

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR JULIANO NUNES
COSTA..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 14 / 02 / 2006
Eurípides Nóbrega
ORIENTADOR

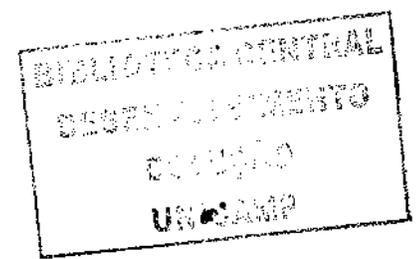
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Projeto, Fabricação e Teste de uma Microbomba sem Válvulas

Autor: Juliano Nunes Costa

Orientador: Prof. Dr. Eurípides G. O. Nóbrega

15-2006



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL

Projeto, Fabricação e Teste de uma Microbomba sem Válvulas

Autor: **Juliano Nunes Costa**

Orientador: **Prof. Dr. Eurípedes G. O. Nóbrega**

Curso: Engenharia Mecânica

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2006

S.P. - Brasil

UNIDADE	BC
Nº CHAMADA	1/0 NILCA/P
	0823p
V	EX
TOMBO BCI	69735
PROC.	10-123-06
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	1100
DATA	29-06-06

BLB 1D - 382726

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

<p>0823p M817g</p>	<p>Costa, Juliano Nunes Projeto, fabricação e teste de uma microbomba sem válvulas / Juliano Nunes Costa. --Campinas, SP: [s.n.]. 2006.</p> <p>Orientador: Eurípedes Guilherme de Oliveira Nóbrega Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.</p> <p>1. Microssistemas eletromecânicos. 2. Circuitos elétricos. 3. Litografia. I. Nóbrega, Eurípedes Guilherme de Oliveira. II. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.</p>
------------------------	--

Título em Inglês: Design, fabrication and test of a valveless micropump
 Palavras-chave em Inglês: Micropumps, Microelectromechanical systems, MEMS, Equivalent electrical networks, Micromanufacture, Deep lithography
 Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico
 Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica
 Banca examinadora: Luiz Otávio Saraiva Ferreira e Ivo Milton Raimundo Júnior
 Data da defesa: 17/02/2006

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Projeto, Fabricação e Teste de uma
Microbomba sem Válvulas

Autor: Juliano Nunes Costa

Orientador: Prof. Dr. Eurípedes G. O. Nóbrega

Banca Examinadora:



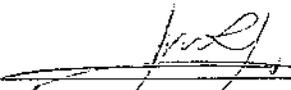
Prof. Dr. Eurípedes G. O. Nóbrega, Presidente

FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Luiz Otávio Saraiva Ferreira

FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Ivo Milton Raimundo Júnior

IQ/UNICAMP

Campinas, 17 de fevereiro de 2006.

200613554

Dedicatória

À minha família, e em especial aos meus pais,
que são as pessoas que mais amo nessa vida, dedico.

*“...Ainda que eu andasse pelo vale das sombras da morte,
não temerei mal algum, porque Tu estás comigo...”*

Salmo 23

Agradecimentos

- A Deus, pela saúde e todas as virtudes que me é concebida em minha vida.
- Aos meus pais, Luiz Carlos e Anísia, por todo amor e carinho dados a mim durante toda minha vida. Agradecer também por todo apoio, ajuda e dedicação.
- Ao Professor Eurípedes G. O. Nóbrega, pela orientação, apoio e incentivo durante todo o mestrado.
- Ao Professor Luiz Otávio, pelas dicas e também pela disposição em estar sempre colaborando.
- Ao Professor Alessandro F. Alves, pelo incentivo dado em meu ingresso no mestrado.
- Ao meu irmão, Tiago, pela amizade, convivência e carinho.
- Ao meu tio, Mário Sérgio Faria, que nunca esquecerei, pelos conselhos e incentivos em meus estudos e também por ter sido uma pessoa maravilhosa. Agradecer também à minha tia Vilma, Júnior, Alexandre, Eduardo e Cristina por todo carinho e incentivo.
- À Juliana, minha namorada, pela compreensão, amor, incentivo e paciência durante todo o mestrado.
- Aos meus queridos amigos Maurício, Juan, Fuga, Marcel, Roberto, Aldecir e Simone pela ótima convivência e principalmente por toda ajuda dada durante o mestrado. Sem vocês as coisas seriam muito mais difíceis, muito obrigado por tudo.
- Aos meus amigos da República Quilombo, pela boa convivência e aprendizado nesses dois anos. Agradecer principalmente ao André pela amizade de longa data.
- Aos meus amigos e companheiros do Departamento de Mecânica Computacional.
- Aos professores e funcionários do Departamento de Mecânica Computacional.
- À CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo

Costa, Juliano Nunes. *Projeto, fabricação e teste de uma microbomba sem válvulas*.

Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2006, 86p., Dissertação (Mestrado).

Hoje em dia, os microsistemas eletromecânicos (MEMS) constituem uma das áreas mais promissoras e de rápido crescimento entre as novas tecnologias. Uma área de destaque na utilização de MEMS é a microfluídica, onde diversos tipos de equipamentos miniaturizados são necessários. As microbombas têm um papel fundamental neste tipo de microdispositivos, devido a sua função de prover quantidades muito pequenas de fluidos de maneira segura e uniforme. O presente trabalho apresenta o processo de desenvolvimento de uma microbomba de diafragma oscilante sem válvulas e com atuação pneumática. Para se construir a microbomba sem válvulas, primeiramente foi feito um estudo sobre os elementos bocal/difusor, que representam na microbomba o papel das válvulas. Com o objetivo de se analisar o comportamento da microbomba, foi feita uma simulação numérica utilizando-se a analogia por circuitos elétricos equivalentes, reconhecidamente um método simples e eficiente de simulação de sistemas multidomínios, onde a grande maioria dos microdispositivos podem ser classificados. Por fim, foram projetados e montados protótipos da microbomba utilizando-se a tecnologia de microfabricação Litografia Profunda em polímeros flexográficos, onde se faz o uso de radiação ultravioleta. Tal opção se deve a que esta é uma tecnologia de baixo custo e de fácil utilização. Foi feito em seguida o levantamento de desempenho da microbomba, onde vários testes foram realizados para se conhecer a relação de pressão versus vazão.

Palavras chaves: Microbombas, Microsistemas Eletromecânicos (MEMS), Circuitos elétricos equivalentes, Microfabricação, Litografia Profunda.

Abstract

Costa, Juliano Nunes. *Design, fabrication and test of a valveless micropump*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2006, 86p., Dissertation (Master's Degree).

Nowadays, Micro-Electromechanical systems (MEMS) constitute one of the most promising and fast expanding fields among the new technologies. Microfluidic systems are a noteworthy sub-area of MEMS, demanding several types of microdevices to be developed. Micropumps have a fundamental role in these systems, due to the need of supplying minimal amounts of fluid in a guaranteed and uniform way. This work presents the process of development of prototypes of a valveless micropump based upon reciprocating diaphragm and pneumatic actuation. To construct the valveless micropump, firstly it was made a study on the nozzle/diffuser elements, which represent in these micropumps the valve function. Aiming to analyse the behavior of the micropump, a numeric simulation was studied using electrical equivalent networks, known as a simple and efficient method of simulation of multidomain systems, a classification most MEMS follow. Finally, it was designed and constructed prototypes of the micropumps using the Deep Lithography in flexographics polymers micro-manufacture technology. This option is due to the low cost characteristic of this technology and also because it is very easy to learn how to produce the prototypes. In the sequence, the performance of the micropump was studied through several experimental tests in order to know its pressure and flow behavior.

Key words: Micropumps, Microelectromechanical systems (MEMS), Equivalent electrical networks, Micromanufacture, Deep Lithography.

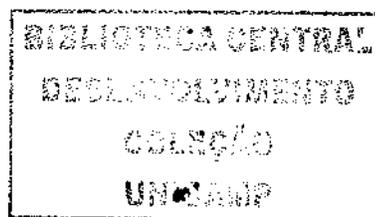
Sumário

1	Introdução	1
1.1	Relevância e motivação	1
1.2	Objetivos do trabalho	4
1.3	Estrutura do texto	4
2	Microbomba sem válvulas: modelagem e microfabricação	6
2.1	Microbombas	6
2.1.1	Bombas em geral	6
2.1.2	Resumo histórico das microbombas	8
2.2	Microbomba sem válvulas	10
2.3	Elementos bocal/difusor	12
2.3.1	O difusor na mecânica dos fluidos	15
2.3.2	Coefficiente de perda de pressão no difusor/bocal	16
2.4	Métodos de modelagem de microbombas	18
2.5	Tecnologias de microfabricação	20
2.5.1	Tecnologia LIGA	20
2.5.2	Litografia Macia	23
3	Modelagem por circuitos equivalentes	26
3.1	Analogia elétrica-mecânica-fluídica	26
3.1.1	Elementos fluídicos	31
3.2	Modelagem da microbomba	36

3.2.1	Especificação da microbomba a ser projetada	36
3.2.2	Especificações técnicas	36
3.2.3	Representação por circuitos elétricos	39
4	Construção da microbomba	44
4.1	Processo de construção	44
4.1.1	Etapas do processo de fabricação	46
4.2	Protótipo final	48
4.3	Dificuldades no processo de microfabricação	51
4.4	Teste da microbomba	52
4.4.1	Variação da pressão aplicada	52
5	Conclusões	65
5.1	Trabalhos futuros	66

Lista de Figuras

1.1	Escala de tamanhos	2
2.1	Bomba de roda d'água	7
2.2	Bomba parafuso de Archimedes	8
2.3	Microbomba peristáltica proposta por Jan Smits	9
2.4	Princípio de funcionamento de uma microbomba de diafragma convencional com duas válvulas de retenção passivas: (a) modo de expansão; (b) modo de compressão.	10
2.5	Esquema da microbomba sem válvulas	11
2.6	Modelos de difusor	13
2.7	Princípio de funcionamento de uma microbomba com bocal/difusor: (a) modo de expansão; (b) modo de compressão.	14
2.8	Mapa de estabilidade de fluxo no difusor. L é o comprimento do difusor, d é a largura da abertura de entrada do difusor e 2θ é o seu ângulo de abertura.	15
2.9	Divisão do difusor em regiões	16
2.10	Etapas de fabricação da técnica LIGA	21
2.11	Microengrenagem construída utilizando-se LIGA	23
2.12	Etapas de fabricação da técnica litografia macia	24
2.13	Estrutura construída utilizando-se litografia macia	25
3.1	Representação de um sistema mecânico translacional	28
3.2	Representação de um circuito RLC	29
3.3	Representação do tubo dividido em segmentos	32



3.4	Representação do modelo da resistência	33
3.5	Resistências para fluxo laminar em diferentes tipos de tubulação. L representa o comprimento do tubo e μ a viscosidade do fluido que opera no sistema.	35
3.6	Vista de cima das câmaras de entrada (a) e saída (b), da câmara de bombeamento (c) e do bocal/difusor.	37
3.7	Representação do difusor utilizado na microbomba. $R_1=100 \mu m$; $R_2=500 \mu m$; $L=2.3$ mm. A curvatura da entrada menor do difusor é de $100 \mu m$	38
3.8	Vista de corte da microbomba. a e b são as câmaras de entrada e saída respectivamente; c é a câmara de bombeamento e d é a câmara da membrana onde será aplicada a variação de pressão.	39
3.9	Representação por circuitos elétricos das características da microbomba	39
3.10	Volume armazenado no reservatório de saída, pressão 0.111 MPa (simulação numérica)	42
3.11	Volume armazenado no reservatório de saída, pressão 0.121 MPa (simulação numérica)	43
4.1	Exemplo de uma máscara	45
4.2	Camadas que constituem a microbomba	45
4.3	Materiais utilizados na fabricação	47
4.4	Câmara de curagem	48
4.5	Base da microbomba (1.6 mm de espessura)	49
4.6	Bocal/Difusor e suas alturas (3.2 mm de espessura)	49
4.7	Definição de altura (1.6 mm de espessura)	49
4.8	Tampa da microbomba (1.6 mm de espessura)	49
4.9	Câmara da membrana (3.2 mm de espessura)	50
4.10	Microbomba construída	51
4.11	Seringa acoplada ao eixo do cilindro	52
4.12	Programa <i>Ladder</i> desenvolvido para o controle do cilindro	53
4.13	Princípio de atuação da microbomba	55

4.14	Relação entre o volume da seringa 2 e o α	56
4.15	Configuração de teste para a caracterização do fluxo da microbomba. h_1 é a altura da coluna de líquido do reservatório de entrada e h_2 é a altura do tubo de saída.	57
4.16	Visão da microbomba e os reservatórios	58
4.17	Visão da microbomba e do atuador pneumático	59
4.18	Microbomba vedada	60
4.19	Verificação das características do volume bombeado (Tabela 4.2), com as barras de erro (desvio padrão) de cada média encontrada.	62
4.20	Curvas obtidas no teste 1 com as barras de erro (desvio padrão) de cada média encontrada.	63
4.21	Curvas obtidas nos teste 2 e 3 com as barras de erro (desvio padrão) de cada média encontrada.	64

Lista de Tabelas

2.1	Coeficiente de perda (K) para o bocal/difusor	18
3.1	Exemplos de variáveis de força conjugadas	30
3.2	Analogia elétrica-mecânica-fluídica	31
3.3	Características da microbomba	40
4.1	Dados experimentais medidos no teste 1 na frequência de 1 Hz	61
4.2	Dados experimentais medidos no teste 1 na frequência de 2 Hz	61
4.3	Dados experimentais medidos no teste 1 na frequência de 5 Hz	61
4.4	Dados experimentais medidos no teste 2 na frequência de 2 Hz	61
4.5	Dados experimentais medidos no teste 3 na frequência de 2 Hz	62

Capítulo 1

Introdução

1.1 Relevância e motivação

Microsistemas eletromecânicos (MEMS) são dispositivos que combinam atuação e sensoria-mento elétrico e mecânico em uma estrutura, cujas dimensões são da ordem de micrômetros (v. d. Poel Filho, 2005). Entretanto, o conceito de MEMS tem crescido e hoje o termo é usado para se referir a microdispositivos em geral. Sendo assim, MEMS são sistemas de sensores e atuadores feitos através de tecnologias de processos de microusinagem (Fedder and Jing, 1999).

Hoje em dia, os microsistemas eletromecânicos são provavelmente uma das áreas mais promissoras e de rápido crescimento entre as novas tecnologias. De fato, a possibilidade de redução do tamanho das estruturas mecânicas para o microdomínio, abre uma grande variedade de possibilidades de aplicações: biomedicina, aeronáutica, setores automotivos, robótica, engenharia molecular, fibra óptica e tecnologia de fluidos (Bona and Enikov, 2004). Este tipo de sistema é chamado por uma grande variedade de nomes, em diferentes partes do mundo: Microsistemas eletromecânicos (MEMS), Micromecânico, Tecnologia de Microsistemas (MST), Micromáquinas (Micro) e é também chamado de Nanotecnologia por algumas pessoas, muito embora, a Nanotecnologia geralmente se refira aos dispositivos com alcance de tamanho de um nanometro até um micron, como mostrado na Figura 1.1 (Enikov, 2004):

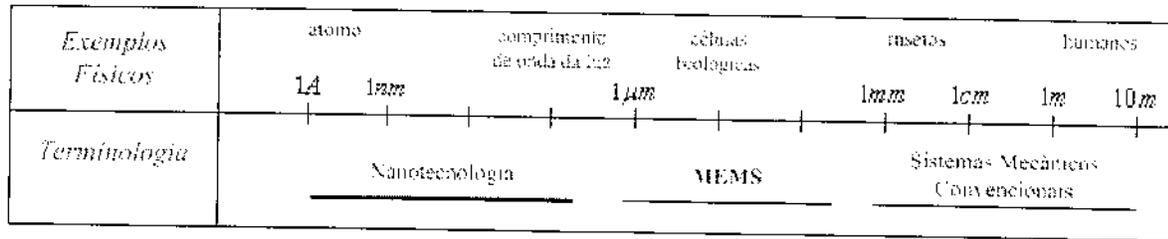


Figura 1.1: Escala de tamanhos

Enquanto os componentes eletrônicos são fabricados usando circuitos integrados e processos seqüenciais (CMOS, Bipolar, ou processo BICMOS), os microssistemas eletromecânicos são fabricados usando processos de microusinagem compatíveis, que atacam seletivamente partes isoladas da pastilha do substrato ou adiciona novas camadas estruturais para formar os microdispositivos.

As aplicações estão em diversas áreas. Nas indústrias automotiva e espacial destacam-se os sensores inerciais e de pressão. Um dos exemplos mais populares da tecnologia de microssistemas é o acelerômetro (Ko et al., 1995; Yazdi and Najfi, 2000). Atualmente, esse microsensor inercial é empregado, entre outros, em sistemas de freio com controle de travamento, acionamento de *airbags* e em sistemas de sensoriamento sísmico. Sensores de pressão são úteis no campo de medições de intensidades acústicas e fluxo (Burns et al., 1995).

A miniaturização em si traz um campo de aplicações impossível de ser alcançado por equipamentos em macroescala. Na engenharia biomédica, a tecnologia de MEMS tem impulsionado o desenvolvimento de ferramentas para cirurgias com o mínimo de invasão do corpo humano. Nestas, microdispositivos são inseridos no organismo do paciente por meio de pequenas incisões no corpo e os procedimentos necessários são então efetuados. O resultado é uma intervenção onde há menos trauma dos tecidos, menos risco de inflamação, redução de complicações pós-operatórias e recuperação mais rápida (Dargahi et al., 2000).

Uma área de bastante aplicação de MEMS é a microfluídica, onde diversos microdispositivos são construídos. Como exemplo tem-se o *lab-on-a-chip* (LOC), que em português significa laboratório em uma pastilha, termo usado para denotar a miniaturização de análises químicas, biológicas e bioquímicas. Em termos funcionais, um LOC para a maioria das

aplicações (comerciais) consiste de um *microchip*, um instrumento para controle e detecção, um computador com controle e software para análise de dados, ensaios e reagentes (Chow, 2002).

Para a realização destas funções, há a necessidade de uma série de dispositivos microfluídicos, sendo os componentes mais comuns: bombas, válvulas, sensores de fluxo, separadores e misturadores. A microbomba é um componente chave para o controle de sistemas microfluídicos em geral, em consequência de sua função, que é a de prover quantidades muito pequenas de fluido na proporção certa, para que ocorra um transporte seguro e uniforme do fluido. Além de ser o componente chave em microfluídica, a microbomba também pode ser utilizada com outras funções como em (Cao et al., 2000; Teymoori and Abbaspour-Sani, 2005), onde foram desenvolvidas microbombas que têm como objetivo fazer a administração de medicamentos, sendo úteis (por terem tamanho reduzido e grande precisão de bombeamento) para tratamento de quimioterapia, injeção de insulina para pacientes diabéticos, para dosagem de medicamentos em pacientes com câncer, etc. Vantagens imediatas são o alívio das dores causadas pelas freqüentes injeções e o maior controle na dosagem da droga.

