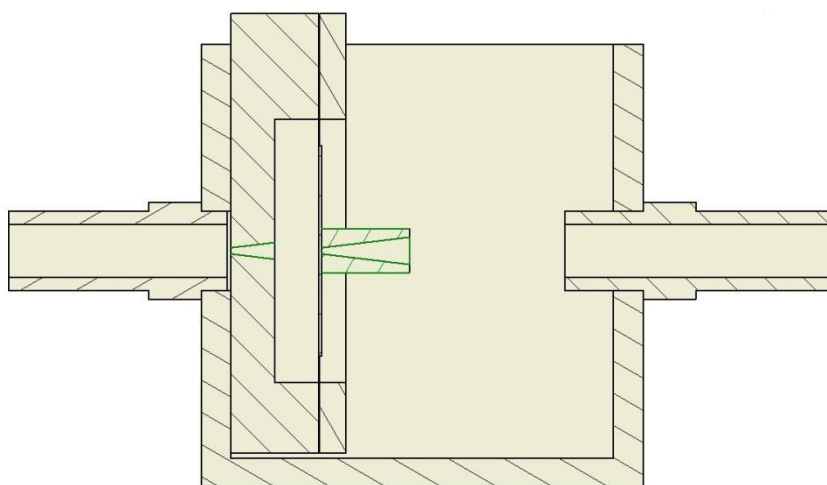


Figura 4.4: Vista em corte lateral a partir do eixo de simetria do protótipo. Bocais em destaque.

Deve-se notar que a bomba utiliza como atuador piezelétrico um “tweeter”, cotado a um real em 2006 (CHOI, 2009). Os espigões são peças prontas, utilizadas originalmente para gás, ele foi adaptado a este projeto. Desta forma diminui-se o tempo de trabalho em oficina e consequentemente o custo.

Para a vedação foi utilizado teflon (fita), devido à sua maleabilidade alta e espessura inferior à do latão.

4.3 Ensaio de Vazão

Um dos fatores a serem validados pelo protótipo é a vazão. Ela é medida através do cálculo da velocidade máxima. Neste método o tempo que a partícula mais rápida do escoamento percorre um duto circular de área e comprimentos conhecidos determina a velocidade máxima no escoamento ($V_{m\acute{a}x}$). A partir desta velocidade obtém-se a velocidade média no duto pela equação 4.1.

$$V_m = \frac{V_{m\acute{a}x}}{2} \quad (4.1)$$

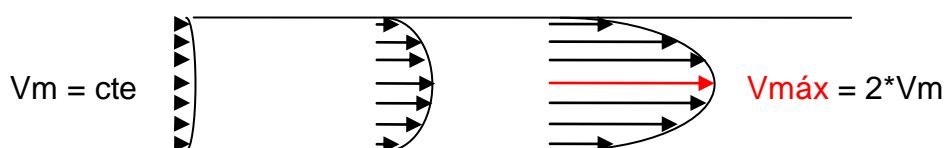


Figura 4.5: Perfil de velocidades num escoamento laminar plenamente desenvolvido

Assim, a vazão sai da equação 4.2.

$$Q = V_m \times A \quad (4.2)$$

onde A é a área da seção transversal do tubo.

Para este ensaio é utilizado um vaso para armazenar o fluido, corante líquido, um tubo e um cronômetro. O tubo é conectado diretamente à saída do protótipo e marcado em duas posições. Inicia-se a contagem de tempo a partir do momento em que o fluido com corante passa a primeira marcação. Quando ele cruza a segunda marcação o cronômetro é parado. A montagem é mostrada na Figura 4.6.

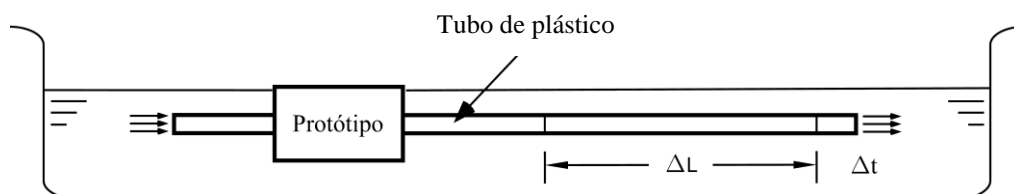


Figura 4.6: Montagem do ensaio de vazão.

Deve-se notar que na primeira marcação o escoamento deve ser plenamente desenvolvido, para que se tenha o perfil apresentado na Figura 4.5. Há, além disso, certa influência sobre a vazão, uma vez que o duto gera perdas de carga. Desta forma, deve-se utilizar um tubo com um diâmetro não muito pequeno. No entanto, ele não pode ser muito grande em relação ao comprimento de entrada, pois não será observado o perfil de escoamento desejado.

4.4 Ensaio de Pressão Estática

A pressão estática é o outro fator a ser validado pelo protótipo. Para este experimento é utilizado um duto em “L”, como ilustrado na Figura 4.7 . Ao se excitar o atuador o fluido irá subir o duto até uma altura “H”, que corresponderá à pressão estática em mmca.

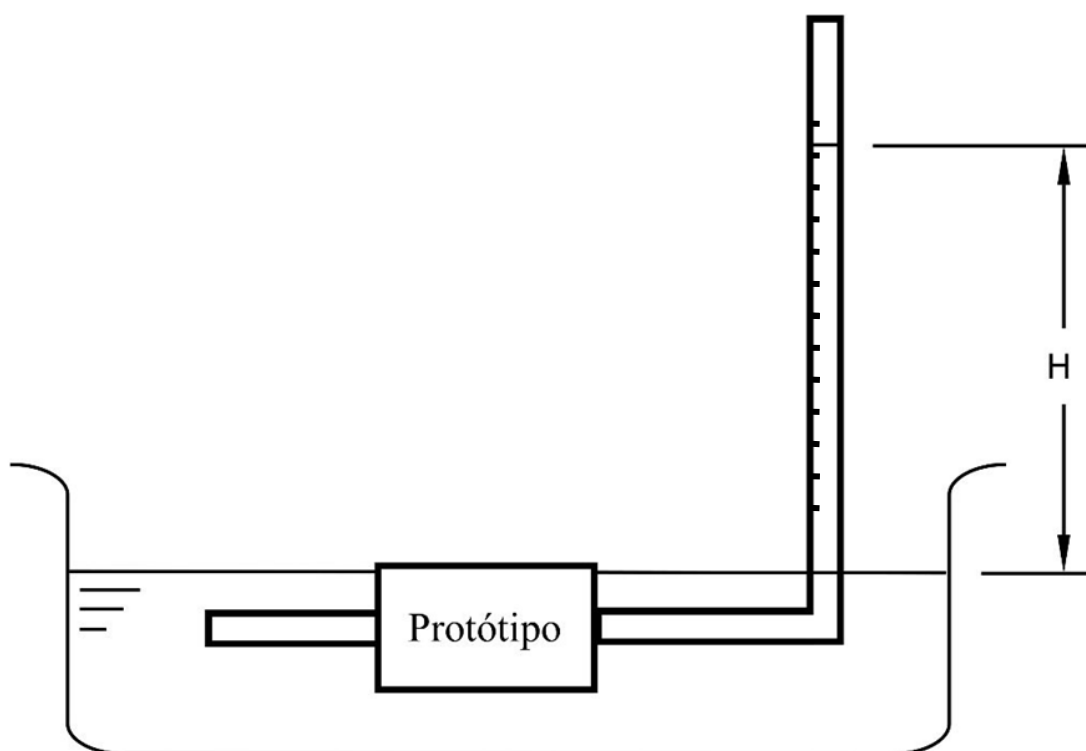


Figura 4.7: Montagem do ensaio de pressão estática

5 RESULTADOS COMPUTACIONAIS

O modelo computacional serve para guiar a construção do protótipo, para que o mesmo seja baseado em algum estudo prévio, e que tenha seu desempenho e operação previstos.

Para as simulações computacionais foram utilizados as propriedades apresentadas na Tabela 5.1

Tabela 5.1: Propriedades dos materiais nos modelos computacionais.

Água	Peso específico	ρ_{H_2O}	998	Kg/m^3
	Viscosidade dinâmica	μ	0,001003	$Pa.s$
	Velocidade de propagação do som	v_s	1500	m/s
Latão	Coeficiente de Poisson	ν	0,34	
	Módulo de elasticidade	E	97	GPa
	Peso específico	$\rho_{latão}$	8530	Kg/m^3
PZT-5A	Constantes dielétricas	$\epsilon_{11}^S/\epsilon_0$	916	
		$\epsilon_{33}^S/\epsilon_0$	830	
	Constantes elásticas	c_{11}^E	12,10	$\times 10^{10} N.m^{-2}$
		c_{12}^E	7,54	$\times 10^{10} N.m^{-2}$
		c_{13}^E	7,52	$\times 10^{10} N.m^{-2}$
		c_{33}^E	11,10	$\times 10^{10} N.m^{-2}$
		c_{44}^E	2,11	$\times 10^{10} N.m^{-2}$
		e_{31}	-5,35	$C.m^{-2}$
		e_{33}	15,8	$C.m^{-2}$
	Constantes piezelétricas	e_{15}	12,3	$C.m^{-2}$
		Peso específico	ρ_{PZT}	7750
				Kg/m^3

5.1 Atuador no ar

Para a simulação do atuador no ar pôde-se observar os modos de vibrar e frequências de ressonância e anti-ressonância. Para se obter os modos de vibrar foi realizada uma análise modal. O modelo com as condições de contorno está apresentado na Figura 5.1. Os valores dos parâmetros estão definidos na Tabela 5.2.

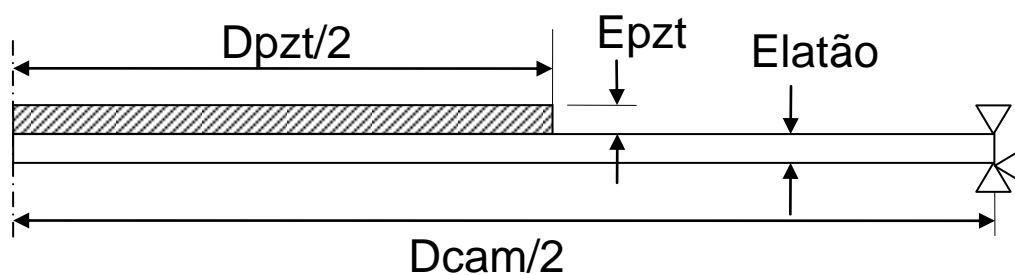
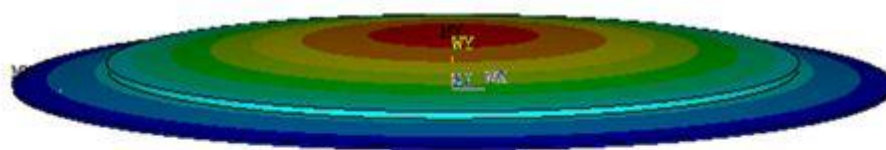


Figura 5.1: Modelo do atuador no ar.

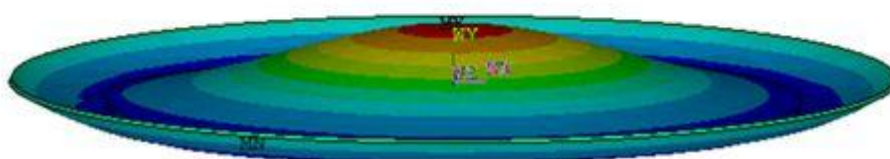
Tabela 5.2: Parâmetros Geométricos do modelo do atuador

Dpzt	23,5mm
Dcam	30mm
Epzt	0,25mm
Elatão	0,13mm

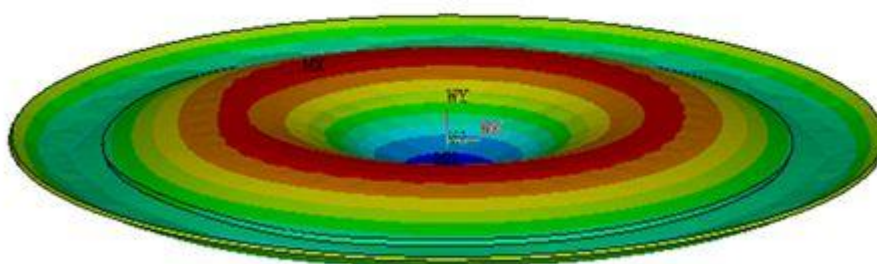
Para obter as frequências, curvas de admitância e amplitude foram utilizadas análises harmônicas. O amortecimento utilizado foi de 0,00000476. Três modos são apresentados abaixo:



(a)



(b)



(c)

Figura 5.2: Os Três primeiros modos de vibrar. (a): Primeiro modo, (b): segundo modo, (c): terceiro modo

O modo de vibrar desejado para trabalho é o primeiro, pois este é o único que possui um acompanhamento de fase de deslocamento de todo o atuador, deslocando mais fluido. Os outros modos, como se pode ver fazem uma compensação de deslocamentos, de forma que o volume total deslocado é menor.

As curvas de impedância e amplitude de deslocamento do atuador foram obtidas com o auxílio do programa MATLAB (listagem no APENDICE C). Os gráficos podem ser vistos nas figuras Figura 5.3.(a) e (b).

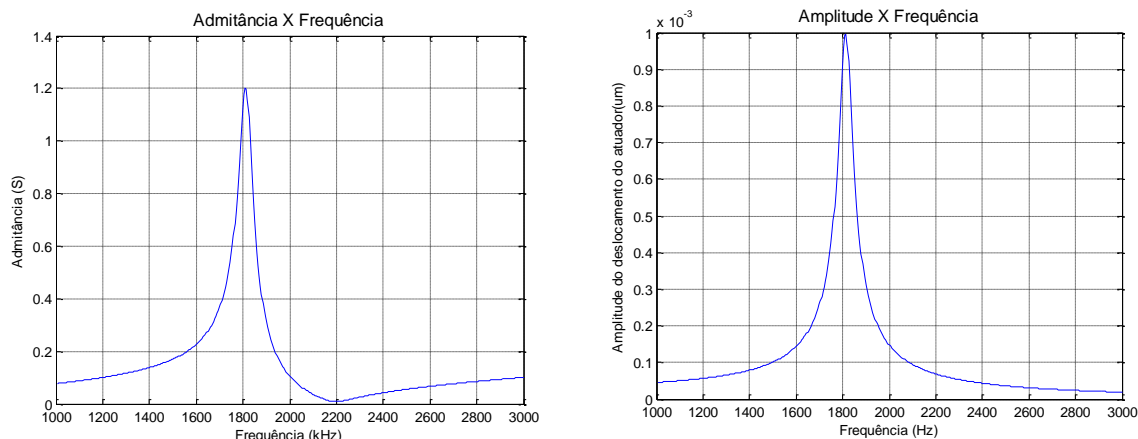


Figura 5.3: Curvas de admitância e amplitude do modelo do atuador no ar simples.

Os valores obtidos foram:

Frequência de ressonância = 1815Hz

Frequência de anti-ressonância = 2195Hz

Amplitude de movimento na frequência de ressonância = 994,7μm

Assim, confirma-se que para a frequência de ressonância tem-se a maior amplitude de movimento.

5.1.1 Atuador no Ar com furo

Por motivo de comparação foi feita a análise harmônica do modelo do atuador no ar, com um furo no centro e acoplamento de posição vertical de uma área anular da superfície superior do PZT. O modelo é esquematizado na Figura 5.4. O modelo do ANSYS é mostrado com as condições de contorno na .

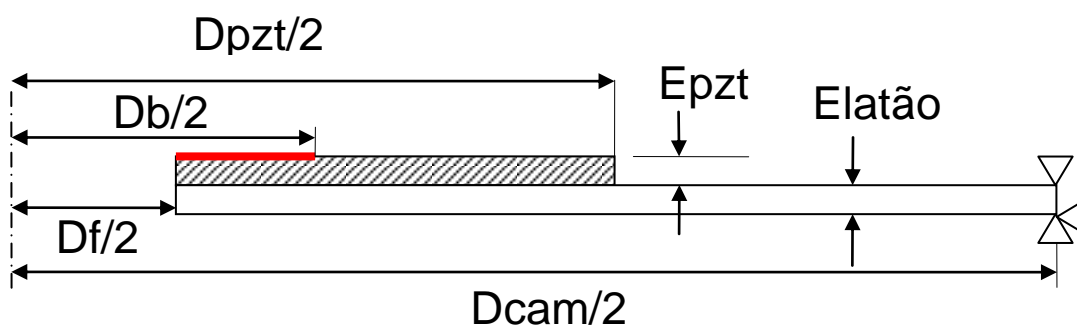


Figura 5.4: Modelo do Atuador no ar com furo no centro e acoplamento de posição vertical (em vermelho).

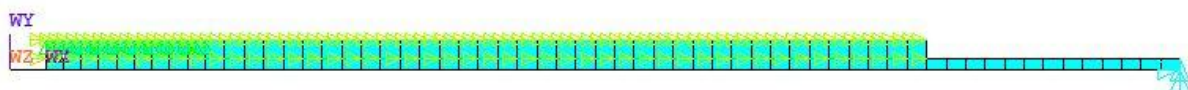


Figura 5.5: Modelo do Atuador no ar com furo no centro e acoplamento de posição vertical com elementos e condições de contorno.

As curvas de admitância e amplitude são mostradas a seguir.

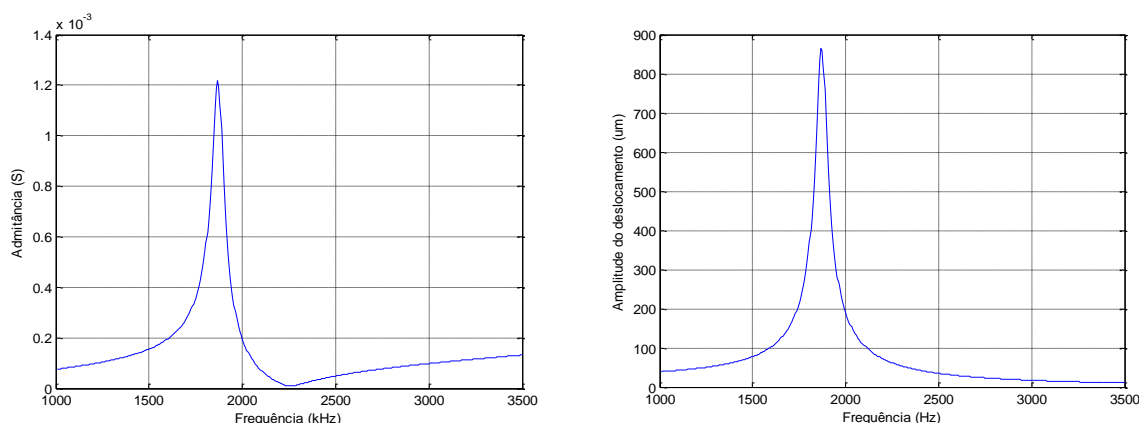


Figura 5.6: Curvas de admitância e amplitude do modelo do atuador no ar com furo.

