

FÁBIO ADHEMAR DA SILVA RAHAL

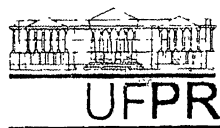
**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO  
MICROFLUÍDICOS DE FLUXO BIDIRECIONAL: PROVA DE  
CONCEITO**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e  
Ciência dos Materiais, Programa Interdisciplinar de  
Pós Graduação em Engenharia, Setor de  
Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Cyro Ketzer Saul

CURITIBA

2011

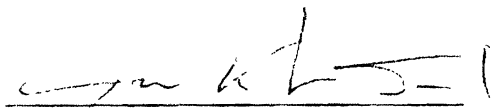


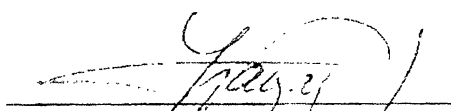
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais- PIPE  
Setor de Tecnologia

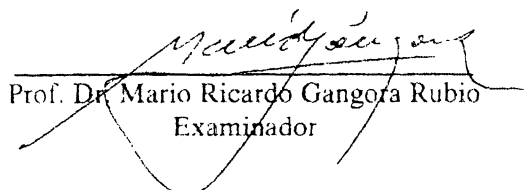
## RELATÓRIO DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aos cinco dias do mês de julho de 2011, no auditório do CEHPAR - no Centro Politécnico - UFPR, foi instalada pelo Prof. Dr. Dante Homero Mosca Jr., coordenador do PIPE - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, a Banca Examinadora para a ducentésima terceira defesa de dissertação de mestrado na área de concentração Engenharia e Ciência dos Materiais. Estiveram presentes no ato, além do coordenador do Curso de Pós-Graduação, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais, foi constituída pelos professores doutores: Cyro Ketzer Saul (UFPR), José Viriato Coelho Vargas (UFPR), Mario Ricardo Gangora Rubio (IPT-SP). Às 14:00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando o candidato **FÁBIO ADHEMAR DA SILVA RAHAL** a fazer a apresentação da dissertação de mestrado intitulada “**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO MICROFLUÍDICO DE FLUXO BIDIRECIONAL: PROVA DE CONCEITO**”. Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de arguição pelos membros participantes. Tendo em vista a dissertação e a arguição, a banca decidiu pela APROVAÇÃO do candidato, (de acordo com a determinação dos artigos 68 e 69 da resolução 65/09 de 09.11.2009).

Curitiba, 05 de julho de 2011.

  
Prof. Dr. Cyro Ketzer Saul  
Orientador

  
Prof. Dr. José Viriato Coelho Vargas  
Examinador

  
Prof. Dr. Mario Ricardo Gangora Rubio  
Examinador

Eu creio em mim mesmo, creio nos que trabalham comigo, creio nos meus amigos e creio na minha família. Creio que Deus me emprestará tudo que necessito para triunfar, contanto que eu me esforce para alcançar com meios lícitos e honestos. Creio nas orações e nunca fecharei meus olhos para dormir, sem pedir antes a devida orientação a fim de ser paciente com os outros e tolerante com os que não acreditam no que eu acredito. Creio que o triunfo é resultado de esforço inteligente, que não depende da sorte, da magia, de amigos, companheiros duvidosos ou de meu chefe. Creio que tirarei da vida exatamente o que nela colocar. Serei cauteloso quando tratar os outros, como quero que eles sejam comigo. Não caluniarei aqueles que não gosto. Não diminuirei meu trabalho por ver que os outros o fazem. Prestarei o melhor serviço de que sou capaz, porque jurei a mim mesmo triunfar na vida, e sei que o triunfo é sempre resultado do esforço consciente e eficaz. Finalmente, perdoarei os que me ofendem, porque compreendo que às vezes ofendo os outros e necessito de perdão.

Mahatma Gandhi

## Tabela de Figuras

Figura 2.1 - Gráfico relacionado ao desenvolvimento da microfluidica onde observa-se a evolução do número de publicações referentes ao assunto. Os dados foram obtidos da base isi knowlegde através de uma busca realizada com a palavra microfluidic. [4] .....	5
Figura 2.2 - Esquema geral de composição de um Lab-on-a-Chip, adaptado de [5].....	6
Figura 2.3 – a) Ilustração do sistema de detecção microfluídico e suas etapas e b) imagem de um sistema Point-of-care portátil [7]. .....	8
Figura 2.4 – Faixa de vazões associadas a cada princípio de bombeamento (atuação), adaptado de [9]. .....	9
Figura 2.5 – Categorização dos mecanismos de bombeamento referentes as microbombas, adaptado de [11]. .....	10
Figura 2.6 – Gráfico relacionado ao desenvolvimento das microbombas onde observa-se a evolução do número de publicações referentes ao assunto. Os dados foram obtidos da base isi knowlegde através de uma busca realizada com a palavra Micropump. [4] .....	12
Figura 2.7 – A esquerda a ilustração do funcionamento de uma microbomba com válvulas ativas e a direita a ilustração do funcionamento de uma microbomba com válvulas passivas, adaptado de [11]. .....	14
Figura 2.8 – a) Desenho esquemático de uma microbomba de deslocamento recíproco com microválvulas de retenção passivas e b) ilustração do seu funcionamento [10].....	16
Figura 2.9 – Lista das resistências hidráulicas para canais com diferentes formas de secção transversal. Os valores numéricos foram calculados utilizando-se os seguintes parâmetros: $\eta = 1$ mPa s (água), $L = 1$ mm, $a = 100$ $\mu$ m, $b = 33$ $\mu$ m, $h = 100$ $\mu$ m e $w = 300$ $\mu$ m. [51].....	28
Figura 2.10 – Acoplamento em série de dois canais com resistências hidráulicas $R_1$ e $R_2$ . [41] .....	29
Figura 2.11 – Acoplamento em paralelo de dois canais com resistências hidráulicas $R_1$ e $R_2$ . [51].....	29
Figura 3.1 – Fotografia da fresadora a laser de CO2, modelo LASER LS100 da Gravograph®.....	35
Figura 3.2 - Microcanal feito em polimetilmetacrilato PMMA , utilizando o modo vector e observado com microscópio óptico. A região A compreende ao topo do canal e tem aproximadamente 300 $\mu$ m e a região B compreende a base do canal com aproximadamente 100 $\mu$ m.....	36
Figura 3.3 – A esquerda um poço com 0,6 mm de profundidade, confeccionado no modo raster; A direita uma visão detalhada dos sulcos (da figura a esquerda) com dimensões de aproximadamente 100 $\mu$ m. Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura. ....	36
Figura 3.4 - Ilustração da Zona termicamente afetada ZTA e sua implicação na limitação dos diâmetros dos furos realizados pela fresadora a laser. ....	37
Figura 3.5 - A esquerda um exemplo do desenho projetado, de uma camada, utilizando o Corel Draw® que é utilizado na fresadora. A direita um desenho feito com o software Autodesk Inventor® que ilustra o resultado esperado após o processo de ablação. ....	38
Figura 3.6 - A esquerda os componente da microbomba, ao centro a camada que contém os flaps e a direita o dispositivo montado, todos desenhados no Inventor®.....	40

Figura 3.7 - Esquema do aparato experimental utilizado para detectar o funcionamento da microbomba.....	41
Figura 3.8 - Modelos de flaps utilizados no trabalho. Os modelos de 1 a 4 foram utilizados na primeira configuração da microbomba e os modelos 5 e 6 foram aplicados na segunda configuração.....	42
Figura 3.9 - A esquerda os componente do sistema de atuação desenvolvido para a microbomba desenhados no Inventor®, a direita as camadas que formam o sistema de válvulas e abaixo um desenho completo do dispositivo (sistema de atuação mais sistemas de válvulas). ....	44
Figura 3.10 - Acima uma ilustração da rotação da microbomba com relação ao referencial; abaixo fotos do dispositivo pronto, a esquerda na posição 1 e a direita na posição 2.....	45
Figura 3.11 - Representação do funcionamento da microbomba do modelo 3, utilizando esferas de isopor. Para a posição 1 temos a) a configuração inicial b) o passo de sucção e c) o passo de descarga; para a posição 2 temos d) a configuração inicial e) o passo de sucção e f) o passo de descarga. ....	47
Figura 3.12 - Ilustração da estrutura da câmara da esfera. ....	48
Figura 3.13 - Ilustração do funcionamento das câmaras da esfera, para as esferas de isopor, com relação a pressão fornecida de maneira senoidal (setas vermelhas). Obs.: O sentido da flecha indica o sentido em que a pressão está sendo fornecida. ....	48
Figura 3.14 - A direita o desenho do sistema de válvulas e a esquerda um desenho do sistema de atuação da microbomba ambos criados no Inventor®. ....	50
Figura 3.15 – Dimensões do sistema de atuação a esquerda e do sistema de válvulas a direita.....	50
Figura 3.16 - Representação do funcionamento da microbomba do modelo 4, utilizando esferas de aço, em um ciclo composto por dois passos, sendo a) passo de sucção e b) passo de descarga. ....	52
Figura 3.17 - A esquerda a montagem experimental destinada ao teste de pressão máxima e a direita o sistema de válvulas fixado em um suporte.....	54
Figura 3.18 - Esquema de montagem relacionado ao teste de pressão máxima. ....	55
Figura 3.19 - Ilustração do funcionamento da microbomba relacionado ao teste de pressão máxima. ....	56
Figura 3.20 - Esquema de montagem e funcionamento da microbomba relacionado ao teste de vazão. ....	58
Figura 3.21 – Foto do aparato experimental utilizado no teste referente as curvas características. ....	62
Figura 4.1 – a) Perfil cilíndrico reto, esperado para o canal que compõe a câmara da esfera b) perfil resultante, apresentando conicidade. ....	64
Figura 4.2 - Gráficos tridimensionais relacionados ao teste de pressão máxima utilizando esferas de vidro e diâmetros da câmara da esfera de 2,1 mm, sendo a) o resultado para a posição 1 e b) para a posição 2. ....	65
Figura 4.3 - Gráficos tridimensionais relacionados ao teste de pressão máxima utilizando esferas de isopor e diâmetros da câmara das esferas de 2,3 mm, sendo a) o resultado para a posição 1 e b) para a posição 2. ....	67

Figura 4.4 - Ilustração da área da secção transversal (em vermelho) disponível para a passagem do fluido no interior da câmara da esfera. As esferas (em branco) possuem um diâmetro fixo de 2 mm e as câmaras de esferas possuem diâmetros de (a) 2,1 mm, (b) 2,3 mm e (c) 2,5 mm. ....	68
Figura 4.5 - Gráficos tridimensionais relacionados ao teste de pressão máxima utilizando esferas de vidro e diâmetros da câmara das esferas de 2,3 mm, sendo a) o resultado para a posição 1 e b) para a posição 2. ....	69
Figura 4.6 - Gráficos tridimensionais relacionados ao teste de pressão máxima utilizando esferas de aço e diâmetros da câmara das esferas de 2,3 mm, sendo a) o resultado para a posição 1 e b) para a posição 2. ....	70
Figura 4.7 - Gráficos tridimensionais relacionados ao teste de pressão máxima utilizando esferas de vidro e diâmetros da câmara das esferas de 2,5 mm sendo a) o resultado para a posição 1 e b) para a posição 2. ....	72
Figura 4.8 - Gráficos tridimensionais relacionados ao teste de pressão máxima utilizando esferas de aço e diâmetros da câmara das esferas de 2,5 mm sendo a) o resultado para a posição 1 e b) para a posição 2. ....	73
Figura 4.9 - A esquerda um gráfico da vazão pela frequência, com a tensão constante em 30 V, e a direita um gráfico da vazão pela tensão, com a frequência constante em 20 Hz, ambos para o dispositivo com câmaras das esferas de 2,1 mm de diâmetro e utilizando esferas de vidro. Os pontos nos gráficos foram ligados apenas para facilitar a visualização.....	75
Figura 4.10 - A esquerda um gráfico da vazão pela frequência, com a tensão constante em 30 V, e a direita um gráfico da vazão pela tensão, com a frequência constante em 20 Hz, ambos para o dispositivo com câmaras das esferas de 2,3 mm de diâmetro e utilizando esferas de isopor. ....	76
Figura 4.11 - A esquerda um gráfico da vazão pela frequência, com a tensão constante em 30 V, e a direita um gráfico da vazão pela tensão, com a frequência constante em 20 Hz, ambos para o dispositivo com câmaras das esferas de 2,3 mm de diâmetro e utilizando esferas de vidro. ....	76
Figura 4.12 - A esquerda um gráfico da vazão pela frequência, com a tensão constante em 30 V, e a direita um gráfico da vazão pela tensão, com a frequência constante em 20 Hz, ambos para o dispositivo com câmaras das esferas de 2,3 mm de diâmetro e utilizando esferas de aço. ....	77
Figura 4.13 - A esquerda um gráfico da vazão pela frequência, com a tensão constante em 30 V, e a direita um gráfico da vazão pela tensão, com a frequência constante em 20 Hz, ambos para o dispositivo com câmaras das esferas de 2,5 mm de diâmetro e utilizando esferas de vidro. ....	77
Figura 4.14 - A esquerda um gráfico da vazão pela frequência, com a tensão constante em 30 V, e a direita um gráfico da vazão pela tensão, com a frequência constante em 20 Hz, ambos para o dispositivo com câmaras das esferas de 2,5 mm de diâmetro e utilizando esferas de aço. ....	78
Figura 4.15 – Gráfico da vazão pela frequência com relação ao material das esferas: isopor, aço e vidro, todos referentes a posição 1 e para configurações com 2,3 mm de diâmetros. ....	79
Figura 4.16 - Gráficos da vazão pela frequência com relação diâmetro da câmara da esfera: 2,1 mm, 2,3 mm e 2,5 mm, a) utilizando esferas de vidro e b) utilizando esferas de aço, todos referentes a posição 1. ....	80

Figura 4.17 – Comparação entre gráficos relativos aos testes de vazão a frequência constante, onde a) utilizou-se câmaras de 2,3 mm e esferas de vidro, b) câmaras de 2,5 mm e esferas de vidro e c) câmaras de 2,3 mm e esferas de aço.....	81
Figura 4.18 - Gráfico da massa/volume com relação ao tempo, a tensão constante em 30 V e a frequência constante em 30 Hz, para o dispositivo com câmaras das esferas de 2,3 mm de diâmetro e utilizando esferas a) de isopor, b) de vidro e c) de aço. ....	82
Figura 4.19 – Gráfico relacionando a vazão Q fornecida pela microbomba com a altura H associada a uma pressão externa atuando sobre a saída da microbomba, para vários valores de tensão fornecida ao atuador. ....	84
Figura 4.20 - Gráfico relacionando a vazão Q fornecida pela microbomba com a altura H associada a uma pressão externa atuando sobre a saída da microbomba, para os valores de tensão iguais a 30, 20 e 15V respectivamente.....	85
Figura 4.21 - Gráfico relacionando a vazão Q fornecida pela microbomba com a altura H associada a uma pressão externa atuando sobre a saída da microbomba, para os valores de tensão iguais a 10, 7 e 5V respectivamente. ....	86
Figura 4.22 - Gráfico relacionando a Potência útil fornecida pela microbomba com a altura H associada a uma pressão externa atuando sobre a saída da microbomba, para os valores de tensão iguais a 10, 7 e 5V respectivamente.....	89
Figura 4.23 - Gráfico relacionando a Potência útil fornecida pela microbomba com a altura H associada a uma pressão externa atuando sobre a saída da microbomba, para os valores de tensão iguais a 30, 20 e 15V respectivamente.....	89
Figura 4.24 - Esquema da válvula, na horizontal, utilizado no desenvolvimento da simulação. ....	91
Figura 4.25 – Representação da aproximação utilizada na simulação. ....	92
Figura 4.26 - Relação dos parâmetros ajustáveis na simulação.....	93
Figura 4.27 – Gráfico resultante da simulação, relativo às variações das pressões $P_1$ e $P_2$ nas respectivas câmaras 1 e 2.....	94
Figura 4.28 - Gráficos resultantes da simulação, onde: a) representa as acelerações b) representa as velocidades e c) representa as posições, das esferas 1 e 2 com relação ao tempo. ....	95
Figura 4.29 – Gráfico resultante da simulação, relacionado à vazão de fluido através de uma câmara, em um ciclo.....	96
Figura 4.30 – Gráfico resultante da simulação relacionado as alturas das colunas de fluido. ....	97
Figura 4.31 - Gráfico resultante da simulação referente a bidirecionalidade.....	98
Figura 4.32 - Gráfico resultante da simulação referente ao teste comparativo das pressões. ....	99
Figura 4.33 – Gráfico resultante da simulação referente a posição de uma das esferas com relação a pressão fornecida. ....	100
Figura 4.34 - Gráfico resultante da simulação referente ao teste comparativo das frequências. ....	101
Figura 4.35 - Gráfico resultante da simulação referente a posição de uma das esferas com relação a frequência.....	101
Figura 4.36 - Gráfico resultante da simulação referente ao teste comparativo dos diâmetros das câmaras.....	102

Figura 4.37 - Gráfico resultante da simulação referente ao teste comparativo dos materiais das esferas.....	103
Figura 4.38 - Gráfico resultante da simulação referente a posição de uma das esferas com relação a densidade da esfera.....	103
Figura 4.39 - Gráfico resultante da simulação referente ao teste de pressão máxima. ....	104
Figura 6.1 – Gráfico resultante dos cinco testes realizados, onde cada ponto representa um valor médio.....	108



## Lista de símbolos

$\rho$  - massa específica

$\vec{v}$  - velocidade

$\tau_{xy}$  - tensão cisalhante

$n$  - chamado de índice de comportamento do escoamento

$k$  - índice de consistência

$\mu$  - coeficiente de viscosidade absoluta ou viscosidade dinâmica

$\eta$  - coeficiente de viscosidade aparente do fluido

$p$  - pressão

$v$  - velocidade escalar do fluido

$l$  - comprimento característico do sistema

Re - número de Reynolds

$Re_t$  - número de Reynolds de transição

$\Delta p$  - diferença de pressão

$R_{hyd}$  - resistência hidráulica

$G_{hyd}$  - condutância hidráulica

Q - vazão

$\Delta V$  - diferença de potencial elétrico

R - resistência elétrica ou hidráulica

I - corrente elétrica

$R_{EQ}$  - resistência equivalente

$g$  - aceleração da gravidade

H - Altura da coluna de fluido

A - diâmetro da câmara da esfera

B - diâmetro do canal de entrada/saída do fluido

C - comprimento da câmara da esfera

$a$  - coeficiente angular

$b$  - coeficiente linear

P - potencia

$R_h$  - resistência hidráulica

$P_U$  - potência útil

$\gamma$  - peso específico do fluido

## Lista de siglas e abreviaturas

μTAS	Micro Total Analysis System
AIDS	Acquired immunodeficiency syndrome
DNA	Deoxyribonucleic acid
IBMP	Instituto de Biologia Molecular do Paraná
ICC	Instituto Carlos Chagas
INCT	Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia
LOC	Lab on a Chip
MEMS	Microeletromechanical systems
PDMS	Polidimetilsiloxano
PMMA	Polimetilmetacrilato
PZT	Piezoelétrico
ZTA	Zona termicamente afetada

## Resumo

A microfluídica desenvolveu-se nas últimas décadas tendo como uma de suas principais aplicações os dispositivos tipo “Lab-on-chip”. O INCT para Diagnósticos em Saúde Pública, criado no ano de 2008, iniciou o desenvolvimento de um sistema microfluídico do tipo “Point of Care” para diagnóstico rápido de diversas enfermidades. Durante o desenvolvimento desse sistema surgiu à necessidade de dominar e desenvolver técnicas relacionadas à microfluídica. Nesse contexto o bombeamento de fluidos, que é um dos pontos principais nesse tipo de sistema, foi considerado estratégico e portanto motivou o presente trabalho. Neste trabalho foram desenvolvidos dois modelos de microbombas de deslocamento recíproco empregando válvulas de retenção passivas compostas por esferas. Para a construção dos dispositivos foi utilizado o Polimetilmetacrilato (PMMA) usinado por ablação a laser de CO<sub>2</sub>. Os dispositivos apresentaram uma capacidade de bombeamento de fluido bidirecional, associada a fatores geométricos e posicionais, sendo esse fato inédito na literatura existente. Durante a caracterização dos dispositivos foram realizados os testes de pressão máxima, de vazão, assim como os testes necessários para determinação de suas curvas características. Os parâmetros avaliados foram: o diâmetro da câmara da esfera (2,1 mm, 2,3 mm e 2,5 mm); o material das esferas utilizadas (isopor, aço, vidro); a tensão e a frequência, fornecidas ao atuador. A configuração que apresentou os melhores resultados, no teste de pressão máxima, utilizou uma câmara com 2,3 mm de diâmetro e esferas de vidro apresentando valores máximos de aproximadamente 7200 Pa. Para os resultados dos testes de vazão as esferas de vidro também apresentaram os resultados mais satisfatórios, com uma faixa de vazão variando de 0,3 mL/min a 5,8 mL/min. Os valores de tensão de bombeamento utilizados foram de no máximo 30 V em uma faixa de frequências de 0-70 Hz. Os testes relacionados às curvas características da microbomba foram efetuados empregando esferas de vidro e a câmara com diâmetro de 2,3 mm. Os resultados mostraram uma relação linear entre a vazão fornecida pela microbomba e a pressão externa aplicada na saída da mesma, para valores de tensão abaixo de 10 V. Para tensões acima de 15 V surge uma não linearidade que provavelmente esta associada à limitação do percurso das esferas dentro das câmaras. Neste trabalho também foram realizadas simulações que possibilitaram a obtenção de informações complementares a respeito da relação entre os parâmetros variáveis da microbomba e o movimento das esferas no interior das câmaras (válvulas). Isto também permitiu analisar a relação entre o movimento das esferas e a eficiência de bombeamento. Com base nos resultados obtidos foi comprovada a capacidade de fornecimento de fluxo bidirecional, assim como potencial da microbomba em questão para aplicação em sistemas microfluídicos.

## Abstract

The development of microfluidics in the last decades has as one of its main drives the development of Lab-on-chip devices. The INCT for Public Health Diagnostics, created in 2008, started the development of a Point-of-Care microfluidic device aiming the rapid diagnostic of different diseases. During the development of this system it became evident the necessity of mastering both knowledge and techniques associated to microfluidics. Since pumping is one of the main issues in this realm, it became the focus and the motivation of this work. In this work two different models of reciprocating pumps, using sphere check valves, were developed. The fabrication of the devices was performed using (Polymethyl methacrylate) PMMA machined using CO<sub>2</sub> laser ablation. The devices presented bidirectional pumping capacity associated to geometric and positional factors, which is not known in the literature. During its characterization the tests included maximum pumping pressure, pumping rate, as well as all the testes necessary to obtain its characteristic curves. The evaluated parameters were: the sphere chamber diameter (2.1 mm, 2.3 mm and 2.5 mm); the sphere material (expanded polystyrene, steel and glass); and both voltage and frequency feeded to the actuator. The high pressure results were obtained with 2.3 mm chambers and the glass spheres reaching 7200 Pa. The glass spheres also performed better in the pumping rate tests leading to flows from 0.3 ml/min to 5.8 ml/min. The maximum voltage used was 30V within a frequency range from 0-70 Hz. The characteristic curves of the pumps were also measured using the 2.3 mm chamber and the glass sphere, and showed a linear correlation between the pumping rate and the column height (pressure) for pumping voltages below 10V. Above 15V the curves become non-linear probably due to displacement limitation of the spheres within the chamber. In this work we also developed simulations which allowed the gathering of complementary information on the micropump parameter correlation as well as the movement of the spheres within the chambers. It also allowed correlating the movement of the spheres and the pumping efficiency. Based on the obtained results the bidirectional capability of the pump was confirmed as well as its application potential for microfluidics systems.

# Sumário

1. Introdução .....	1
1.1. Motivação e objetivo.....	1
1.2. Organização .....	2
2. Revisão de literatura .....	4
2.1. Microfluídica .....	4
2.2. Microbombas .....	8
2.2.1. Definições .....	8
2.2.2. Características gerais .....	9
2.2.3. Classificação.....	10
2.2.4. Estado da arte .....	11
2.2.5. Microbomba de deslocamento recíproco .....	16
2.2.5.1. Microbombas utilizando válvulas de esferas .....	18
2.2.5.2. Microbombas bidirecionais .....	19
2.3. Introdução teórica.....	20
2.3.1. Conceitos fundamentais da Mecânica dos fluidos .....	20
2.3.1.1. Hipótese do contínuo e as propriedades de campo .....	20
2.3.1.2. Viscosidade, fluidos newtonianos e não-newtonianos .....	21
2.3.1.3. Descrição e classificação dos movimentos dos fluidos .....	23
2.3.1.3.1. Fluidos viscosos e não-viscosos.....	23
2.3.1.3.2. escoamentos Laminar e Turbulento .....	23
2.3.1.3.3. escoamentos Compressível e Incompressível .....	24
2.3.2. A equação de Navier-Stokes e o de fluxo de Poiseuille.....	24
2.3.2.1. O Número de Reynolds.....	25
2.3.3. Lei de Hagen–Poiseuille .....	27
2.3.4. Resistência hidráulica .....	27
2.3.5. Resistência hidráulica, para dois canais retos conectados.....	28
2.3.5.1. Dois canais retos conectados em série .....	28
2.3.5.2. Dois canais retos conectados em paralelo.....	29
2.3.6. Curvas características .....	30
3. Processo experimental .....	34
3.1. Materiais e métodos .....	34
3.1.1. Escolha dos materiais.....	34

3.1.2. Técnica de fabricação.....	35
3.1.3. Projeto e fabricação.....	37
3.1.4. Montagem e Colagem das camadas.....	38
3.2. Evolução do design.....	39
3.2.1. Modelo 1.....	39
3.2.2. Modelo 2.....	41
3.2.3. Modelo 3.....	42
3.2.4. Modelo 4.....	49
3.3. Montagem experimental.....	53
3.3.1. Teste de pressão máxima.....	53
3.3.2. Testes de vazão.....	57
3.3.3. Análise da curva característica.....	61
4. Resultados e Discussões.....	63
4.1. Resultados experimentais.....	63
4.1.1. Resultados dos testes de Pressão máxima.....	63
4.1.2. Resultados dos testes de vazão.....	75
4.1.3. Discussões gerais sobre os testes de Pressão máxima e de Vazão.....	83
4.1.4. Resultados dos testes que visam analisar as curvas características.....	84
4.2. Simulações computacionais.....	90
4.2.1. Resultados da simulação.....	93
5. Conclusão.....	105
6. Apêndices.....	108
Referências.....	112

# 1. Introdução

## 1.1. Motivação e objetivo

A manipulação de fluidos em canais de dimensões micrométricas tem emergido como um novo campo de pesquisa e tecnologia denominado Microfluídica. Nessas condições os fluidos comportam-se de maneira distinta ao usual e intuitivo, fato que possibilita inovações e desperta interesses na área. Em relação à sua aplicação, a Microfluídica está presente em áreas como: Química; análises biológicas e clínicas; células combustíveis; automação e controle industrial, tecnologias da informação e aplicações aeroespaciais. [1]

A Microfluídica dispõe de muitos dispositivos de aplicações práticas em forma de componentes unitários, por exemplo: microcanais; micromisturadores; microseparadores; microbombas; microcâmaras, microsensores, dentre muitos outros. Porém o grande trunfo da microfluídica é a possibilidade de integração de vários desses componentes microfluídicos, formando verdadeiros laboratórios miniaturizados, denominados Lab-on-a-chip.

O INCT (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia) para Diagnósticos em Saúde Pública, que envolve uma colaboração entre o Instituto Carlos Chagas (ICC-Fiocruz), o Instituto de Biologia Molecular do Paraná (IBMP), a Universidade Federal do Paraná e diversas outras instituições. Tem como um dos seus objetivos o desenvolvimento de um sistema para diagnóstico rápido de diversas enfermidades do tipo “Point of Care”. Esse tipo de sistema é um Lab-on-a-chip aplicado na área de diagnósticos e monitoramento relacionados à saúde.

Durante o desenvolvimento desse sistema surgiu à necessidade do aprimoramento com relação a técnicas e conhecimento a respeito da microfluídica, principalmente na parte de controle e manipulação dos fluidos. Nesse contexto o bombeamento de fluidos tornou-se um ponto interessante a ser estudado, e motivou o presente trabalho. Assim este trabalho está baseado em um componente que é fundamental para a maioria dos sistemas microfluídicos, a microbomba. Sua importância está relacionada ao fato de ser o componente que possibilita a movimentação dos fluidos no interior desses sistemas, de maneira controlada.

O ponto inicial do trabalho foi a reprodução de uma microbomba de modelo já conhecido da literatura, porém utilizando técnicas de fabricação e materiais diferentes. Após a sua construção a próxima etapa seria a caracterização da microbomba com o intuito de analisar a sua aplicabilidade nos sistemas microfluídicos.

Durante a construção da microbomba foram feitas varias modificações no modelo inicial, o que conduziu o trabalho ao desenvolvimento de um novo modelo com características próprias. Essas características estão relacionadas tanto ao desenho da microbomba quanto a sua funcionalidade, pois esse novo modelo possui a capacidade de fornecer um fluxo bidirecional de fluido. A bidirecionalidade associada a essa microbomba é atribuída a fatores geométricos, da estrutura da microbomba, e posicionais, pois o sentido do fluxo é invertido ao rotacionar a microbomba com relação ao referencial gravitacional.

Neste ponto os objetivos do trabalho foram direcionados a prova do conceito de bidirecionalidade da microbomba e para a caracterização da mesma.

## **1.2. Organização**

Para a apresentação do desenvolvimento do trabalho, esta dissertação foi estruturada na forma de capítulos.

O Capítulo 1 apresenta uma breve introdução sobre o presente trabalho bem como a organização do mesmo.

No Capítulo 2 é feita uma revisão da literatura visando à apresentação de conceitos ligados ao estudo da microfluídica e das microbombas. Também no Capítulo 2, é feita uma exposição do estado da arte nas pesquisas ligadas ao desenvolvimento das microbombas, bem como a apresentação dos conceitos teóricos utilizados nas simulações e análises dos resultados.

Inicialmente no Capítulo 3 são apresentados os pontos principais do processo de construção das microbombas, bem como a evolução ocorrida no design das mesmas, durante o trabalho. Também no Capítulo 3, são descritos os detalhes das montagens experimentais utilizadas, seguidos dos respectivos métodos utilizados para a execução das medidas de pressão máxima e de vazão, e obtenção das curvas características da microbomba.



Os resultados obtidos para cada um dos testes realizados no capítulo anterior são apresentados no Capítulo 4. Neste são realizadas as discussões e comparações de dados para cada um dos testes realizados, seguido das discussões de caráter geral. Por fim é apresentada a simulação computacional realizada bem como os resultados proporcionados por ela.

No Capítulo 5 é apresentado um conjunto de conclusões e perspectivas associadas ao presente trabalho. Todos os livros e artigos, citados em ordem numérica ao longo do texto, são mostrados ao final no capítulo Referências.

## 2. Revisão de literatura

### 2.1. Microfluídica

A Microfluídica é um campo multidisciplinar de pesquisa e tecnologia baseada na análise do comportamento, controle preciso e manipulação de volumes muito pequenos de fluidos em estruturas de dimensões micrométricas, bem como na fabricação e aplicação dessas estruturas.

A transição entre o macro e o micro não é bem definida e portanto é conveniente associar à microfluídica algumas características como: pequenos volumes de fluidos (pL à mL); pequenas dimensões das estruturas ( $\mu\text{m}$  à mm); escala dimensional onde os “efeitos micrométricos” predominam.

Quando trabalha-se nessas dimensões vários aspectos usuais no mundo macrométrico como os efeitos da gravidade e inércia, por exemplo, dão lugar a efeitos aqui denominados “efeitos micrométricos”, tais como: a tensão superficial; a capilaridade; o reduzido número de Reynolds (regime laminar) e suas implicações; a influência de campos elétricos sobre o movimento de fluidos; dentre outras.

Em termos de teoria a microfluídica pode ser entendida como um ramo da mecânica dos fluidos onde são considerados os efeitos da redução de escala dos sistemas e suas implicações. A Microfluídica estuda o comportamento dos fluidos nessas condições e como isso pode ser explorado em novas aplicações.

Dentre as definições encontradas na literatura temos que a Microfluídica compreende o estudo de fluidos simples ou complexos, mono ou multifásicos, que circulam em microssistemas artificiais, por exemplo, os que são fabricados utilizando as novas tecnologias<sup>1</sup>. [2]

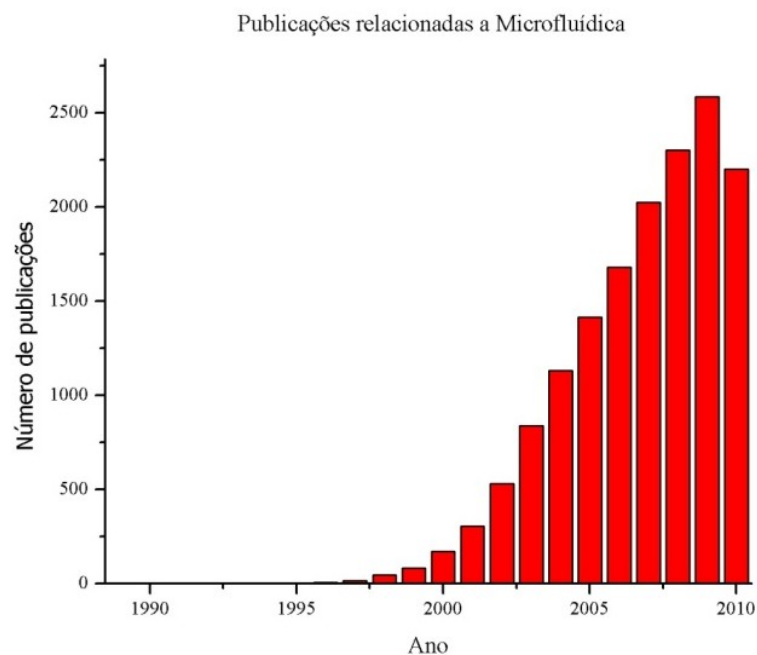
A microfluídica como um novo campo de conhecimento tem sua origem na década de 80 e pode ser considerada como fruto de quatro áreas principais: Análise molecular, Biologia molecular, Biodefesa e Microeletrônica. [1]

---

<sup>1</sup> As novas tecnologias mencionadas envolvem várias técnicas, incluindo fotolitografia, corrosão, deposição e microimpressão, que permitem a fabricação de sistemas miniaturizados. Estas tecnologias são consideradas “novas”, pois elas surgiram apenas na década de 70 e eram utilizadas na fabricação de circuitos integrados. [2]

Com o surgimento da Microfluídica como uma nova área de conhecimento e tecnologia surgem os primeiros interesses práticos e comerciais diretamente relacionados a ela, como nas pesquisas e desenvolvimento de cabeçotes de impressoras a jato de tinta, realizados pela IBM na década de 80. [3]

Na década de 90 os interesses na microfluídica apresentaram um grande crescimento, devido a suas características e versatilidade, principalmente sua capacidade de integração entre sistemas, difundindo-se nas diversas áreas de conhecimento.



**Figura 2.1 - Gráfico relacionado ao desenvolvimento da microfluídica onde observa-se a evolução do número de publicações referentes ao assunto. Os dados foram obtidos da base isi knowledge através de uma busca realizada com a palavra microfluidic. [4]**

A microfluídica dispõe tanto de componentes inovadores, desenvolvidos com base nos conceitos dessa área, quanto componentes baseados na miniaturização de equipamentos já existentes como: sistemas de purificação; concentração; separação; câmaras de isolamento e de reações, sensores e detectores. Porém, o grande trunfo nessa área é a capacidade de integrar vários desses componentes num único sistema, que associados a sistemas de detecção, dando origem ao conceito inicialmente de  $\mu$ TAS (Micro Total Analysis System), que atualmente é chamado de Lab-on-a-Chip. Estes são sistemas microfluídicos que possibilitam desde o processo de preparação até a análise de amostras num único sistema.

A filosofia dos Lab-on-a-Chip ou LOCs é ir da amostra-à-resposta (sample-to-answer) [5]. O diagrama a seguir (Figura 2.2) mostra um esquema de montagem geral de um LOC e através desse podemos entender melhor essa filosofia.

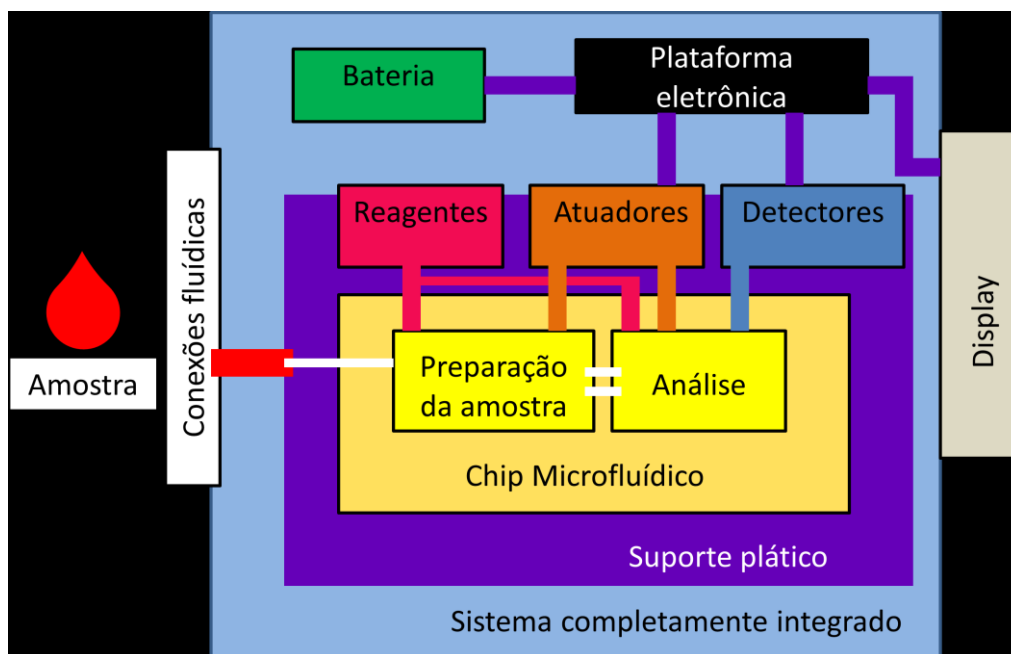


Figura 2.2 - Esquema geral de composição de um Lab-on-a-Chip, adaptado de [5].

As amostras são introduzidas nos chips através das conexões fluidicas. Os atuadores vão controlar o movimento dos fluidos (amostras, reagentes e rejeitos) nos microcanais que conectam as etapas do processo, a de preparação da amostra e a de análise. Inicialmente a amostra passa pela etapa de preparação que consta de componentes microfluídicos como filtros, câmaras de reações, de concentração e separação, etc. Em seguida pela etapa de análise que está associada aos detectores que podem ser químicos, de calor, detectores de para transdução óptica, etc. Os reagentes podem ser utilizados tanto na preparação das amostras como na análise, como por exemplo, quando se deseja marcar um analito com moléculas fluorescentes para uma posterior detecção.