Sendo assim, o estudo da microbomba torna-se atrativo por ter um papel fundamental nos dispositivos microfluídicos e também por sua gama de aplicações em outras áreas, uma vez que a tecnologia de MEMS em geral vem crescendo a cada dia. Pesquisas recentes mostram que o mercado de dispositivos microfluídicos movimentam de 3 a 4,5 bilhões de dólares e com estimativa de crescimento anual a uma taxa de 25 a 30 por cento (Nguyen et al., 2002). Considerando também que a fabricação de microdispositivos na Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP ainda está se iniciando, uma vez que o laboratório de microfabricação é recente, este trabalho também tem o objetivo de aplicar as técnicas já desenvolvidas para o amadurecimento dos métodos disponíveis.

Como outras aplicações de MEMS tem-se: armazenamento de dados em massa (*Hard Disk*), sistemas de gravação, processos de impressão (impressoras a jato de tinta) e redes de comunicação (telefones móveis). Modernos automóveis são equipados com uma grande variedade de microsensores para gerenciamento de motor, propriedades da estrada, segurança (*airbag*) e conforto (Ehrfeld, 2003) e também para detecção de materiais explosivos e agentes

biológicos (vírus, bactérias ou toxinas), tendo como objetivo dificultar a ação de terroristas (Wang, 2004).

1.2 Objetivos do trabalho

O objetivo do trabalho é construir uma microbomba de diafragma (movimento oscilatório), sem válvulas, com atuação pneumática e posteriormente testar a microbomba para caracterizar o fluxo bombeado de acordo com a pressão. Para o desenvolvimento do objetivo proposto, outros tópicos são abordados no presente trabalho, sendo eles:

- estudo do funcionamento da microbomba sem válvulas;
- simulação numérica da microbomba utilizando o método de modelagem por circuitos elétricos equivalentes;
- construção da microbomba utilizando-se a tecnologia de microfabricação litografia profunda em polímeros flexográficos.

1.3 Estrutura do texto

A estrutura do texto é descrita a seguir.

O Capítulo 2 apresenta um resumo histórico abrangendo as microbombas de uma forma geral e as microbombas sem válvulas, mostrando seu princípio de funcionamento e suas principais características. Posteriormente aborda os métodos de modelagem de MEMS e por fim as técnicas de microfabricação.

O Capítulo 3 contém o modelo proposto da microbomba e a sua respectiva modelagem numérica com os resultados obtidos.

O Capítulo 4 mostra a construção da microbomba, seguido das etapas desenvolvidas no processo de microfabricação, e também contém a parte de teste de desempenho da microbomba.

No Capítulo 5 são apresentadas as considerações e conclusões finais sobre o trabalho desenvolvido. Também são indicadas propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Microbomba sem válvulas: modelagem e microfabricação

Este capítulo contém um resumo histórico sobre microbombas. Também é feito um levantamento sobre técnicas de modelagem de microdispositivos e posteriormente são exemplificadas algumas tecnologias de microfabricação. Por fim, é apresentada a microbomba sem válvulas, mostrando o seu funcionamento e suas características.

2.1 Microbombas

2.1.1 Bombas em geral

Os mais velhos dispositivos conhecidos para se transferir energia para fluidos são as bombas. Há 3000 anos atrás bombas de roda d'água (que podem carregar a água em um coletor, enquanto a corrente no córrego gira a roda (Figura 2.1)) foram usadas na Ásia e na África e elas ainda são comuns até hoje.

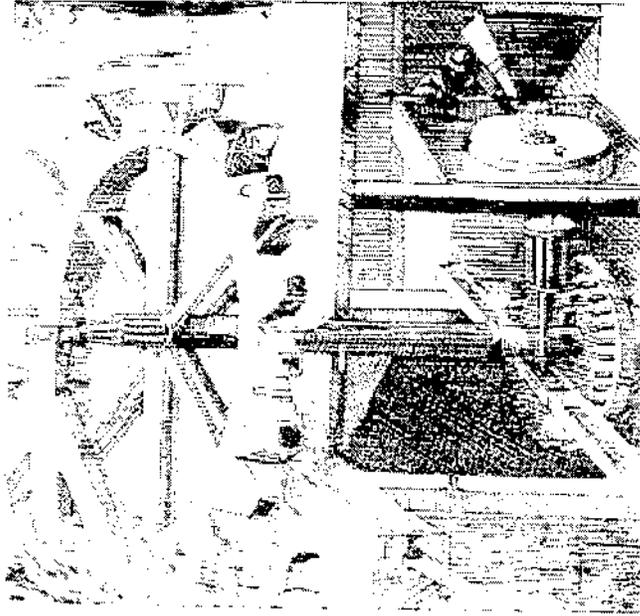


Figura 2.1: Bomba de roda d'água

Outro exemplo antigo é a bomba parafuso de Archimedes (Figura 2.2), construída por volta de 250 AC e que também ainda são utilizadas para irrigação e drenagem. Com o passar do tempo, várias bombas com diferentes dimensões têm sido desenvolvidas e com diferentes mecanismos de bombeamento para diferentes aplicações. É estimado que a bomba é provavelmente a segunda máquina atualmente mais utilizada, perdendo apenas para o motor elétrico (Zhang, 2005).



Figura 2.2: Bomba parafuso de Archimedes

2.1.2 Resumo histórico das microbombas

Considerando as microbombas, as pesquisas começaram em 1980 na Universidade de Stanford, onde Jan Smits desenvolveu uma microbomba, com o objetivo de usá-la em sistemas de controle de insulina, para manter a taxa de açúcar no sangue constante em pacientes diabéticos, sem a necessidade de se utilizar de injeções frequentes (Laser and Santiago, 2004). Considerando a microbomba proposta por (Smits, 1990), mostrada na Figura 2.3, ela foi fabricada em uma pastilha de silício de 50.8 milímetros unido com duas chapas de vidro de cada lado. Três discos piezelétricos foram colados em uma fina placa de vidro em cima da área onde os orifícios de entrada e saída estão localizados. Quando estes três elementos piezelétricos são atuados um após o outro, formam o movimento peristáltico que gera uma

vazão de saída. Água foi o fluido de trabalho da microbomba.

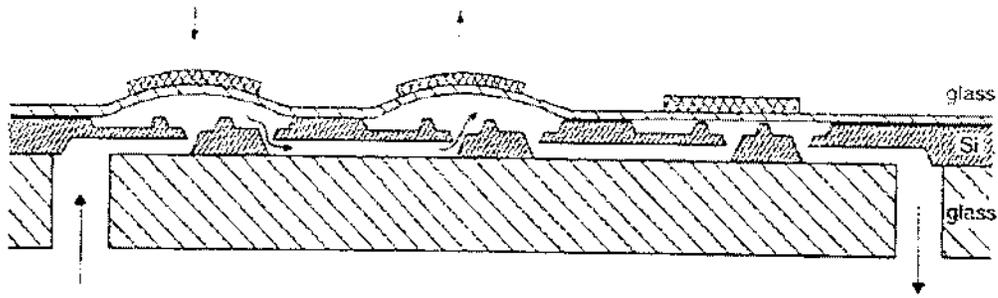


Figura 2.3: Microbomba peristáltica proposta por Jan Smits

Microbombas em geral podem ser classificadas por seu princípio de atuação (piezelétrico, pneumático, termopneumático, termomecânico, eletrostático, eletromagnética), princípios de bombeamento (alternação, peristáltico, eletrohidrodinâmico, eletroosmótico, ultrasônico) ou mesmo pelo princípio de válvulas ou sem elas. Considerando seu princípio de bombeamento são divididas basicamente em duas categorias (Zhang, 2005): microbombas dinâmicas e microbombas de deslocamento. Nas microbombas dinâmicas a energia é continuamente adicionada ao fluido o que gera altas velocidades dentro da microbomba. Desde que essas velocidades sejam maiores que as da saída, esta diferença de velocidade pode resultar em uma diferença de pressão. Esta diferença de pressão move o fluido adiante. Como exemplo de microbombas dinâmicas tem-se: eletrohidrodinâmica, eletroosmótica, magnetohidrodinâmica, ultrasônicas, etc. Nas microbombas de deslocamento, a energia é periodicamente adicionada ao fluido por uma força. Como resultado, a pressão do fluido varia periodicamente enquanto a entrada e a saída abrem alternativamente (considerando bombas com válvulas móveis), conseqüentemente o fluido é transportado. Como exemplos de microbombas de deslocamento pode-se citar microbombas oscilantes (incluindo diafragma e êmbolo) e as rotacionais, ou ainda o coração humano.

2.2 Microbomba sem válvulas

Recentemente, muitos modelos de microbombas foram desenvolvidos. Uma microbomba de diafragma convencional consiste de duas válvulas de retenção passivas (que apenas permitem a passagem de fluxo em uma única direção) conectadas a um diafragma oscilante, que cria uma variação do volume da câmara, como mostrado na Figura 2.4.

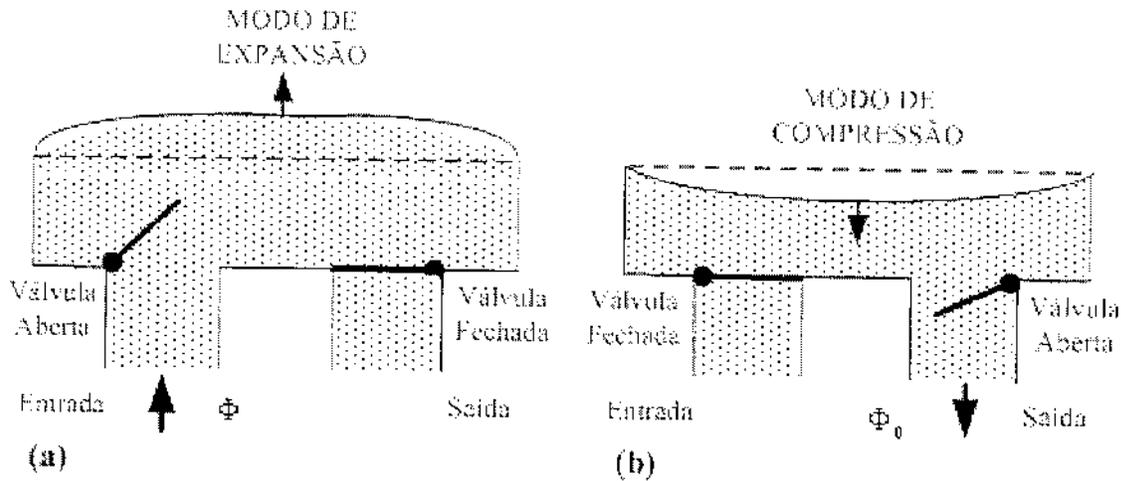


Figura 2.4: Princípio de funcionamento de uma microbomba de diafragma convencional com duas válvulas de retenção passivas: (a) modo de expansão; (b) modo de compressão.

Quando o volume da câmara aumenta, a válvula de entrada é aberta, enquanto a válvula de saída é fechada e o fluido flui através da entrada para dentro da câmara (modo de expansão), Figura 2.4(a). Quando o volume da câmara diminui a válvula de entrada é fechada e a de saída é aberta e o fluido flui através da saída para fora da câmara (modo de compressão), Figura 2.4(b).

Para microbombas convencionais, as válvulas, por possuírem partes móveis, podem sofrer problemas como alta queda de pressão através das válvulas e com isso ter um desgaste levando as partes móveis a se romperem. Isto pode resultar em uma redução da vida útil e da confiabilidade da bomba. Também há o risco de que a ação da válvula possa prejudicar fluidos mais sensíveis.

Considerando o ponto anterior, (Stemme and Stemme, 1993) desenvolveu um conceito alternativo para microbombas, onde as válvulas foram trocadas pelos elementos bocal/difusor, como apresentado na Figura 2.5.

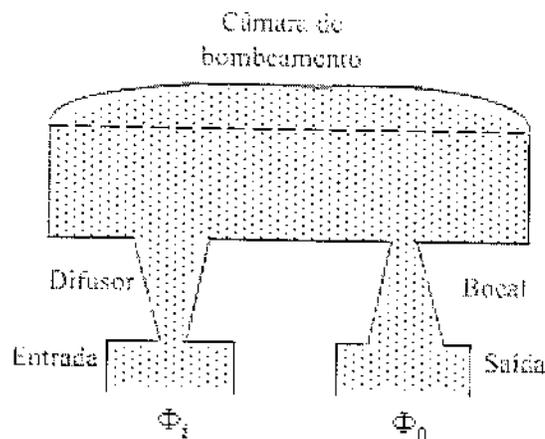


Figura 2.5: Esquema da microbomba sem válvulas

Esta solução conduziu a uma simplificação considerada no processo de fabricação, por não ter que se projetar e acoplar válvulas com partes móveis na microbomba. Este trabalho foi continuado por Anders Olsson, que forneceu um estudo compreensivo de microbombas de bocal/difusor (Olsson et al., 1996; Olsson et al., 1997b; Olsson et al., 1999; Olsson et al., 2000) e construiu diferentes protótipos usando tecnologias de microusinagem em silício e réplica termoplástica (Olsson et al., 1998). Outros trabalhos numéricos baseados no bocal/difusor também foram feitos por outros autores como (Gerlach and Wurmus, 1995), que descreveram o comportamento dinâmico de uma microbomba sem válvulas de atuação piezelétrica; em (Jiang et al., 1998) é apresentado um conjunto de equações que relaciona o número de Reynolds com o coeficiente de resistência de fluxo no bocal/difusor; (Nguyen and Huang, 2000) desenvolveram uma simulação numérica de uma microbomba sem válvulas atuada utilizando modulação por largura de pulso; (Pan et al., 2001) mostraram uma solução analítica para microbomba sem válvulas considerando o acoplamento da membrana e em (Singhal et al., 2004) características de fluxo para baixos números de Reynolds são analisadas em difusores

cônicos e planos.

Com relação à construção de microbombas sem válvulas tem-se como exemplo (Olsson et al., 1997a), que construíram a primeira microbomba sem válvulas para se bombear gás. (Bóhm et al., 1999) construíram uma microbomba de plástico usando técnicas e materiais convencionais. Como trabalhos mais recentes tem-se (Yamahata et al., 2005) que construíram uma microbomba em um recipiente de vidro com atuação eletromagnética e o de (Kim et al., 2005) que fabricaram uma microbomba com atuação termopneumática.

Sendo assim, o modelo proposto por (Stemme and Stemme, 1993) impressionou os pesquisadores de MEMS por sua estrutura simples e alta vazão de saída.

Microbombas sem válvulas são divididas nas seguintes categorias (Nguyen and Huang, 2001):

- Bombas peristálticas que possuem uma vazão máxima de $100 \mu\text{l}/\text{min}$ para água (Teymoori and Abbaspour-Sani, 2005).
- Bombas com bocal/difusor e bombas de canal valvular que podem gerar uma vazão de $2000\text{-}3000 \mu\text{l}/\text{min}$ de água (Olsson, 1998).
- Bombas ultrasônicas que induzem por vibração acústicas uma vazão na ordem de $10 \mu\text{l}/\text{min}$ (Nguyen and White, 1999; Nguyen et al., 2000).
- Bombas eletrosmóticas e eletroforéticas que podem mover líquidos com velocidade menor que $1\text{mm}/\text{s}$. Dependendo do diâmetro capilar e da tensão aplicada, uma vazão de várias centenas de nanolitros por minuto pode ser alcançada (Herr et al., 1999).

As duas primeiras categorias são simples e não requerem tecnologias especiais de fabricação.

2.3 Elementos bocal/difusor

O difusor, um duto com a área da secção transversal que se expande gradualmente, é o elemento chave na microbomba sem válvulas. Usado no sentido oposto com a área da secção

transversal convergindo, ele é chamado de bocal. Difusores frequentemente possuem secção transversal circular (Figura 2.6(a)) ou plana (Figura 2.6(b)). Ambos difusores e bocais são dispositivos comuns em sistemas de fluxo macroscópicos (Olsson, 1998).

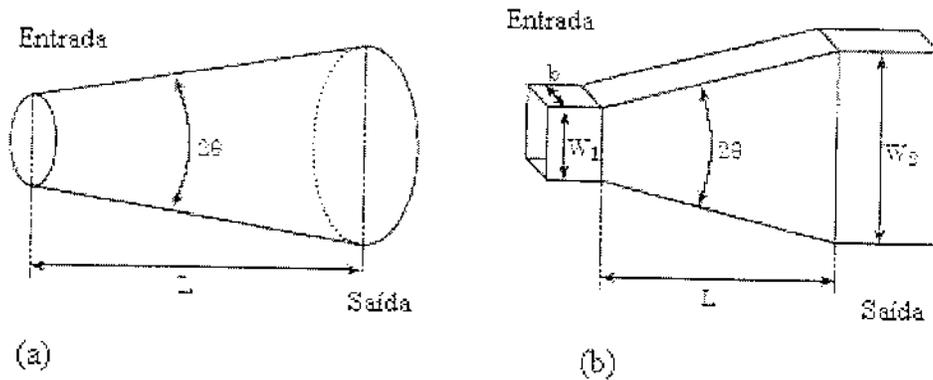


Figura 2.6: Modelos de difusor

Em geral, os dois tipos de difusores (planos ou cônicos) possuem aproximadamente a mesma eficiência difusora. No entanto, o melhor desempenho para difusores cônicos é alcançado com um comprimento que é de dez a oitenta por cento maior que para um difusor plano. A escolha do tipo do difusor depende basicamente do processo de fabricação que será utilizado, mas difusores planos são preferidos já que eles resultam em um projeto mais compacto (Olsson et al., 2000), o que é sem dúvida importante em dispositivos miniaturizados.

A direção do fluxo na microbomba é baseado no fato de que os elementos bocal/difusor podem ser modelados geometricamente para terem uma perda de pressão mais baixa na direção do difusor que na direção do bocal, para a mesma velocidade de fluxo, como mostrado na Figura 2.7.

