Universidade de São Paulo
Instituto de Física

Caracterização de uma microválvula fabricada
usando o polímero piezoelétrico poli(fluoreto de
vinilideno) (PVDF) integrada a saída de um
microbocal sônico

Rodrigo Sérgio Wiederkehr

Orientador: Profª. Dra. Maria Cecília Barbosa da Silveira Salvadori
Co-Orientador: Prof. Dr. Mauro Sérgio Dorsa Cattani

Tese de doutorado apresentada ao
Instituto de Física para a obtenção do
título de Doutor em Ciências

Comissão Examinadora:

Profª. Dra. Maria Cecília Barbosa da Silveira Salvadori (IFUSP)
Prof. Dr. Sérgio Luiz Morelhão (IFUSP)
Prof. Dr. Felix Sharipov (UFPR)
Prof. Dr. José Nivaldo Hinckel (INPE)
Prof. Dr. Rinaldo Gregório Filho (UFSCar)

São Paulo
2007

Agradecimentos

Gostaria de agradecer minha orientadora Prof. Maria Cecília Salvadori e meu co-orientador Prof. Mauro Cattani e ao Prof. Francisco Tadeu Degasperi pelo apoio e oportunidade dada para o desenvolvimento do projeto.

A Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) que concedeu a bolsa que possibilitou minha dedicação integral ao desenvolvimento do projeto (DD 03/00754-3) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio dado a este trabalho através da aquisição de equipamento e material de consumo. A Pró Reitoria de Pós Graduação da Universidade de São Paulo (PRPG/USP) pelo auxílio dado para participação em congresso no exterior.

Aos funcionários do IFUSP em especial aos do Departamento de Física Aplicada: as secretárias Lia e Inês, ao Sr. Eduardo da eletrônica que me ajudou na montagem das fontes usadas nos experimentos ao Sr. Raimundo, Sr. Toninho e todo o pessoal da oficina mecânica que fabricaram as peças usadas na montagem da linha de gás importante para os testes do dispositivo fabricado.

Ao pessoal do Laboratório de Óptica & Laser do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (em especial ao Prof. Sergio Brito Mendes, Prof. Flávio Horowitz, Dr. Marcelo Barbalho Pereira, Dr. Alexandre Fassini Michels e ao Eng. Roberto Spinato) que me despertaram o interesse e motivação e desenvolver pesquisa em Física experimental (na área de filmes finos).

Ao todo o pessoal do Laboratório de Microsistemas 1 (LMIS1) da Escola Politécnica Federal de Lausanne/ Suíça (EPFL) (em especial ao Prof. Juergen Brugger) pela amizade e por colaborar no desenvolvimento de parte deste trabalho que foi parcialmente desenvolvido no LMIS1 durante um estágio de 6 meses financiado pelo auxílio de RTB da FAPESP.

Ao Dr. Alfredo Rodrigues Vaz, Dr. Deílton Reis Martins, Dr. Leônidas Lopes de Melo, Ms. Reginaldo de Jesus Costa Farias, Fábio dos Santos Lisboa Fábio Aparecido Souza e Fernando Massa Fernandes pela amizade, companheirismo e pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

A Técnica Ms. Fernanda de Sá Teixeira pelo auxílio diário nas atividades de laboratório e discussões sobre o projeto.

Ao Pierre-Alain, Guylaine, Noémie, Choé, Bennoit et Thomas Magnin que me ajudaram muito durante minha estada em Lausanne acho que sem eles não teria sido

possível em um curto espaço de tempo desenvolver o projeto proposto (Merci Beaucoup).

Agradeço a todos meus familiares em especial a minha mãe Nadir Ana Wiederkehr, irmã Ana Letícia Wiederkehr, minhas tias Célia Wiederkehr e Maria Mirna Schneider e prima Anne Rose Wiederkehr Baú que sempre me apoiaram e acreditaram que era possível mesmo longe de casa e da família realizar a pós graduação.

Por fim agradeço a todos os colegas e amigos que tive a oportunidade de conhecer durante a vida acadêmica com quem tive o privilégio de conviver e aprender a cada uma nova lição.

Resumo

Este trabalho descreve a seqüência de fabricação de uma microválvula piezoelétrica posicionada na saída de um microbocal sônico. A técnica usada para fabricar os microbocais foi o jateamento utilizando pó de alumina e o substrato usado foi de vidro. As microválvulas são atuadores fabricados com o polímero poli(fluoreto de vinilideno) (PVDF) que é um material piezoelétrico. Os microbocais têm um formato convergente-divergente com diâmetro na entrada de 1 mm e com diâmetro na garganta em cerca de 240 μm . O atuador foi fabricado no modo bimorfo (duas folhas do polímero coladas com polarização opostas) com dimensões de 3 mm de largura por 6 mm de comprimento. Ambas as folhas do polímero são recobertas por um filme condutor de 200 nm de espessura usados como eletrodos. Aplicando uma voltagem entre os eletrodos uma folha expande enquanto a outra contrai gerando um movimento vertical do atuador. O movimento vertical pode ser maior ou menor dependendo do valor da tensão aplicada.

Os dispositivos foram testados usando uma linha de gás, aplicando tensões DC e AC nos eletrodos do atuador. Para controle, também foram realizadas medidas em bocais sem atuadores. No caso onde foram aplicadas tensões DC nos atuadores, a pressão de entrada foi constante de 266 Pa. Aplicando uma tensão de +300 V DC nos eletrodos, o atuador teve um movimento vertical na direção oposta ao do microbocal de 20 μm (movimento de abertura). Neste caso o fluxo de gás medido, quando a razão de pressão entre a entrada e a saída atingiu 0,5, foi de 150 cm^3/min . Aplicando uma tensão de -300 V DC (o que significa um movimento vertical de fechamento de 13 μm), o fluxo de gás medido, quando a razão de pressão foi de 0,5, foi de 134 cm^3/min . Assim, existe uma faixa de fluxo entre 134 cm^3/min e 150 cm^3/min que pode ser controlada através do atuador. Em uma das medidas onde se aplicou uma tensão AC (200 V com 5 Hz de frequência), foi utilizada uma pressão de entrada 13300 Pa. Neste caso, para uma razão de pressão de 0,5, onde o bocal se encontrava bloqueado, foi observado um fluxo de 847 cm^3/min . Considerando que o fluxo do bocal sem atuador, nas mesmas condições de medida foi de 614 cm^3/min , concluímos que o dispositivo no modo AC funciona como uma microbomba.

A relevância deste trabalho está na utilização do poli(fluoreto vinilideno) (PVDF) para a fabricação de um atuador como microválvula. Este material ainda não havia sido

testado para esta finalidade. A fabricação dos microbocais feita em um substrato de vidro usando a técnica de jateamento também é inédita.

Abstract

This work describes the fabrication and test of a microvalve integrated in a micronozzle. The technique used to fabricate the micronozzles was powder blasting using aluminum oxide powder and glass as substrate. The microvalves are actuators made from PVDF (poly(vinylidene fluoride)), that is a piezoelectric polymer. The micronozzles have convergent-divergent shape with diameter of 1mm at the entrance and throat around 240 μm . The actuators were fabricated as a bimorph structure (two piezoelectric sheets were clamped together with opposite polarization) with dimensions 3 mm width and 6 mm length. Both sheets are recovered with a conductive thin film with 200 nm of thickness used as electrodes. Applying voltage between the electrodes one sheet expands while the other contracts and this generate a vertical movement to the entire actuator. If the voltage is changed, this movement can be higher or lower.

The devices were tested in a gas line applying DC and AC voltages between the actuator's electrodes. Measurements were also realized using a micronozzle without actuator, for control. In the case where DC voltage was applied between the actuators electrodes, the inlet pressure was kept constant in 266 Pa. Applying +300V DC voltage between the electrodes, the actuator moved 20 μm vertically in the opposite direction of the micronozzle (it opened). In this case the volume flux rate, for a pressure ratio (outlet / inlet) of 0.5, was 150 cm^3/min . Applying -300 V DC between the electrodes (that means it closed 13 μm in the micronozzle direction), for a pressure ratio of 0.5, the volume flux rate was 134 cm^3/min . With these results, we conclude that it is possible to control the flow through the device in the range between 134 and 150 cm^3/min . Flow measurements were also performed applying AC voltage (200 V AC with frequency of 5 Hz) between the actuator electrodes and with the inlet pressure kept constant in 13300 Pa. In this case, with a pressure ratio (outlet / inlet) of 0.5, blocking the micronozzle, the flow rate measured was 847 cm^3/min . Considering that the flow rate measured for the micronozzle without actuator was 614 cm^3/min , in the same measurement conditions, we concluded that the device, in AC mode, was working as a micropump.

The relevance of this work was the use of the Poly(vinylidene fluoride) (PVDF) in the fabrication of the actuators and use it as a microvalve. The micronozzles were fabricated in a glass substrate using the powder blasting technique that was also new.

Sumário

1 Introdução.	10
1.1 Motivação.	12
1.2 Sistemas de atuação usados na construção de microválvulas.	14
1.3 Fatores que devem ser levados em conta para a construção da membrana móvel.	14
1.3.1 Atuador pneumático	15
1.3.2 Atuador thermopneumático.	15
1.3.3 Atuador bimetálico (térmico).	17
1.3.4 Atuador fabricado a partir de uma liga de memória.	19
1.3.5 Atuador eletrostático.	20
1.3.6 Atuador eletromagnético.	22
1.3.7 Atuador eletroquímico.	25
1.3.8 Atuador piezoelétrico.	25
 2 Materiais e métodos.	 28
2.1 Desenvolvimento e fabricação de um atuador piezelétrico bimorfo.	28
2.2 Desenvolvimento de microbocais em substrato de vidro usando a técnica de jateamento.	36
2.2.1 A técnica de jateamento.	37
2.2.2 O processo de erosão.	38
2.2.3 Parâmetros que influenciam o jateamento.	40
2.2.4 Etapas de fabricação do microbocal.	44
2.2.5 Deposição de um filme fino de platina na superfície do substrato.	47
2.3 Deposição de filmes finos por plasma metálico (MePIIID – Metal Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition).	48
2.4 Montagem da microválvula usando o atuador piezoelétrico e o microbocal de vidro e procedimento para teste.	51

2.4.1 Mecanismo de funcionamento.	53
2.4.2 Montagem de uma linha de teste para verificar a performance da microválvula.	54
2.4.3 Condições iniciais adotadas para a realização das medidas.	55
2.4.4 Dedução da expressão usada no cálculo de fluxo de gás que passa pelo dispositivo por unidade de tempo.	57
3 Resultados.	60
3.1 Medida do deslocamento do atuador piezoelétrico bimorfo.	60
3.2 Medida de fluxo de gás dos microbocais com microválvulas integradas. . . .	64
3.2.1 Resultados para microbocais de diferentes diâmetros.	65
3.2.2 Resultados para a microválvula aplicando tensão DC.	69
3.2.3 O efeito da histerese no desempenho da microválvula.	73
3.2.4 Resultados para a microválvula aplicando tensão AC.	74
3.2.5 Fenômeno de bombeamento observado quando a tensão AC é aplicada no atuador.	78
4 Sumário e Conclusões.	83
4.1 Perspectivas de Trabalhos Futuros.	84
A Modelagem numérica de um microbocal e uma microválvula usando o programa Ansys/CFX 10.0.	85
A1 Introdução.	85
A2 Problema físico estudado.	86
A3 Condições de contorno usados na modelagem numérica.	88
A4 Resultados.	90
A5 Conclusão.	101

B Congressos e publicações.	103
B1 Trabalho apresentado na forma de pôster no XXIX Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada	103
B2 Trabalho apresentado na forma de pôster no 1º Encontro Regional de Materiais do estado de São Paulo.	104
B3 Trabalho apresentado na forma oral no XXX Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada.	105
B4 Trabalho apresentado na forma de pôster no IVC17: 17th Internacional Vacuum Congress.	106
B5 Artigo publicado na revista Smart Materials and Structures 16 2302-2307 (IOP publishing)	107
B6 Artigo aceito para publicação na revista Sensors and Actuators A (Elsevier).	117
B7 Artigo submetido para a revista Journal of Physics: Conference Series (IVC17/ICSS13/ICN+T2007 Proceedings) (IOP publishing)	126
Referências.	130

Capítulo 1

Introdução

A microfluídica é o ramo da ciência que estuda o comportamento dos fluidos nos casos em que ele diverge da teoria convencional devido à pequena quantidade em uso. Isso geralmente ocorre quando o fluido é confinado em microestruturas como microcanais ou orifícios.

Os primeiros dispositivos para microfluídica foram criados na década de 70 quando a tecnologia de microfabricação se limitava a obtenção de estruturas no silício usando as técnicas de microeletrônica [1]. Os dispositivos mais sofisticados como as microbombas e microválvulas surgiram na década de 80 também utilizando o silício como substrato [2]. As técnicas de microfabricação foram evoluindo, introduzindo novos materiais [3,4,5] e tornaram os dispositivos mais eficientes e com menor custo de fabricação. Mas é importante ressaltar que as dimensões dos dispositivos não necessitam ser micrométricas, pois o importante é a quantidade de fluido com o qual o dispositivo interage.

Quando uma pequena quantidade de fluido é manipulada (como 1 μL), existem efeitos e forças que devem ser levados em consideração, que são normalmente ignorados quando estamos com grande quantidade do mesmo fluido (como em 1 L). Quando confinado em um tubo o efeito da camada limite em 1 μL é muito maior que em grandes quantidades. A razão superfície/ volume em uma gota é muito maior que em 1 litro do mesmo fluido [6].

O fluxo de pequenas quantidades de gás começou a ser estudado por Knudsen em 1909 quando ele mediu a vazão mássica de um gás em microcanais de 30 μm de diâmetro. Desde então diversos pesquisadores tem trabalhado no desenvolvimento e caracterização de sistemas para uso com pequenas quantidades de gás [7,8, 9].

Bocais são canais bastante utilizados em linhas de gás por apresentarem o fenômeno de bloqueio. A bloqueio ocorre quando a velocidade do fluido na garganta do bocal atinge a velocidade do som, o que faz que a vazão mássica alcance um valor máximo, ou seja, mesmo diminuindo a razão de pressão entre a saída e a entrada do bocal a vazão se mantém inalterada [10]. A bloqueio de um bocal é observada quando a razão de

pressão é menor que um fator (tipicamente 0,5) que depende das dimensões do bocal e da composição do gás utilizado [11].

Os primeiros microbocais com formato cônico foram fabricados em 1997 por Robert Bayt e Kenneth Breuer [11]. Eles fabricaram um microbocal na superfície de um substrato de silício com um diâmetro de garganta de $19\text{ }\mu\text{m}$ e um diâmetro de saída de $102\text{ }\mu\text{m}$. A Figura 1 mostra o microbocal obtido.

Figura 1: Microbocal fabricado na superfície do silício por Bayt e Breuer usando a técnica de DRIE (deep reactive ion etching) [11]. Esta técnica é bastante usada com o silício, pois mascarando a superfície do substrato é possível remover as áreas expostas e obter estruturas de dimensões micrométricas com boa anisotropia.

O microbocal mostrado na Figura 1 foi fabricado para uso como propulsor de microsátélites e microfoguetes. Desde então novos trabalhos surgiram tentando melhorar a geometria [6,12] ou propondo novos materiais e técnicas de fabricação do bocal [12,13].

Além do uso em propulsores os microbocais podem ser usados no controle de fluxo de linha de gás, pois como os bocais grandes, também apresentam o fenômeno de bloqueio [13]. A Figura 2 mostra o fenômeno da bloqueio presente quando a razão de pressão saída/ entrada do microbocal é menor que 0,5.

Figura 2: Gráfico de vazão mássica versus razão de pressão saída/ entrada do microbocal com 260 μm de diâmetro interno (garganta). Mesmo diminuído a pressão na saída a vazão se manteve inalterada o que indica que o bocal está bloqueado.

1.1 Motivação

O objetivo desta tese foi fabricar microbocais de diferentes diâmetros em uma placa e introduzir em sua saída um atuador que, ao movimentar, permita a passagem de mais ou menos gás. Variando a posição do atuador é possível obter diferentes valores de fluxo de gás usando apenas um bocal. Uma linha de teste foi montada para verificar-se o desempenho do dispositivo montado.

Um problema ainda inexplorado e que motivou esta tese foi incorporar à saída do microbocal um atuador e criar um sistema de controle de gás mais sofisticado. O material usado na fabricação do atuador foi o PVDF e os microbocais foram feitos em vidro por jateamento que são novidades para este tipo de dispositivo. O atuador funcionaria como uma espécie de “porta” que pode se movimentar e permanecer em diferentes posições deixando passar uma quantidade maior ou menor de gás.

A Figura 3 mostra um desenho esquemático do sistema proposto nesta tese para o controle de fluxo de gás em uma linha.

Figura 3: Desenho esquemático do sistema microbocal atuador. O controle do fluxo de gás é feito movimentando o atuador presente na saída do bocal.

Quando um atuador ou membrana é usado para controlar o fluxo de um fluido no interior de um microcanal o sistema é conhecido como microválvula. A seção a seguir descreve os principais tipos de atuadores usados na fabricação de microválvulas.

1.2 Sistemas de atuação usados na construção de microválvulas

Microválvulas são estruturas em constante estudo e desenvolvimento por ser um dos componentes mais usados na manipulação de pequenas quantidades de fluido. A primeira foi desenvolvida por Terry et al. em 1979 [2] e desde então vários modelos foram desenvolvidos visando dispositivos menores, que funcionem em pressões cada vez maiores e sejam compatíveis com outros sistemas.

A faixa de pressão em que vão funcionar e o fluido passante definem qual o melhor material a ser usado na sua construção. As válvulas controlam o fluxo através de uma membrana ou peça móvel que obstrui ou libera a passagem do fluido no seu interior.

As microválvulas são usadas na dosagem de pequenas quantidades de líquido ou gás sendo composta de um canal de entrada, uma membrana móvel e um canal de saída. Para a sua construção devemos levar em conta a faixa de pressão, temperatura de trabalho, tempo de resposta (para abertura e fechamento), compatibilidade com o sistema (caso seja integrado a outro dispositivo), custo e material empregado na sua construção. Os principais atuadores que podem ser usados são: pneumático, thermopneumático, piezoelétrico, térmico, liga de memória, eletrostático, eletromagnético e eletroquímico.

1.3 Fatores que devem ser levados em conta para a construção da membrana móvel

O atuador é um dispositivo que converte energia (elétrica, térmica entre outras) em movimento, sendo a peça móvel da microválvula que se desloca de uma posição inicial de repouso para uma posição desejada. A variação da posição deixa passar uma quantidade maior ou menor de fluido. Para esta função o atuador deve ter força e deslocamento suficientes sendo possíveis de serem controlados. O parâmetro que determina o desempenho do atuador é o trabalho produzido calculado usando a equação:

$$W_a = F_a S_a \quad (1)$$

onde F_a é a força produzida e S_a é o deslocamento máximo do atuador. Quanto maior o trabalho melhor o desempenho do atuador.

Nas subseções a seguir serão descritos os principais tipos de atuadores usados na construção de microválvulas.

1.3.1 Atuador pneumático

O atuador pneumático é uma membrana que se movimenta quando uma pressão é aplicada em uma das suas faces. A vantagem de usar este atuador para a construção de uma microválvula é a faixa de pressão em que o dispositivo pode atuar. A pressão de entrada na válvula pode ser de qualquer valor, desde que a pressão usada para movimentar a membrana seja maior [14]. É importante ressaltar que o material empregado na construção do atuador seja flexível para que haja movimentação quando a pressão na sua face traseira for aplicada [15,16]. A Figura 4 mostra um desenho esquemático de uma microválvula pneumática.

Figura 4: Microválvula pneumática fabricada usando uma membrana de um material flexível. A válvula está normalmente aberta, mas quando uma pressão (maior que a pressão de entrada) é aplicada na parte superior do dispositivo ocorre uma movimentação que interrompe o fluxo de fluido. No desenho P_{en} significa pressão na entrada e $P_{saída}$ é a pressão medida na saída do dispositivo.