Os valores obtidos foram:

Frequência de ressonância = 1868,8Hz

Frequência de anti-ressonância = 2256,2Hz

Amplitude de movimento na frequência de ressonância = 864,6μm

As duas curvas acima mostram que o comportamento do atuador no ar quando furado e com acoplamento vertical de uma área anular na parte superior do PZT não varia muito em comparação com o atuador sem alterações.

5.2 Atuador na Água - Análise de Sensibilidade

Nesta fase foi modelado um atuador em meio flúido, onde teria influência da água. São realizadas simulações harmônicas num espectro em torno do primeiro modo de vibrar. Com isso são obtidas, para cada condição dos parâmetros impostos, as frequências de ressonâncias do primeiro modo e a amplitude de deslocamento do atuador correspondente à essa frequência de ressonância. Essas frequências e amplitudes são então plotadas, em cada análise, para mais fácil visualização. Assim, pode-se obter frequências de ressonância mais próximas das de trabalho, sendo que uma dessas frequências (a frequência do primeiro modo piezelétrico) será utilizada nas análises de fluido.

Para esta análise foi modelada uma câmara com água no interior, paredes fixas e o atuador na parede superior. Tubos foram colocados nas duas extremidades da câmara para simular os bocal/difusores. O modelo é mais detalhado na Figura 5.7. A geometria do atuador se mantém a mesma do modelo anterior. Os parâmetros são definidos na Tabela 5.3, porém alguns deles são variados em

função da análise de sensibilidade. A tensão aplicada a estes modelos foi de 320Vpp. Para redução do custo computacional foi utilizada a simetria axial.

Tabela 5.3: Parâmetros Geométricos do Modelo Acústico.

Df	0,9mm
Ebocal	1mm
Cbocal	8mm
Hcam	3mm

As condições de contorno utilizadas são:

- Pressão nula nos furos;
- Engastamento nas paredes das superfícies fixas do fluido com estrutura e na base inferior do latão (Figura 5.7);
- Acoplamento elétrico da superfície superior do PZT;
- Acoplamento elétrico da superfície inferior do PZT;
- Impedância unitária em todo o contorno do material fluido com estrutura;
- Interface fluido-estrutura na superfície entre o latão e a água;
- Restrição do movimento da base superior do latão na direção axial.

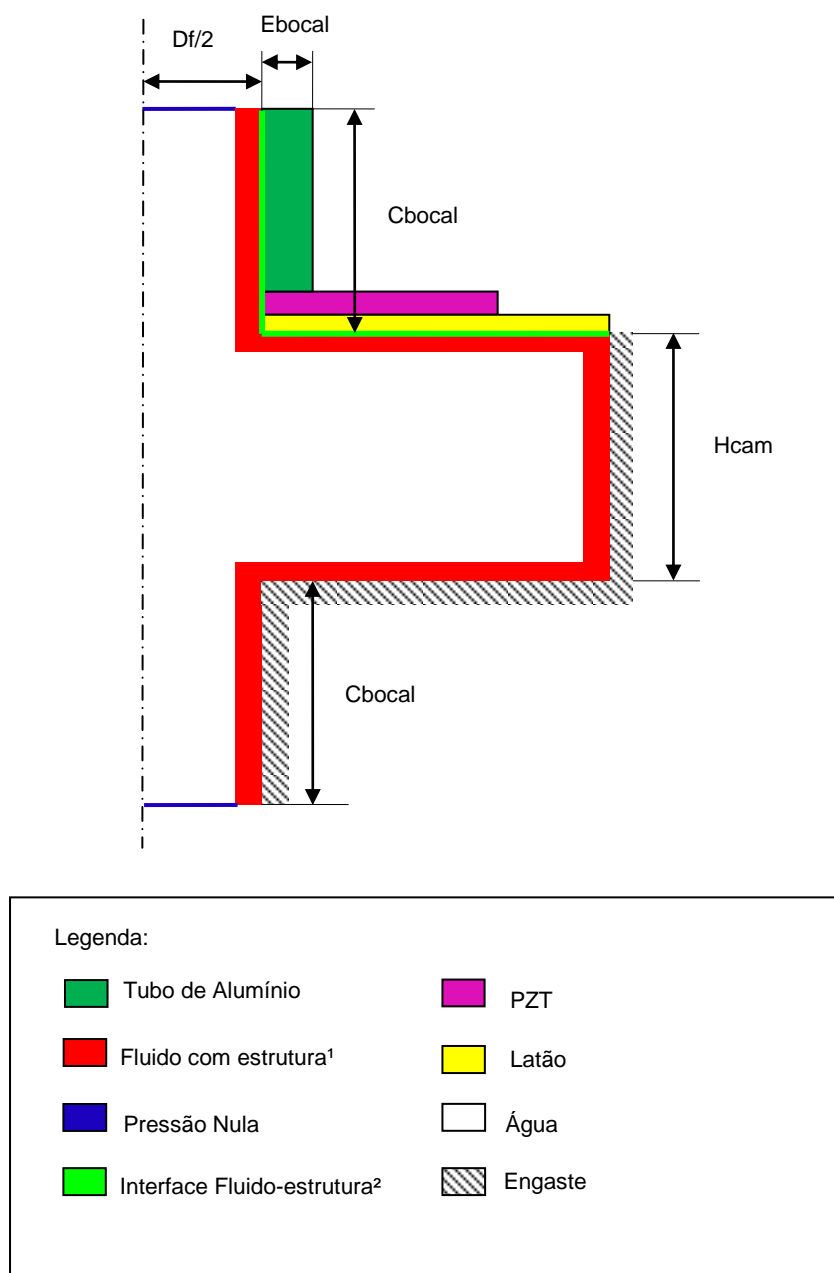


Figura 5.7: Modelo Acústico.

Esta análise busca identificar os parâmetros que influenciam de forma significativa no desempenho da bomba de fluxo. São analisados aqui:

- Comprimento dos bocais;
- Diâmetro da câmara;
- Diâmetro dos bocais;

¹ Elemento FLUID29 com os graus de liberdade de deslocamento

² *Flag* para indicar a interface entre elementos de fluido com estrutura e estrutura modelada, acoplando os deslocamentos. É utilizado para análises acústicas.

- Espessura da parede dos bocais;
- Altura da Câmara.

5.2.1 Comprimento dos Bocais

Nesta seção é analisada a influência de diferentes comprimentos dos bocais no movimento do atuador, e consequentemente, no desempenho da bomba de fluxo. A partir do modelo base, o comprimento do bocal “Cb” é variado de 4 a 20mm, a cada 2mm. As figuras Figura 5.9 e Figura 5.8 apresentam as curvas da frequência de ressonância e da amplitude do deslocamento do atuador e em função do comprimento do bocal.



Figura 5.8: Análise de sensibilidade do atuador em função do Comprimento do Bocal - Frequência de Ressonância.

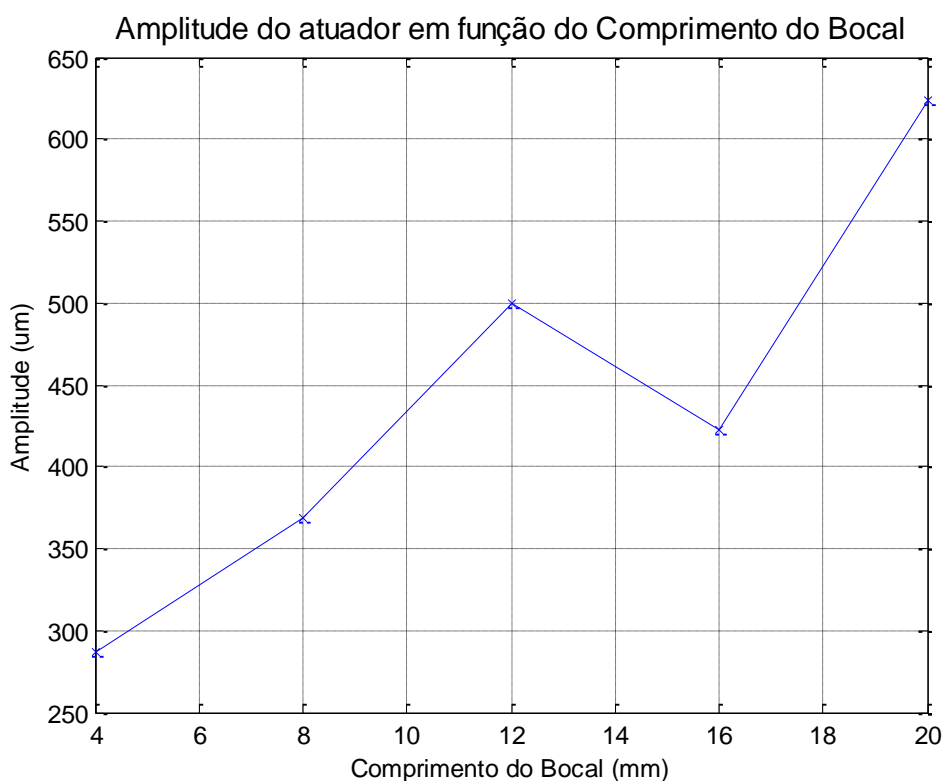


Figura 5.9: Análise de sensibilidade do atuador em função do Comprimento do Bocal - Amplitude de deslocamento do atuador na frequência de ressonância.

Estes dados mostram que o comprimento do bocal pode influenciar significativamente na dinâmica do atuador, no entanto seu efeito no desempenho da bomba de fluxo não é óbvio, uma vez que a amplitude do movimento do atuador aumenta e a frequência de ressonância diminui. Há, além disso, o fator de perda de carga devido ao bocal, que cresce junto com o comprimento do mesmo.

5.2.2 Diâmetro da Câmara

Esta análise de sensibilidade busca identificar a influência do diâmetro da câmara no desempenho do atuador. As condições de contorno aplicadas são as mesmas definidas para o modelo, variando-se apenas “Dcam” de 26mm a 32mm, com incrementos de 1mm a cada passo.

As amplitudes de deslocamento e as frequências de ressonância são apresentadas nas figuras Figura 5.10 e Figura 5.11.

Fica claro que o diâmetro da câmara influencia no desempenho da bomba de fluxo. Uma vez que com o aumento do diâmetro a frequência diminui 60% e a amplitude aumenta 600%, estima-se que esta influência seja positiva.

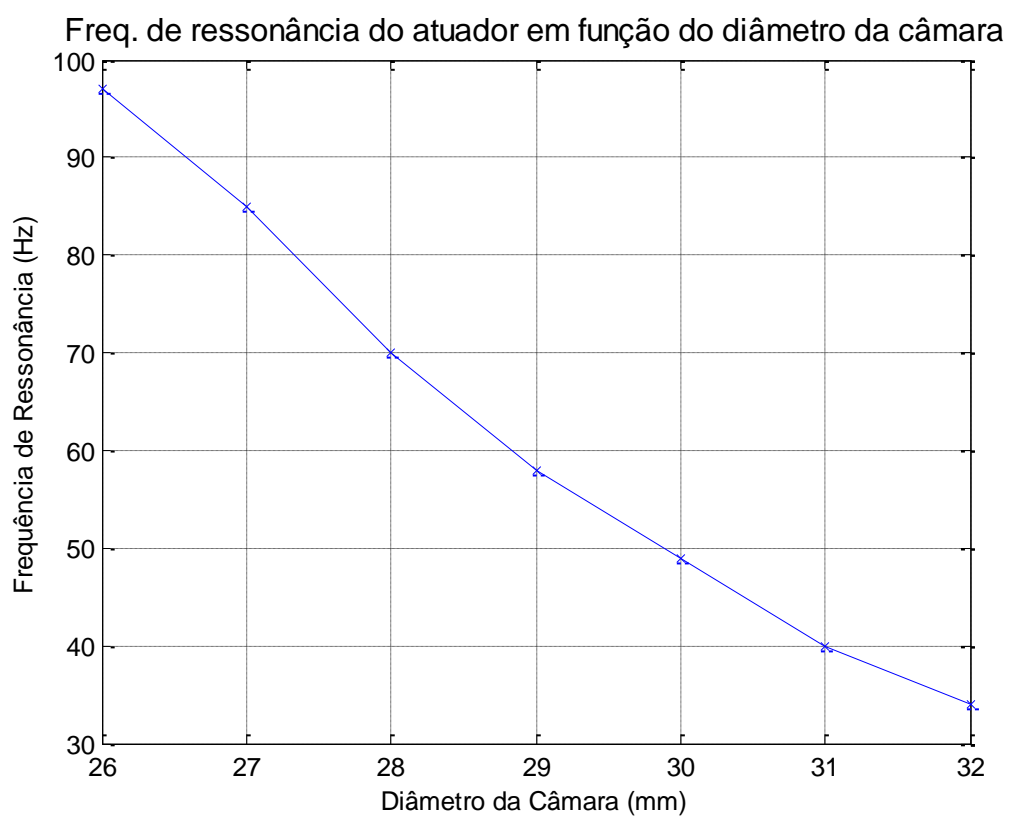


Figura 5.10: Análise de sensibilidade do atuador em função do Diâmetro da Câmara - Frequência de Ressonância.

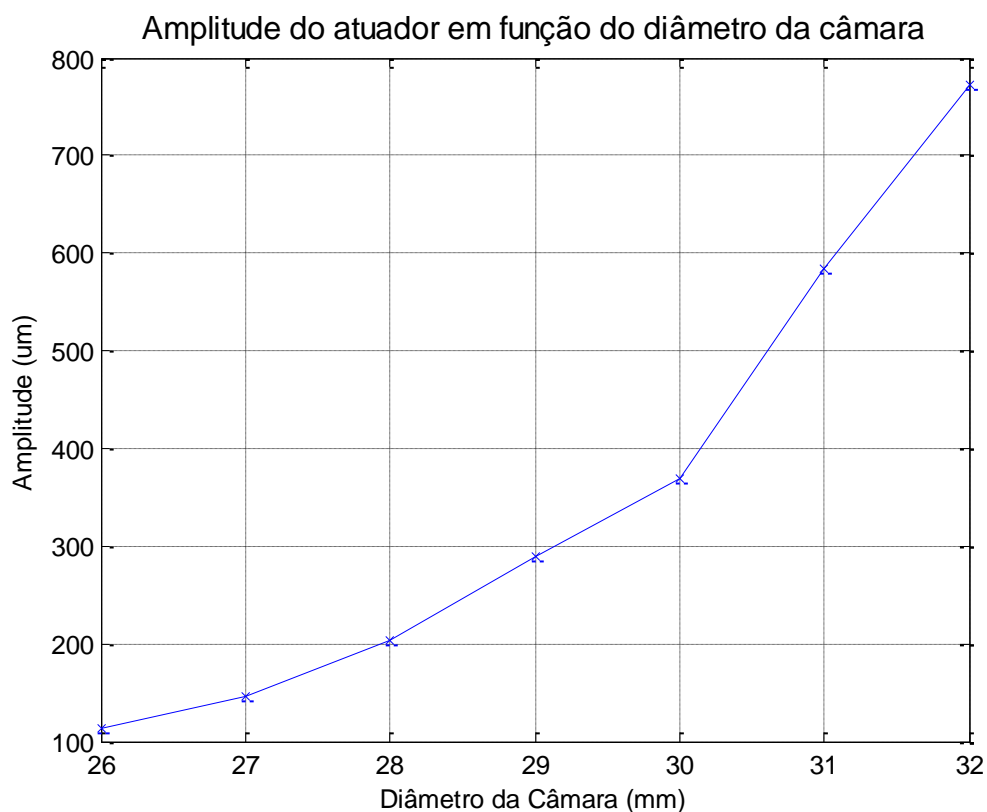


Figura 5.11: Análise de sensibilidade do atuador em função do Diâmetro da Câmara - Amplitude de deslocamento do atuador na frequência de ressonância.

5.2.3 Diâmetro do Bocal

Nesta seção é analisada a influência da relação de diâmetros – ou ângulo de abertura do bocal. A Figura 5.12 apresenta como são definidos os parâmetros geométricos nos bocais. Esta análise é feita aqui variando-se o diâmetro menor “Dmenor” de 0,9 a 1,5mm com incrementos de 0,2mm. O diâmetro maior “Dmaior” é fixo, e vale 1,5mm.

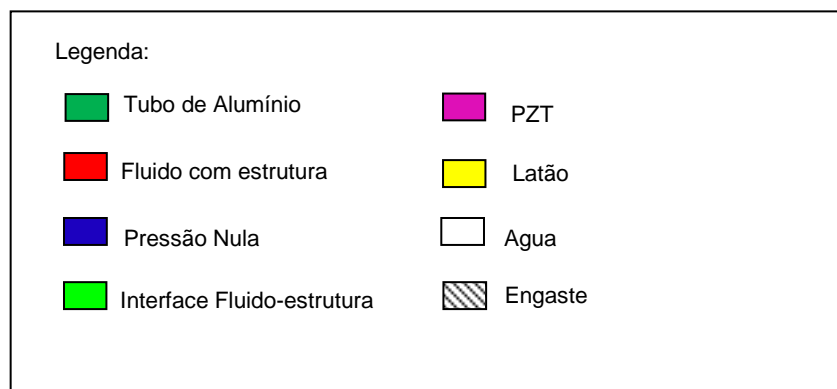
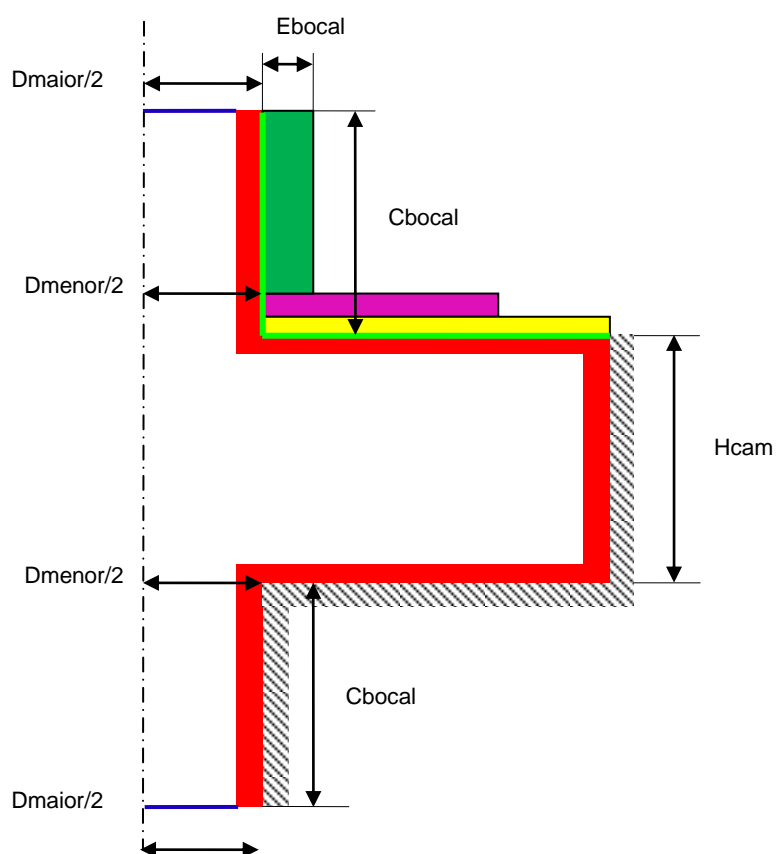


Figura 5.12: Modelo Acústico com Bocal Cônico.