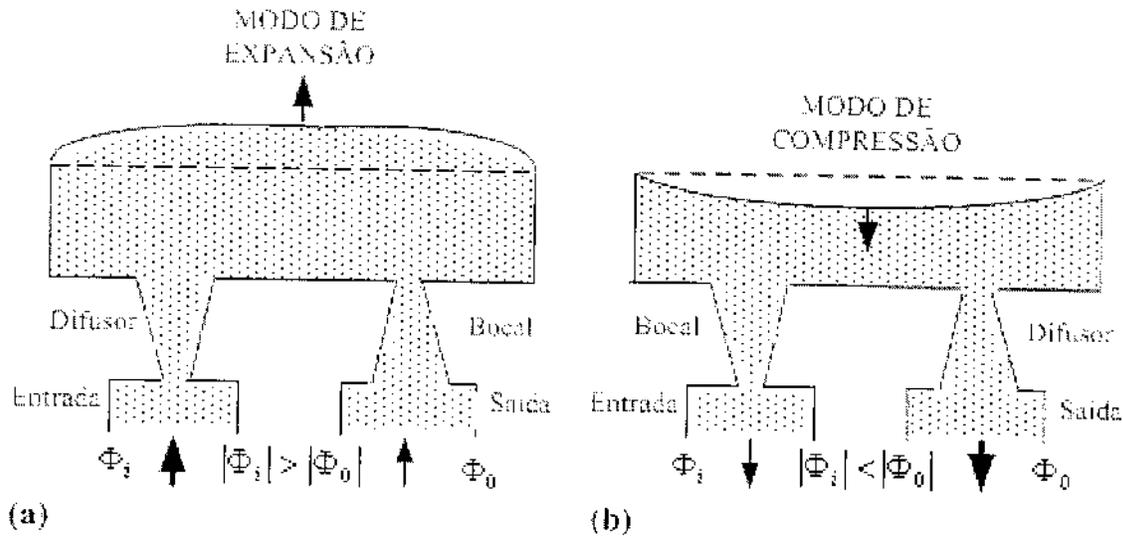


Figura 2.7: Princípio de funcionamento de uma microbomba com bocal/difusor: (a) modo de expansão; (b) modo de compressão.

Durante o aumento do volume da câmara (modo de expansão), o elemento de entrada atua como um difusor com uma restrição de fluxo menor que no elemento de saída que atua como bocal. Isto significa que um volume maior é transportado através da entrada para dentro da câmara que através da saída, como mostra a Figura 2.7(a). Durante a diminuição do volume da câmara (modo de compressão), o elemento de saída atua como um difusor com uma restrição de fluxo menor que no elemento de entrada, que atua como um bocal. Isto significa que um volume maior é transportado para fora da câmara através da saída que através da entrada, como mostra a Figura 2.7(b). O resultado de um ciclo completo da microbomba é conseqüentemente que o fluido é bombeado pelo lado da entrada para o lado da saída, apesar do fato que os elementos bocal/difusor transportam fluidos em ambos os sentidos.

O princípio de funcionamento da microbomba sem válvulas é simples como apresentado acima, mas um bom modelo matemático é complicado. Portanto, muitas das análises e experimentos em microbombas sem válvulas são focados nos efeitos dos parâmetros geométricos, como comprimento e ângulo cônico dos elementos bocal/difusor, o número de Reynolds do

fluxo (Jiang et al., 1998). a resposta à vibração e o fluxo médio através da microbomba (Pan et al., 2001). Estes são alguns dos parâmetros que influenciam no desempenho da microbomba sem válvulas.

2.3.1 O difusor na mecânica dos fluidos

Por definição, o difusor é um dispositivo que diminui a velocidade e aumenta a pressão estática do fluido que passa através do sistema, isto é, transforma energia cinética (velocidade) em energia potencial (pressão) (Olsson, 1998). O tipo de fluxo no difusor pode ser exemplificado pelo mapa de estabilidade apresentado na Figura 2.8.

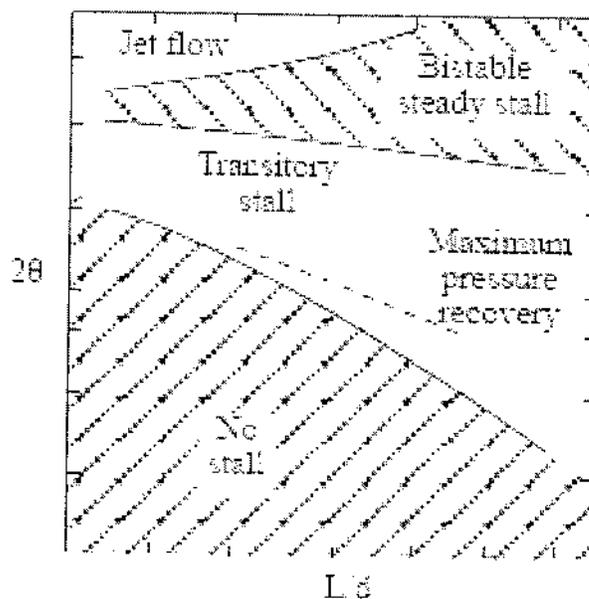


Figura 2.8: Mapa de estabilidade de fluxo no difusor. L é o comprimento do difusor, d é a largura da abertura de entrada do difusor e 2θ é o seu ângulo de abertura.

O mapa mostra que dependendo da geometria, o difusor opera em quatro regiões diferentes. Na região *no stall* o fluxo é constante, sem separação nas paredes do difusor e tem relativamente bom desempenho. Na *transitory steady stall* é onde o fluxo começa a ser instável. A menor perda de pressão ocorre neste local. Na *bistable steady stall* uma perda de

velocidade constante do fluxo ocorre por ele chocar-se nas paredes do difusor e o desempenho é ruim. Na *jet flow* o fluxo se separa quase que completamente nas paredes do difusor e o desempenho é extremamente ruim.

2.3.2 Coeficiente de perda de pressão no difusor/bocal

Como mencionado anteriormente, pode-se projetar geometricamente o difusor para que ele tenha uma menor perda de pressão que no bocal. Para alcançar o melhor desempenho de bombeamento é necessário projetar o difusor com a maior capacidade de eficiência de fluxo.

O difusor pode ser dividido em três regiões diferentes, como apresentado na Figura 2.9.

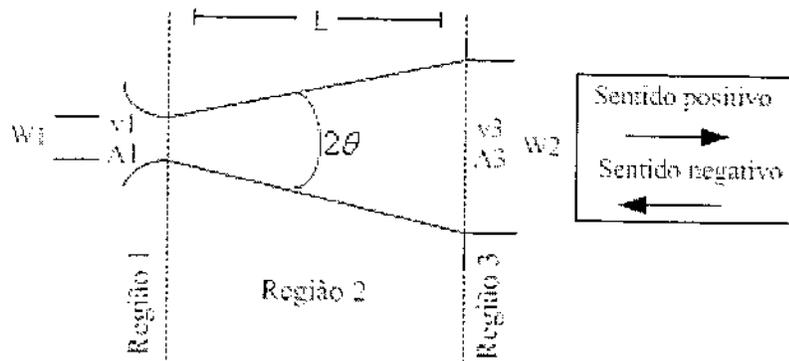


Figura 2.9: Divisão do difusor em regiões

Para cada região a queda de pressão pode ser calculada. A queda de pressão total é o somatório das quedas de pressão através das regiões. Considerando-se o bocal/difusor tendo a mesma geometria, assim, o fluxo no sentido positivo representa a ação do difusor, e o fluxo no sentido negativo, a ação do bocal. Sendo assim, a queda de pressão total no sentido positivo (dada pela Equação 2.1 e no sentido negativo (dada pela Equação 2.2) são definidas por (Olsson et al., 1996)

$$\Delta p_d = \Delta p_{d,1} + \Delta p_{d,2} + \Delta p_{d,3} , \quad (2.1)$$

$$\Delta p_n = \Delta p_{n,1} + \Delta p_{n,2} + \Delta p_{n,3} . \quad (2.2)$$

A queda de pressão Δp é usualmente descrita, em função de um coeficiente de perda K , pela seguinte expressão: 2.3:

$$\Delta p = \frac{1}{2} K \rho v^2 , \quad (2.3)$$

onde ρ é a densidade do fluido e v é a velocidade média. Substituindo a Equação 2.3 nas Equações 2.1 e 2.2, pode-se reescrevê-las da seguinte forma:

$$\Delta p_d = \left[K_{d,1} + K_{d,2} + K_{d,3} \left(\frac{A_1}{A_3} \right)^2 \right] \frac{1}{2} \rho v_1^2 , \quad (2.4)$$

$$\Delta p_n = \left[K_{n,1} + (K_{n,2} + K_{n,3}) \left(\frac{A_1}{A_3} \right)^2 \right] \frac{1}{2} \rho v_1^2 . \quad (2.5)$$

Para o difusor completo, usa-se ξ como o coeficiente de perda de pressão ao invés de K . Neste caso, a expressão para ξ é

$$\xi = \frac{\Delta p}{\rho v^2 / 2} . \quad (2.6)$$

O coeficiente total de perda de pressão no sentido do difusor pode agora ser escrito como

$$\xi_d = K_{d,1} + K_{d,2} + K_{d,3} \left(\frac{A_1}{A_3} \right)^2 , \quad (2.7)$$

e no sentido do bocal como

$$\xi_n = K_{n,1} + (K_{n,2} + K_{n,3}) \left(\frac{A_1}{A_3} \right)^2 . \quad (2.8)$$

Das Equações 2.7 e 2.8 a relação de eficiência do difusor η é definida como

$$\eta = \frac{\xi_n}{\xi_d} = \frac{K_{n,1} + (K_{n,2} + K_{n,3}) (A_1/A_3)^2}{K_{d,1} + K_{d,2} + K_{d,3} (A_1/A_3)^2} . \quad (2.9)$$

Para a utilização do difusor em uma microbomba, a relação de eficiência deve estar entre $1 < \eta < 5$, segundo (Stemme and Stemme, 1993). Isto significa que a perda de pressão para

um dado fluxo é menor na direção do difusor que na direção do bocal, de modo a garantir uma boa vazão líquida.

O valor do coeficiente de perda K está relacionado com a região do bocal/difusor (ver Figura 2.9). A região 1 é a região de entrada na direção do difusor. Para entrada com cantos pontiagudos, $K = 0.5$, e para entradas com cantos arredondados $K = 0.05$ (Olsson et al., 1996). Para a saída (considerando o sentido negativo, bocal) $K = 1$, independentemente da forma de seus cantos. Portanto, o difusor deverá ter entradas de cantos arredondados para conseguir baixas perdas com relação ao bocal que deverá ter entradas pontiagudas. Considerando a região 2, no sentido positivo (difusor) as perdas ficam em torno de $K = 0.15$. No sentido do bocal as perdas são bem menores e está em torno de $K = 0.01$. Na região 3, tem-se um $K = 1$ para a saída do difusor. No sentido do bocal a maior possibilidade de perda de pressão é desejada, assim utilizam-se entradas pontiagudas que dá um $K = 1$, bem maior que o K de entrada do difusor. Na Tabela 2.1 estão os valores de K para cada região da Figura 2.9.

Tabela 2.1: Coeficiente de perda (K) para o bocal/difusor

	Região 1	Região 2	Região 3
Sentido do difusor	0.05	0.15	1.0
Sentido do bocal	1.0	0.01	0.5

2.4 Métodos de modelagem de microbombas

A utilização de dispositivos microfluídicos vem crescendo a cada dia, nas mais diversas áreas (biomedicina, aeronáutica, setores automotivos, etc). Conseqüentemente, eles vêm ganhando mais e mais sofisticação, com isso um esforço equivalente na sua modelagem torna-se necessário. Devido à complexidade de alguns dispositivos, há a necessidade do desenvolvimento de ferramentas de modelagem similares aos dispositivos de silício mais clássicos. Por exemplo, no caso das microbombas, existem freqüentemente fortes interações entre fluido e elementos estruturais como válvulas ou membranas, que podem também serem acopladas eletricamente

ou termicamente para descrever um mecanismo de atuação. As equações que governam o comportamento destes sistemas freqüentemente não possuem solução analítica, particularmente se elas incluem efeitos não lineares (Bourouina and Grandchamp, 1996).

(Zengerle and Richter, 1994) têm reportado um modelo teórico para microbombas, baseado em um conjunto de equações que têm sido resolvidas com softwares dedicados. Este modelo tem sido validado por medições. Uma alternativa para a simulação de sistemas microfluídicos consiste no uso de métodos numéricos como modelagem por elementos finitos (FEM). Porém, aumentando a complexidade do dispositivo o custo computacional do método aumenta, especialmente se análises acopladas tornam-se necessárias. A simulação de uma microbomba completa é conseqüentemente muito lenta. Uma terceira possibilidade é o uso de *bond-graphs* que é um método matemático para a modelagem de sistemas baseado na energia e nas relações de forças dos elementos acoplados. Este método foi usado por (der Pol et al., 1990) para modelar uma microbomba termopneumática.

Outro modo para modelar microbombas é pela analogia com circuitos elétricos equivalentes. Este método consiste na descrição do sistema por circuitos formados por impedâncias mecânicas, podendo ser ou não lineares, e conseqüentemente podendo fazer sua análise com uma ferramenta de simulação de circuitos elétricos. Em (Bourouina and Grandchamp, 1996) são apresentados alguns exemplos de aplicações em acústica para a modelagem de transdutores o que vem sendo feito por um longo tempo (Manson, 1943). O método também tem sido usado por (Swart and Nathan, 1992) e por (Auebach et al., 1994) para modelar medidores de fluxo, e por (Carmona et al., 1996) para modelar bombas termopneumáticas.

Neste trabalho, o método de analogia por circuitos elétricos foi usado para descrever o comportamento de uma microbomba de membrana sem válvulas com atuação pneumática. Descrever sistemas fluídicos com circuitos elétricos equivalentes é um poderoso método. Ele é muito simples e praticamente não há limitações no número de elementos usados. Sistemas complexos podem ser rapidamente descritos e analisados. Porém, todas as impedâncias desses elementos devem ser calculadas antecipadamente, por meio de equações do fenômeno físico dominante. Uma desvantagem na utilização deste método é que algumas dessas impedâncias não podem ser calculadas analiticamente, tendo-se que recorrer a métodos numéricos,

como FEM, para extrair seus fluxos e pressões característicos. Esse método foi validado por (Bourouina and Grandchamp, 1996). Como exemplos mais recentes de modelagem por FEM e também por analogia por circuitos elétricos tem-se os trabalhos de (Carmona et al., 2003) e de (Goulpeau et al., 2005), respectivamente.

Um outro método de bastante utilização é o *Computational Fluid Dynamics* (CFD), para o qual tem-se como exemplo o FLOTRAN, que é parte do pacote do software comercial ANSYS. Esse software é baseado no método dos elementos finitos e oferece diferentes tipos de análises como de fluxo laminar ou turbulento e compressibilidade ou não de fluidos (Olsson, 1998).

2.5 Tecnologias de microfabricação

Existem diferentes tecnologias para a manufatura de MEMS e, conseqüentemente, microbombas. Como exemplos tem-se: litografia, microusinagem em silício (microusinagem em massa e microusinagem de superfície), replicação termoplástica (Olsson, 1998), processos de cauterização (gravação) (Jiang et al., 1998), AMANDA (microusinagem de superfície, moldagem e transferência de diafragma) (Schomburg et al., 1998), etc. Revisões contendo explicações detalhadas de vários processos de microusinagem podem ser encontradas nas seguintes referências: (Weigl et al., 2003; Woias, 2005; Ehrfeld, 2003; Madou, 1997). Considerando-se as tecnologias mencionadas acima, o presente estudo será focado na litografia, uma vez que é um dos processos mais utilizados e difundidos, tendo sido utilizado neste trabalho.

2.5.1 Tecnologia LIGA

Microusinagem ou micromanufatura compreende o uso de um conjunto de ferramentas de fabricação, baseada em técnicas de produção em larga escala de películas usadas geralmente na indústria eletrônica. Em uma visão mais abrangente, a microusinagem faz uso de uma série de tecnologias tradicionais, como métodos de fabricação de pequenas estruturas tridimensionais (3D) com dimensões na faixa de subcentímetros até submicrômetro, envolvendo

sensores, atuadores, ou outros microcomponentes e microssistemas (Madou, 1997).

A construção de microdispositivos começou como um ramo da indústria de projetos de circuitos integrados, onde substratos rígidos, mais comumente silício, são usados como material primário de construção. O paradigma básico das tecnologias padrões de litografia envolve o uso de radiação eletromagnética, tipicamente luz ultravioleta (UV), para transferir um modelo para uma superfície, como o silício, coberto com uma fotoresina. O modelo é transferido para a superfície por exposição à radiação eletromagnética do material a ser curado. Frequentemente, luz ultravioleta (UV) é usada, embora ondas eletromagnéticas com comprimento de ondas curtas, como os raios-X, são também usados para se ter uma melhor definição (Weigl et al., 2003).

A utilização de litografia por incidência de raio-X chama-se LIGA, que é um acrônimo alemão derivado de litografia (*Litographie*), eletrodeposição (*Galvanoformung*), e moldagem (*Abformung*), sendo estes os passos do processo de produção do método. O processo surgiu em 1970 quando um número de processos de microfabricação foram desenvolvidos para a produção de microbocais curvados para a separação do isótopo do urânio no Centro de Pesquisa Nuclear em Karlsruhe. Neste contexto, um método foi proposto com um potencial particularmente elevado relativo a miniaturização, liberdade do projeto e produção em massa, que foi baseado na combinação de litografia, eletroformação e no processo de moldagem (Ehrfeld, 2003). As etapas de fabricação da tecnologia LIGA estão representadas na Figura 2.10.

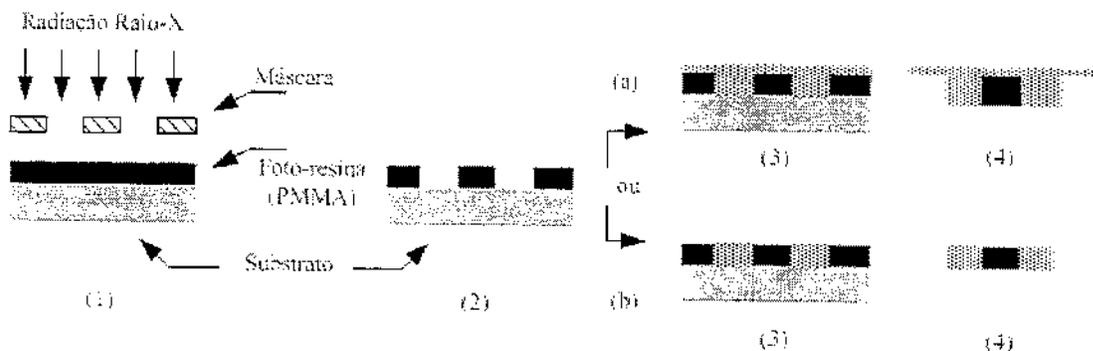


Figura 2.10: Etapas de fabricação da técnica LIGA

O processo apresentado na Figura 2.10 consiste em: (1) resina de polimetilmetacrilato (PMMA) exposto à radiação aplicado sobre o substrato, (2) molde em PMMA, (3) eletroformação, (4) moldagem.

Comparada com outras técnicas de microfabricação (microfabricação baseada em silício, microusinagem, tecnologias a laser), a técnica LIGA possui algumas vantagens (Hormes et al., 2003):

- Estruturas com razão de aspecto elevado (*aspect ratio* relação entre a altura de uma estrutura e a dimensão lateral mínima) podem ser fabricadas;
- Não há nenhum limite a respeito da forma bi-dimensional de um dispositivo;
- Uma grande variedade de materiais (polímeros, metais, cerâmica, etc) podem ser usados;
- Com sistemas avançados de varredura, estruturas tri-dimensionais podem ser fabricadas;

Como desvantagem a técnica LIGA é um processo muito caro, sendo que muitos dispositivos devem ser construídos para compensar a sua utilização. A Figura 2.11 mostra uma microengrenagem feita através da tecnologia LIGA (Ehrfeld, 2003).