1.3.2 Atuador thermopneumático

O atuador thermopneumático é constituído de uma membrana que está em contato com um fluido confinado em uma câmara e uma das paredes é a membrana flexível. Quando o fluido é aquecido sofre uma expansão que movimenta o atuador. O material confinado na câmara pode ser um gás, líquido ou até mesmo um sólido. Os mais usados

são os líquidos e os sólidos, pois quando são aquecidos podem mudar de fase o que resulta numa mudança maior no volume, aumentando assim a força aplicada no atuador [17,18,19]. Usando o princípio thermopneumático é possível construir uma microválvula que funcione para uma determinada faixa de pressão (que vai depender da força gerada pela mudança de volume do material presente na câmara). A Figura 5 mostra um desenho esquemático de uma microválvula thermopneumática.

Figura 5: Desenho esquemático de uma microválvula thermopneumática. A válvula é composta de uma câmara que está em contato com o atuador sendo que um líquido foi confinado em seu interior. O atuador é constituído de um material flexível e de pequena espessura. Quando o líquido é suficientemente aquecido é parcialmente ou totalmente transformado em vapor, pressionando a membrana e bloqueando a passagem de fluido pelo interior na microválvula. No desenho P_{en} significa pressão na entrada e $P_{saída}$ é a pressão medida na saída do dispositivo.

1.3.3 Atuador bimetálico (térmico)

As ligas bimetálicas se movimentam, ao serem aquecidas, devido aos diferentes coeficientes de expansão dos metais que a compõem. Quando exposta a uma fonte de calor um metal dilata mais que o outro gerando um movimento vertical. A Figura 6 mostra um desenho esquemático de uma liga bimetálica e sua resposta quando é aquecida.

Figura 6: Desenho esquemático de um atuador bimetálico. Quando uma fonte de calor é ativada um metal expande mais que o outro gerando um movimento vertical. Na Figura E_1 e E_2 são os módulos de Young dos materiais e γ_1 , γ_2 são os coeficiente de expansão térmica.

A desvantagem deste sistema é a alta potência consumida e a resposta lenta. A força resultante produzida é proporcional à diferença entre os coeficientes de dilatação térmica e a variação de temperatura como mostra a equação a seguir [20]:

$$F = C(\gamma_2 - \gamma_1)\Delta_t \quad (2)$$

Onde Δ_t é a variação de temperatura e C é uma constante dada por [20]:

$$C = \left(\frac{3t_1}{4L} \right) * \left(\frac{t_1 + t_2}{\frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2}} \right) \quad (3)$$

Sendo que as constantes L , t_1 , t_2 , γ_1 , γ_2 , E_1 e E_2 estão definidas na Figura 6.

Usando um atuador bimetálico é possível construir uma microválvula para controle do fluxo de fluidos [21,22]. A Figura 7 mostra um desenho esquemático de uma microválvula que utiliza um atuador bimetálico.

Figura 7: Desenho esquemático de uma microválvula termomecânica. A válvula foi construída para estar normalmente fechada. Quando os atuadores bimetálicos são aquecidos movimentam o suporte que obstrui a passagem do fluido, permitindo sua passagem. No desenho P_{en} significa pressão na entrada e $P_{saída}$ e a pressão medida na saída.

1.3.4 Atuador fabricado a partir de uma liga de memória

As ligas de memória (ou *shape-memory alloys* (SMA) em inglês) são materiais que, ao sofrerem uma deformação, retornam ao estado inicial somente quando ocorre um aumento na sua temperatura. A liga mais usada é a de níquel/ titânio, pois é a que apresenta maior força. A liga de memória tem um módulo de Young baixo à temperatura ambiente, mas o módulo aumenta quando sofre um acréscimo de temperatura tornando o material mais rígido. A Figura 8 mostra um desenho esquemático de uma microválvula feita com uma liga de memória [23,24].

Figura 8: Desenho esquemático de uma microválvula fabricada usando uma liga de memória. Quando a fonte de calor está desligada a válvula está aberta permitindo a passagem do fluido pelo interior do dispositivo. Mas quando a liga é aquecida ela empurra uma membrana flexível em direção ao substrato interrompendo o fluxo no

interior da válvula. A abertura da válvula se dá quando a fonte de calor está desligada e a própria diferença de pressão entre entrada e saída do dispositivo força a deformação da liga de memória. No desenho P_{en} significa pressão na entrada e $P_{saída}$ e a pressão medida na saída.

1.3.5 Atuador eletrostático

Um atuador eletrostático movimenta-se devido à força de atração entre dois eletrodos de cargas opostas sendo que um dos eletrodos é o próprio atuador ou está presente nele. O campo elétrico gerado entre os dois eletrodos é o responsável pelo deslocamento do atuador. Para calcular a força gerada no atuador devido à presença deste campo é necessário considerar os eletrodos como duas placas de área a separados por uma distância d . A equação a seguir é usada para calcular a força gerada no atuador.

$$F = \frac{1}{2} \epsilon_r \epsilon_o a \left(\frac{V}{d} \right)^2 \left(\frac{\epsilon_i}{\epsilon_r + \epsilon_i} \right)^2 \quad (4)$$

onde ϵ_r é o constante dielétrica do material que compõe o atuador, ϵ_i é o constante dielétrica do material que separa os dois eletrodos, ϵ_o é a permissividade no vácuo e V é a voltagem aplicada nos eletrodos.

A maior vantagem do atuador eletrostático é a sua rápida resposta. Entretanto a alta voltagem aplicada e o baixo deslocamento são suas desvantagens.

Para fabricar-se uma microválvula com um atuador eletrostático é necessário que o atuador seja feito ou recoberto por um material condutor. A outra superfície condutora deve estar presente no substrato. Assim, quando o campo é aplicado o atuador movimenta-se na direção do substrato, por isso o design da microválvula eletrostática é conhecido como válvula aberta [25,26]. A Figura 9 mostra o desenho esquemático de uma microválvula eletrostática.

Microválvula ABERTA

$$P_{en} > P_{saída}$$

Microválvula FECHADA

(Um Campo Elétrico Está Sendo Aplicado Entre os Eletrodos)

$$P_{en} > P_{saída}$$

Legenda:

Substrato com o Microcanal

Camada Condutora

Camada Isolante

Figura 9: Desenho esquemático de uma microválvula eletrostática. Neste caso o atuador foi recoberto por um filme condutor. O outro eletrodo está presente na superfície do substrato. Quando uma voltagem é aplicada o atuador movimenta-se em direção ao substrato bloqueando o fluxo de fluido no interior da válvula. Como uma camada isolante está entre os dois eletrodos não existe passagem de corrente elétrica. No desenho P_{en} significa pressão na entrada e $P_{saída}$ é a pressão medida na saída da microválvula.

1.3.6 Atuador eletromagnético

Os atuadores eletromagnéticos são feitos de materiais que apresentam propriedades magnéticas, como a liga ferro níquel. Aplicando um campo magnético o material movimenta-se de acordo com a direção e sentido do campo aplicado. Uma bobina eletromagnética geralmente é usada para aplicar o campo (como exemplo podemos citar uma bobina de cobre enrolada ao redor de um material magnético) [27]. Quando uma corrente passa pela bobina, o campo induzido gera uma força que pode atrair ou repelir o atuador, dependendo apenas do sentido da corrente.

A força vertical de um campo magnético B na direção z gerada num atuador com magnetização M_m e volume V é dada pela equação [28]:

$$F = M_m \int_V \frac{dB}{dz} dV \quad (5)$$

Quando uma microválvula eletromagnética é fabricada a maior dificuldade é encontrar a melhor posição para a bobina que vai produzir o campo magnético. Existem duas configurações possíveis: a externa, onde a bobina fica fora da microválvula [29] e a interna, onde a bobina fica localizada entre o substrato e o atuador [30]. As Figuras 10 e 11 mostram as duas possíveis configurações de válvula eletromagnética.

Microválvula ABERTA

$$P_{en} > P_{saída}$$

Microválvula FECHADA

$$P_{en} > P_{saída}$$

Legenda:

Substrato com Microcanal	Bobina que Produz o Campo Magnético
Atuador Feito com FeNi	

Figura 10: Microválvula eletromagnética onde a bobina que produz o campo está localizada fora do dispositivo. No desenho P_{en} significa pressão na entrada e $P_{saída}$ é pressão medida na saída da microválvula e I é a corrente induzida na bobina.

Microválvula ABERTA

Microválvula FECHADA

$$P_{en} > P_{saída}$$

Legenda:

Substrato com Microcanal	Bobina que Produz o Campo Magnético
Atuador Feito com FeNi	

Figura 11: Microválvula eletromagnética onde a bobina foi posicionada no interior do dispositivo. No desenho P_{en} significa pressão na entrada e $P_{saída}$ é a pressão medida na saída da microválvula e I é a corrente induzida na bobina.

1.3.7 Atuador eletroquímico

O atuador eletroquímico baseia-se no mesmo princípio que o do atuador termopneumático: aumentar a pressão de um material confinado em uma câmara através do aumento seu volume, pressionando o atuador que está em contato. A diferença é que no princípio termopneumático o líquido é aquecido até virar vapor e no princípio eletroquímico o gás é gerado pela eletrólise da água conforme a reação dada pela equação [31]:

Assim, como o volume do gás é maior que o do líquido, a pressão no interior da câmara aumentará. Para que o atuador volte à posição original é necessária uma reação inversa para converter os gases em água, que ocorre conforme a reação dada pela equação [31]:

1.3.8 Atuador piezoelétrico

A piezoelectricidade é a capacidade de certos materiais sofrerem uma deformação quando um campo elétrico é aplicado e vice versa. O material pode expandir-se ou contrair-se dependendo do sentido do campo aplicado. Para que um material seja utilizado como atuador é necessário que tenha um bom coeficiente piezoelétrico (é o fator que mede a deformação do material quando um campo é aplicado). Os materiais piezoelétricos podem ser divididos em dois grupos: piezocerâmicas e piezopolímeros. A piezocerâmica mais usada na construção de atuadores é o titanato zirconato de chumbo (PZT) [32] e o piezopolímero mais usado é o PVDF ou Poli(fluoreto de vinilideno) [33].

O PZT é uma cerâmica que possui o coeficiente piezoelétrico 10 vezes maior que o do PVDF, por isso é bastante usada na construção de válvulas para a microfluídica [34,35]. A desvantagem é seu alto custo e a dificuldade em modelar no formato do atuador desejado (esta cerâmica é um material frágil). O uso do PVDF como material piezoelétrico na construção de dispositivos em geral tem aumentado nos últimos tempos [27,36], pois as folhas do polímero são fabricadas e vendidas em diversos tamanhos e espessuras [37,38]. Outra vantagem é o preço do PVDF, que é um material de menor custo quando comparado ao similar cerâmico (o preço de uma folha de polímero de mesma área que uma cerâmica chega a ser 1 décimo).

Para que um material piezoelétrico seja usado na fabricação de uma microválvula é necessário que ele tenha um movimento vertical para exercer a função de abertura e fechamento. Existem duas configurações possíveis para que o atuador exerça um movimento vertical: a configuração bimorfo e a unimorfo [31]. O atuador bimorfo é obtido quando duas camadas do material piezoelétrico são coladas de maneira que suas polaridades fiquem opostas. Assim quando o campo elétrico é aplicado uma camada expande enquanto a outra contrai o que gera um movimento vertical. Já o atuador unimorfo é obtido quando uma camada do material piezoelétrico é colada a um material de mesma espessura, mas que não possui as propriedades piezoelétricas. Quando o campo elétrico é aplicado à camada piezoelétrica ela se dilata ou contrai, mas a outra camada se mantém estática e isso gera o movimento vertical. A Figura 12 mostra o desenho esquemático de uma microválvula feita usando um atuador piezoelétrico.

Analizando todos os princípios de atuadores para a fabricação de microválvulas foi escolhido o princípio de atuação piezoelétrica, usando a material PVDF como atuador. O PVDF como componente ativo de uma microválvula ainda não havia sido testado. A vantagem de utilizar este material é seu baixo custo e a facilidade em obter uma estrutura bimorfa no formato e tamanho desejados. O substrato escolhido foi o vidro, que também é um material de baixo custo e as técnicas de fabricação de microcanais utilizadas não exigiram equipamentos caros ou de sala limpa para a realização das etapas de fabricação.

No capítulo de materiais e métodos serão descritas as etapas realizadas para a construção da microválvula, bem como para a linha de teste montada para a aplicação do dispositivo. No capítulo de resultados será mostrado o desempenho do dispositivo em diferentes situações, bem como analisado o deslocamento obtido com o atuador bimorfo fabricado. Por último serão apresentados as conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.

Microválvula ABERTA

Microválvula FECHADA

Legenda:

Adesivo	Atuador Bimorfo Piezoelétrico
Membrana Flexível	
Substrato com os Microcanais	

Figura 12: Desenho esquemático de uma microválvula piezoelétrica. Quando o campo elétrico é aplicado o atuador bimorfo se movimenta e empurra a membrana na direção do substrato interrompendo o fluxo de gás que passa pelo dispositivo. No desenho P_{en} significa pressão na entrada e $P_{saída}$ é a pressão medida na saída da microválvula.

Capítulo 2

Materiais e métodos

Neste capítulo serão mostrados as técnicas e materiais empregados na fabricação e no teste da microválvula. O capítulo foi dividido em quatro seções: desenvolvimento e fabricação de um atuador piezelétrico bimorfo, desenvolvimento de microbocais em um substrato de vidro usando a técnica de jateamento, deposição de filmes finos por plasma metálico, montagem da microválvula usando o atuador piezoelétrico e o microbocal de vidro e por último os procedimentos para teste.

2.1 Desenvolvimento e fabricação de um atuador piezelétrico bimorfo

O material utilizado na fabricação do atuador foi o polímero semicristalino poli(fluoreto de vinilideno), PVDF, cuja fórmula química é $-\text{CH}_2-\text{CF}_2-$. Esse polímero pode cristalizar-se em pelo menos quatro fases cristalinas, conhecidas como α , β , γ e δ [39,40]. A predominância de cada fase depende fundamentalmente das condições de processamento da amostra. A fase mais facilmente formada é a α , onde os dipolos estão alinhados antiparalelamente na célula unitária, fornecendo baixa atividade piezelétrica. A fase β é a mais desejável sob o ponto de vista tecnológico por fornecer ao polímero mais intensas atividades piro e piezelétricas. Essa fase é facilmente obtida pelo estiramento mecânico, uni ou biaxial, de filmes originalmente na fase α [41]. O processo é realizado a temperatura entre 80 e 100°C e a uma razão de estiramento de 4 a 6 vezes. Mesmo na fase ferroelétrica β o filme necessita ser polarizado para tornar-se piezelétrico. A polarização é realizada pela aplicação de um intenso campo elétrico ($\sim 2\text{MV/cm}$), normalmente utilizando a técnica de descarga corona. Essa técnica tem a vantagem de não necessitar de contato direto com os eletrodos da amostra, permitindo a polarização de grandes áreas e em um processo contínuo. Em processos industriais o estiramento e a polarização são realizados simultaneamente, o que agiliza a produção e resulta em coeficientes piezelétricos mais intensos.

Neste trabalho foram utilizados filmes de 25 μm comercializados pela Piezotech [37]. Esses filmes, biorientados e polarizados, foram fornecidos já recobertos com uma fina camada de ouro de 50 nm em uma das faces, que servirá como eletrodo. A Figura 13 mostra um desenho esquemático da configuração do polímero na fase β após ser estirado e polarizado. As setas indicam a orientação dos dipolos da cadeia $-\text{CH}_2-\text{CF}_2-$.

Figura 13: Configuração do polímero usado na fabricação dos atuadores. O polímero está na fase β com os dipolos orientados (as setas representam a orientação dos dipolos). Esta configuração é a que possui o coeficiente piezelétrico mais elevado.

As propriedades dos filmes utilizados, fornecidas pelo próprio fabricante, estão apresentadas na Figura 14.

Os materiais piezelétricos sofrem uma deformação mecânica quando sujeitos a uma tensão elétrica ou, inversamente, sob o efeito de uma tensão mecânica produzem uma tensão elétrica. No PVDF, como em todo material piezelétrico, os coeficientes piezelétricos dependem da direção do filme em que a tensão mecânica é aplicada e da direção em que o campo elétrico é aplicado. Por essa razão, o coeficiente piezelétrico é representado por um tensor d_{ij} , onde i é o índice que define a direção do campo elétrico e j é o índice que define a direção da tensão mecânica. A Figura 15 mostra um desenho esquemático do filme onde os índices 1, 2 e 3 representam as possíveis direções.

PIEZOTECH S.A.

BI-AXIALLY STRETCHED PVDF DATA SHEET (at 23°C)

PIEZO/PYRO ELECTRICAL PROPERTIES

d_{33}	pC/N	-20 ±10%
d_{31}	pC/N	5 ±20%
d_{32}	pC/N	5 ±20%
p_3	$\mu\text{C}/\text{m}^2\cdot\text{K}$	-21 ±25%

DIELECTRICAL PROPERTIES

ϵ_r	(at 1kHz)	12 ±10%
$\tan \delta$	(at 1kHz)	0.014 ±10%
DC breakdown voltage	V/ μm	400 ±30%
Maximum voltage to apply*	V/ μm	35 ±30%

*Note: Higher positive (resp. negative) voltage can be applied to negative (resp. positive) side.

MECHANICAL PROPERTIES

Young modulus (axis 1)	MPa	2500 ±20%
Young modulus (axis 2)	MPa	2500 ±20%
Stress at break (axis 1)	MPa	180 ±15%
Stress at break (axis 2)	MPa	180 ±15%
Elongation at break (axis 1)	%	50 ±30%
Elongation at break (axis 2)	%	50 ±30%
Density	kg/m^3	1800 ±5%

THERMAL PROPERTIES

Thermal expansion	$1/\text{K}$	$1.4 \cdot 10^{-3}$ ±10%
Specific heat	$\text{J}/\text{cm}^3\cdot\text{K}$	2.4 ±5%
Thermal conductivity	$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$	0.13 ±5%
Heat diffusion coeff.	m^2/s	$53 \cdot 10^{-9}$ ±5%
Melting temperature	°C	175 ±5%
Max. storage/use temperature	°C	70 ±5%

Theses informations are given as typical values. They don't engage Piezotech S.A responsibility.

Figura 14: Tabela de dados com as propriedades do polímero piezoelétrico adquirido da piezotech.

Figura 15: Desenho esquemático do filme piezoelétrico mostrando as possíveis direções do campo elétrico aplicado e da deformação sofrida pelo material.

Em nosso caso o campo elétrico será aplicado perpendicularmente à superfície do filme, ou seja, na direção 3. Como estamos interessados na deformação do filme na direção 1 do comprimento, é o coeficiente d_{31} que deve ser levado em consideração na hora de calcular a variação da dimensão do filme nessa direção. A equação usada para calcular a deformação do filme quando uma voltagem V é aplicada é dada por [42]:

$$\Delta l = \frac{l * d_{31} * V}{t} \quad (8)$$

onde Δl é o quanto o polímero deformou (metros), l é o comprimento inicial (metros), d_{31} é o coeficiente piezoelétrico (metro/volts) e t é a espessura do filme (metros). Através da equação (8) é possível concluir que, além do coeficiente piezoelétrico, a tensão aplicada, o comprimento e a espessura do filme influem na sua deformação.

Para se obter um movimento vertical de abertura e fechamento (pois o objetivo é usar o atuador como uma microválvula), é necessário colar um pedaço do filme a outro com polarização oposta. Assim quando o campo elétrico é aplicado uma folha expande enquanto a outra contrai, gerando um movimento vertical. Esta configuração é conhecida como atuador bimorfo [42]. A Figura 16 mostra um desenho esquemático do dispositivo obtido após a colagem das duas folhas do filme.

Figura 16: Desenho esquemático do atuador bimorfo. Quando a tensão é aplicada uma folha do PVDF expande enquanto a outra contrai, o que gera um deslocamento vertical.