Uma plataforma eletrônica controla o sistema (atuadores e detectores) e coleta os dados. A bateria garante o funcionamento da parte eletrônica e o display mostra os resultados das análises finalizando o processo. [5]

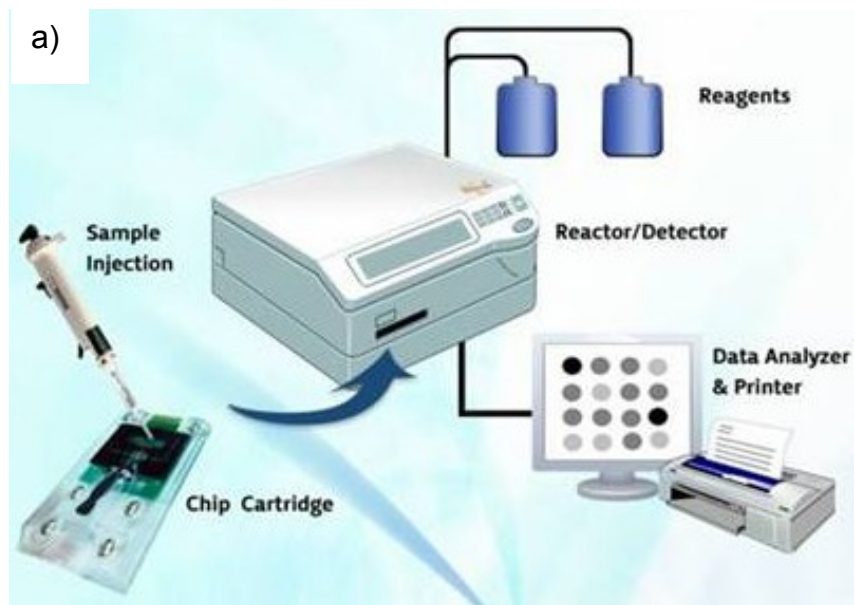
Algumas vantagens comuns dos LOCs são: as pequenas dimensões do sistema (a maioria entre alguns milímetros ou centímetros quadrados); o baixo consumo de fluidos (reagentes, amostras, baixa produção de resíduos); possibilita

transferências rápidas de calor e massa; possibilita análise com reduzido tempo de resposta; simplifica o processo de controle, devido à rápida resposta do sistema; o baixo consumo de energia. E dentre as desvantagens temos: os efeitos físicos como a capilaridade e a tensão superficial, dentre outros que dominam na microescala e podem tornar os processos mais complexos que nos equipamentos tradicionais; nem todos os dispositivos têm a mesma facilidade de miniaturização; as técnicas de microfabricação ainda necessitam de reduções de custos; a necessidade de desenvolvimento de novos materiais para suprir a sua grande variedade de aplicações. [6]

Os “point of care” são LOCs destinados a diagnósticos na saúde pública que, além das vantagens mencionadas anteriormente, possuem características como: pequeno peso e volume; estabilidade em condições ambientais variadas; alta confiabilidade (precisão laboratorial); rápido processamento; facilidade de transporte e armazenamento; simplicidade de operação. Estas características são extremamente importantes quando se fala de diagnósticos em regiões do mundo onde a tecnologia de laboratórios não está à disposição da maioria da população.

Atualmente cerca de 1 bilhão de pessoas no mundo não tem acesso a assistência médica nem água tratada e aproximadamente 15 milhões morrem anualmente vítimas de doenças como infecções respiratórias, AIDS/HIV, malária dentre outras. Muitos desses casos não chegam ser diagnosticados devido à precariedade e escassez de laboratórios nessas regiões. Atualmente os point-of-care possibilitam realizar teste como o de DNA, testes imunológicos, diagnósticos de vários tipos de doenças, com grande eficiência nessas regiões. [6]

Um dos modelos de dispositivos utilizado é baseado em chips microfluídicos (cartuchos) complexos, formados por vários componentes como microcanais, microbombas, misturadores, filtros, e etc. A amostra a ser analisada é inserida no cartucho e este por sua vez é colocado no analisador. Esses sistemas possibilitam os processos de preparação até a análise da amostra, como observado na Figura 2.3a, e também possuem versões portáteis Figura 2.3b.



b)



Figura 2.3 – a) Ilustração do sistema de detecção microfluídico e suas etapas e b) imagem de um sistema Point-of-care portátil [7].

## 2.2. Microbombas

### 2.2.1. Definições

No contexto dos sistemas microfluídicos este trabalho está focado em uma categoria de dispositivos fundamental para a maior parte deles, as microbombas. Segundo alguns autores [8], as microbombas servem como o coração da maioria dos Lab-on-a-chip, por fornecerem o fluxo dos fluidos utilizados nos mesmos.

Para delinear a diferença entre as microbombas e as bombas convencionais serão adotados dois critérios, seguindo a literatura disponível, que são: possuir

estruturas internas da ordem de micrometros e dimensões totais da ordem de milímetros a centímetros; fornecerem vazões inferiores a 10 mL/min [9]. Esses critérios têm a finalidade única de fornecer um ponto de referencia ao leitor e não a pretensão de estabelecer limites.

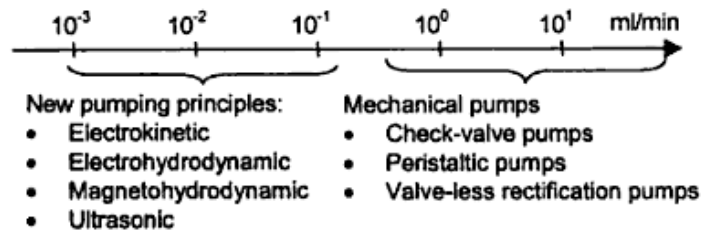


Figura 2.4 – Faixa de vazões associadas a cada princípio de bombeamento (atuação), adaptado de [9].

Para vazões maiores que 10 mL/min, bombas miniaturizadas comerciais são as soluções mais comuns. [9]

Alguns autores ainda utilizam como critério as técnicas de fabricação utilizadas, considerando que microbombas são microfabricadas, ou seja, que elas são fabricadas usando técnicas e ferramentas originalmente desenvolvidas para a indústria de circuitos integrados e técnicas relacionadas, por exemplo, fotolitografia e corrosão.

### 2.2.2. Características gerais

Podemos destacar nas microbombas dois componentes principais: os atuadores, que são responsáveis por fornecer a pressão ao fluido, e as válvulas, que são utilizadas para a retificação dos fluxos em alguns casos. As microbombas diferenciam-se com relação aos tipos e combinações desses elementos visando sempre o melhor desempenho para cada aplicação.

As características geralmente analisadas nas microbombas são: a pressão máxima de bombeamento fornecida; a faixa de vazão volumétrica; e o consumo de energia. Este último não será analisado nesse trabalho.

Outros fatores podem se tornar importantes de acordo com a sua aplicação tais como: o tempo de resposta característico; a insensibilidade a bolhas de gás; a biocompatibilidade; a capacidade de operações e situações adversas; a precisão; baixo custo de fabricação; facilidade de manutenção; dentre outros.

Atualmente a maioria das microbombas é desenvolvida para o bombeamento de líquidos e em muitos casos as propriedades dos líquidos influenciam diretamente no funcionamento da mesma. Assim como a presença de partículas no líquido (ex. células ou poeira) que podem causar problemas no seu funcionamento.

### 2.2.3. Classificação

Em geral as microbombas são classificadas de acordo com o método de atuação utilizado e estão agrupadas em duas categorias maiores: Bombas de deslocamento mecânico, que exercem pressão no fluido de trabalho através de uma ou mais partes móveis (membranas); Bombas dinâmicas, que adicionam energia continuamente ao fluido de trabalho de maneira que aumenta seu momentum (como no caso das bombas centrifugas) ou a pressão diretamente (como no caso das bombas eletro-osmóticas e eletro-hidrodinâmicas). [10]

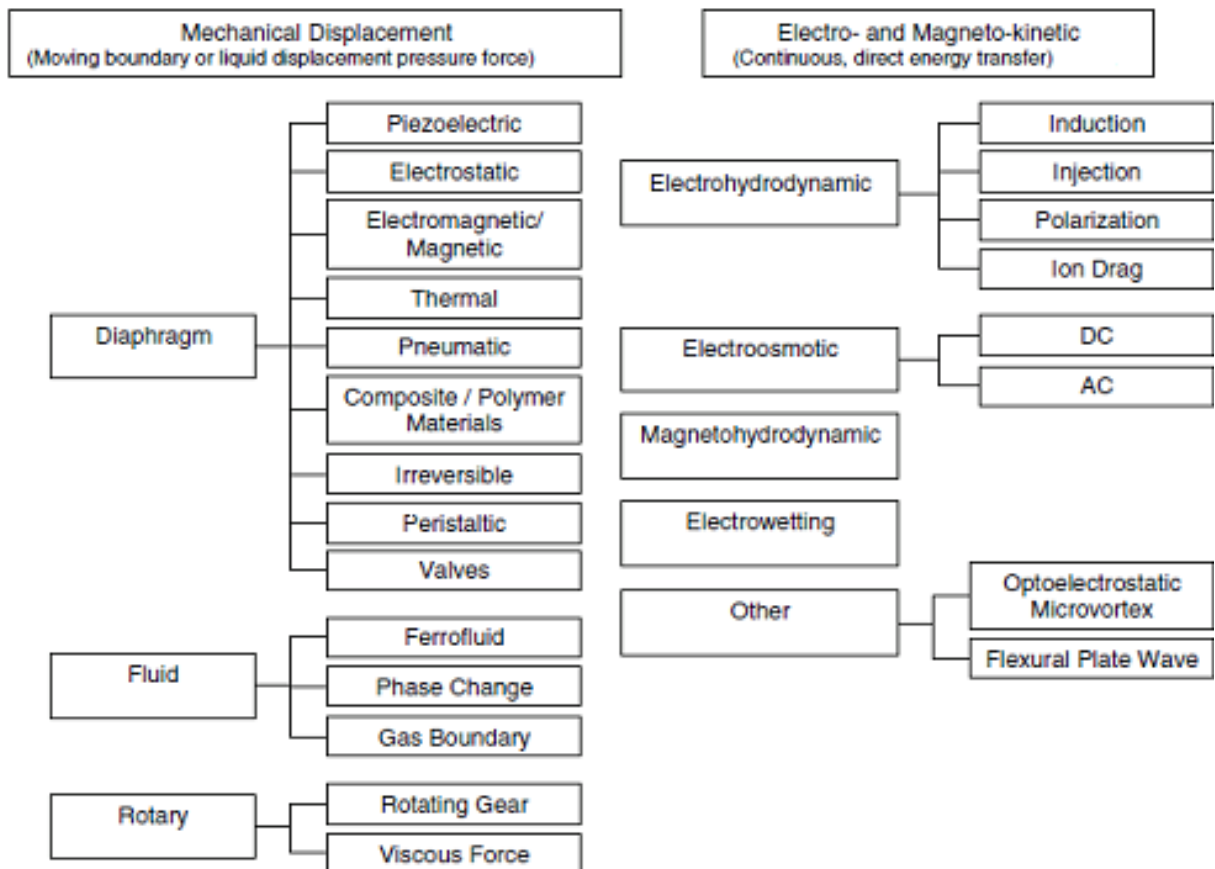


Figura 2.5 – Categorização dos mecanismos de bombeamento referentes as microbombas, adaptado de [11].



Muitas bombas de deslocamento operam de maneira periódica, incorporando algumas funções de retificação do movimento periódico do fluido para produzir um fluxo líquido. Tais bombas de deslocamento periódico podem ser subdivididas em bombas que são baseadas em movimentos recíprocos, assim como num pistão ou diafragma, e bombas que são baseadas em movimentos rotatórios tais como turbinas ou ventoinhas. Outra subcategoria de bombas de deslocamento são as de deslocamento não periódicos cujo funcionamento não depende do movimento perfeitamente periódico da superfície provedora de pressão. Bombas de deslocamentos não periódicos tipicamente bombeiam apenas um limitado volume de fluidos, a bomba de seringa é um exemplo macroscópico dessa categoria. [10]

As Bombas dinâmicas incluem as bombas centrífugas, como o nome sugere a pressão fornecida ao fluido provém da força centrífuga. As bombas em que campos elétricos interagem diretamente com o fluido de trabalho para gerar pressão e fluxo, como nas bombas eletro-hidrodinâmicas, eletro-osmóticas e ainda bombas magneto-hidrodinâmicas e microbombas de ondas acústicas (ultrassom). [10]

A Figura 2.5 apresenta uma visão geral a respeito da classificação das microbombas com relação ao seu mecanismo de operação.

O presente trabalho abordará apenas as microbombas de deslocamento recíproco. As demais serão abordadas apenas se contribuírem para a compreensão do texto.

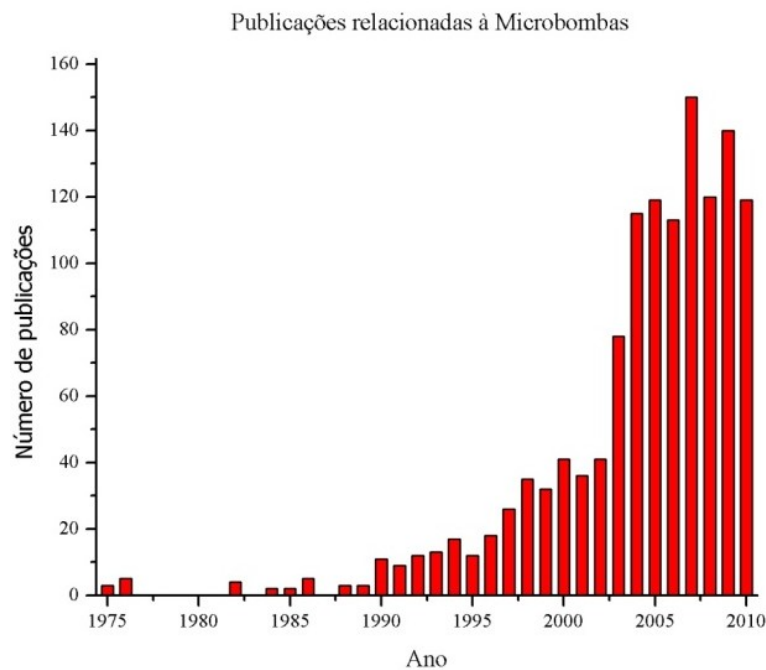
#### **2.2.4. Estado da arte**

Os primeiros trabalhos relacionados à microbombas foram relatados nos anos 70. Inicialmente, em 1975, por Thomas e Bessman [12], onde foi desenvolvida uma bomba miniaturizada para implantação no corpo humano, destinada ao fornecimento de insulina. Um segundo trabalho associado a bombas miniaturizada data de 1978 e é atribuído a Spencer [13]. Ambos os trabalhos utilizaram técnicas micromecânicas convencionais tais como a fresagem e a modelagem plástica, que predominaram dos anos 70 aos 80.

Porém na literatura alguns autores consideram que os primeiros trabalhos relacionados a esse assunto datam de 1984, quando foi depositada por J.G.

Smits a primeira patente de uma microbomba, também relacionada a fornecimento de insulina, fabricada com base nas técnicas de microfabricação de circuitos integrados [10]. E isso é devido ao fato de que alguns autores consideram os métodos de fabricação como um critério para classificação das microbombas.

Os trabalhos relacionados às microbombas foram impulsionados por essas novas técnicas de microfabricação e assim associa-se o início da evolução das microbombas aos trabalhos de Smits e de van Lintel [14]. Seguindo estes trabalhos pioneiros, muitos outros, especialmente os baseados nessas em tecnologias de fabricação de circuitos integrados, emergiram nos 20 anos seguintes (Figura 2.6).



**Figura 2.6 – Gráfico relacionado ao desenvolvimento das microbombas onde observa-se a evolução do número de publicações referentes ao assunto. Os dados foram obtidos da base isi knowlegde através de uma busca realizada com a palavra Micropump. [4]**

Como o desenvolvimento das microbombas ocorreu num intervalo de tempo relativamente curto fica difícil apresentá-lo numa ordem cronológica. Assim apresentaremos o desenvolvimento dos principais componentes das microbombas (atuadores e válvulas), citados anteriormente, suas aplicações e implicações.

Com relação aos atuadores de deslocamento mecânico, os primeiros a serem utilizados nas microbombas foram os piezoelétricos [13,14]. Os atuadores piezoelétricos fornecem uma grande força de bombeamento e possibilidade de trabalho numa grande faixa de frequências (Hz a kHz), porém tem como desvantagem a necessidade de altas tensões (acima de 100V) para um funcionamento satisfatório, devido ao baixo deslocamento fornecido.

No início da década de 90, um segundo tipo de atuador que passou a ser utilizado foi o termopneumático. Esse mecanismo de atuação fornece a possibilidade de trabalho com tensões menores que as utilizadas no caso anterior (por volta de 50 V), porém as frequências de operações são limitadas a uma pequena faixa em torno de 0 a 50 Hz [13].

Com o desenvolvimento nos estudos relacionados a microfluídica e o crescente número de aplicações associadas a ela, surge a necessidade de desenvolvimento de novos métodos de atuação para suprir as necessidades específicas de cada uma delas.

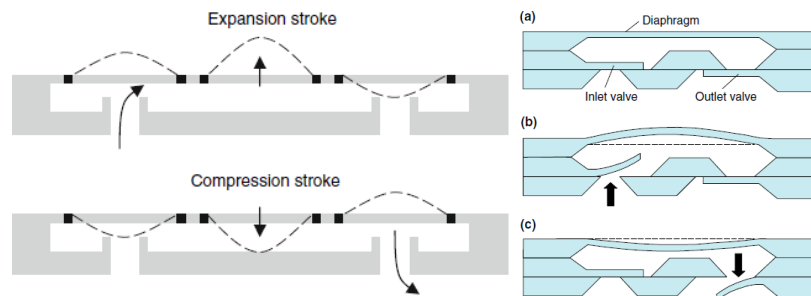
A partir da década de 90 vários outros métodos de atuação foram utilizados como: o pneumático; o eletrostático; o eletromagnético. Com relação ao atuador eletromagnético, este consiste geralmente de um ímã permanente fixado em uma membrana e envolvido por uma bobina. Suas vantagens são devido a simplicidade de construção e a utilização de baixas tensões (5V a 110V) em iguais condições aos outros atuadores apresentados.[10]

As aplicações de materiais inteligentes na construção de atuadores foram iniciadas em 1998 por Benard, que utilizou uma liga com efeito de memória de forma (*Shape-memory alloy*). Esses atuadores apresentam capacidade de fornecer altas vazões (mL/s) fornecer altas pressões (próximos a 1 MPa ou 10 atm) utilizando tensões baixas, porém também é limitado a baixas frequências, em torno de 100 Hz e apresenta como uma desvantagem o alto custo. [10,11]

Em muitas das microbombas, em que os atuadores funcionam de maneira periódica, torna-se necessária a utilização de mecanismos para a retificação do movimento (chaveamento) dos fluidos, para produzir um bombeamento efetivo. Esses mecanismos são as microválvulas. Essas válvulas podem ser classificadas em ativas, onde o processo de chaveamento necessita de fornecimento de energia e controle externo, e as microválvulas passivas, onde

não é necessário o controle dessas nem o consumo de energia. Esses modelos são denominados de geometria dinâmica, pois possuem mecanismos que se movem ou se deformam. [11]

As primeiras microválvulas relatadas foram válvulas de retenção (ou *check-valve*) ativas utilizadas [12], porém essas válvulas têm uma fabricação bem complicada. A primeira microbomba com válvulas de retenção passivas foi desenvolvida em 1988 por Van Lintel [33]. Nas microválvulas de retenção passivas alguns mecanismos foram propostos e utilizados como o *flap*, que consiste em uma peça móvel fixada em uma de suas extremidades utilizada para controlar a passagem do fluido por um orifício, e funcionar de maneira oscilatória (Figura 2.7). Os flaps apresentam vários modelos como: o *diafragma-ring mesa*; o *cantilever*; o *tethered plate*; etc [13].



**Figura 2.7 – A esquerda a ilustração do funcionamento de uma microbomba com válvulas ativas e a direita a ilustração do funcionamento de uma microbomba com válvulas passivas, adaptado de [11].**

Devido à capacidade de criar uma barreira física impedindo o retorno do fluido essas válvulas tendem a fornecer altas pressões de bombeamento comparadas aos demais métodos de retificação que foram ou serão apresentados. Alguns problemas apresentados por esse tipo de mecanismos, e relatados na literatura, são: o tempo de resposta para entrarem em sincronia com o atuador; a possibilidade desses flaps aderirem à área que circunda o orifício de passagem do fluido, causando uma falha no funcionamento; a possibilidade de falhas devido à fadiga do material, quando utilizados por um longo período de tempo. [10]

Além dos flaps foram utilizadas esferas para desempenhar essas funções. Utilizando as esferas minimiza-se o efeito da aderência do flap e o desgaste da

peça por fadiga, tendo em vista que não possui uma parte fixa, sujeita a uma carga aplicada de forma cíclica. [11]

Um importante avanço no design das microválvulas foi realizado em 1993 por Stemmes e Stemmes [10]. Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de chaveamento, ou retificação do fluido, sem a necessidade de válvulas, apenas utilizando aspectos geométricos e foi classificada como geometria fixada (*fixed-geometry*). Essa configuração proposta por Stemme foi denominada *diffuser/nozzle*. Outro modelo de geometria fixada é o Tesla que foi inicialmente proposto por Nicola Tesla em 1920 e utilizado em 1997 por Bardell. [10]

A partir de 1990, e paralelamente ao desenvolvimento das microbombas de deslocamento mecânico, outros métodos de bombeamento foram desenvolvidos. As microbombas que utilizam esses novos métodos não necessitam de válvulas e foram classificadas como microbombas dinâmicas. Estas diferenciam das demais, pois possibilitam uma transferência contínua de energia e conseqüentemente um fluxo praticamente estacionário. Essas microbombas têm deslocamentos baseados em vários princípios de funcionamento como o eletro-hidrodinâmico; o eletrocinético; o eletro-osmótico; o ultrasônico; o magnetohidrodinâmicos; e o eletroquímico [10, 11, 13]. Essas microbombas possuem algumas vantagens como: não possuem partes móveis; fornecem uma grande variedade de vazões, apresentam melhor desempenho em baixas vazões (abaixo de 100 $\mu$ L/min) do que as microbombas de deslocamento recíproco; em alguns casos são bidirecionais. Em geral são limitadas pela baixa pressão de bombeamento fornecida, porém em alguns casos podem fornecer pressões muito altas (10 MPa) como no caso das eletro-osmóticas . [11]

Algumas das aplicações iniciais das microbombas foram os sistemas de fornecimento de insulina, e atualmente essa aplicação continua sendo desenvolvida por alguns grupos [15,16]. Isso demonstra que mesmo os conceitos e tecnologias mais remotas da microfluídica continuam sendo investigadas.

As aplicações das microbombas estão intimamente ligadas ao desenvolvimento da microfluídica e assim como tal estão presentes em diversas áreas tais como: nos sistemas de análises químicas e biológicas [17-20]

estudos relacionados ao DNA [21-23], sistemas de controle térmico em dispositivos microeletrônicos [24-26], células combustíveis [27], aplicações aeroespaciais [28-32], dentre muitas outras.

### 2.2.5. Microbomba de deslocamento recíproco

O modelo apresentado na Figura 2.8 foi utilizado como ponto de partida para o presente trabalho, por isso optou-se por explicar um pouco mais sobre o mesmo. Esse é o modelo de uma microbomba de deslocamento recíproco utilizando válvulas de retenção passivas.

Os componentes dessa microbomba são a câmara de bombeamento (*pump chamber*), fechada de um lado pela membrana ou diafragma, um mecanismo de atuação (*actuator* ou *driver*) e duas válvulas de retenção passivas (*check-valves*), uma na entrada (ou lado da sucção) e outra na saída (lado de descarga).

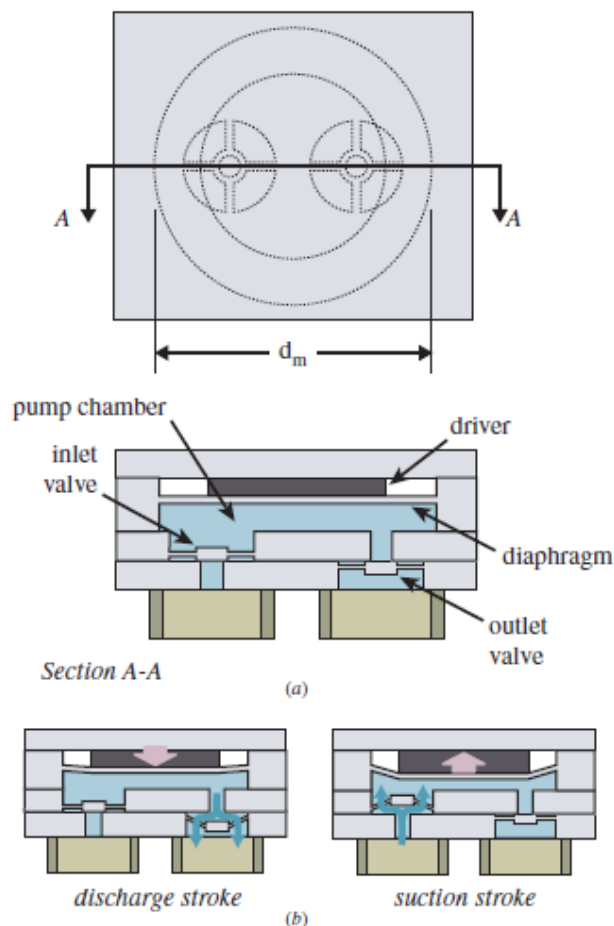


Figura 2.8 – a) Desenho esquemático de uma microbomba de deslocamento recíproco com microválvulas de retenção passivas e b) ilustração do seu funcionamento [10].

Durante a operação, o atuador age sobre a membrana de maneira cíclica, onde aumenta e diminui o volume da câmara de bombeamento também ciclicamente. O fluido enche a câmara durante a expansão da mesma, no passo de sucção, e é forçado a sair quando a câmara diminui o seu volume, no passo de descarga. As válvulas de retenção, na entrada e na saída, orientam o fluxo para dentro e fora da câmara de bombeamento, respectivamente, retificando o fluxo após um ciclo de dois passos.

A bomba de deslocamento recíproco mostrada na Figura 2.8 é construída com 4 camadas de materiais, mas microbombas feitas com 2 a 7 camadas de materiais já foram reportadas [10]. Materiais comuns na confecção de bombas de deslocamento incluem o silício, o vidro e polímeros.

A operação das microbombas de deslocamento recíproco frequentemente envolve a interação entre diversas áreas como eletromagnetismo, mecânica dos sólidos, mecânica dos fluidos, além das implicações microfluídicas. Por causa da complexidade dessas interações modelos analíticos do funcionamento das microbombas de deslocamento recíprocos não são facilmente encontrados. Uma das alternativas tem sido a comparação dos componentes das microbombas com componentes eletrônicos e analisar a microbomba como um circuito eletrônico composto por esses componentes. Modelos baseados em osciladores amortecidos de baixa ordem têm sido utilizados para a modelagem de alguns aspectos importantes na operação das microbombas [34-36]. A análise de elementos finitos também se tornou uma ferramenta muito útil nos estudos desses dispositivos. Em muitos casos a alternativa encontrada é a simulação de partes isoladas dos dispositivos considerando a dificuldade de integrá-los de maneira satisfatória. Pacotes comerciais de *softwares* como ANSYS e ALGOR têm sido utilizado para analisar as respostas dos diafragmas das microbombas submetidas a atuadores de força [37]. Uma variedade de aproximações numéricas e semianalíticas têm sido utilizadas nos estudos de fluxos de fluidos em microbombas de deslocamento recíprocos [38,39].

### 2.2.5.1. Microbombas utilizando válvulas de esferas

As microbombas de deslocamento mecânico se diferenciam basicamente pelo sistema de válvulas utilizado. Neste trabalho temos como principais modelos de sistemas de válvulas os que utilizam flaps e os que utilizam esferas.

O uso de esferas no sistema de válvulas de microbombas foi reportado pela primeira vez em 1995 por Carozza [40]. Outros grupos também adotaram o uso das esferas, porém utilizando métodos de fabricação, materiais e modelos diferentes de microbombas. Alguns dos trabalhos presentes na literatura apresentam interessantes informações com relação à miniaturização desse tipo de microbombas [41-43], além de modelos matemáticos baseados em osciladores amortecidos de segunda ordem, para descrever o seu funcionamento [42].

Alguns dos resultados encontrados na literatura relacionados à microbombas de deslocamento recíproco, utilizando válvulas de regulação passivas de esferas, estão dispostos na Tabela 1.

<b>Autor</b>	<b>Atuador</b>	<b>Válvulas</b>	<b>Vazão (mL/min)</b>	<b>Pressão máxima (kPa)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Frequência (Hz)</b>
<b>Carozza [40]</b>	Piezelétrico	Esferas	max 2,7	2,5	300	70
<b>Tingrui [41]</b>	Eletromagnético (microbobina)	Esferas	0,1 – 0,8	7,5	-	4
<b>Tingrui [41]</b>	Eletromagnético (micromotor)	Esferas	0,1 – 1	3,6	-	5,9
<b>Yamahata [42]</b>	Eletromagnético (microbobina)	Esferas	max 5	28	37	20
<b>Shen [43]</b>	Eletromagnético (microbobina)	Esferas	max 6.0	35	~30	20

**Tabela 1 – Algumas informações encontradas na literatura para microbombas utilizando esferas no sistema de válvulas.**

A utilização de esferas no sistema de válvulas está presente em poucos trabalhos encontrados na literatura, comparado aos demais sistemas. Alguns dos fatores atribuídos a isso podem ser a dificuldade de fabricação e de miniaturização.



As microbombas que utilizam esses sistemas são apropriadas para aplicações que necessitam de vazões relativamente altas, na faixa de mL/min, e tensões baixas (menores que 100 V).

### 2.2.5.2. Microbombas bidirecionais

Outro ponto relevante para o trabalho desenvolvido é a capacidade da microbomba de fornecer um fluxo bidirecional. As microbomba bidirecionais se diferenciam dos demais modelos devido ao fato de possuírem um mecanismo que possibilita alterar o sentido do fluxo de fluido fornecido.

Na literatura atual ainda são poucos os trabalhos relacionados à microbombas bidirecionais. Dentre os trabalhos encontrados esses se diferenciam pelo mecanismo utilizado para inverter o sentido do fluxo. Um desses mecanismos é baseado na sincronia do movimento dos flaps com relação à frequência de oscilação do atuador [45,46]. No caso das microbombas de movimentos peristálticos o sentido do fluxo pode ser invertido simplesmente alterando os sinais elétricos fornecidos aos piezos [47,48]. Temos ainda na literatura um dispositivo onde a inversão do fluxo é baseada na geometria do sistema e na utilização de dois atuadores piezelétricos [44].

Alguns dos resultados encontrados na literatura relacionados à microbombas de deslocamento recíproco bidirecionais estão dispostos na Tabela 2.

<b>Autor</b>	<b>Atuador</b>	<b>Válvulas</b>	<b>Vazão (mL/min)</b>	<b>Pressão máxima (kPa)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Frequência (Hz)</b>
Zengerle [45]	Eletrotático	flaps	Normal 0,85 Reverso 0,2	Normal 31 Reverso 7	200	-
Luo [46]	Piezelétrico bimorfo	Flaps	Normal 16,4 Reverso 5,1	Normal 15 Reverso -	150	620
Lee [47]	Piezelétrico	Peristáltico	~0,012	-	120	10
Doll [48]	Piezelétrico	Peristáltico	1,8	60	250	27,8
Yoon [44]	Membranas Piezelétricas	Geometria fixa	0,3	0,3	385	130

**Tabela 2 – Algumas informações encontradas na literatura com relação à microbombas bidirecionais.**

As microbombas bidirecionais apresentam potencial para serem multifuncionais, atuando tanto no transporte como na mistura de fluidos [45]. Alguns estudos mostram a sua aplicabilidade nos LOCs e nos Point-of-Care [46]. E um caso específico de aplicação encontrado foi na criação de uma prótese de esfíncter artificial [48].

## **2.3. Introdução teórica**

Com relação aos conceitos teóricos aplicáveis ao estudo da microbomba em questão foram selecionados apenas os de maior relevância para a compreensão do trabalho. Conceitos e análises mais aprofundadas podem ser encontrados nos textos que constam nas referências bibliográficas.

### **2.3.1. Conceitos fundamentais da Mecânica dos fluidos**

Serão apresentados a seguir, de forma breve, alguns conceitos fundamentais para a mecânica dos fluidos, e posteriormente as considerações aplicáveis a microfluídica.

#### **2.3.1.1. Hipótese do contínuo e as propriedades de campo**

A mecânica dos fluidos clássica tem como base a hipótese do contínuo para os fluidos [49]. Essa hipótese desconsidera a natureza molecular dos fluidos considerando-o um meio contínuo e indefinidamente divisível [50]. Como consequência, cada propriedade do fluido como a massa específica, temperatura, velocidade, pressão, assume um valor definido em cada ponto no espaço e são consideradas funções contínuas da posição e do tempo.

A hipótese do contínuo conduz diretamente a noção campo de massa específica, que em coordenadas retangulares, pode ser representada como:

$$\rho = \rho(x, y, z, t)$$

Outras propriedades dos fluidos também podem ser descritas por meio de campos.

A hipótese do contínuo também conduz ao conceito de *partícula (ou elemento) de fluido*<sup>2</sup>, muito utilizado na mecânica dos fluidos, principalmente na descrição do campo de velocidade. A representação do campo velocidade, em coordenadas retangulares, é dada por

$$\vec{v} = \vec{v}(x, y, z, t)$$

O vetor velocidade escrito em termos de seus componentes escalares, pode ser apresentado como

$$\vec{v} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k}$$

Onde os componentes nas direções  $x, y, z$  são denotados por  $u, v, w$ . Em geral, cada um dos componentes  $u, v, w$ , serão função de  $x, y, z, t$ .

Para o caso particular onde as propriedades em cada ponto de um campo de escoamento não mudam com o tempo, o escoamento é denominado *permanente*.

No escoamento de fluidos estão envolvidas tanto *forças superficiais* quanto as de *campos* (ou de *volume*). As forças superficiais atuam nas fronteiras de um meio através do contato direto, como a tensão superficial e a viscosidade. As forças desenvolvidas sem contato físico, e distribuídas por todo o volume do fluido, são denominadas forças de campo. As forças gravitacionais e eletromagnéticas são exemplos de *forças de campo*. [51]

As tensões num elemento de fluido resultam das forças que atuam em alguma posição dele, O conceito de tensão fornece uma forma conveniente de descrever o modo pelo qual as forças atuantes nas fronteiras do elemento de fluido são transmitidas através dele.

### **2.3.1.2. Viscosidade, fluidos newtonianos e não-newtonianos**

Um fluido pode ser definido como uma matéria que se deforma continuamente sob a ação de uma tensão de cisalhamento. Na ausência

---

<sup>2</sup> Uma pequena massa de fluido associada a um elemento, maior que as dimensões moleculares, porém pequeno em relação a as dimensões físicas do sistema, de tal modo que seja válida a descrição diferencial para o mesmo [artigo].

desta não haverá deformação. Os fluidos podem ser classificados, de modo geral, de acordo com a relação entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de deformação [49]; e também dessa relação temos a origem do conceito de viscosidade do fluido.

Várias equações empíricas foram propostas para modelar as relações observadas entre a tensão cisalhante e taxa de deformação por cisalhamento (ou gradiente de velocidade) para fluidos com comportamento independente do tempo [49]. Essas relações podem ser adequadamente representadas por (1), para um escoamento unidimensional, laminar e assumindo condições de não-eskorregamento<sup>3</sup>.

$$\tau_{xy} = k \left( \frac{du}{dy} \right)^n \quad (1)$$

Onde  $\tau_{xy}$  é a tensão cisalhante,  $\frac{du}{dy}$  é taxa de deformação por cisalhamento (ou gradiente de velocidade), o expoente  $n$  é chamado de índice de comportamento do escoamento e o coeficiente  $k$  é o índice de consistência [49].

Para o caso em que  $n = 1$  com  $k = \mu$  esta equação recai numa relação linear entre a tensão cisalhante e taxa de deformação, denominada lei de Newton da viscosidade descrita pela equação (2).

$$\tau_{xy} = \mu \frac{du}{dy} \quad (2)$$

A constante de proporcionalidade  $\mu$  é chamada de *viscosidade absoluta* ou *viscosidade dinâmica*. Os fluidos onde esta relação linear é obedecida são denominados *fluidos newtonianos*. [49]

Para os casos onde  $n \neq 1$ , a relação entre a tensão cisalhante e taxa de deformação deixa de ser linear, e os fluidos que apresentam este comportamento são denominados *fluidos não newtonianos*.

---

<sup>3</sup> A aderência dos fluidos às fronteiras sólidas tem sido observada experimentalmente e é um fato muito importante na mecânica dos fluidos. Usualmente, esta aderência é referida como condição de não skorregamento. Todos os fluidos, tanto líquidos e gases, satisfazem esta condição [munson].

A equação (1) pode ser reescrita na forma:

$$\tau_{xy} = k \left| \frac{du}{dy} \right|^{n-1} \frac{du}{dy} = \eta \frac{du}{dy} \quad (3)$$

Onde o coeficiente  $\eta$  é denominado *viscosidade aparente* do fluido e é dado por:

$$\eta = k \left| \frac{du}{dy} \right|^{n-1} \quad (4)$$

Assim, a equação (3) (fluidos não-newtonianos) apresentará a mesma forma da equação (2) (fluidos newtonianos), apenas substituindo a viscosidade newtoniana  $\mu$  pela viscosidade aparente  $\eta$ . Com essa modificação é notável que a diferença é que, enquanto  $\mu$  é constante (exceto para efeitos de temperatura),  $\eta$  depende da taxa de cisalhamento. [52]

### **2.3.1.3. Descrição e classificação dos movimentos dos fluidos**

A mecânica do fluido possui uma classificação com relação ao movimento dos fluidos, que tem por base as características físicas observáveis dos campos de escoamento.

#### **2.3.1.3.1. Fluidos viscosos e não-viscosos**

A principal subdivisão é indicada entre escoamentos viscosos e não viscosos. Os escoamentos onde são desprezados os efeitos da viscosidade são denominados não-viscosos, casos contrários são *viscosos*. No caso dos não-viscosos, a viscosidade do fluido  $\mu$ , é admitida como igual a zero.

#### **2.3.1.3.2. Escoamentos Laminar e Turbulento**

Os regimes de escoamentos viscosos são classificados em laminar ou turbulento, tendo por base a sua estrutura. No regime laminar, a estrutura do escoamento é caracterizada pelo movimento suave em camadas lisas ou lâminas. A estrutura no regime turbulento é caracterizada pelo movimento aleatório, de partículas fluídicas, devido a flutuações aleatórias no campo tridimensional de velocidades.

Em um escoamento laminar unidimensional, a tensão de cisalhamento está relacionada com o gradiente de velocidade, pela lei de Newton da viscosidade, dada por

$$\tau_{xy} = \mu \frac{du}{dy}$$

No escoamento turbulento essa equação simples não é válida. Para escoamentos turbulentos não existem relações universais entre o campo de tensões e o campo de velocidade média, assim utilizam-se teorias semi-empíricas e dados experimentais. [49]

### **2.3.1.3.3. Escoamentos Compressível e Incompressível**

O escoamento é dito *incompressível* quando as variações na massa específica são desprezíveis, caso contrário é *compressível*. Os gases são considerados fluidos com escoamento compressível, ao passo que os líquidos, em geral, possuem escoamento incompressível. Alguns fatores fazem a massa específica aumentar ou diminuir. Os principais fatores são a temperatura e pressão. Para os líquidos, a temperatura tem pouca influência sobre a massa específica e sob pressões moderadas os líquidos podem ser considerados incompressíveis. [49]

### **2.3.2. A equação de Navier-Stokes e o de fluxo de Poiseuille**

As equações regentes para a hidrodinâmica podem ser derivadas de equações fundamentais da mecânica não relativística, que descrevem a conservação da massa, o *momentum* e a energia [50]; levando em consideração as hipóteses e conceitos apresentados anteriormente.

A equação que descreve o movimento dos fluidos é obtida através da combinação das equações diferenciais de conservação da massa e do momentum.

Considerando um fluido newtoniano, isotrópico e incompressível, e desconsiderando a ação de forças de campos; a equação que descreve o movimento, para um campo de velocidade de Euler, é denominada equação de

Navier-Stokes para fluidos newtonianos e incompressíveis, que na forma vetorial apresenta-se como:

$$\rho [\partial_t \vec{v} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v}] = - \vec{\nabla} p + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (5)$$

Onde:

$\rho$ : é a massa específica

$\vec{v}$  : é a velocidade do fluido

$p$  : é a pressão

$\mu$ : é a viscosidade absoluta do fluido

O lado esquerdo da equação (5) está relacionado com o *momentum* e as forças inerciais e o lado direito com a pressão e a força de viscosidade. Essa equação, na sua forma completa, não possui solução analítica, porém existem algumas condições de contorno que a tornam analiticamente solúvel para alguns casos específicos.

A condição utilizada na microfluídica é a de baixas velocidades dos fluidos (menor que a velocidade do som), o que possibilita desprezar o termo não linear  $\rho(\vec{v} \cdot \vec{\nabla})\vec{v}$  da equação em questão. Com isto entra-se no regime chamado de fluxo laminar, onde as soluções analíticas para uma série de problemas de fluxo podem ser encontradas. [51]

Uma dessas soluções analíticas da equação de Navier-stokes resulta num escoamento denominado de fluxo de Poiseuille ou Poiseuille-Hagen, que considera: um escoamento laminar completamente desenvolvido, em regime permanente, de um fluido newtoniano, incompressível, num canal reto, acionado por uma diferença de pressão entre as duas extremidades do mesmo [51]. Esta solução foi a escolhida para descrever o fluxo de fluido no sistema analisado nesse trabalho, principalmente na simulação computacional.