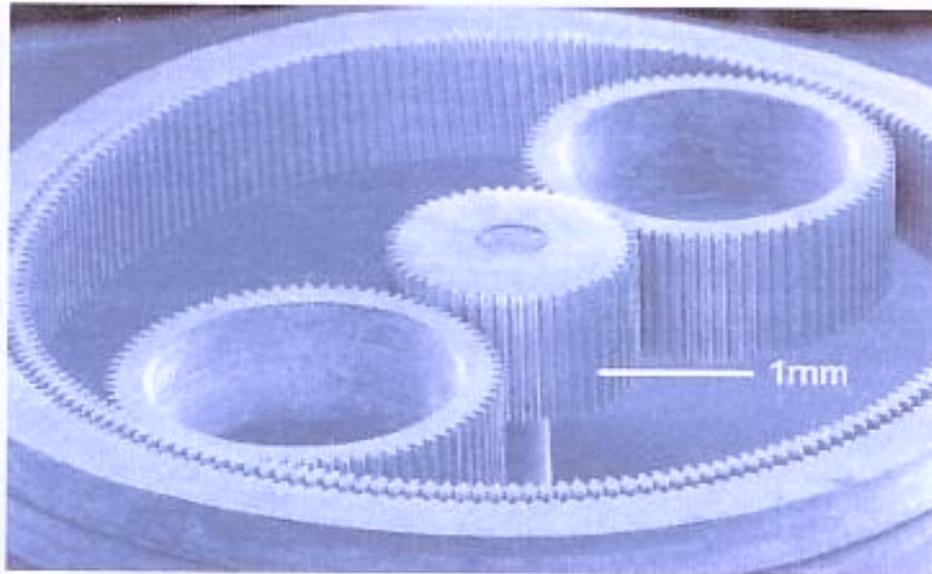


Figura 2.11: Microengrenagem construída utilizando-se LIGA

2.5.2 Litografia Macia

Um outro tipo de litografia bastante utilizado é a litografia macia, que é um método relativamente recente para a transferência de modelos. Na literatura, litografia macia refere-se a um conjunto de métodos para fabricação ou réplica de estruturas utilizando matriz de elastômero, moldes e fotomáscara. O nome litografia *macia* é devido ao uso de materiais elastoméricos (Rogers and Nuzzo, 2005). Ao contrário da litografia ótica convencional, ela utiliza um corpo de modelo polimérico para realizar a transferência física de modelos, como um selo de borracha usado para imprimir tinta sobre papel. O processo de cura do material polimérico é feito através do uso de radiação eletromagnética (UV). O molde é formado por moldagem do substrato sobre o molde mestre que contém o modelo do relevo desejado. O modelo mestre pode ser formado pelas técnicas convencionais de litografia ou por cauterização. As partes moldadas são tiradas do modelo mestre, e são então usados como dispositivos de impressão. Quando cobertos com um material para ser transferido (tipicamente um filme fino), então prensado na superfície desejada, a transferência do material modelo pode ser alcançada. A produção de modelos e moldes pode ser feita em poucos passos, possibilitando uma rápida

construção de protótipos para explorar novas idéias.

Esta técnica (litografia macia) possui características úteis para aplicações, porque possui baixo custo e modela grandes áreas e superfícies curvadas. Ela também é compatível com uma larga escala de materiais que não podem ser moldados com facilidade utilizando outro tipo de técnica (Senturia, 2001). Um exemplo de utilização da técnica é apresentado na Figura 2.12.

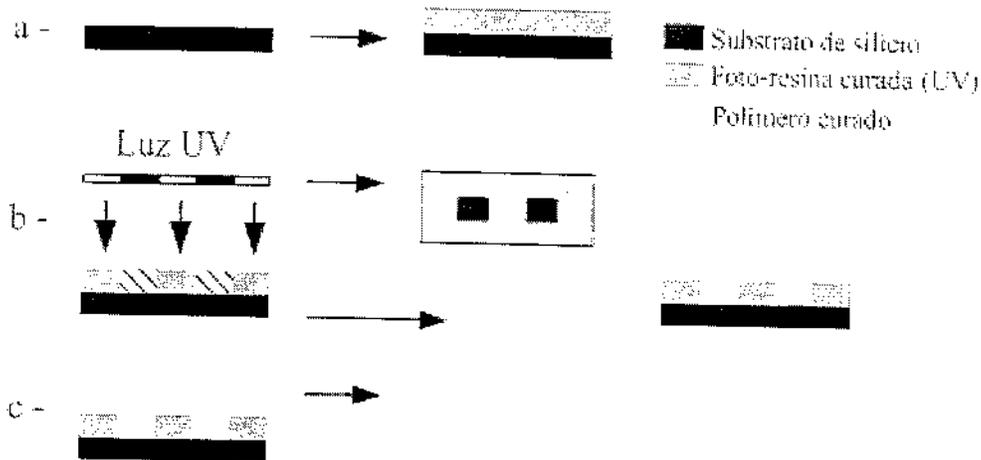


Figura 2.12: Etapas de fabricação da técnica litografia macia

As etapas da técnica litografia macia apresentada na Figura 2.12 são: em (a) substrato de silício para gerar camadas de fotoresina UV; (b) uso da máscara para selecionar seletivamente as seções da fotoresina e remoção das partes não curadas para criar o molde; (c) adição de polímero sobre o molde, curar, e remover do molde (Weigl et al., 2003). A Figura 2.13 apresenta uma estrutura feita através da tecnologia litografia macia (Keatch et al., 2002).

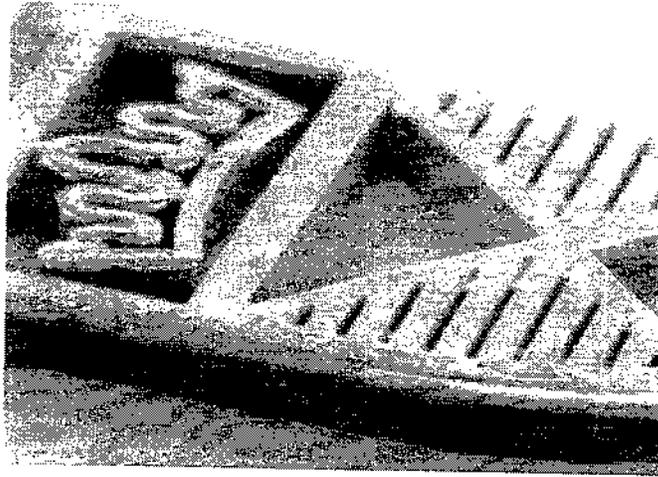


Figura 2.13: Estrutura construída utilizando-se litografia macia

A tecnologia de microfabricação utilizada para a construção da microbomba, proposta no trabalho, chama-se Litografia Profunda em polímeros flexográficos utilizando ultravioleta. A microfabricação com polímeros flexográficos foi desenvolvida e patenteada recentemente na Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. O trabalho que resultou no desenvolvimento da técnica está em processo de aceitação para publicação no *Journal of the Brazilian Chemical Society* (Fernandes and Ferreira, 2006). Detalhes sobre o processo são apresentados no Capítulo 4.

Capítulo 3

Modelagem por circuitos equivalentes

Este capítulo apresenta o método de analogia por circuitos elétricos equivalentes, mostrando os procedimentos a serem realizados para uma representação eficiente. Posteriormente é apresentado o modelo da microbomba a ser construído e, por fim, é feito o modelo da microbomba, apresentando-se os resultados obtidos.

3.1 Analogia elétrica-mecânica-fluídica

Para construir o circuito equivalente de um sistema alternativo, é necessária a subdivisão completa da estrutura do dispositivo em seus elementos constitutivos. Cada elemento é, então, descrito com base em analogias entre os parâmetros físicos do fenômeno dominante e parâmetros elétricos. Considerando os sistemas mecânicos translacionais tem-se as seguintes variáveis que descrevem o comportamento dinâmico do sistema:

- x , deslocamento em metros (m);
- v ou \dot{x} , velocidade em metros por segundo (m/s);
- a ou \ddot{x} , aceleração em metros por segundo ao quadrado (m/s^2);
- f , força em Newton (N);

Além dessas variáveis, para se representar o comportamento dinâmico dos sistemas mecânicos translacionais de forma mais consistente, é necessário acrescentar alguns elementos que combinados com as variáveis acima permitem representar com eficiência seu comportamento. Estes elementos são massa (m), amortecimento (α) e rigidez (k).

Considerando a massa, pode-se escrever utilizando a segunda lei de Newton a relação para a massa de um corpo quando submetida a uma força f

$$f = m\ddot{x} . \quad (3.1)$$

Forças que são proporcionais à velocidade entre dois pontos são descritas por elementos de atrito viscoso, conhecidos como amortecedores:

$$f = \alpha \Delta v . \quad (3.2)$$

E por fim, a mola que representa a rigidez do sistema, e que obedece a lei de Hook dada por

$$f = kx . \quad (3.3)$$

Combinando esses elementos, obtém-se a equação que governa os sistemas mecânicos, definida por

$$F = m \frac{dv}{dt} + \alpha v + k \int v dt , \quad (3.4)$$

onde F , m , α , k e v são respectivamente força, massa, coeficiente de atrito viscoso (amortecedor), rigidez e velocidade. A Figura 3.1 apresenta um sistema mecânico translacional formado por uma massa (M), um amortecedor (α) e uma mola (K), onde F é a força que está sendo aplicada na massa e x é o seu respectivo deslocamento.

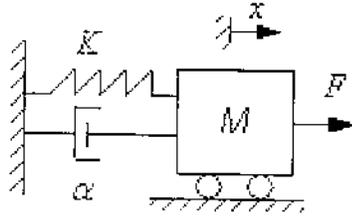


Figura 3.1: Representação de um sistema mecânico translacional

Considerando agora os sistemas elétricos, tem-se como elementos o resistor, o capacitor e o indutor. O resistor é um elemento para o qual existe uma relação entre a tensão (e) entre seus terminais e a corrente (i) através deles, e são descritos pela lei de Ohm, dada por

$$e = Ri . \quad (3.5)$$

onde R é a resistência em ohms (Ω).

O capacitor é um elemento que obedece à relação entre a tensão e a carga, onde a carga é a integral da corrente. Para um capacitor linear, a carga e a tensão são relacionados por

$$q = Ce , \quad (3.6)$$

onde C é a capacitância em Farads (F). Se a Equação 3.6 é diferenciada e substituindo \dot{q} por i , a equação pode ser reescrita da seguinte forma

$$i = C \frac{de}{dt} . \quad (3.7)$$

O indutor é um elemento para o qual existe uma relação algébrica entre a tensão entre seus terminais e a derivada da corrente. Para um indutor linear, pode-se escrever:

$$e = L \frac{di}{dt} , \quad (3.8)$$

onde L é a indutância em Henry (H). Combinando as Equações 3.8, 3.7 e 3.5, obtém-se o comportamento de um circuito RLC , dado por

$$e(t) = Ri(t) + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i(t) dt . \quad (3.9)$$

Na Figura 3.2. é apresentado um circuito RLC . onde i é a corrente e e é a tensão no circuito:

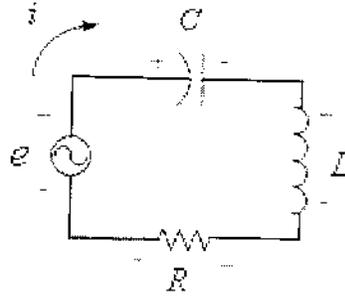


Figura 3.2: Representação de um circuito RLC

Definido os elementos elétricos, pode-se relacionar o comportamento de seus elementos com os elementos do sistema mecânico.

Em (Senturia, 2001), uma metodologia é apresentada para a modelagem de sistemas por divisões com elementos de circuitos. Esse método é baseado na troca de energia entre elementos e na relação das variáveis de força conjugadas, como apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Exemplos de variáveis de força conjugadas

Domínio da energia	Esforço	Fluxo	Momento	Deslocamento
Mecânico translacional	Força F	Velocidade \dot{x}, v	Momento p	Posição x
Mecânico rotacional	Torque τ	Velocidade angular ω	Momento angular J	Ângulo θ
Circuito elétrico	Tensão V, v, e	Corrente I, i	...	Carga Q
Circuito magnético	Força Magnetomotriz MMF	Taxa de fluxo $\dot{\phi}$...	Fluxo ϕ
Fluidos incompressíveis	Pressão P	Fluxo volumétrico Q	Momento de pressão Γ	Volume V
Térmico	Temperatura T	Taxa de fluxo de entropia \dot{S}	...	Entropia S

Considerando a Equação 3.4 e a Tabela 3.1, pode-se reescrever a Equação 3.4 da seguinte forma

$$P = (m/A^2) \frac{dq}{dt} + (\alpha/A^2)q + (k/A^2) \int q dt , \quad (3.10)$$

onde P , q são, respectivamente, pressão e vazão. Analisando esta equação tem-se uma equivalência com a equação que representa o comportamento de um circuito RLC (ver Equação 3.9). Considerando essa equivalência pode-se escrever a analogia elétrica-mecânica-fluídica, apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Analogia elétrica-mecânica-fluídica

Parâmetros mecânicos e fluídicos		Parâmetros elétricos equivalentes	
q	vazão	i	corrente
P	pressão	e	tensão
m/A^2	m (massa)	L	indutância
α/A^2	α (atrito viscoso)	R	resistência
k/A^2	k (rigidez)	C	capacitância

Dessa forma, representa-se um dispositivo fluídico complexo fazendo sua analogia por circuitos elétricos e aplicando a lei de Kirshhoff, trocando-se tensão por pressão e corrente por vazão. Por se tratar de analogia elétrica de um sistema microfluídico, há a necessidade de se calcular a resistência e a indutância fluídica e também a compliância do sistema (o que é apresentado abaixo). Feito isso, a analogia por circuitos elétricos está completa.

3.1.1 Elementos fluídicos

Para a definição dos elementos fluídicos (resistência, compliância e inertância fluídica), considera-se um fluxo em um tubo de área constante. As variáveis de interesse são: a pressão média do fluido (p) (N/m^2) e a vazão q (m^3/s). A velocidade média de fluxo v (m/s) é definida como q/A , onde A (m^2) é a área da seção transversal do tubo. Considerando um modelo de fluxo uni-dimensional, onde a pressão e a velocidade são uniformes sobre a área, pode-se fazer a análise dos parâmetros divididos, sendo o tubo dividido em segmentos como mostrado na Figura 3.3.

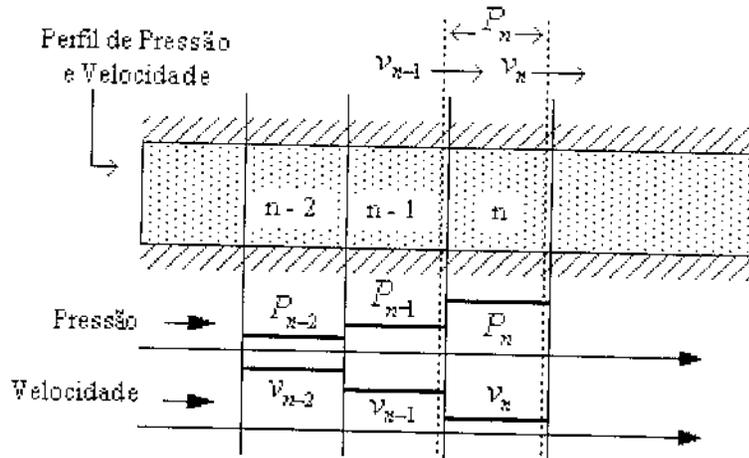


Figura 3.3: Representação do tubo dividido em segmentos

Considerando o comportamento de um segmento típico n , pode-se escrever as definições dos elementos fluidicos básicos (Doebelin, 1972). Desprezando-se os efeitos térmicos, e considerando apenas pequenas variações na densidade, as duas leis básicas da física que se faz uso na análise é a da conservação da massa e a lei de Newton. Além disso, necessita-se de dados da compressibilidade do fluido e do atrito. A compressibilidade do fluido é descrita por uma propriedade do fluido chamada de módulo de elasticidade volumétrico. O módulo de elasticidade volumétrico é medido experimentalmente por compressão de uma amostra de volume do fluido V e medindo a mudança de volume ΔV causada pela mudança de pressão ΔP , dado por

$$B \triangleq -\frac{\Delta P}{\Delta V/V}, \text{ em } Pa. \quad (3.11)$$

Com relação ao atrito do fluido, ele é considerado no comprimento de curso do fluido. Considerando um fluido sendo forçado através de um tubo (Figura 3.4), espera-se intuitivamente que para grandes vazões, deve-se ter grande queda de pressão, sendo que este comportamento é o observado. Em geral, a relação entre queda de pressão e vazão é não linear, no entanto, algumas situações apresentam efeito quase linear, e considera-se o atrito de fluido ou um elemento de resistência fluidica linear, representado na Equação (3.12).

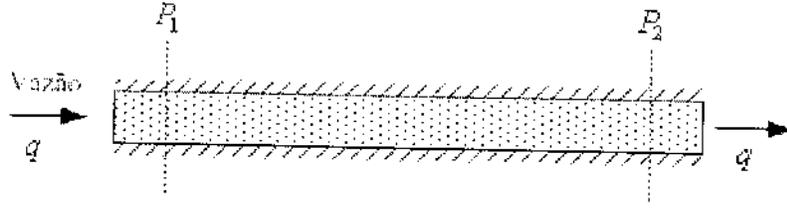


Figura 3.4: Representação do modelo da resistência

$$R_f \triangleq \frac{p_1 - p_2}{q}, \text{ em } Ns/m^5. \quad (3.12)$$

Retornando-se para a Figura 3.3, seja considerada a conservação da massa aplicada no segmento n sobre um intervalo de tempo infinitesimal Δt . A massa entra no segmento da esquerda com uma vazão $Av_{n-1}\rho$ e sai pela direita com vazão $Av_n\rho$, onde ρ é a densidade do fluido, assumida constante. Se o fluido é incompressível, estas duas vazões de massa deverão ser iguais, e assim v_n também será igual a v_{n-1} . No entanto, fluidos reais (até mesmo líquidos) são compressíveis, assim em geral a diferença entre a massa de entrada e a massa de saída mostra um armazenamento de massa. Sendo a massa e o volume relacionados através da densidade $\rho \triangleq m/V$, e o volume relacionado com a pressão através do módulo de elasticidade volumétrico, pode-se escrever:

$$(Av_{n-1}\rho - Av_n\rho) dt = dm = \rho dV = \rho \frac{V}{B} dp_n = \frac{\rho Al}{B} dp_n \quad (3.13)$$

$$(q_{n-1} - q_n) dt = \frac{Al}{B} dp_n \quad (3.14)$$

$$p_n = \frac{1}{C_f} \int (q_{n-1} - q_n) dt \quad (3.15)$$

$$C_f \triangleq \frac{Al}{B}, (\text{compliância fluídica em } m^5/N). \quad (3.16)$$

Considerando-se a vazão $(q_{n-1} - q_n)$ como análogo à corrente elétrica, e a pressão p_n como análogo a queda de tensão na Equação 3.15, obtém-se a analogia elétrica da capacitância.