Para a obtenção da estrutura bimorfo foi usada uma cola epóxi de baixa viscosidade para colar as duas folhas de PVDF com polarizações opostas. Para definir o tamanho e o formato do atuador foi necessário levar em conta a deflexão (Δ_z) e a força gerada (F) quando uma tensão DC é aplicada entre seus eletrodos. Para estimar os melhores valores de comprimento (l) e largura (w) do filme para uma dada deflexão e força foram usadas as seguintes equações [42]:

$$\Delta_z = \frac{3d_{31}l^2V}{4t^2} \quad (9)$$

onde Δ_z é o deslocamento vertical, d_{31} é o coeficiente piezoelétrico, l o comprimento, t a espessura do filme, respectivamente, e V a voltagem aplicada.

$$F = \frac{3Ywd_{31}tV}{2l} \quad (10)$$

onde Y é o módulo de Young do PVDF e w é a largura do filme.

É importante ressaltar que as equações (9) e (10) não levam em conta o recobrimento de ouro na superfície do filme (usado como eletrodo) e a cola que une as duas as folhas. A presença destas camadas reduz o movimento vertical da estrutura bimorfa.

Para verificar a validade da equação (9) para o atuador fabricado foi feita uma comparação entre a deflexão obtida pela equação com aquela medida experimentalmente, usando o aparato mostrado na Figura 17. A Figura 18 apresenta os resultados obtidos, onde os quadrados representam os valores experimentais e a linha

contínua foi obtida usando a equação (9). O Desvio máximo obtido foi de 10% que mostra uma boa concordância entre o modelo teórico e os valores experimentais.

Figura 17: Desenho esquemático do aparato experimental usado para medir a deflexão do atuador. Aplicando uma tensão DC entre os eletrodos ocorre um movimento vertical do atuador que muda a direção do feixe de laser refletido na superfície do CCD (charged coupled device). Com o aparato montado é possível medir os deslocamentos do atuador com 0,1 μ m de precisão.

Figura 18: Deslocamento vertical medido para o atuador bimorfo feito com filmes de PVDF de 25 μ m de espessura, 17 mm de comprimento e 7 mm de largura.

A sequência de fabricação do atuador piezelétrico é apresentada em etapas que serão descritas a seguir. A Figura 19 ilustra essas etapas.

(a) A folha de PVDF (com espessura de 25 μm e recoberta com um filme de ouro) é recortada em dois quadrados de 30 x 30 mm^2 .

(b) Uma diluição de 0,6 gramas do adesivo epóxi Araldite Cristal[®] é realizada em 0,2 ml de xylol para redução de sua viscosidade.

(c) Um dos quadrados de polímero recortados em (a) é preso a um substrato de silício e colocado em um spinner (prato giratório que espalha a cola de maneira uniforme na superfície do polímero). Utilizando velocidade de 5000 rpm por 10 s o adesivo diluído é depositado na superfície do PVDF.

(d) O segundo quadrado de polímero é unido com o primeiro com o cuidado de se colocar as polarizações das duas partes em direções opostas, para se obter uma estrutura bimorfa (assim quando o campo é aplicado, uma folha expande enquanto a outra contrai, gerando o movimento vertical).

(e) Após a colagem o atuador é removido do substrato de silício e, utilizando uma tesoura, retângulos de 3 mm de largura por 6 mm de comprimento são recortados.

A Figura 20 mostra o atuador obtido após as etapas de fabricação.

Figura 19: Etapas de fabricação: (a) vista superior da folha do polímero com ouro antes e depois do corte; (b) diluição da cola Araldite; (c) um dos quadrados do filme cortado é preso a um substrato e uma camada homogênea de cola é depositada na sua superfície usando um spinner; (d) visão lateral mostrando os dois pedaços dos filmes após serem colados. O sinal $\pm$ ao lado de cada parte do filme indica o sentido de polarização; (e) visão superior do dispositivo final após o processo de corte.

Figura 20: Visão superior do atuador piezelétrico após o processo de fabricação, pronto para ser integrado ao substrato que contém o microbocal para compor a microválvula (o menor traço na régua equivale a meio milímetro).

Tendo o atuador fabricado a próxima etapa consiste no desenvolvimento dos microbocais. As etapas de fabricação estão descritas na próxima seção.

2.2 Desenvolvimento de microbocais em substrato de vidro usando a técnica de jateamento

A técnica de microfabricação de canais com dimensões submilimétricas é bem desenvolvida para substratos de silício por ser um material bastante usado em microeletrônica [43,44,45]. Mascarando a superfície do silício é possível remover as áreas expostas e o perfil da erosão (circular ou piramidal) vai depender da solução ou do gás empregado (corrosão úmida ou seca). A maior dificuldade encontrada é a obtenção de microestruturas com formato cônico, pois as técnicas de erosão anisotrópica desenvolvidas geram um formato do bocal piramidal. Os bocais com formato piramidal, quando submetidos a teste em linha de gás [46], geram vórtices na região dos vértices e, por isso, tem uma vazão mássica menor quando comparado com um bocal cônico nas mesmas condições.

A opção escolhida para o presente trabalho foi a obtenção de um microbocal com formato cônico, usando a técnica de jateamento. A escolha da técnica de fabricação se baseou no baixo custo envolvido, não exigindo equipamentos caros ou de sala limpa para sua realização. Mascarando a superfície do substrato é possível expor pequenas áreas e o perfil da erosão é cônico. Outra vantagem é que o substrato pode ser de qualquer material quebradiço como o silício, o vidro ou até a ferrite (material usado na

fabricação de ímãs). Para a fabricação dos bocais foi usado o vidro como substrato por ser um material de baixo custo e disponível em diversas espessuras.

2.2.1 A técnica de jateamento

O jateamento é muito usado para criar gravuras em vidro e para remover camadas de sujeira de peças metálicas. Se a superfície do material for mascarada (ou seja, expomos apenas pequenas áreas do substrato) e o material exposto ao jato de alumina, é possível fabricar microestruturas na sua superfície.

Para jatear o pó na superfície do vidro foi montado um equipamento que permite o controle da distância entre a amostra e o bico jateador, do ângulo entre o jato de partículas e a amostra e a remoção das partículas que já incidiram no substrato. Um esquema do equipamento montado é apresentado na Figura 21.

O jato das partículas é direcionado para o substrato sendo acelerado por um fluxo de ar em alta pressão. A mistura entre o ar e o pó ocorre quando o fluxo de ar entra dentro do reservatório das partículas. Depois a mistura entra por um tubo metálico de 3 mm de diâmetro e sai pelo bico de mesmo diâmetro. As partículas atingem o substrato em uma caixa fechada que é ventilada por um aspirador de pó, que remove as partículas que já incidiram na amostra. A Figura 22 mostra a foto do equipamento montado.

Figura 21: Desenho esquemático do aparato experimental montado.

Figura 22: Fotografia do sistema montado para jatear o pó de alumina na superfície do substrato de vidro.

2.2.2 O processo de erosão

Existem três classes de materiais que devem ser considerados para o jateamento: materiais dúcteis (metais), elastômeros (borracha) e materiais quebradiços (vidro e silício). Os materiais dúcteis e elastômeros têm baixa taxa de erosão (quando comparado com os materiais quebradiços), por esse motivo eles são usados na fabricação das máscaras [47,48]. Quando um material quebradiço é atingido por uma partícula acelerada, a área de impacto é deformada devido à pressão compressiva. A pressão gerada na superfície depois do impacto gera trincamentos que causam a remoção do material como mostrado na Figura 23.

(a)

(b)

Figura 23: (a) Diagrama mostrando as etapas do processo de erosão. (b) Propagação das micro trincas durante o processo de indentação na superfície do substrato.

O trincamento radial (mostrado na Figura 23 (b)) gerado durante o processo de endentação é o responsável pelo perfil anisotrópico da erosão, pois as próximas partículas que incidirem na amostra vão aumentar o desbaste nesta região.

Os modelos teóricos desenvolvidos para determinar a taxa de erosão e rugosidade consideram o processo de desbaste como a soma dos impactos de várias partículas independentes [49].

2.2.3 Parâmetros que influenciam o jateamento

Antes de iniciar o processo de desbaste é importante ajustar e controlar as variáveis citadas a seguir para permitir a reprodutibilidade das micro estruturas fabricadas.

(a) Distância do bico jateador à amostra e pressão do ar

Estes parâmetros são muito importantes, pois eles estão diretamente ligados ao valor da energia cinética da partícula (a diferença de pressão a que o ar está sujeito acelera as partículas imprimindo-lhes velocidade). A equação a seguir mostra como o volume da endentação está diretamente ligado com a quantidade de energia cinética de cada partícula.

$$\delta V = \frac{U_{Cin}}{H} \quad (11)$$

onde δV é o volume de material desbastado, U_{Cin} é a energia cinética das partículas (em Joule) e H é a dureza definida como F/A_{Ind} (sendo F a força para a obtenção da endentação (em Newtons) e A_{Ind} é a área da superfície de incidência (em m^2)). A equação (11) foi deduzida por Slikkerver e está descrita na referência [49].

A Tabela 1 mostra a dependência da energia cinética com a pressão do ar comprimido (sendo a pressão de saída dada por uma atmosfera) e a distância do bico jateador à amostra.

		Pressão (x 10 ⁵ Pa)					
		1	1,5	2	2,5	3	
Distância do bico à amostra (cm)	4	2,5	4,5	6,5	7,5	8,0	Energia Medida (μJ)
	5,5	2,2	4,0	5,5	6,0	6,5	
	7	2,0	3,7	5,0	5,5	6,2	
	8,5	1,5	2,8	4,2	5,0	5,5	

Tabela 1: Valores de energia obtidos medindo a velocidade (lembrando que

$U_{Cin} = \frac{mv^2}{2}$ com $m = 0,45 \mu g$). As medidas foram feitas por Belloy et al. e estão descritas na referência [48]. As partículas usadas tinham um diâmetro médio de 30μm. Usando baixas distâncias do bico à amostra e alta pressão é possível se obter uma alta taxa de erosão.

Para fabricar os microbocais no vidro usamos uma distância entre o bico e a amostra de 4 cm e uma pressão de 300000 Pa para o ar comprimido.

(b) Diâmetro dos orifícios das máscaras

O outro parâmetro importante é o tamanho dos orifícios presentes na máscara que expõem determinadas áreas do substrato que serão removidas pelo processo de erosão. Os diâmetros dos orifícios influenciam no tempo necessário para que a erosão atinja uma determinada profundidade no substrato. A Tabela 2 mostra a dependência do diâmetro dos orifícios com a profundidade atingida num determinado espaço de tempo.

		Diâmetro dos orifícios (μm)				Profundidade da erosão obtida (μm)
		150	200	300	1000	
Tempo de erosão (s)	10	20	50	100	250	
	30	40	100	200	300	
	60	50	200	- - -	400	
	90	70	- - -	- - -	450	
	120	100	- - -	- - -	500	
	150	- - -	- - -	- - -	550	
	180	- - -	- - -	- - -	600	

Tabela 2: Profundidade da erosão em função do diâmetro dos orifícios presentes na máscara. Os valores foram obtidos usando uma máscara de ferro de 0,5 mm de espessura e o pó usado no desbaste da superfície foi o óxido de alumínio com diâmetro médio das partículas de 30 μm . Estas medidas foram obtidas usando a máquina de jateamento montada no laboratório (mostrada na Figura 22).

(c) Tamanho das partículas usadas no processo de erosão

Durante o processo foram usadas partículas angulosas de alumina (Al_2O_3), pois é um material de baixo custo, não tóxico e de fácil aquisição.

O critério para a escolha da granulometria é que o diâmetro médio das partículas seja no máximo um terço do diâmetro da estrutura que se deseja fabricar [48]. Se estivermos

fabricando bocais com diâmetro de garganta de 230 μm é adequado usar partículas com diâmetro máximo de 75 μm . O pó usado tem partículas com diâmetro médio de 30 μm e foi adquirido da Treinbacher Schleimittel (alumina código EK8A-FFF). A Figura 24 mostra uma micrografia eletrônica de varredura do pó usado para os processos de microfabricação deste trabalho.

Figura 24: Micrografia eletrônica de varredura do pó de alumina adquirido da Treinbacher usado no processo de jateamento.

(d) Tipo de material usado para o substrato e para o mascaramento

As características dos materiais influenciam o processo de erosão. Materiais quebradiços como o vidro ou o silício tem uma taxa mais alta de erosão quando comparados com os materiais dúcteis ou elastômeros.

Para que os resultados sejam reproduzíveis é importante que os substratos no processo de erosão tenham a mesma composição. Para os experimentos realizados foram usados substratos de vidro de 1,2 mm de espessura adquiridos da Perfecta Vidros.

Um material pode ser usado como máscara, no processo de jateamento, se tiver baixa erosão e permitir a fabricação de orifícios na sua superfície. Existem diversos materiais que já foram testados como máscara. Um material muito utilizado é o polímero Ordil, material que permite fabricar estruturas por fotolitografia. Outro tipo de material

também muito utilizado são os metais, onde as estruturas podem ser fabricadas por laser ou por furação [47].

Para proteger o vidro e expor apenas as áreas desejadas foi usada uma máscara de ferro de 0,5 mm de espessura com furos de 1 mm de diâmetro feitos com o auxílio de uma furadeira. Para a obtenção da máscara foi cortada uma chapa de ferro no formato desejado e, usando uma broca para metal de 1 mm de diâmetro, foi feito um orifício.

A Figura 25 mostra um esquema das etapas necessárias para fabricar microestruturas no vidro usando o jateamento e a Figura 26 mostra uma micrografia ótica do orifício da máscara usada durante o processo.

Figura 25: Etapas necessárias para fabricar microestruturas em vidro por jateamento, usando uma máscara metálica para expor apenas pequenas regiões do substrato ao jato de partículas.

Figura 26: Micrografia ótica do orifício de uma máscara metálica usada para proteger a superfície do substrato de vidro. O orifício foi feito para expor a região circular de 1 mm de diâmetro do substrato de vidro.

2.2.4 Etapas de fabricação do microbocal

Nesta subseção serão discutidas as etapas necessárias para a fabricação de microbocais em vidro. A Figura 27 mostra o desenho esquemático das etapas realizadas. A fabricação é dividida em 5 partes:

- (a) A primeira etapa consiste da fabricação da máscara metálica. Inicialmente a chapa de ferro de 0,5 mm de espessura é cortada em quadrados de $20 \times 20 \text{ mm}^2$ e depois é realizando o furo de 1 mm de diâmetro no centro.
- (b) Usando uma cola plástica a máscara é colada na superfície do substrato de vidro (de $25 \times 25 \text{ mm}^2$ de área) de 1,2 mm de espessura.
- (c) A seguir o jateamento é feito usando os seguintes parâmetros: distância do bico ao substrato de 4 cm, pressão do ar comprimido de 300000 Pa e as partículas usadas foram de alumina de 30 μm de diâmetro médio. A profundidade atingida foi de 600 μm após 3 minutos de erosão.

(d) O processo feito em (c) é repetido agora no verso do substrato. É importante alinhar a máscara no segundo processo para que as duas erosões saiam alinhadas, obtendo assim um microbocal cônico convergente-divergente.

(e) A máscara é então removida e o substrato é limpo, inicialmente com água e detergente e posteriormente com álcool isopropílico.

Figura 27: Desenho esquemático mostrando as etapas necessárias para a fabricação de um microbocal em vidro usando a técnica de jateamento.

A Figura 28 mostra microbocais obtidos com a técnica de jateamento. É importante ressaltar que o diâmetro dos orifícios foi alterado para obter diferentes estruturas.

Figura 28 (a): Micrografias eletrônicas de varredura de bocal fabricado por jateamento: diâmetro externo de 1 mm e diâmetro interno de 133 μm (visão superior e lateral).

Figura 28 (b): Micrografias eletrônicas de varredura de bocal fabricado por jateamento: diâmetro externo de 1,1 mm e diâmetro interno de 245 μm (visão superior e lateral).

Figura 28 (c): Micrografias eletrônicas de varredura de bocal fabricado por jateamento: diâmetro externo de 1,4 mm e diâmetro interno de 380 μm (visão superior e lateral).

2.2.5 Deposição de um filme fino de platina na superfície do substrato

Para tornar o substrato condutor foi depositado um filme fino de platina de 200 nm de espessura na sua superfície por MePIIID (deposição de filme por plasma metálico que será descrito a seguir). Para fabricar a microválvula o atuador bimorfo deve ser posicionado na saída do bocal ficando preso ao substrato. Assim o eletrodo inferior do atuador fica em contato com a superfície condutora e, aplicando uma diferença de potencial elétrico entre o filme de platina e o eletrodo superior, o atuador se movimenta. A Figura 29 (a) mostra um substrato de vidro com um microbocal fabricado e recoberto com o filme de Pt. A Figura 29 (b) mostra um desenho com a posição das conexões elétricas necessárias para aplicar tensão nos eletrodos do atuador para movimentá-lo. É importante ressaltar que a seção de estrangulamento do dispositivo ocorre na garganta e não na região onde o atuador está posicionado.

Figura 29 (a): Vista superior de um substrato de vidro com um microbocal recoberto com um filme de platina de espessura de 200 nm. (a escala da régua está em centímetro).

Legenda:

+ e - são os sinais das cargas dos eletrodos do atuador

↓ e ↑ são o sentido de polarização do polímero

OBS: O desenho está fora de escala

Figura 29 (b): Desenho esquemático mostrando a posição das conexões elétricas em relação ao atuador e ao substrato.

2.3 Deposição de filmes finos por plasma metálico

(MePIIID – Metal Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition) [50]

Plasma metálico é obtido através de uma descarga em vácuo entre um catodo, fabricado do material que se pretende depositar o filme, e um anodo (de alumínio ou aço).

O material do catodo sofre uma transição do estado sólido para um plasma de não equilíbrio; ou seja, o depósito de filme por MePIIID não deve ser confundido com evaporação ou sputtering. A pressão no catodo é extremamente alta (maior de 10^{10} Pa) por isso o plasma se expande rapidamente na câmara de vácuo. Neste processo ocorre também a formação de macropartículas, também do material do catodo. Estas partículas têm dimensões entre cerca de 0,1 e 10 μm e são chamadas assim por serem muito maiores que a própria espessura do filme depositado pela técnica.

O método mais comum para separarmos as macropartículas do plasma é utilizar um filtro magnético curvo. Quando o plasma, contaminado pelas macropartículas, entra no interior do filtro as trajetórias das macropartículas não serão afetadas pelo campo magnético da bobina devido a sua grande massa. Já o plasma será guiado pelo campo magnético curvo do interior do filtro até a sua saída onde se encontra o substrato. A Figura 30 mostra em detalhe a trajetória percorrida pelo plasma e as macropartículas no

interior do filtro. A perda de plasma ao longo do filtro de partículas é grande, sendo de cerca de 80%, mas a deposição de filmes sem a presença de macropartículas é de excelente qualidade.

Figura 30: Fotografia do filtro de partículas. As macropartículas mantêm sua trajetória retilínea e o plasma é guiado pelo campo magnético curvo criado pela bobina.

O sistema MePIIID presente no Laboratório de Filmes Finos possui três bombas de vácuo sendo uma mecânica, uma turbo molecular e uma de aprisionamento. A câmara de vácuo que está mostrada na Figura 31 foi feita de aço inox e tem o formato de um paralelepípedo, sendo suas dimensões de $90 \times 90 \times 45 \text{ cm}^3$.

Figura 31: Visão externa da câmara de vácuo usada na deposição de filmes por MePIIID.

No interior da câmara existe um porta amostra localizado em frente à saída do filtro de partículas onde o substrato é posicionado. Na entrada do filtro temos a fonte de plasma que é composta do catodo na forma de bastão, feito do material que se pretende depositar o filme, e um anodo cilíndrico, estando estas duas peças isoladas por uma capa cerâmica em torno do catodo. O plasma do material do catodo é gerado através de descargas pulsadas entre o catodo e o anodo, com corrente entre 50 e 300 A e duração entre 0,1 e 10 ms. Durante a descarga ocorre um faiscamento distribuído aleatoriamente na superfície do catodo. O anodo é passivo, agindo como um coletor de elétrons. Uma bobina enrolada no próprio anodo ligada em série com a descarga, focaliza o plasma através do campo magnético axial que se forma. Ainda ligada em série com a descarga, entre catodo e anodo, está o filtro de partículas.

A Figura 32 mostra um desenho esquemático do filtro e da fonte de plasma usados durante a deposição do filme.