### **2.3.2.1. O Número de Reynolds**

O número de Reynolds é uma grandeza adimensional, importante na mecânica dos fluidos, obtido através da equação de Navier-Stokes. Para um

fluido newtoniano, incompressível, com densidade uniforme, o número de Reynolds é dado por:

$$Re \equiv \frac{\rho v l}{\mu} \quad (6)$$

Onde:

$\rho$  = massa específica do fluido

$\mu$  = viscosidade absoluta do fluido

$v$  = velocidade do fluido

$l$  = comprimento característico do sistema.

A magnitude do número de Reynolds,  $Re$ , pode fornecer uma estimativa da importância relativa das forças viscosas e não-viscosas atuando sobre um elemento de fluido [53].

Na prática é comum utilizar o número de Reynolds para determinar se um escoamento é laminar ou turbulento. Mas para isso é necessária a definição de um número de *Reynolds de transição*  $Re_t$ . Assim, se  $Re < Re_t$ , o escoamento é dito laminar, caso contrário  $Re > Re_t$ , o regime é dito turbulento.

O número de Reynolds de transição depende diretamente das características do sistema a ser analisado. Dentre essas características estão às condições assumidas para o escoamento e aspectos geométricos do sistema [53].

A fim de determinar se um fluxo é laminar ou turbulento, é comum avaliar o número de Reynolds e compará-lo com o número de transição de 2300. Porém, em geral, o número de *Reynolds de transição* para sistemas microfluídicos são menores do que 2300, podendo assumir valores em torno de 15. [3]

Mesmo possuindo baixos números de *Reynolds de transição*, os sistemas microfluídicos ainda tende a apresentar escoamentos laminares, pois devido as baixas velocidades envolvidas e pequenas dimensões, estes apresentam números de *Reynolds* geralmente menores que um.

Uma das implicações práticas do número de Reynolds é a influência na capacidade de mistura de fluidos. Enquanto no regime turbulento os fluidos misturam-se facilmente no regime laminar essa mistura ocorre de maneira bem menos efetiva e, geralmente, devido apenas a difusão de partículas. Assim,



como a microfluídica envolve baixos números de Reynolds, a capacidade de misturar fluidos torna-se um desafio nessa área.

### 2.3.3. Lei de Hagen–Poiseuille

Para um fluxo de Poiseuille em um canal reto, se a diferença de pressão entre as extremidades do canal  $\Delta p$  for constante, a vazão  $Q$  também o será e isso pode ser resumido na lei de Hagen-Poiseuille:

$$\Delta p = R_{hyd}Q = \frac{1}{G_{hyd}}Q \quad (7)$$

Onde foram introduzidos os fatores de proporcionalidade  $R_{hyd}$  e  $G_{hyd}$  conhecidos como resistência e condutância hidráulica, respectivamente. A lei de Hagen-Poiseuille, Eq. (7), é completamente análoga a lei de Ohm,  $\Delta V = RI$ , relacionando a corrente elétrica  $I$ , com a resistência elétrica  $R$  e a diferença de potencial elétrico  $\Delta V$  ao longo de um fio. [51] A eq. (7) é válida para  $Re < Re_t$ , ou seja, escoamento laminar completamente desenvolvido.

As unidades SI utilizados na lei de Hagen-Poiseuille são:

$$[Q] = \frac{m^3}{s}, \quad [\Delta p] = Pa = \frac{N}{m^2} = \frac{kg}{ms^2}, \quad [R_{hyd}] = \frac{Pa \cdot s}{m^3} = \frac{kg}{m^4s}$$

### 2.3.4. Resistência hidráulica

O conceito de resistência hidráulica é muito importante no contexto do desenvolvimento e caracterização de canais em sistemas microfluídicos. Pode ser entendido, a grosso modo, como a dificuldade encontrada pelo fluido ao atravessar uma determinada região do sistema.

Utilizando-se os conceitos do fluxo de Poiseuille para canais retos podem ser obtidas as expressões para a resistência hidráulica para várias formas de canal como observado na Figura 2.9 a seguir:


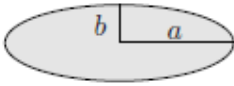

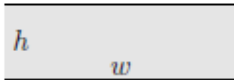

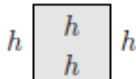
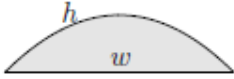
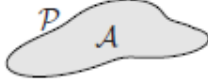
shape		$R_{\text{hyd}}$ expression	$R_{\text{hyd}}$ [ $10^{11} \frac{\text{Pa}\cdot\text{s}}{\text{m}^3}$ ]
circle		$\frac{8}{\pi} \eta L \frac{1}{a^4}$	0.25
ellipse		$\frac{4}{\pi} \eta L \frac{1 + (b/a)^2}{(b/a)^3} \frac{1}{a^4}$	3.93
triangle		$\frac{320}{\sqrt{3}} \eta L \frac{1}{a^4}$	18.5
two plates		$12 \eta L \frac{1}{h^3 w}$	0.40
rectangle		$\frac{12 \eta L}{1 - 0.63(h/w)} \frac{1}{h^3 w}$	0.51
square		$28.4 \eta L \frac{1}{h^4}$	2.84
parabola		$\frac{105}{4} \eta L \frac{1}{h^3 w}$	0.88
arbitrary		$\approx 2 \eta L \frac{P^2}{A^3}$	-

Figura 2.9 – Lista das resistências hidráulicas para canais com diferentes formas de secção transversal. Os valores numéricos foram calculados utilizando-se os seguintes parâmetros:  $\eta = 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  (água),  $L = 1 \text{ mm}$ ,  $a = 100 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $b = 33 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $h = 100 \text{ }\mu\text{m}$  e  $w = 300 \text{ }\mu\text{m}$ . [51]

Desses perfis de canais apresentados serão utilizados o canal circular (circle) e o canal de placas paralelas (two plates) na simulação computacional.

### 2.3.5. Resistência hidráulica, para dois canais retos conectados

#### 2.3.5.1. Dois canais retos conectados em série

Em sistemas microfluídicos onde o número Reynolds é baixo, quando dois canais de dimensões diferentes são conectados, as resistências hidráulicas desses podem ser somadas, como uma associação de resistores em série num circuito elétrico. [51]

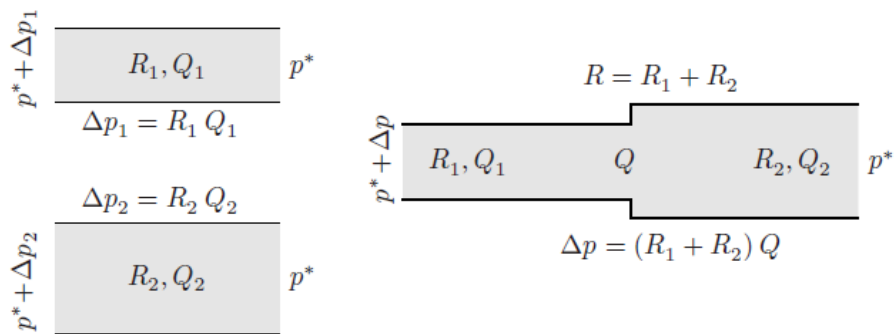


Figura 2.10 – Acoplamento em série de dois canais com resistências hidráulicas  $R_1$  e  $R_2$ . [41]

Considerando um acoplamento de dois resistores hidráulicos em série, como mostrado na Figura 2.10, assume-se a validade da lei de Hagen-Poiseuille para cada um dos resistores mesmo depois de conectados. Utilizando a aditividade da diferença de pressão ao longo do canal resultante e a conservação do fluxo  $Q_1=Q_2=Q$ , tem-se que a resistência hidráulica equivalente será dada por:

$$R_{EQ} = R_1 + R_2 \quad (8)$$

Essa lei aditiva é válida somente para números de Reynolds baixos e para canais longos e estreitos [51]. Porém a utilização desses conceitos no presente trabalho está baseada na aproximação do sistema real a essas condições ideais.

### 2.3.5.2. Dois canais retos conectados em paralelo

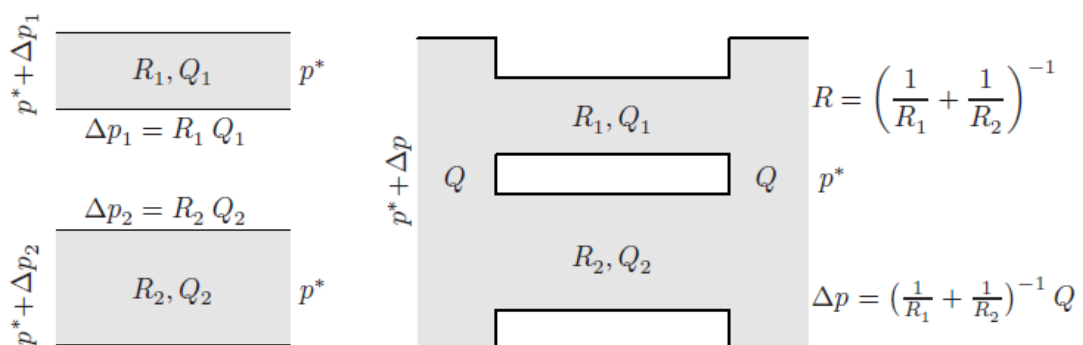


Figura 2.11 – Acoplamento em paralelo de dois canais com resistências hidráulicas  $R_1$  e  $R_2$ . [51]

Considerando um acoplamento de dois resistores hidráulicos em paralelo, como mostrado na Figura 2.11, também é assumido como válida a lei de Hagen-Poiseuille para cada um dos resistores mesmo depois de conectados. Utilizando a aditividade da diferença de pressão ao longo do canal resultante e a conservação do fluxo  $Q=Q_1+Q_2$ , tem-se que a resistência hidráulica equivalente será dada por:

$$R = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (9)$$

As limitações e aproximações para este caso são iguais a associação em série apresentada anteriormente. [51]

### 2.3.6. Curvas características

As microbombas, assim como as bombas convencionais, são desenvolvidas para operarem com vazões e pressões externas<sup>4</sup>, definidas pelas suas características de funcionamento. Através de ensaios verifica-se que as bombas são capazes de fornecer vazão mesmo quando submetidas a pressões externas diferentes, além dos valores para as quais elas foram projetadas. As combinações entre vazões e pressões externas geralmente são representadas através de gráficos, onde o conjunto dos pontos em que a bomba é capaz de operar constitui a faixa de operação da bomba, e a curva descrita por esses pontos é denominada *curva característica da bomba*. [54]

Em aplicações reais as microbombas são conectadas a componentes microfluídicos que possuem uma determinada resistência hidráulica, ou seja, uma resistência ao escoamento do fluido. Essa resistência hidráulica do componente está associada a uma pressão, que pode ser comparada a uma pressão externa atuando sobre a saída da bomba. E assim torna-se importante saber qual a influência de uma pressão externa na saída da bomba sobre a vazão fornecida pela mesma.

---

<sup>4</sup> O termo pressão externa é referente à pressão resultante atuando sobre a entrada ou saída da microbomba.

Considerando que  $\Delta p_0$  seja a pressão fornecida ao fluido pela microbomba, que possui uma resistência hidráulica interna igual a  $R_{h_0}$  e forneça uma vazão  $Q_0$ , quando não existe uma pressão externa atuando na saída da microbomba; e supondo um escoamento que obedece a lei de Hagen-Poiseuille, temos que:

$$\Delta p_0 = R_{h_0} Q_0 \quad (10)$$

Onde:

$\Delta p_0$  é a pressão fornecida pela microbomba ao fluido.

$R_{h_0}$  é a resistência hidráulica inerente a microbomba.

$Q_0$  é a vazão fornecida pela microbomba quando não existe uma pressão externa resultante atuando sobre a saída.

Acoplando a essa microbomba um componente microfluídico com resistência hidráulica  $R_{h_1}$  e considerando esse acoplamento como sendo em série, temos que a pressão total do sistema é dada por:

$$\Delta p = \Delta p_0 + \Delta p_1 \quad (11)$$

Sendo

$$\Delta p = R_{h_{tot}} Q_{res} \quad (12)$$

$$\Delta p_0 = R_{h_0} Q_0 \quad (13)$$

$$\Delta p_1 = R_{h_1} Q_1 \quad (14)$$

Onde:

$R_{h_{tot}}$  é a resistência hidráulica total do sistema.

$Q_{res}$  é a vazão resultante no sistema

$R_{h_1}$  é a resistência hidráulica do componente.

$Q_1$  é a vazão no componente.

Supondo que o componente conectado a saída da microbomba fosse uma coluna de fluido de altura  $H$ . Assim temos que:

$$\Delta p_1 = -\rho g H \quad (15)$$

Onde o sinal negativo é devido ao fato dessa pressão possuir um sentido contrário ao da pressão fornecida pela microbomba. Substituindo (15) em (11) e rearranjando os termos, obtemos:

$$\Delta p_0 - \rho g H = R_{h\_tot} Q_{res}$$

$$Q_{res} = \frac{\Delta p_0}{R_{h\_tot}} - \frac{\rho g H}{R_{h\_tot}} = Q'_0 - \frac{\rho g H}{R_{hyd}}$$

$$Q = Q'_0 - \frac{\rho g H}{R_{hyd}} \tag{16}$$

Onde:

$$Q'_0 = \frac{\Delta p_0}{R_{h\_tot}} \tag{17}$$

Sendo:

$\Delta p_0$  a pressão fornecida pela microbomba ao fluido

$\Delta p_1 = -\rho g H$  a pressão sobre a saída da microbomba devido a uma coluna de fluido de altura H.

H a altura da coluna de líquido efetiva, medida.

Através da equação (16) podemos analisar a influência de uma pressão externa na saída da microbomba, sobre a vazão total fornecida por essa. A equação (16) será utilizada para descrever a vazão na simulação computacional.

## **2.4. Objetivos**

Com base na revisão bibliográfica desenvolvida identificaram-se lacunas no estado da arte, nos sistemas de bombeamento microfluídicos. Em decorrência são listados os seguintes objetivos para esta dissertação:

Objetivo geral: Desenvolvimento de um sistema de bombeamento microfluídico de fluxo bidirecional.

Para atingir o objetivo geral são definidos os seguintes objetivos específicos:

Aquisição de conhecimento e habilidades com relação às técnicas de fabricação utilizadas;

Projeto e construção de microbombas com base nos modelos presentes na literatura;

Desenvolvimento de novos modelos de microbombas;

Caracterização do sistema desenvolvido;

Desenvolvimento de simulações computacionais, para auxiliar nas análises dos resultados.

## 3. Processo experimental

### 3.1. Materiais e métodos

Na fabricação dos dispositivos microfluídicos os polímeros têm se tornado cada vez mais interessantes em comparação aos materiais até então utilizados como o silício e o vidro devido às inúmeras vantagens apresentadas por eles como: o baixo custo; a facilidade de trabalhar; a facilidade de obtenção da matéria prima, a boa compatibilidade com material biológico.

Com relação aos processos de fabricação esses estão divididos em dois grupos: as técnicas de replicação, onde é feito um molde e transferido aos materiais poliméricos, como na modelagem à quente (*hot-embossing*) e molde injetado; e as técnicas diretas ou de prototipagem, que consistem em fabricar cada dispositivo individualmente, como a ablação<sup>5</sup> a laser e a estereolitografia. As técnicas diretas, principalmente a microfabricação a laser tem se destacado devido a alguns fatores como: o baixo custo, a facilidade de trabalho, a rapidez e a qualidade razoável nessas aplicações. [55]

A fabricação das microbombas, neste trabalho, pode ser dividida em quatro etapas iniciando pela escolha dos materiais e técnicas de fabricação, seguida da etapa de projeto dos componentes do sistema, posteriormente a fabricação de cada um e por fim os componentes são agrupados e vedados para montar o dispositivo e finalizar o processo. A seguir será feita uma breve explanação sobre cada uma dessas etapas no intuito de apresentar suas principais características.

#### 3.1.1. Escolha dos materiais

No presente trabalho foram utilizados como materiais: o PMMA (polimetilmetacrilato) ou acrílico, na fabricação da estrutura da microbomba devido a sua transparência e boa rigidez mecânica; e o PDMS (polidimetilsiloxano), para a fabricação da membrana, devido ao seu baixo módulo de elasticidade e conseqüentemente sua facilidade de deformação. Além das propriedades específicas a escolha desses materiais teve como

---

<sup>5</sup> Ablação: Ato de tirar por força; extrair, ação de arrancar, arrebatado, cortar (dicionário Michaelis).



motivações: a facilidade de obtenção; o baixo custo; o bom desempenho nessas aplicações; e a adequação as técnicas de fabricação utilizadas.

### 3.1.2. Técnica de fabricação

A técnica utilizada na fabricação das estruturas da microbombas foi a ablação a laser que será discutida, de maneira breve. Vários grupos estudaram essa técnica. Caiazza [56] investigou o corte a laser de CO<sub>2</sub> em diferentes plásticos poliméricos como Polietileno (PE), Polipropileno (PP) e Policarbonato (PC). Klank [57] e Snakenborg [58] investigaram o uso de laser comercial de CO<sub>2</sub> para fabricação de sistemas microfluídicos em PMMA. Malek [59] investigou aplicações do processamento a laser nos sistemas microfluídicos aplicados a biologia. Atualmente essa técnica continua sendo investigada e empregada em aplicações na microfluídica,

Neste trabalho foi utilizada uma fresadora a laser modelo L-Solution 100, de 30 W de potência, da Gravograph®, Figura 3.1.



Figura 3.1 – Fotografia da fresadora a laser de CO<sub>2</sub>, modelo LASER LS100 da Gravograph®.

A fresadora é composta de um laser CO<sub>2</sub>, de potência variável, com valor máximo de 30 W e possui uma área de gravação de 460 x 305 mm. Este equipamento é operado utilizando basicamente dois parâmetros, velocidade (do trilho) e potência (do laser). A velocidade também é variável e possui um valor máximo de 2 m/s, com precisão de movimentos garantida através de guias lineares.

Esse equipamento funciona, e é instalado, basicamente como uma impressora, onde as informações relacionadas à impressão provêm de um software de edição de imagem. No nosso caso o *Corel Draw*® foi escolhido por

se tratar de um software preciso, de fácil manuseio e de baixo custo em comparação aos outros disponíveis. [52]

O equipamento possui dois modos principais de trabalho: o modo *vector*, que possibilita a confecção de cortes, canais e ranhuras, com formas definidas pelo operador, porém com a largura definida pela resolução do laser (Figura 3.2); e o modo *raster*, que possibilita escavações com formas definidas pelo usuário (por exemplo canais e poços), essas escavações são realizadas através de sucessivas ranhuras (*vector*) próximas umas as outras (Figura 3.3).

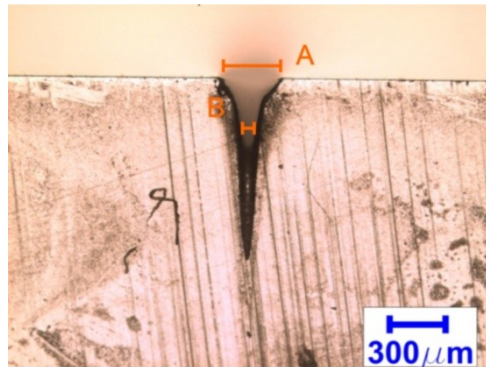


Figura 3.2 - Microcanal feito em polimetilmetacrilato PMMA , utilizando o modo *vector* e observado com microscópio óptico. A região A compreende ao topo do canal e tem aproximadamente 300  $\mu\text{m}$  e a região B compreende a base do canal com aproximadamente 100  $\mu\text{m}$ .

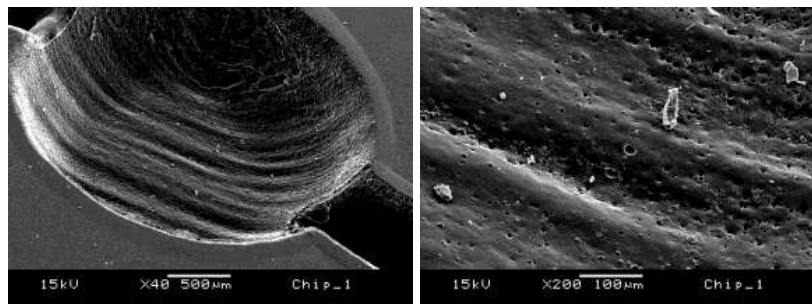


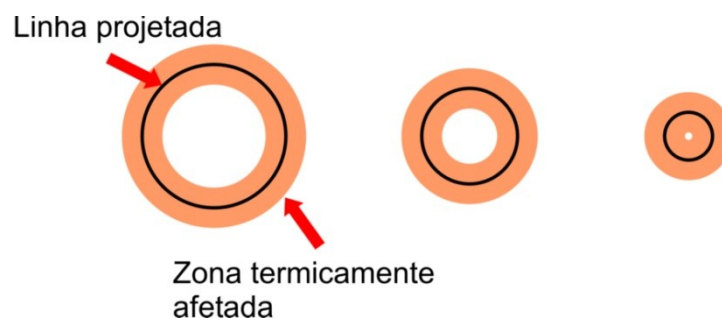
Figura 3.3 – A esquerda um poço com 0,6 mm de profundidade, confeccionado no modo *raster*; A direita uma visão detalhada dos sulcos (da figura a esquerda) com dimensões de aproximadamente 100  $\mu\text{m}$ . Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura.

O equipamento permite a variação dos parâmetros e através das combinações de velocidade e potência oferece a possibilidade de cortes ou escavações, com profundidades variadas.

Um ponto muito importante analisado foi o perfil do corte produzido na superfície do acrílico (Figura 3.2), bem como a superfície resultante de uma

escavação (Figura 3.3). As implicações desse perfil serão analisadas posteriormente.

Assim com todo equipamento esse também possui algumas limitações como o limite mínimo de espessura, de aproximadamente 100  $\mu\text{m}$ , para cortes ou canais utilizando o modo vector e uma limitação relacionada à confecção de orifícios pontuais, pois não possui uma função específica para isso. Para fazer orifício puntual é necessário desenhar um círculo utilizando a função *vector*, porém, quando esses diâmetros são pequenos a zona termicamente afetada<sup>6</sup> passa a limitar o tamanho mínimo do furo que pode ser realizado (Figura 3.4).



**Figura 3.4 - Ilustração da Zona termicamente afetada ZTA e sua implicação na limitação dos diâmetros dos furos realizados pela fresadora a laser.**

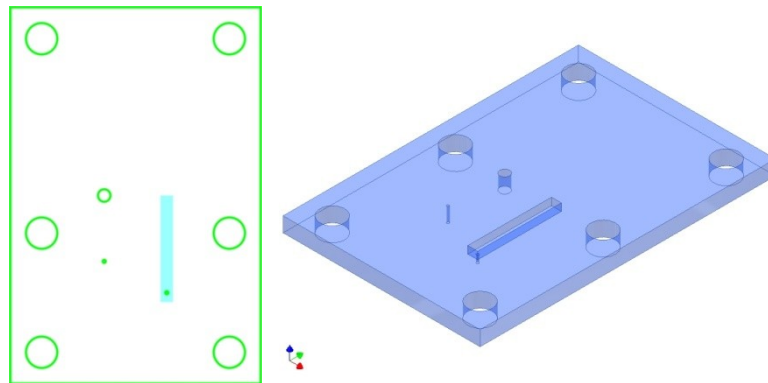
### 3.1.3. Projeto e fabricação

Para que o dispositivo seja fabricado, utilizando a fresadora a laser, inicialmente os componentes do mesmo devem ser projetados individualmente através do software Corel Draw® ou equivalente, para posteriormente serem “impressos”.

Nesse trabalho os dispositivos são compostos por camadas, cada uma com sua especificidade, e posteriormente estas camadas serão integradas para a formação do dispositivo. O desenho de cada camada é feito em 2D (a esquerda na Figura 3.5) e a profundidade é definida pelos parâmetros do equipamento, anteriormente discutidos, ou pela espessura da camada do material. Assim, durante a etapa de planejamento de cada camada é necessário considerar o

<sup>6</sup> Entende-se por Zona termicamente afetada a região que circunda o trajeto efetuado pelo laser no processo de ablação. Essa região corresponde a uma área que foi afetada, mas indesejavelmente devido à propagação de calor ocorrida no material durante o processo.

desenho, com os parâmetros do equipamento e as restrições impostas pelas camadas adjacentes.



**Figura 3.5 - A esquerda um exemplo do desenho projetado, de uma camada, utilizando o Corel Draw® que é utilizado na fresadora. A direita um desenho feito com o software Autodesk Inventor® que ilustra o resultado esperado após o processo de ablação.**

Após esses procedimentos de planejamento e desenho as camadas são fabricadas na fresadora a laser obtendo-se camadas como a ilustrada à direita na Figura 3.5.

#### **3.1.4. Montagem e Colagem das camadas**

Após o projeto e a fabricação das camadas temos a etapa de montagem do dispositivo que, no nosso caso, consta basicamente do empilhamento dessas. Porém, como esse dispositivo trabalha com fluidos essas camadas devem ser fixadas umas as outras e vedadas para evitar que o fluido escoe por regiões indesejadas do dispositivo. Isso torna a etapa de vedação e colagem um fator crítico para o funcionamento das microbombas.

A maioria das técnicas de colagem já atua como vedantes, ou seja, colam e vedam ao mesmo tempo. Apesar de parecer simples esta etapa pode ser uma das mais trabalhosas em termos práticos, dependendo da técnica utilizada. Atualmente dispõe-se de várias técnicas de colagem e essas são extremamente dependentes dos materiais que compõe as superfícies a serem aderidas. Para os polímeros, em especial o PMMA e PDMS, as técnicas mais comuns são: o tratamento das superfícies (a plasma), com a finalidade de torná-las aderentes; a deposição de filmes finos e cura posterior; a utilização de fluidos colantes; a utilização de fitas adesivas; e alguns métodos mais recentes

como a soldagem ultrassônica para PMMA [11]. A colagem anódica (*anodic bonding*); prensagem à quente (*hot press*) são mais apropriadas para materiais resistentes a temperaturas elevadas, como vidro e silício, porém há relatos de utilização da prensagem à quente em polímeros. Para alguns casos o fechamento hermético<sup>7</sup> também é uma opção de vedação desses sistemas, apesar de não ser uma colagem permanente. Este último apresenta a vantagem de ser um processo reversível, ou seja, as camadas podem ser integradas e posteriormente separadas sem a destruição do dispositivo.

Neste trabalho foram utilizadas técnicas mais simples de colagem como a utilização de fitas adesivas dupla-face, colas líquidas e o fechamento hermético. Estas técnicas são suficientes considerando que o trabalho está baseado numa prova de conceito e não numa versão final para este dispositivo.

## 3.2. Evolução do design

Inicialmente o trabalho estava baseado na reprodução de uma microbomba genérica, como a apresentada na seção 2.2.5, utilizando os processos de fabricação mencionados anteriormente. Ao decorrer do trabalho algumas alterações foram propostas com a finalidade de fazer funcionar a microbomba e posteriormente melhorar o seu desempenho. Essas alterações favoreceram o desenvolvimento do design da microbomba possibilitando algumas inovações na área. A seguir serão apresentados os modelos e suas principais características visando ressaltar a sua evolução.

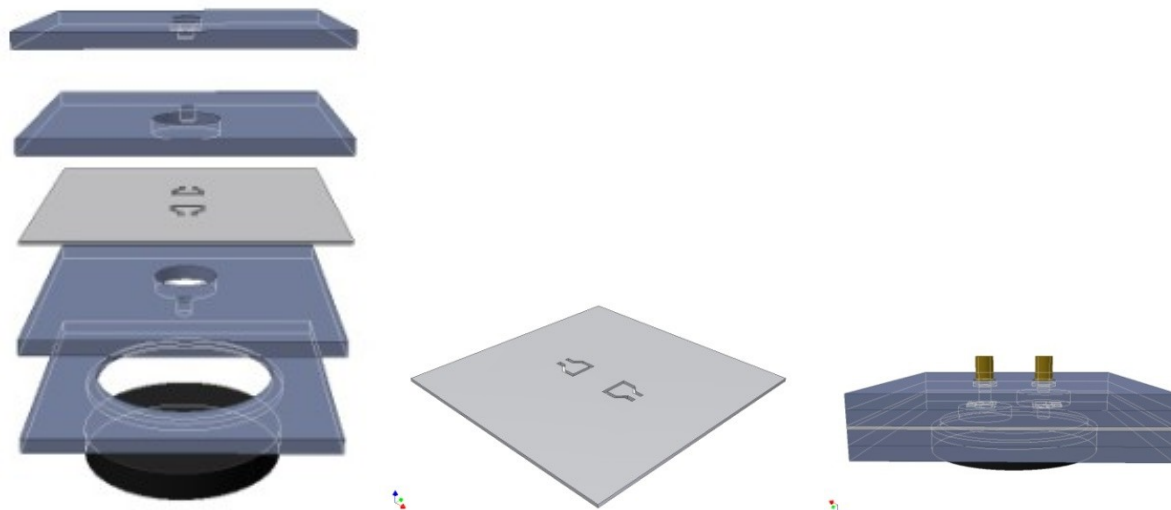
### 3.2.1. Modelo 1

O modelo de microbomba trabalhado inicialmente foi projetado como um sistema integrando o atuador e as válvulas de retenção passivas. O atuador utilizado foi um alto falante de fones de ouvido de 12 V, comercial, e as válvulas utilizadas foram do modelo *flaps*, com formas variadas. A Figura 3.6, a seguir,

---

<sup>7</sup> Hermético: Fechado completamente, de modo que não deixe penetrar ou escapar o ar (vasos, painéis etc.); estanque (dicionário Michaelis). No presente caso, que os líquidos não escapem dos sistemas microfluídicos.

ilustra este primeiro modelo. As camadas desse dispositivo foram aderidas com a utilização de fita dupla-face<sup>8</sup>. O atuador foi ligado a um gerador de função<sup>9</sup>, este equipamento foi utilizado em todos os testes.



**Figura 3.6 - A esquerda os componente da microbomba, ao centro a camada que contém os flaps e a direita o dispositivo montado, todos desenhados no Inventor®.**

Para analisar o funcionamento das microbombas, foi desenvolvido um aparato como mostrado na Figura 3.7. Este consta de duas colunas formadas por tubos de silicone, fixadas em uma régua, e ligadas a microbomba. Preenchia-se o sistema com água, utilizando uma bomba de seringa<sup>10</sup>, até que a água atingisse uma determinada altura dentro dos tubos. Inicialmente, como a microbomba não está em operação, a altura das duas colunas de água é a mesma. Ao iniciar funcionamento espera-se observar um aumento na altura de uma das colunas, e conseqüentemente a diminuição da outra, indicando que a microbomba esta funcionando. Este aparato ainda permite a determinação aproximada da pressão máxima fornecida pela microbomba através da altura máxima da coluna de água que esta consegue manter durante sua operação.

<sup>8</sup> Fita dupla-face 3M modelo 6205.

<sup>9</sup> Gerador de função EMG modelo TR 0467.

<sup>10</sup> Santronic ST680.

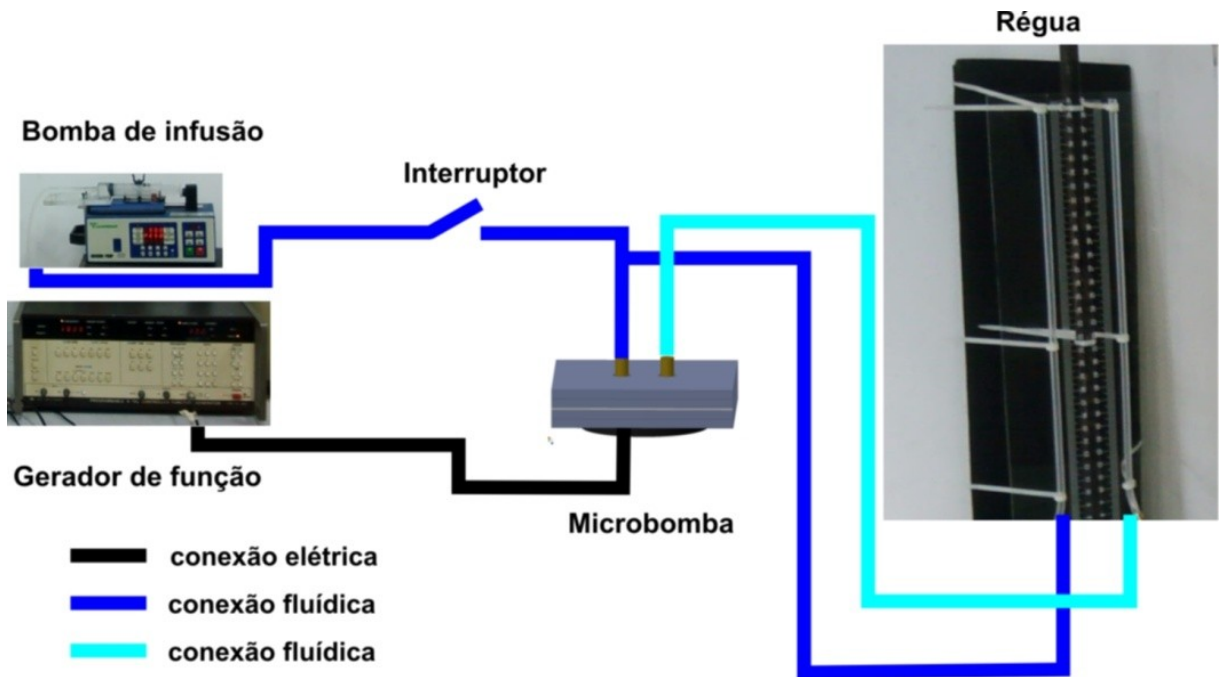
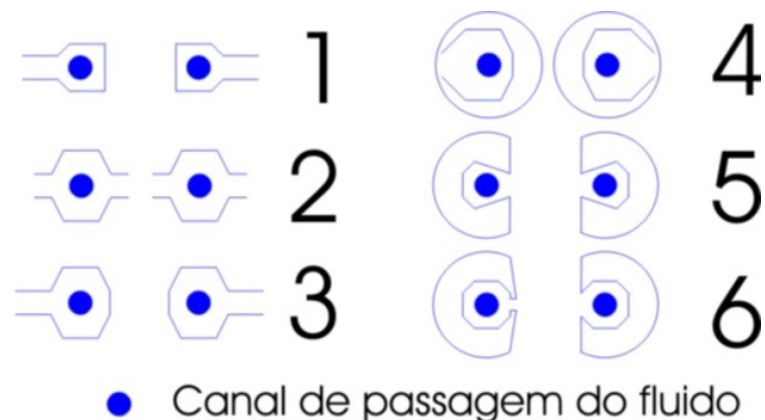


Figura 3.7 - Esquema do aparato experimental utilizado para detectar o funcionamento da microbomba.

O princípio de funcionamento desse modelo é o mesmo descrito na seção 2.2.5. Esse primeiro modelo não funcionou e alguns dos fatores atribuídos a esse fato podem ser: problemas relacionados ao desenho do dispositivo; o atuador não possuía força suficiente para um funcionamento adequado; o formato dos flaps não era eficiente e estes ainda estavam aderindo à superfície que circunda o canal de passagem do fluido.

### 3.2.2. Modelo 2

As primeiras alterações foram nos atuadores e passou a ser utilizado um disco piezoelétrico substituindo o alto falante. O disco PZT possui uma força de bombeamento muito grande comparado a alto falante, que é projetado para deslocamento de ar na produção do som. Alguns ajustes no formato dos flaps também foram efetuados com o intuito de minimizar os problemas mencionados no modelo 1. Basicamente a área de contato entre o flap e a região que circunda o canal de passagem do fluido foi minimizada através da redução da área do flap.



**Figura 3.8 - Modelos de flaps utilizados no trabalho. Os modelos de 1 a 4 foram utilizados na primeira configuração da microbomba e os modelos 5 e 6 foram aplicados na segunda configuração.**

Com relação ao princípio de funcionamento este modelo também segue o descrito na seção 2.2.5. Este modelo apresentou um funcionamento discreto fornecendo uma pressão suficiente para manter uma coluna de água de aproximadamente 3 cm., Porém apresentava um funcionamento muito instável e de difícil repetitividade. As possíveis causas atribuídas a esse mau funcionamento foram novamente o atuador e os flaps. Dessa vez chegou-se a conclusão de que apesar do disco PZT fornecer uma grande força de bombeamento ao líquido o seu deslocamento é pequeno. Para que fornecesse um deslocamento satisfatório seria necessária uma tensão aplicada bem mais alta do que a máxima tensão fornecida pelo equipamento utilizado, que era de 30 V. A dificuldade da implementação do PZT no sistema também pode ser considerada, pois a técnica de fixação deste no sistema fluídico não é fácil tendo em vista que ele deforma-se e acaba danificando a vedação e a colagem, que foram realizadas utilizando cola líquida instantânea Superbonder® flexgel. A instabilidade do funcionamento e a dificuldade de reprodução foram atribuídas aos flaps que, apesar das modificações, continuaram apresentando os mesmos problemas do modelo 1.

### 3.2.3. Modelo 3

Analisando os resultados obtidos nos primeiros testes notou-se que seriam necessárias modificações no atuador, necessitando de um método de atuação que fornecesse um deslocamento de líquido satisfatório, assim como uma força



de bombeamento, porém utilizando as tensões disponíveis no equipamento. E também foi observada a necessidade de reduzir ao máximo a área de contato dos flaps com os canais de passagens de fluidos.

A solução para o primeiro caso foi a construção de um sistema de atuação composto por: um solenóide de máquina de lavar, com uma tensão nominal de 110V, porém utilizado na faixa de 5V a 30V; ímãs permanentes de terra rara (NdFeB); uma membrana de PDMS, de fabricação própria<sup>11</sup>; e um corpo de acrílico para a sustentação da membrana.

Na montagem desse sistema, ilustrado na Figura 3.9 (à esquerda), o ímã de neodímio foi colado na camada de PDMS e essa por sua vez está confinada entre duas camadas de PMMA. O formato das camadas de PMMA delimita a região móvel da membrana em forma circular. A camada superior de PMMA serve de apoio ao solenóide.

Os dois terminais na parte superior do solenóide são ligados na saída do gerador de função. O gerador enviará sinais de tensão alternados e periódicos. A tensão fornecida gera uma corrente elétrica, proporcional, que percorre o solenóide e por sua vez gera um campo magnético de orientação variável. As interações entre os campos magnéticos do solenóide e do ímã resultarão num movimento alternado do segundo, devido atração e repulsão, Esse movimento fornecido ao ímã conseqüentemente causa um deslocamento da membrana que é transmitido ao fluido, fechando o processo de atuação.

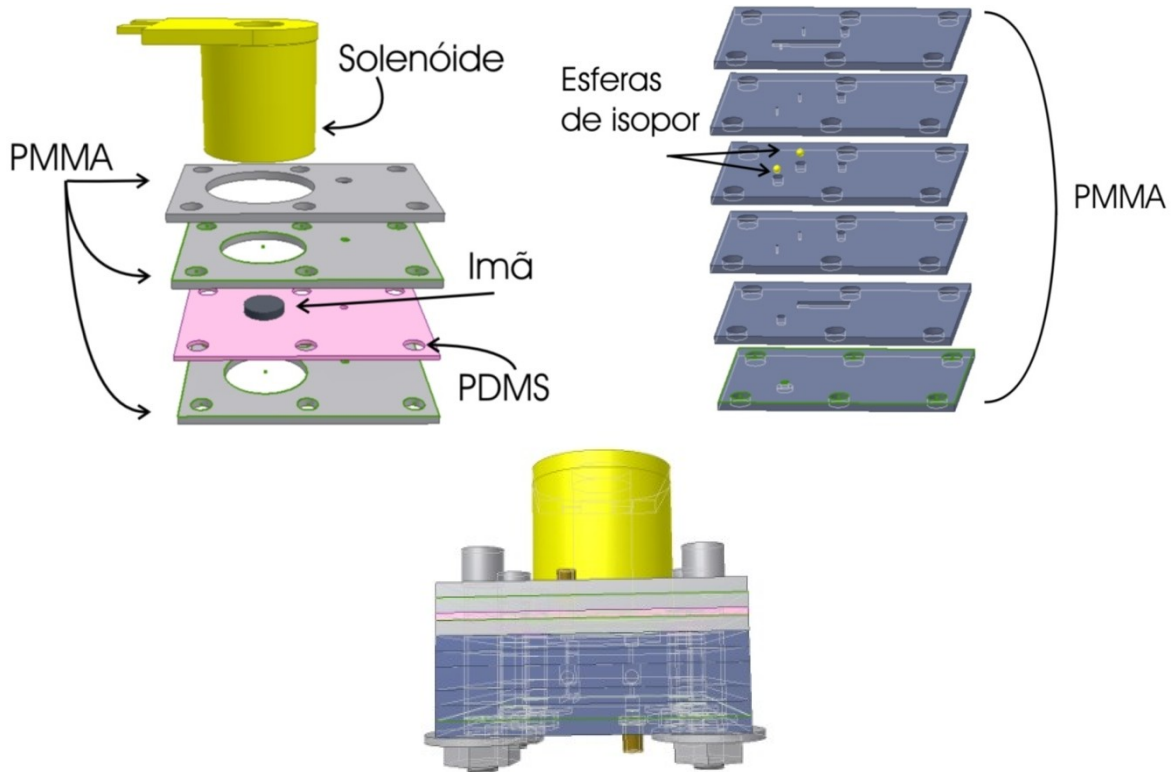
Com relação ao problema das válvulas foi adotada a utilização de esferas de isopor substituindo os flaps. Essa alteração implicou numa mudança no design da microbomba (Figura 3.9). Um novo projeto foi montado agora não mais diretamente baseado no modelo genérico apresentado e sim com características próprias. Neste momento foi percebida a capacidade de bombeamento bidirecional desse novo dispositivo.