Os resultados são mostrados na Figura 5.13 e na Figura 5.14.

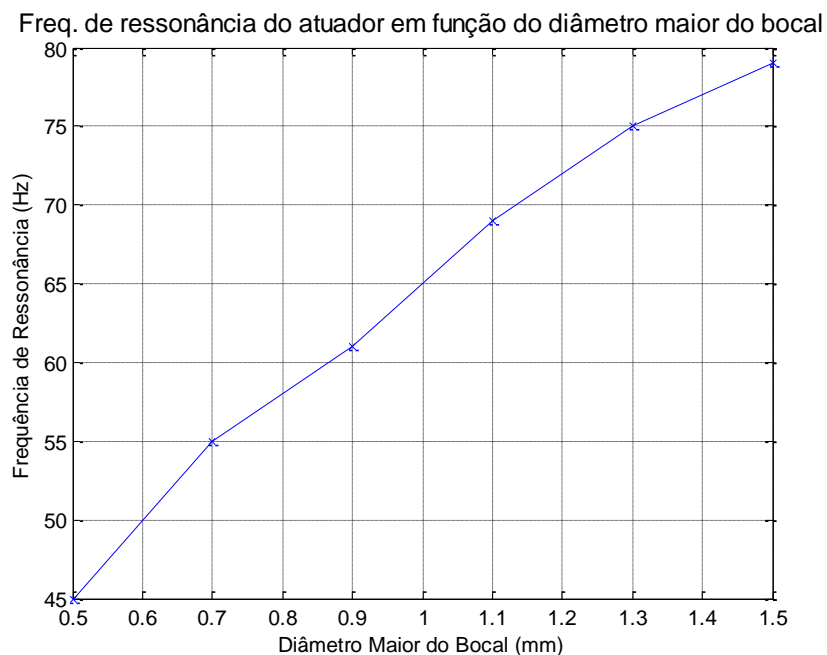


Figura 5.13: Análise de sensibilidade do atuador em função do Diâmetro maior do Bocal – Frequência de Ressonância.

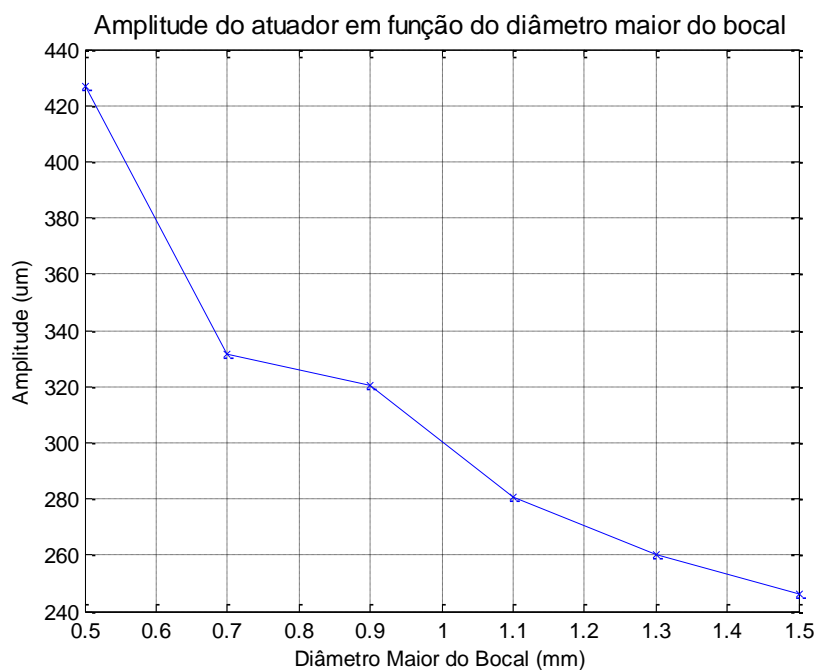


Figura 5.14: Análise de sensibilidade do atuador em função do Diâmetro maior do Bocal - Amplitude de deslocamento do atuador na frequência de ressonância.

Estes resultados não são conclusivos, uma vez que enquanto a frequência de ressonância aumenta com o aumento do diâmetro maior do bocal, a amplitude diminui. Ambos aproximadamente na mesma proporção. Torna-se necessário fazer uma análise fluida em torno deste parâmetro geométrico.

5.2.4 Espessura da Parede do Bocal

Esta análise de sensibilidade estuda a influência da espessura da parede do bocal preso ao atuador. Isso é feito através de análises acústicas baseadas no modelo. As condições de contorno são, portanto as mesmas. Varia-se “Eb” de 0,5mm a 3mm com incrementos de 0,5mm.

As amplitudes de deslocamento e as frequências de ressonância são apresentadas nas figuras Figura 5.16 e Figura 5.15.

Estes resultados mostram uma queda na amplitude de 17,8% contra um aumento na frequência de ressonância de 0,4%. Desta forma pode-se concluir que quanto maior for a espessura do bocal melhor será o desempenho da bomba piezelétrica.

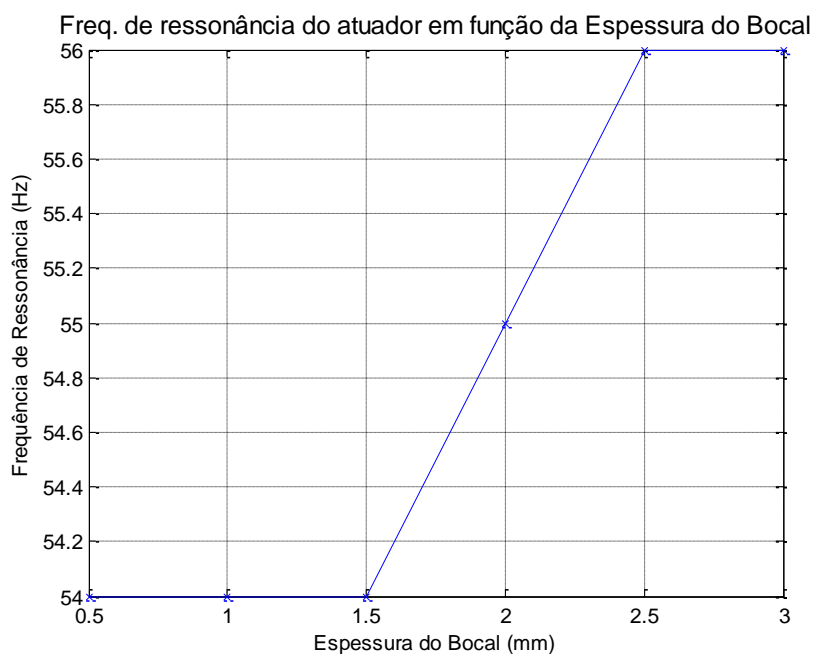


Figura 5.15: Análise de sensibilidade do atuador em função da Espessura do Bocal - Frequência de Ressonância.

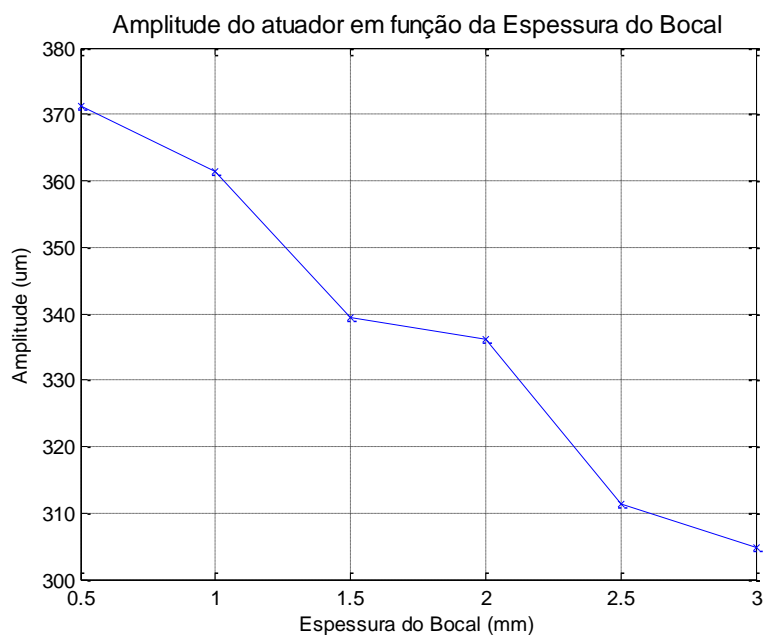


Figura 5.16: Análise de sensibilidade do atuador em função da Espessura do Bocal - Amplitude de deslocamento do atuador.

5.2.5 Altura da Câmara

Nesta seção é estudada a sensibilidade do atuador quanto à altura da câmara. O modelo acústico foi utilizado variando-se “Hcam” em duas etapas: a primeira partindo de 0,4mm a 1,8mm com incrementos de 0,2mm, a segunda foi de 2mm a 5mm com incrementos de 0,5mm. Os resultados são apresentados nas figuras Figura 5.18 e Figura 5.17.

Assim, pode-se concluir que, como a frequência varia muito pouco frente à altura da câmara, a amplitude terá efeito direto sobre o desempenho da bomba de fluxo. A curva da amplitude mostra uma resposta interessante, apresentando uma altura crítica - 1mm - que corresponde à menor amplitude. Nota-se também que a partir de 3mm a altura deixa de se tornar um fator importante.

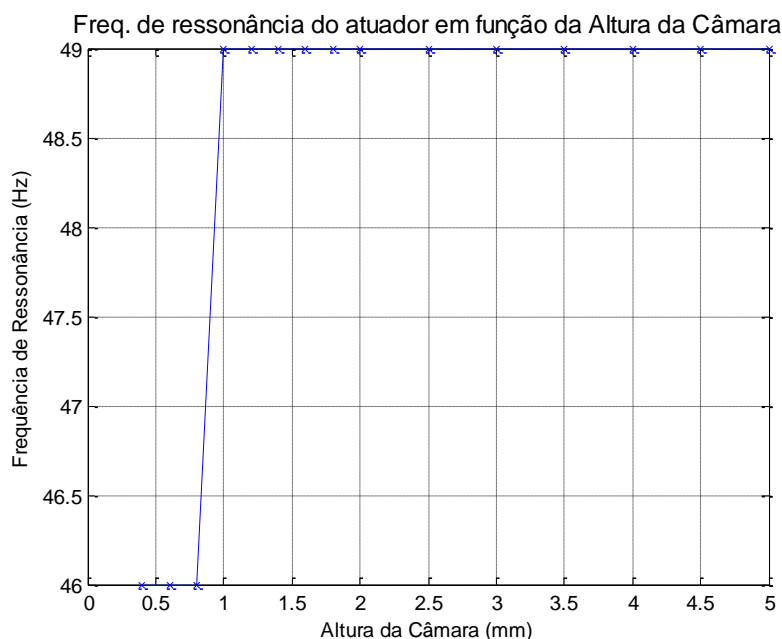


Figura 5.17: Análise de sensibilidade do atuador em função da Altura da Câmara - Frequência de Ressonância.

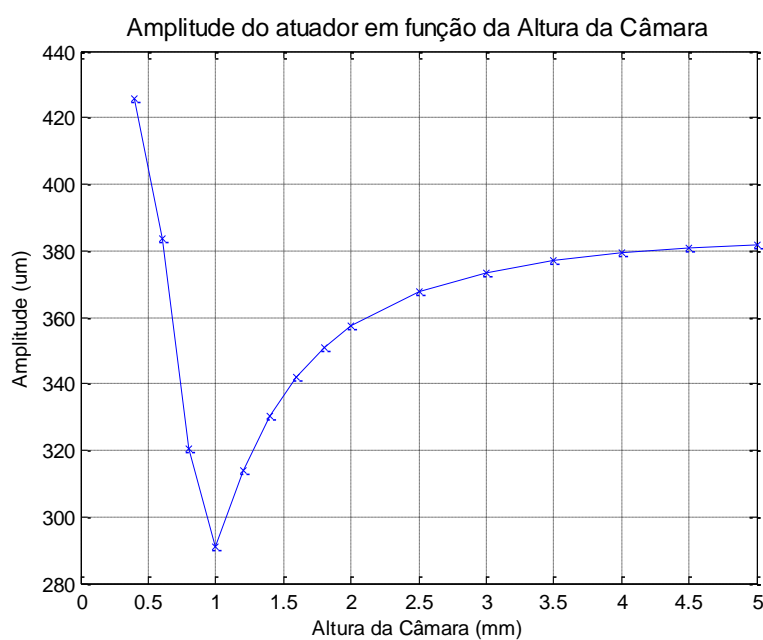


Figura 5.18: Análise de sensibilidade do atuador em função da Altura da Câmara – Amplitude de deslocamento do atuador.

5.3 Análise de Sensibilidade Baseada nas Simulações de Escoamento de Fluido

Esta análise busca identificar a influência de parâmetros geométricos da geometria. Neste caso, são tratados os diâmetros dos bocais, que não puderam ter seu efeito completamente entendido apenas pela análise acústica. Assim, esta análise fluida serve como complemento à acústica. Com isso pode ser construído

um protótipo com uma geometria escolhida de forma a ter seu desempenho conhecido e esperado.

Esta é uma análise transiente, realizada para 150 passos, com 30 passos por período, e com frequência de 50Hz.

O modelo utilizado nestas simulações é apresentado na Figura 5.19 numa vista isométrica. São definidos os contornos “Entrada”, “Saida”, “Atuador”, “Paredes”, “Simetria”, “Bocal” e “Conector”. “Entrada” é definido como o plano com a maior cota em Z, e “Saida” o com menor. “Atuador” é apontado na Figura 5.19. “Bocal” é definido apenas como o bocal em contato com o atuador. Por fim, “Conector” é o plano que conecta o “Bocal” com o tubo de saída.

Os contornos móveis tem seu movimento definido pelas equações 5.1 e 5.2.

$$Amp \times \left(1 - \frac{r^2}{225}\right) \times \sin(\omega t) \quad (5.1)$$

$$Amp \times \sin(\omega t) \quad (5.2)$$

onde:

Amp = diferença de potencial elétrico;

r = posição na coordenada radial;

ω = frequência de excitação;

t = carga elétrica.

Apenas um quarto da estrutura é modelado devido à simetria do problema (representada pelas setas rosa). Assim, a malha do modelo possui em torno de 32000 elementos, quase um quarto do que teria se fosse modelada a estrutura inteira.

As condições de contorno são apresentadas mais detalhadamente na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Condições de contorno aplicadas ao modelo fluido

Atuador	
Tipo de contorno	Parede
Influência no fluxo	Sem escorregamento
Acabamento Superficial	Parede Lisa
Velocidade da parede relativa a	Movimento da Malha
Movimento da malha	Deslocamento Especificado
Deslocamento Axial	Equação 5.1
Deslocamento Radial	0m

Deslocamento em Theta	0m
Conector	
Tipo de contorno	Parede
Influência no fluxo	Sem escorregamento
Acabamento Superficial	Parede Lisa
Velocidade da parede relativa a	Movimento da Malha
Movimento da malha	Deslocamento Não Especificado
Entrada e Saída	
Tipo de contorno	Abertura
Pressão de Abertura	0 Pa
Direção do Fluxo	Normal à parede
Turbulência	Baixa
Movimento da malha	Estacionário
Paredes	
Tipo de contorno	Parede
Influência no fluxo	Sem escorregamento
Acabamento Superficial	Parede Lisa
Movimento da malha	Estacionário
Simetria	
Tipo de contorno	Simetria
Válvula	
Tipo de contorno	Parede
Influência no fluxo	Sem escorregamento
Acabamento Superficial	Parede Lisa
Velocidade da parede relativa a	Movimento da Malha
Movimento da malha	Deslocamento Especificado
Deslocamento Axial	Equação 5.2
Deslocamento Radial	0m
Deslocamento em Theta	0m

Tabela 5.5: Condições iniciais aplicadas ao modelo fluido

Condições Iniciais	
Pressão Relativa	0 Pa
Deslocamento Axial	0 m/s
Deslocamento Radial	0 m/s
Deslocamento em Theta	0 m/s

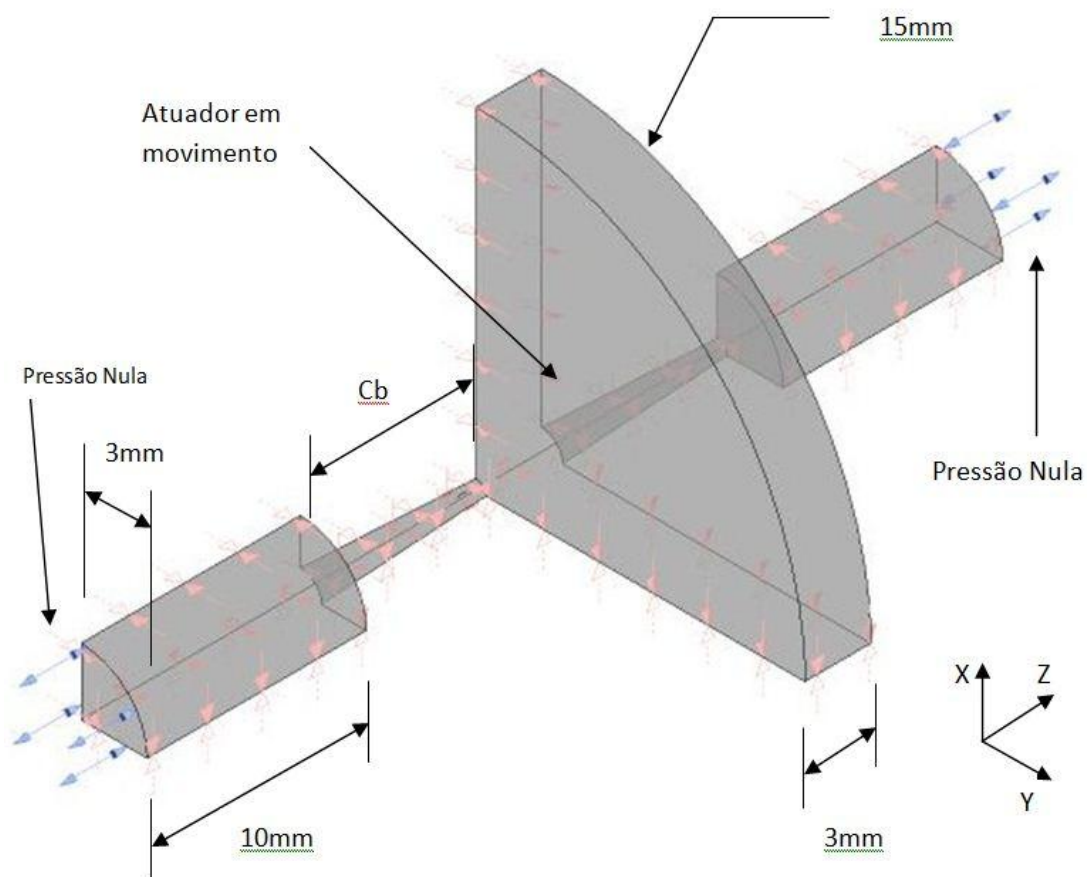


Figura 5.19: Modelo Fluido.