Figura 32: Desenho esquemático do filtro e da fonte de plasma usados na deposição do filme metálico.

A taxa de deposição para uma área circular de aproximadamente 5 cm de diâmetro é de 0,1 nm por pulso. A qualidade do filme é especialmente boa quanto à homogeneidade, visto que o filtro de partículas é muito eficiente e quanto à pureza química, desde que os elementos presentes na câmara reagente são apenas os de interesse para o filme.

Para a deposição de um filme de platina na superfície do substrato de vidro que contém o microbocal o substrato de vidro foi posicionado a 6 centímetros da saída do filtro de partículas e a câmara foi submetida a uma pressão de base de 8×10^{-4} Pa. O tempo de deposição foi de 41 minutos, lembrando que a duração do plasma foi de 5 ms a cada segundo. A espessura do filme obtida foi de 200 nanômetros, apresentando uma excelente adesão com o substrato de vidro e tornando sua superfície condutora gerando uma resistência de 7 Ohms considerando um comprimento de 25 milímetros.

2.4 Montagem da microválvula usando o atuador piezoelétrico e o microbocal de vidro e procedimento para teste

Usando uma fita isolante o atuador bimorfo fabricado é preso e alinhado ao microcanal existente no substrato de vidro que está recoberto com filme de Pt. Usando cola de carbono (tinta condutora) os fios das conexões elétricas são colados ao substrato (que está em contato com o eletrodo inferior do atuador) e ao eletrodo superior do atuador. Por último o dispositivo é encapsulado por uma lâmina de vidro que está perfurada o por um furo circular de 2 mm de diâmetro (o encapsulamento é a proteção

feita para que o atuador e o microbocal não fiquem expostos diretamente ao meio externo).

A Figura 33 mostra o dispositivo depois de montado e encapsulado, pronto para os testes. Já a Figura 34 mostra as etapas para a obtenção do dispositivo.

Figura 33: Vista superior do dispositivo depois de montado. Nas bordas é passada uma cola epóxi branca para prevenir vazamentos pelas laterais do atuador (a escala da régua está em centímetros).

Figura 34: Etapas para a obtenção do dispositivo: (a) fabricação do microbocal por jateamento. (b) Deposição de um filme de platina de 200 nm em uma das faces. (c) Fabricação do atuador bimorfo piezoelétrico, integração ao substrato condutor que contém um microbocal, colagem dos fios elétricos, encapsulamento com vidro perfurado para passagem de gás pelo orifício de 2 mm de diâmetro e vedação lateral com epóxi branco (a escala da régua está em centímetros).

2.4.1 Mecanismo de funcionamento

(a) Usando tensão DC

Foram realizados testes aplicando tensão DC positiva (+) e negativa (-) no eletrodo superior do atuador e mantendo a superfície condutora do substrato (que está em contato com eletrodo inferior do atuador) aterrada, ou seja, quando o eletrodo superior está carregado positivamente (+) o inferior age como negativo (-) e quando o eletrodo superior está carregado negativamente (-) o inferior age como positivo (+).

Aplicando uma tensão DC onde o eletrodo superior está positivo ocorre uma abertura, ou seja, passa mais gás pelo dispositivo quando comparado ao caso fechado. Aplicando uma tensão DC onde o eletrodo superior está negativo ocorre um fechamento passando menos gás pela linha quando comparado com o caso aberto.

A Figura 35 mostra o comportamento do atuador quando é aplicada uma tensão DC entre os eletrodos.

Note que uma camada expande enquanto a outra contrai por causa da polaridade que cada camada do PVDF possui

Figura 35: Comportamento do atuador piezoelétrico quando é aplicada uma tensão DC: (a) quando o eletrodo superior está negativo e o eletrodo inferior está positivo ocorre um movimento para baixo (fechamento) (b) quando o eletrodo superior está positivo e o inferior está negativo ocorre um movimento para cima (abertura).

(b) Usando Tensão AC (corrente alternada)

Aplicando uma tensão AC o atuador tem um movimento oscilatório que depende da frequência do sinal. Os testes foram feitos com a amplitude do sinal mantida constante (200 V) e a frequência utilizada foi de 5 Hz, ou seja, o atuador realizava 5 ciclos por segundo. Para que o atuador possa vibrar ele é colocado um pouco acima da saída do bocal, existindo um vão entre o atuador e o substrato. A Figura 36 mostra um desenho esquemático da microválvula montada, mostrando a disposição do atuador e do microbocal.

Figura 36: Desenho esquemático da microválvula mostrando a posição do atuador e do microbocal. Existe um vão de 100 μm entre os dois para que o atuador possa vibrar quando a tensão AC é aplicada.

2.4.2 Montagem de uma linha de teste para verificar a performance da microválvula

Para testar o dispositivo nos diferentes regimes de funcionamento (aberto DC, fechado DC e oscilando AC) foi montado um sistema que mede a variação de pressão de uma câmara, que está isolada do meio externo, em função do tempo. A passagem de gás para esta câmara gera um aumento de pressão e ocorre apenas por uma linha que contém o microatuador e o bocal.

O desenho esquemático do sistema montado está representado na Figura 37 (a) e a montagem será descrita a seguir. Partimos de um recipiente Y de volume conhecido, com uma dada pressão inicial. A montagem experimental faz com que a única maneira de entrar gás nesta câmara é através de um tubo que o conecta a outro reservatório X de pressão inicial maior (os dois estão isolados do meio externo). O aumento de pressão no

reservatório Y ocorre devido ao gás que sai do recipiente X, passa pelo dispositivo a ser testado (microbocal com microválvula integrada) e chega ao seu interior. Movimentando o atuador piezoelétrico (abrindo, fechando ou oscilando) a quantidade de gás por unidade de tempo que chega ao recipiente Y pode ser maior ou menor. Medindo o aumento de pressão com o tempo, para cada regime de atuação, é possível calcular a vazão em cada situação, caracterizando assim o dispositivo.

2.4.3 Condições iniciais adotadas para a realização das medidas

O recipiente denotado X tem a forma de um paralelepípedo de 263 litros de volume interno (V_x) e pressão inicial P_x de 266 Pa. Já o recipiente denotado Y tem a forma de um cilindro de volume interno de 0,343 litros (V_y) e pressão inicial P_y de 4 Pa. Em cada reservatório foi colocado um medidor de pressão tipo pirani (modelo APG-M) da BOC Edwards. O medidor funciona da seguinte forma: para cada valor de pressão o medidor associa um valor de voltagem e, através de uma eletrônica adquirida com o medidor, é possível se obter o valor da pressão. O manual de instruções do medidor fornece a curva tensão DC versus pressão (Pascal), o que possibilita dispensar a eletrônica original do medidor e utilizar um sistema denotado por *data acquisition switch* da Agilent modelo 34970A.

O tempo de resposta do medidor devido à variação de pressão no interior da câmara é de 0,1 segundos (informação obtida do manual do medidor). O valor da tensão DC gerado pelo medidor é aquisitado por este equipamento que está ligado a um computador, onde os valores de tensão são armazenados em arquivos e posteriormente transformados em valores de pressão. O intervalo de aquisição da voltagem emitida pelo medidor foi de 1 segundo. As informações contidas nos arquivos são organizadas em quatro colunas: a primeira é a coluna do tempo (intervalo de tempo entre cada aquisição), a segunda coluna é a tensão medida pelo medidor presente na câmara X, a terceira coluna é a tensão medida pelo medidor presente na câmara Y e a quarta coluna é a medida da temperatura ambiente durante a aquisição dos dados.

A Figura 37 (b) mostra uma fotografia do aparato experimental montado para testar o dispositivo composto por microbocal com microválvula integrada, para os diferentes regimes de atuação.

(a)

Legenda:

A – Medidor de pressão pirani (modelo APG-M da Boc Edwards).

Y – Câmara Y com $P_y < P_x$ (condição inicial), sendo V_y igual a 0,343 litros.

O – Válvula modelo Swigelok abre/fecha.

D – Dispositivo com a microválvula acoplada.

(b)

Figura 37: (a) Desenho esquemático do aparato experimental montado para medir o fluxo de gás que passa pelo dispositivo; (b) fotografia mostrando a disposição dos componentes que compõe o sistema de teste.

Quando a linha de gás que liga as duas câmaras é aberta é possível medir-se com precisão o aumento de pressão na câmara Y (que inicialmente está a uma pressão de 4 Pa) em função do tempo. Considerando os volumes e pressões iniciais e finais das câmaras X e Y, a variação da pressão na câmara X é inferior a 1%. Assim, a pressão em X será considerada constante durante os experimentos.

A Figura 38 mostra uma foto do sistema usado na aquisição do sinal DC gerado pelos medidores de pressão durante a variação de pressão das duas câmaras.

O gás utilizado em todas as medidas foi o ar atmosférico.

Figura 38: Sistema de aquisição de dados usado para monitorar a variação de pressão das duas câmaras.

2.4.4 Dedução da expressão usada no cálculo de fluxo de gás que passa pelo dispositivo por unidade de tempo

Tendo a curva de pressão versus tempo e o volume da câmara que está conectada a saída do dispositivo é possível deduzir uma expressão para o fluxo de gás que passa pelo dispositivo. Nas pressões e temperaturas envolvidas (temperatura ambiente de 296

K e pressões na faixa de 266 Pa), o gás (ar atmosférico) pode ser considerado como um gás ideal. A equação de estado do gás ideal é dada por:

$$P_s V_s = N_s R T \quad (12)$$

onde:

P_s = pressão do gás na saída do dispositivo,

V_s = volume da câmara de saída (Y),

N_s = número de moles de gás na câmara de saída,

R = constante universal dos gases,

T = temperatura absoluta (ambiente).

Lembrando que

$$N_s = \frac{m_s}{M} \quad (13)$$

onde

m_s = massa de gás na câmara de saída do dispositivo,

M = massa molar média do ar atmosférico (28,96 g/mol),

e substituindo a expressão (13) em (12) temos que:

$$P_s V_s = \frac{m_s R T}{M} \quad (14)$$

e isolando m_s chegamos a seguinte expressão:

$$m_s = \frac{M P_s V_s}{R T} \quad (14a)$$

Derivando a expressão (14a) obtemos o fluxo de massa (kg/s):

$$\frac{dm_s}{dt} = \frac{M V_s}{R T} \frac{dP_s}{dt} \quad (\text{kg/s}) \quad (15)$$

Calculando o volume do gás, temos:

$$V_{gás} = \frac{m_s}{\rho_{entrada}} = \frac{M P_s V_s}{\rho_{entrada} RT} \quad (16)$$

onde $\rho_{entrada}$ é a densidade de gás na entrada do bocal.

Como estamos interessados no cálculo da variação de fluxo de gás por unidade de tempo é necessário calcular a derivada $dV_{gás}/dt$:

$$\frac{dV_{gás}}{dt} = \frac{1}{\rho_{entrada}} \frac{dm_s}{dt} = \frac{M V_s}{\rho_{entrada} RT} \frac{dP_s}{dt} \quad (\text{cm}^3/\text{s}) \quad (17)$$

onde as grandezas M , V_s , $\rho_{entrada}$, R e T são constantes.

Para calcular a derivada dP_s/dt foram usadas as curvas de pressão versus tempo. Foi encontrado o polinômio que melhor se ajustou a cada curva e a derivada dP_s/dt foi calculada. Substituindo na equação (17) o fluxo de gás $dV_{gás}/dt$ foi calculado.

Capítulo 3

Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos referentes ao deslocamento do atuador bimorfo piezoelétrico aplicando diferentes valores de tensão DC a AC. Serão também mostrados os testes na linha de gás para microbocais fabricados de diferentes diâmetros sem atuador na saída, para diferentes valores de pressão de entrada. Por fim, serão apresentados os testes na linha de gás para dispositivo composto por microbocal e atuador preso em sua saída, para diferentes regimes de atuação (aplicando tensão DC e AC).

3.1 Medida do deslocamento do atuador piezoelétrico bimorfo

O atuador foi testado aplicando três diferentes valores de tensões DC: +300 V, +200 V e -300 V no eletrodo superior. Os testes também foram realizados com tensão AC aplicando 200 V AC com 5 Hz de frequência do sinal. Quando uma tensão DC é aplicada o atuador tem um deslocamento vertical de abertura ou de fechamento dependendo o sinal da tensão. Para a realização dos testes de movimentação o atuador foi preso à superfície de substrato condutor (vidro recoberto com um filme de Pt) e as conexões elétricas foram feitas no eletrodo superior do atuador e na superfície do substrato. A Figura 39 mostra um desenho esquemático da montagem utilizada para a medida do deslocamento vertical.

Legenda:

+ e - são os sinais das cargas dos eletrodos do atuador
 ↓ e ↑ são o sentido da polarização do polímero

OBS: O desenho está fora de escala

Figura 39: Desenho esquemático mostrando atuador bimorfo piezoelétrico preso a um substrato com superfície condutora para a medida do deslocamento vertical.

Para a visualização do deslocamento vertical foi usado um microscópio óptico da Olympus (modelo BX51) com aumento de 10 vezes. As imagens digitais foram obtidas, sendo uma delas apresentada na Figura 40. As barras de escala e as medidas foram feitas usando o software Image-Pro Discovery que acompanha o microscópio. Para aplicar tensão no atuador foi usada uma fonte DC de alta tensão (faixa de 0 a 3 kV) fabricada no laboratório de eletrônica do Instituto de Física da USP. Especificamente na Figura 40 é apresentado um atuador na posição neutra, isto é, sem a aplicação de tensão. As dimensões do atuador caracterizado são de 6 mm de comprimento por 3 mm de largura sendo que apenas 3 mm do comprimento estão livres para se movimentar.

Figura 40: Posição do atuador sem tensão aplicada. Como a superfície do substrato é refletora é possível ver a imagem do atuador refletida. O atuador está a 20,6 μm da superfície do substrato.

As Figuras 41 e 42 mostram a posição do atuador quando as tensões de +200 V e -300 V são aplicadas, respectivamente.

Figura 41: Posição do atuador quando uma tensão de +200V DC é aplicada entre seus eletrodos. Um movimento vertical de 20,6 μm de abertura (em relação à posição do atuador sem tensão aplicada) foi observado.

Figura 42: Posição do atuador quando uma tensão de -300V DC é aplicada entre seus eletrodos. Um movimento vertical de $7,3\text{ }\mu\text{m}$ de fechamento (em relação à posição do atuador sem tensão aplicado) foi observado.

A Tabela 3 mostra os valores de tensão aplicados e deslocamentos típicos medidos, usando as imagens obtidas pelo microscópio óptico.

Tensão do Eletrodo Inferior	Tensão do Eletrodo Superior	Deslocamento “+” sendo abertura e “-” fechamento
0V	+200V	+20,6 μm
0V	+300V	+30 μm
0V	-300V	-7,3 μm

Tabela 3: Tensões aplicadas nos eletrodos do atuador bimorfo piezoelétrico e o deslocamento gerado. Quando a tensão é positiva o movimento vertical é de abertura. Quando o sinal da tensão aplicada é invertido o movimento vertical é de fechamento.

O atuador também foi testado com tensão AC, onde foi utilizado um gerador de frequência da Inimpa modelo MFG-4200 com faixa de frequência de 0,1 Hz a 1 MHz juntamente com um amplificador de sinal fabricado no laboratório de eletrônica do Instituto de Física da USP. Aplicando entre os eletrodos do atuador uma tensão AC de

amplitude de 200 V e frequência de 5 Hz, o atuador apresentou um movimento oscilatório com a mesma frequência que a da tensão aplicada e com amplitude de 20 μm .

Após a caracterização dos atuadores, eles foram removidos do substrato utilizado para teste e integrados em outros substratos contendo bocal.

3.2 Medida de fluxo de gás dos microbocais com microválvulas integradas

Existem diversas maneiras de se medir fluxo de gás que passa por um dispositivo. Uma forma direta consiste em conectar o dispositivo a uma linha de gás, colocando em série um medidor de fluxo de massa. Neste trabalho optamos por um método indireto, onde a pressão de entrada do dispositivo foi mantida constante e a variação da pressão de saída foi medida em função do tempo. Usando a equação (15), deduzida na seção 2.4.4 do capítulo 2 de materiais e métodos o fluxo de massa de gás é então calculado. No capítulo anterior (nas seções 2.4.2 e 2.4.3) a linha de teste usada para determinar o fluxo de gás foi descrita em detalhes. A medida foi realizada registrando-se a variação de pressão em função do tempo em uma câmara denotada por Y que estava isolada do meio externo. O aumento de pressão na câmara Y foi provocado pelo fluxo de gás que passou pelo dispositivo, sendo este dado usado no cálculo de fluxo de massa. A Figura 43 mostra um esquema das duas configurações que podem ser usadas para a determinação de fluxo através de um dispositivo.

(a)

(b)

Figura 43 (a): Medida de fluxo de gás que passa pelo dispositivo usando um medidor de fluxo de massa (método direto). As medidas das pressões são necessárias apenas para se obter as razões de pressão na entrada e saída do bocal enquanto as medidas de fluxo de massa são realizadas. (b) Neste caso é registrada a pressão em função do tempo na câmara Y e, através da equação (15), o fluxo de gás que passa pelo dispositivo é então calculado.

3.2.1 Resultados para microbocais de diferentes diâmetros

Nesta seção serão mostrados as etapas realizadas para a obtenção do fluxo de gás ($dV_{gás}/dt$) e do fluxo de massa (dm_s/dt) para três bocais de diferentes diâmetros obtido pelo método indireto. A primeira etapa consistiu em registrar a pressão da câmara Y em função do tempo, como descrito anteriormente. A pressão de entrada foi mantida constante em 266 Pa. A Figura 44 mostra as curvas de pressão em função do tempo obtidas para três bocais (sem atuador) de diferentes diâmetros. Em seguida foram obtidas as curvas (polinomiais) que melhor se ajustassem aos dados experimentais. Na Figura 45 é apresentada a curva fitada para o bocal de 260 μm de garganta. Em todas as medidas apresentadas os primeiros 10 segundos foram descartados, pois na abertura da linha o fluxo de gás leva alguns segundos para se estabilizar.

Figura 44: Curvas de pressão em função do tempo para microbocais de diferentes diâmetros fabricados em vidro. A pressão foi medida na câmara Y localizada na saída do bocal. Na legenda DG significa diâmetro na garganta e DE diâmetro na entrada.

Figura 45: A curva em vermelho é o polinômio de grau 5 ($P_s(t) = 51,235 + 3,22791*t - 3,31599*t^2 - 1,89497*t^3 + 1,47387*t^4 - 3,68157*t^5$) que melhor se ajustou aos valores de pressão de saída em função do tempo para o bocal de 260 µm de diâmetro interno na garganta. Este procedimento também foi feito para as outras duas curvas mostradas na Figura 44 que representam os bocais com 420 µm e 516 µm de diâmetro interno.

A derivada do polinômio é calculada e representa a variação de pressão de saída do bocal em função do tempo (dP_s/dt). A Figura 46 mostra o cálculo da derivada em função do tempo para a curva de pressão do bocal com 260 μm de garganta.

Figura 46: Derivada da pressão, em função do tempo, do polinômio de grau 5.

O cálculo da derivada da pressão em função do tempo é substituído nas equações (15) e (17), onde se obtém a vazão mássica (dm_s/dt) e a vazão volumétrica ($dV_{gás}/dt$). A Figura 47 e a Figura 48 mostram os valores de vazão mássica (dm_s/dt) e vazão volumétrica ($dV_{gás}/dt$) calculados para os bocais de diferentes diâmetros.

Figura 47: Vazão mássica calculada para os três diferentes bocais. Na legenda DG significa diâmetro na garganta do bocal e DE significa diâmetro na entrada do bocal.

Figura 48: Vazão volumétrica calculada para os três diferentes bocais. Na legenda DG significa diâmetro na garganta do bocal e DE diâmetro na entrada do bocal.

Para se verificar a precisão dos resultados obtidos na Figura 47 o valor da vazão mássica medida (dm_s/dt) foi comparado à vazão mássica calculada (dm_{ideal}/dt) usando a equação:

$$\frac{dm_{ideal}}{dt} = AC \frac{P_o}{\sqrt{RT_o M}} \quad (\text{kg/s}) \quad (18)$$

Onde A é a área da garganta, C é uma constante de valor 0,5, P_o e T_o são a pressão e a temperatura na região da entrada do bocal, R é a constante universal dos gases e M é a massa molecular do ar atmosférico.