Aplicando a lei de Newton para o segmento n , tem-se:

$$Ap_{n-1} - Ap_n - R_f A q_n = \rho A l \frac{dv_n}{dt} = \rho l \frac{dq_n}{dt} \quad (3.17)$$

$$(p_{n-1} - p_n) - R_f q_n = \frac{\rho l}{A} \frac{dq_n}{dt} . \quad (3.18)$$

Contendo a Equação 3.18 os dois efeitos, resistência (atrito) e inércia (massa), desconsidera-se um efeito de cada vez. Se a densidade do fluido é igual a zero (sem massa), tem-se:

$$(p_{n-1} - p_n) = R_f q_n . \quad (3.19)$$

Agora considerando a resistência (atrito) igual a zero, tem-se:

$$(p_{n-1} - p_n) = \frac{\rho l}{A} \frac{dq_n}{dt} = I_f \frac{dq_n}{dt} \quad (3.20)$$

$$I_f \triangleq \frac{\rho l}{A} = \text{Inércia fluídica (Kg/m}^4\text{)}. \quad (3.21)$$

Fazendo $(p_{n-1} - p_n)$ análogo a queda de tensão, e q_n como a corrente, novamente observa-se a analogia elétrica da resistência e da indutância.

As equações apresentadas acima estão em sua forma mais geral, tendo ainda a possibilidade de serem mais trabalhadas para ficarem mais fáceis de serem resolvidas. Em (Kovacs, 1998) as equações encontram-se mais detalhadas. A resistência fluídica como apresentada na Equação 3.12 está relacionada com a vazão (q). A vazão varia com o formato do tubo que se deseja saber a resistência fluídica. Sendo assim, a Figura 3.5 apresenta as equações para a resistência fluídica para diversos formatos de tubulação (Doebelin, 1972).

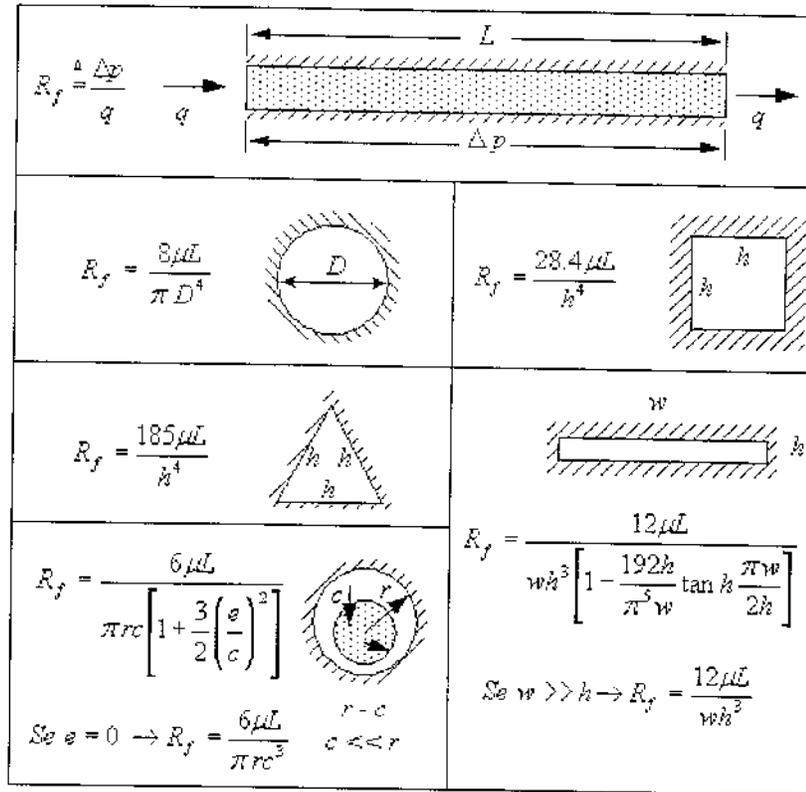


Figura 3.5: Resistências para fluxo laminar em diferentes tipos de tubulação. L representa o comprimento do tubo e μ a viscosidade do fluido que opera no sistema.

A equação da compliância (capacitância fluídica. Equação 3.16), que está relacionada com a rigidez da membrana, também pode ser mais trabalhada de maneira que suas variáveis e constantes fiquem mais fáceis de se calcular. A compliância para uma membrana quadrada é dada por

$$C = \frac{6W^6(1 - \nu^2)}{\pi^4 E h^3} \quad (3.22)$$

onde W é a largura da membrana (em metros). E é o módulo de Young da membrana (em N/m^2), h é a espessura da membrana (em metros) e ν é a relação de Poisson (adimensional)

Para uma membrana circular de raio r_m (em metros), a compliância é dada por

$$C = \frac{\pi r_m^6(1 - \nu^2)}{16 E h^3} \quad (3.23)$$

Considerando finalmente a indutância fluídica, a Equação 3.21, já está em sua forma mais usual.

3.2 Modelagem da microbomba

Antes de se fazer a modelagem da microbomba, logicamente há necessidade de se saber qual estrutura a microbomba terá e também conhecer toda a sua geometria. Só assim pode-se estimar um modelo confiável e que representa de maneira aceitável o comportamento da microbomba.

3.2.1 Especificação da microbomba a ser projetada

Para a construção da microbomba, diversos modelos foram estudados. Com base nesses estudos, ficou claro que as microbombas com diafragma oscilante e sem válvulas são as mais produzidas atualmente. De fato, como já mencionado anteriormente, o modelo de válvula formado pelos elementos bocal/difusor proposto por (Stemme and Stemme, 1993) tornou o processo de fabricação mais simples. Considerando-se também o princípio de bombeamento, o modelo com diafragma oscilante permite uma grande variedade de tipos de atuação (pneumático, piezelétrico, eletromagnético, etc). Sendo assim, o projeto de uma microbomba de diafragma com atuação pneumática e sem válvulas foi desenvolvido. Para a elaboração do projeto também foi levado em consideração a instrumentação do laboratório de microfabricação, tendo muitas vezes a necessidade de se fazer algumas adaptações para se alcançar determinados objetivos. Limitações também foram encontradas devido à técnica utilizada para fabricação da microbomba.

3.2.2 Especificações técnicas

Uma microbomba convencional é formada basicamente pela câmara de bombeamento e as válvulas, com os tubos que fazem o transporte do fluido ligados nas válvulas. No caso do projeto desenvolvido, foram colocadas na saída do bocal/difusor duas câmaras, uma de

entrada e outra de saída. A Figura 3.6 apresenta uma vista de cima da base da microbomba, onde q representa o sentido do fluxo.

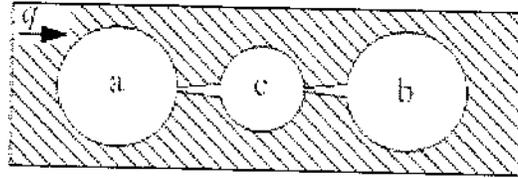


Figura 3.6: Vista de cima das câmaras de entrada (a) e saída (b), da câmara de bombeamento (c) e do bocal/difusor.

A Figura 3.6 não está com as dimensões reais, sendo a e b as câmaras de entrada e saída respectivamente, possuindo ambos 14.14 mm de diâmetro; c , é a câmara de bombeamento possuindo 10 mm de diâmetro. Os difusores fazem a ligação entre as câmaras de entrada e saída a e b com a câmara de bombeamento c . As câmaras de entrada e saída foram projetadas para possuírem um volume duas vezes maior que o da câmara de bombeamento.

Para os difusores, como já apresentado no Capítulo 2, sua geometria é que caracteriza a direção do fluxo, o que torna sua definição extremamente importante. Considerando que diversas microbombas sem válvulas já foram desenvolvidas, o modelo de geometria utilizado nos trabalhos de (Yamahata et al., 2005) e (Khoo and Liu, 2000) foi escolhido para a utilização na microbomba, uma vez que são trabalhos recentes e ambos utilizam a mesma geometria para o difusor, e portanto suas características de desempenho já são conhecidas. A Figura 3.7 apresenta o modelo de difusor utilizado.



Figura 3.7: Representação do difusor utilizado na microbomba. $R_1=100 \mu m$; $R_2=500 \mu m$; $L=2.3 \text{ mm}$. A curvatura da entrada menor do difusor é de $100 \mu m$.

A altura do difusor da Figura 3.7 foi definida como 1.6 mm. Este foi o único parâmetro alterado com relação aos trabalhos originais, sendo a altura do difusor definida originalmente como 0.4 mm. Este parâmetro foi alterado devido a limitações do processo de microfabricação utilizado, porque a colagem entre as camadas é feita com a própria resina, sendo assim na hora de prensar as duas camadas que irão ser coladas, a resina pode se espalhar entupindo os canais. Com canais mais altos, isto pode ser evitado. No Capítulo 4 uma ênfase maior será dada a esta questão.

A eficiência do difusor utilizado é (Equação 2.9, Capítulo 2):

$$\eta = \frac{\xi_n}{\xi_d} = \frac{K_{n,1} + (K_{n,2} + K_{n,3})(A_1/A_3)^2}{K_{d,1} + K_{d,2} + K_{d,3}(A_1/A_3)^2} = 4.2517,$$

que pode ser considerada adequada por estar entre um e cinco, conforme já mencionado. Além disso, o difusor está projetado na região, no mapa de estabilidade, em que há a menor perda de pressão (Figura 2.8, Capítulo 2). Na Figura 3.8 é apresentada uma vista de corte da microbomba desenvolvida.

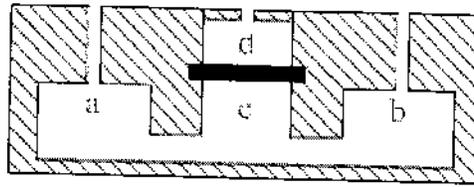


Figura 3.8: Vista de corte da microbomba. *a* e *b* são as câmaras de entrada e saída respectivamente; *c* é a câmara de bombeamento e *d* é a câmara da membrana onde será aplicada a variação de pressão.

3.2.3 Representação por circuitos elétricos

Conhecendo-se as características físicas e o princípio de atuação (pneumática) da microbomba, tem-se condições de fazer uma representação da dinâmica da microbomba. Como já mencionado anteriormente, para se fazer a analogia por circuitos elétricos de um determinado sistema, deve-se dividi-lo em partes. Considerando as características da microbomba apresentada acima, um modelo simplificado para representá-la foi projetado. Esse modelo é mostrado na Figura 3.9.

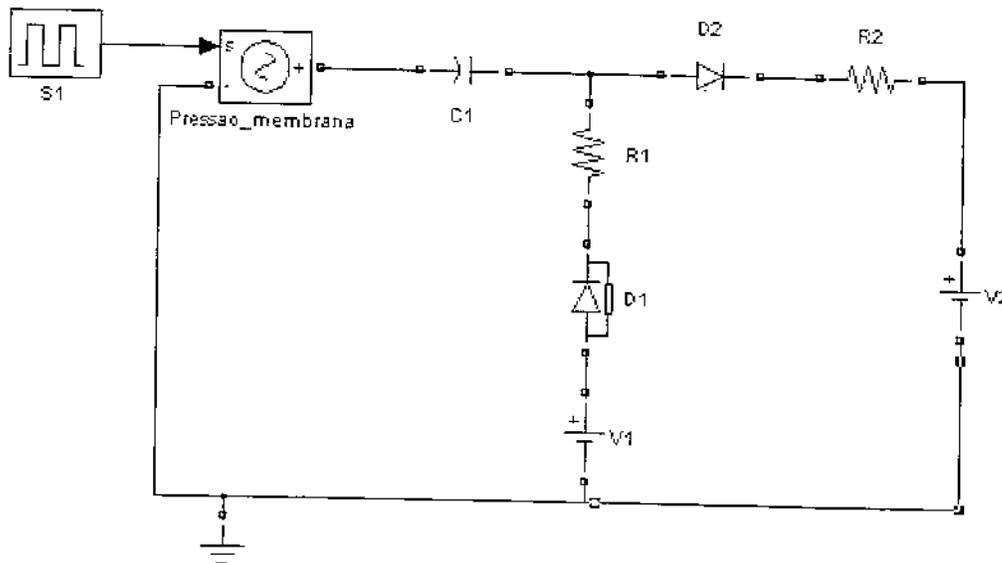


Figura 3.9: Representação por circuitos elétricos das características da microbomba

Considerando o circuito apresentado na Figura 3.9, ele é constituído por:

- Um gerador de pulso ($S1$), que representa a atuação pneumática que gera a pressão que é aplicada na membrana;
- Um capacitor ($C1$) que representa a rigidez da membrana;
- Dois resistores ($R1$ e $R2$) que representam os tubos que fazem a ligação dos reservatórios com as câmaras de entrada e saída da microbomba;
- Dois diodos ($D1$ e $D2$) que têm o objetivo de representar o bocal/difusor;
- E duas fontes de tensão de corrente contínua ($V1$ e $V2$) que representam a coluna de líquido de entrada do reservatório e a perda de carga do sistema.

Portanto com a união desses elementos no circuito elétrico, tem-se o comportamento da microbomba.

Antes de se fazer a simulação do circuito há necessidade de se calcular os valores das resistência e da compliância fluídica. As características da microbomba que será construída são apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Características da microbomba

Características da microbomba		
Membrana de Latex	Coeficiente de Poisson (ν)	0.5
	Módulo de Young (E)	10 (MPa)
	Raio da membrana (r_m)	0.005 (m)
	Espessura da membrana (h)	0.00005 (m)
Tubo	Comprimento (L)	0.125 (m)
	Raio (r)	0.001 (m)
Fluido	Viscosidade da água (μ)	1.00210-3 (Pa s)

Utilizando os parâmetros da microbomba apresentados na Tabela 3.3, tem-se condições de calcular os parâmetros fluídicos (resistência e compliância).

Da Figura 3.5 (tubo com seção transversal circular) tem-se o valor para a resistência fluidica, dada por

$$R_f = \frac{8\mu L}{\pi r^4} = 3.1895 * 10^8 \text{ (Ns/m}^5\text{)}.$$

E da Equação 3.23 tem-se a compliância fluidica para uma membrana circular, dada por

$$C = \frac{\pi(r_m)^6(1 - \nu^2)}{16Eh^3} = 1.8408 * 10^{-9} \text{ (m}^5\text{/N)}.$$

A simulação numérica do modelo, foi feita nas seguintes condições:

- As pressões de entrada na membrana foram: 0.111 e 0.121 MPa. Estas pressões são a menor e a maior pressão que se pode aplicar à membrana no modelo experimental. E a frequência de atuação foi de 2 Hz.
- A tensão em $V1$ (Figura 3.9) foi de 600 V, que representa a altura da coluna de líquido no reservatório de entrada, que foi de 6 cm e para cada centímetro de coluna d'água equivale a 100 Pa de pressão.
- A tensão em $V2$ (Figura 3.9) foi de 100 V, que representa a altura de 1cm de coluna d'água, equivalente a perda de carga do sistema, que é onde está posicionado o cano de saída.

Essas condições na simulação experimental, é o teste 1 na frequência de 2 Hz (Tabela 4.2, Capítulo 4). As Figuras 3.10 e 3.11 apresentam os resultado obtidos com a simulação numérica do modelo.

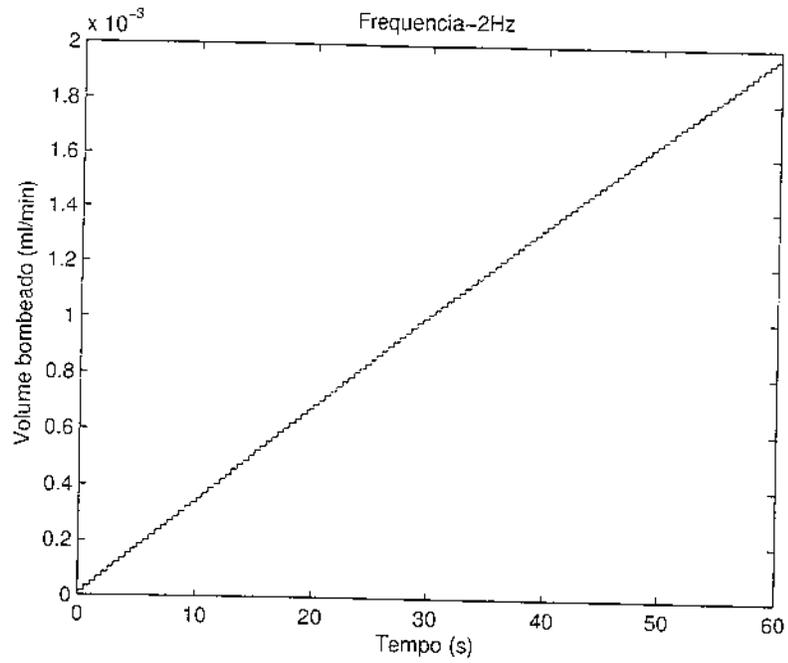


Figura 3.10: Volume armazenado no reservatório de saída, pressão 0.111 MPa (simulação numérica)

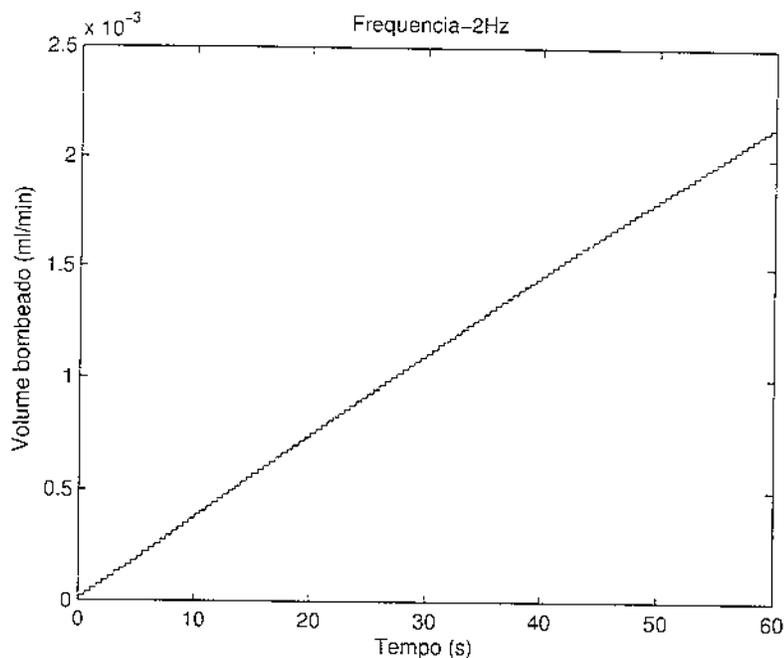


Figura 3.11: Volume armazenado no reservatório de saída, pressão 0.121 MPa (simulação numérica)

Para a simulação da Figura 3.10 a uma pressão de 0.111 MPa, o resultado obtido com o modelo foi um volume bombeado de 1.94 ml/min. Para a Figura 3.11 o volume bombeado foi de 2.1 ml/min. Comparando-se os resultados numéricos obtidos com os obtidos no modelo experimental (Tabela 4.2, Capítulo 4), observa-se uma pequena diferença nos volumes encontrados, sendo que no modelo experimental com a pressão de 0.111 MPa foi medido um volume bombeado de 1.99 ml/min e no modelo numérico 1.94 ml/min. Com a pressão de 0.121 MPa o volume bombeado medido no modelo experimental foi de 2.48 ml/min e no modelo numérico foi de 2.10 ml/min. Portanto, tem-se a necessidade de se melhorar o modelo numérico, para que os volumes bombeados em diferentes pressões sejam melhor estimados.