Detalhe especial é dado ao bocal-difusor, que foi peça de estudo principal desta análise de sensibilidade fluida. A Figura 5.20 mostra seus parâmetros geométricos.

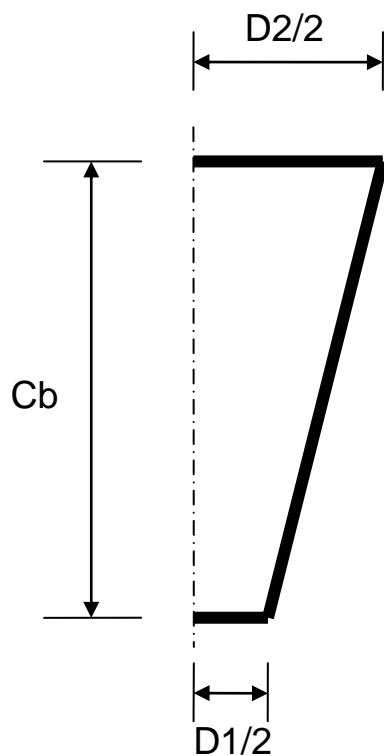


Figura 5.20: Esquema do bocal-difusor.

Com C_b fixo igual a 8mm, D_1 fixo igual a 0,9mm e variando-se D_2 de 1,3 a 2,1mm, com passos de 0,2mm foi obtida a curva abaixo:

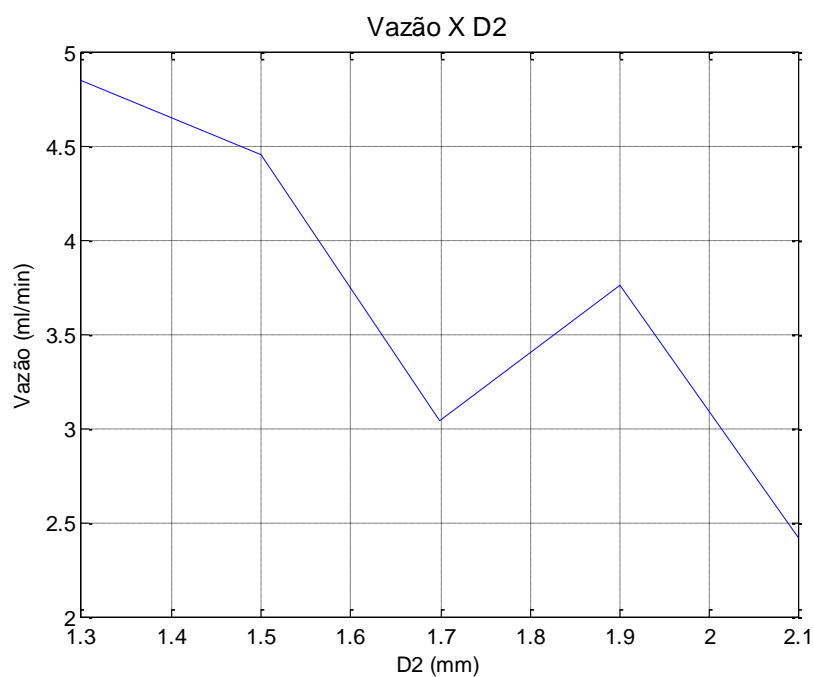


Figura 5.21: Análise de Sensibilidade Fluida com $D_1 = 0,9\text{mm}$ e $C_b = 8\text{mm}$.

Com C_b fixo igual a 5mm, D_1 fixo igual a 0,7mm e variando-se D_2 de 1,1 a 1,9mm, com passos de 0,2mm foi obtida a curva abaixo:

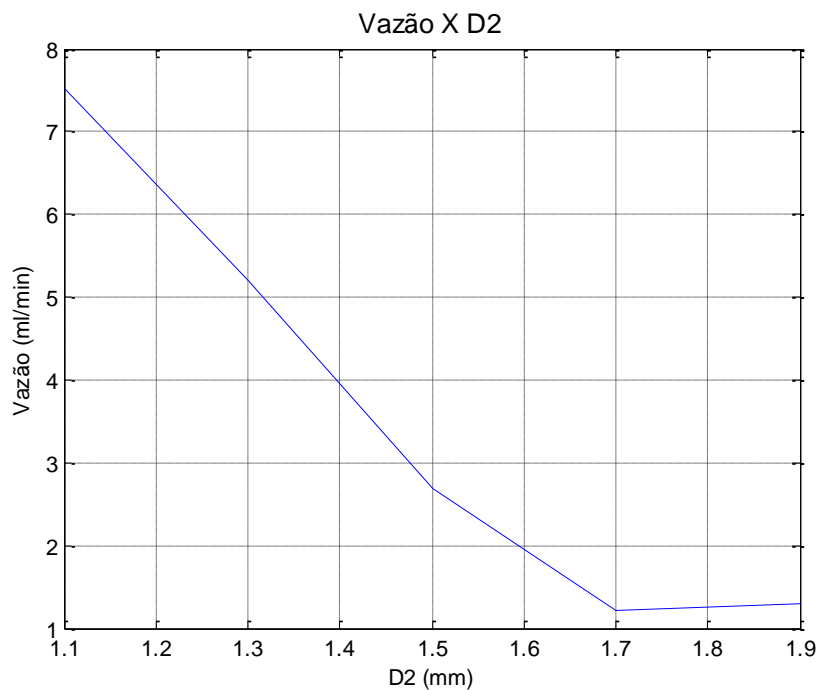


Figura 5.22 Análise de Sensibilidade Fluida com $D_1 = 0,7\text{mm}$ e $C_b = 5\text{mm}$.

Assim, obteve-se a maior vazão (7,51ml/min) para um bocal com medidas de: $C_b = 5\text{mm}$, $D_1 = 0,7\text{mm}$ e $D_2 = 1,1\text{mm}$, ou seja, um ângulo de abertura $\alpha = 4,6^\circ$, onde

$$\alpha = \text{atan} \left(\frac{(D_2 - D_1)/2}{C_b} \right) \quad (5.1)$$

6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com o protótipo construído são feitos os ensaios de vazão e pressão estática. A montagem dos ensaios é mostrada na Figura 6.1.

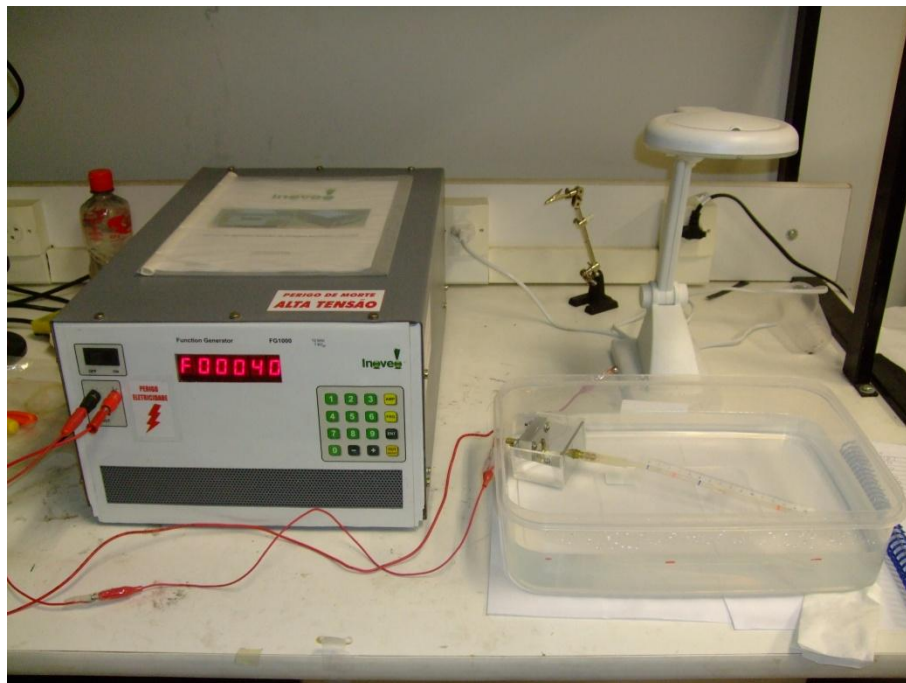


Figura 6.1: Montagem dos ensaios.

6.1 Curva de Vazão X Frequência

Para verificar a influência da frequência de excitação na vazão da bomba é levantada a curva de vazão média em função da frequência, apresentada na . Neste ensaio utiliza-se a tensão de trabalho de 300Vpp.

Esta curva mostra dois picos de vazão, em 85 e 105Hz, sendo que o primeiro fornece a maior vazão.

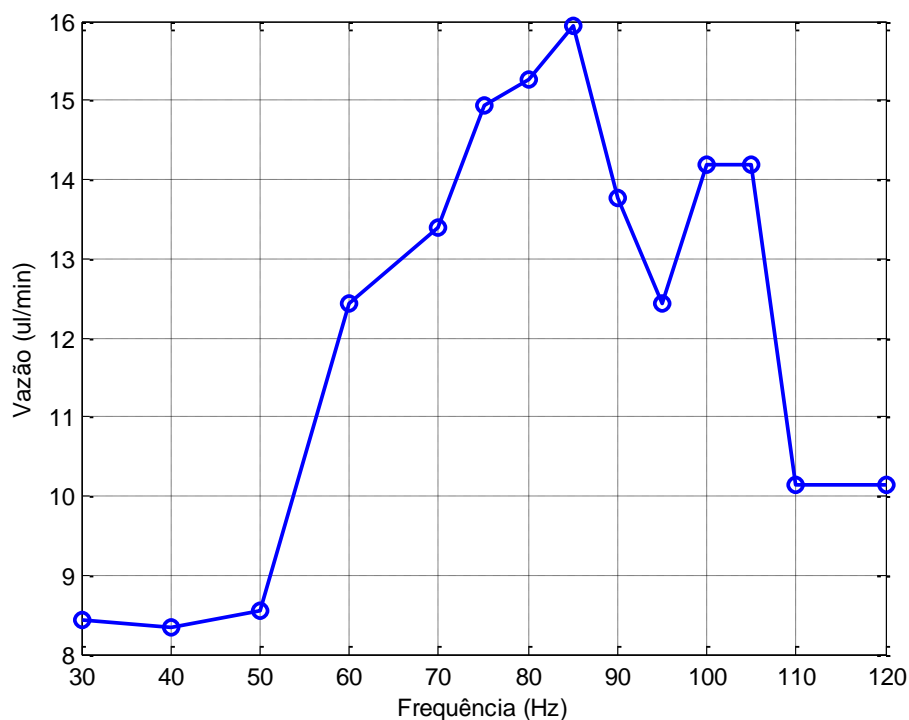


Figura 6.2: Curva da vazão em função da frequência para excitação em 300Vpp.

6.2 Curva de Vazão X Tensão

Outro fator importante para ser avaliado é a influência da amplitude da tensão na vazão da bomba de fluxo. Para isso

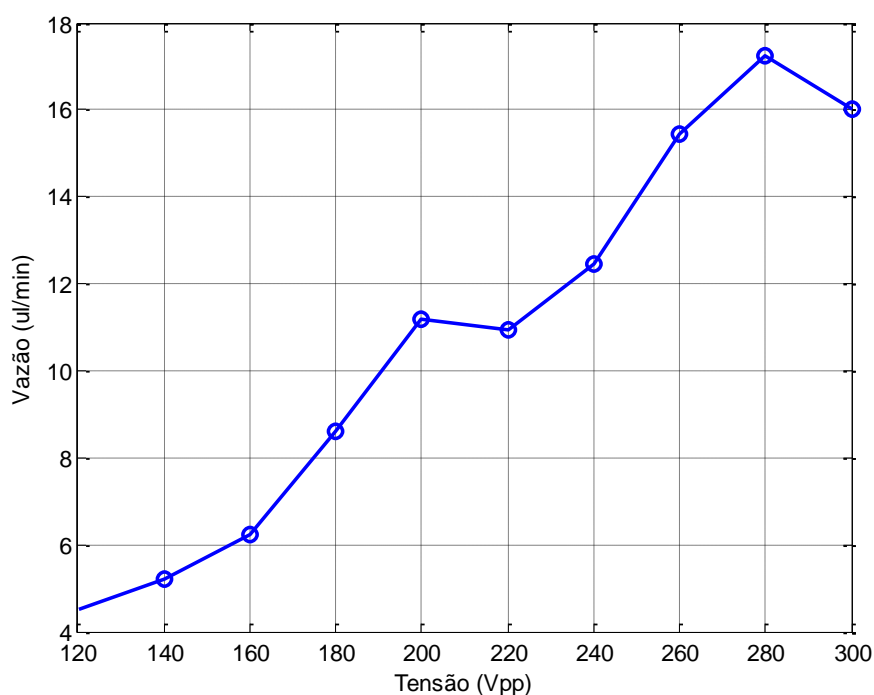


Figura 6.3: Curva da vazão em função da amplitude da tensão para excitação em 85Hz.

6.3 Curva de Pressão X Frequência

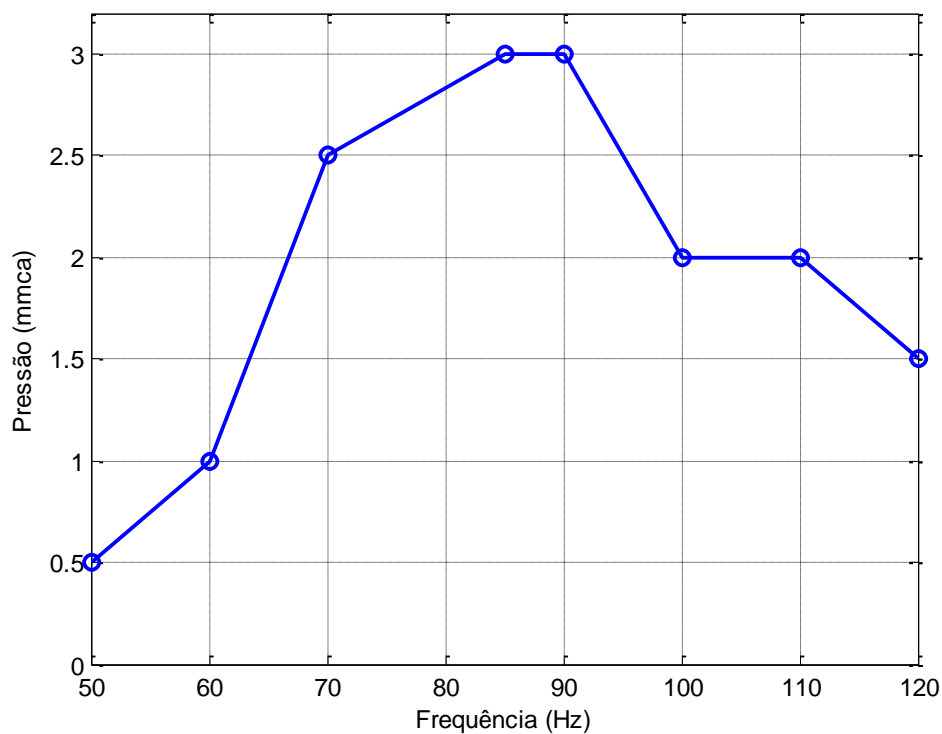


Figura 6.4: Curva da pressão em função da frequência.

7 CONCLUSÕES

As simulações se mostraram importantes por permitir entender o funcionamento da bomba e avaliar sua viabilidade.

O protótipo se mostrou viável de ser construído.

O teste do protótipo apresentou vazão abaixo da esperada, porém apresentou resposta linear, mostrando que é controlável.

Notou-se a importância do efeito contrário ao fluxo gerado pela conexão de bexiga, que deve ser evitado.

8 Bibliografia

- ANSYS, INC. **ANSYS Commands Reference**. [S.l.]: [s.n.], 2009.
- ANSYS, INC. **Elements Reference**. [S.l.]: [s.n.], 2009.
- ANSYS, INC. **Theory Reference**. [S.l.]: [s.n.], 2009.
- BROUNS, A. Effect of Heat on Piezoelectric Properties of a Ceramic Element. **IRE Transactions on Audio**, Maio-Junho 1957. 73-74.
- CARROZZA, M. C. et al. A piezoelectric-driven stereolithography-fabricated micropump. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, n. 5, 1995. 177-179.
- CHOI, A. **Desenvolvimento de um bomba de fluxo piezelétrica de diafragma**. São Paulo: [s.n.], 2009.
- ESASHI, M.; SHOJI, S.; NAKANO, A. Normally Closed Microvalve and Micropump Fabricated on a Silicon Wafer. **Sensors and Actuators**, n. 20, p. 163 - 169, 1989.
- IKEDA, T. **Fundamentals of Piezoelectricity**. Oxford: Oxford University Press, 1996.
- JIANG, X. N. et al. Micronozzle diffuser flow and its application in micro valveless pumps. **Sensors And Actuators**, 1998.
- JUNWU, K. et al. Design and test of a high-performance piezoelectric micropump for drug delivery. **Sensors and Actuators A-Physical**, 121, n. 1, 31 Maio 2005. 156 - 161.
- KESWANI, R. K.; RAJ, A.; LEE, K. S. Microfluidic Devices for Controlled Release and Drug Delivery, 14 Maio 2007.
- KOCH, M. et al. A novel micropump design with thick-film piezoelectric actuation. **Measurement Science and Technology**, v. 8, p. 49-57, 1997.
- LANGER, R. Drug delivery and targeting. **Nature**, p. 392, Abril 1998.
- LERCH, R. Simulation of piezoelectric devices by 2-dimensional and 3-dimensional. **IEEE Transactions On Ultrasonics Ferroelectrics And Frequency Control**, v. 37, n. 3, 1990. 233-247.
- MAILLFER, D. et al. A High-Performance Silicon Micropump For Disposable Drug Delivery Systems. **IEEE**, 2001.
- MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. **Fundamento da Mecânica dos Fluidos**. Quarta Edição. ed. [S.l.]: Editora Edgard Blucher Ltda., 2006.

PHYSIK INSTRUMENTE (PI) GMBH & CO. Tutorial: Piezoelectrics in Nanopositioning, Designing with Piezoelectric Actuators, 2010. Disponível em: <<http://www.physikinstrumente.com/tutorial/>>. Acesso em: 10 Abril 2010.