A bidirecionalidade dessa microbomba está associada à geometria das válvulas, a utilização das esferas e a aspectos posicionais. Esse último ponto refere-se ao fato da direção de bombeamento esta relacionada com a posição

---

<sup>11</sup> A membrana de PDMS foi fabricada na própria instituição onde o trabalho foi realizado, pelo aluno de mestrado Luiz Eduardo Nishino Gomes do Amaral.

da microbomba, ou seja, se o sistema inteiro for rotacionado em 180°, com relação ao referencial gravitacional, o sentido de bombeamento será invertido. Assim foi definido como posição 1 quando a microbomba estiver com o solenóide para cima e posição 2 quando o mesmo estiver voltado para baixo, como na Figura 3.10.

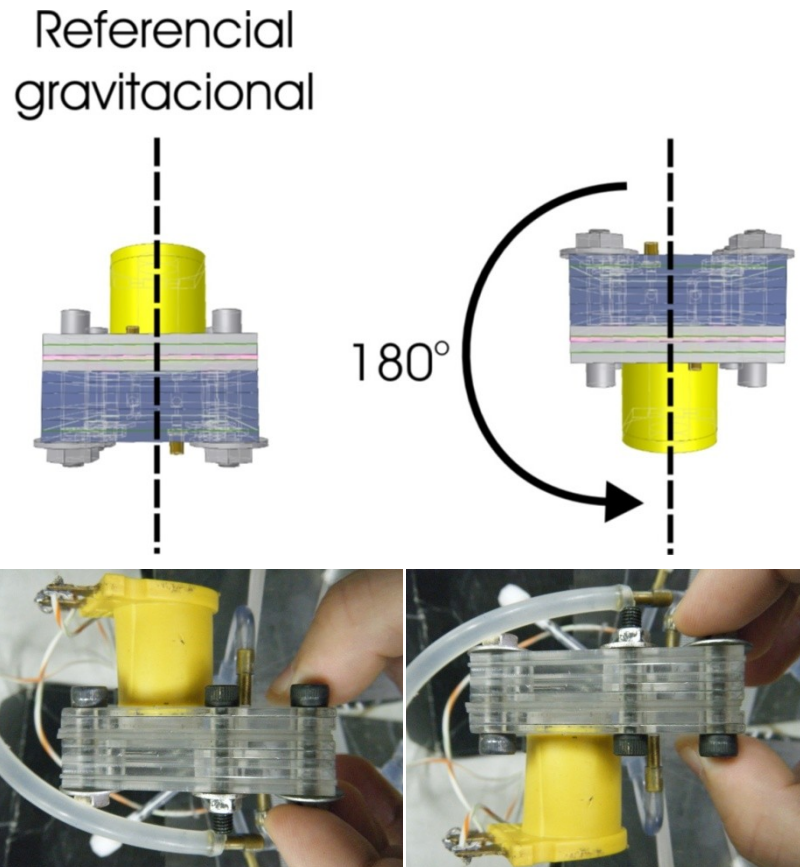


**Figura 3.9** - A esquerda os componente do sistema de atuação desenvolvido para a microbomba desenhados no Inventor®, a direita as camadas que formam o sistema de válvulas e abaixo um desenho completo do dispositivo (sistema de atuação mais sistemas de válvulas).

Esse dispositivo apresenta outra mudança em relação aos outros modelos desenvolvidos neste trabalho que é o método de colagem e vedação. Nesse caso optou-se por desenvolver um sistema que pudesse ser vedado e posteriormente aberto sem a destruição do mesmo. Para isso foi realizado um fechamento hermético, utilizando um fluido base de elastômero de silicone<sup>12</sup> entre as camadas e fixando-as com parafusos, porcas e arruelas, como visto na Figura 3.10. Isso contribuiu para um aumento na agilidade dos testes, pois assim que um defeito era detectado o sistema podia ser aberto e somente o

<sup>12</sup> Silicone elastomer base Sylgard® 184 produzido por Dow Corning Corporation.

componente defeituoso era substituído. Este método tem uma susceptibilidade a vazamentos maior que a colagem utilizando a fita adesiva, ou outros métodos, mas ainda assim serve para o presente trabalho.



**Figura 3.10 - Acima uma ilustração da rotação da microbomba com relação ao referencial; abaixo fotos do dispositivo pronto, a esquerda na posição 1 e a direita na posição 2.**

Uma representação do funcionamento da microbomba do modelo 3 pode ser observada na Figura 3.11.

Antes da microbomba entrar em funcionamento ambas as esferas encontram-se localizadas nas extremidades superiores das câmaras, devido ao empuxo (Figura 3.11a).

Durante a operação dessa microbomba o atuador age sobre a membrana de maneira cíclica aumentando e diminuindo o volume da câmara de bombeamento alternadamente. A câmara ao aumentar o seu volume força o fluido a preenchê-la, no passo de sucção (Figura 3.11b), e ao reduzir seu volume o fluido é forçado a sair, no passo de descarga (Figura 3.11c).

A câmara de bombeamento está diretamente conectada a cada uma das válvulas de retenção, porém em posições diferentes, uma pela extremidade superior e a outra pela inferior, sempre mantendo as pressões com sentidos inversos em cada válvula e a cada passo.

Para a posição 1 da microbomba, considerando a configuração apresentada na Figura 3.11a, no passo de sucção a válvula à direita da passagem ao fluido enquanto a da esquerda fecha (Figura 3.11b), e no passo de descarga a válvula à direita é fechada e a da esquerda libera a passagem para o fluido (Figura 3.11c). Assim as válvulas orientam o fluxo retificando-o após um ciclo de dois passos.

Ao trocar a posição da microbomba para a posição 2 (Figura 3.11d), a ordem em que as válvulas abrem e fecham é invertida e assim no passo de sucção a válvula da direita fecha enquanto a da esquerda da passagem ao fluido (Figura 3.11e), e no passo de descarga a válvula da direita libera a passagem para o fluido e a da esquerda é fechada (Figura 3.11f). Consequentemente a entrada e saída do fluido são invertidas o que implica na inversão do sentido do fluxo.

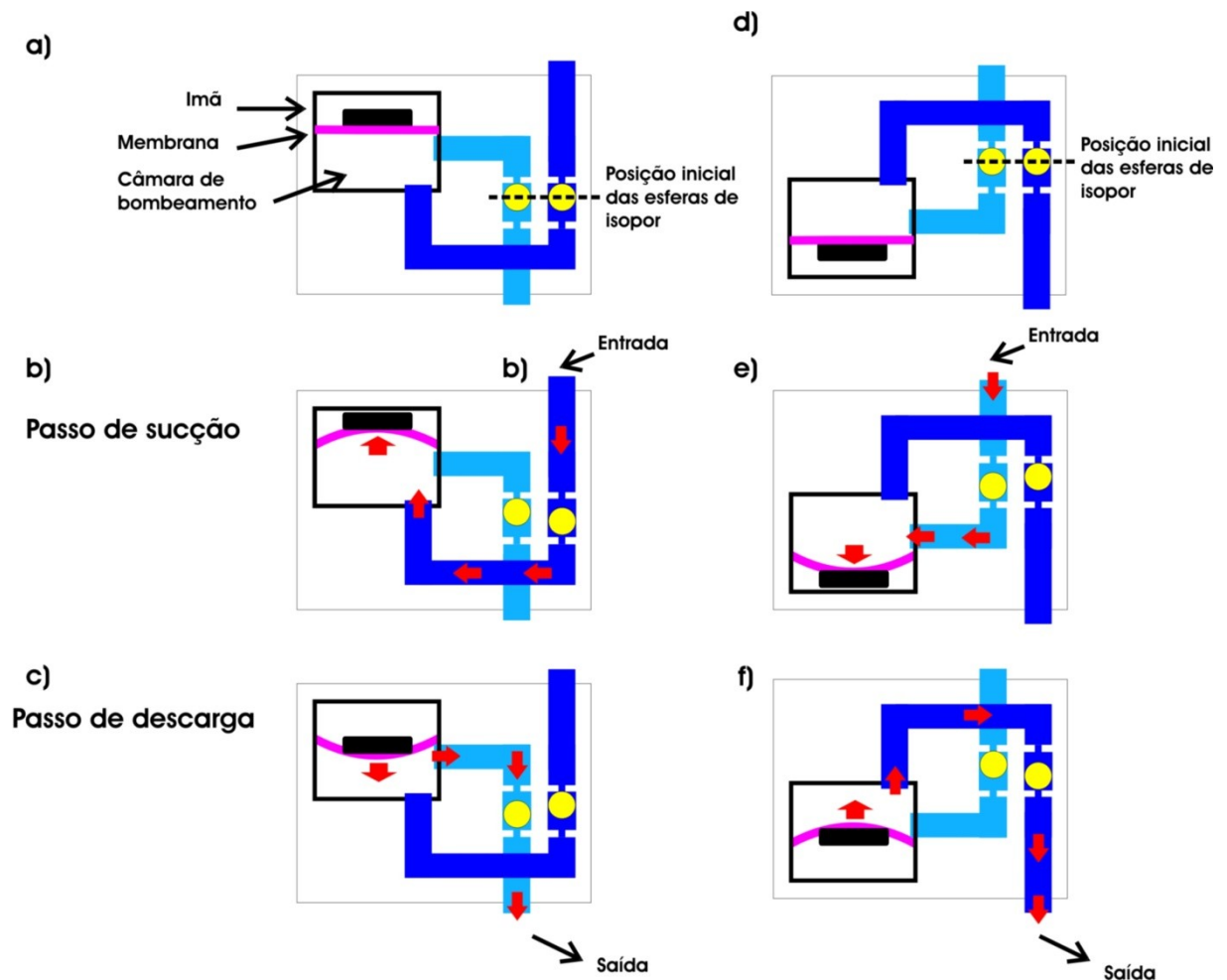


Figura 3.11 - Representação do funcionamento da microbomba do modelo 3, utilizando esferas de isopor. Para a posição 1 temos a) a configuração inicial b) o passo de sucção e c) o passo de descarga; para a posição 2 temos d) a configuração inicial e) o passo de sucção e f) o passo de descarga.

Neste trabalho cada válvula de retenção é composta pela câmara da esfera mais a esfera, e como são utilizadas sempre duas válvulas simultaneamente isso será denominado sistema de válvulas.

O ponto principal do sistema de válvulas utilizado nesse trabalho são as câmaras das esferas. Essas câmaras consistem basicamente em canais cilíndricos, como representado na Figura 3.12, a seguir, sendo  $A$  o diâmetro dessa câmara, onde a esfera fica contida,  $B$  é o diâmetro da entrada e/ou saída de fluido da câmara e  $C$  é o comprimento da câmara. No presente trabalho os valores de  $B$  e  $C$  são fixos e seus valores são respectivamente 0,5 mm e 3 mm, enquanto os valores de  $A$  serão variáveis.

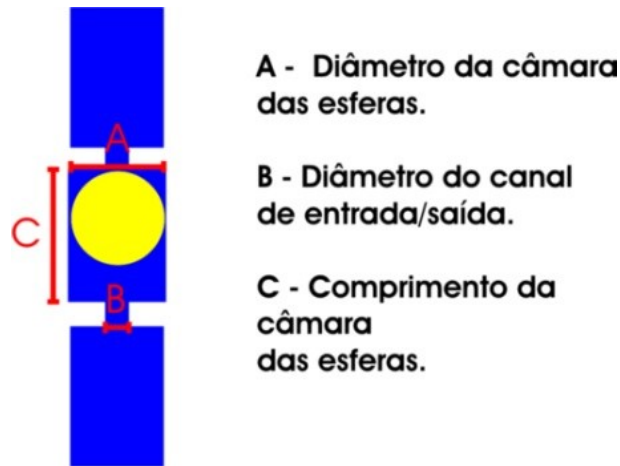


Figura 3.12 - Ilustração da estrutura da câmara da esfera.

O funcionamento do sistema de válvula pode ser observado com mais detalhes na Figura 3.13 onde a esquerda é ilustrado o movimento da esfera (de isopor) dentro da câmara 1 com relação a pressão fornecida pelo atuador, representada pelas setas vermelhas. A direita é ilustrado o mesmo processo, porém para a câmara 2. Ambas as esferas se localizam na parte superior do canal, devido ao empuxo. A câmara de bombeamento está conectada a câmara 1 pela extremidade inferior e a câmara 2 pela superior. Os dois processos ocorrem simultaneamente e a sincronia do movimento das esferas nas câmaras 1 e 2 é fundamental para o bom funcionamento da microbomba.

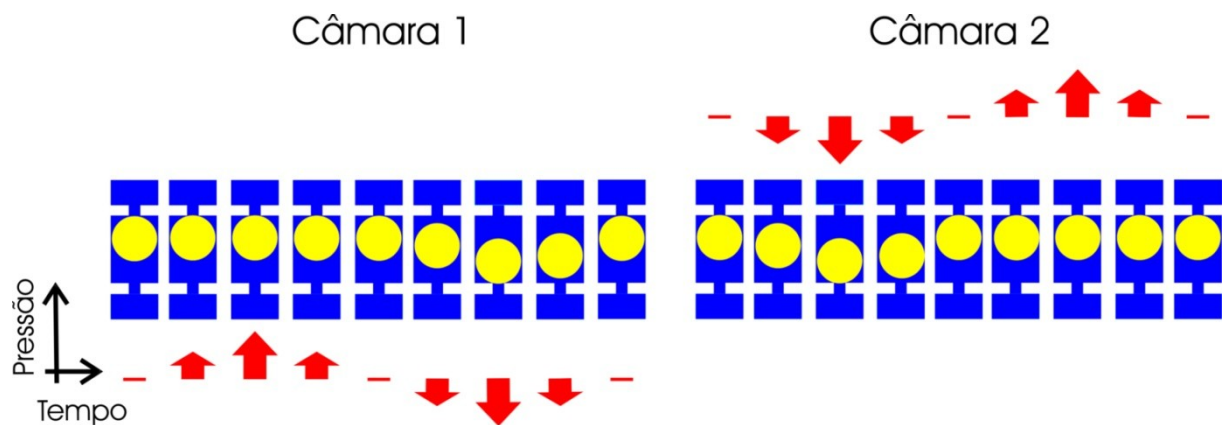


Figura 3.13 - Ilustração do funcionamento das câmaras da esfera, para as esferas de isopor, com relação a pressão fornecida de maneira senoidal (setas vermelhas). Obs.: O sentido da flecha indica o sentido em que a pressão está sendo fornecida.

As alterações realizadas foram fundamentais para o melhoramento no desempenho desse modelo. Realizando o mesmo teste utilizado nos demais

dispositivos, considerando que agora a microbomba possui dois modos de funcionamento, essa microbomba forneceu uma pressão máxima de bombeamento suficiente para manter uma coluna de água de 170 mm, ou 1700 Pa, na posição 1 e uma pressão equivalente a uma coluna de aproximadamente 60 mm, ou 600 Pa, para a posição 2. Esses resultados foram obtidos utilizando-se uma tensão de 30 V e uma frequência de 8 Hz.

Neste teste foi verificada a capacidade de bombeamento bidirecional dessa microbomba, além de um funcionamento superior aos modelos anteriormente testados. Esses resultados foram animadores, porém ainda era almejada uma melhora na pressão máxima de bombeamento, estabilidade e repetitividade dessa microbomba para iniciarem os testes pretendidos. A diferença nos valores de pressão máxima, com relação à posição da microbomba, chamou a atenção tendo em vista que esperava-se observar uma diferença muito pequena ou nula.

Fatores que foram detectados como colaboradores para a instabilidade e dificuldade na repetitividade foram a presença de bolhas no sistema e a dificuldade de retirá-las quando encontradas.

#### **3.2.4. Modelo 4**

Novamente analisaram-se as experiências anteriores buscando identificar seus pontos fracos visando melhorar novamente o desempenho. Através dessa análise um novo e último modelo de microbomba foi desenvolvido.

Nesse modelo as alterações, com relação ao anterior, foram: o atuador; a separação do sistema de válvulas do sistema de atuação (Figura 3.14 e Figura 3.15); a adição de uma concentração de detergente na água; a utilização de esferas de materiais diferentes isopor, aço e vidro; a troca de algumas camadas de PMMA por folhas de acetato; e a adição de mais ímãs no sistema de atuação.

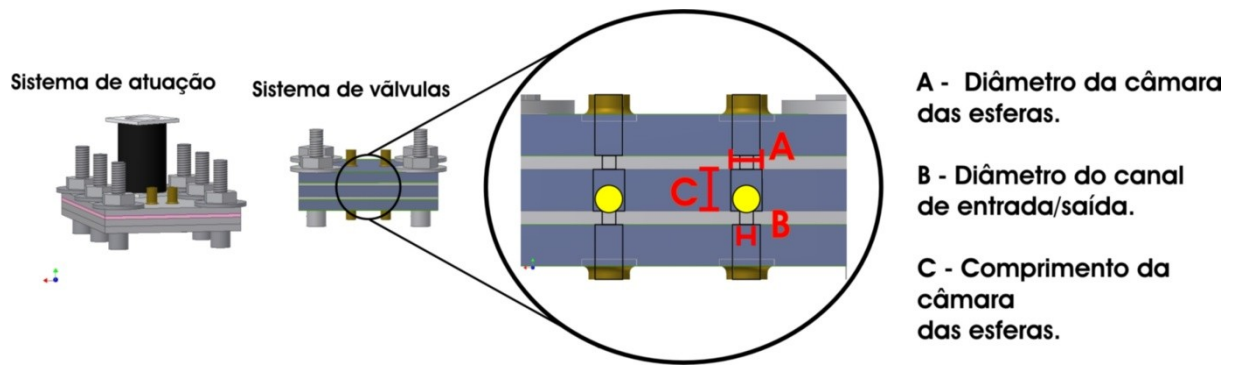
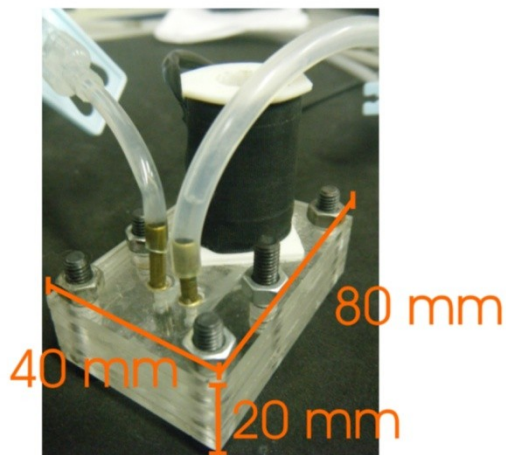


Figura 3.14 - A direita o desenho do sistema de válvulas e a esquerda um desenho do sistema de atuação da microbomba ambos criados no Inventor®.

## Sistema de atuação



## Sistema de válvulas

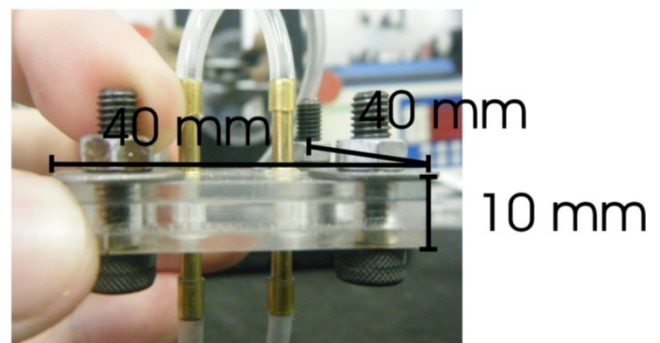


Figura 3.15 – Dimensões do sistema de atuação a esquerda e do sistema de válvulas a direita

Autor: O autor (2011)

Com a troca do atuador associado à adição de mais um ímã pretendia-se aumentar o deslocamento da membrana. O novo atuador possui uma tensão nominal de 35 V que é bem mais próxima da tensão máxima utilizada no trabalho de 30 V do que o solenóide anterior.

A separação do sistema de atuação do sistema de válvulas teve como objetivo principal a redução na diferença do desempenho entre as posições 1 e 2. Pois nessa configuração o sistema de atuação tem uma posição fixa e somente o sistema de válvulas é rotacionado. Para diferenciar as posições 1 e 2 foram feitas marcações utilizando canetas próprias para acrílico.



Foi realizada adição de um detergente<sup>13</sup> na água com a intenção de reduzir a tensão superficial da mesma dificultando a formação de bolhas de ar e facilitando a retirada das mesmas quando encontradas. Essa combinação de água e detergente será denominada fluido de trabalho. A concentração utilizada foi de 0,5 mL de detergente para cada 1 L de água ou 0,05% do volume. Como a concentração utilizada foi pequena assumiu-se que não ocorreu variação significativa na densidade da água, assim neste trabalho será utilizada a relação 1 g de líquido é igual a 1 mL do mesmo.

No sistema de válvulas a redução da espessura de algumas camadas visava à diminuição da pressão mínima necessária para o funcionamento da microbomba devido à diminuição na resistência hidráulica. Essa redução foi realizada trocando as camadas de PMMA de 2 mm por folhas de acetato de 0,5 mm.

Neste modelo, além das esferas de isopor, foram utilizadas esferas constituídas de materiais diferentes como o vidro e o aço, visando analisar a influência da densidade dos materiais no desempenho das microbombas.

Essas alterações contribuíram para uma melhora no desempenho desse novo modelo, comparado com os anteriores. A melhora na pressão máxima fornecida foi associada às modificações realizadas no sistema de atuação e redução da espessura das camadas. A separação dos dois sistemas diminuiu, mas não eliminou, a diferença de funcionamento entre as posições 1 e 2. A estabilidade do sistema e a repetitividade das medidas foram melhoradas com a adição do detergente na água, o que diminui a sua tensão superficial, ajudando na eliminação das bolhas quando detectadas.

Uma representação do funcionamento da microbomba do modelo 4, utilizando esferas de aço ou vidro, pode ser observada na Figura 3.16.

---

<sup>13</sup> Triton X100 com densidade de 1,07 g/cm<sup>3</sup>.

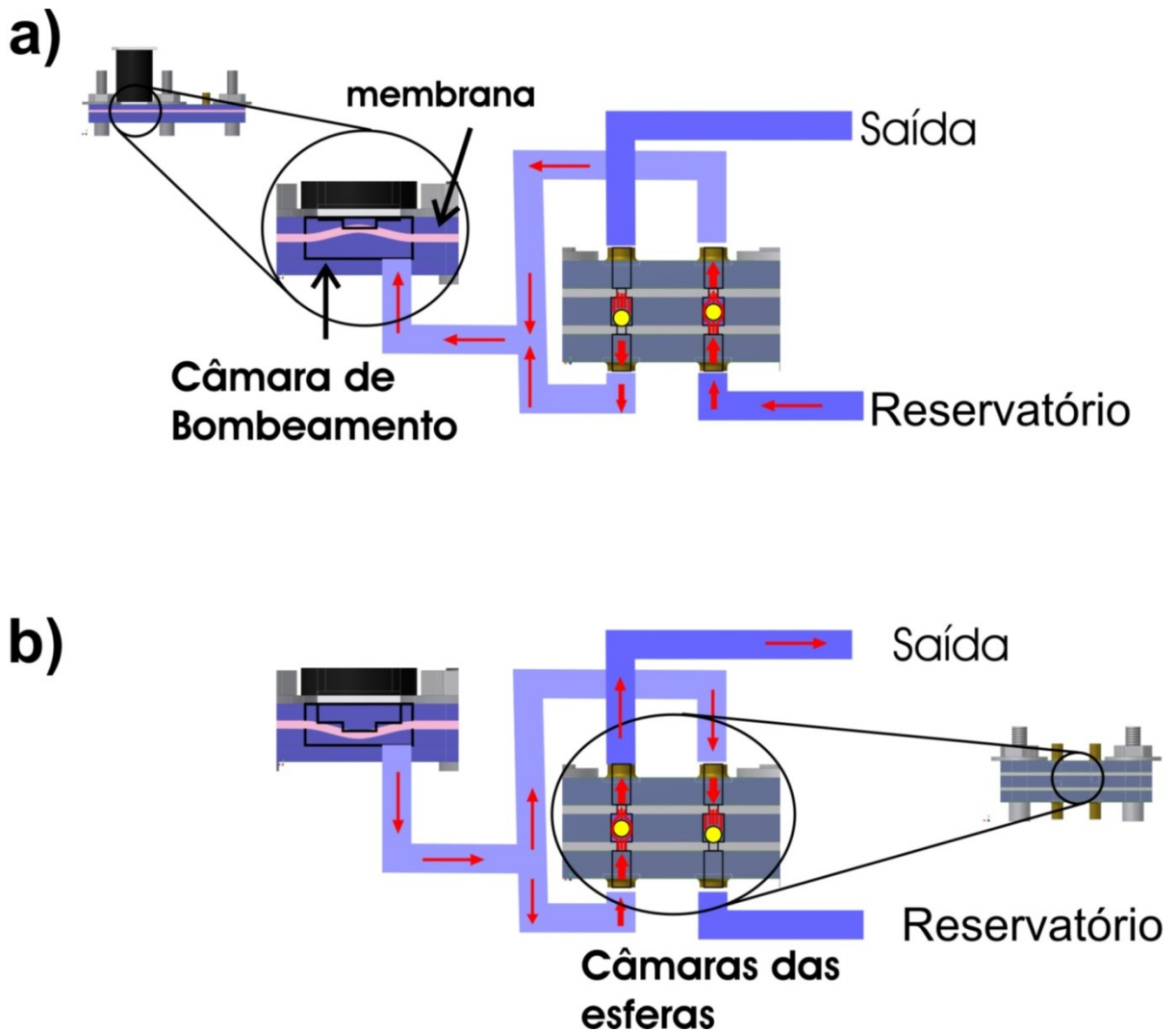


Figura 3.16 - Representação do funcionamento da microbomba do modelo 4, utilizando esferas de aço, em um ciclo composto por dois passos, sendo a) passo de sucção e b) passo de descarga.

O princípio e funcionamento é semelhante ao descrito para o modelo anterior, porém agora o sistema de atuação e o sistema de válvulas estão separados e conectados através de tubos. Além disso, a utilização de esferas com densidades maiores influencia o modo de funcionamento da microbomba, com relação ao descrito para o modelo 3, pois inicialmente as duas esferas encontram-se localizadas na extremidade inferior da câmara das esferas (Figura 3.14) e a força gravitacional passa a predominar sobre o empuxo.

Este dispositivo conseguiu manter uma coluna de fluido de aproximadamente 750 mm de altura, o que equivale a uma pressão de 7500 Pa, para a posição 1

e aproximadamente 650 mm de altura, ou 6500 Pa, para a posição 2, funcionando a uma tensão de 30 V e frequência de 20 Hz.

Os resultados obtidos para este dispositivo foram considerados satisfatórios e assim esta configuração foi escolhida para a caracterização e um estudo mais aprofundado.

### **3.3. Montagem experimental**

Nesta parte serão descritos as montagens experimentais e os métodos utilizados na realização dos testes, com a microbomba desenvolvida na seção 3.2.4. Esses testes são: o de pressão máxima e o de vazão. Foram variados alguns parâmetros como o diâmetro da câmara das esferas e o material das mesmas, e parâmetros externos como a tensão e a frequência, fornecidas ao sistema de atuação.

#### **3.3.1. Teste de pressão máxima**

Inicialmente foram realizados os testes de pressão máxima de bombeamento, com o intuito de analisar seus limites, além da sua relação com os parâmetros variáveis do sistema. Dentre estes parâmetros estão a tensão e frequência, fornecidas ao atuador, aqui denominados parâmetros externos, e parâmetros relacionados à estrutura da microbomba, que são o diâmetro da câmara das esferas e o material que compõe as esferas (densidade).

Para a realização desse teste o método escolhido foi semelhante ao utilizado para a detecção do funcionamento, mencionado anteriormente na seção 3.2.1, com algumas alterações e adaptações como o aumento no comprimento da régua e a fixação da posição do sistema de válvula. Essa montagem pode ser observada na Figura 3.17 e Figura 3.18, onde é possível observar os itens utilizados, como: a régua, onde tubos de silicone foram fixados, utilizada para a medição da altura da coluna de água bombeada; o sistema de válvulas fixado a um suporte, que o mantém numa altura fixa e possibilita a rotação do mesmo; o sistema de atuação, sobre uma folha de papel para detecção de vazamentos; a bomba de seringa, utilizada para preencher o sistema com o fluido de trabalho;

o gerador de função, onde são controladas a tensão e a frequência fornecidas ao sistema de atuação.



**Figura 3.17 - A esquerda a montagem experimental destinada ao teste de pressão máxima e a direita o sistema de válvulas fixado em um suporte.**

Optou-se por variar apenas dois parâmetros associados à estrutura da microbomba, que foram: o diâmetro da câmara das esferas (Figura 3.14, ponto A), onde os valores utilizados foram de 2,1mm, 2,3 mm e 2,5 mm; e o material que compõe as esferas: o isopor, o vidro e o aço. Todas as esferas tinham o diâmetro de 2 mm. Combinando estes parâmetros temos nove combinações diferentes (Quadro 1), porém o sistema possui duas posições de funcionamento totalizando dezoito testes a serem realizados.

Teste de pressão máxima	
Material das esferas	Diâmetro da câmara das esferas
Isopor	2,1 mm
	2,3 mm
	2,5 mm
Vidro	2,1 mm
	2,3 mm
	2,5 mm
Aço	2,1 mm
	2,3 mm
	2,5 mm

**Quadro 1 - Parâmetros utilizados nos testes de pressão máxima e de vazão.**

Após escolher uma das combinações possíveis, mostradas no Quadro 1, a próxima etapa consiste em integrar todos os componentes da configuração, como na Figura 3.19a. Os dois tubos da régua são conectados ao sistema de válvulas, que possui quatro conectores, aos outros dois conectores são conectados dois tubos de silicone que provêm do sistema de atuação. O sistema de atuação ainda possui uma entrada, na qual é injetado o fluido que provem da bomba de seringa. Após concluir as conexões fluídicas liga-se o solenóide, do sistema de atuação, ao gerador de função.

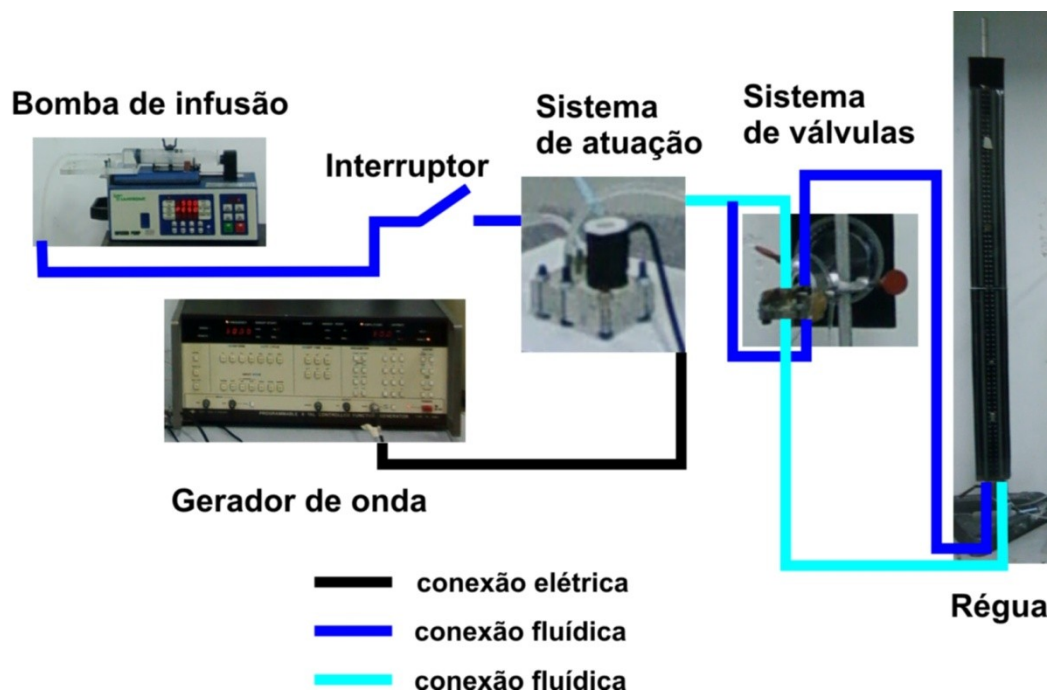
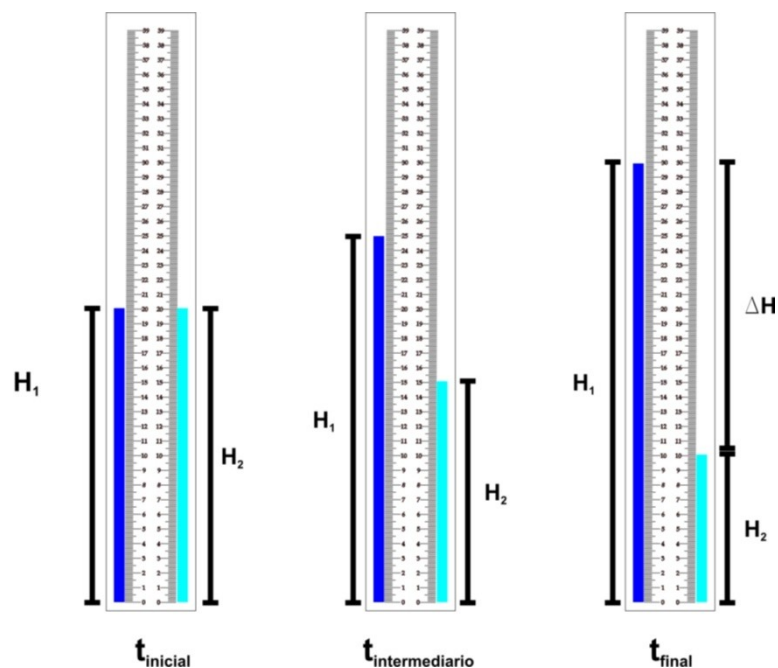


Figura 3.18 - Esquema de montagem relacionado ao teste de pressão máxima.

Posteriormente a integração dos componentes o sistema era preenchido com o fluido de trabalho e como mencionado isso é realizado utilizando uma bomba de seringa, após o preenchimento o tubo da bomba de seringa é fechado (interruptor). Nesta etapa é fundamental a prevenção de bolhas de ar, no interior de qualquer parte do sistema, e quando detectadas devem ser retiradas antes de iniciar qualquer teste. O sistema era analisado para verificar se não haviam vazamentos de fluídos. Concluídos estes procedimentos iniciavam-se os testes pretendidos.

No início dos testes era feito um nivelamento da altura da coluna de líquido, para estabelecer um ponto inicial e de referência. Eram selecionadas a tensão e

a frequência desejadas e então ligado o gerador de função. Ao ligar, o funcionamento da bomba era perceptível através da elevação de uma das colunas e diminuição da outra, devido à conservação do fluido no sistema. Esse processo é representado através da Figura 3.19b. Após um determinado tempo ( $t_{\text{final}}$ ) não era mais perceptível a elevação da coluna de fluido e nesse momento anotava-se o valor da pressão máxima atingida, ou seja, a diferença de altura máxima ( $\Delta H$ ) entre as duas colunas de fluido.



**Figura 3.19 - Ilustração do funcionamento da microbomba relacionado ao teste de pressão máxima.**

Foi adotado, por convenção, que a posição 1 está associada ao deslocamento do fluido da coluna da direita para a coluna da esquerda (Figura 3.19b), sendo os valores de pressão considerados positivos. Para a posição 2 o fluido se desloca da coluna da esquerda para a da direita, sendo os valores de pressão considerados negativos. No entanto para a confecção dos gráficos, nas seções posteriores, os valores de pressão máxima, para ambas as posições, serão considerados positivos com a finalidade de facilitar as comparações.

Nos testes a tensão era variada de 5 a 30 V e frequência, de 1 a 70 Hz. Isso era feito da seguinte maneira, escolhia e fixava-se uma tensão e variava-se a frequência na faixa mencionada. Esse procedimento foi repetido para todos os valores de tensão selecionados. Para cada par de valores tensão-frequência

eram anotados os valores da pressão máxima atingida. Esses dados foram organizados em forma de quadros como o apresentado a seguir (Quadro 2).

Tensão \ Freqüência	5 V	10 V	15 V	20 V	25 V	30 V
5 Hz	40 mm	195 mm	320 mm	360 mm	420 mm	460 mm
10 Hz	55 mm	175 mm	295 mm	370 mm	440 mm	450 mm
15 Hz	50 mm	175 mm	295 mm	310 mm	440 mm	440 mm
20 Hz	50 mm	160 mm	260 mm	315 mm	365 mm	440 mm
25 Hz	50 mm	160 mm	260 mm	315 mm	365 mm	430 mm
30 Hz	45 mm	160 mm	260 mm	310 mm	360 mm	430 mm
35 Hz	45 mm	155 mm	250 mm	300 mm	360 mm	430 mm
40 Hz	35 mm	90 mm	130 mm	180 mm	210 mm	210 mm
50 Hz	35 mm	90 mm	120 mm	170 mm	210 mm	210 mm
60 Hz	30 mm	60 mm	60 mm	90 mm	170 mm	170 mm
70 Hz	20 mm	20 mm	20 mm	35 mm	140 mm	140 mm

**Quadro 2 - Valores da diferença de altura das colunas de líquidos para cada combinação de tensão e frequência selecionada. Estes valores estão relacionados ao teste realizado com esfera de vidro com diâmetro da câmara das esferas de 2,1 mm e na posição 1.**

Como mencionado, foram realizados dezoito testes diferentes resultantes das combinações presentes no Quadro 1 e das duas posições possíveis da microbomba. Para cada uma dessas combinações todo o procedimento descrito foi repetido e os resultados organizados em formas de quadros, como no Quadro 2. A partir desses quadros serão confeccionados gráficos tridimensionais relacionando a pressão (Pa), com a tensão (V) e a frequência e esse gráficos serão aqui denominados perfis de pressão ou perfis de desempenho.

### 3.3.2. Testes de vazão

O segundo tipo de teste realizado foi o de vazão, com o intuito de conhecer a faixa de vazão fornecida por este dispositivo, bem como a sua relação com os parâmetros variáveis, mencionados anteriormente, e suas limitações.

Nesta configuração o sistema de válvulas, o sistema de atuação, o gerador de função e a bomba de infusão não sofreram alterações com relação à configuração mostrada na Figura 3.19. A régua, onde se encontravam fixados os dois tubos de silicone que provinham do sistema de válvulas, foi substituída

por dois béqueres iguais. Um dos béqueres foi colocado sobre uma balança de precisão<sup>14</sup> e o outro sobre um suporte, com o intuito de deixá-los nivelados. A altura dos béqueres e o nível do líquido dentro dos mesmos devem ser iguais, para evitar que apareça uma pressão reversa e o líquido flua de um para outro, devido à diferença de altura da coluna de líquido, causando alterações na medição da vazão.