Esta equação foi deduzida na ref. [51] sendo que já foi utilizada no estudo do fluxo em microbocais em [52]. A Tabela 4 mostra os valores de vazão mássica medidos e calculados bem como o coeficiente de descarga ($C_{descarga}$) que é definido como:

$$C_{descarga} = \frac{\frac{dm_s}{dt}}{\frac{dm_{ideal}}{dt}} \quad (19)$$

Note que, o coeficiente de descarga calculado mostra boa concordância entre os resultados para os bocais de garganta de maior diâmetro. Quanto ao de menos diâmetro,

a menor concordância provavelmente se deve ao maior valor do número de Knudsen, se distanciando da condição ideal de não escorregamento na parede.

Pressão na entrada do bocal (Pa)	Pressão na saída do bocal (Pa)	Razão pressão saída/ entrada	Diâmetro na garganta do bocal (μm)	C_1 $= \frac{dm_s}{dt}$ $\times 10^{-8} \text{ (kg/s)}$	C_2 $= \frac{dm_{ideal}}{dt}$ $\times 10^{-8} \text{ (kg/s)}$	$C_{descarga}$ $= \frac{C_1}{C_2}$
266	133	0,5	260	1,3	2,41	0,541
			420	5,5	6,15	0,894
			516	9,4	9,54	0,985

Tabela 4: Comparação entre os valores de vazão mássica medidos (dm_s/dt) e calculado (dm_{ideal}/dt) usando a equação (18).

3.2.2 Resultados para a microválvula aplicando tensão DC

Nesta seção serão mostradas as etapas para a obtenção do fluxo de massa (dm_s/dt) e de volume ($dV_{gás}/dt$) de dispositivos compostos por microbocais integrados a microválvulas, aplicando diferentes valores de tensão DC no atuador. O dispositivo testado é composto por um microbocal de 1 mm de diâmetro de entrada e 260 μm de diâmetro na garganta. Na saída foi fixado um atuador piezoelétrico bímorfo de 3 mm de largura por 6 mm de comprimento que, aplicando uma tensão DC nos eletrodos, apresenta um movimento vertical que pode ser de abertura ou fechamento. Apenas 3 mm do comprimento do atuador estão livres para se movimentar, pois os outros 3 mm estão em contato (presos) na superfície do substrato. As medidas foram obtidas de maneira indireta, ou seja, primeiro medindo a pressão na saída do dispositivo para depois, usando as equações (15) e (17), calcular o fluxo de massa e o volume de gás em função do tempo. Foram aplicados três valores de tensões no atuador: +300 V DC, +200 V DC e -300 V DC e para cada caso o aumento de pressão na câmara Y com o tempo foi medido. Em todas as medidas apresentadas os primeiros 10 segundos foram descartados, pois na abertura da linha o fluxo de gás leva alguns segundos para se

estabilizar. No apêndice A foi feita a modelagem numérica das equações de Navier Stokes para se visualizar os valores do número de Mach no interior do bocal para o caso do bocal sem atuador e do bocal com atuador aplicando diferentes valores de tensões nos eletrodos.

A Figura 49 mostra a curva de pressão em função do tempo para o dispositivo, aplicando diferentes valores de tensão. A pressão de entrada foi mantida constante em 266 Pa.

Figura 49: Pressão na câmara Y conectada a saída da microválvula. Aplicando uma tensão DC o atuador se movimenta deixando passar mais ou menos gás. Quando uma tensão positiva é aplicada o atuador tem um movimento vertical de abertura e, por isso, a pressão na câmara Y aumenta mais rapidamente.

A Figura 50 mostra a curva (polinômio de grau 5) que melhor se ajustou aos pontos quando foi aplicado uma tensão de +300 V DC no eletrodo superior do atuador.

Figura 50: A curva em vermelho é o polinômio de grau 5 ($P_s(t) = -14,035 + 2,91*t - 4,48^{-3}*t^2 - 6,347^{-5}*t^3 + 3,7682^{-7}*t^4 - 6,56392^{-10}*t^5$) que melhor se ajustou aos valores de pressão de saída em função do tempo, quando foi aplicada uma tensão de +300 V DC no atuador. Este procedimento também foi feito para as outras duas curvas mostradas na Figura 49 que representam os casos aplicando tensão +200 V DC e aplicando -300 V DC.

A derivada do polinômio é calculada e representa a variação de pressão da saída do bocal em função do tempo (dP_s/dt). A Figura 51 mostra o cálculo da derivada para o caso em que foi aplicada uma tensão de +300 V DC.

Figura 51: Derivada do polinômio de grau 5 que representa a variação da pressão em função do tempo, quando foi aplicada uma tensão de +300 V DC no eletrodo superior do atuador.

O cálculo da derivada é substituído nas equações (15) e (17), onde se obtém a vazão mássica (dm_s/dt) e a vazão volumétrica ($dV_{gás}/dt$). As Figuras 52 e 53 mostram os

valores de vazão mássica (dm_s/dt) e vazão volumétrica ($dV_{gás}/dt$) aplicando diferentes valores de voltagem.

Figura 52: Vazão mássica através do dispositivo quando três tensões distintas são aplicadas, mostrando a capacidade da microválvula de controlar o fluxo de gás a baixas pressões.

Figura 53: Vazão volumétrica da microválvula quando três tensões distintas são aplicadas mostrando a capacidade do dispositivo de controlar o fluxo de gás a baixas pressões.

3.2.3 O efeito da histerese no desempenho da microválvula

Os materiais piezoelétricos apresentam um comportamento não linear conhecido como histerese. A histerese é observada quando uma voltagem DC variável é aplicada no material que em geral não volta ao seu comprimento original quando a voltagem aplicada é suspensa. Como exemplo, podemos citar o comportamento da movimentação do atuador piezoelétrico que compõe a microválvula. A Figura 54 mostra a pressão medida na câmara Y para duas situações: a curva representada por quadrados escuros foi primeiro aplicado uma tensão DC de +200 V para depois aplicar a tensão DC de -300 V. Já a curva representada por círculos vermelhos a tensão DC -300 V foi aplicada diretamente ou seja o atuador partiu da posição de repouso. Em todos os casos de medida de fluxo apresentados onde a tensão DC foi usada para movimentar o atuador o efeito da histerese foi levado em conta, ou seja, o atuador sempre partiu da posição de repouso.

A Pressão de entrada foi mantida constante em 266 Pa

Figura 54: Pressão versus tempo para duas situações: No primeiro caso representado por quadrados escuros primeiro foi aplicado uma tensão de +200 V DC para depois aplicar a tensão de -300 V DC. Já no segundo caso representado pelos círculos vermelhos foi aplicada diretamente uma tensão de -300 V DC o que mostra que a histerese influencia no desempenho da microválvula.

3.2.4 Resultados para a microválvula aplicando tensão AC

Nesta seção serão mostrados as etapas para a obtenção do fluxo de massa (dm_s/dt) e de volume ($dV_{gás}/dt$) através do dispositivo, aplicando uma tensão AC com variação de frequência e amplitude do sinal. O dispositivo testado é composto por um microbocal de 1,1 mm de diâmetro de entrada e 210 μm de diâmetro na garganta. Um atuador piezoelétrico bimorfo de 3 mm de largura por 6 mm de comprimento foi fixado a 1 mm da saída do bocal através da utilização de um espaçador. Aplicando uma tensão AC nos eletrodos ocorre um movimento vertical oscilatório. As medidas foram obtidas de maneira indireta, ou seja, primeiro medindo a pressão na saída do dispositivo para depois, usando as equações (15) e (17), calcular o fluxo de massa e de volume de gás em função do tempo. Em todas as medidas apresentadas os primeiros 10 segundos foram descartados, pois na abertura da linha o fluxo de gás leva alguns segundos para se estabilizar.

A Figura 55 mostra a curva da pressão em função do tempo para o dispositivo, aplicando tensão de +200 V AC e mantendo a frequência do sinal em 5 Hz. A pressão de entrada foi mantida constante em 266 Pa.

Figura 55: Aumento de pressão em função do tempo para o caso do dispositivo com atuador sujeito à tensão AC.

A Figura 56 mostra o polinômio de grau 5, que melhor se ajustou a curva, que será utilizado para o cálculo da derivada.

Figura 56: A curva em vermelho é o polinômio de grau 5 ($P_s(t) = 33,382 + 4,0266*t - 8,8804*t^2 - 4,2645*t^3 + 3,9197*t^4 - 1,1908*t^5$) que melhor se ajustou aos valores de pressão de saída em função do tempo para o dispositivo, quando foi aplicada uma tensão de 200 V AC com uma frequência de 5 Hz.

A Figura 57 mostra a derivada do polinômio que representa a variação de pressão no interior da câmara Y nem função do tempo (dP_s/dt).

Figura 57: Derivada do polinômio que representa a variação de pressão em função do tempo para o dispositivo, quando foi aplicada uma tensão de 200 V AC com uma frequência de 5 Hz.

O cálculo da derivada é substituído nas equações (15) e (17) e a vazão mássica (dm_s/dt) e a vazão volumétrica ($dV_{gás}/dt$) são obtidas. A Figura 58 e a Figura 59 mostram os valores de vazão mássica (dm_s/dt) e vazão volumétrica ($dV_{gás}/dt$) obtidas.

Testes com outras frequências de sinal como 1, 7, 10 e 20 Hz também foram realizados, mas o aumento da pressão no tempo na câmara Y em função do tempo praticamente não variou (menos de 1%). A Figura 60 mostra a vazão volumétrica para diferentes frequências comparadas com o caso do bocal sem o atuador na sua saída.

Figura 58: Vazão mássica obtida para o dispositivo no regime AC de operação mostrando que também é possível controlar o fluxo de gás usando uma tensão de corrente alternada de 5 Hz de frequência.

Atuador vibrando, tensão aplicada: AC 200V 5Hz
Pressão de entrada foi mantida constante a 266 Pa

Figura 59: Vazão volumétrica obtida para o dispositivo no regime AC de operação mostrando que é possível também controlar o fluxo de gás usando uma tensão AC.

Figura 60: Vazão volumétrica obtida para o dispositivo aplicando uma tensão de 200 V corrente alternada mas com diferentes valores de frequência. Isso mostra que a vazão do dispositivo praticamente não variou quando a frequência da tensão foi alterada.

3.2.5 Fenômeno de bombeamento observado quando a tensão AC é aplicada no atuador

Nesta seção serão comparados os resultados observados para um microbocal sem atuador e o caso em que o atuador está presente e oscilando na saída do bocal. Os resultados mostram que o movimento oscilatório do atuador na saída do bocal gera um efeito de bombeamento, aumentando o fluxo de gás que passa pelo dispositivo. O efeito de bombeamento foi definido como sendo o fluxo de gás que passa pelo dispositivo menos o fluxo do bocal sem atuador. Foram realizadas medidas para três pressões de entrada distintas: 266 Pa, 1333 Pa e 13300 Pa.

O escoamento em bocais tem sido estudado extensivamente nos últimos anos [6,11,13]. O fenômeno de blocagem é uma consequência das conservações de massa, momento e energia aplicadas a gases ideais. O fluxo de massa através do bocal depende apenas das condições no montante do bocal. Assim, apesar de o atuador estar posicionado na saída do bocal, seu movimento deve estar criando alterações no montante do bocal.

As Figuras 61 e 62 mostram o fluxo de gás para um bocal com 1,1 mm de diâmetro de entrada e com 260 μm de diâmetro na garganta comparado com um bocal de 1,1 mm de diâmetro de entrada e com 210 μm de diâmetro na garganta, mas com um atuador de 3mm por 6mm oscilando a uma distância de 1mm da saída do bocal. Note que, o fluxo de gás no dispositivo com atuador é 25 % maior (quando a razão de pressão saída/entrada é de 0,2), apesar do bocal com atuador ser de diâmetro de garganta 50 μm menor que o bocal sem atuador. No caso dos resultados referentes às Figuras 61 e 62 a pressão de entrada foi mantida constante em 266 Pa.

Figura 61: Vazão mássica do dispositivo quando é aplicada uma tensão AC juntamente com a vazão mássica do bocal sem atuador. Através destas curvas é possível verificar que o efeito de bombeamento está presente em toda a faixa de razão de pressão estudada. Na legenda DG significa diâmetro na garganta do bocal e DE diâmetro na entrada do bocal.

Figura 62: Vazão volumétrica do dispositivo quando é aplicada uma tensão AC e vazão volumétrica do bocal sem atuador. Na legenda DG significa diâmetro na garganta do bocal e DE diâmetro na entrada do bocal.

Medidas similares foram realizadas com mesmo dispositivo e o mesmo bocal descritos acima, mas para uma pressão de entrada constante de 1330 Pa. Os resultados são apresentados nas Figuras 63 e 64, mostrando da mesma forma o efeito de bombeamento.

Figura 63: Vazão mássica para o dispositivo com atuador e para o bocal sem atuador. Neste caso a pressão de entrada foi de 1330 Pa, mostrando da mesma forma o efeito de bombeamento. Na legenda DG significa diâmetro na garganta do bocal e DE diâmetro na entrada do bocal.

Figura 64: Vazão volumétrica para o dispositivo com atuador e para o bocal sem atuador. A pressão de entrada usada neste caso foi de 1330 Pa. Na legenda DG significa diâmetro na garganta do bocal e DE diâmetro na entrada do bocal.

Finalmente, medidas similares foram realizadas com mesmo dispositivo e o mesmo bocal descritos acima, mas para uma pressão de entrada constante de 13300 Pa. Os resultados são apresentados nas Figuras 65 e 66, mostrando da mesma forma o efeito de bombeamento.

Figura 65: Vazão mássica do dispositivo com atuador e do bocal sem atuador para a pressão de entrada de 13300 Pa. Na legenda DG significa diâmetro na garganta do bocal e DE diâmetro na entrada do bocal.

Figura 66: Vazão volumétrica para o dispositivo com atuador e para o bocal sem atuador. A pressão de entrada usada neste caso foi de 13300 Pa. Na legenda DG significa diâmetro na garganta do bocal e DE diâmetro na entrada do bocal.

A taxa de bombeamento foi definida como vazão medida do bocal com atuador menos a vazão do bocal sem atuador. A taxa medida quando a razão de pressão entre a entrada e a saída do dispositivo é 0,5 foi de 47 cm³/min quando a pressão de entrada foi de 266 Pa, de 117 cm³/min quando a pressão de entrada foi de 1330 Pa e de 232,5 cm³/min quando a pressão de entrada foi de 13300 Pa. A razão entre o volume medido para o bocal sem atuador e o bocal com o atuador oscilante presente na sua saída se manteve constante entre 0,73 a 0,8 sugerindo que o efeito de bombeamento é independente da pressão de entrada.

Nos casos onde foram tomadas as pressões de entrada de 1330 Pa e 13300 Pa, o bocal sem o atuador estava bloqueado quando a razão de pressão entre a entrada e a saída era menor que 0,5. Assim, estando, bloqueado, a vazão mássica é máxima, não havendo possibilidade de obtenção de um fluxo maior [53].

A variável medida diretamente é a pressão na câmara de descarga. Devido ao processo de expansão, haverá também uma redução da temperatura do gás na câmara de descarga. Entretanto, considerando os resultados já apresentados na literatura [6], a diminuição máxima da temperatura na saída de um microbocal é da ordem de 40 K em 296 K, o que gera uma incerteza menor que 15%. Assim, a variação de temperatura devido à expansão do gás não justifica o aumento do fluxo observado, sendo que o fluxo de gás no dispositivo com atuador é 25 % maior (quando a razão de pressão saída/entrada é de 0,2), apesar do bocal com atuador ser de diâmetro de garganta 50 µm menor que o bocal sem atuador.

O fato interessante e inédito foi mostrar experimentalmente que, quando um atuador é colocado na saída do bocal e posto para vibrar, o fluxo de gás que passa pelo microbocal aumenta, mesmo quando este está bloqueado.

Capítulo 4

Sumário e conclusões

Nesta tese foi apresentada a sequência de montagem de uma microválvula, tendo o PVDF como atuador piezoelétrico, integrado a um bocal micro fabricado em vidro. O PVDF poli(fluoreto de vinilideno) foi escolhido como material piezoelétrico para compor o atuador por ser um material de baixo custo (quando comparado com cerâmicas de propriedades similares) e a facilidade em obter uma estrutura bimorfa no formato e tamanho desejados. O substrato escolhido foi o vidro por ser também um material de baixo custo e as técnicas de fabricação de microcanais utilizadas não exigirem o uso de sala limpa ou equipamentos sofisticados. A fabricação dos microbocais em substrato de vidro foi feita utilizando a técnica de jateamento (*powder blasting* em inglês), sendo a principal vantagem desta técnica a ausência de processos de litografia.

Um sistema de teste (linha de gás) foi montado, usando duas câmaras de vácuo. Os testes foram realizados fazendo com que o ar atmosférico passasse de um recipiente de maior volume e pressão para um recipiente de menor pressão. O dispositivo composto pela microválvula integrada ao substrato de vidro contendo o microbocal era a peça de interconexão entre as duas câmaras que estavam isoladas do meio externo.

A microválvula foi testada com uma pressão de 266 Pa na sua entrada sendo que a posição do atuador foi mudada aplicando diferentes valores de tensão DC. Isso tornou possível controlar o fluxo de gás que passou pelo dispositivo. O efeito de histerese deve ser levado em conta para não haver distorções nas medidas de fluxo. Quando uma tensão AC foi aplicada, o atuador passou a oscilar de acordo com a frequência do sinal e isso gerou um aumento no fluxo de gás. O fato experimental ainda não explicado teoricamente consiste no aumento do fluxo de gás de um bocal bloqueado, quando um atuador oscilante é integrado em sua saída. Esse efeito foi denominado de bombeamento neste trabalho.

4.1 Perspectivas de Trabalhos Futuros

O ramo da microfluidica tem evoluído ano após ano buscando dispositivos mais eficientes e de menos custo de fabricação. O uso de modelagem para projetar dispositivos nessa área tem se mostrado cada vez mais importante. Assim, no caso do dispositivo desenvolvido nesta Tese, seria muito interessante a utilização de programas como o ANSYS que modela o desempenho do atuador nas condições de trabalho.

Novas medidas poderiam ser realizadas aplicando tensão AC com frequências entre 0 Hz e 1 Hz para analisar o comportamento da curva que apresenta um fenômeno de bombeamento para observar a aproximação junto à curva do caso bocal sem atuador.

O sistema de teste (linha de gás) pode ser melhorado usando medidores de membrana capacitiva, conferindo maior precisão às medidas. Outros gases poderiam ser usados nas medidas de fluxo como o hélio, o nitrogênio e o argônio. A pressão de entrada poderia ser diminuída para se observar o comportamento da microválvula a baixas pressões, ou seja, outros regimes de escoamento. Outros dispositivos podem ser testados como orifícios e tubos de diferentes diâmetros e comprimentos objetivando o estudo detalhado do escoamento no seu interior.

Apêndice A

Modelagem numérica de um microbocal e uma microválvula usando o programa Ansys/CFX 10.0

A1 – Introdução

A dinâmica computacional de fluidos (CFD) é uma ferramenta que modela o comportamento de sistemas que possuem o escoamento de um fluido no seu interior ou vizinhança. O computador soluciona as equações de Navier-Stokes para o fluido na região de interesse, usando as condições de contorno estipuladas. No estudo numérico apresentado a seguir o programa computacional usado foi o Ansys/CFX 10.0.

Existem diversas maneiras de solucionar as equações de Navier-Stokes que são usadas pelos códigos de CFD. A mais usada, no qual o Ansys/CFX é baseado, é conhecida como método dos volumes finitos. Nesta técnica, a região de interesse é dividida em pequenas células, chamadas de volume de controle. As equações são discretizadas e resolvidas para cada volume de controle. O conjunto dos volumes de controle forma a malha do volume.