STEMME, E.; STEMME, G. A valveless diffuser-nozzle-based fluid pump. **Sensors and Actuators A-Physical**, n. 39, 1993. 159-167.

TEO, A. L. et al. Transdermal microneedles for drug delivery applications. **Materials Science and Engineering**, n. 132, 2006. 151-154.

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

VINHAIS, H. F. **Projeto e Simulação de Motores Piezelétricos Lineares pelo Método dos Elementos Finitos**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2002.

VOLKSWAGEN. **TDI Engines**. Disponível em: <http://www.volkswagen.de/vwcms/master_public/virtualmaster/en2/experience/innovation/powertrain/start/piezo_injectors.html>. Acesso em: 2 agosto 2010.

APÊNDICE A – Instruções para o CFX

A.1 Introdução ao ANSYS

Para realizar uma simulação no ANSYS são necessárias 3 fases:

- Pré-Processamento;
- Solução;
- Pós-Processamento.

A.2 Pré-Processamento

Na primeira fase (pré-processamento) se define o modelo a ser estudado. Portanto, são necessárias informações como:

- Geometria;
- Elementos;
- Materiais – todas as suas propriedades estudadas no problema;
- Relação entre elementos, materiais e geometria;
- Malha – como será discretizado o domínio do MEF (geometria do elemento e quantidade ou tamanho dos mesmos);
- Condições de contorno;
- Acoplamentos.

A geometria pode ser feita em qualquer programa CAD e ser importada como *.IGES. Neste trabalho, no entanto, foi utilizado a APDL devido a sua facilidade de recriar modelos alterando apenas alguns parâmetros.

Os elementos a serem utilizados são escolhidos de acordo com as características do material a ser estudado. Para cada material deve-se escolher um elemento capaz de modelar as propriedades deste material. Isto é feito olhando-se no *Element Reference* do ANSYS. A eles devem ser adicionados os parâmetros como matriz de rigidez, massa e acoplamento.

Para os materiais deve-se apenas especificar as suas propriedades estudadas no problema. O próximo passo é especificar para cada parte da geometria o elemento e o material correspondente.

Gera-se então, a malha, que deve ser feita de forma a otimizar a relação custo computacional X erro nos resultados.

As condições de contorno são definidas pelo modelo estudado e pela solução a ser obtida.

A.3 Solução

Na fase de solução é escolhido o tipo de análise (fluida, modal, harmônica, transiente etc.), o método de resolução e outros parâmetros, como a banda de frequência e a quantidade de passos na análise harmônica.

A.4 Pós-Processamento

É nesta fase que ocorre a aquisição dos dados gerados pela fase anterior. Existem dois tipos de pós-processamentos: o POST1, *General Postprocessor*, e POST26, *Time-History Postprocessor*. No primeiro podem-se obter as frequências de ressonância e anti-ressonância, modos de vibrar e animações deste. No segundo obtêm-se respostas em função da frequência na análise harmônica.

A.5 Linguagem APDL

ANSYS Parametric Design Language ou APDL é uma linguagem de programação utilizada para automatizar e parametrizar problemas a serem realizados pelo ANSYS. Esta linguagem mescla comandos de programação comuns como if-then-else, criação de variáveis e execução de operações matemáticas com comandos específicos do ANSYS, como os comandos que são gerados ao se utilizar a GUI - *Graphic User Interface*.

Pode-se, com esta ferramenta realizar várias simulações de alguma situação alterando apenas algum parâmetro, rapidamente, sem precisar refazer toda a modelagem novamente. Assim, pode-se focar no problema e não perder tempo refazendo modelagens.

Para cada fase de simulação tem-se um padrão para o código, que pode ser observado nas listagens em anexo.

Comandos na linguagem APDL podem ser inseridos de duas formas: pela inserção direta na linha de entrada de comandos da GUI ou pela leitura de um arquivo de entrada, onde um arquivo *.txt é lido pelo ANSYS. Há também a possibilidade de trabalhar no modo *batch* onde há também a leitura de um arquivo *.txt mas não há o uso da GUI, ou seja, há economia de custo computacional.

O formato dos comandos é o nome do comando seguido dos seus parâmetros, separados por vírgulas:

COMANDO, PARÂMETRO1, PARÂMETRO2

podendo um comando ter vários parâmetros. Alguns comandos podem ser usados somente em algum processador, outros podem ser usados em mais. Há os comandos com barra (/) ou asterisco (*), geralmente usados para fornecer instruções de controle. Todos os comandos com asterisco podem ser usados em qualquer parte do programa. Quanto aos comandos com barras a maioria pode ser usada em qualquer parte do programa.

Comandos com barra (/) incluem:

- Escolha de processador (/PREP7, /POST1);
- Controle de display (/TRIAD,Lab);
- Controle de dados de saída e de arquivos (/FILENAME,Fname,Key).

Comandos com asteriscos incluem:

- Operações if-then-else;
- loops e repetições;
- macros.

APÊNDICE B - Tutorial do ANSYS para FEA (*Finite Elements Analysis*)

Para qualquer pessoa que vai fazer simulações no ANSYS uma das ferramentas mais essenciais é o Help Topics. Para acessá-lo basta clicar, no menu de utilidades, em Help > Help Topics.

A figura abaixo mostra a janela principal do ANSYS Multiphysics.

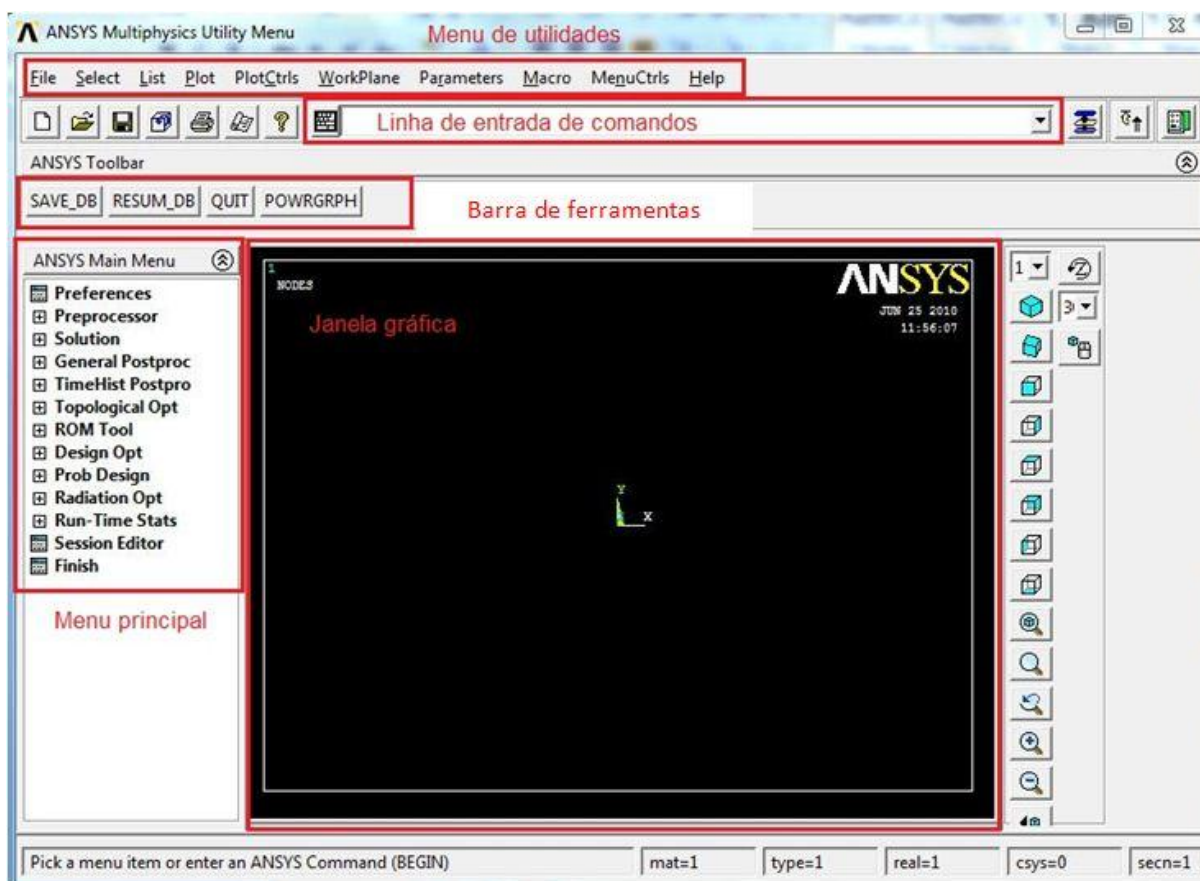


Figura 8.1: Janela Principal do ANSYS Multiphysics.

B.1 Escolha do tipo de simulação

O ANSYS realiza diferentes tipos de simulações, cada uma possui sua peculiaridade para entrada de dados. As simulações podem ser: análise modal, harmônica, transiente e estática. Para um caso mais geral temos a equação genérica:

$$[\mathbf{M}]_{n \times n} \{\ddot{\mathbf{X}}\}_{n \times 1} + [\mathbf{C}]_{n \times n} \{\dot{\mathbf{X}}\}_{n \times 1} + [\mathbf{K}]_{n \times n} \{\mathbf{X}\}_{n \times 1} = \{\mathbf{F}\}_{n \times 1} \quad (\text{B.1.1})$$

onde, para o caso mecânico:

$[\mathbf{M}]_{n \times n}$ = Matriz de massa

$[\mathbf{C}]_{n \times n}$ = Matriz de amortecimento

$[K]_{n \times n}$ = Matriz de rigidez

$\{X\}_{n \times 1}$ = Graus de liberdade

$\{F\}_{n \times 1}$ = Excitação

Note que pode-se estender a equação para qualquer caso genérico de sistemas de segunda ordem.

A análise modal, como explicado no item 2.4.1, fornece a partir das matrizes de massa e rigidez os seus autovalores e autovetores correspondentes. Os autovalores representam as frequências de ressonância, já os autovetores representam os modos de vibrar correspondente (dados pelos valores dos graus de liberdade do elemento em módulo e fase). Pode-se ver uma animação do modo de vibrar de uma estrutura pela GUI. Isso será explicado depois.

A análise harmônica fornece respostas harmônicas em função da frequência de excitação pela resolução de uma equação como a 3.1, genérica, com as condições dadas pela equação 2.16 e:

$$\{X(t)\} = \{X\}e^{j\omega t} \quad (B.1.2)$$

Esta excitação pode somente ser feita em uma única frequência – dada por ω . Esta frequência será a frequência de excitação, em que serão aplicadas todas as excitações. As respostas são valores de graus de liberdade (deslocamentos e tensões no caso de análises estruturais) dados em módulo e fase. Embora esta análise tenha sua resposta para apenas uma frequência de excitação, o ANSYS é capaz de realizar esta equação várias vezes num passe, com incrementos de frequência a cada equação.

A análise transiente fornece, diferentemente dos dois casos anteriores, também a resposta do sistema antes dele atingir o regime permanente. Isto é feito pela resolução da equação 2.23 com o vetor $\{F\}$ variando no tempo. Nesta análise a excitação pode ser dada de diferentes formas (amplitudes em função do tempo) e períodos (ambos escolhidos pelo usuário). Os resultados desta análise são os graus de liberdade em função do tempo, não mais da frequência como nos dois casos anteriores.

A análise estática resolve a equação 2.8 com o vetor $\{F\}$ constante no tempo. Ela considera regime permanente e fornece apenas os graus de liberdade nesta condição.

Assim, para cada resultado desejado há uma análise mais adequada.

B.2 Escolha do elemento

Antes de começar a simulação propriamente deve-se ter claramente o que vai ser simulado, ou seja, materiais, geometria, condições de contorno e saídas (graus de liberdade que se quer estudar).

Tendo isso em mente procura-se por simplificações possíveis, como condições de simetria ou admitir uma estrutura infinitamente rígida.

Assim, pode ser escolhido um elemento. Eles podem ser achados no Element Reference do Help, onde há também todas as informações de cada elemento, inclusive aplicações do mesmo. Os elementos podem ser 2D ou 3D. Alguns elementos podem ser definidos tanto como 2D ou 3D, dependendo de suas configurações de *keypoint* (isso será tratado mais adiante). Eles são divididos em vários tipos, entre eles (ANSYS, INC., 2009):

- LINK;
- BEAM;
- SOLID;
- SHELL;
- PLANE;
- PIPE;
- FLUID;

A escolha é feita a princípio de acordo com as suas necessidades. Existem, no entanto vários elementos do mesmo tipo. Para realizar esta escolha deve ser observado os graus de liberdade e propriedades deste tipo de elemento que mais se adequam. Por exemplo:

Para fazer a análise harmônica do atuador no ar desconsiderou-se o efeito dinâmico do mesmo. Modelando-se apenas o atuador. Escolheu-se o elemento SOLID98 por possuir propriedades piezelétricas e estruturais, ser 3D (para poder ser observado os modos de vibrar) e suportar as análises harmônica e modal.

B.3 Escolha do Modo de Trabalho

A simulação pode ser feita de três maneiras distintas, elas são através de:

- APDL;
- Main menu da GUI;

- ANSYS Workbench.

Como foi mencionado anteriormente, no item 3.2.4, o APDL é um modo de automatizar os comandos do ANSYS.

A GUI – *Graphic User Interface* possui um menu (main menu) à partir da qual pode ser feita a simulação. Este menu é separado em processadores e sub-áreas, de forma bem amigável. Além disso, há a janela de vídeo, onde é exibida uma imagem do modelo geométrico, mas também podem ser exibidas as soluções. Há também a possibilidade de fazer *picking* nesta janela (o que é impossível apenas com o APDL). Esta ferramenta permite selecionar elementos da figura através do mouse. Este modo de trabalho é o mais recomendado para fins didáticos.

Ambos os modos acima podem ser feitos durante uma mesma modelagem. A

O ANSYS Workbench é uma interface diferente da GUI do ANSYS. Ela integra em um único aplicativo todos os add-ons do ANSYS e ainda um CAD, para modelagem de geometrias. Esta é a interface mais amigável do ANSYS, no entanto, não se tem o mesmo controle sobre a simulação quanto os modos acima.

Este tutorial tentará ser o mais abrangente possível, mas mais focado no APDL.

B.4 Configurações Iniciais da Modelagem

Depois de concluídos os três primeiros passos o diretório de trabalho deve ser escolhido. É nele que serão salvos por *default* os arquivos gerados pela simulação. Para isso, siga o caminho: menu de utilidades>File>Change Directory, escolha uma pasta e dê OK. Para fazer isso por APDL use o comando (ANSYS, INC., 2009):

- **/CWD**, DIRPATH.

Deve ser também dado um título ao projeto – é com este nome que os arquivos serão salvos. Isto é feito seguindo o caminho: menu de utilidades>File>Change Jobname. Ou pelo comando:

- **/FILENAME**, Fname, Key

B.5 Comandos Básicos em APDL

Existem alguns comandos que são utilizados com muita frequência e em várias etapas do programa. É, então, importante conhecê-los. Os comandos mais comuns são:

- **VSEL**, *Type*, *Item*, *Comp*, *VMIN*, *VMAX*, *VINC*, *KSWP*

- **ASEL**, *Type, Item, Comp, VMIN, VMAX, VINC, KSWP*
- **LSEL**, *Type, Item, Comp, VMIN, VMAX, VINC, KSWP*
- **NSEL**, *Type, Item, Comp, VMIN, VMAX, VINC, KABS*

Estes comandos selecionam, respectivamente, volumes, áreas, linhas e nós.

São importantes para geometrias complexas os comandos de plotagem e de listagem:

- **VPLOT**, *NV1, NV2, NINC, DEGEN, SCALE*
- **APLOT**, *NA1, NA2, NINC, DEGEN, SCALE*
- **LPLOT**, *NL1, NL2, NINC*
- **NPLOT**, *KNUM*

e

- **VLIST**, *NV1, NV2, NINC*
- **ALIST**, *NA1, NA2, NINC, Lab*
- **LLIST**, *NL1, NL2, NINC, Lab*
- **NLIST**, *NODE1, NODE2, NINC, Lcoord, SORT1, SORT2, SORT3*

B.6 Modelagem do Sistema

Uma vez configurado dá-se início propriamente dito à modelagem. A primeira coisa a ser feita é entrar no Pré-processador - comando /PREP7 no APDL - e definir a geometria, os elementos e as propriedades dos materiais a serem modelados. Estes, apresentados nos itens 3.3.5 a 3.3.7 podem ser realizados em qualquer ordem dentro do pré-processador.

Começando então a modelagem da geometria do modelo, que podem ser 2D ou 3D. Modelos 2D requerem custo computacional muito menor.

Para criar modelos 2D pode-se utilizar *key points* e criar áreas através deles, ou utilizar geometrias já existentes na biblioteca do ANSYS. Para criar *key points* utiliza-se o comando **K,NPT,X,Y,Z**, que pode ser feito tanto pelo menu principal quanto por APDL. Uma vez criados os pontos principais criam-se áreas. Para isso utiliza-se o comando **A** seguido dos *key points* que formarão a área, em ordem de ligação. Outra opção é usar os comandos existentes para geometrias como retângulos, círculos e polígonos.

Para criar modelos 3D são realizadas operações análogas.

O ANSYS permite também fazer operações booleanas com áreas e volumes, como soma, subtração e intersecção.

B.7 Definição dos elementos

Os elementos do ANSYS podem funcionar de várias formas. Estas mudanças de características, como condições de simetria, graus de liberdade e vários outros, são configuradas através dos *key options*.

Para se definir os elementos que serão usados utiliza-se o comando **ET**, *ITYPE*, *Ename*, *KOP1*, *KOP2*, *KOP3*, *KOP4*, *KOP5*, *KOP6*, *INOPR*. Onde:

- *ITYPE* = número de referência (este número deve ser guardado, pois era usado na associação à geometria e ao material);
- *Ename* = nome do elemento escolhido;
- *KOPi* = valor do *key option* (*i*);
- *INOPR* = suprimir a saída das soluções para este elemento se for 1.

Esta mesma operação pode ser feita utilizando o menu principal pelo caminho: Element Type>Add/Edit/Delete>Add> escolher o elemento desejado e clicar OK.