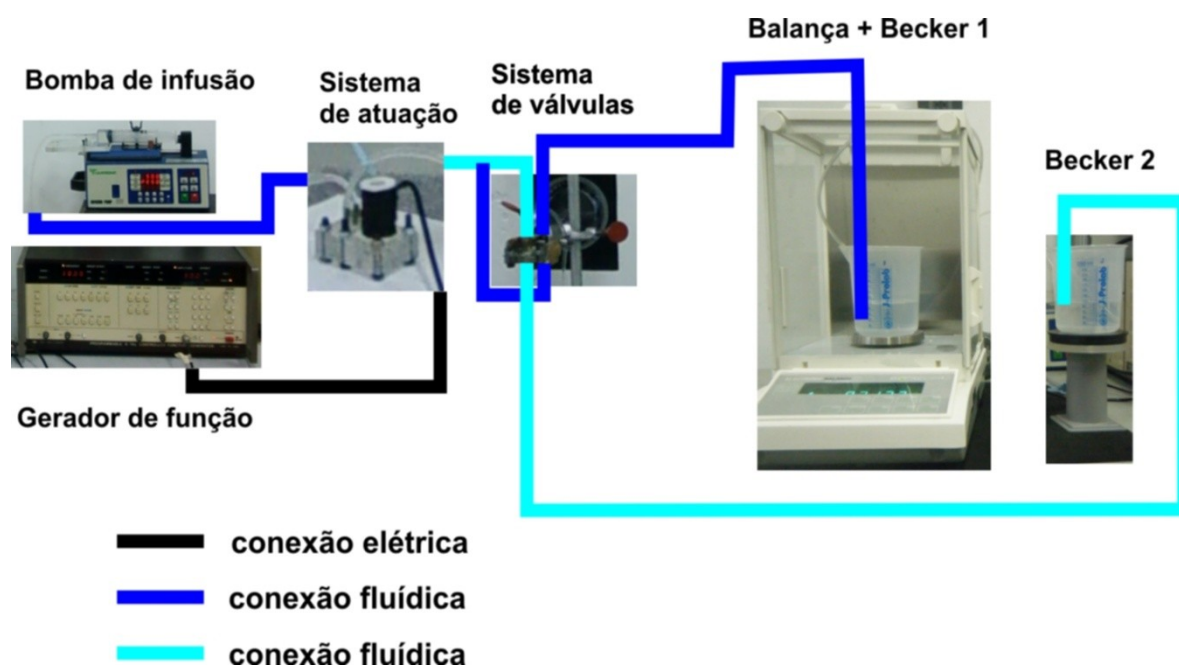


Figura 3.20 - Esquema de montagem e funcionamento da microbomba relacionado ao teste de vazão.

Para esse teste também foram variados os parâmetros da estrutura da microbomba e os parâmetros externos. As alterações na estrutura ocorreram da mesma maneira que no teste de pressão máxima obedecendo ao mesmo procedimento. Assim também foram realizados dezoito testes diferentes, considerando as combinações mostradas no Quadro 1.

Em cada um dos testes o procedimento seguido iniciava-se com a escolha das esferas a serem utilizadas e o diâmetro das câmaras das esferas. Em seguida fechava-se o sistema de válvulas e integrava todos os outros componentes, como mencionado anteriormente. Antes de iniciarem as medidas todo o sistema fluídico era preenchido com o fluido de trabalho, não podendo apresentar bolhas nem vazamentos. Os níveis de água dos dois béqueres eram

<sup>14</sup> Bioprecisa FA-2104N



igualados, como mencionado. Após estes procedimentos os testes podiam ser executados. Iniciando com a escolha dos parâmetros tensão e frequência desejados e pré-definidos. Ao ligar o gerador de função a microbomba inicia seu funcionamento e começa a bombear o líquido do béquer reservatório para o béquer que está sobre a balança e esse processo é analisado observando a variação da massa nesse béquer.

A vazão fornecida pela microbomba em operação foi medida com o auxílio de uma balança de precisão e um cronômetro. Assim foi definido um intervalo de tempo de 1 minuto após o qual media-se a variação da massa, em gramas, ocorrida nesse intervalo. Foi utilizada a tara para o béquer com o líquido inicial, sobre a balança, para facilitar a medição da variação da massa. A aquisição dos dados fornecidos pela balança e pelo cronômetro foi realizada manualmente.

Com relação aos parâmetros externos os testes de vazão foram realizados de duas maneiras. A primeira mantinha-se a tensão constante, em 30 V, e variava-se a frequência de 1 a 70 Hz com intervalos pré-definidos (Quadro 3). Na segunda maneira mantinha-se a frequência constante, em 20 Hz, e variava-se a tensão de 5 a 30 V, também com intervalos pré-definidos (Quadro 4). Ao contrário do que foi realizado no teste de pressão máxima, este tinha como objetivo analisar a dependência da vazão com a frequência e com a tensão separadamente.

No teste realizado a tensão constante, para cada valor de frequência selecionado tem-se um valor de massa associada, em gramas, que por sua vez está relacionada ao intervalo de tempo, de 1 minuto, resultando no valor da vazão em g/min e diretamente convertido em mL/min (Quadro 3). No teste à frequência constante, para cada valor de tensão selecionado está associado a um valor de vazão como citado no caso anterior (Quadro 4).

As medidas foram feitas de maneira sistemática visando à possibilidade de comparação entre os resultados obtidos de todos os testes realizados.

Frequência Tempo	1 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	70 Hz
1 min	0,66 g	0,95 g	0,95 g	0,96 g	0,98 g	0,63 g	0,62 g	0,44 g	0,33 g
2 min	1,45 g	1,88 g	1,9 g	1,95 g	1,97 g	1,23 g	1,24 g	0,88 g	0,66 g
3 min	2,24 g	2,84 g	2,84 g	2,94 g	2,94 g	1,84 g	1,85 g	1,33 g	0,98 g
4 min	3,05 g	3,8 g	3,79 g	3,92 g	3,92 g	2,45 g	2,49 g	1,78 g	1,3 g
5 min	3,85 g	4,76 g	4,64 g	4,89 g	4,9 g	3,06 g	3,11 g	2,2 g	1,62 g

**Quadro 3 - Valores das massas utilizadas no cálculo da vazão. Estes valores estão relacionados ao teste realizado com esfera de vidro com diâmetro da câmara das esferas de 2,1 mm, tensão fixa em 30 V e na posição 1.**

Tensão Tempo	5 V	10 V	15 V	18 V	20 V	22 V	25 V	28 V	30 V
1 min	0,31 g	0,91 g	1,49 g	1,69 g	1,88 g	2,07 g	2,15 g	2,3 g	2,38 g
2 min	0,6 g	1,82 g	3 g	3,4 g	3,74 g	4,07 g	4,38 g	4,57 g	4,7 g
3 min	0,89 g	2,76 g	4,53 g	5,09 g	5,67 g	6 g	6,4 g	6,8 g	7 g

**Quadro 4 - Valores das massas utilizadas no cálculo da vazão. Estes valores estão relacionados ao teste realizado com esfera de vidro com diâmetro da câmara das esferas de 2,3 mm, frequência fixa em 20 Hz e na posição 1.**

Durante a operação da microbomba foi observado que inicialmente pode ocorrer um funcionamento instável até que o movimento das esferas entre em sincronia. Como o tempo necessário para atingir uma estabilidade não foi determinado optou-se por não considerar os valores obtidos para o primeiro minuto de funcionamento.

No teste de vazão após um determinado tempo de operação a altura do líquido no béquer sobre a balança começa a aumentar e a vazão fornecida pela microbomba começa a diminuir devido ao surgimento de uma pressão no sentido reverso.

Assim para a confecção dos gráficos dos testes de vazão, que serão apresentados posteriormente, o valor da massa a ser utilizada no cálculo da vazão e plotada no gráfico, resulta da variação entre os tempo de 2 e 3 minutos do Quadro 3 mostrado no Quadro 5.

Frequência Tempo	1 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	70 Hz
3 min - 2min	0,79 g	0,96 g	0,94 g	0,99 g	0,97 g	0,61 g	0,61 g	0,45 g	0,32 g

**Quadro 5 - Valores das massas utilizadas nos gráficos de vazão. Estes valores estão relacionados aos dados do quadro 3, após o procedimento descrito acima.**

Este procedimento foi escolhido visando eliminar o erro associado ao início do funcionamento da microbomba e também eliminar o erro associado à diferença de nível nos béqueres após algum tempo de funcionamento.

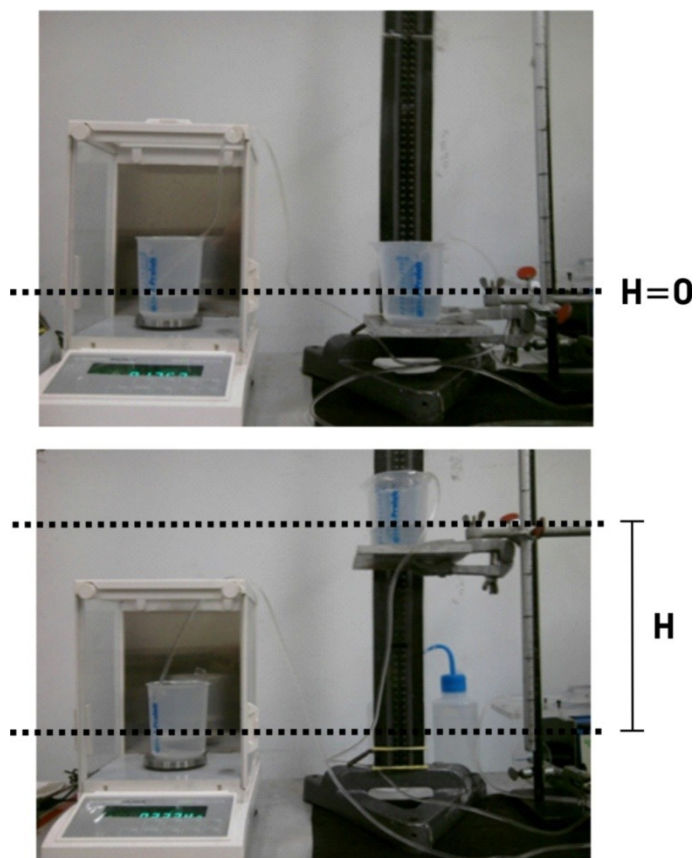
Anteriormente a cada um dos testes realizados, tanto de pressão máxima quanto de vazão, eram realizados alguns pré-testes com o intuito de analisar a sua repetitividade. A repetitividade segundo Inmetro é o grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando, efetuadas sob as mesmas condições de medição, chamadas de condições de repetitividade, a seguir: mesmo procedimento de medição; mesmo observador; mesmo instrumento usado sob mesmas condições; mesmo local; e repetições em curto espaço de tempo. (60)

Neste trabalho os testes foram realizados seguindo as condições de repetitividade citadas acima para cada uma das configurações. Esses pré-testes utilizavam valores definidos de frequência (20 Hz) e de tensão (30 V). Eram realizados 3 pré-testes, se estes não apresentassem variações superiores a 5% eram considerados repetitíveis e assim os testes prosseguiam seguindo os procedimentos descritos anteriormente.

### **3.3.3. Análise da curva característica**

Neste trabalho foram realizados testes com o intuito de analisar a relação entre a vazão fornecida pela microbomba e vários valores de pressão externa aplicados sobre a saída da microbomba, devido a uma coluna de fluido. E com isso analisar as faixas de operação da microbomba desenvolvida e suas curvas características.

Neste teste utilizou-se o seguinte aparato experimental (figura 3.21):



**Figura 3.21 – Foto do aparato experimental utilizado no teste referente as curvas características.**

O aparato experimental é muito semelhante ao utilizado no teste de vazão. A diferença principal é que o becker que serve de reservatório fica sempre sobre a balança e o becker conectado a saída da microbomba fica sobre um suporte de altura variável.

Foram realizadas medidas de vazão utilizando os mesmos procedimentos descritos anteriormente, porém a cada medida de vazão aumentava-se a altura do becker conectado a saída. A altura  $H$  medida é a diferença de altura entre o nível de fluido do becker sobre a balança e o nível de fluido sobre o outro becker, conectado a saída da microbomba.

Para esses testes as esferas de vidro e o diâmetro de 2,3 mm, para a câmara das esferas, foram selecionados, devido aos bons resultados apresentados nos testes anteriores. Nesses testes a frequência foi mantida constante enquanto os valores de tensão foram variados.

## **4. Resultados e Discussões**

A seguir serão apresentados os resultados experimentais obtidos para os testes realizados nas seções anteriores bem como a discussão sobre estes e suas implicações. Também será apresentada a simulação computacional desenvolvida neste trabalho e a comparação dos resultados obtidos experimentalmente e os obtidos na simulação.

### **4.1. Resultados experimentais**

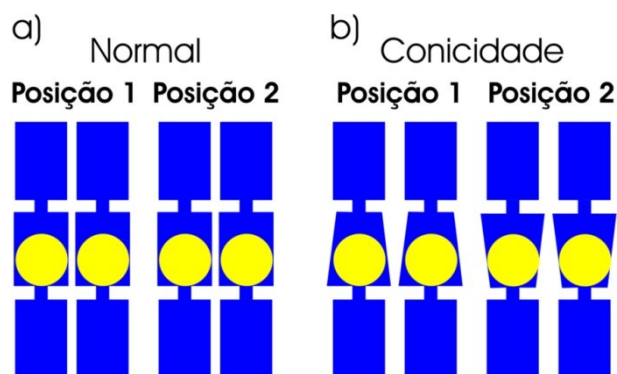
#### **4.1.1. Resultados dos testes de Pressão máxima**

A ordem em que os testes foram realizados segue o Quadro 1, porém os resultados serão apresentados em outra ordem com a finalidade de melhorar a compreensão do texto e facilitar algumas comparações. Nessa outra ordem os resultados foram agrupados com relação ao diâmetro da câmara das esferas.

A seguir serão apresentados os dados referentes aos testes realizados utilizando as câmaras das esferas com diâmetro de 2,1 mm, para cada um dos materiais das esferas utilizados.

Inicialmente foram testadas as esferas de isopor e para essa configuração não houve êxito, tendo em vista que a repetitividade dessa configuração não atingiu um patamar mínimo esperado para esse teste. O funcionamento ocorreu, porém as esferas travavam frequentemente nas entradas e/ou saídas das câmaras, prejudicando o funcionamento da microbomba dificultando a obtenção de dados. Assim esse teste não foi explorado com detalhes e nem apresentado em quadros ou gráficos. Os motivos atribuídos a essa falha foram: a não uniformidade das esferas, tanto no tamanho quanto no grau de esfericidade; a facilidade de deformações nas esferas, devido a características do material; defeitos geométricos das câmaras das esferas, como a conicidade.

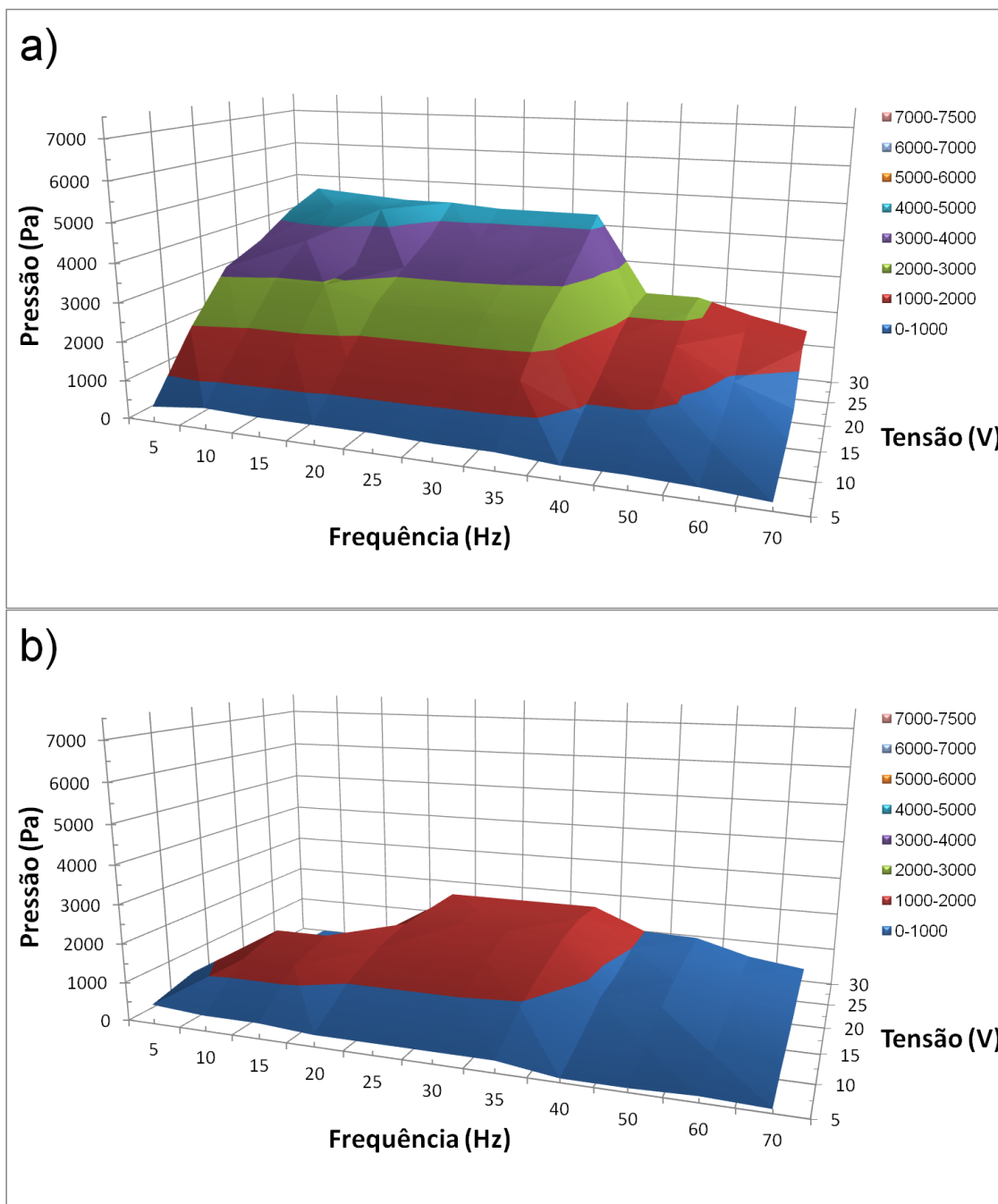
Esta conicidade foi detectada após a execução dos testes e talvez seja o defeito geométrico de maior relevância no trabalho. Este defeito é inerente ao processo de fabricação devido ao perfil de corte, observado na Figura 3.2, que resulta na fabricação de câmaras com perfis cônicos ao contrário do esperado que seria um canal cilíndrico reto.



**Figura 4.1 – a) Perfil cilíndrico reto, esperado para o canal que compõe a câmara da esfera b) perfil resultante, apresentando conicidade.**

Este defeito causa uma quebra de simetria do sistema o que certamente resulta numa diferença de desempenho entre as posições 1 e 2. Apesar de detectado no início dos testes esse defeito não foi corrigido. Assim analisou-se a sua influência sobre o desempenho das microbombas testadas. Através da Figura 4.1b percebe-se que, para grandes amplitudes nos movimentos das esferas, ambas as posições sofrem com o efeito da conicidade, devido aos travamentos, porém para baixas amplitudes a posição 1 pode funcionar melhor do que a posição 2, pois espera-se que trave menos.

Utilizando esferas de vidro os resultados foram melhores por apresentarem a repetitividade mínima esperada nos pré-testes. A melhora no desempenho dessa configuração com relação à anterior foi atribuída à mudança no material que constitui a esfera, já que a esfera de vidro não deforma e consequentemente diminui o travamento, e também a possui uma uniformidade e esfericidade maior que a de isopor. Assim os resultados obtidos para esta configuração foram organizados em quadros e apresentados nos gráficos a seguir:



**Figura 4.2 - Gráficos tridimensionais relacionados ao teste de pressão máxima utilizando esferas de vidro e diâmetros da câmara da esfera de 2,1 mm, sendo a) o resultado para a posição 1 e b) para a posição 2.**

A Figura 4.2 possibilita a comparação entre os perfis de pressão, ou perfis de desempenho, relacionados às posições 1 e 2. Para a posição 1 os valores de pressão máxima variam fortemente com a tensão aplicada, porém se mantêm praticamente constantes com a frequência até o valor aproximado de 40 Hz, onde ocorre uma queda brusca. Para a posição 2 os valores de pressão

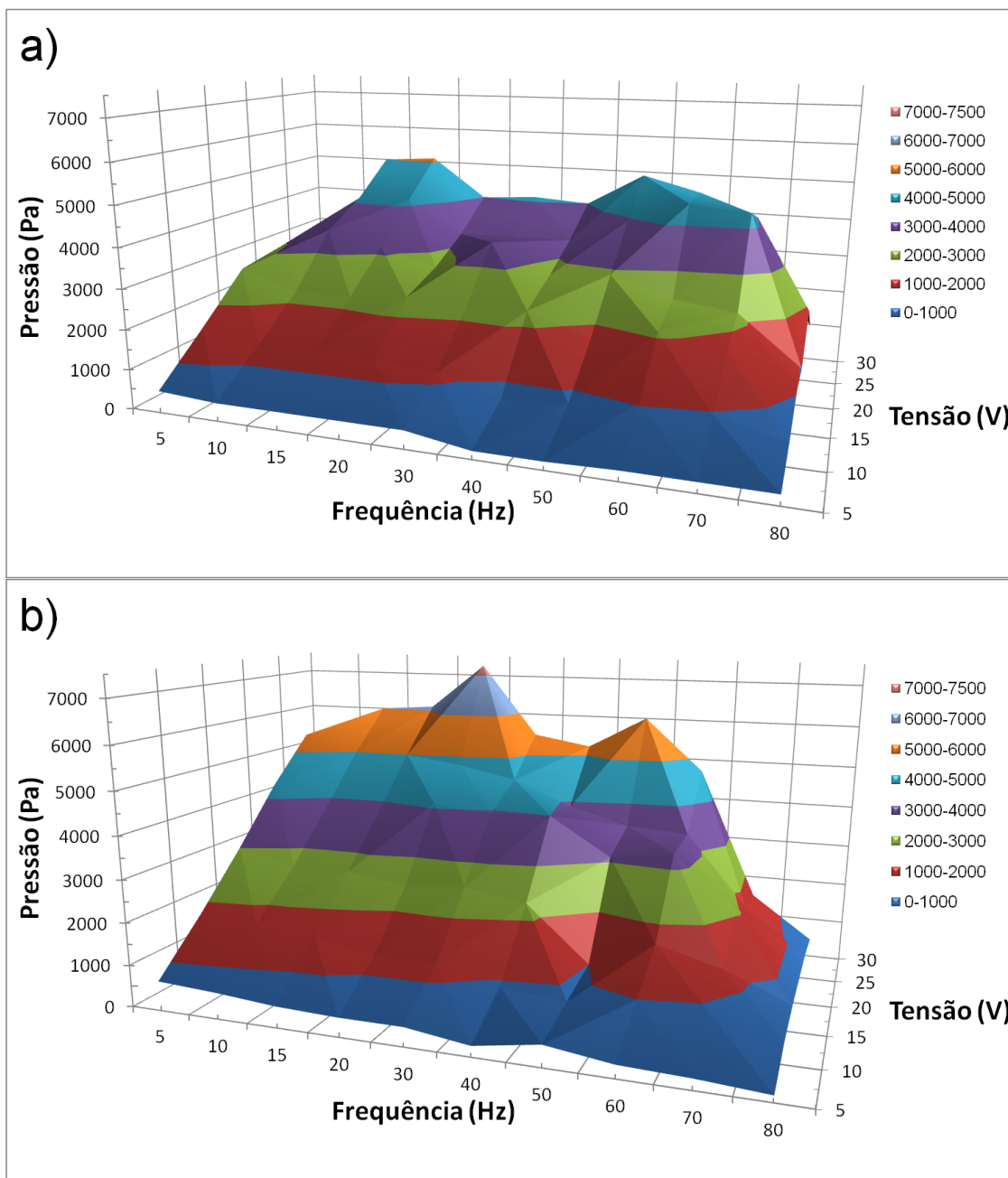
máxima iniciam baixos e crescem com o aumento da frequência atingindo o seu valor máximo em 20 Hz. Semelhante a posição 1 os valores mantêm-se constantes até a frequência de 40 Hz onde também apresenta uma redução. A partir de 40 Hz a diminuição no desempenho, para ambos os casos, é esperada devido à diminuição da amplitude do deslocamento fornecido pelo atuador. O mau funcionamento observado na faixa de 0 a 20 Hz, na posição 2, pode estar relacionado a conicidade apresentada pelas câmaras, onde nessa situação a esfera tende a travar na posição inferior da câmara. Além disso, a grande amplitude do movimento das esferas no interior das câmaras devido ao alto valor de tensão e baixa frequência, pode contribuir ainda mais com o mau funcionamento. Foi observado que nestas condições as esferas chocam-se com as duas extremidades da câmara da esfera, dificultando o movimento coordenado das mesmas, o que é um fator crucial para o funcionamento da microbomba. O resultado desse mau funcionamento, na maioria das vezes, era um bombeamento reverso ao esperado para a posição 2. Este fato não é observado na posição 1, pois nesta posição o fluido já estava sendo bombeado neste sentido.

Através da análise dos dois casos anteriores concluiu-se que essa combinação utilizada, o diâmetro das esferas e o diâmetro das câmaras das esferas, não apresentou um funcionamento satisfatório. Assim optou-se por não executar o teste com as esferas de aço utilizando essa combinação.

A seguir serão apresentados os dados referentes aos testes realizados utilizando as câmaras das esferas com diâmetro de 2,3 mm, para cada um dos materiais das esferas utilizados.

Para o teste realizado com as esferas de isopor os resultados obtidos foram melhores do que os obtidos utilizando um diâmetro da câmara de 2,1 mm. Esse teste foi realizado com êxito atingindo a repetitividade mínima esperada, ao contrário do caso anterior. Os dados para estas medidas podem ser observados na figura a seguir:

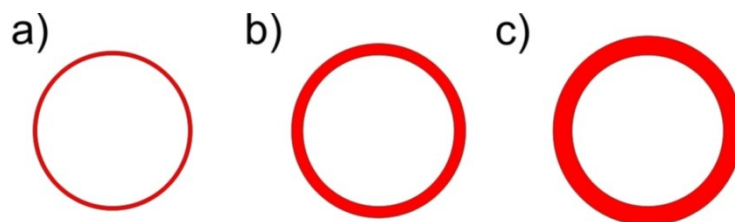




**Figura 4.3 - Gráficos tridimensionais relacionados ao teste de pressão máxima utilizando esferas de isopor e diâmetros da câmara das esferas de 2,3 mm, sendo a) o resultado para a posição 1 e b) para a posição 2.**

A melhora no desempenho foi atribuída à variação do diâmetro da câmara das esferas. A explicação para o fato está baseada na diminuição da pressão aplicada sobre as esferas, devido ao aumento da área da secção transversal disponível para a passagem do fluido, diminuindo a deformação e o travamento das mesmas. Esta área da secção transversal disponível para a passagem do

fluido está relacionada com a diferença entre o diâmetro da câmara e o diâmetro das esferas como mostra a figura 4.4.



**Figura 4.4 - Ilustração da área da secção transversal (em vermelho) disponível para a passagem do fluido no interior da câmara da esfera. As esferas (em branco) possuem um diâmetro fixo de 2 mm e as câmaras de esferas possuem diâmetros de (a) 2,1 mm, (b) 2,3 mm e (c) 2,5 mm.**

Nesta configuração novamente a posição 1 apresenta um comportamento inicial, na faixa de 0 a 20 Hz, diferente do observado na posição 2 e este fato é atribuído as mesmas causas mencionadas anteriormente. As duas posições apresentam um melhora no desempenho, com relação a pressão máxima, em 50 Hz e diminuem com o aumento da frequência. Este aumento inesperado do desempenho pode estar relacionado com o modo de vibração da membrana do atuador ou com a frequência de ressonância natural do sistema, porém os dados obtidos ainda não são suficientes para estas conclusões.

Para o teste realizado com as esferas de vidro os dados obtidos foram dispostos na Figura 4.5, a seguir:

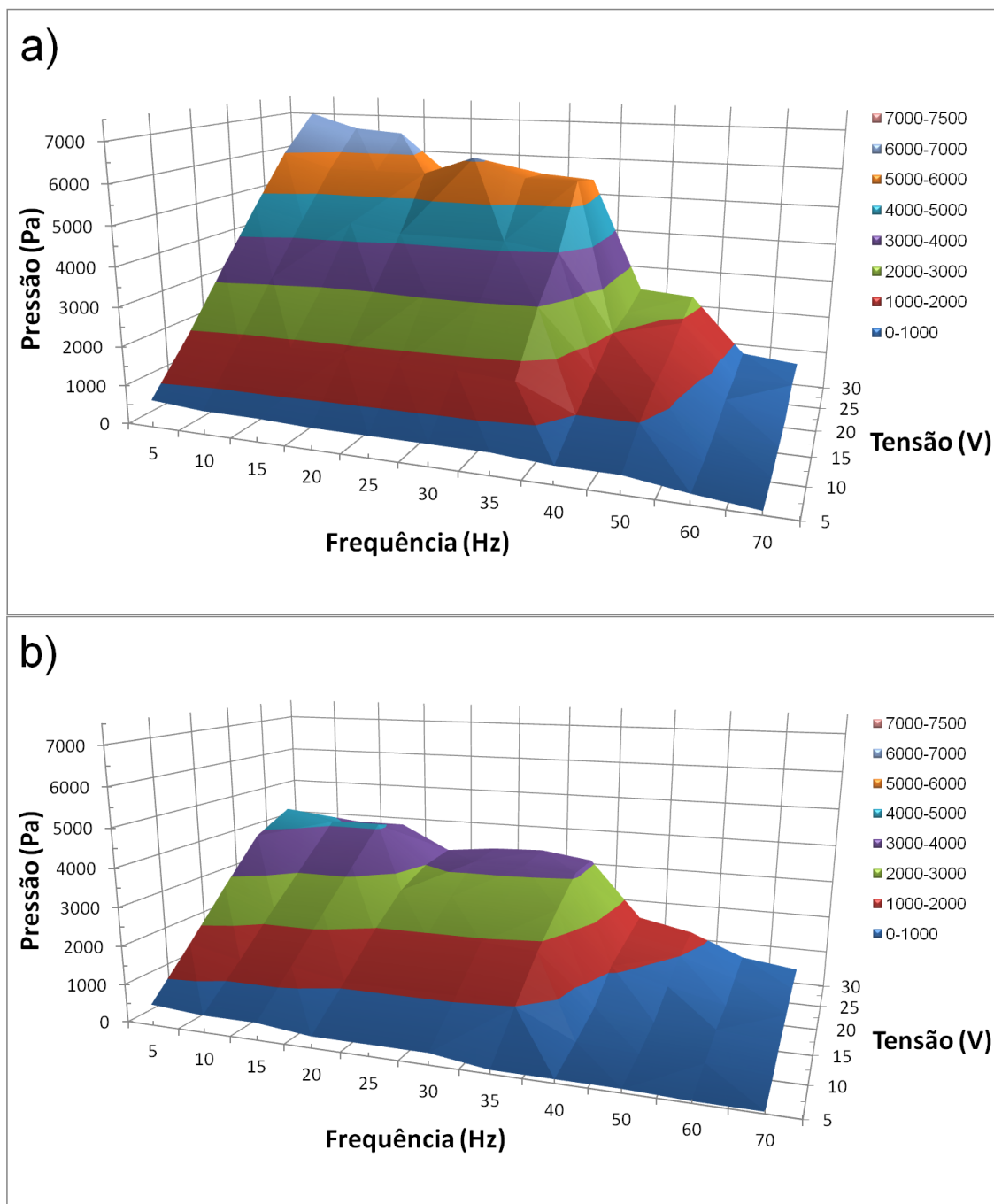


Figura 4.5 - Gráficos tridimensionais relacionados ao teste de pressão máxima utilizando esferas de vidro e diâmetros da câmara das esferas de 2,3 mm, sendo a) o resultado para a posição 1 e b) para a posição 2.

Comparando esse teste, com o realizado utilizando o mesmo tipo de esferas, mas com o diâmetro de 2,1mm, observou-se que a diferença no perfil de desempenho entre as duas posições, na faixa de 0 a 20 Hz, foi amenizada e isso foi atribuído novamente a variação do diâmetro das câmaras das esferas.

Esse teste apresentou a maior semelhança entre os perfis de desempenho entre as posições 1 e 2.

O terceiro teste associado à câmara das esferas com diâmetro de 2,3 mm foi realizado utilizando-se esferas de aço. Os dados para esse teste serão apresentados seguindo o mesmo padrão dos anteriores e podem ser vistos na Figura 4.6.

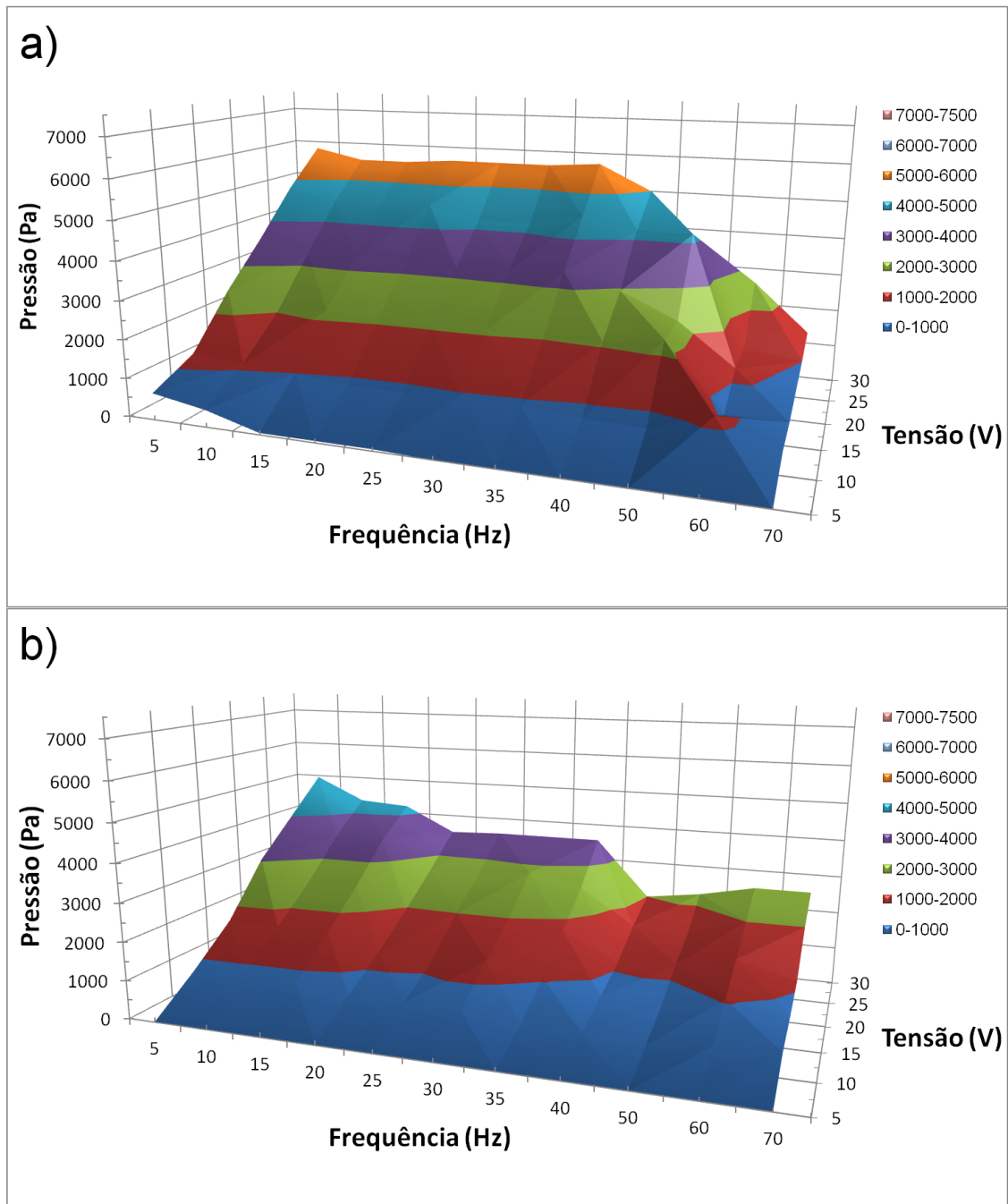


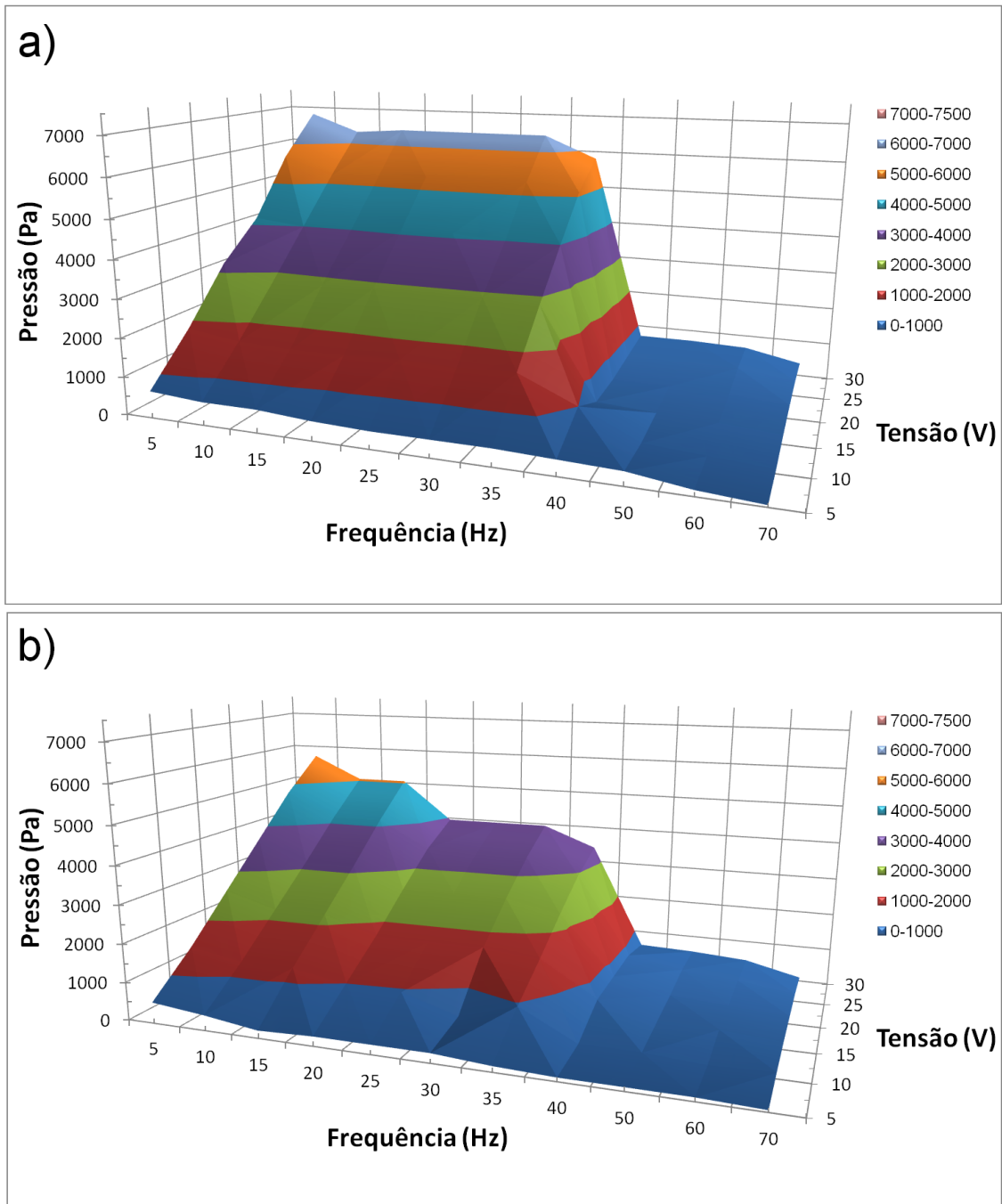
Figura 4.6 - Gráficos tridimensionais relacionados ao teste de pressão máxima utilizando esferas de aço e diâmetros da câmara das esferas de 2,3 mm, sendo a) o resultado para a posição 1 e b) para a posição 2.

Na figura acima os valores de pressão máxima, para a posição 1, são praticamente constantes na faixa de 5 a 35 Hz, apresentando uma queda contínua a partir de 40 Hz, enquanto a posição 2 apresenta uma queda em 20 Hz , outra em 40 Hz, e posteriormente, em 50 Hz, apresenta uma melhora no desempenho que atinge seu valor máximo em 60 Hz e volta a diminuir com o aumento da frequência. Tanto as quedas quanto as melhoras no desempenho das microbombas podem estar associadas aos modos de vibração da membrana quanto e/ou frequências de ressonância do sistema.

A seguir serão apresentados os dados obtidos referentes aos testes realizados utilizando as câmaras das esferas com diâmetro de 2,5 mm para cada um dos materiais das esferas utilizados.