O resultado obtido é o valor aproximado de cada variável num ponto específico do domínio (que é a região que está sendo estudada), o que possibilita a caracterização do comportamento do fluido na região de interesse. O programa Ansys/CFX é dividido em três módulos: CFX/Pre, CFX/Solver e CFX/Post. O módulo CFX/Pre pode importar arquivos de malha produzidos por diversos programas. As condições de contorno e os valores iniciais são especificados no CFX/Pre. O módulo CFX/Solver obtém todas as soluções para as variáveis da modelagem usando as condições de contorno e os valores iniciais introduzidos no CFX/Pre. Já o CFX/Post fornece as ferramentas gráficas que possibilitam a análise e estudo dos resultados obtidos.

A malha do microbocal e da microválvula foi gerada usando o programa Ansys/Workbench 8.1. O sistema de geração da malha do Ansys/Workbench é capaz de produzir malhas de alta qualidade para o uso em modelagem computacional de fluidos (CFD). O CFD requer o uso de malhas que solucionem os efeitos que ocorrem na camada limite.

O gerador de malhas do Workbench gera uma malha não estruturada do volume, ou seja, as células que compõem a malha têm um formato piramidal ou tetrahedral. Os passos para se criar uma malha no Workbench são: (I) criar a geometria do volume, (II) definir as regiões no volume (como entrada e saída), (III) definir as propriedades da malha (como o tamanho máximo das células), (IV) criar a malha da superfície (área que envolve o volume) e por fim (V) criar a malha do volume que será importada pelo CFX/Pre. O tamanho máximo das células usadas foi de $5,5 \times 10^{-5}$ m para o microbocal e $1,6 \times 10^{-4}$ m para a microválvula.

A2 – Problema físico estudado

A geometria do microbocal e da microválvula criados no Workbench foi baseada nas Figuras A1 para o microbocal e A2 para a microválvula.

Figura A1: Micrografia do microbocal usado nos testes de linha de gás. A amostra foi fraturada para permitir a obtenção da micrografia.

Figura A2: Desenho esquemático da microválvula fabricada (desenho fora de escala).

A microválvula é composta de um microbocal e um atuador posicionado na sua saída. Para encapsular o dispositivo foi necessário criar duas câmaras pequenas: uma localizada na entrada e outra na saída do bocal. A câmara localizada na entrada serve para proteger a entrada do bocal e a câmara localizada na saída serve para proteger o atuador do ambiente externo. A Figura A3 mostra a região (círculo em branco) da microválvula que foi levada em conta na modelagem numérica. As Figuras A4 e A5 mostram as geometrias criadas para o microbocal e a microválvula no Workbench.

Figura A3: Vista superior do dispositivo montado. Através desta imagem é possível observar a disposição de cada componente de microválvula. O círculo em branco corresponde à região que será considerada na modelagem numérica.

Figura A4: Geometria criada para o microbocal usando o programa Ansys/ Workbench.

Figura A5: Geometria criada para a microválvula usando o programa Ansys/Workbench. O volume corresponde à região do círculo branco mostrado na Figura A3.

A3 Condições de contorno usados na modelagem numérica

O gás usado em todas as medidas foi o ar atmosférico. Foram estudados dois casos que serão relatados a seguir. No primeiro caso foi estudada a influência do valor da pressão de entrada nos valores do número de Mach (razão entre a velocidade do fluido e a velocidade do som local) para um microbocal sem atuador. A região estudada foi o interior do microbocal. Os valores do número de Mach foram obtidos para três pressões de entrada distintas: 266 Pa, 1330 Pa e 13300 Pa. No segundo caso estudado a pressão de entrada foi mantida constante em 266 Pa e o número de Mach foi obtido para o microbocal e a microválvula (que é um microbocal com um atuador piezelétrico presente na sua saída). No segundo caso o objetivo foi observar o efeito da presença do atuador na saída do bocal nos valores do número de Mach para a região do interior do bocal. O número de Knudsen foi usado para identificar nos dois casos estudados o tipo de escoamento (contínuo ou rarefeito) que ocorre no interior do microbocal e da microválvula. O tipo de escoamento é determinado de acordo com o valor do número de Knudsen (Kn) calculado:

$$Kn = \frac{\lambda}{D} \quad (A1)$$

onde λ é o livre caminho médio das moléculas do ar e D é o diâmetro no interior do bocal. Então

se $Kn < 10^{-3}$ então o escoamento é contínuo

se $10^{-3} < Kn < 10^{-1}$ então o escoamento é com escorregamento na parede (*slip flow*)

se $10^{-1} < Kn < 10$ então é um escoamento transitório

se $Kn > 10$ então é um escoamento rarefeito.

No primeiro caso estudado (microbocal sem o atuador presente na saída) o número de Knudsen foi calculado para as três pressões de entrada. Quando a pressão na entrada foi de 266 Pa o número de Knudsen calculado para a região da garganta foi de 0,015 indicando um escoamento com escorregamento na parede. Quando a pressão de entrada foi de 1330 Pa o número de Knudsen na garganta foi de 0,003 indicando ainda um escoamento com escorregamento na parede. Mas quando a pressão na entrada foi elevada para 13300 Pa o número de Knudsen na garganta foi de 0,0003 indicando um escoamento contínuo.

No segundo caso quando a pressão na entrada foi mantida constante em 266 Pa o número de Knudsen calculado no interior da garganta do microbocal que compõe a microválvula foi de 0,015 indicando um escoamento com escorregamento na parede.

Nos casos em que o escoamento possui escorregamento na parede as equações de Navier Stokes também podem ser usadas, mas a velocidade paralela à parede é diferente de zero sendo calculada durante a resolução do problema. O modelo de turbulência usado nos casos em estudo foi o SST (em inglês *Shear-Stress Transport*). O modelo SST é recomendado para uma modelagem precisa da camada limite.

A densidade foi calculada de acordo com a lei dos gases ideais. A temperatura no escoamento foi fixada em $T_0 = 296$ K na entrada. Durante as medidas experimentais as paredes do microbocal e da microválvula foram consideradas perfeitamente isoladas sem troca de calor com a vizinhança. Por isso na modelagem numérica as paredes do bocal e da válvula foram consideradas adiabáticas.

O escoamento pelo microbocal foi estudado para três pressões distintas de entrada: 266 Pa, 1330 Pa e 13300 Pa, sendo que em cada caso 5 valores de pressão distintos na saída foram usados, que equivalem as seguintes razões de pressão (saída/entrada): 0,25, 0,4, 0,5, 0,65 e 0,8.

Já o escoamento da microválvula foi estudado para uma pressão de entrada constante de 266 Pa e para 5 valores de pressão distintos na saída: 66,5 Pa; 106,4 Pa; 133 Pa; 172,9 Pa e 212,8 Pa. Estes valores correspondem a uma razão de pressão (saída/entrada): 0,25; 0,4; 0,5; 0,65 e 0,8. A primeira situação estudada foi para a microválvula aberta aplicando uma tensão de +300 V DC nos eletrodos, o que foi representado por um plano disposto na saída do bocal a uma distância de 55 μm . A segunda situação estudada foi para a microválvula fechada aplicando uma tensão de -200 V DC nos eletrodos do atuador do atuador, o que foi representado por um plano disposto na saída do bocal a uma distância de 15 μm . Os resultados obtidos nas duas situações foram comparados com o microbocal sem atuador.

A4 – Resultados

Os cálculos foram realizados para situações estacionárias usando as equações de Navier Stokes 3D compressíveis para a modelagem de volumes finitos.

Os valores obtidos experimentalmente para a vazão mássica nos diferentes casos estudados para o microbocal e a microválvula foram comparados com os resultados numéricos. O erro máximo observado entre os valores medidos experimentalmente e os cálculos numéricos foi de 5 % para o bocal sem atuador e de 12 % para a microválvula em posição estática. Esse erro tem uma parcela ligada aos erros de medidas e às aproximações realizadas nos cálculos. A Figura A6 mostra os valores de vazão mássica medidos e obtidos por CFX para os casos: microbocal sem atuador, microbocal com atuador aplicando +300 V DC e microbocal com atuador aplicando -200 V DC no eletrodo superior do atuador. Baseado nos instrumentos utilizados nas medidas a incerteza fica em torno de 2-3%. A geometria simplificada empregada na modelagem numérica é o principal responsável pelo erro nos cálculos.

O efeito da pressão na movimentação do atuador foi levado em conta. A força gerada no atuador devido à diferença de pressão foi obtida multiplicando a área do atuador pela diferença de pressão entre a entrada e a saída. A área do atuador é de 18 mm^2 (retângulo de 3 mm de largura por 6 mm de comprimento). As pressões de entrada e saída foram medidas experimentalmente. A equação foi deduzida a partir das equações de força e deslocamento para um atuador bimorfo [42], sendo usada para estimar a amplitude da deflexão devido à pressão que o gás exerce no atuador.

Figura A6 (a): Valores de vazão mássica medidos e obtidos por Ansys CFX para um microbocal sem atuador e um microbocal com atuador aplicando uma tensão de +300 V DC no eletrodo superior do atuador, com relação ao eletrodo inferior.

Figura A6(b): Valores de vazão mássica medidos e obtidos por Ansys CFX para um microbocal sem atuador e um microbocal com atuador aplicando uma tensão de -200 V DC no eletrodo superior do atuador, com relação ao eletrodo inferior.

$$\Delta_x = \frac{3Fl^3}{2Ywt^3} \quad (A1)$$

onde Δ_x é o deslocamento obtido, F é a força gerada no atuador pela diferença de pressão, l é o comprimento do atuador, w é a largura do atuador, t é a espessura do filme piezelétrico usado na fabricação do atuador (25 μm) e Y é o módulo de Young do material (2500 MPa dado fornecido pelo fabricante).

A Figura A7 mostra os valores do número de Mach obtidos para um microbocal sem atuador para as três pressões de entrada distintas: 266 Pa, 1330 Pa e 13300 Pa. A razão da pressão entre a saída / entrada foi 0,25. A Figura A8 mostra os valores do Mach obtidos para um microbocal sem atuador na saída para as três pressões de entrada distintas: 266 Pa, 1330 Pa e 13300 Pa sendo que a razão da pressão saída / entrada foi de 0,8.

Figura A7(a): Valores do número de Mach no interior de um microbocal sem atuador na saída. A pressão na entrada foi mantida constante em 266 Pa. A razão da pressão saída/ entrada foi de 0,25.

Figura A7(b): Valores do número de Mach no interior de um microbocal sem atuador na saída. A pressão na entrada foi mantida constante em 1330 Pa. A razão da pressão saída/ entrada é de 0,25.

Figura A7(c): Valores do número de Mach no interior de um microbocal sem atuador na saída. A pressão na entrada foi mantida constante em 13300 Pa. A razão da pressão saída/ entrada é de 0,25.

Figura A8 (a): Valores do número de Mach no interior de um microbocal sem atuador na saída. A pressão na entrada foi mantida constante em 266 Pa. A razão da pressão saída/ entrada é de 0,8.

Figura A8 (b): Valores do número de Mach no interior de um microbocal sem atuador na saída. A pressão na entrada foi mantida constante em 1330 Pa. A razão da pressão saída/ entrada é de 0,8.

Figura A8 (c): Valores do número de Mach no interior de um microbocal sem atuador na saída. A pressão na entrada foi mantida constante em 13300 Pa. A razão da pressão saída/ entrada é de 0,8.

Analisando as Figuras A7 e A8 é possível se observar que o valor da pressão na entrada é um fator determinante no valor do número de Mach observado depois da garganta. O valor do número de Mach foi maior de 1 (escoamento supersônico) quando a pressão na entrada foi de 13300 Pa e para a razão de pressão saída/ entrada menor que 0,5. Para as outras duas pressões de entrada (266 Pa e 1330 Pa) o valor do número de Mach foi menor que 1 (escoamento subsônico).

A Figura A9 mostra o gráfico dos valores do número de Mach na garganta do bocal sem atuador em função da razão de pressão saída/entrada para as três pressões de entrada: 266 Pa, 1330 Pa e 13300 Pa. Note que, mesmo para a pressão de entrada de 13300 Pa o valor do número de Mach no centro da garganta é inferior a 1, valor observado para bocais de dimensões maiores. Isso se deve ao fato da razão superfície/volume ser muito maior para microbocal quando comparado com um bocal convencional de dimensões maiores.

Figura A9: Gráfico dos valores do número de Mach na garganta do bocal em função da razão de pressão saída/ entrada para três pressões de entrada distintas.

As Figuras A10 e A11 mostram os valores de Mach para a microválvula (microbocal com atuador piezelétrico presente na saída). Foram estudadas duas situações, a primeira aplicando uma tensão de +300 V DC no eletrodo superior do atuador, o que gera um movimento de abertura no atuador, e a segunda aplicando uma tensão de -200 V DC no eletrodo superior, o que gera um movimento de fechamento no atuador. No caso do atuador aberto, ao aplicarmos uma tensão de +300 V DC e devido a força do gás que empurra o atuador, ele se movimenta +35 μm em relação à posição inicial, sendo que a posição inicial do atuador é de +20 μm em relação ao substrato. Assim, nos cálculos, o atuador foi representado por um plano disposto na saída do bocal a uma distância de 55 μm . No caso do atuador fechado, ao aplicarmos uma tensão de -200 V DC e devido à força do gás que empurra o atuador na direção inversa, ele se movimenta -5 μm em relação à posição inicial e, sendo que a posição inicial do atuador de +20 μm em relação ao substrato, então, nos cálculos, o atuador foi representado por um plano disposto na saída do bocal a uma distância de 15 μm .

A Figura A10 apresenta os casos da microválvula aberta (Figura A10 (a)) e fechada (Figura A10 (b)) onde as pressões de entrada e saída foram mantidas constantes em 266

Pa e 66,5 Pa respectivamente (razão entre pressões de entrada e saída de 0,25). Os valores máximos do número de Mach ocorreram, em ambos os casos, à $3,25 \times 10^{-5}$ m depois da garganta e os respectivos valores foram de 0,077 para o caso da microválvula aberta e 0,0619 para o caso da microválvula fechada.

Figura A10 (a): Valores do número de Mach para a microválvula aberta. O atuador foi considerado nos cálculos como um plano disposto na saída do bocal a uma distância de 55 μ m. A pressão na entrada foi mantida constante em 266 Pa e a pressão na saída foi de 66,5 Pa (razão pressão saída/ entrada: 0,25). O valor máximo do número de Mach ocorreu a $3,25 \times 10^{-5}$ m depois da garganta com valor de 0,077.

Figura A10 (b): Valores do número de Mach para a microválvula fechada. O atuador foi considerado nos cálculos como um plano disposto na saída do bocal a uma distância de 15 μm . A pressão na entrada foi mantida constante em 266 Pa e a pressão na saída foi de 66,5 Pa (razão pressão saída/ entrada: 0,25). O valor máximo do número de Mach ocorreu a $3,25 \times 10^{-5}$ m depois da garganta com valor de 0,0619.

A Figura A11 apresenta os casos da microválvula aberta (Figura A11 (a)) e fechada (Figura A11 (b)) onde as pressões de entrada e saída foram mantidas constantes em 266 Pa e 212,8 Pa respectivamente (razão entre pressões de entrada e saída de 0,8). Os valores máximos do número de Mach ocorreram, em ambos os casos na garganta e os respectivos valores foram de 0,0587 para o caso da microválvula aberta e 0,052 para o caso da microválvula fechada.

Figura A11 (a): Valores do número de Mach para a microválvula aberta. O atuador foi considerado nos cálculos como um plano disposto na saída do bocal a uma distância de 55 μm . A pressão na entrada foi mantida constante em 266 Pa e a pressão na saída foi de 212,8 Pa (razão pressão saída/ entrada: 0,8). O valor máximo do número de Mach ocorreu na garganta com valor de 0,0587.

Figura A11 (b): Valores do número de Mach para a microválvula fechada. O atuador foi considerado nos cálculos como um plano disposto na saída do bocal a uma distância de 15 μm . A pressão na entrada foi mantida constante em 266 Pa e a pressão na saída foi de 212,8 Pa (razão pressão saída/ entrada: 0,8). O valor máximo do número de Mach ocorreu na garganta com valor de 0,052.

Analisando as Figuras A10 e A11 é possível observar-se que o fluxo no interior da microválvula é subsônico (número de Mach menor que 1). A posição do valor do número de Mach máximo ocorreu a $3,25 \times 10^{-5}$ m depois da garganta do bocal que compõe a microválvula quando a razão de pressão saída/ entrada foi 0,25. Mas quando a razão de pressão foi de 0,8 o valor máximo do número de Mach ocorreu no centro da garganta. Isso mostra que o valor da pressão na saída influencia a posição do valor máximo do Mach. A Figura A12 mostra os valores do número de Mach na região da

garganta de um microbocal sem atuador e de um bocal que compõe a microválvula em função da razão de pressão saída/ entrada.

Figura A12: Valor do número de Mach para a microválvula nas posições aberta e fechada e para um microbocal sem atuador. O microbocal usado na microválvula e no caso do bocal sem atuador tem 1 mm de diâmetro na entrada e 245 μ m de diâmetro na garganta.

A presença do atuador na saída do bocal não muda a posição do valor máximo do número de Mach, influencia apenas nos valores, que são menores para a microválvula. As três curvas apresentadas na Figura A12 têm o mesmo comportamento: da razão de pressão 0,25 a 0,4 o valor do número de Mach na garganta é constante, mas não é máximo e para razão de pressão 0,4 a 0,8 o valor do número de Mach diminui na garganta. O aumento da pressão na saída faz com que o valor máximo do número de Mach se aproxime da garganta até atingi-la quando a razão da pressão é 0,8.

A5 – Conclusão

As características do escoamento para um microbocal e uma microválvula foram estudadas. O programa usado na modelagem numérica foi o Ansys/ CFX. A condição de escorregamento na parede foi usada para o microbocal quando a pressão na entrada foi de 266 Pa e 1330 Pa. Para a microválvula a condição de escorregamento na parede

também foi usada após o cálculo do número de Knudsen. Houve uma boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos.

A presença do atuador posicionado na saída do microbocal não influenciou o perfil do número de Mach no interior do bocal. Apenas diminuiu os valores do Mach que são menores para a microválvula. Quando a pressão na entrada do bocal e da microválvula foi de 266 Pa o escoamento foi subsônico. Quando a pressão na entrada do microbocal sem atuador foi aumentada para 13300 Pa o escoamento no seu interior foi supersônico (na região depois da garganta) para uma razão de pressão saída/ entrada menor que 0,5.

Apêndice B

Congressos e publicações

B1 Trabalho apresentado na forma de pôster no XXIX Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada

Development of actuators using PVDF piezoelectric polymer

*Rodrigo Sérgio Wiederkehr¹, Maria Cecília Salvadori¹ and Juergen Brugger²

¹Applied Physics Department, Institute of Physics, University of São Paulo, Caixa Postal:66318 CEP: 05315-970 São Paulo-SP,Brazil

² Microsystems Laboratory, Institute of Microelectronics and Microsystems, École Polytechnique Fédérale de Lausanne - EPFL, BM 3116 Station 17
CH-1015 Lausanne, Switzerland

rsergio@if.usp.br

Piezoelectricity is the propriety of materials that relates mechanical deformation as a function of applied voltage and vice-versa. The advantage of using these materials as actuators is the fast response and low power consumption when compared with traditional actuators. The piezoelectric polymers are emerging as actuators because they are lightweight, flexible and cheaper than PZT ceramics. But to reach high displacements it is necessary to glue two layers of the material with opposite polarization (bimorph) or bond it with a non piezoelectric surface (unimorph).

In this presentation it will be shown a sequence of fabrication of a bimorph actuator using a poly(vinylidene fluoride) (PVDF) as material and the theoretical models used to describe the movement. The devices were fabricated using a polymer with 9µm of thickness recovered with 200nm of gold layer as electrodes and the design employed was a triangle with 2.2mm of base with 2mm of height. Applying a 170V DC between the electrodes it was observed an 18µm displacement in the vertical direction.