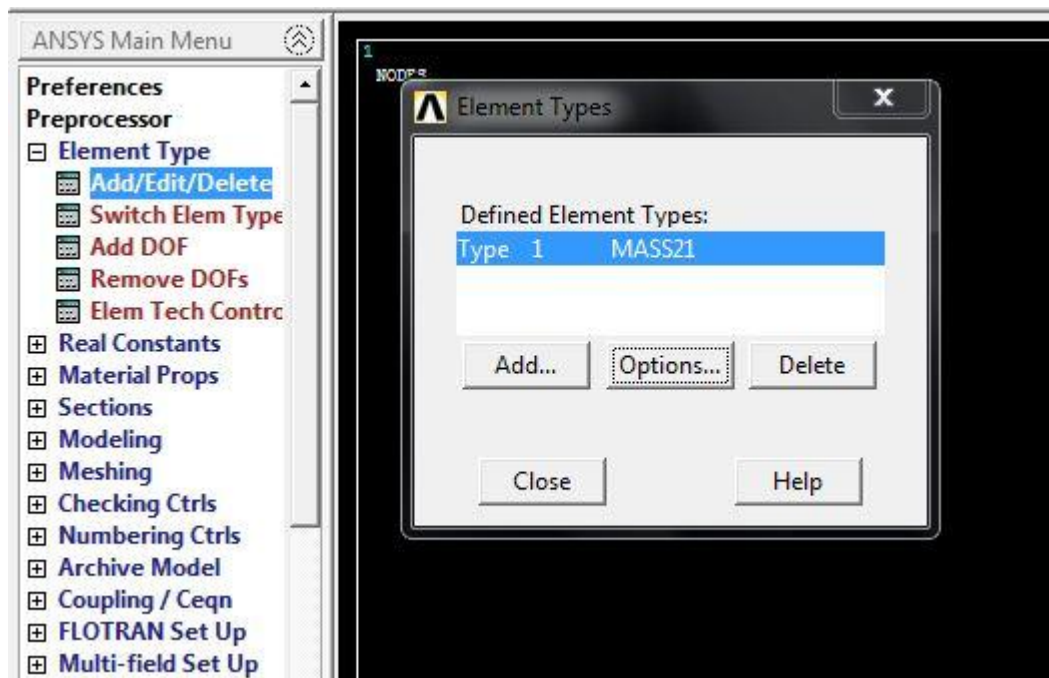


Figura 8.2

Definem-se então os *key points* clicando no botão options da janela *element types*. Escolhem-se os valores e clica OK.

Este processo deve ser repetido para todos os elementos que serão utilizados.

B.8 Definição das propriedades dos materiais

Para definir as propriedades dos materiais pelo menu principal tem-se o caminho: Material Props>Material Models>escolhe-se o material a ser utilizado e na janela que se abre introduzem-se os valores correspondentes.

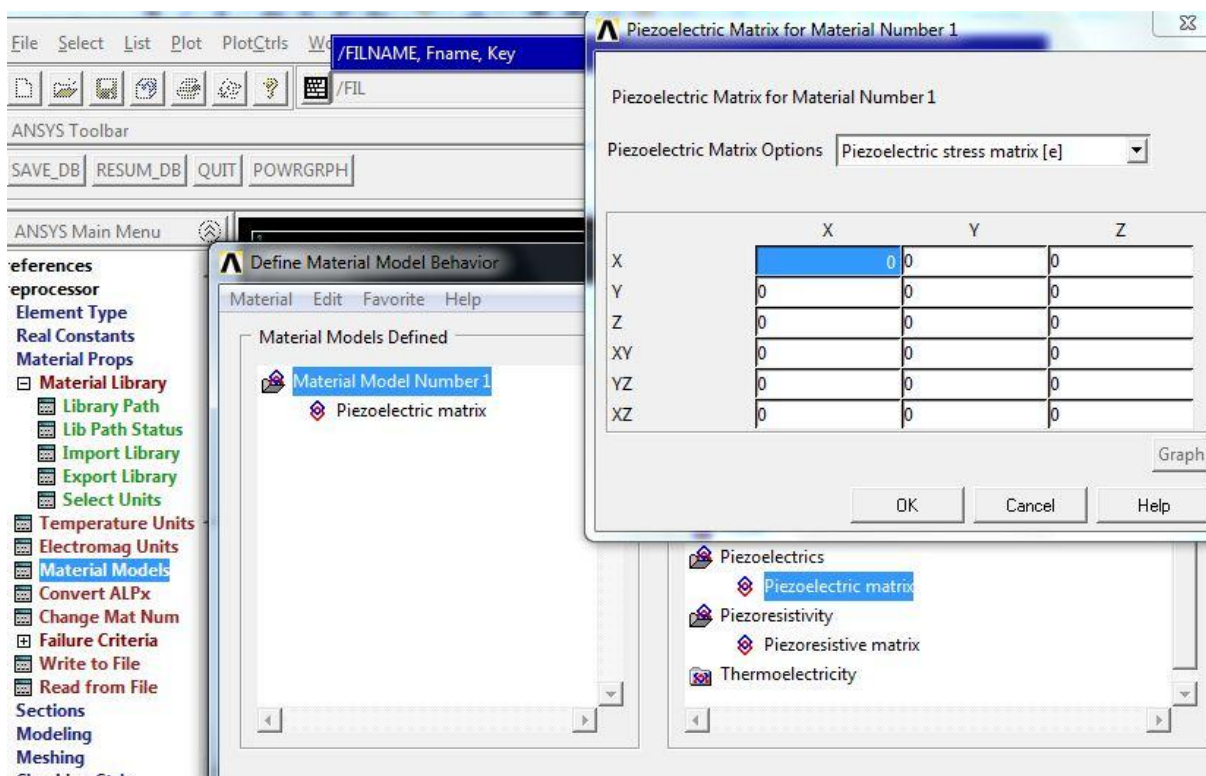


Figura 8.3

Para fazer isso pelo APDL utilizam-se os comandos:

- **MP**, Lab, MAT, C0, C1, C2, C3, C4;
- **UIMP**, MAT, Lab1, Lab2, Lab3, VAL1, VAL2, VAL3;

onde:

- Lab é a propriedade a ser definida;
- Ci e VALi são os valores para essas propriedades;
- MAT é um valor arbitrário para ser relacionado a um material, assim, todas as propriedades relacionadas a algum material devem ter o mesmo valor de MAT.

E para materiais não lineares utiliza-se o comando

- **TB**, Lab, MAT, NTEMP, NPTS, TBOPT, EOSOPT, FuncName.

B.9 Associação de Elementos e Materiais às Geometrias

Para associar elementos e materiais às geometrias deve-se primeiro selecionar um conjunto de áreas com as mesmas características. Isto é feito com o comando:

- **ASEL**, Type, Item, Comp, VMIN, VMAX, VINC, KSWP

O mesmo comando existe para 3D, é o **VSEL**.

Utiliza-se então, o comando:

- **AATT**, MAT, REAL, TYPE, ESYS, SECN

Este comando associa ao conjunto de áreas previamente selecionado o material (MAT), o set de constantes reais (REAL) e o elemento (TYPE) num sistema de coordenadas ESYS e numa seção do elemento SECN.

B.10 Geração da Malha

A geração de malha, ou *mesh* divide a geometria em elementos menores. Cada nó destes elementos corresponderá a uma posição no vetor $\{X\}$ da equação 3.1. Portanto, uma malha muito refinada irá exigir um custo computacional muito alto, mas uma malha com poucos elementos pode não fornecer uma resposta satisfatória.

Para escolher o tamanho da malha pode-se escolher propriamente o tamanho dos elementos dela pelo comando

- **ESIZE**, SIZE, NDIV

onde:

- SIZE, se for definido será o tamanho do elemento;
- NDIV, se SIZE não for definido, será o número de divisões feitas.

Existem outras configurações possíveis para a geração de malha, feitas com comandos como: **MSHAPE**, **MOPT**, **MSHKEY**, **MSHMID** e **MSHPATTERN**.

Uma vez terminada a configuração de malha, ela própria pode ser feita através do comando AMESH para áreas e VMESH para volumes. O resultado será parecido com a figura abaixo:

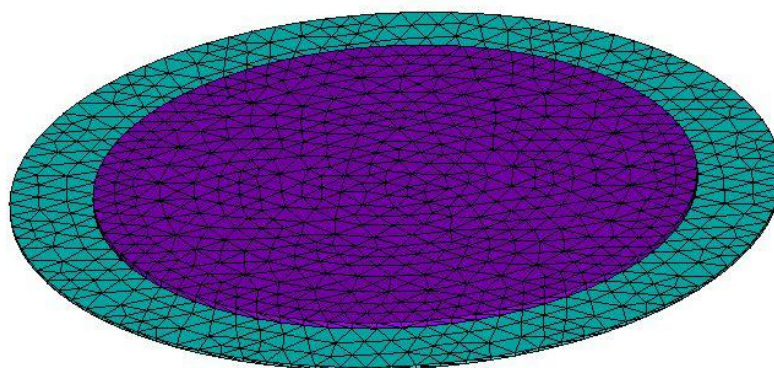


Figura 3.4: Malha gerada no ANSYS.

B.11 Aplicação das Condições de Contorno e Esforços Externos

Agora já está pronta a parte esquerda da equação 3.1, falta a parte direita, ou seja, as forças externas e condições de contorno.

Isso é feito selecionando-se os nós onde serão aplicadas as cargas (como explicado no item 3.3.5) e utilizando o comando:

- **D**, *NODE*, *Lab*, *VALUE*, *VALUE2*, *NEND*, *NINC*, *Lab2*, *Lab3*, *Lab4*, *Lab5*, *Lab6*.

onde:

- **NODE** = nó ou conjunto de nós onde serão aplicadas as condições de contorno
- **Lab** a **Lab6** = o grau de liberdade a ser definido;
- **VALUE** e **VALUE2** = valores do **Lab**, são os mesmos a todos os **Labs**;
- **NEND** = número do nó final do *range* a que será aplicada a condição de controle;
- **NINC** = incremento de nós para o *range*;

Existem também os esforços externos, que não são graus de liberdade dos elementos. E são definidos com o comando:

- **F**, *NODE*, *Lab*, *VALUE*, *VALUE2*, *NEND*, *NINC*.

Os parâmetros são análogos ao comando **D**.

B.12 Definição da Solução

Uma vez terminada a etapa anterior pode ser fechado o pré-processador. Para isso, utiliza-se o comando **FINISH**. Para entrar na etapa de solução deve ser

dado o comando **/SOLU**. Define-se então o tipo de análise a ser feita. Basicamente, para se fazer isso basta utilizar o comando:

- **ANTYPE**, *Antype*, *Status*, *LDSTEP*, *SUBSTEP*, *Action*.

onde:

- Antype = tipo de análise;

Os outros parâmetros não serão abordados aqui.

Por fim o comando **SOLVE** realiza a solução que acabou de ser configurada.

B.13 Obtenção de Resultados

A obtenção de resultados pode ser feita em dois processadores: o POST1 (General results postprocessor) e o POST26 (time-history results postprocessor), dependendo da simulação realizada.

O POST1 é utilizado para o caso geral. Nele se obtêm os valores das frequências de ressonância, imagens dos modos e vibrar e até animações dos mesmos. Nestas imagens pode-se escolher ver todos os graus de liberdade que foram resolvidos, como deslocamento, pressão, carga elétrica.

O POST26 é utilizado neste estudo para análises harmônicas. Nele pode-se obter a resposta no espectro de frequências de algum grau de liberdade de qualquer nó do modelo. Pode-se então listar ou plotar os resultados, seja na forma de gráfico ou na forma de imagem gráfica.

B.14 Dicas

Antes de começar uma simulação certifique-se de escolher o diretório desejado para o projeto, uma vez que é nesse diretório que serão salvos os arquivos gerados na simulação.

Uma vez completada a solução de uma simulação pode-se salvar seus resultados através do comando SAVE. Isto gera um arquivo *.RST na pasta de trabalho. Assim, a solução pode ser vista de novo. Para isso basta clicar numa aba de pós processamento do menu principal e escolher um arquivo *.RST para abrir. É importante notar que estes arquivos são muito pesados (da ordem de Giga Bytes). Então cuidado na hora de escolher a pasta de trabalho.

APÊNDICE C - Listagem dos Códigos APDL

C.1 Modelo do Atuador no Ar

Este modelo foi utilizado para as análises modais e harmônicas do atuador no ar. Foram criados arquivos separados para o pré-processador e o pós-processador, uma vez que são diferentes para cada tipo de análise.

C.1.1 Pre.txt

```

=====
! Parâmetros da simulação
=====

RESSONANCIA = 1
HARM          = 1

*IF,HARM,EQ,1,THEN
    MODELO = 'Ar_Axis_Harm'
*ELSEIF,RESSONANCIA,EQ,1,THEN
    MODELO = 'Ar_Axis_Modal_Res'
*ELSE
    MODELO = 'Ar_Axis_Modal_Antires'
*ENDIF

/FILENAME,%MODELO%
/TITLE,meutitulo
/STITLE,meu_subtitulo
/NOPR
/CONFIG,NPROC,2
/PREP7
/TRIAD, OFF      !Apaga a triade do sist de coord, deixando só a do working plane

=====
! DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS - Axissimétricos
=====

! METAL
!-----
ET,1,PLANE182,,1

! MATERIAL PZT
!-----
ET,2,PLANE223,1001,,1      !UX,UY,CHRG,Axisymmetric

=====
! PROPRIEDADES DOS MATERIAIS
=====
!-----

```

```

! Latão - Material 1
!-----
UIMP,1,EX, , ,11e10,
UIMP,1,DENS, , ,8970,
UIMP,1,PRXY, , ,0.34,
MP,DAMP,1,3e-9

! PZT-5A grupo de simetria 6 mm
!-----
! Piezo constants
!-----
e31=-5.4
e33=15.8
e15=12.3
TB,PIEZ,2 !* PZT-5A - classe de simetria 6mm
TBDATA,1,0,e31,0 !* | 0 -5.4 0 | | 0 e31 0 |
TBDATA,4,0,e33,0 !* | 0 15.8 0 | | 0 e33 0 |
TBDATA,7,0,e31,0 !* | 0 -5.4 0 | | 0 e31 0 |
TBDATA,10,e15,0,0 !* | 12.3 0 0 | = | e15 0 0 |
TBDATA,13,0,0,e15 !* | 0 0 12.3 | | 0 0 e15|
!* | 0 0 0 | | 0 0 0 |

!-----
! Elastic constants at E cst
!-----
c11=12.5E10
c12=7.54E10
c13=7.52E10
c33=11.1E10
c44=2.11E10
c66=.5*(c11-c12)
TB,ANEL,2 !* PZT-5A - classe de simetria 6mm (*10^10)
TBDATA,1,c11,c13,c12,0,0,0 !* | 12.5 7.52 7.54 0 0 0 | | c11 c13 c12 0 0 0 |
TBDATA,7,c33,c13,0,0,0 !* | 11.1 7.52 0 0 0 | | c33 c13 0 0 0 |
TBDATA,12,c11,0,0,0 !* | 12.5 0 0 0 | | c11 0 0 0 |
TBDATA,16,c44,0,0 !* | 2.11 0 0 | = | c44 0 0 |
TBDATA,19,c44,0 !* | 2.11 0 | | c44 0 |
TBDATA,21,c66 !* | 2.26 | | c66|

!-----
! Constantes dieletricas a strain (S) constante
!-----
e00=8.85E-12
eps1=916*8.85E-12
eps3=830*8.85E-12 !* PZT-5A - classe de simetria 6mm (*10^-9)
MP,PERX,2,eps1 !* | 8.1066 0 0 | | eps11 0 0 |
MP,PERY,2,eps3 !* | 0 7.3455 0 | = | 0 eps33 0 |
MP,PERZ,2,eps1 !* | 0 0 8.1066 | | 0 0 eps11 |

!-----
! Densidade e amortecimento

```



```

!-----
MP,DENS,2,7650
QM=75
FR=47000
OMEGA=2*3.1416*FR
BETA= 0.00000476
MP,DAMP,2,BETA

!=====
! PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO (OBS: dimensões no S.I.)
!=====

FreqInicial = 1000 ! Frequencia inicial da analise harmonica
FreqFinal = 3500 ! Frequencia final da analise harmonica
FreqPassos = 400 ! Número de substeps da analise harmonica

*IF,HARM,EQ,1,THEN
    tensao = 160 ! Voltagem aplicada nos PZTs
*ELSEIF,RESSONANCIA,EQ,1,THEN
    tensao = 0
*ELSE
    tensao = 160
*ENDIF

Df = 0.0009
element = 0.00025
Elatão = 0.00013
Epzt = 0.00025
Dpzt = 0.0235
Dcam = 0.03
Db = 0.005

!=====
! Geometria
!=====

K,1,Df/2
K,2,Db/2
K,3,Dpzt/2
K,4,Dcam/2

K,5,Df/2,Elatão
K,6,Db/2,Elatão
K,7,Dpzt/2,Elatão
K,8,Dcam/2,Elatão

K,9,Df/2,Elatão+Epzt
K,10,Db/2,Elatão+Epzt
K,11,Dpzt/2,Elatão+Epzt

```

```

! Linhas
L,5,6          ! L1 - Pzt baixo
L,6,7          ! L2 - Pzt baixo

L,9,10         ! L3 - Pzt cima e engaste bocal
L,10,11        ! L4 - Pzt cima

! Áreas
A,1,2,6,5      ! Latão
A,2,3,7,6      ! Latão
A,3,4,8,7      ! Latão

A,5,6,10,9     ! PZT
A,6,7,11,10    ! PZT

ALLSEL
AGLUE,ALL

!=====
! APLICAÇÃO DOS MATERIAIS E ELEMENTOS
!=====

ASEL,S,,,1,3   ! Propriedades do Latão
AATT,1,,1

ASEL,S,,,4,5   ! Propriedades do PZTs
AATT,2,,2

ALLSEL

!=====
! GERAÇÃO DA MALHA
!=====

LESIZE, ALL,element
MSHKEY,1          !mapped meshing=1; mapped meshing IF POSSIBLE = 2

AMESH,ALL

ALLSEL

!=====
! ACOPLAMENTO DOS NÓS DAS SUPERFÍCIES DOS PZTs
!=====

! (união dos nós ligados ao terra)
LSEL,S,,,1,2
NSLL,S,1
CP,1,VOLT,all

```

```

alls

! (união dos nós ligados ao Vcc)
LSEL,S,,,3,4
NSLL,S,1
*GET, N1,NODE,,,NUM,MIN!pega o nó de menor valor e coloca em N1
CP,2,VOLT,all
alls

! Engaste do bocal
LSEL,s,,,3
NSLL,S,1
*GET,N2,NODE,,,NUM,MIN
CP,3,UY,ALL
ALLS

!=====
! CONDIÇÕES DE CONTORNO
!=====

D,NODE(Dcam/2,0,0),UY,0          ! Metal Engastado
D,NODE(Dcam/2,0,0),UX,0

D,NODE(Dcam/2,Elatão,0),UY,0
ALLS

LSEL,S,,,3,4          ! Voltagem - OFF
NSLL,S,1
D,all,VOLT,tensao
ALLS

LSEL,S,,,1,2          ! Voltagem terra
NSLL,S,1
D,all,VOLT,0
alls

FINISH

!=====
! SOLUÇÃO
!=====
/SOLU

*IF,HARM,EQ,1,THEN
    ANTYPE, HARMIC
    KBC,1
    HARFRQ, FreqInicial,FreqFinal
    NSUBST, FreqPassos

*ELSE
    ANTYPE,MODAL

```

```

        MODOPT,LANB,5
*ENDIF

SOLVE

SAVE

ALLS
FINISH

```

C.1.2 Post.txt

```

*GET, NNosA,LINE,3,ATTR,NNOD
*GET, NNosB,LINE,4,ATTR,NNOD
NNos = NNosA+NNosB-1

/POST26
!RFORCE,2,N1,AMPS,,Carga Eletrica1 ! STORE CHARGES ON ELECTRODE N1=2066?
RFORCE,2,N2,CHRG,,Carga Eletrica2 ! STORE CHARGES ON ELECTRODE N1=2066?
PI2=(3.14159*2)
PROD,3,2,1,,ADMITV,,NNos,PI2 !  $Q=F*NNos*2*PI$  . 25=NNós
QUOT,4,3,,,Admitancia,,,1,tensao !Admitancia =  $w.Q/V$ 

NSOL,5,N2,U,Y, Amplitude ! Nó do latão de deslocamento máx
NSOL,6,node(Df/2,0,0),U,Y, Amplitude ! Nó do latão de deslocamento máx

/OUTPUT,'VARSA_1','TXT','.'

PLCPLX,0
PRCPLX,1
PRVAR,4,5,6 !Lista Admitancia e Amplitude em VARSA

/OUTPUT,'VARSB_Dcam%Dcam%','TXT','.'

PRVAR,2 ! Lista a carga Elétrica em VARSB

!PLOTA GRÁFICOS E SALVA

PLVAR,4
/IMAGE,SAVE,'adm_1',jpg

PLVAR,6
/IMAGE,SAVE,'amp_1',jpg

```

C.2 Modelo para Análises Acústicas

O programa utilizado nas análises acústicas foi feito em módulos, ou seja, arquivos diferentes para diferentes funções. Assim, para simulações diferentes modifica-se apenas os arquivos correspondentes às mudanças.