O teste utilizando as esferas de isopor nesta configuração, não atingiu um patamar mínimo de repetitividade almejado pelo trabalho. Assim este teste também não foi computado e não servirá de base para comparações. Esta falha foi atribuída à combinação de dois fatores: o material da esfera (isopor) e o diâmetro da câmara das esferas (de 2,5 mm). Foi observado que nessa configuração a esfera realizava um movimento na horizontal, dentro da câmara das esferas, enquanto esperava-se um movimento na vertical para o funcionamento planejado. Este movimento indesejado pode ser considerado uma consequência do aumento do diâmetro das câmaras das esferas, oferecendo uma maior liberdade ao movimento nas proximidades das entradas e/ou saídas das mesmas. A baixa densidade da esfera de isopor pode ser um fator que contribui ainda mais para esse movimento, devido a sua baixa inércia ou resistência ao movimento.

Para o teste realizado utilizando-se esferas de vidro os resultados estão dispostos na Figura 4.7, a seguir.



**Figura 4.7 - Gráficos tridimensionais relacionados ao teste de pressão máxima utilizando esferas de vidro e diâmetros da câmara das esferas de 2,5 mm sendo a) o resultado para a posição 1 e b) para a posição 2.**

Esta configuração possui um perfil de desempenho semelhante ao apresentado na Figura 4.5 na faixa de 0 a 40 Hz, a partir deste valor é observada uma redução brusca no seu desempenho e não apresenta uma posterior melhora, como na configuração utilizada na comparação. Esta redução abrupta no desempenho na frequência de 40 Hz foi atribuída ao

movimento horizontal das esferas, dentro das câmaras, que passam a predominar a partir desse valor de frequência.

Por fim são apresentados, na Figura 4.8, os resultados obtidos para o teste utilizando as esferas de aço.

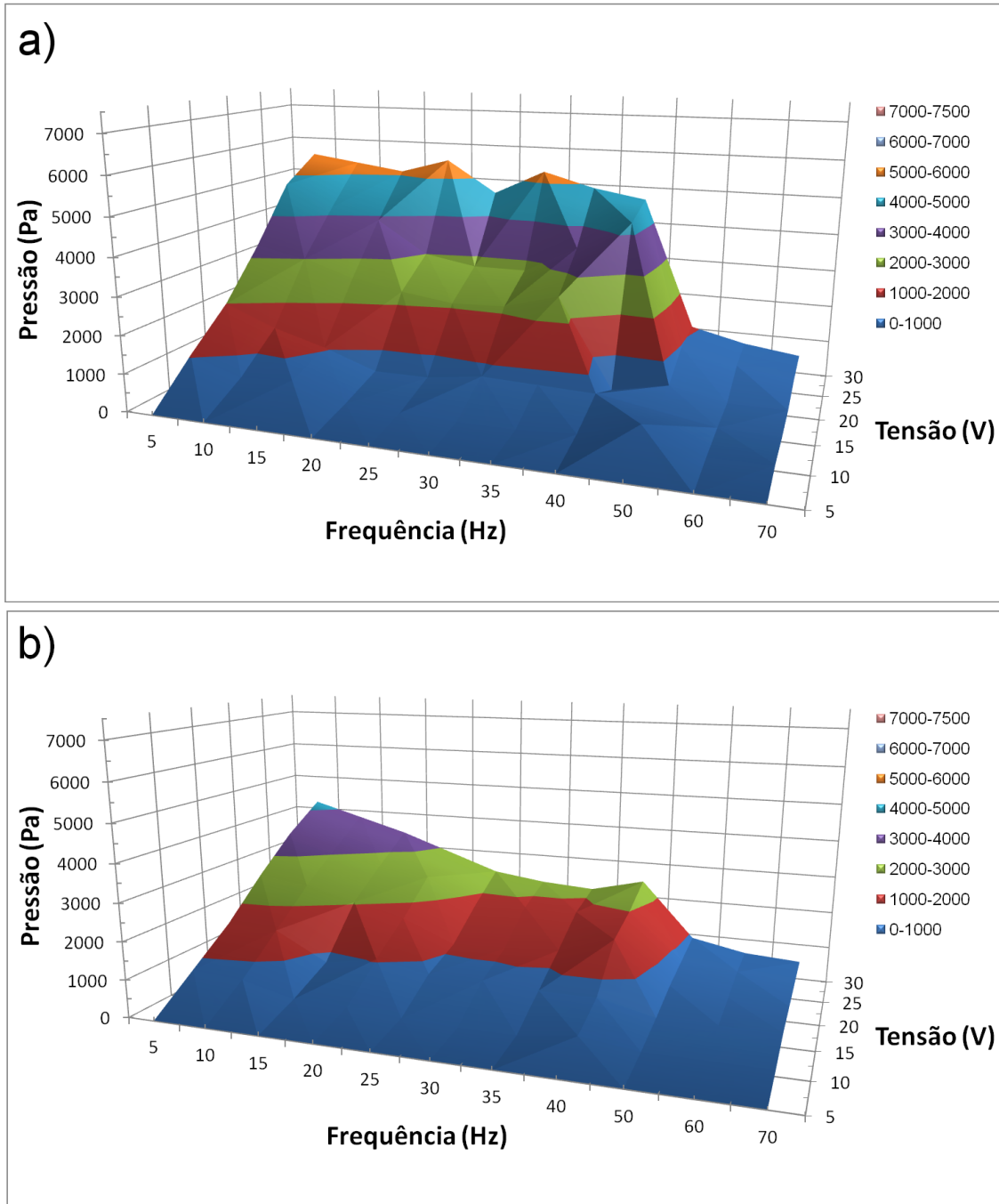


Figura 4.8 - Gráficos tridimensionais relacionados ao teste de pressão máxima utilizando esferas de aço e diâmetros da câmara das esferas de 2,5 mm sendo a) o resultado para a posição 1 e b) para a posição 2.

Tanto para a posição 1 quanto para a posição 2 o perfil do desempenho é semelhante ao observado na Figura 4.7, porém apresenta uma instabilidade nas medidas. Uma diferença significativa observada foi a frequência onde o desempenho cai bruscamente que neste caso é de 50 Hz. A partir desse valor o comportamento volta a assemelhar-se ao observado na Figura 4.7. Ainda observa-se, na Figura 4.8, que a posição 2 volta a apresentar uma melhora no desempenho em 40 Hz e este fato pode estar relacionado com aumento do valor de frequência onde o desempenho cai que por sua vez está relacionado com o material da esfera (aço).

Os resultados dos testes onde foram utilizadas esferas de vidro possibilitam comparações e análises mais detalhadas, com relação a variação do diâmetro da câmara, pois foi o único material que funcionou de maneira satisfatório para os 3 valores de diâmetros utilizados. Comparando os gráficos nas figuras 4.2, 4.5 e 4.7, observou-se que à medida que os valores para o diâmetro da câmara aumentam os valores da pressão máxima também o fazem. Os três possuem uma queda de desempenho na frequência de 40 Hz. Apenas a configuração referente à figura 4.5 não apresentou uma região anômala, como a região entre 0 e 20 Hz na Figura 4.2 e de 40 a 70 Hz, para a - Gráficos tridimensionais relacionados ao teste de pressão máxima utilizando esferas de vidro e diâmetros da câmara das esferas de 2,5 mm sendo a) o resultado para a posição 1 e b) para a posição 2. Assim esta configuração foi associada ao melhor resultado obtido com relação ao desempenho no teste de pressão máxima.

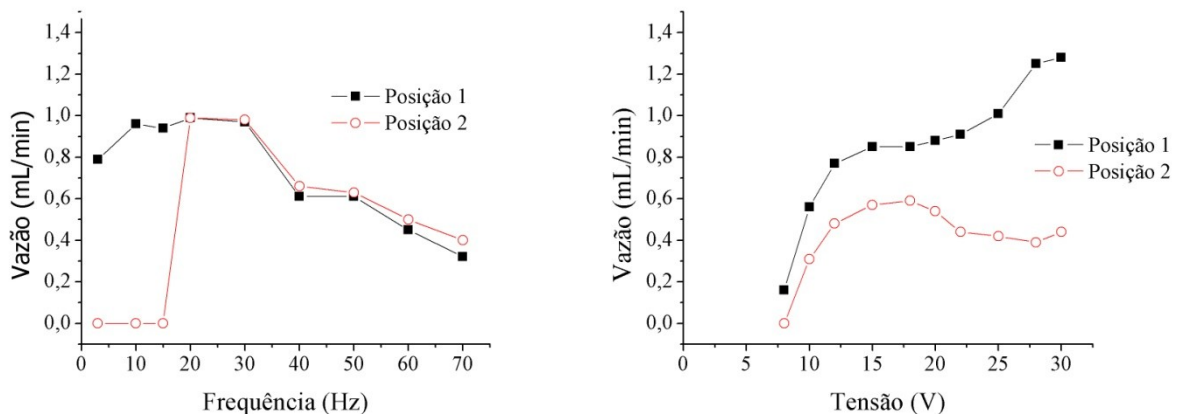
Com relação ao diâmetro da câmara das esferas o valor de 2,3 mm foi o único que funcionou para os três tipos de material das esferas. Comparando os gráficos nas figuras 4.3, 4.5 e 4.6, observou-se que este parâmetro possui uma influência direta no perfil dos desempenhos, causando alteração principalmente nas regiões de quedas ou melhoras desempenho, o que sugere uma relação entre os materiais e as frequências naturais de ressonância do sistema.



#### 4.1.2. Resultados dos testes de vazão

Com base nos resultados obtidos nos testes anteriores e nas análises realizadas, serão apresentados apenas os testes de vazão associados a configurações nas quais o teste de pressão máxima foi realizado com sucesso. Estes resultados serão apresentados seguindo a mesma ordem utilizada na seção anterior.

Inicialmente serão apresentados os resultados dos testes de vazão obtidos para a configuração que utilizava um diâmetro da câmara das esferas de 2,1 mm e esferas de vidro. Os dados obtidos utilizando-se esta configuração estão dispostos na Figura 4.9, a seguir.

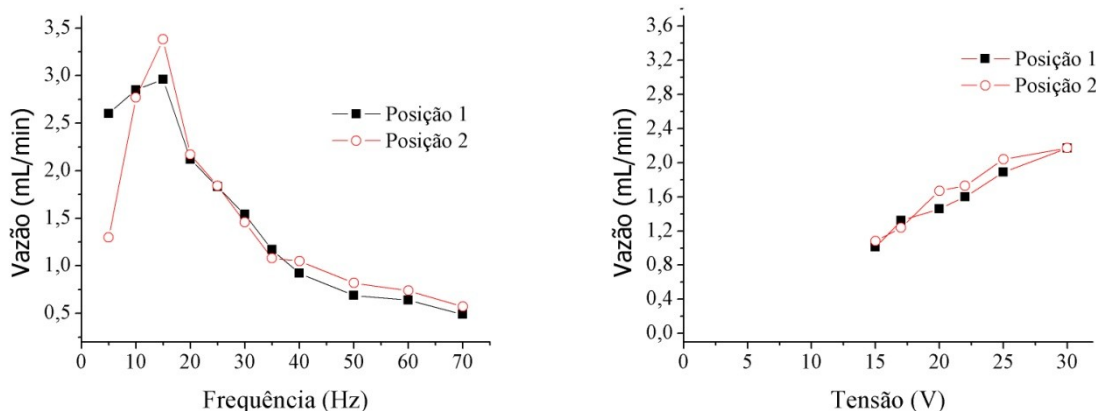


**Figura 4.9 - A esquerda um gráfico da vazão pela frequência, com a tensão constante em 30 V, e a direita um gráfico da vazão pela tensão, com a frequência constante em 20 Hz, ambos para o dispositivo com câmaras das esferas de 2,1 mm de diâmetro e utilizando esferas de vidro. Os pontos nos gráficos foram ligados<sup>15</sup> apenas para facilitar a visualização.**

A seguir serão apresentados os dados obtidos a partir dos testes realizados com a câmara das esferas com diâmetro de 2,3 mm, para cada um dos materiais das esferas utilizados.

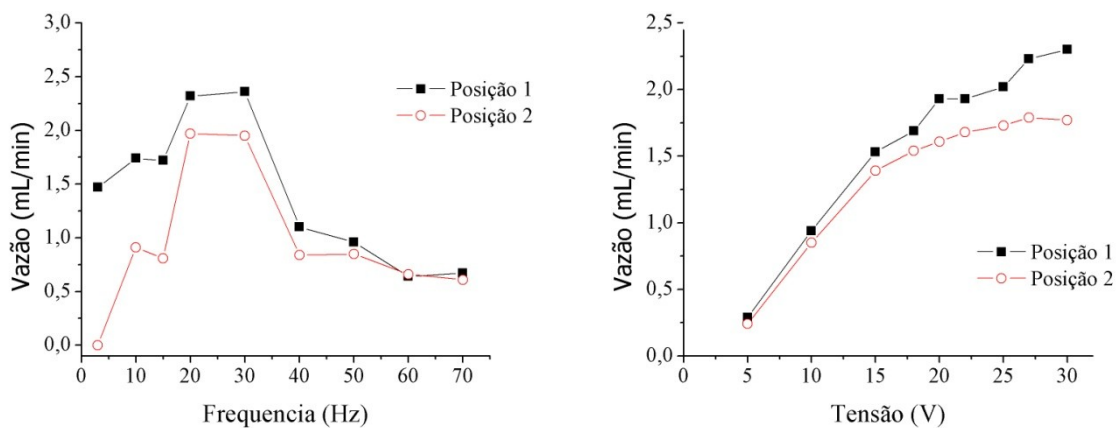
Seguindo a ordem de apresentação dos dados experimentais são dispostos na Figura 4.10, a seguir, os resultados para os testes realizados utilizando-se esferas de isopor.

<sup>15</sup> Os pontos nos gráficos bidimensionais foram ligados com o intuito de facilitar a visualização, caso algum ajuste de curva seja realizado este aparecerá explicitamente na legenda do gráfico e será citado no texto.



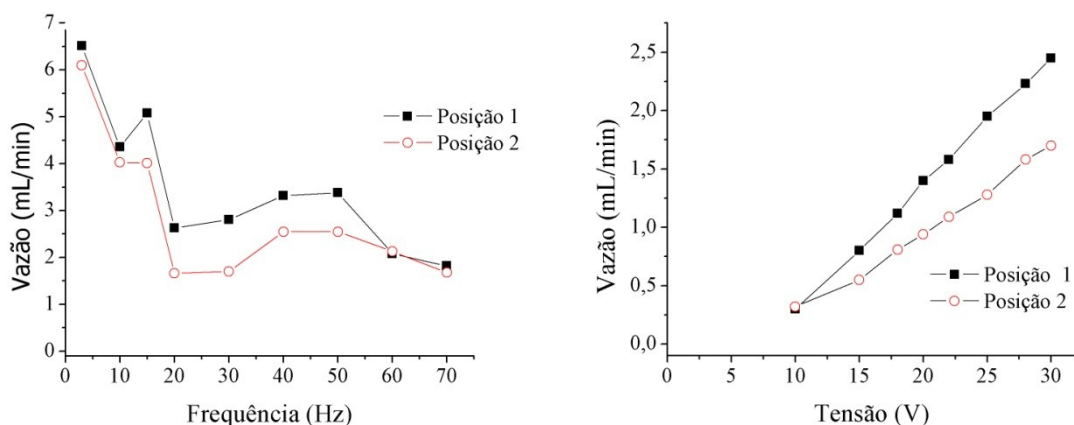
**Figura 4.10 - A esquerda um gráfico da vazão pela frequência, com a tensão constante em 30 V, e a direita um gráfico da vazão pela tensão, com a frequência constante em 20 Hz, ambos para o dispositivo com câmaras das esferas de 2,3 mm de diâmetro e utilizando esferas de isopor.**

Para a mesma configuração, porém empregando-se esferas de vidro os resultados obtidos para o teste de vazão podem ser analisados através do gráfico a seguir (Figura 4.11).



**Figura 4.11 - A esquerda um gráfico da vazão pela frequência, com a tensão constante em 30 V, e a direita um gráfico da vazão pela tensão, com a frequência constante em 20 Hz, ambos para o dispositivo com câmaras das esferas de 2,3 mm de diâmetro e utilizando esferas de vidro.**

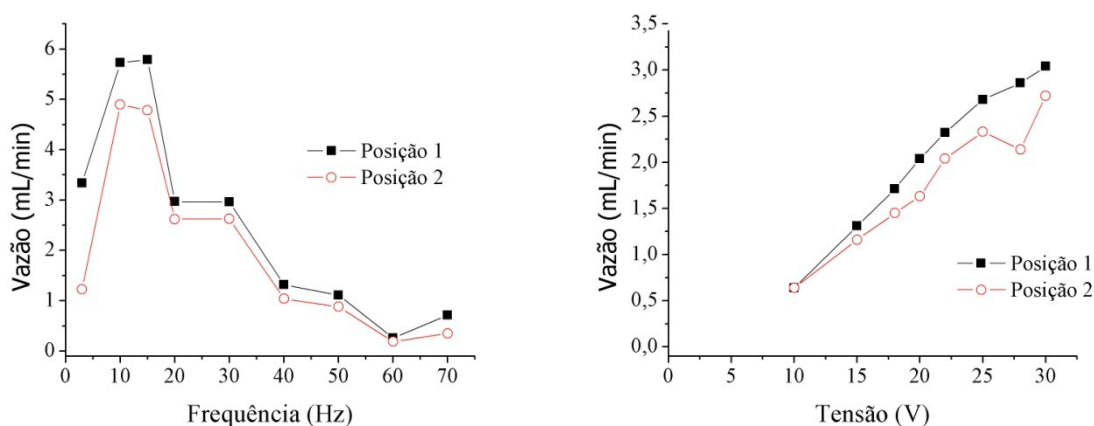
O último teste de vazão, associado a esta configuração, a ser apresentado é relacionado às esferas de aço e seus resultados podem ser analisados através da Figura 4.12.



**Figura 4.12 - A esquerda um gráfico da vazão pela frequência, com a tensão constante em 30 V, e a direita um gráfico da vazão pela tensão, com a frequência constante em 20 Hz, ambos para o dispositivo com câmaras das esferas de 2,3 mm de diâmetro e utilizando esferas de aço.**

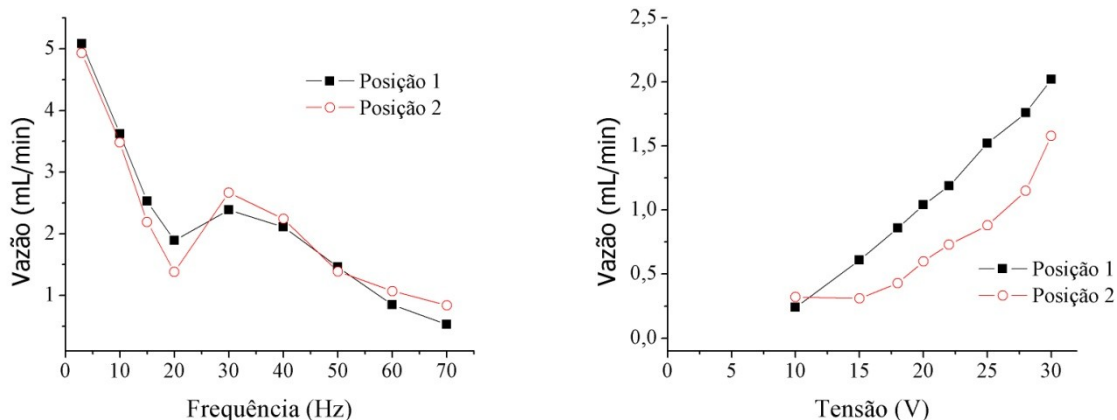
A seguir serão apresentados os dados obtidos a partir dos testes realizados com a câmara das esferas com diâmetro de 2,5 mm, para cada um dos materiais das esferas utilizados.

Os resultados relacionados aos testes de vazão, para esta configuração, utilizando-se esferas de vidro estão dispostos no gráfico a seguir (Figura 4.13).



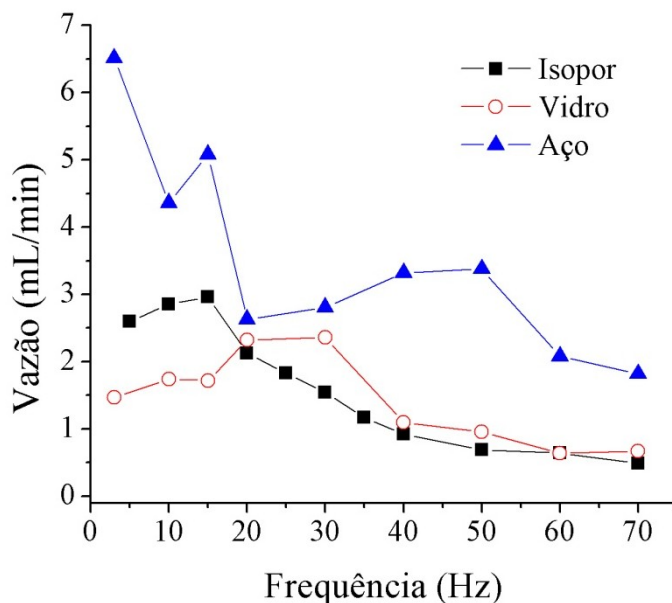
**Figura 4.13 - A esquerda um gráfico da vazão pela frequência, com a tensão constante em 30 V, e a direita um gráfico da vazão pela tensão, com a frequência constante em 20 Hz, ambos para o dispositivo com câmaras das esferas de 2,5 mm de diâmetro e utilizando esferas de vidro.**

Por fim os resultados relacionados aos testes de vazão, para esta configuração, utilizando-se esferas de aço estão dispostos no gráfico a seguir (Figura 4.14).



**Figura 4.14 - A esquerda um gráfico da vazão pela frequência, com a tensão constante em 30 V, e a direita um gráfico da vazão pela tensão, com a frequência constante em 20 Hz, ambos para o dispositivo com câmaras das esferas de 2,5 mm de diâmetro e utilizando esferas de aço.**

Comparando os gráficos à esquerda na Figura 4.9, Figura 4.11 e Figura 4.13 foi notado que a variação no diâmetro da câmara das esferas influencia na diferença de desempenho entre as posições 1 e 2. Aumentando o diâmetro, a diferença entre estas posições diminui. Em seguida comparando a Figura 4.13 com a Figura 4.14 observou-se uma diminuição ainda maior, o que indica uma dependência com o material das esferas. Para justificar esse fato considera-se que as esferas ao movimentarem-se no interior das câmaras que as contém, podem se chocar com as extremidades do canal causando uma perda na sincronia do movimento das mesmas, reduzindo a sua eficiência. O aumento no diâmetro das câmaras e na massa das esferas, ameniza os choques com as extremidades, reduzindo a diferença nos desempenhos entre as posições 1 e 2.

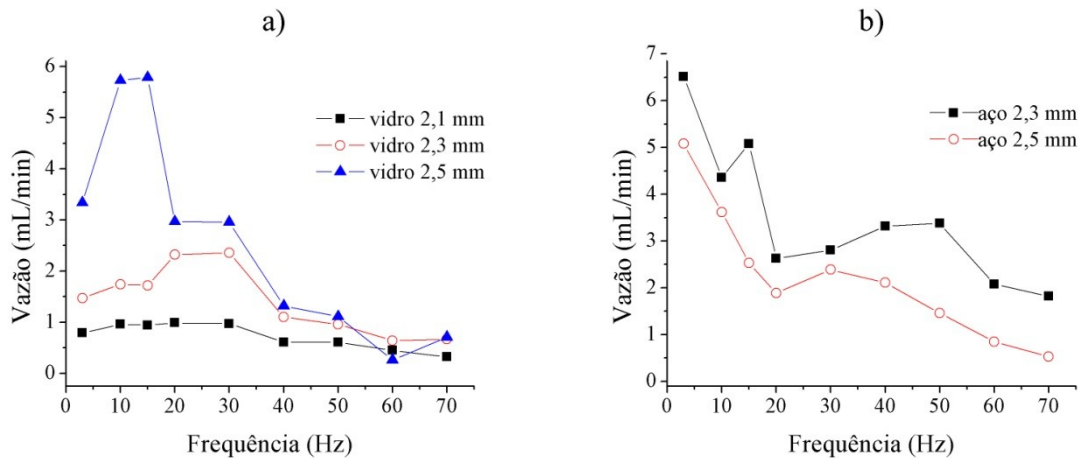


**Figura 4.15 – Gráfico da vazão pela frequência com relação ao material das esferas: isopor, aço e vidro, todos referentes a posição 1 e para configurações com 2,3 mm de diâmetros.**

Analisando os valores de vazões obtidos com relação ao material das esferas na Figura 4.15, observou-se que para as esferas de aço os maiores valores de vazão estão associados a baixas frequências (1 a 10 Hz), diferentemente do que ocorre para os demais materiais. Isso pode estar relacionado com a massa das esferas.

Comparando o movimento de uma esfera de aço e uma de vidro dentro de uma câmara espera-se que a velocidade da esfera de aço seja menor, devido a sua maior inércia, resultando num tempo maior para o deslocamento de uma extremidade a outra da câmara. Conseqüentemente o tempo maior permitirá a passagem de uma maior quantidade de fluido aumentando assim a vazão. No caso da esfera de vidro, esta possui uma velocidade maior assim atinge a outra extremidade da câmara num tempo menor, reduzindo a vazão.

Com o aumento da frequência ocorre uma diminuição na vazão, para todos os casos, devido à redução da amplitude de deslocamento das esferas.



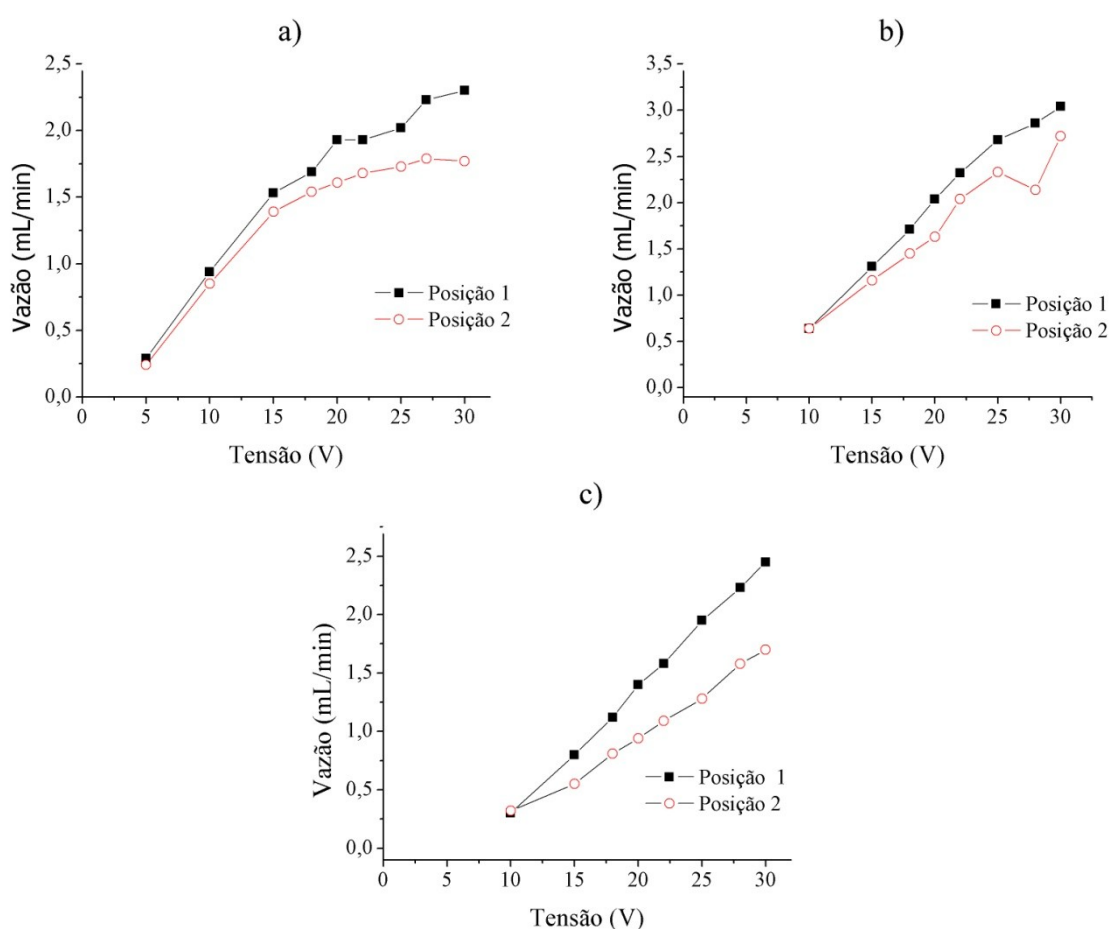
**Figura 4.16 - Gráficos da vazão pela frequência com relação diâmetro da câmara da esfera: 2,1 mm, 2,3 mm e 2,5 mm, a) utilizando esferas de vidro e b) utilizando esferas de aço, todos referentes a posição 1.**

Analisando a influência do diâmetro da câmara das esferas no teste de vazão, utilizando esferas de vidro, através da Figura 4.16a, observa-se que o aumento no diâmetro das câmaras resulta num aumento da vazão. Este fato está relacionado aumento da área disponível para a passagem do fluido e já era previsto. Entretanto para a Figura 4.16b, utilizando esferas de aço, o mesmo não ocorre de modo que ao aumentar o diâmetro os valores máximos de vazão diminuíram. Esse fato pode indicar que a configuração utilizando um diâmetro de 2,3 mm esteja próximo ao ideal, com relação à pressão aplicada sobre a esfera e a amplitude de deslocamento dessa dentro da câmara. Aumentando o diâmetro para 2,5 mm diminui-se a pressão sobre a esfera e a amplitude do movimento e conseqüentemente a vazão, como já explicado anteriormente.

Ao comparar os desempenhos com relação ao diâmetro da câmara e o material da esfera, observou-se que ambos têm influência sobre a vazão, porém o perfil de desempenho esta relacionado com o material.

Através dos testes relacionados à influência da tensão, fornecida ao atuador, sobre a vazão (a frequência constante) observa-se, a direta nas figuras de 4.10 a 4.14, que para baixos valores de tensão a diferença de desempenho entre as posições 1 e 2 é menor, e essa aumenta com o valor da tensão. Esse fato pode estar relacionado à intensidade dos choques das esferas com as extremidades das câmaras associado à conicidade das mesmas.

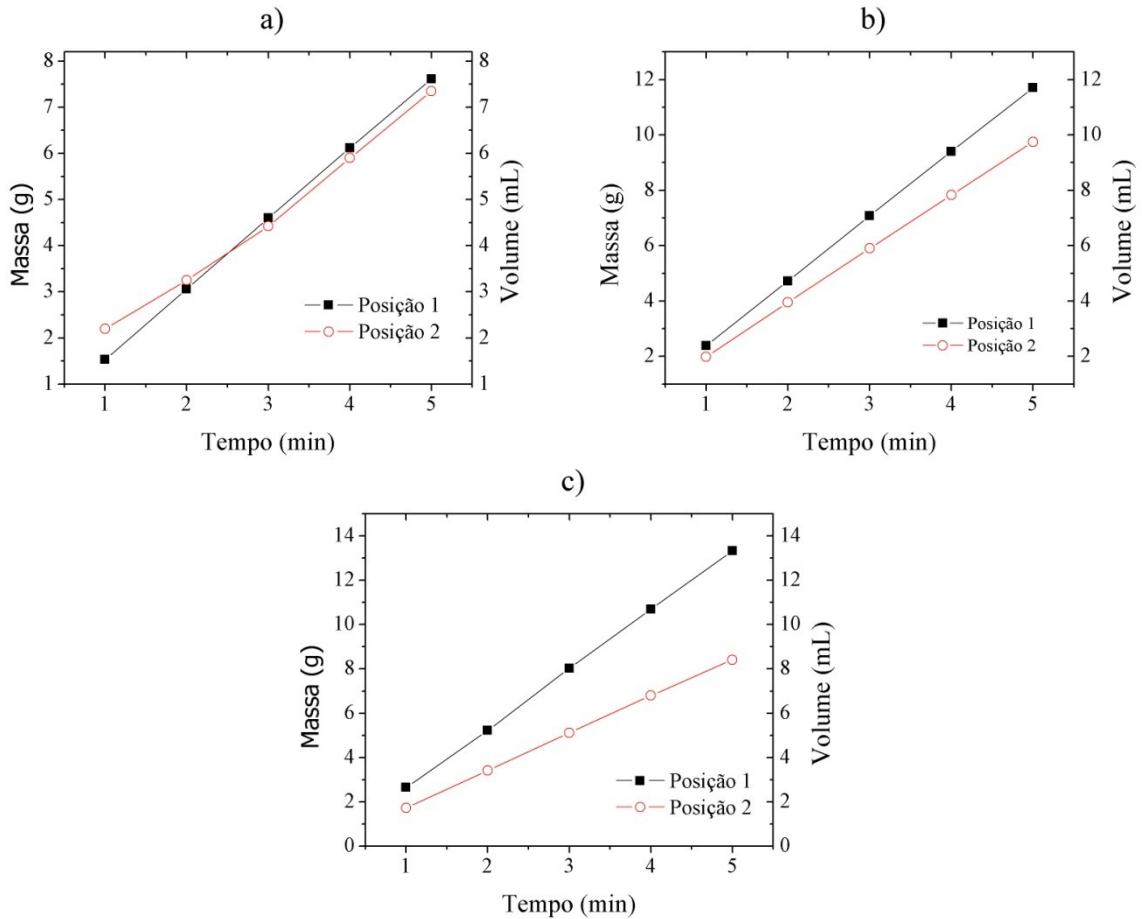
Na figura 4.17a é possível observar que a partir de um determinado valor de tensão as variações no valor da vazão são menores, podendo indicar um ponto limite de tensão para esta configuração. Isso está relacionado ao choque das esferas com as extremidades das câmaras. No entanto, aumentando o diâmetro da câmara, figura 4.17b, a pressão sobre a esfera é reduzida e a amplitude do seu movimento também, diminuindo assim os choques. Consequentemente a região limite de tensão é deslocada para valores mais altos. Esse mesmo fato ocorre com o aumento da densidade das esferas (figura 4.17c) o que também reduz a amplitude do movimento das esferas e seus choques.



**Figura 4.17 – Comparação entre gráficos relativos aos testes de vazão a frequência constante, onde a) utilizou-se câmaras de 2,3 mm e esferas de vidro, b) câmaras de 2,5 mm e esferas de vidro e c) câmaras de 2,3 mm e esferas de aço.**

Realizando-se os testes de vazão com relação à frequência e vazão com relação à tensão separadamente, foi possível observar a influência de cada um desses parâmetros sobre o mensurando em questão.

Com os resultados obtidos nos testes de vazão, como os vistos no quadro 3 por exemplo, foi possível analisar a variação da massa e volume com relação ao tempo de funcionamento da microbomba. E os resultados podem ser observados nas figuras a seguir.



**Figura 4.18 - Gráfico da massa/volume com relação ao tempo, a tensão constante em 30 V e a frequência constante em 30 Hz, para o dispositivo com câmaras das esferas de 2,3 mm de diâmetro e utilizando esferas a) de isopor, b) de vidro e c) de aço.**

Através dessas figuras observa-se, pela linearidade nos gráficos, que a vazão permanece praticamente constante durante o tempo de funcionamento da microbomba no teste de vazão. Estes resultados servem de confirmação com relação à estabilidade das medidas obtidas.



#### 4.1.3. Discussões gerais sobre os testes de Pressão máxima e de Vazão

Uma discussão sobre a diferença de desempenho entre as duas posições possíveis para a microbomba em questão foi realizada durante o trabalho, e após a comparação dos resultados dos testes de pressão máxima e de vazão surgiu à seguinte questão: Porque a diferença entre os perfis de desempenho das posições 1 e 2 são menores no teste de vazão? Em busca de uma resposta chegou-se a conclusão que o método de medição pode influenciar no desempenho das posições 1 e 2 de maneira diferente.

No caso do teste de pressão máxima a pressão exercida sobre cada uma das câmaras e suas respectivas esferas pode ser diferente, devido à diferença na altura da coluna de fluido sobre cada, podendo causar uma diferença na amplitude de oscilação das esferas. Porém acredita-se que as diferenças de pressões não sejam suficientes e que a causa também esteja relacionada com a conicidade.

Isso justificaria a diminuição dessa diferença observada no teste de vazão, a tensão constante, uma vez que esses foram realizados mantendo-se as pressões, ou alturas da coluna de fluido, iguais sobre ambas as câmaras, que possuíam o mesmo defeito.

Nos testes de pressão máxima e de vazão foram variados dois parâmetros relacionados ao atuador, a tensão e a frequência.

Variando a frequência, tanto a vazão quanto a pressão máxima, apresentam comportamentos menos uniforme, onde podem ser observadas quedas de eficiência para determinados valores seguidos de aumentos não esperados. Esse comportamento pode ser influenciado por fatores como: a frequência natural do sistema, modos de vibração da membrana, perda de sincronia no movimento das esferas. Variando a tensão, tanto a vazão quanto a pressão máxima, apresentam um comportamento mais uniforme.

Portanto uma maneira eficiente de realizar futuros testes seria iniciar analisando o perfil vazão com relação à frequência, para a configuração selecionada, escolher a frequência de melhor desempenho, mantendo-a constante, e por fim variar a tensão para obter a faixa de vazão desejada. Isso também pode ser utilizado nos testes de pressão máxima

#### 4.1.4. Resultados dos testes que visam analisar as curvas características

Para os testes relacionados a curva característica foi escolhida a posição 1 da microbomba e a tensão, fornecida ao atuador, foi variada a cada teste. Os resultados para esse teste são mostrados na figura 4.19.

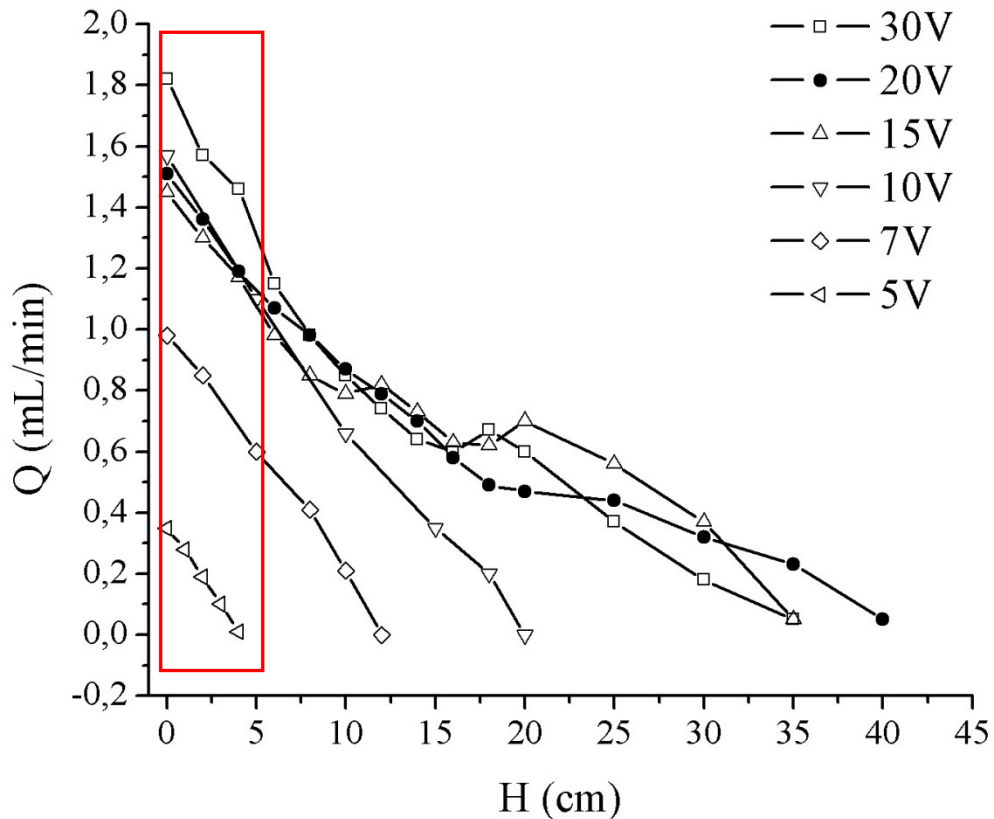
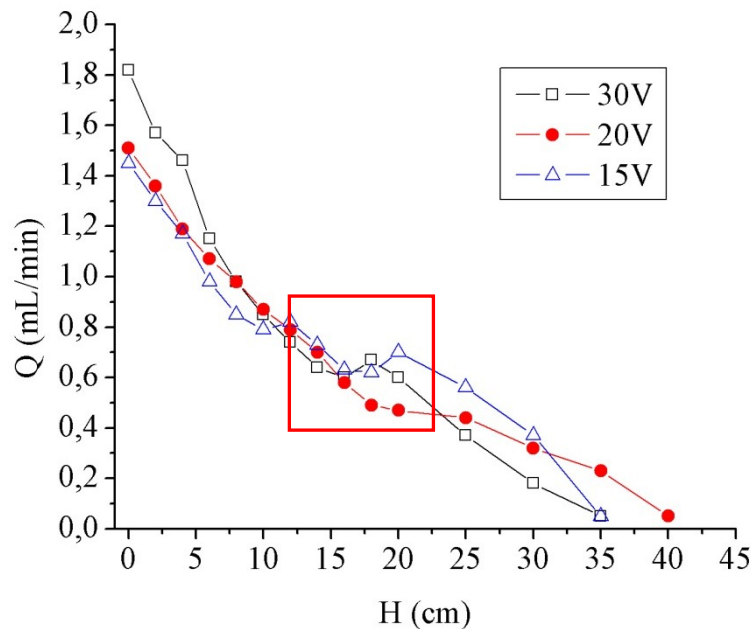


Figura 4.19 – Gráfico relacionando a vazão  $Q$  fornecida pela microbomba com a altura  $H$  associada a uma pressão externa atuando sobre a saída da microbomba, para vários valores de tensão fornecida ao atuador.