Capítulo 4

Construção da microbomba

Este capítulo apresenta a construção da microbomba, explicando o processo de fabricação utilizado e as etapas que foram desenvolvidas. Em seguida, é explicado o processo de teste realizado para se caracterizar o desempenho dos parâmetros da microbomba e posteriormente são mostrados os resultados obtidos.

4.1 Processo de construção

Como já mencionado anteriormente, a tecnologia utilizada para a construção da microbomba foi a litografia profunda em polímeros flexográficos utilizando ultravioleta. O polímero elastomérico utilizado na fabricação foi o poliuretano-acrilato (marca FlexLight M050 (densidade 1.030 e viscosidade 1.984 cps)), que é uma fotoresina negativa. Sendo assim, onde incidir a radiação UV, a fotoresina irá curar. Portanto, para se obter um padrão desejado na superfície, coloca-se uma máscara (seleciona as partes que devem ser curadas ou não) sobre a fotoresina. A máscara utilizada no processo foi um filme transparente. A impressão, com a geometria desejada, foi realizada na máscara com impressora a laser, que posteriormente é colocada sobre a superfície (fotoresina) a ser moldada. A Figura 4.1 apresenta um exemplo de uma máscara. No caso desse exemplo a camada final apresentará os quatro furos, apresentados na cor negra.

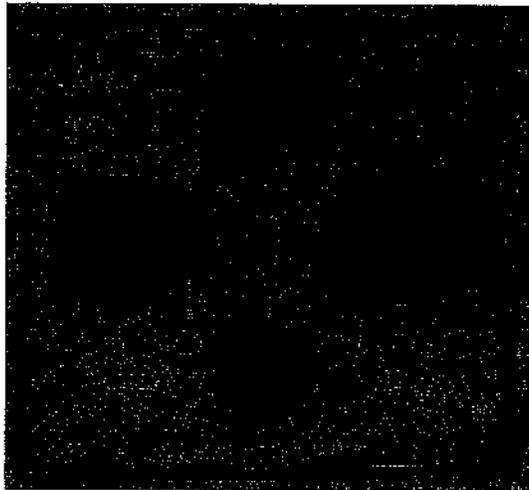


Figura 4.1: Exemplo de uma máscara

Para a construção de um elemento por microfabricação é necessário dividir o microdispositivo desejado em camadas, ou seja, a tridimensionalidade é obtida pela união de várias camadas. Considerando a microbomba projetada, ela foi dividida em seis camadas, como apresentado na Figura 4.2.

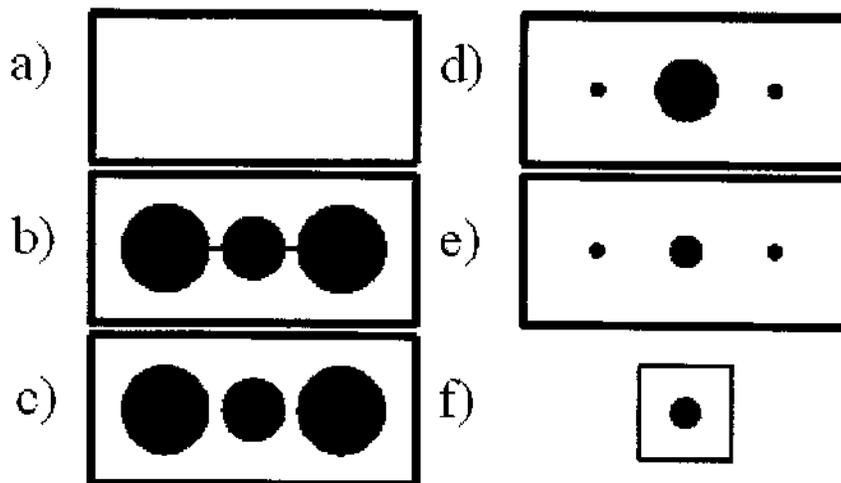


Figura 4.2: Camadas que constituem a microbomba.

Na Figura 4.2, a camada (a) é o substrato onde será instalada a microbomba; (b) é onde

são construídas as câmaras de entrada e saída, a câmara de bombeamento e o bocal/difusor; (c) é onde são definidas as alturas das câmaras de entrada e saída e da câmara de bombeamento e onde a membrana de latex é fixada; (d) é onde é construída a câmara superior da membrana, (e) é a tampa da microbomba onde são anexados os tubos; por fim a camada (f) representa um encaixe para a entrada do tubo que irá gerar a variação de pressão na câmara da membrana. Sendo assim, a microbomba é a união dessas seis camadas.

4.1.1 Etapas do processo de fabricação

Como mencionado anteriormente, a construção de microdispositivos utilizando-se a litografia profunda é dividida em camadas. A construção de cada camada é feita da seguinte forma:

- define-se a máscara que irá transferir o modelo para a superfície;
- coloca-se a fotoresina na base com os espaçadores (define a espessura da camada) e depois coloca-se a máscara sobre a fotoresina;
- coloca-se para curar (exposição à radiação UV).

O resultado do processo de cura é que as partes da fotoresina que foram expostas à radiação irão se solidificar, enquanto que nas partes onde a radiação não incidiu ela continuou líquida, sendo facilmente removida com água. Como resultado tem-se a camada moldada de acordo com a máscara. No caso do laboratório onde é feita a microfabricação, os materiais utilizados na construção das camadas que formarão a microbomba estão na Figura 4.3.

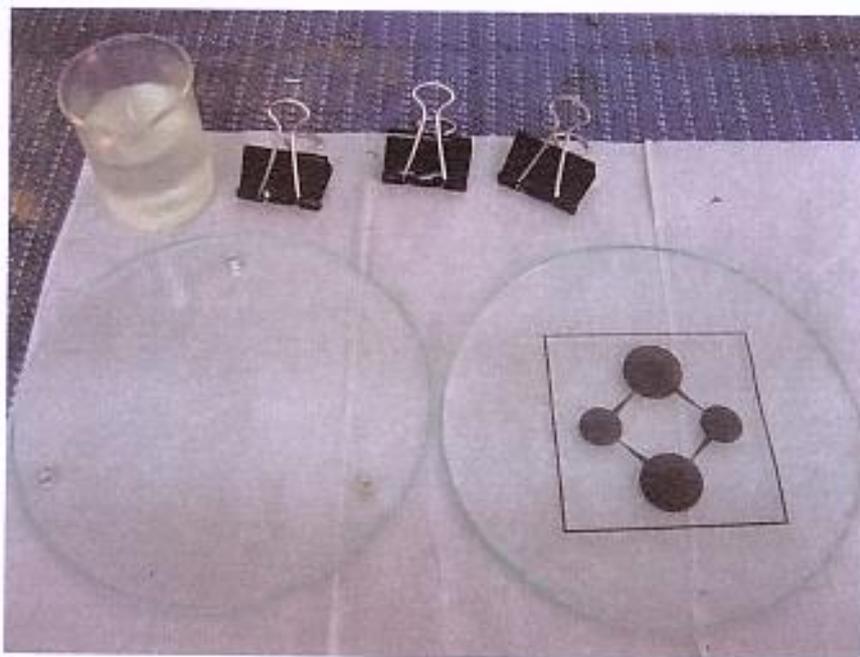


Figura 4.3: Materiais utilizados na fabricação

A Figura 4.3 apresenta duas peças de vidro que servem uma como a base para se colocar a fotoresina e a outra para se anexar a máscara; os parafusos (vistos na peça de vidro à esquerda) são os separadores que definirão a espessura da camada; no recipiente de vidro está a fotoresina e ao lado estão os grampos utilizados para anexar a fotoresina à máscara.

O tempo de cura, para uma camada simples é de sete minutos. A colagem entre duas camadas é feita com a própria fotoresina, como já mencionado, e seu tempo de cura é de duas horas. Esta técnica (colar as camadas utilizando a própria fotoresina) ainda estava em teste, e não se tinha certeza de sua eficiência. Sendo assim, vários intervalos de tempo de exposição à radiação foram testados, chegando a um tempo aproximado como já mencionado acima, de duas horas. Com o tempo adequado, não ocorreram problemas com vazamento de fluido entre as camadas. A Figura 4.4 apresenta a câmara usada para a emissão de radiação UV.

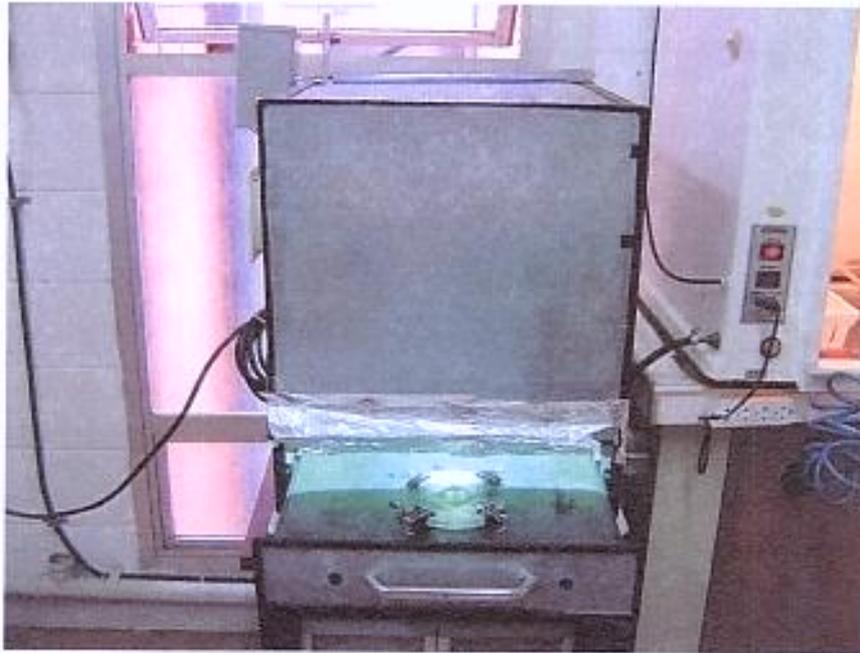


Figura 4.4: Câmara de curagem

A câmara de emissão de radiação apresentada na Figura 4.4 possui uma lâmpada a vapor de mercúrio (marca OSRAM modelo HQA 400W, comprimento de onda 350-430 nm) como fonte de luz. A distância da lâmpada à base da câmara (onde coloca-se a fotoresina) é de 50 cm.

4.2 Protótipo final

Baseado no processo de fabricação apresentado acima, a microbomba foi construída. Fotografias apresentando as camadas produzidas para um protótipo são apresentadas nas figuras a seguir.



Figura 4.5: Base da microbomba (1.6 mm de espessura)



Figura 4.6: Bocal/Difusor e suas alturas (3.2 mm de espessura)

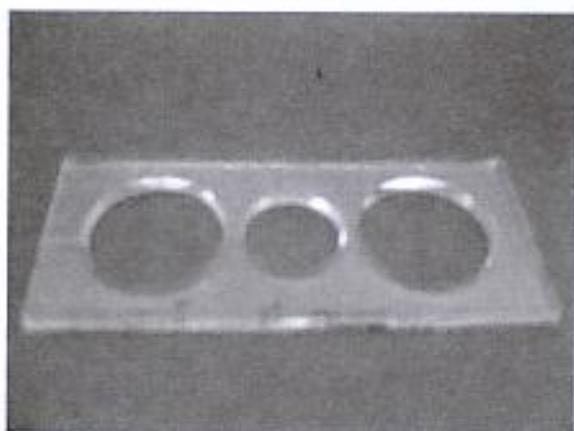


Figura 4.7: Definição de altura (1.6 mm de espessura)

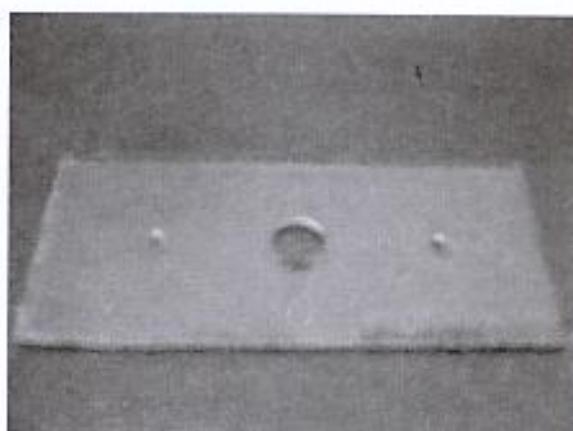


Figura 4.8: Tampa da microbomba (1.6 mm de espessura)

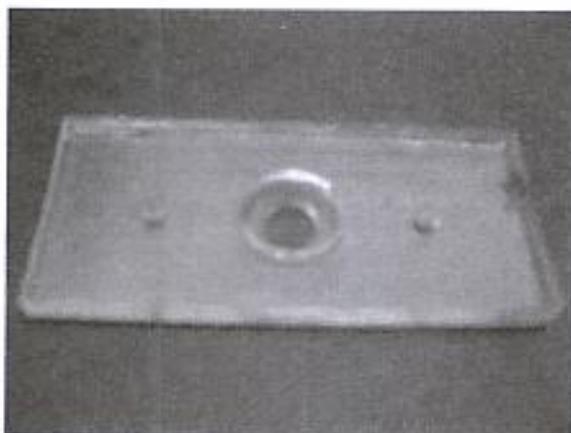


Figura 4.9: Câmara da membrana (3.2 mm de espessura)

A Figura 4.5 apresenta a base da microbomba onde serão colados posteriormente o bocal/difusor. O bocal/difusor é apresentado na Figura 4.6. Para fabricar a altura desses elementos, a camada apresentada na Figura 4.7 é colocada sobre o conjunto formado pela base e pelo bocal/difusor. Para se fazer a câmara da membrana, primeiro é feita a tampa da microbomba Figura 4.8, posteriormente é feita a câmara da membrana sob a tampa da microbomba Figura 4.9.

No processo de fabricação das camadas é interessante fazer o máximo possível de camadas uma sobre a outra, assim automaticamente elas já estão coladas no fim da exposição à radiação. Apenas quando o desenho da nova camada não permite é que se deve fazer as camadas separadas. No atual processo de fabricação, apenas as camadas das Figuras 4.6 e 4.9 foram feitas uma sobre a outra.

Com essas camadas definidas, cola-se a membrana de latex sobre o orifício central da Figura 4.6 e posteriormente, cola-se sobre esta a camada representada na Figura 4.9. O tempo de exposição à radiação entre camadas é que foi determinado experimentalmente em aproximadamente duas horas. Como resultado final, observa-se a microbomba apresentada na Figura 4.10.



Figura 4.10: Microbomba construída

As dimensões externas do material que contém a microbomba foram definidas em 52 mm de comprimento, 23 mm de largura e 8.2 mm de altura.

4.3 Dificuldades no processo de microfabricação

O processo de microfabricação por litografia profunda em polímeros flexográficos mostrou-se um bom método para a construção de microbombas, sendo de fácil manipulação e eficiente na construção de camadas. Porém, sua utilização para a construção de camadas com dimensões maiores exige aperfeiçoamento, uma vez que muitas bolhas se formam durante a parte de anexação da máscara à fotoresina, o que distorce o modelo final da camada.

O processo de colagem de uma camada a outra é crítico. Mesmo determinado o tempo de exposição, alguns cuidados extras foram necessários. Para evitar o entupimento dos canais no par bocal/difusor, pequenos tubos foram encaixados ao se anexar as duas camadas. Isso garantiu que a fotoresina não escorresse para dentro dos canais.

4.4 Teste da microbomba

Com a microbomba construída, podem-se determinar os seus parâmetros de desempenho descritos pela relação entre a pressão diferencial e a vazão. A próxima seção descreve a maneira como a atuação pneumática foi implementada.

4.4.1 Variação da pressão aplicada

Foi utilizado um cilindro pneumático como elemento base de atuação. Para se conseguir o controle da pressão aplicada na membrana, o cilindro foi acoplado a uma seringa, como apresentado na Figura 4.11.



Figura 4.11: Seringa acoplada ao eixo do cilindro

Para o acionamento do cilindro foi usado o controlador lógico programável (CLP) modelo ZAP500, produzido pela empresa HI Tecnologia. Na Figura 4.12 é apresentado o diagrama

de contatos conhecido como diagrama *Ladder* desenvolvido para o controle de deslocamento do eixo do cilindro.

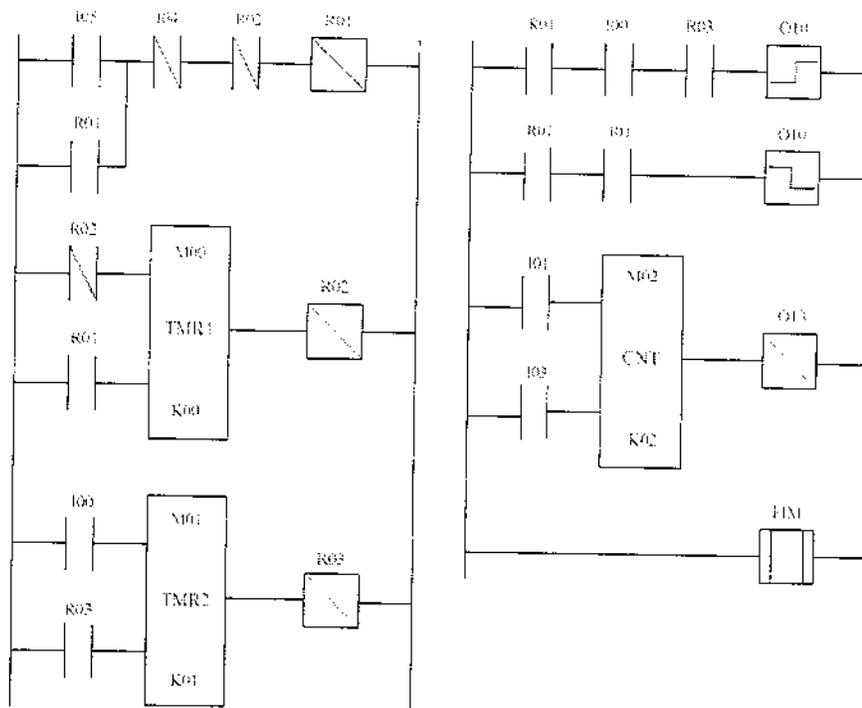


Figura 4.12: Programa *Ladder* desenvolvido para o controle do cilindro

Para o controle do deslocamento do eixo do cilindro (Figura 4.12) foi usado um sensor (I01) fim de curso. Quando o sensor é ativado, o cilindro volta para a sua posição inicial (sensor I00). Além dos sensores, o diagrama de contatos possui um temporizador (TMR1) que define o tempo total de execução das repetições do cilindro. Para definir o intervalo de repetição entre os acionamentos do cilindro, foi utilizado outro temporizador (TMR2). E com o objetivo de verificar se o cilindro está se deslocando como esperado, foi colocado o contador CNT, para contar o número de vezes que o sensor fim de curso é ativado.