Na análise acústica foram utilizados 3 arquivos:

- caller.txt;
- pre.txt;
- post.txt.

O primeiro é o arquivo utilizado para começar a simulação. Ele é responsável por chamar os outros dois recursivamente. O “pré.txt” realiza todo o pré-processamento e o *sol/ver*, e o “post.txt” realiza parte do pós-processamento.

C.2.1 caller.txt

```
/CWD,'E:\ANSYS\New folder - Copia desktop\Camara Furo Axis\Dcam\Resultados_Dcam'

N1=0
Dcam = 0.0004 ! de 0.0005 a 0.005 em passos de 0.0005

*DO,Dcam,0.026,0.032,0.001

  /INPUT,'BocaisAx_Dcam','txt','E:\ANSYS\New folder - Copia desktop\Camara Furo Axis\Dcam',,
0

  /INPUT,'post','txt','E:\ANSYS\New folder - Copia desktop\Camara Furo Axis\Dcam',, 0

  !pegar máximos ou imprimir variáveis (amplitude e admitancia??)
  /OUTPUT,'VARSA_Dcam%Dcam%','TXT','.'

  PLCPLX,0
  PRCPLX,1
  PRVAR,4,6 !Lista Admitancia e Amplitude em VARSA

  /OUTPUT,'VARSB_Dcam%Dcam%','TXT','.'

  PRVAR,2 ! Lista a carga Elétrica em VARSB

  !PLOTA GRÁFICOS E SALVA

  PLVAR,4
  /IMAGE,SAVE,'adm_Dcam%Dcam%',jpg

  PLVAR,6
  /IMAGE,SAVE,'amp_Dcam%Dcam%',jpg
```

```

!PARSAV,ALL,Parametros,PARM      ! Salva parâmetros definidos até aqui em Batch_Par.parm

FINISH
/CLEAR,START

*ENDDO

```

C.2.2 pre.txt

```

!=====
! Parâmetros da simulação
!=====

RESSONANCIA = 1
HARM        = 0

*IF,HARM,EQ,1,THEN
    MODELO = 'BocaisAx_XX_YY_ZZ'
*ELSEIF,RESSONANCIA,EQ,1,THEN
    MODELO = 'BocaisAx_XX_Modal_Res'
*ELSE
    MODELO = 'BocaisAx_XX_Modal_Antires'
*ENDIF

/FILENAME,%MODELO%
/TITLE,meutitulo
/STITLE,meu_subtitulo
/NOPR
!/CONFIG,NPROC,2
/PREP7
/TRIAD, OFF      !Apaga a tríade do sist de coord, deixando só a do working plane

!=====
! DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS - Axissimétricos
!=====

! MATERIAL PZT
!-----
!ET,1,SOLID98,3,,,0
ET,1,PLANE223,1001,,1      !UX,UY,CHRG,Axisymmetric

! Material fluido com estrutura - Axissimétrico
!-----
!* usado como superfície de amortecimento de propagacao
!* de ondas acusticas.
ET,2,FLUID29,,0,1

! Material fluido sem estrutura
!-----
!* meio no qual a onda acustica se propaga.
ET,3,FLUID29,,1,1

```

```

! METAL - Latão
!-----
ET,4,PLANE182,,,1

! ACRÍLICO
!-----
ET,5,PLANE182,,,1

!=====
! PROPRIEDADES DOS MATERIAIS
!=====
!-----
! Latão - Material 1
!-----
UIMP,1,EX, , ,11e10,
UIMP,1,DENS, , ,8970,
UIMP,1,PRXY, , ,0.34,
MP,DAMP,1,3e-9

! PZT-5A grupo de simetria 6 mm
!-----
! Piezo constants
!-----
e31=-5.4
e33=15.8
e15=12.3
TB,PIEZ,2 !* PZT-5A - classe de simetria 6mm
TBDATA,1,0,e31,0 !* | 0 -5.4 0 | | 0 e31 0 |
TBDATA,4,0,e33,0 !* | 0 15.8 0 | | 0 e33 0 |
TBDATA,7,0,e31,0 !* | 0 -5.4 0 | | 0 e31 0 |
TBDATA,10,e15,0,0 !* | 12.3 0 0 | = | e15 0 0 |
TBDATA,13,0,0,e15 !* | 0 0 12.3 | | 0 0 e15|
!* | 0 0 0 | | 0 0 0 |

!-----
! Elastic constants at E cst
!-----
c11=12.5E10
c12=7.54E10
c13=7.52E10
c33=11.1E10
c44=2.11E10
c66=.5*(c11-c12)
TB,ANEL,2 !* PZT-5A - classe de simetria 6mm (*10^10)
TBDATA,1,c11,c13,c12,0,0,0 !* | 12.5 7.52 7.54 0 0 0 | | c11 c13 c12 0 0 0 |
TBDATA,7,c33,c13,0,0,0 !* | 11.1 7.52 0 0 0 | | c33 c13 0 0 0 |
TBDATA,12,c11,0,0,0 !* | 12.5 0 0 0 | | c11 0 0 0 |
TBDATA,16,c44,0,0 !* | 2.11 0 0 | = | c44 0 0 |
TBDATA,19,c44,0 !* | 2.11 0 | | c44 0 |
TBDATA,21,c66 !* | 2.26 | | c66|

```

```

!-----
! Constantes dieletricas a strain (S) constante
!-----
e00=8.85E-12
eps1=916*8.85E-12
eps3=830*8.85E-12 !* PZT-5A - classe de simetria 6mm (*10^-9)
MP,PERX,2,eps1 !* | 8.1066 0 0 | | eps11 0 0 |
MP,PERY,2,eps3 !* | 0 7.3455 0 | = | 0 eps33 0 |
MP,PERZ,2,eps1 !* | 0 0 8.1066 | | 0 0 eps11 |

!-----
! Densidade e amortecimento
!-----
MP,DENS,2,7650
BETA = 0.000476
MP,DAMP,2,BETA

!-----
! Alumínio - Material 4
!-----
UIMP,4,EX, , ,70.3E12,
UIMP,4,DENS, , ,2697,
UIMP,4,PRXY, , ,0.35,
!MP,DAMP,3,3e-9

!=====
! Meio fluídico: Agua
!=====
UIMP,3,DENS, , ,998,
UIMP,3, MU, , ,1.0,
UIMP,3,SONC, , ,1500,

!=====
! PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO (OBS: dimensões no S.I.)
!=====
FreqInicial = 1 ! Frequencia inicial da analise harmonica
FreqFinal = 301 ! Frequencia final da analise harmonica
FreqPassos = 100 ! Número de substeps da analise harmonica
tensao = 160 ! Voltagem aplicada nos PZTs

!***** Yuki *****
Elatão = 0.00013
Epzt = 0.00025
Dpzt = 0.0235

Hcam = 0.0026 ! Altura da câmara -> Caller
Cb = 0.008 ! Comprimento Bocal -> Caller
Eb = 0.001 ! Espessura Bocal -> Caller
Df = 0.0009

```



```

Dmaior = Df ! Diâmetro maior dos cones      -> Caller
Dmenor = Df ! Diâmetro menor dos cones      -> Caller
Dcam = 0.03 ! Diâmetro da Câmara           -> Caller
element = 0.0001! Dimensão do elemento
Flstr = element

```

```
!Flstr = 0.2*element ! Fluido com estrutura
```

```
!*****
```

```
!=====
```

```
! Geometria
```

```
!=====
```

```
K,1,0,0
```

```
K,2,Dmenor/2-Flstr
```

```
K,3,Dmenor/2
```

```
K,4,Dmenor/2+Eb
```

```
K,5,,Cb
```

```
K,6,Dmaior/2-Flstr,Cb
```

```
K,7,Dmaior/2,Cb
```

```
K,8,Dmaior/2+Eb,Cb
```

```
K,9,Dpzt/2,Cb
```

```
K,10,Dcam/2-Flstr,Cb
```

```
K,11,Dcam/2,Cb
```

```
K,12,,Cb+Flstr
```

```
K,13,Dmaior/2-Flstr,Cb+Flstr
```

```
K,14,Dmaior/2,Cb+Flstr
```

```
K,15,Dmaior/2+Eb,Cb+Flstr
```

```
K,16,Dpzt/2,Cb+Flstr
```

```
K,17,Dcam/2-Flstr,Cb+Flstr
```

```
K,18,Dcam/2,Cb+Flstr
```

```
K,19,,Cb+Hcam-Flstr
```

```
K,20,Dmenor/2-Flstr,Cb+Hcam-Flstr
```

```
K,21,Dmenor/2,Cb+Hcam-Flstr
```

```
K,22,Dmenor/2+Eb,Cb+Hcam-Flstr
```

```
K,23,Dpzt/2,Cb+Hcam-Flstr
```

```
K,24,Dcam/2-Flstr,Cb+Hcam-Flstr
```

```
K,25,Dcam/2,Cb+Hcam-Flstr
```

```
K,26,,Cb+Hcam
```

```
K,27,Dmenor/2-Flstr,Cb+Hcam
```

```
K,28,Dmenor/2,Cb+Hcam
```

```
K,29,Dmenor/2+Eb,Cb+Hcam
```

```
K,30,Dpzt/2,Cb+Hcam
```

```
K,31,Dcam/2-Flstr,Cb+Hcam
```

```
K,32,Dcam/2,Cb+Hcam
```

K,33,,Cb+Hcam+Elatão
 K,34,Dmenor/2-Flstr,Cb+Hcam+Elatão
 K,35,Dmenor/2,Cb+Hcam+Elatão
 K,36,Dmenor/2+Eb,Cb+Hcam+Elatão
 K,37,Dpzt/2,Cb+Hcam+Elatão
 K,38,Dcam/2-Flstr,Cb+Hcam+Elatão
 K,39,Dcam/2,Cb+Hcam+Elatão

 K,40,0,Cb+Hcam+Elatão+Epzt
 K,41,Dmenor/2-Flstr,Cb+Hcam+Elatão+Epzt
 K,42,Dmenor/2,Cb+Hcam+Elatão+Epzt
 K,43,Dmenor/2+Eb,Cb+Hcam+Elatão+Epzt
 K,44,Dpzt/2,Cb+Hcam+Elatão+Epzt

 K,45,0,Cb+Hcam+Elatão+Epzt+Cb
 K,46,Dmaior/2-Flstr,Cb+Hcam+Elatão+Epzt+Cb
 K,47,Dmaior/2,Cb+Hcam+Elatão+Epzt+Cb
 K,48,Dmaior/2+Eb,Cb+Hcam+Elatão+Epzt+Cb

! Furo Baixo

L,1,2 ! L1 - com estrutura
 L,2,3 ! L2 - sem estrutura

! Furo Cima

L,45,46 ! L3 - com estrutura
 L,46,47 ! L4 - sem estrutura

L,3,4 ! L5 - PAREDES EXTERNAS - Fixo
 L,4,8 ! L6
 L,8,9 ! L7 - (tem tbm impedancia unitaria a partir daqui)
 L,9,10 ! L8
 L,10,11 ! L9
 L,11,18 ! L10
 L,18,25 ! L11
 L,25,32 ! L12

L,3,7 ! L13 - FSI
 L,7,8 ! L14
 L,31,32 ! L15
 L,30,31 ! L16
 L,29,30 ! L17
 L,28,29 ! L18
 L,28,35 ! L19
 L,35,42 ! L20
 L,42,47 ! L21

L,35,36 ! L22 - PZT BAIXO
 L,36,37 ! L23

L,42,43 ! L24 - PZT CIMA

L,43,44 ! L25

A,1,2,6,5 ! Área 1 = Fluido sem estrutura
 A,5,6,13,12 ! Área 2
 A,12,13,20,19 ! Área 3
 A,19,20,27,26 ! Área 4
 A,26,27,34,33 ! Área 5
 A,33,34,41,40 ! Área 6
 A,40,41,46,45 ! Área 7
 A,13,14,21,20 ! Área 8
 A,14,15,22,21 ! Área 9
 A,15,16,23,22 ! Área 10
 A,16,17,24,23 ! Área 11

A,2,3,7,6 ! Área 12 = Fluido com estrutura

A,6,7,14,13 ! Área 13
 A,7,8,15,14 ! Área 14
 A,8,9,16,15 ! Área 15
 A,9,10,17,16 ! Área 16
 A,10,11,18,17 ! Área 17
 A,17,18,25,24 ! Área 18
 A,24,25,32,31 ! Área 19
 A,23,24,31,30 ! Área 20
 A,22,23,30,29 ! Área 21
 A,21,22,29,28 ! Área 22
 A,20,21,28,27 ! Área 23
 A,27,28,35,34 ! Área 24
 A,34,35,42,41 ! Área 25

A,41,42,47,46 ! Área 26

A,31,32,39,38 ! Área 27 = Latão
 A,30,31,38,37 ! Área 28
 A,29,30,37,36 ! Área 29
 A,28,29,36,35 ! Área 30

A,36,37,44,43 ! Área 31 = PZT
 A,35,36,43,42 ! Área 32

A,42,43,48,47 ! Área 33 = Alumínio
 A,3,4,8,7 ! Área 34

ALLSEL
 AGLUE,ALL

!=====
 ! APLICAÇÃO DOS MATERIAIS E ELEMENTOS
 !=====

```
ASEL,S,,,1,11 ! Propriedades do Fluido sem estrutura
AATT,3,,3
```

```
ASEL,S,,,12,26 ! Propriedades do Fluido com estrutura
AATT,3,,2
```

```
ASEL,S,,,31,32 ! Propriedades do PZTs
AATT,2,,1
```

```
ASEL,S,,,27,30 ! Propriedades do Latão
AATT,1,,4
```

```
ASEL,S,,,33,34 ! Propriedades do Alumínio
AATT,4,,5
```

```
ALLSEL
```

```
!=====
! GERAÇÃO DA MALHA
!=====
```

```
LESIZE, ALL,element
MSHKEY,1 !mapped meshing=1; mapped meshing IF POSSIBLE = 2
```

```
ALLSEL
ASEL,U,,,32
AMESH,ALL
```

```
ALLSEL
AMESH,32
```

```
!=====
! APLICAÇÃO DE FSI (Fluid-Solid Interface)
!=====
LSEL,S,,,13,21 !Linha entre latão e Fluido s/ estrutura
SFL,all,FSI
alls
```

```
!=====
! DEFINIÇÃO DE IMPEDÂNCIA UNITÁRIA NOS CONTORNOS DO MODELO
! (impede que a onda reflita)
!=====
LSEL,S,,,7,21
SFL,ALL,,IMPD,1
ALLS
```

```
!=====
```

```

! ACOPLAMENTO DOS NÓS DAS SUPERFÍCIES DOS PZTs
!=====

! (união dos nós ligados ao terra)
LSEL,S,,,22,23
NSLL,S,1
CP,1,VOLT,all
alls

! (união dos nós ligados ao Vcc)
LSEL,S,,,24,25
NSLL,S,1
*GET, N1,NODE,,NUM,MIN!pega o nó de menor valor e coloca em N1
CP,2,VOLT,all
alls

!LSEL,S,,,3,4 ! furo de cima
!NSLL,S,1
!CP,3,UY,ALL
!alls

!=====
! CONDIÇÕES DE CONTORNO
!=====
MOD_HARM = 1

! Simetria???

LSEL,S,,,5,12      ! Contorno fixo
NSLL,S,1           ! inclui a base inferior do latão
D,all,UX,0
D,all,UY,0
alls

!LSEL,S,,,18      ! Metal Engastado -
!NSLL,S,1
!D,all,UX,0
!D,all,UY,0
!alls

!LSEL,S,,,19,22,3  ! Simetria do atuador - tirar p/ teste?
!NSLL,S,1
!D,ALL,UX,0
!ALLS

LSEL,S,,,24,25     ! Voltagem - OFF
NSLL,S,1
D,all,VOLT,tensao

LSEL,S,,,22,23     ! Voltagem terra
NSLL,S,1

```

```
D,all,VOLT,0
```

```
LSEL,S,,1,4          ! Pressão nula
```

```
NSLL,S,1
```

```
D,all,PRES,0
```

```
alls
```

```
FINISH
```

```
!=====
```

```
! SOLUÇÃO
```

```
!=====
```

```
/SOLU
```

```
*IF,HARM,EQ,1,THEN
```

```
    ANTYPE, HARMIC
```

```
    KBC,1
```

```
    HARFRQ, FreqInicial,FreqFinal
```

```
    NSUBST, FreqPassos
```

```
*ELSE
```

```
    ANTYPE,MODAL
```

```
    MODOPT,UNSYM,10
```

```
*ENDIF
```

```
SOLVE
```

```
SAVE
```

```
!ALLS
```

```
!FINISH
```

```
!=====
```

```
! PÓS-PROCESSAMENTO (POST1)
```

```
!=====
```