Através da figura 4.19 é possível analisar a relação entre  $Q$  e  $H$  para vários valores de tensão fornecida ao atuador. Observa-se que com o aumento da tensão as curvas são deslocadas no gráfico, porém a partir de 10 V, as curvas começam a sobrepor-se. Isso pode indicar uma região de limitação da vazão com relação à tensão utilizada no trabalho, devido à configuração do sistema de válvulas, principalmente ao comprimento da câmara da esfera, como já observado em testes anteriores.

Comparando as curvas é possível ver que no intervalo entre  $H=0$  e  $H=5$  cm (destacado na figura 4.20), as inclinações das curvas são semelhantes. Para tensões maiores que 10 V essas inclinações mudam a partir de  $H=5$  cm (figura

4), e aparece uma região onde os valores de vazão mudam bruscamente o que sugere que essas curvas estão saindo da região de limitação do sistema, e nesses casos a vazão tende a zero para valores mais altos de H.



**Figura 4.20 - Gráfico relacionando a vazão  $Q$  fornecida pela microbomba com a altura  $H$  associada a uma pressão externa atuando sobre a saída da microbomba, para os valores de tensão iguais a 30, 20 e 15V respectivamente.**

Para valores de tensão igual ou inferiores a 10V, observa-se um comportamento praticamente linear e que pode ser visto mais detalhadamente na figura 4.21.

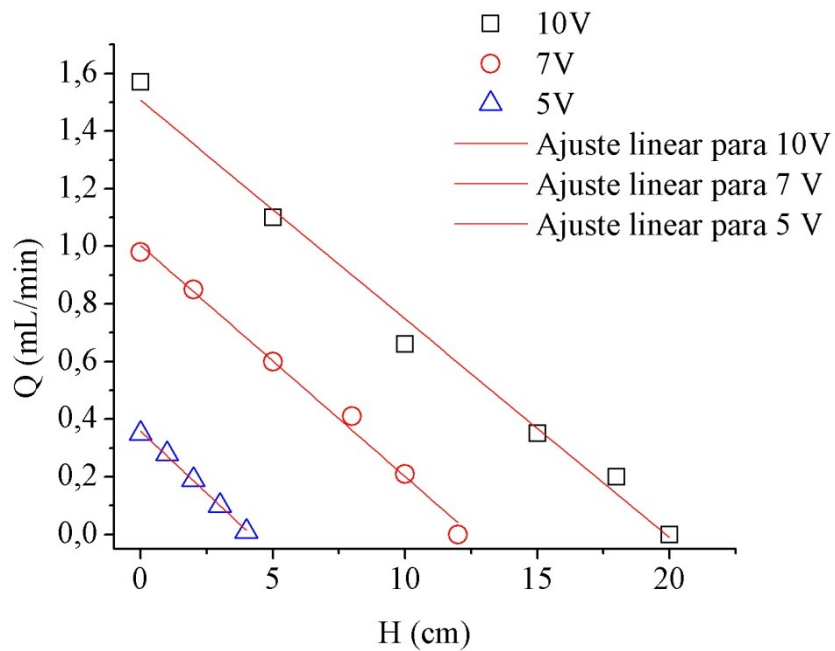


Figura 4.21 - Gráfico relacionando a vazão Q fornecida pela microbomba com a altura H associada a uma pressão externa atuando sobre a saída da microbomba, para os valores de tensão iguais a 10, 7 e 5V respectivamente.

O comportamento linear entre a vazão Q medida e a altura da coluna de líquido atuando sobre a saída da bomba está de acordo com a equação (16), e ainda observa-se que com o aumento da altura da coluna de líquido ocorre uma redução na vazão, como previsto pela mesma.

$$Q = Q'_0 - \frac{\rho g H}{R_{hyd}} \quad (16)$$

Através de um ajuste linear desses dados obtidos experimentalmente (figura 4.21) foram obtidos os seguintes resultados:

Tensão	Equação referente a tensão
10 V	$Q = -0,076H + 1,51$
7 V	$Q = -0,080H + 1,00$
5 V	$Q = -0,086H + 0,36$

Quadro 6 – Valores de tensão utilizados 10, 7 e 5V e as equações obtidas através do ajuste linear para cada um dos valores de tensão. Onde Q é dado em mL/min e H em cm.

Transformando as unidades para Q em  $\left(\frac{m^3}{s}\right)$  e H em (m) temos:

Tensão	Equação referente a tensão
10 V	$Q = -(1,26 \cdot 10^{-7})H + (2,51 \cdot 10^{-8})$
7 V	$Q = -(1,34 \cdot 10^{-7})H + (1,67 \cdot 10^{-8})$
5 V	$Q = -(1,43 \cdot 10^{-7})H + (5,97 \cdot 10^{-9})$

**Quadro 7 - Valores de tensão utilizados 10, 7 e 5V e as equações obtidas através do ajuste linear para cada um dos valores de tensão. Onde Q é dado em m<sup>3</sup>/s e H em m.**

Comparando cada uma das equações obtidas através do ajuste linear com a equação (16), temos que o coeficiente linear equivale ao valor de vazão máximo ( $b = Q'_0$ ), ou seja, quando a pressão na saída é nula; e o coeficiente angular é proporcional ao inverso da resistência hidráulica total do sistema ( $a = \frac{\rho g}{R_{hyd}}$ ).

Logo é possível determinar experimentalmente a resistência hidráulica total do sistema. Os valores de  $R_h$  total  $\left(\frac{kg}{m^4s}\right)$  calculados dessa maneira são:

Tensão	Valores de $R_h$ calculados
10 V	$7,74692 \cdot 10^{10}$
7 V	$7,33175 \cdot 10^{10}$
5 V	$6,83721 \cdot 10^{10}$

**Quadro 8 – Valores calculados para a  $R_h$  utilizando os valores do quadro 7.**

Esses valores de resistência hidráulica encontrados são valores médios considerando que durante a operação da microbomba, a resistência hidráulica total do sistema varia com a posição das esferas no interior das câmara. Teóricamente uma válvula ideal fechada teria um valor de resistência hidráulica tendendo a infinito, no nosso caso podemos afirmar que elas assumem valores muito altos. Assim assumimos neste trabalho que a resistencia hidráulica

assume valores mínimos quando as esferas encontram-se no meio das câmaras e máximos quando as mesmas se encontram nas extremidades.

Canais microfluídicos em geral apresentam valores elevados de resistência hidráulica devido a suas dimensões. Os valores obtidos experimentalmente são compatíveis com os valores encontrados na figura 2.9 para canais microfluídicos de formas variáveis, sugerindo que nessa microbomba testada, os componentes de menor dimensão fornecem a maior contribuição na resistência hidráulica. As menores dimensões encontradas na microbomba são da ordem 0,5 mm nos canais de entrada e saída das câmaras de esferas, e podem assumir valores menores ainda nas regiões entre as esferas e paredes internas das câmaras, que são variáveis.

As curvas observadas na figura 4.19 são denominadas *curvas características*. A partir delas e utilizando alguns conceitos da hidráulica é possível calcular as potências envolvidas no bombeamento.

Utilizando os valores de Q e H obtidos experimentalmente é possível calcular a potência útil<sup>16</sup> para a microbomba em questão, para cada ponto no gráfico da figura 4.19, utilizando a seguinte relação:

$$P_U = \gamma QH$$

Onde:  $P_U$  é a potência útil e  $\gamma$  é o peso específico do fluido.

Os valores de potência calculados, com relação a altura da coluna de fluido, para alguns valores de tensão, podem ser observados na figura 4.22 e 4.23.

---

<sup>16</sup> A potência útil é a que corresponde à energia aproveitada pelo líquido para seu escoamento para fora da bomba, considerando as perdas de energia no interior da bomba devido à perdas hidráulicas diversas.[livro]

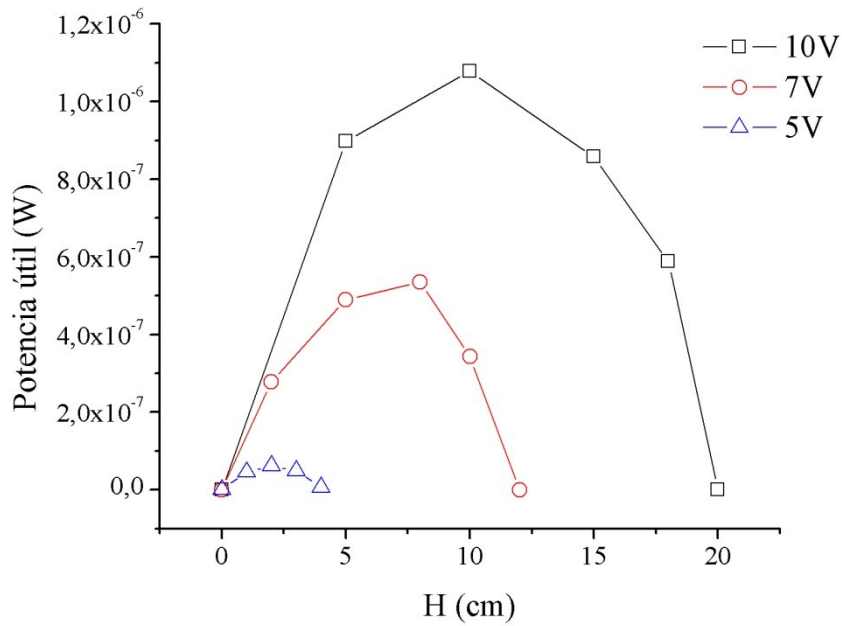


Figura 4.22 - Gráfico relacionando a Potência útil fornecida pela microbomba com a altura H associada a uma pressão externa atuando sobre a saída da microbomba, para os valores de tensão iguais a 10, 7 e 5V respectivamente.

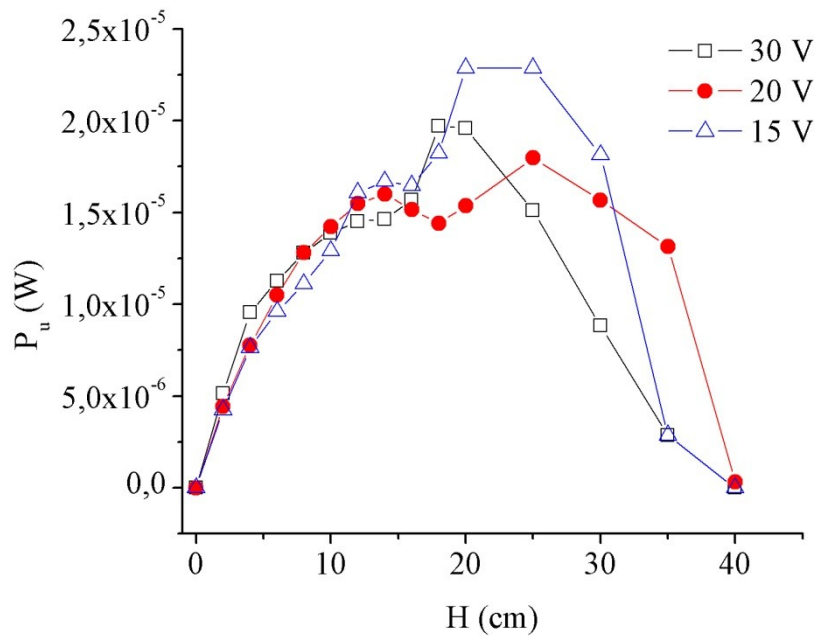


Figura 4.23 - Gráfico relacionando a Potência útil fornecida pela microbomba com a altura H associada a uma pressão externa atuando sobre a saída da microbomba, para os valores de tensão iguais a 30, 20 e 15V respectivamente

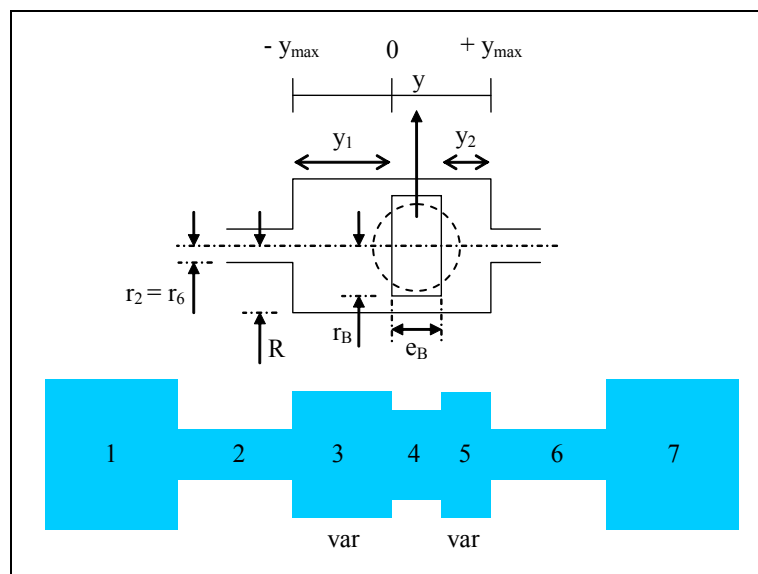
Através da figura 4.22 é possível observar a relação entre a potência útil fornecida pela microbomba e a pressão externa na saída da microbomba, devido a uma coluna de fluido de altura  $H$ . Nota-se a presença de três curvas distintas, cada uma associada a um valor de tensão, porém apresentam comportamentos semelhantes onde a potência apresenta um valor máximo. Os baixos valores de potência útil estão associados principalmente aos baixos valores de vazão obtidos.

Na figura 4.23 pode ser observado um comportamento, diferente do visto na figura 6, onde para os três valores de tensão utilizados os valores de potência são muito semelhantes até a altura  $H=15$  cm. Esse fato reforça a hipótese da região de limitação da vazão, com relação à tensão, devido ao comprimento do canal, apresentada pela microbomba. Entretanto, a partir do valor de  $H=15$  cm na figura 7, a pressão externa na saída da microbomba, associada à altura  $H$  da coluna de fluido, reduz a amplitude do movimento da esfera no interior da câmara, conectada a saída. Assim o choque entre essa esfera e as extremidades dos canais que as contém também são reduzidos e isso pode estar associado ao aumento da eficiência do bombeamento, e conseqüentemente um aumento na potência útil fornecida pela mesma. Porém a outra esfera, dentro da câmara conectada ao reservatório, continua colidindo com as extremidades o que pode explicar as instabilidades encontradas nessas medidas.

## **4.2. Simulações computacionais**

Para o presente trabalho foi desenvolvido, inicialmente pelo professor Dr. Cyro Ketzer Saul, uma simulação da microbomba em estudo, utilizando a plataforma Excel, visando à exploração de dados complementares ao estudo e uma possível comparação qualitativa com os resultados obtidos experimentalmente.





**Figura 4.24 - Esquema da válvula, na horizontal, utilizado no desenvolvimento da simulação.**

Como a parte fundamental para a microbomba em questão são as câmaras das esferas, estas foram o ponto de partida para o desenvolvimento da simulação. A Figura 4.24 mostra o esquema utilizado como base para esse desenvolvimento onde, no desenho azul, as partes 1 e 7 são canais de entrada e/ou saída de fluido da válvula, as partes 2 e 6 são canais de entrada e/ou saída de fluido na câmara da esfera e as partes 3, 4 e 5 compreendem a câmara mais a esfera. Nesta simulação não foi considerada uma esfera e sim um cilindro dentro do canal, devido a complexidade envolvida na simulação da esfera. Na parte superior da Figura 4.24 são apresentados alguns detalhes como:  $r_2$  e  $r_6$ , que são os raios das entradas e/ou saídas da câmara da esfera;  $R$  que é o raio da câmara;  $r_b$  e  $e_b$  que são respectivamente o raio e a altura do cilindro (esfera);  $y_1$  e  $y_2$  representam respectivamente a distância da superfície plana do cilindro com relação as entradas e/ou saídas 2 e 6. O diâmetro do cilindro, utilizado na simulação, foi calculado empregando um valor médio para compensar o fato de a esfera ser curva e o cilindro ser reto na lateral (Figura 4.25). A altura do cilindro foi mantida igual ao diâmetro da esfera.



**Figura 4.25 – Representação da aproximação utilizada na simulação.**

O funcionamento das câmaras segue o descrito na Figura 3.13. Na simulação foram integradas duas câmaras, com as ilustradas na Figura 3.12, para simular o sistema de válvulas. Para diferenciá-las foram denominadas câmara 1 e câmara 2, e posteriormente as grandezas que apresentarem índice 1 estão associadas à primeira e índice 2 à segunda.

Para simular o sistema de atuação foi utilizada uma fonte de pressão com entrada na parte 1 (Figura 4.24) para a câmara 1 e na parte 7 para a câmara 2, de maneira que a pressão nas duas seja sempre invertida. A pressão foi definida de modo a variar de forma senoidal semelhante ao sistema original.

A resistência hidráulica do sistema foi calculada com base na soma das resistências oferecidas em cada uma das partes de 1 a 7 da Figura 4.24. Para as regiões 1,2,6 e 7 as resistências hidráulicas foram calculadas seguindo o conceito de resistência para canais circulares apresentado por Bruus [51]. Para as regiões 3, 4 e 5 as resistências hidráulicas são calculadas utilizando o conceito de resistência em placas paralelas, porém para as regiões 3 e 5 as resistências hidráulicas são variáveis, ao contrário das outras, devido a variação das distâncias  $y_1$  e  $y_2$ .

O fluido considerado na simulação foi a água com suas características físico-químicas próprias. As propriedades dos cilindros utilizados também foram incluídas como a densidade, o raio e a espessura (no caso do cilindro). Foi considerada a ação da gravidade e do empuxo sobre as partes móveis e também a conservação do fluido no sistema.

Esse programa possibilita tanto a simulação do teste de pressão máxima, considerando a diferença de altura entre as duas colunas de fluido, quanto do teste de vazão, desconsiderando a diferença de altura entre as colunas de fluido. Ainda

permite operar tanto na posição 1 quanto na posição 2 da microbomba, assim como realizado experimentalmente.

Nesta simulação os parâmetros ajustáveis são: o raio da câmara da esfera; a densidade do cilindro (esfera); a pressão fornecida (em pascal) que faz o papel da tensão fornecida ao atuador (em volts); e a frequência com que o sentido da pressão é invertido. Outros parâmetros que podem ser alterados, porém serão mantidos constantes, são: o comprimento da câmara; o raio do cilindro; as propriedades do fluido de trabalho.

Um exemplo da seleção desses parâmetros pode ser observado na Figura 4.26, a seguir.

Parâmetros Gerais			Parâmetros de iteração		
$g$ (m/s <sup>2</sup> ) =	9,78	Aceleração da gravidade	steps para iteracao	3	
$\rho_{\text{AGUA}}$ (kg/m <sup>3</sup> ) =	1000	Densidade do fluido (água)	cont =	0	
$\eta_{\text{AGUA}}$ (Pa.s) =	1,0E-03	Coefficiente de viscosidade do fluido (água)	iteracao =	0	
Parâmetros do sistema de válvulas			$dt_{\text{USER}}$ =	0,0002	
$R$ (m) =	0,0015	Raio da câmara da esfera	$dt$ (s) =	0	
$r_B$ (m) =	0,001	Raio do cilindro (esfera)	$t$ (s) =	0	
$e_B$ (m) =	0,001	Altura do cilindro	pto no graf a cada	2	$dt_{\text{USER}}$
$y_{\text{MAX}}$ (m) =	0,002	Metade do comprimento da câmara da esfera	$dt_{\text{GRAF}}$ (s) =	0,0004	
$\rho_{B1}$ (kg/m <sup>3</sup> ) =	7800	Densidade da esfera 1	pto sendo plotado	0	
$m_{B1}$ (kg) =	2,45E-05	Massa da esfera 1			
$V_{B1}$ (m <sup>3</sup> ) =	3,14E-09	Volume da esfera 1	pontos para 1 $\lambda$ =	250	
$\rho_{B2}$ (kg/m <sup>3</sup> ) =	7800	Densidade da esfera 2			
$m_{B2}$ (kg) =	2,45E-05	Massa da esfera 2			
$V_{B2}$ (m <sup>3</sup> ) =	3,14E-09	Volume da esfera 2			
Parâmetros do atuador					
$P_{\text{MAX}}$ (Pa) =	4000	Pressão fornecida			
Frequencia (Hz) =	20	Frequência fornecida			

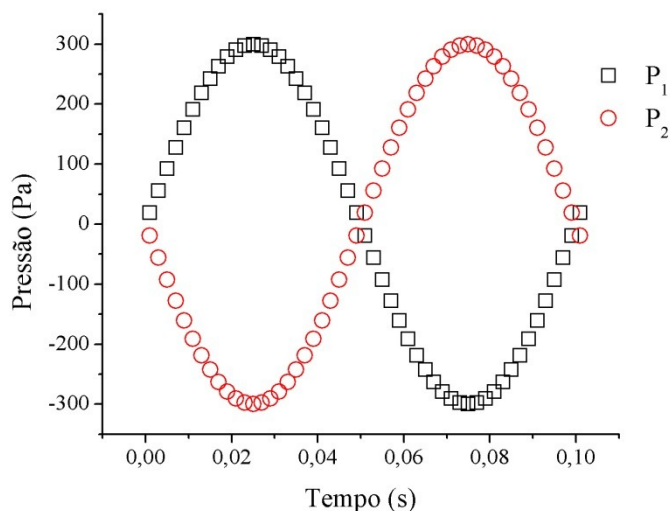
Figura 4.26 - Relação dos parâmetros ajustáveis na simulação.

Mais detalhes sobre a simulação como as equações utilizadas e a sequência dos cálculos realizados podem ser encontrados no Apêndice B – Fluxograma da simulação.

#### 4.2.1. Resultados da simulação

Inicialmente serão apresentados alguns resultados, através de gráficos, da simulação da microbomba utilizando os valores mostrados na Figura 4.26, onde foram utilizadas esferas de aço, com densidade de 7800 kg/m<sup>3</sup>, e o diâmetro da

câmara de 2,3 mm (raio de 0,00115 m). A pressão (tensão) e frequência são constantes e seus valores respectivamente 300 Pa e 10 Hz. Foi escolhida a posição 1 da microbomba. Essa primeira simulação tem por objetivo mostrar alguns de seus detalhes que posteriormente serão omitidos, porém são importantes nos cálculos e análises envolvidas no processo.



**Figura 4.27 – Gráfico resultante da simulação, relativo às variações das pressões P<sub>1</sub> e P<sub>2</sub> nas respectivas câmaras 1 e 2.**

O gráfico da Figura 4.27 mostra a variação da pressão com o tempo, para um ciclo de operação da microbomba. Esses valores servem de base para o cálculo das forças resultantes sobre as partes móveis e por sua vez das acelerações, velocidades e posições resultantes. Essas grandezas também são apresentadas em gráficos como na figura a seguir:

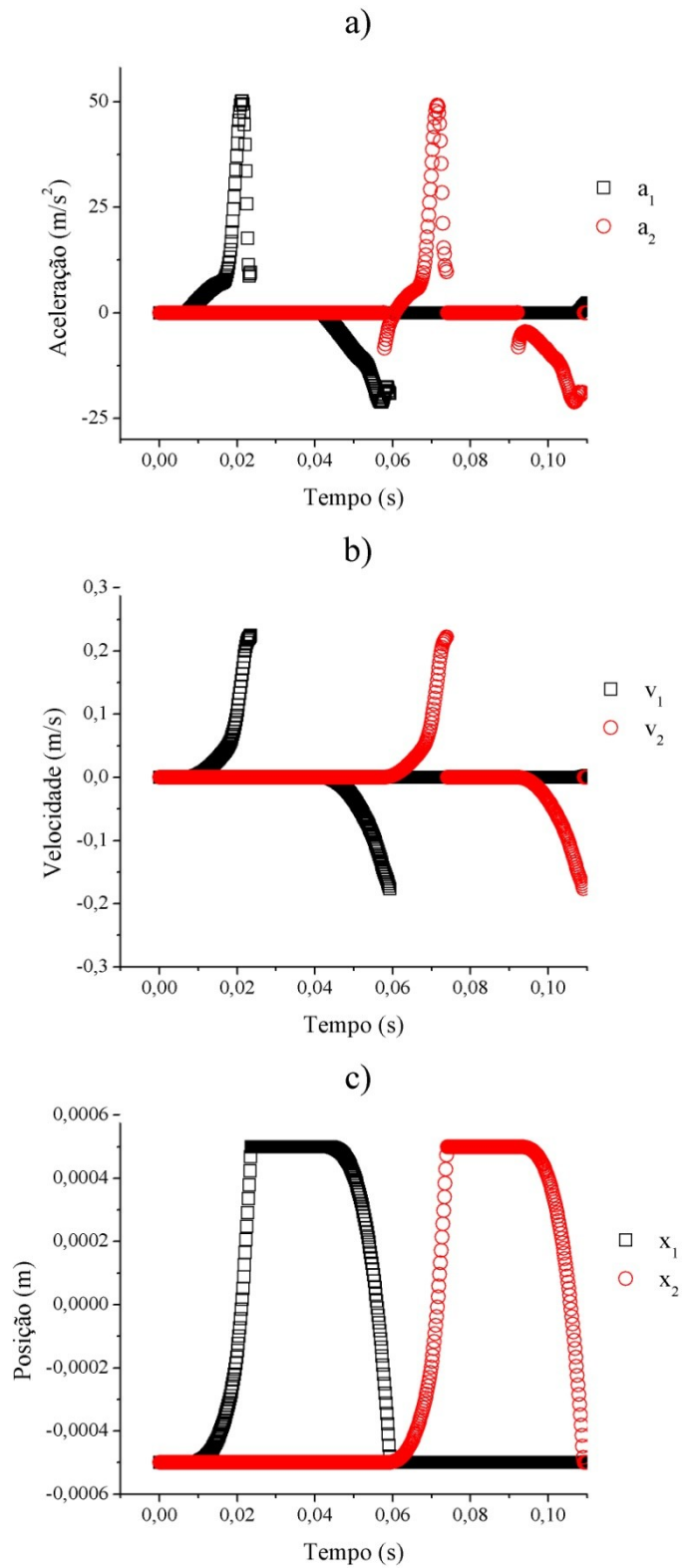
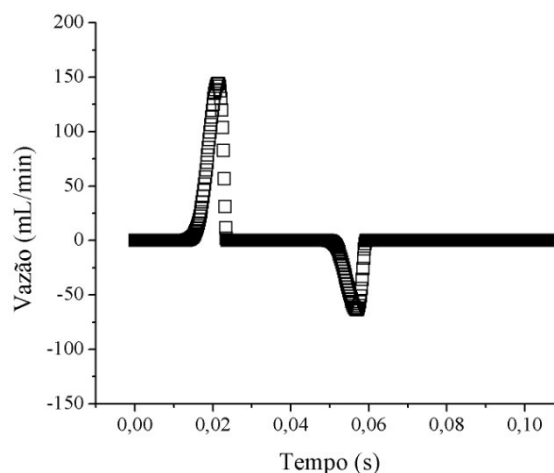


Figura 4.28 - Gráficos resultantes da simulação, onde: a) representa as acelerações b) representa as velocidades e c) representa as posições, das esferas 1 e 2 com relação ao tempo.

Analisando a aceleração fornecida a esfera 1, na Figura 4.28a, e comparando com a pressão imposta a mesma, na Figura 4.27, observa-se que a aceleração começa a aparecer apenas após um intervalo de tempo de 0,01 s e nesse mesmo tempo a pressão já encontra-se por volta de 150 Pa. Isso deve-se ao fato de existir uma pressão mínima para mover a esfera (cilindro), um pouco mais precisamente para esfera de aço esse valor é de aproximadamente 133 Pa. A mesma análise é válida para a esfera 2.

Através da Figura 4.28b podemos observar as velocidades envolvidas no movimento das esferas e na Figura 4.28c a sincronia no movimento das mesmas, o que é de fundamental importância para o funcionamento da microbomba. Além disso, através da Figura 4.28c, ainda é possível analisar o tempo de subida e descida da esfera no interior da câmara e sendo o tempo de subida ligeiramente maior que o de descida devido à aceleração da gravidade.

Outro resultado proveniente da simulação é referente à vazão de fluido através da câmara, que pode ser observado através da Figura 4.29. Nessa figura é apresentada a vazão apenas para uma das câmaras, pois é considerada a conservação do fluido no sistema, assim a vazão na outra tem de ser igual à primeira.



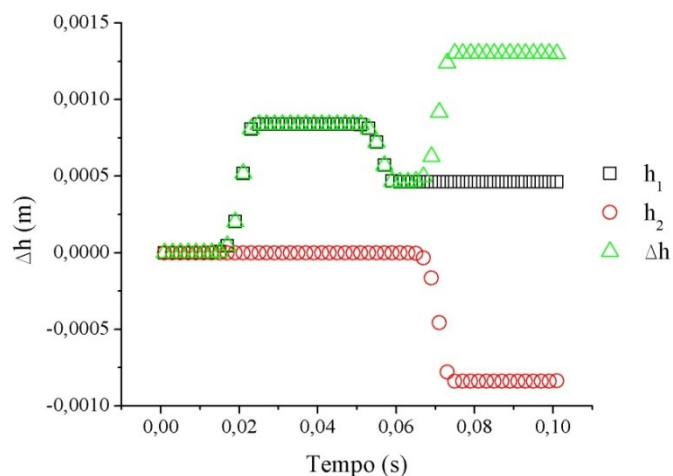
**Figura 4.29 – Gráfico resultante da simulação, relacionado à vazão de fluido através de uma câmara, em um ciclo.**

Analisando a Figura 4.29 observa-se um aumento nos valores da vazão, e esse é associado ao movimento de subida da esfera. No momento em que a

esfera atinge a extremidade superior da câmara a vazão anula-se rapidamente, pois a esfera fechou a saída do fluido. Após um determinado tempo ela começa a cair em direção a sua posição inicial, porém até que atinja a extremidade inferior uma quantidade de fluido acaba voltando, criando uma vazão reversa. Ao atingir a extremidade inferior a vazão volta a anular-se. A vazão efetiva será a diferença entre a quantidade bombeada e a que voltou. Se os dois picos observados no gráfico tiverem o mesmo tamanho, quantidade de fluido que foi bombeada acaba voltando totalmente e a eficiência da válvula é nula.

A vazão média fornecida pela microbomba é obtida através do valor médio da vazão durante um ciclo de operação. Isso pode ser feito utilizando-se os valores das tabelas geradas, que são a base para a confecção dos gráficos. Para esse teste foi calculada uma vazão média de 3,48 mL/min, para o intervalo de tempo de 0,1 s, que equivale a um ciclo da microbomba nessa situação.

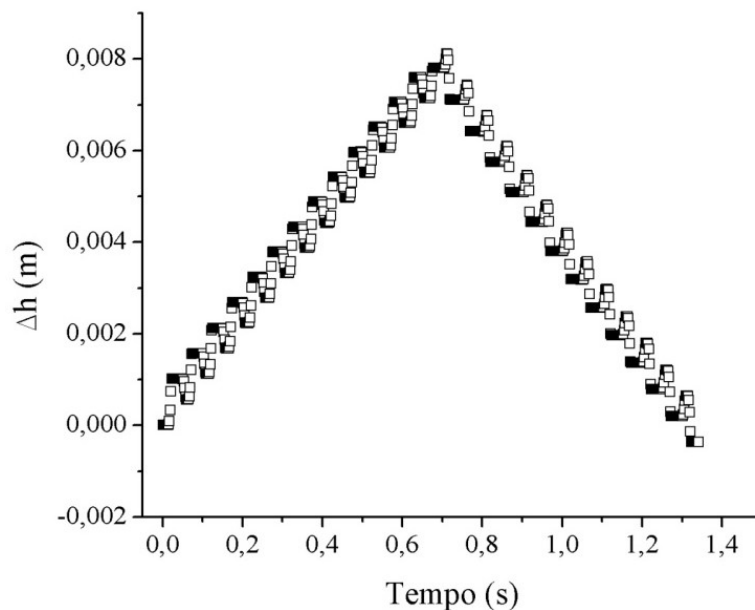
A simulação considera duas colunas de água inicialmente a mesma altura, assim como feito experimentalmente. A figura 4.30 mostra inicialmente a altura da coluna 1 ( $h_1$ ) sendo aumentada, no passo de bombeamento e em seguida a altura da coluna 2 ( $h_2$ ) sendo diminuída, no passo de sucção, gerando uma diferença de altura final ( $\Delta h$ ) após um ciclo. Através desse teste é possível analisar qual a pressão máxima de bombeamento fornecida pela microbomba utilizando o valor máximo da diferença de altura. Entretanto é necessário prosseguir a simulação até que diferença máxima de altura seja atingida e seu valor estabilizado, o que será feito posteriormente.



**Figura 4.30 – Gráfico resultante da simulação relacionado as alturas das colunas de fluido.**

A figura 4.30 também possibilita observar a eficiência no bombeamento através da diferença entre a altura da coluna de fluido bombeada e a altura perdida, devido ao fluxo no sentido reverso.

Através da simulação também é possível observar a inversão no sentido do bombeamento, com relação à posição da microbomba (Figura 4.31). Inicialmente a microbomba encontra-se na posição definida com 1. Com a simulação em andamento nota-se que o  $\Delta h$  aumenta com o tempo, para esta posição, e como  $\Delta h = h_2 - h_1$  temos que  $h_2$  está aumentando e  $h_1$  diminuindo, o que determina o sentido do bombeamento. Num instante  $t=0,7s$  a posição é alterada para a posição 2, e a partir desse instante o  $\Delta h$  diminui com o tempo,  $h_2$  está diminuindo e  $h_1$  aumentando, indicando que o fluido esta sendo bombeado no sentido reverso.



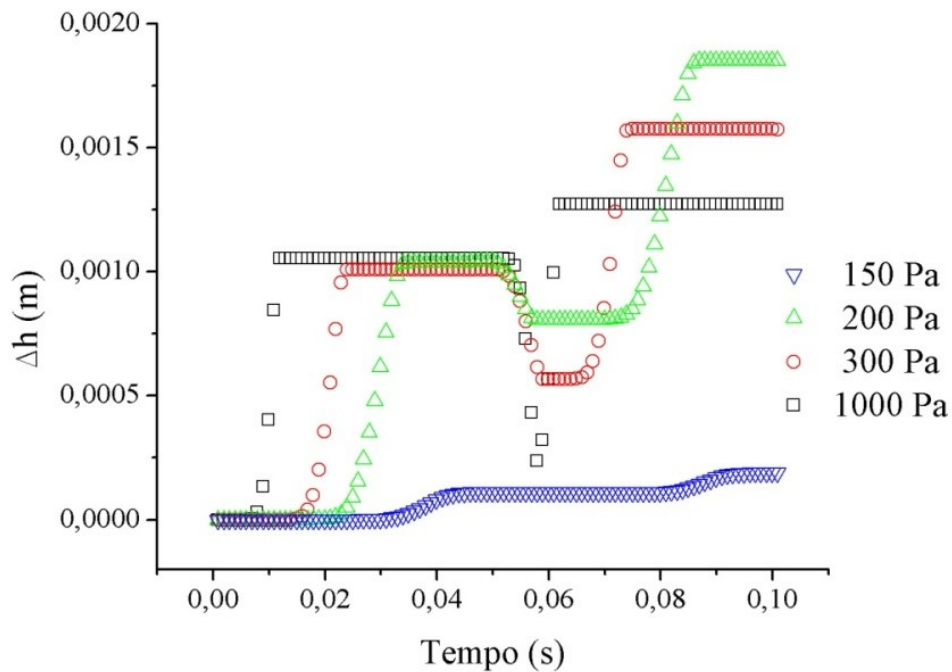
**Figura 4.31 - Gráfico resultante da simulação referente a bidirecionalidade.**

A seguir serão apresentados os resultados, referentes a simulações realizadas com o intuito de analisar a influência de alguns parâmetros no funcionamento da microbomba como: o diâmetro da câmara; a densidade da esfera; a tensão fornecida; e a frequência de operação.

Inicialmente será apresentada a simulação onde foram utilizadas esferas de aço, o diâmetro da câmara de 2,3 mm e a frequência constante em 10 Hz.

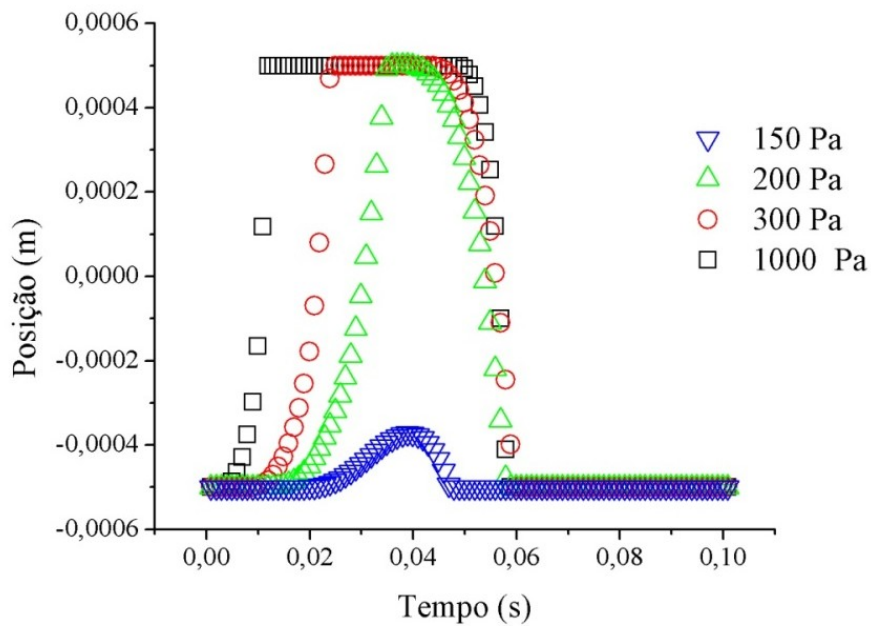


Variou-se apenas a pressão, onde foram utilizados os valores de 150, 200, 300 e 1000 Pa. Os resultados estão dispostos na Figura 4.32 a seguir.



**Figura 4.32 - Gráfico resultante da simulação referente ao teste comparativo das pressões.**

Observa-se na figura acima que para a pressão de 150 Pa temos o menor  $\Delta h$  após um ciclo de funcionamento de 0,10 s. Isso se deve ao fato dessa pressão estar bem próxima da pressão mínima necessária para movimentar a esfera, assim a amplitude dessa é muito pequena e tanto a vazão quanto o  $\Delta h$  também o serão. Entretanto para esse valor de pressão nota-se a melhor eficiência nas válvulas, pois após o bombeamento praticamente nenhuma quantidade de fluxo reverso é observada. Intuitivamente espera-se que com o aumento da pressão a vazão aumentará e consequentemente o  $\Delta h$ . No entanto a pressão de 200 Pa apresenta o maior valor de  $\Delta h$  e com o aumento da pressão, para 300 Pa e posteriormente para 1000 Pa, esse valor acaba diminuindo. Para explicar esse fato é necessário analisar o movimento das esferas no interior da câmara, com relação às pressões fornecidas (Figura 4.33).