Os contatos do programa apresentado na Figura 4.12 são:

- I05 chave que liga o sistema;
- I04 chave de desliga;

- R01 é a bobina que controla o liga e desliga do sistema;
- K00 é a variável onde se configura o tempo e M00 é a memória do temporizador TMR1;
- R02 é a bobina de saída do temporizador TMR1, que é ativada após o fim da temporização;
- K01 é a variável onde se configura o tempo e M01 é a memória do temporizador TMR2;
- R03 é a bobina de saída do temporizador TMR2, que é ativada após o fim da temporização;
- O10 é a bobina que dispara o cilindro;
- I03 chave que habilita o contador CNT;
- K02 é onde se configura o valor a ser contado e M02 é a memória do contador CNT;
- O13 é a bobina de saída do contador que é ativada após o fim da contagem.

Portanto, o programa funciona na seguinte seqüência: quando I05 é acionado, é habilitado a bobina R01 que dispara o temporizador de tempo de execução do sistema (TMR1), que por sua vez habilita o temporizador de intervalo entre acionamentos do cilindro (TMR2). Quando TMR2 é habilitado, ele dispara o cilindro (bobina O10). Quando o sensor I01 é ativado a saída O10 é desligada, fazendo com que o cilindro volte a sua posição inicial. Esse ciclo só pára quando o tempo de execução terminar (bobina R02 é desligada) ou quando a chave I04 também é desligada.

A Figura 4.13 apresenta o sistema de variação da pressão a ser aplicada à membrana, obtendo-se assim a sua deformação. É apresentado na Figura 4.13 o CLP ligado a uma válvula direcionadora de fluxo que por sua vez está ligada ao cilindro de ar. Então, uma vez disparado o êmbolo do cilindro, ele irá se deslocar até o sensor fim de curso e depois será desligado, voltando a sua posição inicial. Através da variação do volume de ar na seringa 1, obtém-se uma variação de pressão, a qual é aplicada na câmara superior da membrana.

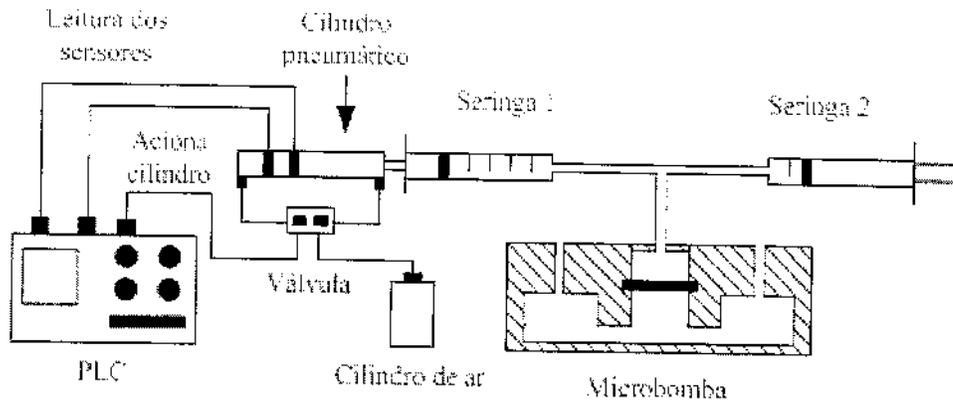


Figura 4.13: Princípio de atuação da microbomba.

Para se determinar a pressão que a membrana exerce sobre o fluido, configuração da Figura 4.13, utiliza-se a lei dos gases ideais. Sendo o processo uma transformação isotérmica e não considerando a variação de volume devido a expansão da membrana, tem-se para a pressão a ela aplicada:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2, \quad (4.1)$$

onde P_1 é a pressão atmosférica (pressão sem atuação), P_2 a pressão que é aplicada à membrana, V_1 o volume inicial do sistema e V_2 o volume do sistema após o deslocamento do eixo do cilindro. V_1 e V_2 são definidos pelas seguintes equações:

$$V_1 = V_{s1} + V_{s2} + V_l \quad (4.2)$$

$$V_2 = V_{s12} + V_{s2} + V_l, \quad (4.3)$$

onde V_{s1} é o volume da seringa 1, V_{s12} é o volume da seringa 1 após a atuação, V_{s2} volume da seringa 2 e V_l é o volume da tubulação entre as seringas e a membrana. Substituindo as Equações 4.2 e 4.3 em 4.1 tem-se para P_2 :

$$P_2 = \frac{V_1}{V_2} P_1 = \frac{V_{s1} + V_{s2} + V_c}{V_{s12} + V_{s2} + V_c} P_1 \quad (4.4)$$

Fazendo $\alpha = V_1/V_2$,

$$P_2 = \alpha P_1 \quad (4.5)$$

Portanto, a relação entre a pressão inicial do sistema (P_1) e a pressão aplicada à membrana (P_2) fica em função de α . Para atuação a uma determinada pressão na membrana, ajusta-se o valor do α através da posição do êmbolo da seringa 2 e, portanto, de seu volume. A Figura 4.14 apresenta a relação entre a variação do volume da seringa 2 e o α .

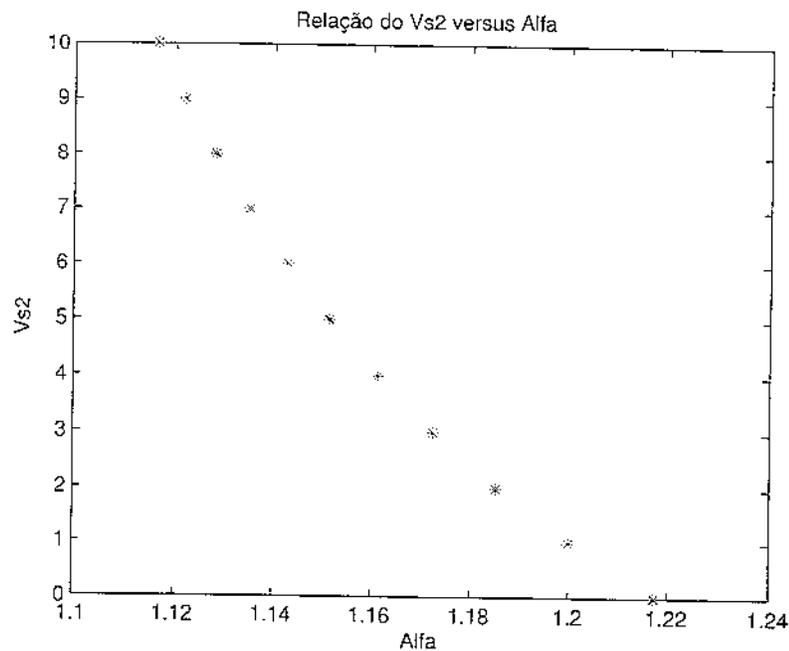


Figura 4.14: Relação entre o volume da seringa 2 e o α

Percebe-se pela Figura 4.14 que quanto maior o volume da seringa 2, menor será o α . Portanto, tem-se condições de ajustar o volume da seringa 2 para um determinado valor de α .

Para se caracterizar o desempenho da microbomba, a configuração de teste apresentada na Figura 4.15 foi adotada:

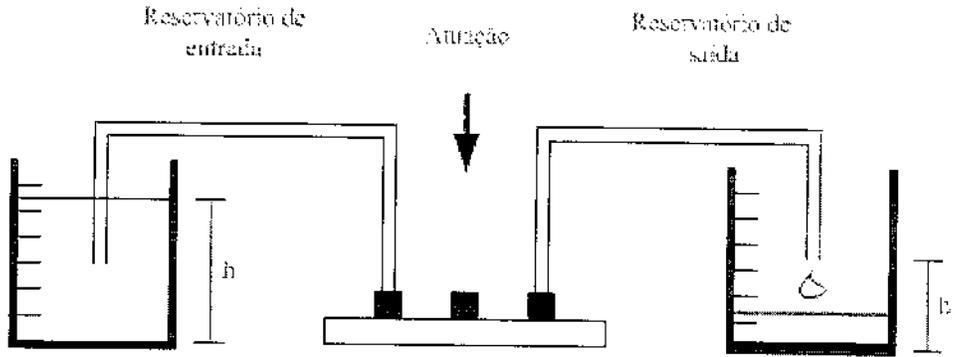


Figura 4.15: Configuração de teste para a caracterização do fluxo da microbomba. h_1 é a altura da coluna de líquido do reservatório de entrada e h_2 é a altura do tubo de saída.

Conhecendo-se h_1 a pressão de entrada no sistema é dada por:

$$P_e = P_a + P_{cl} , \quad (4.6)$$

onde P_a é a pressão atmosférica e P_{cl} é a pressão da coluna de líquido, dada por $P_{cl} = \rho gh_1$. A pressão que atua em h_2 é a pressão atmosférica, porque o tubo não está submerso. Portanto, a pressão de entrada da bomba depende apenas da altura da coluna de líquido do reservatório de entrada (P_{cl}).

As Figuras 4.16 e 4.17 apresentam a bancada de teste construída fisicamente.

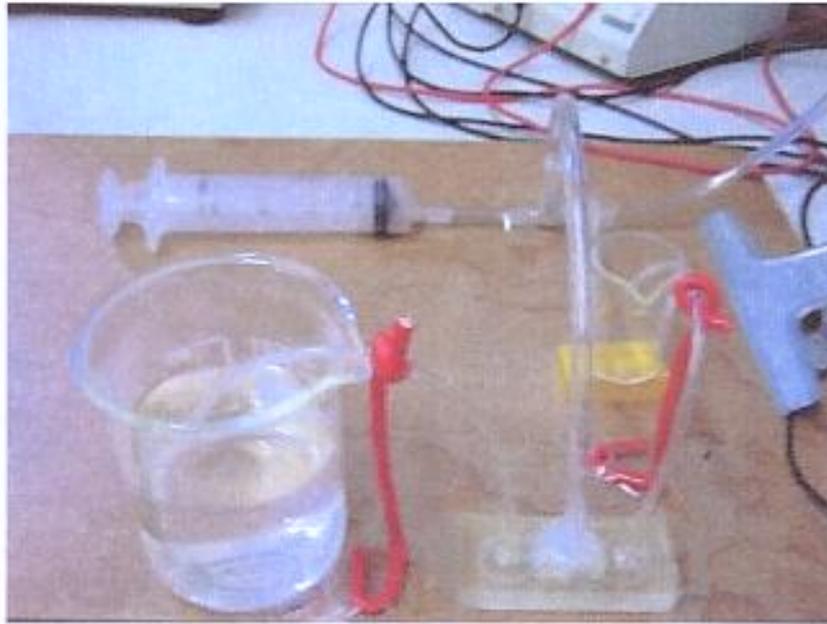


Figura 4.16: Visão da microbomba e os reservatórios

A Figura 4.16 mostra uma visão dos reservatórios de entrada e saída, ao centro está a microbomba ligada ao reservatório através de tubos flexíveis e mais ao fundo está a seringa que atua no sistema como uma câmara de expansão.

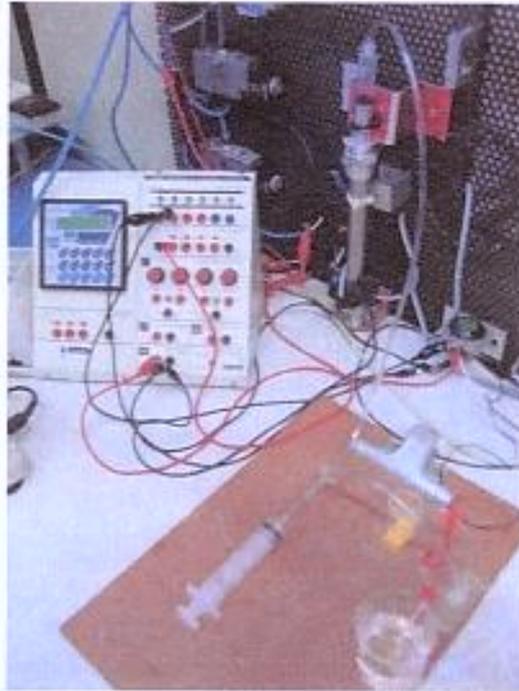


Figura 4.17: Visão da microbomba e do atuador pneumático

A Figura 4.17 mostra uma visão do sistema completo. Ele é formado pelo CLP, seguido do cilindro pneumático que está ligado a outra seringa (câmara de expansão) e que posteriormente estão ligados a microbomba, sendo esta ligada aos reservatórios de entrada e saída.

Com relação à microbomba foi garantido que tanto nas câmaras de entrada e saída, como na câmara da membrana, não houvesse vazamento de ar ou de fluido. Para isso foi feita a vedação com cola de silicone dos tubos de entrada na microbomba. A Figura 4.18 apresenta a microbomba utilizada na simulação experimental.



Figura 4.18: Microbomba vedada

Os seguintes testes (simulação experimental) foram realizados com a bancada apresentada na Figura 4.17, para o levantamento da curva de pressão versus vazão, foram feitos variando-se a pressão entre 0.1116 ($V_{s2} = 10$) e 0.1217 ($V_{s2} = 0$) MPa e a frequência de atuação em 1, 2 e 5 Hz, sendo a água o fluido de trabalho da microbomba:

- Teste 1, condições iniciais: pressão de entrada considerada constante ($h_1 = 6cm$) e posicionando-se $h_2 = 5cm$;
- Teste 2, condições iniciais: pressão de entrada considerada constante ($h_1 = 5cm$) e mantendo-se $h_2 = 5cm$;
- Teste 3, condições iniciais: pressão de entrada constante ($h_1 = 5cm$) e posicionando-se $h_2 = 4cm$;

Para a altura da coluna do reservatório de entrada em 6 cm (volume máximo do recipiente utilizado), a posição para a saída de vazão foi determinada como a menor altura onde o tubo parou de gotejar, com a membrana sem atuação, o que dá uma medida da perda de carga

do conjunto. O resultado foi a altura para o tubo de saída de 5 cm, levando a uma perda de carga equivalente a 1 cm de coluna d'água. Para estas condições iniciais, foi variada a pressão de entrada e a frequência de aplicação do pulso de pressão.

Para se fazer os testes mencionados acima, o volume médio bombeado foi calculado recolhendo-se para cada variação de pressão dez vazões diferentes. Para cada frequência de atuação foram utilizadas onze pressões e para cada uma delas dez vazões foram medidas para se obter a média. As médias e seus respectivos desvios padrões medidos em cada teste são apresentados nas Tabelas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5.

Tabela 4.1: Dados experimentais medidos no teste 1 na frequência de 1 Hz

Teste 1 - Frequência 1 Hz											
Pressão (MPa)	0.1116	0.1122	0.1128	0.1135	0.1142	0.1151	0.1161	0.1172	0.1185	0.1200	0.1217
Média	0.7660	0.8080	0.8570	0.8990	0.9760	1.0040	1.0480	1.0720	1.0930	1.2210	1.2650
Desvio padrão	0.0510	0.0700	0.0410	0.0420	0.0930	0.0990	0.0710	0.0650	0.0740	0.0250	0.0650

Tabela 4.2: Dados experimentais medidos no teste 1 na frequência de 2 Hz

Teste 1 - Frequência 2 Hz											
Pressão (MPa)	0.1116	0.1122	0.1128	0.1135	0.1142	0.1151	0.1161	0.1172	0.1185	0.1200	0.1217
Média 1	1.9460	1.9780	2.0570	2.0930	2.1690	2.2200	2.2500	2.2630	2.3100	2.4320	2.4890
Desvio padrão	0.0640	0.0720	0.0510	0.0450	0.0160	0.0310	0.0160	0.0210	0.0240	0.0090	0.0070
Média 2	1.9920	2.0210	2.0770	2.1150	2.1870	2.2280	2.2450	2.2730	2.3340	2.4440	2.4920
Desvio padrão	0.0220	0.0200	0.0390	0.0330	0.0430	0.0380	0.0140	0.0240	0.0370	0.0090	0.0410

Tabela 4.3: Dados experimentais medidos no teste 1 na frequência de 5 Hz

Teste 1 - Frequência 5 Hz											
Pressão (MPa)	0.1116	0.1122	0.1128	0.1135	0.1142	0.1151	0.1161	0.1172	0.1185	0.1200	0.1217
Média	3.2850	3.3560	3.4510	3.6000	3.6610	3.7880	3.8410	3.8800	4.1710	4.2990	4.6760
Desvio padrão	0.1700	0.0670	0.1590	0.0970	0.0780	0.0130	0.0600	0.1040	0.1390	0.1250	0.1600

Tabela 4.4: Dados experimentais medidos no teste 2 na frequência de 2 Hz

Teste 2 - Frequência 2 Hz											
Pressão (MPa)	0.1116	0.1122	0.1128	0.1135	0.1142	0.1151	0.1161	0.1172	0.1185	0.1200	0.1217
Média	0.2860	0.2900	0.3380	0.5390	0.7510	0.9700	1.1100	1.1620	1.2660	1.3440	1.5420
Desvio padrão	0.0400	0.0420	0.1100	0.1160	0.1760	0.0690	0.0550	0.0410	0.0890	0.0140	0.0460

Tabela 4.5: Dados experimentais medidos no teste 3 na frequência de 2 Hz

Teste 3 - Frequência 2 Hz											
Pressão (MPa)	0.1116	0.1122	0.1128	0.1135	0.1142	0.1151	0.1161	0.1172	0.1185	0.1200	0.1217
Média	0.7590	0.8580	0.9200	1.1250	1.2800	1.4430	1.5490	1.6770	1.7410	1.7800	1.8750
Desvio padrão	0.0280	0.0340	0.0360	0.0290	0.0240	0.0380	0.0360	0.0300	0.0330	0.0010	0.0930

A Tabela 4.2, apresenta uma medição a mais para cada variação de pressão. Isto foi feito com o intuito de verificar se as características da vazão permaneciam as mesmas. As medições foram realizadas em dias diferentes. Analisando-se as duas médias 1 e 2 na Tabela 4.2 para cada pressão, observa-se que houve uma pequena variação do volume bombeado. Isto também pode ser verificado pelo gráfico da Figura 4.19.