Presented at section surface and thin films of the XXIX Brazilian National Meeting of Physics of Condensate Matter from May 9th to 13th 2006 at São Lourenço, MG, Brazil

B2 Trabalho apresentado na forma de pôster no 1º Encontro Regional de Materiais do estado de São Paulo

Desenvolvimento de microcanais em vidro usando a técnica de Powder Blasting

Rodrigo Sérgio Wiederkehr¹, Wagner de Rossi² e Maria Cecília Salvadori¹

¹ Departamento de Física Aplicada, Instituto de Física, Universidade de São Paulo
Caixa Postal 66318, CEP:05315-970 São Paulo – SP

² Centro de Lasers e Aplicações, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.
Av. Prof. Lineu Prestes 2242, Cidade Universitária, CEP:05508-900 São Paulo – SP

O objetivo do trabalho foi desenvolver diversos microcanais cônicos em um substrato para serem usados no controle de fluxo de gás em uma linha. A primeira idéia foi usar silício como substrato, pois as técnicas de microfabricação para este material são bem conhecidos. Mas é difícil fabricar canais com um formato cônico em silício. Por este motivo foi usado outro procedimento conhecido como powder blasting ou jateamento de pó. Usando esta técnica é possível corroer e fabricar microestruturas com formato cônico em qualquer material quebradiço como o vidro. O princípio consiste em jatear uma mistura de pó de granulometria fina (óxido de alumínio com granulometria média de 30µm) com ar comprimido na superfície do substrato e expor apenas as regiões do vidro que se deseja corroer. Para fabricar as microestruturas foi desenvolvido um equipamento que permite o controle do fluxo de pó e distância do substrato ao jato. Foram fabricadas máscaras em uma chapa metálica que tem a função de expor ao jato apenas as regiões definidas da superfície do vidro. As perfurações presentes na máscara foram feitas por laser. Usando lâminas de vidro de 0,2mm de espessura e uma máscara adequada foi possível se obter microcanais cônicos de 200µm de diâmetro de entrada e 150µm de diâmetro de garganta.

Foi apresentado na forma de Pôster na seção de vidros do 1º Encontro Regional de Materiais nos dias 22 e 23 de setembro de 2006 em Franca/SP

B3 Trabalho apresentado na forma oral no XXX Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada

Desenvolvimento de uma microválvula usando o polímero piezoelétrico PVDF para controle de fluxo em uma linha de gás

*Rodrigo Sérgio Wiederkehr, Maria Cecília Salvadori e Mauro Cattani

Departamento de Física Aplicada, Instituto de Física, Universidade de São Paulo
Caixa Postal:66318, CEP:05315-970 São Paulo-SP

rsergio@if.usp.br

A microfluidica é uma área de pesquisa bastante estudada devido à intensa busca em minuatizar dispositivos e baratear sua produção. Componentes como microatuadores e microcanais tem sido objeto de estudo, mas grande parte dos dispositivos fabricados envolve processos complexos de fabricação de elevado custo.

Neste trabalho será mostrada a sequência de fabricação e testes de uma microválvula de baixo custo, feita usando um substrato em vidro que possui um microbocal fabricado por jateamento e um microatuador piezoelétrico feito de PVDF (polivinyldene fluoride) um polímero piezoelétrico. Os microcanais possuem um formato convergente-divergente sendo que diâmetro externo tem um 1mm de extensão e a garganta 230 μ m de diâmetro. O polímero possui um coeficiente piezoelétrico baixo por esta motivo é feito um sistema bimorfo que é a colagem de duas folhas com dimensões 2mm de largura por 4mm de extensão com polaridades opostas aumentando o deslocamento vertical. Ambas as folhas estão recobertas por um filme condutor de Au de 200nm de espessura que servem de eletrodos. Aplicando uma voltagem de 200V DC entre os eletrodos uma folha contrai e outra expande gerando um deslocamento vertical de 20 μ m na direção vertical. Variando o valor voltagem o deslocamento pode ser maior ou menor. Testes na linha de gás a baixas pressões (1 Torr) foram feitos para medir o fluxo de gás pelo dispositivo usando diferentes valores de voltagem DC e AC.

Trabalho apresentado na forma oral na seção Polímeros e fluidos complexos (polímeros) no XXX Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada realizado nos dias 7 a 11 de maio de 2007 em São Lourenço/MG.

B4 Trabalho apresentado na forma de pôster no IVC17: 17th Internacional Vacuum Congress

Development of microvalves for gas flow control in micronozzles using PVDF piezoelectric polymer

*R.S. Wiederkehr¹, M.C. Salvadori¹, F.T. Degasperi², and M. Cattani¹

¹ *Institute of Physics, University of São Paulo,
CP 66318, CEP 05315-970, São Paulo, SP, Brazil, e-mail: rsergio@if.usp.br*

² *Faculdade de Tecnologia de São Paulo, Centro Estadual de
Educação Tecnológica Paula Souza – CEETEPS – UNESP – São Paulo, SP, Brazil*

Microfluidics is a research fields of increasing interest due the intense effort in miniaturize devices to occupy less space and low costs. Components like microactuators and microchannels have been studied to improve the fabrication sequence and to understand the fluid behavior flowing through them.

This work describes a fabrication and test sequence of microvalves installed on micronozzles. The technique used to fabricate the micronozzles was powder blasting. The microvalves are actuators made from PVDF (polivinyldene fluoride), that is a piezoelectric polymer. The micronozzles have convergent-divergent shape with external diameter of 1mm and throat around 230 μ m. The polymer have low piezoelectric coefficient, for this reason a bimorph structure with dimensions of 2mm width and 4mm of length was build (two piezoelectric sheets were glued together with opposite polarization). Both sheets are recovered with a conductor thin film with 200 nm of thickness used as electrodes. Applying a voltage between the electrodes one sheet expands while the other contracts and this generate a vertical movement to the entire actuator. If the voltage is change this movement can be higher or lower.

Three different flux measurements were performed in a gas line with low pressures. In all cases the inlet pressure was kept constant as 2Torr. In the first case we used a single micronozzle without actuator and found that for a pressure ratio of 0.5 between the inlet and the outlet the volume flux rate was 0.5 sccm. In the second test the micronozzle was covered with the piezoelectric actuator and, applying +200V DC voltage between the electrodes, it moved 20 μ m vertically in the opposite direction of the micronozzle (it opened). In this case the volume flux rate, for a pressure ratio of 0.5, was 0.44 sccm. Applying -200V DC between the electrodes (that means it closed) the volume flux rate was 0.42 sccm, defining a possible range of flow between 0.42 and 0.5 sccm. The third measurement was performed using AC voltage (200V AC with frequency of 1Hz), where the actuator oscillated. For pressure ratio of 0.5, the flow rate was 0.7sccm so we concluded that the actuator, in AC mode, was working as a micropump.

This work was presented in the poster section NS – Bionano sensors and microfluidics (poster number NSP4-114) of the 17th International Vacuum Congress in Stockholm/Sweden on July 5th 2007.

**B5 Artigo publicado na revista Smart Materials and Structures 16
pp:2302-2307 (2007) (IOP publishing)**

Fabrication and testing of a poly(vinylidene fluoride) (PVDF) microvalve for gas flow control

**Rodrigo S Wiederkehr¹, Maria C Salvadori¹, Juergen Brugger², Francisco
T Degasperi³ and Mauro Cattani¹**

¹ Institute of Physics, University of São Paulo,

C.P. 66318, CEP 05315-970, São Paulo, SP, Brazil

² Microsystems Laboratory, École Polytechnique Fédérale de Lausanne -
EPFL, Station 17, 1015 Lausanne, Switzerland

³ Faculdade de Tecnologia de São Paulo, Centro Estadual de
Educação Tecnológica Paula Souza – CEETEPS – UNESP –

São Paulo, SP, Brazil

e-mail: rodrigoserio@hotmail.com

Abstract

A microactuator made from poly(vinylidene fluoride) (PVDF), a piezoelectric polymer, was fabricated to control the gas flow rate through a glass micronozzle. The actuator was formed by gluing two PVDF sheets together with opposite polarization directions. The sheets were covered with thin conducting films on one side, that were then used as electrodes to apply an electric field to move the valve. The actuator has a rectangular shape, 3mm by 6mm. The device was incorporated with a micronozzle fabricated by a powder blasting technique. Upon applying a DC voltage across the actuator electrodes, one sheet expands while the other contracts, generating an opening motion. A voltage of +300V DC was used to open the device by moving the actuator 25 μ m, and a voltage of -200V DC was used to close the device by moving the actuator 20 μ m lower than the relaxed position. Flow measurements were performed in a low pressure vacuum system, maintaining the microvalve inlet pressure constant at 266 Pa. Tests carried out with the actuator in the open position and with a pressure ratio (inlet pressure divided by outlet pressure) of 0.5, indicated a flow rate of 0.36 sccm. In the closed position and with a pressure ratio of 0.5, a flow rate of 0.32 sccm was measured.

(Some figures in this article are in colour only in the electronic version)

1. Introduction

Piezoelectric actuators are often used in microvalve application because the opening and closing movements can be generated simply by changing the applied electric field polarity. Actuators can be built in two different modes: unimorph or bimorph. The unimorph device contains a piezoelectric layer bonded to a non piezoelectric substrate [1], and a bimorph actuator contains two piezoelectric layers of different polarizations glued together [2].

Most design and fabrication techniques use ceramics for the piezoelectric material because of their high piezoelectric coefficient [3,4]. Disadvantages of using ceramics are their high cost and the difficulty of cutting them to obtain the desired shape and size. By using a polymer as the actuator material it is possible to make lightweight devices with low cost and complex design [5]. Poly(vinylidene fluoride) is a polymer that exhibits a high piezoelectric coefficient compared to other polymeric materials, due to the high electronegativity of the fluorine atoms compared to carbon atoms, leading to a large dipole moment [6]. It has excellent chemical stability and mechanical flexibility, and can readily conform to complex surface shape.

In this paper we describe the fabrication sequence of a bimorph PVDF actuator that we have used as a microvalve to control the gas flow through a micronozzle in a glass substrate. The micronozzle was convergent-divergent with a throat diameter of 245 μm and an entrance diameter of 1mm. Flow rate measurements were with a vacuum system at low pressure (inlet pressure was kept constant as 266 Pa) with three different values of actuator applied voltage. In addition, a similar flow test was performed with a micronozzle without actuator (actuator removed) for comparison.

2. Fabrication sequence

2.1. Development of microactuators using poly(vinylidene fluoride) piezoelectric polymer

The actuators were fabricated using polymer sheet from Piezotech S.A. [7] that was 25 μm thick, already polarized and coated on one side with a conducting thin film. PVDF displays piezoelectric properties only if its molecules are oriented mostly in the same direction (a state known as β phase) [6]. To develop a bimorph structure, low viscosity epoxy glue with good adhesion to the PVDF was used to glue together two polymer pieces of different polarizations, as illustrated in Figure 1. To define the size and shape for the devices it was necessary to take into account the possible deflection amplitude (Δ_x) and the force (F) generated when a DC voltage is applied between the actuator electrodes. Two different equations were used to estimate these values [8] for the bimorph actuator:

$$\Delta_x = \frac{3d_{31}\ell^2V}{4t^2} \quad (1)$$

where d_{31} is the piezoelectric coefficient ($8 \cdot 10^{-12}$ m/V data from the manufacturer), ℓ is the length of the device, V is the applied voltage between the electrodes and t is the piezofilm thickness; and

$$F = \frac{3Ywd_{31}tV}{2\ell} \quad (2)$$

where Y is the Young's modulus (2500 MPa, data from manufacturer), and w is the piezofilm width. Note that equations (1) and (2) do not take into account the thin conducting film and the glue used to bond the two sheets together. The presence of the metallic film and the glue layer reduce the vertical movement of the bimorph structure due to their greater stiffness.

Figure 1: Schematic showing a bimorph structure in which two polymer pieces with different PVDF polarizations are glued together.

To verify the validity of the equations we compared the theoretical calculations made for the actuator deflection with values measured experimentally, using the experimental setup shown in Figure 2. Upon applying a DC voltage between the actuator electrodes there is a vertical deflection of the actuator that changes the position of incidence of the reflected laser beam on the CCD (Charge Coupled Device) surface, and it is possible to measure the actuator displacement to an accuracy of $0.1\mu\text{m}$. Figure 3 shows the results, where the squares are the experimental values and the straight line was obtained from Equation (1). The maximum deviation was $20\mu\text{m}$, indicating good agreement between Equation (1) and the experimental values.

Figure 2: Schematic of the experimental set-up used to measure actuator displacement.

Figure 3: Measured displacement of a bimorph actuator made with PVDF $25\mu\text{m}$ thick having 26 mm total length, 17 mm free movement, and 7 mm width.

The fabrication sequence was as follows. The first step was to cut two squares of 30 x 30 mm² of PVDF sheet to be glued together. To obtain a thin layer of glue, a viscous epoxy composite (Araldite Cristal®) was diluted in xylene (0.6g of epoxy in 0.2ml of xylene). Using a spinner (5000rpm for 10s) a homogeneous layer of glue was deposited on the surface of the square sheet clamped to a silicon substrate. The two polymer squares were then glued together. Importantly, note that to obtain a bimorph structure the polymer squares must be glued with their polarizations in opposite directions, so that when the electric field is applied one layer contracts while the other layer expands, resulting in a net deflection on the sheet. The bimorph sheet was then cut with a sharp knife into rectangles 3 mm wide by 6 mm long. This shape and size yielded a device with good deflection and sufficient force to allow use as a microvalve in a nozzle with pressure difference of 266 Pa between the inlet and outlet. Figure 4 summarizes schematically the steps used in making the polymer piezoelectric actuator. These actuators were subsequently clamped to a conductive substrate with a micronozzle to form the microvalve, as described below.

Figure 4: Fabrication steps: (a) polymer sheet cut into small squares; (b) glue dilution; (c) polymer squares clamped to a silicon substrate and spin-coated with diluted glue; (d) edge-on view showing the two polymer pieces glued together (the $\pm$ symbols beside each PVDF square indicate the direction of polarization); (e) the glued sandwich is cut into the desired rectangular shape.

2.2. Fabrication of micronozzles in glass substrate using a powder blasting technique

Powder blasting has been used for glass decoration and to remove layers of paint and dirt from metallic devices. If the glass surface is masked (meaning: expose only small regions to be removed by the blasting, and protect the remaining area) it is possible to form very small structures. We used a home-made powder blasting machine in which the distance from the substrate and the angle could be controlled, in turn allowing control of the erosion rate.

The particle jet was produced by a high pressure airflow that was directed toward the target, with air/powder mixing occurring in the airflow inside a particle reservoir. The air/powder mixture flowed through a 3 mm diameter tube with a nozzle of the same diameter reinforcing the end of the tube. Powder particles are ejected from the nozzle and impact the target inside a box that is ventilated with a vacuum cleaner so as to remove the powder from the airflow.

There are three classes of materials to be considered in powder blasting: ductile materials (metals), elastomers (rubbers), and brittle materials (glass and silicon). Ductile materials and elastomers show low erosion rate (compared to brittle materials) and so can be used to fabricate the masks. When a brittle material is impacted by a hard sharp particle the contact area is plastically deformed due to the high compressive stress of impact. This deformation leads to a large tensile stress after the impact, resulting in lateral cracks that cause removal of material [9].

The material from which the mask is made must have low erosion rate and the capability of being accurately patterned. Several mask materials have been tested by different research groups, including polymers and metal thin films [10,11]. However, this approach calls for deposition and microfabrication of structures for each surface to be eroded. To simplify the method we chose to use a thin metal plate mask (as in ref. [11]), and the desired pattern (circular hole) was formed simply using a drill.

The micronozzle fabrication process was divided into five steps. First (I) a metal mask was fabricated with holes of 1 mm diameter drilled in it; then (II) the mask was fixed to a glass substrate of size 25x25 mm² and 1.2 mm thick using a plastic glue; in step (III) the powder blasting erosion was performed; then (IV) the mask was transferred to the back side of the glass substrate and a second powder blasting erosion step carried out (good mask alignment is necessary here, so that the erosion holes from both sides match well); and finally, (V) the mask is removed and the substrate cleaned. Figure 5 illustrates the steps described above.

Figure 5: Schematic of the steps used to fabricate micronozzles in a glass substrate using powder blasting.

Parameters used for the powder blasting process were: distance between nozzle and mask 30 mm, air pressure 3 bar, and the powder used was alumina (Al_2O_3) with average particle size 30 μm . The erosion depth reached after 3 minutes was about 600 μm .

Figure 6 shows a SEM micrograph of a typical micronozzle fabricated with the set-up and the steps described above. To obtain this image it was necessary to fracture the glass substrate in the micronozzle region.

Figure 6: Micrograph showing an edge-on view of a typical micronozzle fabricated using the powder blasting technique. The throat diameter is $245\mu\text{m}$ and the inlet diameter is 1 mm.

2.3. Microvalve installation

To complete the fabrication of the microvalve on the glass substrate, a conductive film was deposited on the glass surface that was to be in contact with the bimorph PVDF sheet. A platinum film 200 nm thick was deposited using a filtered vacuum arc plasma deposition process. The actuator was clamped to the glass and aligned with the micronozzle using insulating tape. In this way, one of the actuator contacts was the platinum film, since it was in mechanical contact with the lower side (electrode) of the bimorph structure. The second actuator contact was the top electrode of the bimorph structure. Thin wire connections were glued to the substrate platinum film and to the top electrode of the actuator, using conductive glue. The final step was encapsulation of the device using glass plates with circular holes of 2 mm diameter. Figure 7 shows some of these steps, and Figure 8 is a schematic of the completed device.

Figure 7: Steps in the microvalve installation: (a) micronozzle formed in a glass substrate by powder blasting; (b) platinum thin film deposited on the glass substrate; (c) actuator clamped to the substrate, wires connected to the actuator contacts, and encapsulation to protect the device from the external environment. (The scale of the ruler is in centimeters).

Figure 8: Schematic of the completed device. Gas enters on one side, passes through the micronozzle and bimorph actuator, and leaves from the opposite side. (Schematic not to scale).

3. Microvalve operation with DC voltage

The mechanical response of the microvalve was measured. Tests were performed using positive and negative voltages applied to the top electrode with the lower electrode (in contact with the conductive substrate) grounded. When a positive DC voltage is applied to the top electrode the actuator opens, and when a negative DC voltage is applied the actuator closes. Table 1 summarizes the results.

Table 1. Test results showing actuator displacement vs. applied voltage.

Lower electrode	Voltage applied to top electrode	Actuator motion + = opening - = closing
grounded	+200V	+20 μ m
grounded	+300V	+30 μ m
grounded	-200V	-8 μ m

4. Gas flow characteristics of the microvalve

The gas transport characteristics of the device were measured keeping the microvalve inlet at constant pressure and monitoring the gas flow rate at the outlet. From equation 2, the maximum force generated by the actuator is about 10^{-5} N, which for the throat size here corresponds to a maximum pressure difference between the inlet and outlet of about 900 Pa. With this estimate, the gas flow tests were performed using a maximum pressure difference of 266 Pa.

The experimental setup used to measure the gas flow through the device is shown in Figure 9. A large chamber X ($V_X = 263$ liters) was maintained at constant pressure ($P_X = 266$ Pa) for all experiments. A small chamber Y ($V_Y = 0.343$ liter), initially at a lower pressure ($P_X > P_Y = 4$ Pa), was connected to chamber X through the microvalve device to be characterized. The gas used in all measurements was atmospheric air. Each chamber was connected to a Pirani pressure sensor (model APG-M from BOC Edwards). A Data Acquisition Switch from Agilent (model 34970A) was used to accurately monitor the chamber pressures and ambient temperature as a function of time (t). The data were stored in a computer.

Figure 9: Schematic of the experimental setup used to measure gas flow through the device. **A** - Pirani vacuum gauge; **B** - chamber Y with $P_y < P_x$ (starting condition) and $V_y = 0.343$ liters; **O** – open/close valves; **D** – device including micronozzle and actuator, or micronozzle alone.

Measurements were started when chambers X and Y were connected (by opening a valve), and stopped when the pressures in the two chambers became equal. Gas flow rate through the device was then calculated from the volume of chamber Y and its pressure as a function of time. The device was characterized with the microvalve open and with the microvalve closed. We observed a hysteresis (or memory) effect related to the actuator being opened and closed in short sequence or remaining for some time with no applied voltage and then closed. A reference measurement was also performed with the nozzle alone, without the actuator.