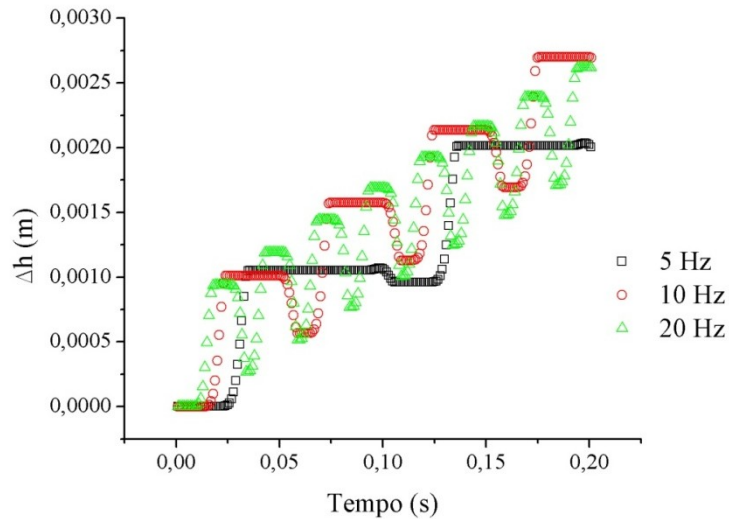


**Figura 4.33 – Gráfico resultante da simulação referente a posição de uma das esferas com relação a pressão fornecida.**

A Figura 4.33 mostra variação na posição de uma das esferas dentro da câmara, a variação para a outra não foi mostrada, pois como visto na Figura 4.28c esta é semelhante à primeira.

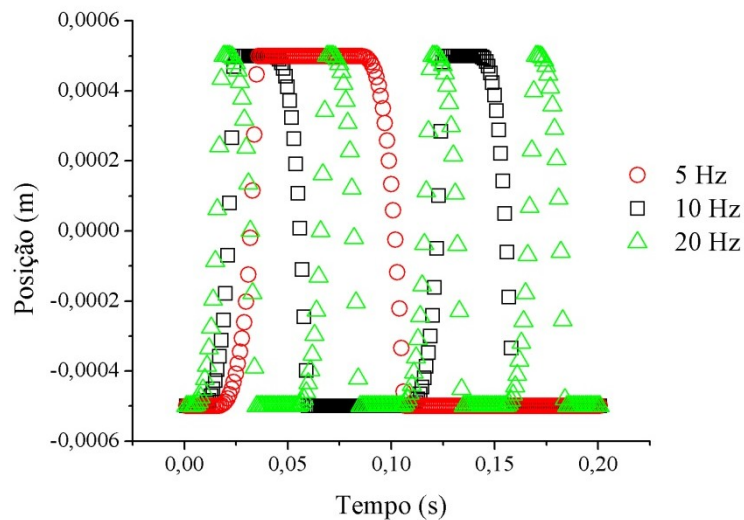
Como anteriormente comentando em 150 Pa a amplitude do movimento é pequena, porém ao aumentar para 200 Pa essa amplitude cresce rapidamente e a esfera passa a colidir com a outra extremidade da câmara. Aumentando ainda mais a pressão, observa-se que o tempo que a esfera leva para atingir a outra extremidade é reduzido e conseqüentemente a vazão diminui. Este é o efeito responsável pela diferença observada no  $\Delta h$  em função da pressão.

A seguir serão apresentados os resultados da simulação onde foram utilizadas esferas de aço, o diâmetro da câmara de 2,3 mm e a pressão constante em 300 Pa. Variou-se apenas a frequência, onde foram utilizados os valores de 5, 10, 20 Hz. Os resultados estão dispostos na a seguir.



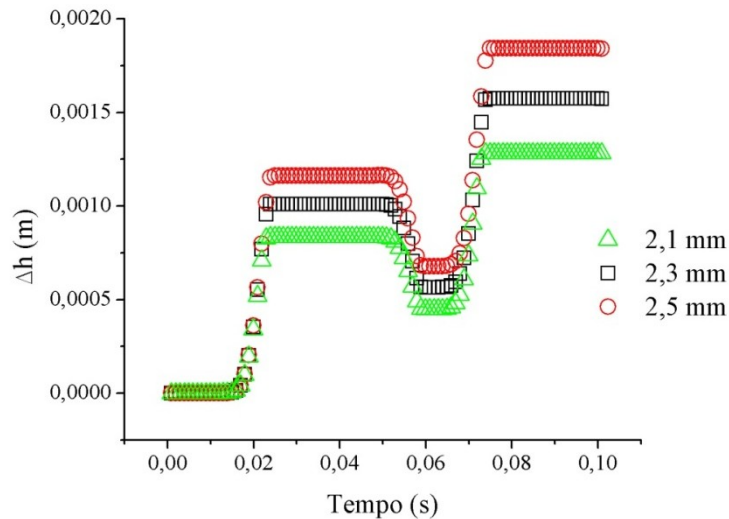
**Figura 4.34 - Gráfico resultante da simulação referente ao teste comparativo das frequências.**

Na Figura 4.34 analisando os valores dos  $\Delta h$  para um ciclo, verifica-se que a frequência de 5 Hz apresenta o maior valor, e a medida que os valores das frequências aumentam o  $\Delta h$  diminui. Além disso, para as frequências mais altas são observadas as menores eficiências de bombeamento, porém neste caso a diminuição na eficiência esta associada à redução do deslocamento da membrana da bomba com a conseqüente redução do volume enviado para a válvula uma possível perda de sincronia do movimento das esferas com o aumento da frequência.



**Figura 4.35 - Gráfico resultante da simulação referente a posição de uma das esferas com relação a frequência.**

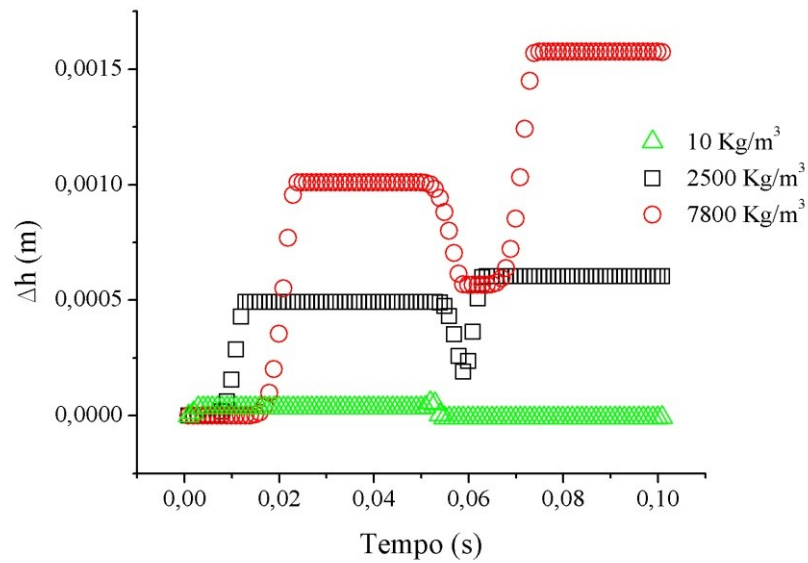
Os próximos resultados a serem apresentados estão relacionados à simulação onde foram utilizadas esferas de aço, a pressão e frequência constantes e respectivamente 300 Pa e 10 Hz. Variou-se apenas o diâmetro da câmara, onde foram utilizados os valores de 2,1, 2,3 e 2,5 mm. Os resultados estão dispostos na a seguir.



**Figura 4.36 - Gráfico resultante da simulação referente ao teste comparativo dos diâmetros das câmaras.**

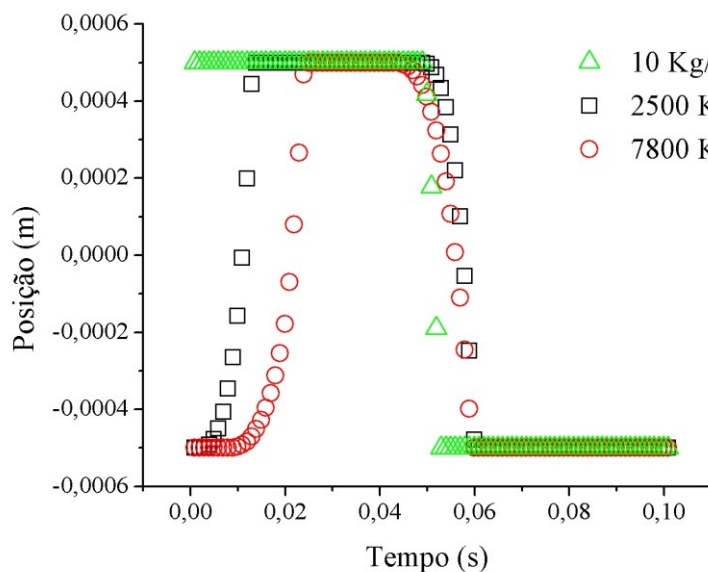
Com aumento do diâmetro observa-se, na Figura 4.36, um crescimento no  $\Delta h$  e conseqüentemente na vazão. Este fato está de acordo com o previsto, pois com o aumento do diâmetro da câmara diminui a resistência hidráulica do sistema e de acordo com a lei de Hagen-Poiseuille, para uma pressão constante a vazão deve aumentar.

Em seguir será analisada a influência dos materiais das esferas na simulação utilizando-se pressão e frequência constantes e respectivamente 300 Pa e 10 Hz e o diâmetro da câmara de 2,3 mm. Foram comparadas esferas de aço, vidro e isopor através da variação da densidade, onde os valores utilizados foram respectivamente 7800, 2500 e 10 kg/m<sup>3</sup>. Os resultados estão dispostos na a seguir.



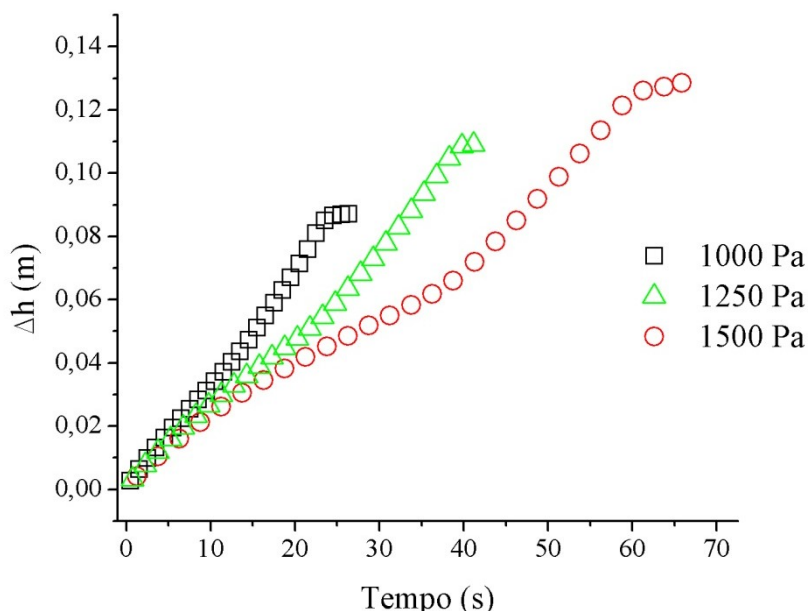
**Figura 4.37 - Gráfico resultante da simulação referente ao teste comparativo dos materiais das esferas.**

Na Figura 4.37 percebe-se que quanto maior a densidade das esferas maior o  $\Delta h$ , após um ciclo, implicando numa vazão mais alta. Isso pode ser explicado, do mesmo modo que feito anteriormente, analisando o movimento das esferas dentro das câmaras, através da Figura 4.38. Essa análise é semelhante à feita para a Figura 4.33, que associava o tempo gasto pela esfera para tocar a outra extremidade do canal com a vazão, porém neste caso quanto maior a densidade maior o tempo.



**Figura 4.38 - Gráfico resultante da simulação referente a posição de uma das esferas com relação a densidade da esfera.**

A seguir serão apresentados os resultados para simulações relacionadas à pressão máxima de bombeamento, onde essa pode ser determinada através da altura máxima da coluna de água ( $\Delta h$ ) que a microbomba é capaz de manter.



**Figura 4.39 - Gráfico resultante da simulação referente ao teste de pressão máxima.**

Com relação à simulação do teste de pressão máxima foi observado que para baixos valores de pressão a altura máxima da coluna de líquido alcança o valor esperado. No entanto com o aumento da pressão a altura máxima começa a apresentar uma diferença entre os valores esperados e os obtidos. Esse fato está associado à perda de eficiência relacionada ao aumento da pressão, discutido nessa mesma seção. As diferenças entre os valores esperados e os obtidos foram calculadas da seguinte maneira: o valor da altura da coluna de líquido é convertido em pressão e somado ao valor da pressão mínima para movimentar o cilindro e esse resultado é subtraído do valor da pressão fornecida. As diferenças foram aproximadamente de: 0% para a pressão de 1000 Pa; 2 % para 1250 Pa; e 5% para 1500 Pa.

Essas simulações ajudaram na compreensão do funcionamento da microbomba desenvolvida, principalmente com relação à influência dos parâmetros utilizados, no movimento das esferas no interior das câmaras e a relação desse fato com a eficiência de bombeamento.

## 5. Conclusão

A reprodução de uma microbomba de modelo já conhecido da literatura, utilizando como técnica de fabricação a usinagem a laser e como material o PMMA, serviu de ponto de partida para o trabalho.

Foram construídos quatro modelos de microbomba. O primeiro e o segundo modelo foram reproduzidos da literatura, enquanto o terceiro e o quarto foram desenvolvidos no trabalho.

Os modelos desenvolvidos são microbombas de deslocamento recíproco, que utilizam válvulas de retenção passivas compostas por esferas. Essas microbombas têm como característica principal a bidirecionalidade, associada a fatores posicionais do sistema de válvulas.

O quarto modelo foi o que apresentou o melhor funcionamento e por esse motivo foi o único submetido ao processo de caracterização.

Na caracterização foram realizados os testes de pressão máxima, de vazão e testes referentes às curvas características da microbomba. Nos dois primeiros foram variados alguns parâmetros como: o diâmetro da câmara da esfera (2,1 mm, 2,3 mm e 2,5 mm); o material das esferas utilizadas (isopor, aço, vidro); a tensão e a frequência, fornecidas ao atuador.

A configuração que apresentou os melhores resultados, com relação ao teste de pressão máxima, utilizou uma câmara com 2,3 mm de diâmetro e esferas de vidro e apresentou valores máximos de aproximadamente 7200 Pa.

Para os resultados dos testes de vazão as esferas de vidro apresentaram os resultados mais satisfatórios, apresentando uma faixa de vazão variando de 0,3 mL/min a 5,8 mL/min. O aumento da vazão associado à diminuição da resistência hidráulica, devido ao aumento no diâmetro da câmara é observado nos testes utilizando as esferas de vidro, e está de acordo com o previsto pela equação de Hagen-Poiseuille.

Com relação aos parâmetros relativos ao atuador, tensão e frequência, foi observado que a maneira mais eficiente de realizar os testes é iniciar analisando o perfil vazão (ou pressão) com relação à frequência, escolher a frequência de melhor desempenho, mantendo-a constante, e por fim variar a tensão para obter a faixa de vazão ou a pressão desejada.

No testes relacionados às curvas características da microbomba foram utilizadas as esferas de vidro, a câmara com diâmetro de 2,3 mm, a frequência constante em 20 Hz e variou-se a tensão fornecida em cada teste. Os resultados mostraram uma relação linear entre a vazão fornecida pela microbomba e a pressão externa aplicada na saída da mesma, para valores de tensão abaixo de 10 V, e uma região de limitação da vazão para valores de tensão acima de 15 V. Através desse teste foi possível obter um valor médio para a resistência hidráulica total do sistema e verificou-se que esses valores são da ordem dos valores característicos de canais microfluídicos.

Através das simulações foi possível analisar a relação entre os parâmetros variáveis da microbomba e o movimento das esferas no interior das câmaras (válvulas). Por sua vez analisar a relação entre o movimento das esferas e a eficiência de bombeamento.

Na simulação a pressão/tensão fornecida ao atuador possui um valor mínimo, para o funcionamento da microbomba, devido ao peso das esferas. Com o aumento da pressão/tensão temos uma região de aumento na eficiência de bombeamento, até atingir um valor máximo. Após este valor máximo observa-se uma redução na eficiência de bombeamento com o aumento da pressão/tensão. Esse fato observado na simulação também é observado nos dados experimentais, tanto no teste de vazão quanto na análise das curvas características.

De modo geral conclui-se que a vazão fornecida pela microbomba possui uma região de limitação com relação à tensão utilizada, devido ao comprimento da câmara das esferas. Este fato está diretamente ligado a amplitude do movimento das esferas no interior das câmaras. Para reduzir a região de limitação da vazão às



alternativas são: aumentar o diâmetro da câmara da esfera, aumentar o comprimento da câmara ou utilizar esferas de maior densidade.

A bidirecionalidade, associada a fatores posicionais do sistema de válvulas, é um fato inédito na literatura. Assim como a bidirecionalidade associada a uma microbomba de deslocamento recíproco utilizando esferas no sistema de válvulas.

As microbombas bidirecionais encontradas na literatura, em geral, estão associadas a baixas vazões e ainda utilizam valores de tensão relativamente altos. A microbomba desenvolvida no presente trabalho possui a bidirecionalidade associada a uma alta vazão, comparada com as microbombas bidirecionais encontradas na literatura, e a tensão máxima utilizada no trabalho foi de 30 V, que é inferior a todas as outras comparadas. Com relação à pressão máxima fornecida pela microbomba ela encontra-se dentro da faixa observada em outros trabalhos.

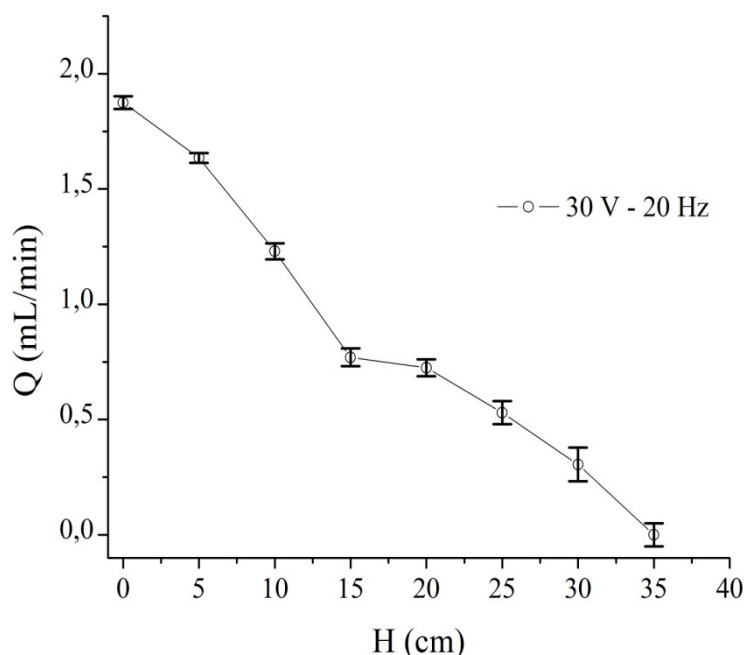
Este trabalho mostrou o potencial da microbomba em questão para aplicação em sistemas microfluídicos. E portanto cumpriu seu papel no desenvolvimento de uma prova de conceito para aplicações em sistemas de diagnósticos do tipo Point-of-care. Entretanto, possui a possibilidade de estudos futuros, pois alguns aspectos ainda não foram abordados, como: a influência de outros parâmetros, como o comprimento da câmara e o diâmetro dos canais de entrada, nos testes de vazão e pressão; alterações no formato das câmaras das esferas e suas implicações.

Outros estudos como a capacidade de mistura de fluidos durante o processo de bombeamento, o processo de miniaturização da microbomba desenvolvida e estudo mais aprofundado com relação a sua aplicabilidade, também são tópicos interessantes para trabalhos futuros.

## 6. Apêndices

### Apêndice A: Estimativa dos erros experimentais

Com o intuito de estimar os erros experimentais envolvidos no presente trabalho um mesmo teste foi realizado cinco vezes, seguindo as condições de repetitividade citadas anteriormente. O teste realizado foi semelhante ao utilizado para a obtenção das curvas características, porém mantendo a tensão e a frequência constantes em 30 V e 20 Hz respectivamente. A configuração utilizada empregava esferas de vidro e câmaras com diâmetro de 2,3 mm. Os resultados obtidos estão dispostos nos gráfico 1. Cada ponto no gráfico equivale a um valor médio e para cada valor médio temos a sua respectiva barra representando o erro relativo, calculado utilizando o desvio padrão dos valores médios.



**Figura 6.1 – Gráfico resultante dos cinco testes realizados, onde cada ponto representa um valor médio.**

Os erros relativos percentuais obtidos para cada ponto variam entre aproximadamente 2 a 8%. Com base nesses dados foi estimado um erro percentual médio de aproximadamente 5 % para todos os demais testes realizados, considerando que as condições de realização dos testes foram muito semelhantes. As principais fontes de erros associadas a esse trabalho estão relacionadas ao método de observação e a flutuações das condições ambientais.

## Apêndice B: Fluxograma da simulação

A seguir são apresentados os parâmetros envolvidos na simulação e os símbolos utilizados no fluxograma.

### Parâmetros definidos no início da simulação

Parâmetros gerais:

$g$  → Aceleração da gravidade.

$\rho_f$  → Densidade do fluido (água).

$\eta_f$  → Coeficiente de viscosidade do fluido (água).

Parâmetros do sistema de válvulas:

$R$  → Raio da câmara da esfera.

$r_B$  → Raio do cilindro (esfera).

$e_B$  → Altura do cilindro.

$y_{MAX}$  → Metade do comprimento da câmara da esfera.

$\rho_{B_1}$  → Densidade da esfera 1.

$m_{B_1}$  → Massa da esfera 1.

$V_{B_1}$  → Volume da esfera 1.

$\rho_{B_2}$  → Densidade da esfera 2.

$m_{B_2}$  → Massa da esfera 2.

$V_{B_2}$  → Volume da esfera 2.

Parâmetros do atuador:

$P_{MAX}$  → Pressão fornecida.

$f$  → Frequência fornecida.

Parâmetros da Simulação

Realizar teste de pressão máxima ou de vazão.

Orientação das Válvulas (posição 1 = normal ou posição 2 = reverso).

Posição inicial das esferas.

$dt$  → Intervalo de tempo para cada iteração da simulação.

### Parâmetros obtidos da simulação

$P$  → Pressão calculada.

$t$  → tempo.

$R_{H\_TOT}$  → Resistência hidráulica Total.

$R_{H_i}$  → Resistência hidráulica de cada um dos  $i$  componentes.

$k$  → Índice de identificação (exemplo  $k=1$  para esfera 1 e  $k=2$  para esfera 2).

$\phi$  → Vazão.

$\Delta P_i$  → Queda de pressão em cada um dos componentes  $i$ .

$\Delta P_{e_k}$  → Queda de pressão sobre a esfera  $k$ .

$r_{e_k}$  → raio da esfera  $k$ .

$F_{P_k}$  → Força sobre a esfera  $k$  devido a diferença de pressão.

$F_{V_k}$  → Força devido à pressão dinâmica sobre a esfera  $k$ .

$A_{e_k}$  → Área da secção transversal da esfera  $k$ .

$v_f$  → Velocidade do fluido.

$v_{e_k}$  → Velocidade da esfera  $k$ .

$F_{G_k}$  → Força gravitacional sobre a esfera  $k$ .

$m_{e_k}$  → massa da esfera  $k$ .

$F_{E_k}$  → Empuxo sobre a esfera  $k$ .

$F_{Res_k}$  → Força resultante sobre a esfera  $k$ .

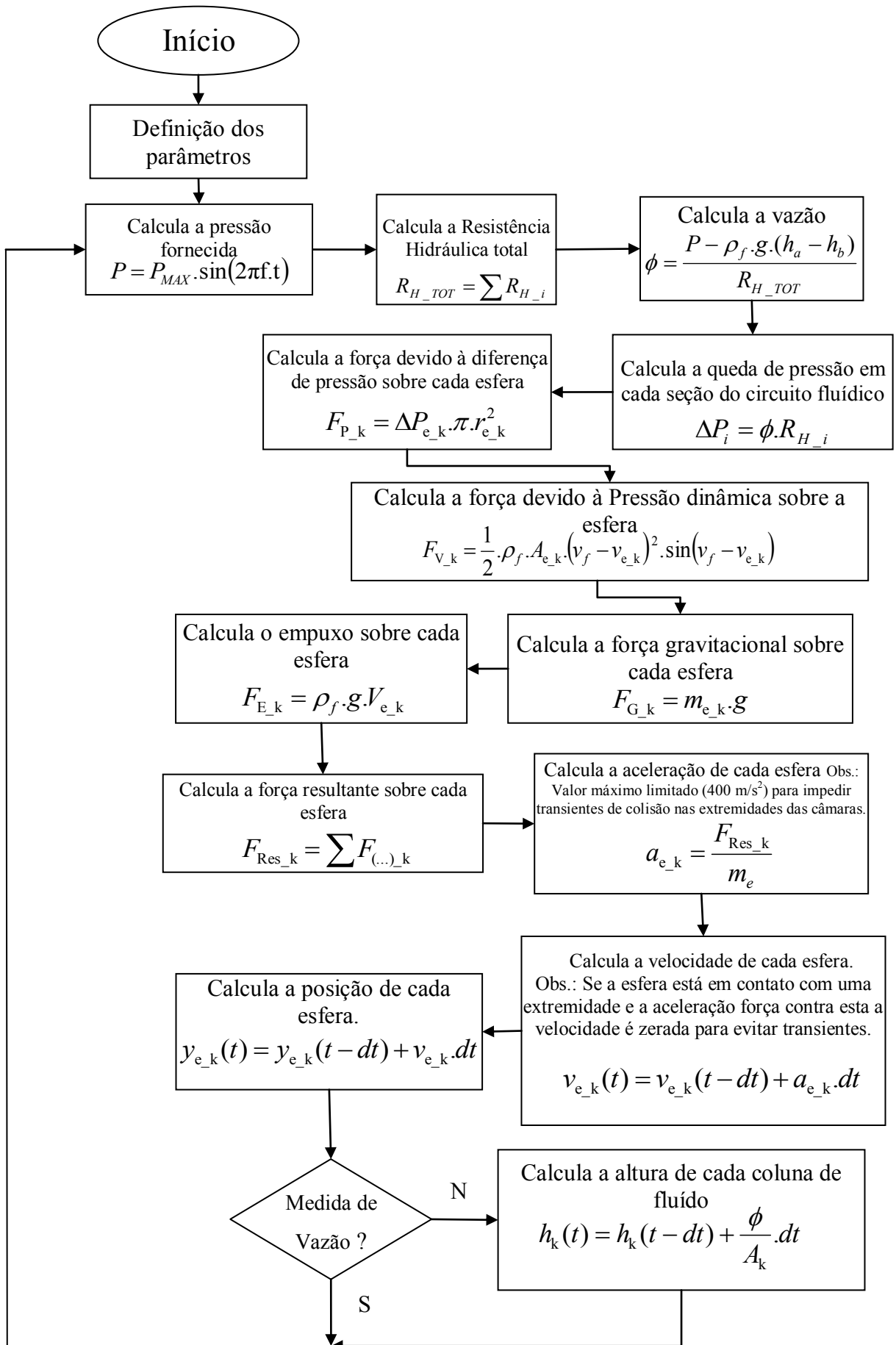
$a_{e_k}$  → Aceleração resultante da esfera  $k$ .

$v_{e_k}$  → Velocidade da esfera  $k$ .

$y_{e_k}$  → Posição da esfera  $k$ .

$h_k$  → Altura da coluna de fluido  $k$ .

$\Delta h$  → Diferença de altura entre as colunas de fluido  $k$  e  $k-1$ .



## REFERÊNCIAS

- 1 WHITESIDES, G. M. The origins and the future of microfluidics. **NATURE**, England: Nature Publishing Group, v. 442, p. 368-373, jul. 2006.
- 2 TABELING, P. **Introduction to microfluidics**. New York: Oxford University Press Inc, 2005.
- 3 GRAVESEN, P. Microfluidics: a review. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, England, v.3, p. 168-182, 1993.
- 4 ISI Knowledge, Disponível em: <<http://pcs.isiknowledge.com/analyze/ra.cgi>>. Acessado em: 16/11/2010, busca realizada com a palavra "microfluidic".
- 5 GARCIA, J. L.; RICCO, A. J. Lab-on-a-Chip (General Philosophy), in: Dongqing Li. **Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics**, New York: Springer, p. 962-969, 2008.
- 6 YAGER, P. et al. Microfluidic diagnostic technologies for global public health. **NATURE**, Nature Publishing Group: England, v. 442, p. 412-418, jul. 2006.
- 7 Fonte da Figura 2.3a. Disponível em: <<http://www.hkdnachips.com/English/chips.htm>>. Acessado em: 22/01/2011. Fonte da Figura 2.3b. Disponível em: <<https://www.siloambio.com/lab-on-a-chip.php>>. Acessado em: 12/05/2011.
- 8 TAY, F. E. H. et al. **Microfluidics and BioMEMS applications**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- 9 NGUYEN, N.T.; WERELEY, S.T. **Fundamentals and applications of microfluidics**. Norwood, MA: Artech House, 2002.
- 10 LASER, D. J.; SANTIAGO, J.G. Micropumps: A review. **Journal of micromechanics and microengineering**, England: IOP Publishing Ltd., v14, p. 35-64, 2004.
- 11 IVERSON, B. D.; GARIMELLA, S. V. Recent advances in microscale pumping technologies: a review and evaluation. **Microfluid Nanofluid**, Verlag: Springer, v.5, p. 145-174, aug. 2008.

- 12 THOMAS, L.J.; BESSMAN, S.P.; Prototype for an implantable micropump powered by piezoelectric disk benders. **Transaction American Society For Artificial Internal Organs**, Washington: Georgetown Univ Med Center, v. 21, p. 516–520, 1975.
- 13 WOIAS, P. Micropumps - past, progress and future prospects. **Sensors and Actuators B - Chemical**, Elsevier Science SA: Switzerland, v. 105, n. 1, p. 28-38, feb. 2005.
- 14 GRAVESEN, P. et al. Microfluidic: a review. **Journal of micromechanics and microengineering**, England: IOP Publishing Ltd., v.3, p. 168-182, 1993.
- 15 GEIPEL, A. et al. A novel two-stage backpressure independent micropump: modeling and characterization. **Journal of micromechanics and microengineering**, England: IOP Publishing Ltd., v.17, n. 5, p. 949-959, 2007.
- 16 LIU, G. A disposable piezoelectric micropump with high performance for closed-loop insulin therapy system. **Sensors and Actuators A - Physical**, Elsevier Science SA: Switzerland, v. 163, n. 1, p. 291-296, sep. 2010.
- 17 MANZ, A. et al. Planar chips technology for miniaturization and integration of separation techniques into monitoring systems: capillary electrophoresis on a chip. **Journal of Chromatography**, v.583, n. 1-2, p. 253-258, feb. 1992.
- 18 WOOLLEY, A. T. *et al.* Functional integration of PCR amplification and capillary electrophoresis in a microfabricated DNA analysis device. **Analytical Chemistry**, Whashington: American Chemical Society, v.68, n. 23, p. 4081-4086, dec. 1996.
- 19 KHANDURINA, J. *et al.* Integrated system for rapid PCR-based DNA analysis in microfluidic devices. **Analytical Chemistry**, Whashington: American Chemical Society, v.72, n.13 , p.2995–3000, 2000.
- 20 TAYLOR, M. T. et al. Simulation of microfluidic pumping in a genomic DNA blood-processing cassette. **Journal of micromechanics and microengineering**, England: IOP Publishing Ltd., v.13, n. 2, p. 201-208, mar. 2003.
- 21 ZHANG,C. et al. Micropumps, microvalves, and micromixers within PCR microfluidic chips: advances and trends. **Biotechnology Advances**, England: Pergamon-Elsevier Science LTD, v. 25, n. 5, p. 483-514, set/oct. 2007.

- 22 VIJENDRAN, S. et al. Multi-directional electrokinetic pumping for efficient transport and mixing in biochip applications. In: **Proceedings of SPIE—the international society for optical engineering, microfluidics, biomems, and medical microsystems IV**, San Jose, v.6112, p. 61120, 2006.]
- 23 AL-HALHOULI, A. T. et al. Development of a novel electromagnetic pump for biomedical applications. **Sensors and Actuators A - Physical**, Elsevier Science SA: Switzerland, v. 162, n. 2, p. 172-176, aug. 2010.
- 24 ZHANG, L. et al. Measurements and modeling of two-phase flow in microchannels with nearly constant heat flux boundary conditions. **Journal of Microelectromechanical Systems**, New York: Institute Electrical Eletronics Engineers INC., v. 11, n. 1, p. 12-19, feb. 2002.
- 25 JIANG, L. et al. Closed-loop electroosmotic microchannel cooling system for VLSI circuits, **IEEE Transactions on Componets an packaging technologie**, New York: Institute Electrical Eletronics Engineers INC., v. 11, n. 1, p. 12-19, feb. 2002.
- 26 TUCKERMAN, D. B.; PEASE, R. F. W. High-performance heat sinking for VLSI **IEEE Electron Device Letters**, New York: Institute Electrical Eletronics Engineers INC., v.2, n. 5, p. 126-129, 1981.
- 27 ZHANG, T.; WANG, Q.M. Valveless piezoelectric micropump for fuel delivery in direct methanol fuel cell (DMFC) devices. **Journal of Power Sources**, Netherlands: Elsevier Science BV, v. 140, n. 1, p. 72-80, jan. 2005.
- 28 WIBERG, D. et al. **Progress toward highly miniaturized vacuum pumps**, 2nd Workshop on Harsh-Environment Mass Spectrometry, St. Petersburg- FL, 2001
- 29 WATSON, T. J. **Introduction to Mass Spectrometry**. Philadelphia, PA: Lippincott-Raven, 1997.
- 30 MICCI, M. M.; KETSDEVER, A. D. **Micropropulsion for Small Spacecraft**. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2000.
- 31 BRUSCHI, P. et al. Micromachined gas flow regulator for ion propulsion systems. **IEEE Transaction on Aerospaceal and Electronic Systems**, New York: Institute Electrical Eletronics Engineers INC., v.38, n. 3, p. 982-988, jul. 2002.



- 32 FERAS, E. et al. Design, fabrication and demonstration of a MEMS steam generator for ejector pump applications. **Journal of micromechanics and microengineering**, England: IOP Publishing Ltd., v.20, n. 10 , oct. 2010.
- 33 VANLINTEL , H.T.G.et al. A piezoelectric micropump based on micromachining of silicon. **Sensors and Actuators**, Switzerland: Elsevier Science SA, v. 15, n. 2, p. 153-167, oct. 1988.
- 34 MORRIS, C. J.; FORSTER, F. K. Low-order modeling of resonance for fixed-valve micropumps based on first principles, **Journal of micromechanics and microengineering**, Piscataway: Institute Electrical Eletronics Engineers INC, v.12, n. 3, p. 325-334, jun. 2003.
- 35 BOUROUINA, T.; GRANDCHAMP, J. P. Modeling micropumps with electrical equivalent networks. **Journal of micromechanics and microengineering**, England: IOP Publishing Ltd., v.6, n. 4 , p. 398-404, dec. 1996.
- 36 OLSSON, A.; STEMME, G.; STEMME, E. A numerical design study of the valveless diffuser pump using a lumped-mass model. **Journal of micromechanics and microengineering**, England: IOP Publishing Ltd., v.9, n. 1 , p. 34-44, mar. 1999.
- 37 GERLACH, T. Microdiffusers as dynamic passive valves for micropump applications. **Sensors and Actuators A - Physical**, Elsevier Science SA: Switzerland, v. 69, n. 2, p. 181-191, aug. 1998.
- 38 ULLMAN, A.; FONO, I. The piezoelectric valve-less pump—improved dynamic model. **Journal of micromechanics and microengineering**, New York: Institute Electrical Eletronics Engineers INC., v.11, n. 6 , p. 655-664, dec. 2002.
- 39 PAN, L. S. et al. Analysis of valveless micropumps with inertial effects. **Journal of micromechanics and microengineering**, England: IOP Publishing Ltd., v.13, n. 3, p. 390-399, may. 2003.
- 40 CARROZZA, M.C. et al. A piezoelectric-driven stereolithography-fabricated micropump. **Journal of micromechanics and microengineering**, England: IOP Publishing Ltd., v. 5, n. 2, p. 177-179, jun. 1995.
- 41 TINGRUI, P. A magnetically driven PDMS micropump with ball check-valves. **Journal of micromechanics and microengineering**, England: IOP Publishing Ltd., v. 15, n. 5, p. 1021-1026, may. 2005.

- 42 YAMAHATA, C. et al. A ball valve micropump in glass fabricated by powder blasting. **Sensors and Actuators B - Chemical**, Elsevier Science SA: Switzerland, v. 110, n. 1, p. 1-7, sep. 2005.
- 43 SHEN, M. et al. Miniaturized PMMA ball-valve micropump with cylindrical electromagnetic actuator. **Microeletronic Engineering**, Netherlands: Elsevier Science BV, v. 85, n. 5-6, p. 1104-1107, may/jun. 2005.
- 44 YOON, J. S. A valveless micropump for bidirectional applications. **Sensors and Actuators A - Physical**, Elsevier Science SA: Switzerland, v. 135, n. 2, p. 833-838, apr. 2007.
- 45 ZENGERLE, R. A bidirectional silicon micropump. **Sensors and Actuators A - Physical**, Elsevier Science SA: Switzerland, v. 50, n. 1-2, p. 81-86, aug. 1995.
- 46 LUO, Y. et al. A polymer-based bidirectional micropump driven by a PZT bimorph. **Microsyst. Technol**, Springer: New York, v. 17, p.403-409, mar 2011.
- 47 LEE, D.S. et al. Fabrication and characterization of a bidirectional valveless peristaltic micropump and its application to a flow-type immunoanalysis. **Sensors and Actuators B - Chemical**, Elsevier Science SA: Switzerland, v. 103, n. 1, p. 409-415, 2004.
- 48 Doll, A. et al. A high performance bidirectional micropump for a novel artificial sphincter system. **Sensors and Actuators A - Physical**, Elsevier Science SA: Switzerland, v. 130, p. 445-453, aug. 2006.
- 49 FOX, R. W. **MACDONALD**, A. T. **PRITCHARD**, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. SP: Editora LTC. ed.7, (2010)
- 50 GAD-EL-HAK, M. The Fluid Mechanics of Microdevices—The Freeman Scholar Lecture. **ASME-AMER SOC MECHANICAL ENG**: New York, v.121, p. 5-33, mar 1999.
- 51 BRUUS, H. **Theoretical Microfluidics**, N.Y: Oxford University Press, (2008).
- 52 SCHNEIDER, L. B. **Desenvolvimento de um chip microfluídico para diagnóstico em saúde pública: prova de conceito**. 153 p. Dissertação (Mestrado em Física) – Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

53 BATCHELOR, G.K. **An introduction to fluid dynamics**. USA: Cambridge University Press, (Reprinted 2002).

54 MACINTYRE, A. J. **Bombas e instalações de bombeamento**. RJ: Editora Guanabara, (1987).

55 NAYAK, N. C. et al. CO<sub>2</sub>-laser micromachining of PMMA: the effect of polymer molecular weight. **Journal of micromechanics and microengineering**, England: IOP Publishing Ltd., v.18, n. 9, p. 095020, sep. 2008.

56 CAIAZZO, F. et al. Laser cutting of different polymeric plastics (PE, PP and PC) by CO<sub>2</sub> laser beam. **Journal of Material Processing Technology**. Elsevier Science SA: Switzerland, v. 159, n. 3, p. 279-285, feb. 2005.

57 KLANK, H. et al. CO<sub>2</sub>-laser micromachining and back-end processing for rapid production of PMMA-based microfluidic systems. **Lab on a Chip**, England: Royal Society of Chemistry, v. 2, n. 4, p. 242-246, 2002.

58 SNAKENBORG, D. et al. Microstructure fabrication with a CO<sub>2</sub> laser system. **Journal of micromechanics and microengineering**, England: IOP Publishing Ltd., v.14, n. 2, p. 82-89, feb. 2004.

59 MALEK, C. G. K. Laser processing for bio-microfluidics applications. **Analytical Bioanalytical Chemistry**, Germany: Springer HEidelberPRINGER HEIDELBERG, v. 384, n. 8, p. 1351-1361, aug. 2006.

60 Fonte: <[http://www.inmetro.gov.br/Sidoq/Arquivos/CGCRE/DOQ/DOQ-CGCRE-8\\_02.pdf](http://www.inmetro.gov.br/Sidoq/Arquivos/CGCRE/DOQ/DOQ-CGCRE-8_02.pdf)>, acessado 05/01/2011.