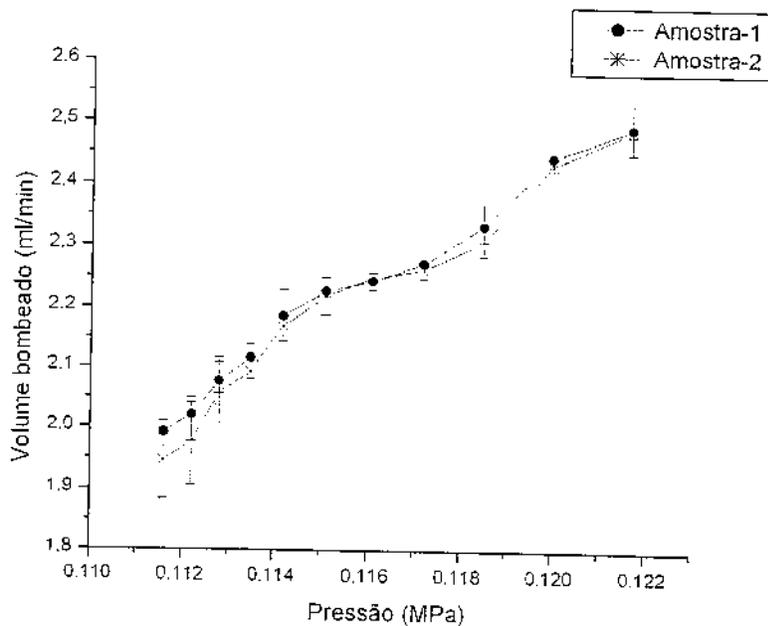


Figura 4.19: Verificação das características do volume bombeado (Tabela 4.2), com as barras de erro (desvio padrão) de cada média encontrada.

O gráfico da Figura 4.20, apresenta as curvas geradas a partir dos dados encontrados no teste 1 (Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3).

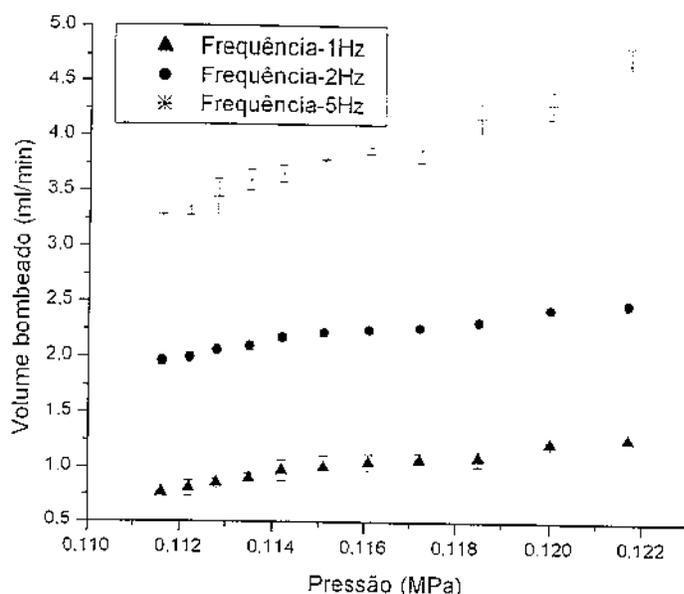


Figura 4.20: Curvas obtidas no teste 1 com as barras de erro (desvio padrão) de cada média encontrada.

A curva na frequência de 2 Hz na Figura 4.20 foi gerada pelas médias apresentadas na Tabela 4.2. Pode-se perceber pelo gráfico da Figura 4.20 que variando a frequência em 1 Hz o volume bombeado em média quase dobra.

O segundo e terceiro testes foram realizados fazendo-se variar a coluna de líquido de entrada (h_1) correspondente à pressão entrada. A altura do tubo de saída, no entanto, foi mantida a mesma, ou seja, está acima da perda de carga do sistema, o que faz com que a energia que deve ser aplicada no sistema seja maior (teste 2). Em seguida foi feito o procedimento para o reposicionamento da altura do tubo de saída (h_2) no ponto em que o tubo para de gotejar (teste 3). Com os dados apresentados nas Tabelas 4.4 e 4.5, o seguinte gráfico foi gerado (Figura 4.21):

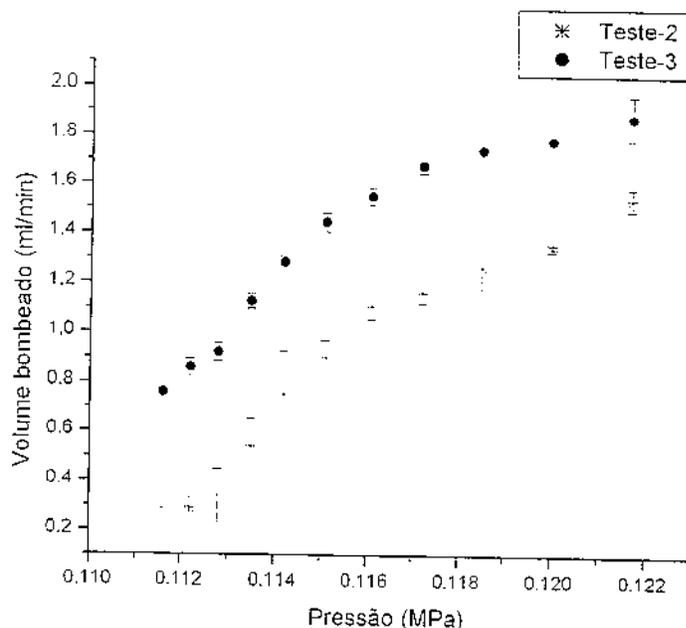


Figura 4.21: Curvas obtidas nos teste 2 e 3 com as barras de erro (desvio padrão) de cada média encontrada.

Considerando a Figura 4.21, percebe-se que a altura h_2 além da perda de carga do sistema (teste 2), o fluxo é menor do que quando definimos h_2 na altura da perda de carga (teste 3). A diferença média é da ordem de 35%. Analisando-se o gráfico da Figura 4.20 (Frequência-2Hz), que possui as mesmas características do gráfico da Figura 4.21 (teste 3), porém com a pressão de entrada maior (coluna de líquido 1 cm maior), percebe-se a influência da coluna de líquido do reservatório de entrada no volume bombeado, uma vez que na Figura 4.20 (Frequência-2Hz) a média do volume bombeado é superior que a do gráfico da Figura 4.21 (teste 3).

Analisando os gráficos apresentados nas Figuras 4.20 e 4.21, observa-se que a microbomba projetada pode trabalhar dentro de uma faixa de vazão que varia entre 0.2 e 4.6 ml/min, para isto basta determinar a pressão de entrada e a frequência de atuação.

Capítulo 5

Conclusões

As considerações e conclusões finais sobre o trabalho desenvolvido são apresentadas neste capítulo.

Os objetivos principais do trabalho foram: construir uma microbomba de diafragma oscilante sem válvulas e com atuação pneumática. A tecnologia de microfabricação utilizada foi litografia profunda em polímeros flexográficos. Outro tema do trabalho foi a simulação numérica da microbomba. E por fim o teste da microbomba para o levantamento de seu desempenho.

Para a construção da microbomba sem válvulas, foi utilizado a tecnologia de microfabricação com resinas flexográficas. A etapa de construção se desenvolveu de maneira satisfatória, devido à técnica ter se adaptado muito bem ao projeto, o que resultou em uma microbomba confiável (sem vazamentos) e com boas características técnicas (dimensões e desempenho), comportando-se de forma satisfatória. Como a tecnologia ainda está em desenvolvimento, vale ressaltar que o trabalho também serviu como contribuição para o aprimoramento da técnica, uma vez que novos parâmetros de construção foram testados e validados.

Considerando a simulação numérica da microbomba, foi desenvolvido um modelo numérico por analogia com circuitos elétricos equivalentes. Os resultados da simulação do comportamento da microbomba foram aproximados aos obtidos experimentalmente, porém os parâmetros precisam ser melhor estimados para uma validação completa do modelo.

O processo de teste da microbomba foi alcançado, utilizando-se um cilindro pneumático como base de atuação. Diversas situações puderam ser simuladas para o levantamento de desempenho da microbomba. Assim, foi possível relacionar a pressão de atuação na membrana com a sua vazão. Com estes dados foi possível prescrever qual a pressão necessária de atuação para que a microbomba opere a uma determinada faixa de vazão variando entre 0.2 e 4.6 ml/min.

5.1 Trabalhos futuros

As propostas para trabalhos futuros são:

- Melhorar a instrumentação disponível para a microfabricação, possibilitando reduzir as dimensões da microbomba e aumentar a confiabilidade dos parâmetros técnicos;
- Estabelecer um novo modelo de atuação para a microbomba, uma vez que diversas adaptações foram necessárias para a configuração do modelo atual;
- Estudar outros métodos de simulação numérica de microbombas, com a possibilidade de se efetuar outros tipos de análises;

Referências

- Auebach, F., Meiendres, G., Muller, R., and Scheller, G. (1994). Simulation of the thermal behavior of thermal flow sensors by equivalent electrical circuits. *Sensors and Actuators, A*, 41(1-3 pt 3):275-278.
- Bóhm, S., Olthuis, W., and Bergveld, P. (1999). A plastic micropump constructed with conventional techniques and materials. *Sensors and Actuators, A*, 77(3):223-228.
- Bona, F. D. and Enikov, E. (2004). Microsystems mechanical design.
- Bourouina, T. and Grandchamp, J.-P. (1996). Modeling micropumps with electrical equivalent networks. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 6:398-404.
- Burns, D. W., Zook, J. D., Horning, R. D., Herb, W. R., and Guckel, H. (1995). Sealed-cavity resonant microbeam pressure sensor. *Sensors and Actuators*, 48:179-186.
- Cao, L., Mantell, S., and Polla, D. (2000). Design and simulation of an implantable medical drug delivery system using microelectromechanical systems technology. *Sensors and Actuators A*, 94:117-125.
- Carmona, M., Marco, S., Samitier, J., Acero, M., Plaza, J., and Esteve, J. (2003). Modeling the thermal actuation in a thermo-pneumatic micropump. *Journal of Electronic Packaging, Transactions of the ASME*, 125(4):527-530.
- Carmona, M., Marco, S., Samitier, J., and Morante, J. (1996). Dynamic simulations of micropumps. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 6(1):128-130.

- Chow, A. W. (2002). Lab-on-a-chip: Opportunities for chemical engineering. *AIChE Journal*, 48(8):1590–1595.
- Dargahi, J., Parameswaran, M., and Payandeh, S. (2000). A micromachined piezoelectric tactile sensor for an endoscopic grasper - theory, fabrication and experiments. *Journal of Microelectromechanical Systems*. 9:329–335.
- der Pol, F. V., Breeveld, P., and Fluitman, J. (1990). Bond graph modeling of an electrothermo-pneumatic micropump. In *Technical Digest of MME '90 (Micro Mechanics Europe) 2nd Workshop on Micromachining and Microsystems (1990)*, pages 19–24.
- Doebelin, E. O. (1972). System dynamics: Modeling and response.
- Ehrfeld, W. (2003). Electrochemistry and microsystems. *Electrochimica Acta*, 48(20-22):2857–2868.
- Enikov, E. T. (2004). Overview of microfabrication techniques for micro-electromechanical systems. Technical report, Department of Aerospace and Mechanical Engineering. University of Arizona, USA.
- Fedder, G. K. and Jing, Q. (1999). A hierarchical circuit-level design methodology for microelectromechanical systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, 46(10):1309–1315.
- Fernandes, J. C. B. and Ferreira, L. O. S. (2006). Manufacturing of miniature fluidic modules for lab-on-a-chip using a photoresin from flexographic platemaking process. *Journal of the Brazilian Chemical Society*.
- Gerlach, T. and Wurmus, H. (1995). Working principle and performance of the dynamic micropump. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 50(1-2):135–140.
- Goulpeau, J., Trouchet, D., Ajdari, A., and Tabeling, P. (2005). Experimental study and modeling of polydimethylsiloxane peristaltic micropumps. *Journal of Applied Physics*. 98(4):044914.

- Herr, A., Molho, J., Kenny, T., Santiago, J., Mungal, M., and Garguilo, M. (1999). Variation of a capillary wall potential in eletrokinetic flow. In *Tranducers*, pages 710–713. Sendai, Japan.
- Hormes, J., Gótttert, J., Lian, K., Desta, Y., and Jian, L. (2003). Materials for liga and liga-based microsystems. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 199(SUPPL):332–341.
- Jiang, X., Zhou, Z., Huang, X., Li, Y., Yang, Y., and Liu, C. (1998). Micronozzle/diffuser flow and its application in micro valveless pumps. *Sensors and Actuators A*, 70(1-2):81–87.
- Keatch, R., Armoogum, K., Schor, S., Pridham, M., Banks, K., Khor, T., and Matthew, C. (2002). Microengineering as a tool to study substratum modulation and cell behaviour. In *Proc. of the 36th Annual Meeting of the German Society for Biomedical Technology (DGBMT), Karlsruhe Germany*, volume 47, pages 386–389.
- Khoo, M. and Liu, C. (2000). A novel micromachined magnetic membrane microfluid pump. In *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology*, volume 3, pages 2394–2397.
- Kim, J.-H., Na, K.-H., Kang, C., and Kim, Y.-S. (2005). A disposable thermopneumatic-actuated micropump stacked with pdms layers and ito-coated glass. *Sensors and Actuators, A*, 120(2):365–369.
- Ko, J. S., Kim, G. H., Cho, Y. H., Lee, K., Kwak, B. M., and Park, K. (1995). Proceedings of the ieee micro electro mechanical systems (mems). In *IEEE International Workshop on MEMS*, page 163.
- Kovacs, G. T. A. (1998). *Micromachined transducers sourcebook*. WCB/McGraw-Hill, Nova York.
- Laser, D. J. and Santiago, J. G. (2004). A review of micropumps. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14(6):R35–R64.

- Madou, M. (1997). *Fundamentals of microfabrication*. Ron Powers, Florida.
- Manson, W. (1943). *Electromechanical transducers and wave filters*. (New York: Van Nostrand) 2nd edn.
- Nguyen, N. and White, R. (1999). Design and optimization of an ultrasonic flexural plate wave micropump using numerical simulation. *Sensors and Actuators A*, 77(3):229–236.
- Nguyen, N.-T. and Huang, X. (2000). Numerical simulation of pulse-width-modulated micropumps with diffuser/nozzle elements. In *2000 International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems - MSM 2000*, pages 636–639.
- Nguyen, N.-T. and Huang, X. (2001). Miniature valveless pumps based on printed circuit board technique. *Sensors and Actuators A*, 88(2):104–111.
- Nguyen, N. T., Huang, X., and Chuan, T. K. (2002). MemS-micropumps: A review. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 124(2):384–392.
- Nguyen, N. T., Meng, A. H., Black, J., and White, R. M. (2000). Integrated flow sensor for in situ measurement and control of acoustic streaming in flexural plate wave micropumps. *Sensors and Actuators A*, 79(2):115–121.
- Olsson, A. (1998). *Valve-less diffuser micropumps*. PhD thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Olsson, A., Stemme, G., Larsson, O., Holm, J., Lundblad, L., and Óhman, O. (1998). Valve-less diffuser micropumps fabricated using thermoplastic replication. *Sensors and Actuators A*, 64(1):63–68.
- Olsson, A., Stemme, G., and Stemme, E. (1996). Diffuser-element design investigation for valve-less pumps. *Sensors and Actuators, A*, 57(2):137–143.
- Olsson, A., Stemme, G., and Stemme, E. (1997a). First valve-less diffuser gas pump. In *IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, pages 108–113.

- Olsson, A., Stemme, G., and Stemme, E. (1997b). Simulation studies of diffuser and nozzle elements for valve-less micropumps. In *International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Proceedings*, volume 2, pages 1039–1042.
- Olsson, A., Stemme, G., and Stemme, E. (1999). Numerical design study of the valveless diffuser pump using a lumped-mass model. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 9(1):34–44.
- Olsson, A., Stemme, G., and Stemme, E. (2000). Numerical and experimental studies of flat-walled diffuser elements for valve-less micropumps. *Sensors and Actuators, A*, 84(1):165–175.
- Pan, L., Ng, T., Liu, G., Lam, K., and Jiang, T. (2001). Analytical solutions for the dynamic analysis of a valveless micropump - a fluid - membrane coupling study. *Sensors and Actuators A*, 93(2):173–181.
- Rogers, J. A. and Nuzzo, R. G. (2005). Recent progress in soft lithography. *Materials Today*, 8(2):50–56.
- Schomburg, W., Ahrens, R., Bather, W., Goll, C., Meinzer, S., and Quinte, A. (1998). Amanda-low-cost production of microfluidic devices. *Sensors and Actuators A*, 70(1-2):153–158.
- Senturia, S. D. (2001). *Microsystems Design*. Kluwer Academic Publishers, Massachusetts.
- Singhal, V., Garimella, S. V., and Murthy, J. Y. (2004). Low reynolds number flow through nozzle-diffuser elements in valveless micropumps. *Sensors and Actuators A*, 113(2):226–235.
- Smits, J. G. (1990). Piezoelectric micropump with three valves working peristaltically. *Sensors and Actuators, A*, 21(1-3):203–206.
- Stemme, E. and Stemme, G. (1993). A valveless diffuser/nozzle-based fluid pump. *Sensors and Actuators A*, 39(2):159–167.

- Swart, N. and Nathan, A. (1992). Flow-rate microsensor modelling and optimization using spice. *Sensors and Actuators, A*, 34(2):109–122.
- Teymoori, M. M. and Abbaspour-Sani, E. (2005). Design and simulation of a novel electrostatic peristaltic micromachined pump for drug delivery applications. *Sensors and Actuators A*, 117(2):222–229.
- v. d. Poel Filho, C. J. (2005). *Modelagem Numérica Multi-domínios para Aplicação em Microsistemas Eletromecânicos*. PhD thesis, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.
- Wang, J. (2004). Microchip devices for detecting terrorist weapons. *Analytica Chimica Acta*, 507(1):3–10.
- Weigl, B. H., Bardell, R. L., and Cabrera, C. R. (2003). Lab-on-a-chip for drug development. *Sensors and Actuators, A*, 55(3):349–377.
- Woiias, P. (2005). Micropumps - past, progress and future prospects. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 105(1):28–38.
- Yamahata, C., Lacharme, F., and Gijs, M. A. (2005). Glass valveless micropump using electromagnetic actuation. *Microelectronic Engineering*, 78-79(1-4):132–137.
- Yazdi, N. and Najfi, K. (2000). An all-silicon single-wafer micro-g accelerometer with a combined surface and bulk micromachining process. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 9:544–550.
- Zengerle, R. and Richter, M. (1994). Simulation of microfluid systems. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 4(4):192–204.
- Zhang, T. (2005). *Valveless Piezoelectric Micropump for fuel Delivery in Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) Devices*. PhD thesis, University of Pittsburgh.