C.2.3 post.txt

```
*IF,N1,EQ,0,THEN
```

```
    LSEL,S,,24,25
```

```
    NSLL,S,1
```

```
    *GET, N1,NODE,,NUM,MIN      !pega o nó de menor valor e coloca em N1
```

```
*ENDIF
```

```
*GET, NNosA,LINE,24,ATTR,NNOD
```

```
*GET, NNosB,LINE,25,ATTR,NNOD
```

```
NNos = NNosA+NNosB-1
```

```

/POST26

!RFORCE,2,N1,AMPS,,Carga Eletrica1 ! STORE CHARGES ON ELECTRODE N1=2066?

RFORCE,2,N1,CHRG,,Carga Eletrica2 ! STORE CHARGES ON ELECTRODE N1=2066?

PI2=(3.14159*2)

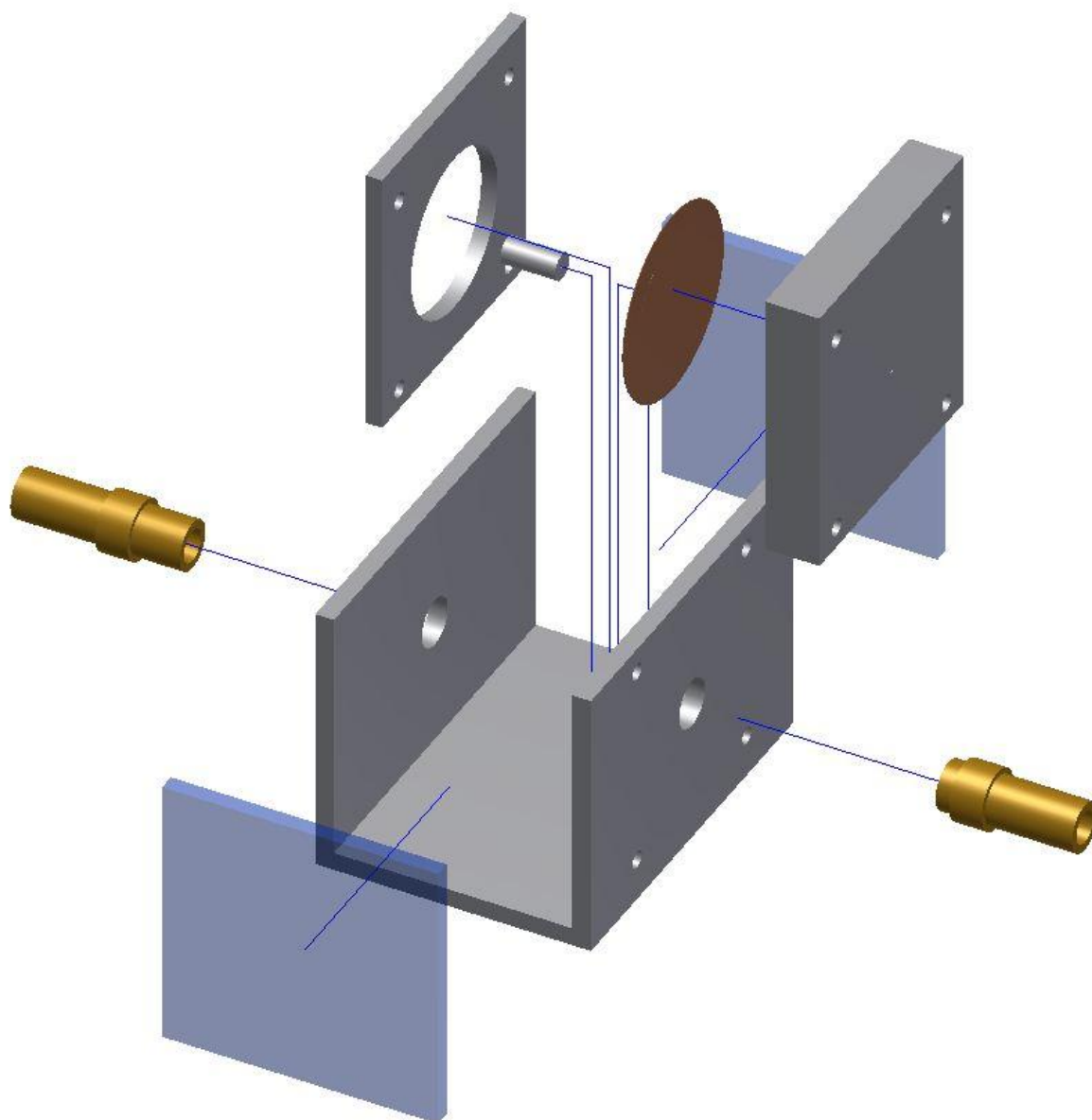
PROD,3,2,1,,ADMITV,,NNos,PI2 !  $Q \cdot F \cdot NNos \cdot 2 \cdot \pi$  . 25=NNós

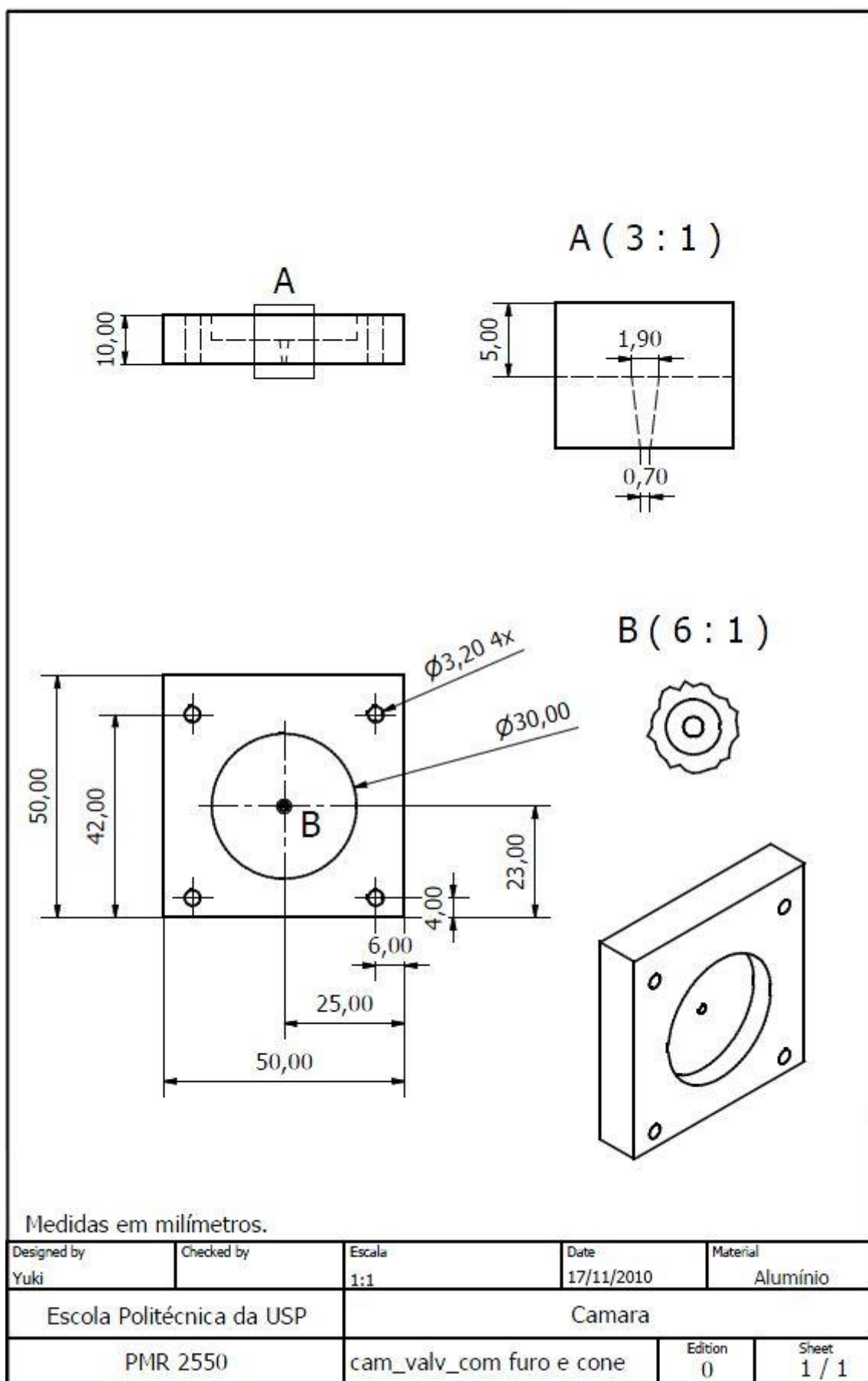
QUOT,4,3,,,Admitancia,,,1,tensao !Admitancia =  $w \cdot Q/V$ 

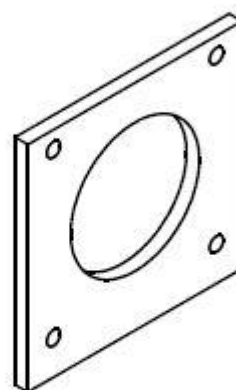
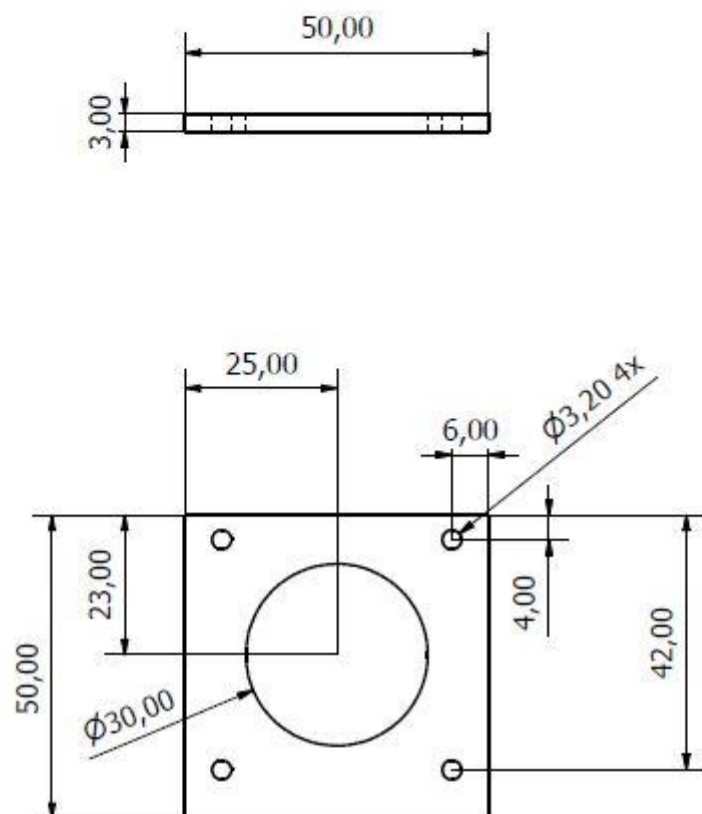
NSOL,6,node(Dmenor/2,Cb+Hcam,0),U,Y, Amplitude ! Nó do latão de deslocamento máx

```

APÊNDICE D - Desenhos Técnicos do Protótipo

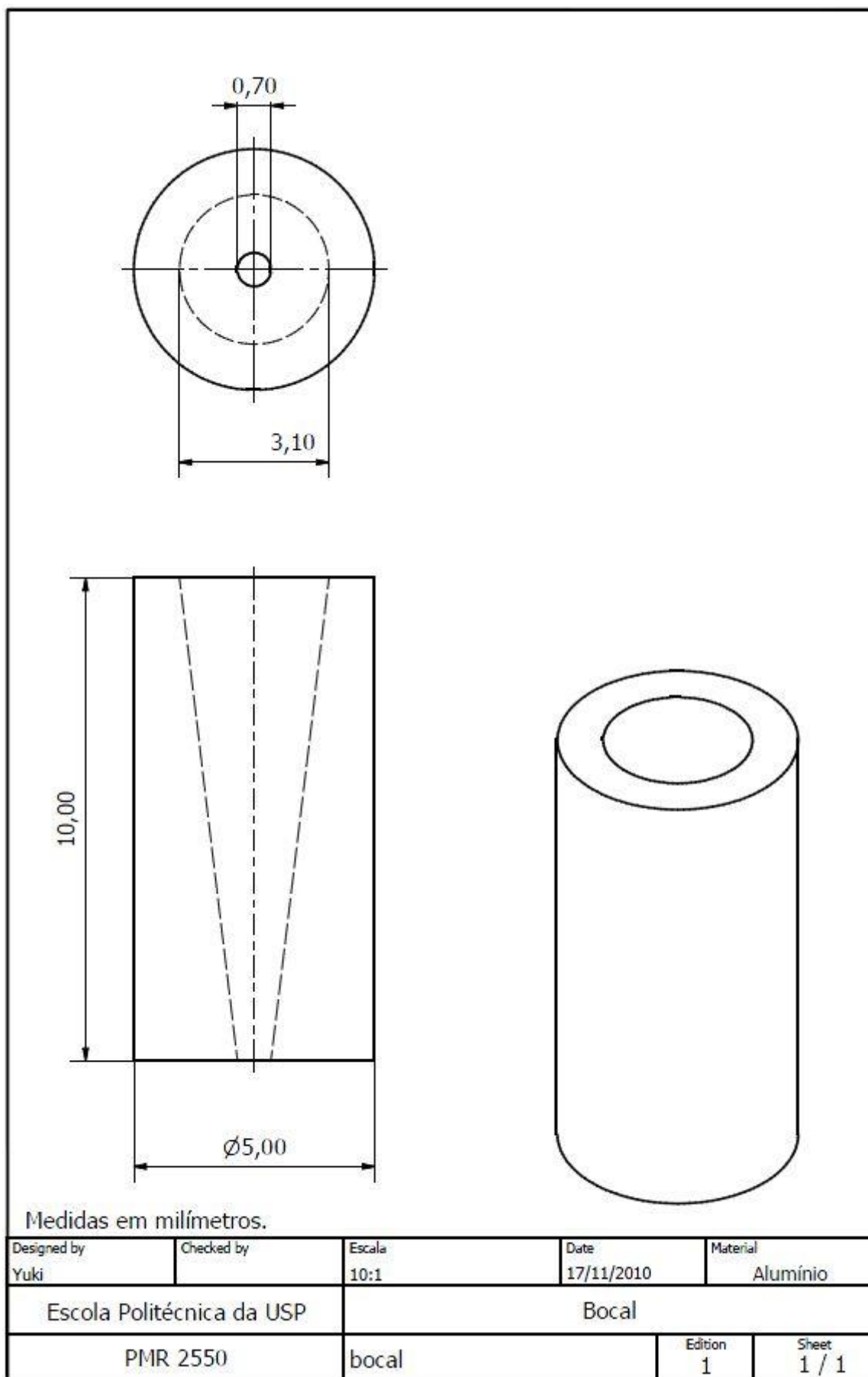


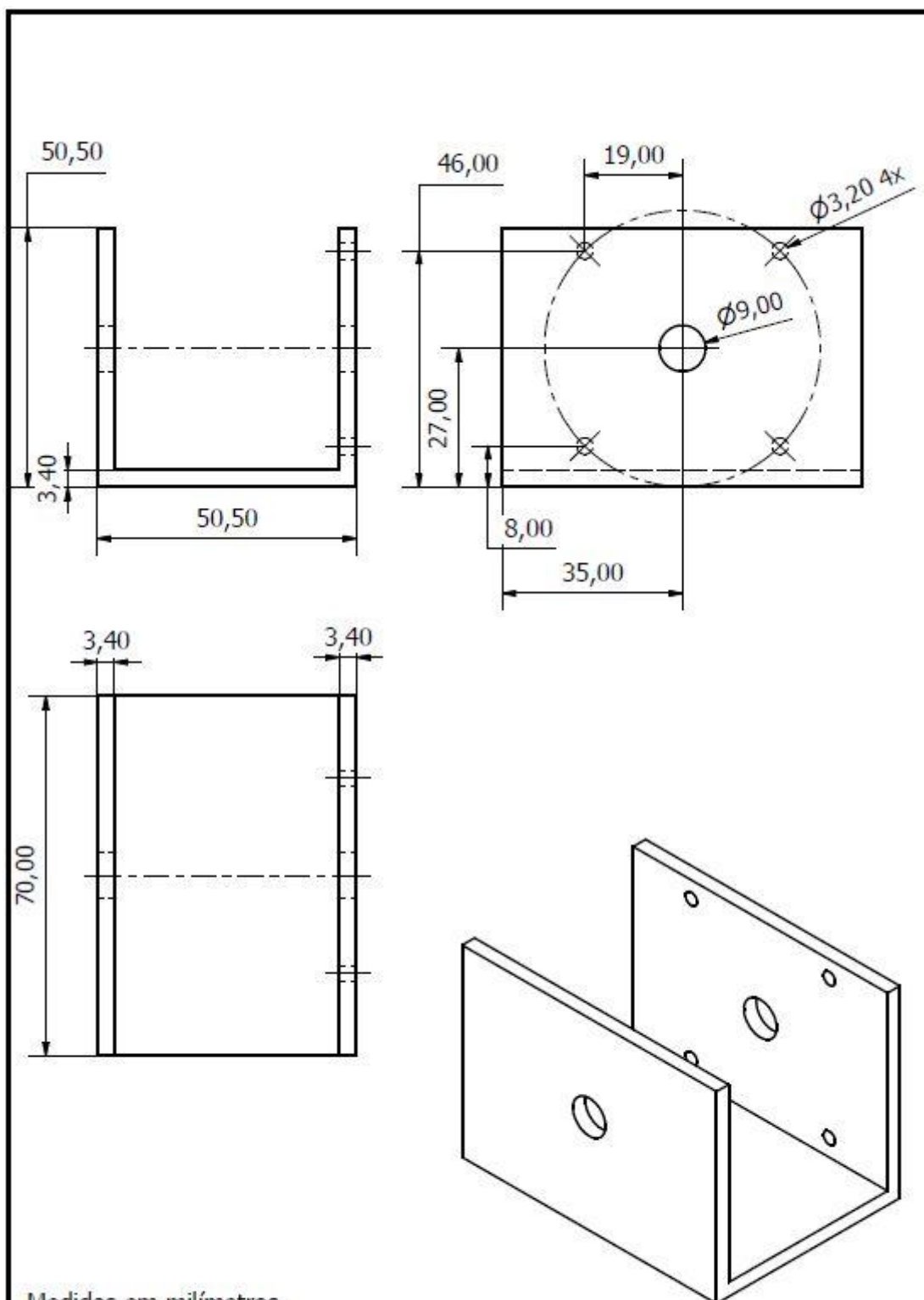




Medidas em milímetros.

Designed by Yuki	Checked by	Escala 1:1	Date 17/11/2010	Material Alumínio
Escola Politécnica da USP		Cabecote		
PMR 2550		cabecote_com_furo	Edition 1	Sheet 1 / 1





Medidas em milímetros.

Designed by Yuki	Checked by	Escala 1:1	Date 17/11/2010	Material Alumínio
Escola Politécnica da USP		Base		
PMR 2550		Base	Edition 1	Sheet 1 / 1