5. Data analysis and results

The measured data are sets of values of chamber Y pressure as a function of time – $P_Y(t)$. For the pressure range spanned here, $4 < P < 266$ Pa, air can be considered as an ideal gas and we have:

$$\frac{dv_y}{dt} = \frac{M_{air} V_Y}{\rho_{air} S R T} \frac{dP_Y}{dt} \quad (3)$$

where dv_y/dt is the standard volumetric flow rate through the device, M_{air} is the average molecular weight of air, ρ_{air} is the air density under standard temperature and pressure conditions, R is the universal gas constant, and T is the ambient temperature. The chamber pressure as a function of time, $P_Y(t)$, was fitted to a polynomial best fit and the derivative dP_Y/dt obtained. The standard volumetric flow rate (dv_y/dt) through the device was then obtained as a function of the pressure ratio P_{out}/P_{in} , where P_{out} is the pressure in chamber Y and P_{in} is the pressure in chamber X.

Figure 10 shows the results for dv_y/dt as a function of P_{out}/P_{in} for three different actuation conditions: applying +300V DC, +200V DC, –200V DC on the actuator electrodes, and also for the case where the micronozzle has no attached actuator (actuator removed). The micronozzle used has throat diameter 245μm and external diameter 1mm. The standard volume rates (dv_y/dt) are in sccm.

Figure 10: Measured standard volumetric flow rate dv_y/dt as a function of P_{out}/P_{in} for three different actuator voltages and for the case where the micronozzle is without actuator. The inlet pressure was maintained at 266 Pa.

Thus the actuator allows precise control of the flow rate through the device. For a pressure ratio of 0.5, the standard volumetric rate was 0.36 sccm for actuator-open with +300V, and 0.32 sccm for actuator-open with -200V.

5.1. The hysteresis effect

The polarization induced in semicrystalline polymers such as PVDF by application of an electric field is a nonlinear function of electric field. This polarization nonlinearity can lead to hysteresis [12], and the effect must be taken into account when the polarity of the applied voltage is reversed. Figure 11 shows the experimental observation of this effect on the performance of the actuator. In the first case (plotted as squares) the actuator was closed with -200V DC after having been opened with +300V DC (in this case the electric field was reversed). In the second case (plotted as circles) the actuator was closed with -200V DC after resting for a long time at 0V. The results show clearly that the gas flow through the device in the first case is greater than in the second case, consequent to actuator hysteresis.

Figure 11: Actuator hysteresis effect. For the case represented by circles the actuator was closed with -200V DC after resting for a long time at 0V; in the case represented by squares the actuator was closed with -200V DC after being opened with +300V DC.

6. Conclusion

We have described the fabrication and performance of a microvalve device for precise control of gas flow rate. The device is composed of a micronozzle formed in a glass sheet with an attached piezoelectric actuator. The actuator is controlled by applying DC voltage to the actuator electrodes. For a pressure ratio P_{out}/P_{in} of 0.5, the standard volumetric flow rate dv_y/dt

in the valve-open position for +300V DC applied voltage is 0.36 sccm, and 0.32 sccm for -200V DC applied voltage. We also identified a hysteresis effect in piezo-actuator behavior for different initial conditions.

Acknowledgments

We are grateful to the Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) and the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brazil, for financial support. We thank Prof. Ian G. Brown for the discussions and the revision of this work, Fernanda de Sá Teixeira and Fernando Massa Fernandes for discussions and the photographs shown here. Part of this work was performed during a research stay by one of us (RSW) at LMIS1/EPFL, Switzerland.

References

- [1] Fu Y, Harvey E C, Ghantasala M K and Spinks G M 2006 Design, fabrication and testing of piezoelectric polymer PVDF Microactuators, *Smart Materials and Structures* **15** s141-46
- [2] Stehr M, Messner S, Sandmaier H and Zengerle R 1996 The Vamp- A new device for handling Liquids or gases, *Sensors and Actuators A* **57** 153-57
- [3] Li S and Chen S 2003 Analytical analysis of a circular PZT actuator for valveless micropumps, *Sensors and Actuators A* **104** 151-61
- [4] Kueppers H, Leuerer T, Schnakenberg U, Mokwa W, Hoffmann M, Schneller T, Boettger U and Waser R 2002 PZT thin films for piezoelectric microactuator applications, *Sensors and Actuators A* **97-98** 680-84
- [5] Shao P, Rummeler Z and Schomburg W K 2004 Polymer micro piezo valve with a small dead volume, *Journal of Micromechanics and Microengineering* **14** 305-09
- [6] Lovinger A J 1983 Ferroelectric Polymers *Science* **220** no:4602 115-21
- [7] Piezotech S.A. piezoelectric polymers, St. Louis/France, web site: www.piezotech.fr
- [8] Measurement Specialties Inc. Piezo Film Sensors Technical Manual, Internet Version, Part 6 of 18, Piezoelectric Basics, 1998, pp:2-6, available at the web site: www.meas-spec.com
- [9] Slikkerveer P J, Bouten P C P, Velt F H and Scholten H 1998 Erosion and damage by sharp particles, *Wear* **217** 237-50
- [10] Wensink H, Jansen H V, Berenschot J W and Elwenspoek M C 2000 Mask materials for powder blasting, *Journal of Micromechanics and Microengineering* **10** 175-80
- [11] Belloy E, Sayah A and Gijs M A M 2000 Powder blasting for three-dimensional microstructuring of glass, *Sensors and Actuators A* **86** 231-237
- [12] Harrison J S and Ounaies Z Piezoelectric Polymers, ICASE Report No. 2001-43 NASA/CR-2001-211422

B6 Artigo aceito para publicação na revista Sensors and Actuators A (elsevier) (previsto para 2008)

The gas flow rate increase obtained by an oscillating piezoelectric actuator on a micronozzle

Rodrigo S Wiederkehr¹, Maria C Salvadori¹, Juergen Brugger², Francisco T Degasperi³ and Mauro Cattani¹

¹ Institute of Physics, University of São Paulo, C.P.66318, CEP 05315-970, São Paulo, SP, Brazil

² Microsystems Laboratory, École Polytechnique Fédérale de Lausanne – EPFL, Station 17, 1015 Lausanne, Switzerland

³ Faculdade de Tecnologia de São Paulo, Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza – CEETEPS – UNESP São Paulo, SP, Brazil

E-mail: rodrigoserio@hotmail.com

Abstract. In this work a piezoelectric actuator was fabricated and installed in a micronozzle outlet. The actuator is a bimorph structure made from a piezoelectric polymer. The micronozzles were fabricated in a glass substrate using the powder blasting technique. Applying an alternate voltage (AC) between the actuator electrodes, it is possible to generate a vertical movement. With a difference of pressure between inlet and outlet of the device the gas through the device was pumped. To attest the pumping effect, the flow rate of the device was compared with the micronozzle in the same condition but without the actuator. The pump rate was defined as the flow of the micronozzle with the actuator oscillating minus the flow of the micronozzle without actuator. The pump rate depends on the inlet pressure and the nozzle throat diameter.

Keywords: piezoelectric microactuator, glass micromachining, pumping effect, micronozzle microfluidics

(Some figures in this article are in colour only in the electronic version)

1 Introduction

Microfluidics is a topic of increase interest due the intense effort in miniaturizes devices. During the last years many structures like microchannels [1,2], microvalves [3,4], and micropumps [5,6] were produced using conventional microfabrication techniques [7]. Polymers have been increasingly used in microfluidics due to the advances in the fabrication processes [8,9] and the low cost.

Micronozzles are very precise passive flow controllers. The flux through a micronozzle occurs when a difference of pressure is applied between its inlet and outlet. The flow rate depends on the pressure ratio. If the ratio P_{out}/P_{in} (pressure outlet/pressure inlet) is small enough, the nozzle is blocked, what means that the mass flow rate is maximum and constant, for a fixed P_{in} . For higher P_{out}/P_{in} the flux decreases gradually and tends to zero. When a nozzle is blocked the velocity of the gas in the throat is the sound speed [10]. Even if the pressure ratio P_{out}/P_{in} is still decreasing the gas velocity in the throat will not change. For a micronozzle the Mach

number is lower than 1 at the throat because the viscous dissipations are stronger due the decrease of the device's scale [11].

In this work we present a pumping effect obtained by a polymer piezoelectric actuator in a micronozzle gas flow, when a difference of pressure is applied between its inlet and outlet. To fabricate the actuator it was used Poly(vinylidene fluoride) (PVDF) as the piezoelectric polymer. The actuator was placed on the micronozzle outlet. The glass substrate used has 1.2mm of thickness, where a micronozzle was fabricated with 260 μ m of throat and 1.1mm of external diameter.

An alternate voltage (AC) was applied between the actuator electrodes to generate a vertical movement. The actuator oscillated according to the frequency of the applied voltage. When the actuator was vibrating and a difference of pressure was applied, between inlet and outlet, the gas through the device was pumped. To attest the pumping effect, the flow rate was compared with the micronozzle in the same condition but without the actuator.

Our intention in this work is to present the experimental evidence of the pumping effect obtained in the present device. In a future work we intend to present a theoretical approach, interpreting this effect, including Monte Carlo simulation. The effect is intricate and involves several discussions present in the literature [11-13]. The main goal is characterize the device to use it as flow controller in a gas line.

2 Fabrication steps

2.1 Micronozzle Fabrication

To obtain a micronozzle with the convergent-divergent format we used the powder blasting technique to micro machine the channel on a glass substrate [14]. The substrate used was a regular glass microscope slide with 1.2 mm thickness cut with an area of 25x25 mm². The surface was masked with a metal plate with thickness of 0.5mm with a circular hole of 1mm diameter. The joint mask-substrate was exposed to the powder blasting (the jet was a mixture of air with alumina particles with average particle size of 30 μ m) during 3 minutes in each side of the substrate. To process the second side an alignment was required between the two erosion points. Figure 1 shows the cross section view of a micronozzle made using the described technique.

Figure 1: Cross section view of a micronozzle made in glass substrate using the powder blasting technique. The throat has 260 μ m of diameter and the inlet and outlet have about 1mm diameter.

2.2 Piezoelectric polymer actuators

The actuators were fabricated using polymer sheets from Piezotech S.A. [15] with 25 μ m thick, already polarized and coated with a conducting thin film as electrode in one side. The first step was to cut two squares of 30 x 30 mm² of PVDF sheet to be glued. To obtain a thin layer of glue, an epoxy viscous composite (Araldite Cristal[®]) was diluted in xylene (0.6g of epoxy in 0.2ml of xylene). Using a spinner (5000rpm for 10s) it was possible to deposit a homogeneous layer of glue in the surface of the square sheet that was clamped in a silicon substrate and then join the two parts. It is important to note that, to obtain a bimorph structure, the polymer squares must be glued with their polarization in the opposite directions (so when the electric field is applied though the electrodes one layer will contract while the other layer

will expand causing a deflection on the whole device). With a sharp knife the bimorph structure was cut in rectangles with 3 mm width and 6 mm length. Figure 2 shows the steps for the bimorph device fabrication.

Figure 2: Fabrication steps: (a) polymer sheet cut into small squares; (b) glue dilution; (c) polymer squares clamped to a silicon substrate and spin-coated with diluted glue; (d) edge-on view showing the two polymer pieces glued together (the $\pm$ symbols beside each PVDF square indicate the direction of polarization); (e) the glued sandwich is cut into the desired rectangular shape.

2.3 Device installation

The bimorph actuator described above has both sides with a conductive film as electrodes for actuation. The substrate, with the micronozzle, was previously coated with a platinum thin film to obtain a conductive surface. The actuator was fixed on the nozzle outlet using a conductive double stick tape. In this way there was a gap between the actuator and the outlet nozzle, allowing the actuator oscillating movement. The actuator was installed on the substrate, aligned with the nozzle, so that its lower conductive film was in electrical contact with the substrate platinum film. Using conductive glue the wire connections are glued: one in

the platinum film on the substrate and the other one in the top electrode of the actuator. The last step was the encapsulation using a glass substrate with a circular hole of 2mm diameter. Figure 3 shows a scheme and figure 4 shows a picture of the final device already encapsulated.

Figure 3: Scheme of the lateral view of the actuator installed on the micronozzle outlet.

Figure 4: Upside view of the actuator installed on the micronozzle outlet (the scale is in centimeter).

3 Experimental set-up and procedure

The gas transport characteristics of the device were measured keeping the micronozzle inlet at constant pressure and monitoring the gas flow rate at the outlet. The experimental setup used to measure the gas flow through the device is shown in figure 5. A large chamber X ($V_X = 263$ liters) was maintained at constant pressure (P_X) for all experiments. A small chamber Y ($V_Y = 0.343$ liter), initially at a lower pressure ($P_X > P_Y = 4$ Pa), was connected to chamber X through the device to be characterized. The gas used in all measurements was atmospheric air. Each chamber was connected to a Pirani pressure sensor (model APG-M from BOC Edwards). A Data Acquisition Switch from Agilent (model 34970A) was used to accurately monitor the chamber pressures and ambient temperature as a function of time (t). The data were stored in a computer. Measurements were started when chambers X and Y were connected (by opening a valve), and stopped when the pressures in the two chambers became equal. Gas flow rate through the device was then calculated from the volume of chamber Y and its pressure as a function of time. We performed four measurements with different inlet pressures (P_X): 266 Pa, 1333 Pa, 14500 Pa and 93324 Pa.

The tests to verify the pumping effect due the actuator oscillation were performed applying alternate voltage (200V) with frequency of 5Hz.

Legend:

A - Vacuum pirani sensor

B - Chamber Y with $P_y < P_x$ (starting condition) and $V_y = 0.343$ liters

O - Valve open/close

D - Device with the micronozzle and actuator or just the micronozzle

Figure 5: Scheme of the set-up to measure the flow rate of the micronozzle with and without actuator installed on the outlet.

4 Results

The data acquired generated a table with the chamber pressures (P_y and P_x) and the ambient temperature (T) as function of the time (t), for each inlet pressure. To obtain the gas flow from these data, the Boyle-Mariotte approach was applied:

$$\dot{m}_Y = \frac{dm_Y}{dt} = \frac{M}{R T} V_Y \frac{dP_Y(t)}{dt} \quad (1)$$

where m_Y is the mass of gas in chamber Y, dm_Y/dt the mass flow rate through the micronozzle, M the average molar mass (28.96 g/mol for the atmospheric air), V_Y the volume of the chamber Y ($V_Y = 3.43 \times 10^{-4} \text{ m}^3$), R the Universal gas constant, T the absolute temperature, P_Y the pressure in chamber Y and t the time. Convert in sccm (standard cubic centimeters per minute), the mass flow rate (f) will be:

$$f = \frac{\dot{m}_Y}{\rho_{\text{air}}} = \frac{M}{R T \rho_{\text{air}}} V_Y \frac{dP_Y(t)}{dt} \quad (2)$$

where ρ_{air} is the air density in standard temperature and pressure.

Figure 6 shows the pressure in chamber Y as function of the time for a micronozzle without the actuator, with throat diameter of 260 μm and inlet and outlet diameter of 1.1mm. The inlet pressure was kept constant as 14500 Pa. With this data it was possible to calculate the gas flow rate, using equation 2. Note that between 2s and 9s the curve is a straight line so $\frac{dP_Y(t)}{dt} = \text{constant}$ and f is also constant and we say that the nozzle is blocked.

Figure 6: Pressure in chamber Y as function of the time due the gas flow through the micronozzle without the actuator, with throat diameter of 260 μ m and inlet and outlet diameter of 1.1mm.

The volume flow rate to the inlet pressure of 266 Pa, 1333Pa, 14500Pa and 93324Pa to a micronozzle without actuator and with an oscillating actuator at the nozzle outlet are shown in figures 7, 8, 9 and 10. The micronozzle used in these experiments was the same one mentioned in Figure 6 with throat diameter of 260 μ m and inlet and outlet diameter of 1.1mm. We define as pump rate the flow rate of the micronozzle with the oscillating actuator minus the flow rate of the micronozzle without actuator. All the flow rates are in sccm as stated in equation 2.

Figure 7: Flow rate for a single micronozzle without actuator (circles) and a micronozzle with an oscillating actuator on the outlet (crosses). The inlet pressure was 266 Pa and the pump rate was 0.11 sccm (for pressure ratio of 0.5).

Figure 8: Flow rate for a single micronozzle without actuator (circles) and a micronozzle with an oscillating actuator on the outlet (crosses). The inlet pressure was 1333 Pa and the pump rate was 1.4 sccm (for pressure ratio of 0.5).

Figure 9: Flow rate for a single micronozzle without actuator (circles) and a micronozzle with an oscillating actuator on the outlet (crosses). The inlet pressure was 14500 Pa and the pump rate was 27 sccm (for pressure ratio of 0.5).

Figure 10: Flow rate for a single micronozzle without actuator (circles) and a micronozzle with an oscillating actuator on the outlet (crosses). The inlet pressure was 93324 Pa and the pump rate was 305 sccm (for pressure ratio of 0.5).

Finally, to compare results for different micronozzles, the same experiment was performed using the same inlet pressure for two different micronozzles. The throat diameters were: 260 μ m and 420 μ m. The data acquisition was realized with the micronozzles without actuator and with an oscillating actuator at the nozzle's outlet. The results are shown in figure 11, attesting that the pumping effect is present in all cases.

Legend:

- - micronozzle with throat diameter of 420 μ m and the piezoactuator oscillating at 5Hz
- △ - micronozzle without actuator with throat diameter of 420 μ m
- + - micronozzle with throat diameter of 260 μ m and the piezoactuator oscillating at 5Hz
- O - micronozzle without actuator with throat diameter of 260 μ m

Figure 11: Flow rate for two micronozzles without actuator with different throat diameter: 260 μ m and 420 μ m and for the same micronozzles with an oscillating actuator on the outlet. The inlet pressure was 93324 Pa for both cases. The pump rate was 305 sccm for the micronozzle with throat diameter of 260 μ m and 595 sccm for the micronozzle with throat diameter of 420 μ m (in both cases the pump rate was for pressure ratio of 0.5).

5 Conclusions

A piezoelectric actuator was fabricated and installed in a micronozzle outlet. An oscillating movement generated an effect of pumping, when an alternate voltage is applied, increasing the flow rate. The pump rate was defined as the flow of the micronozzle with the actuator oscillating minus the flow of the micronozzle without actuator. The pump rate depends on the inlet pressure and on the nozzle throat diameter.

Acknowledgments

We are grateful to the Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) and the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brazil, for financial support. We thank Fernanda de Sá Teixeira and Fernando Massa Fernandes for the discussions and the photos that are presented in this work. Part of this work has been performed during a research stay of one of us (RSW) at LMIS1/EPFL.

References

- [1] Tjerkstra R W, Boer M J De, Berenschot J W, Gardeniers J G E, Berg A Van Den, Elwenpoek M C 1997 Etching technology for microchannels *Proceeding of MEMS 97, 10th IEEE International Workshop Micro Electromechanical Systems* 147-151
- [2] Kovacs G T A, Maluf N I and Petersen, K E 1998 Bulk micromachining of silicon *Proceedings of IEEE*, **86**(8)1536-1551
- [3] Ohnstein T R, Fukiura, T, Ridley J and Bonne, U 1990 Micromachined silicon microvalve. *Proceedings of MEMS 90, 2nd IEEE Workshop Micro Electromechanical Systems* 95-98
- [4] Vandelli N, Wroblewski D, Velonis M and Bifano T (1998) Development of a MEMS microvalve array for fluid flow control *Journal of Micro Electromechanical Systems* **9**(4) 395-403
- [5] Zengerle R, Ulrich J, Kluge S, Richter M, and Richter A 1995 A bidirectional silicon micropump *Sensors and Actuators A* **50** 81-86
- [6] Koch M, Harris N, Evans A G R, White N M and Brunnschweiler A 1998 A novel micromachined pump based on thick film piezoelectric actuation *Sensors and Actuators A* **70** 98-103
- [7] Madou M 1997 Fundamentals of Microfabrication CRC Press, New York
- [8] Becker H and Gärtner C 2000 Polymer microfabrication methods for microfluidic analytical applications *Electrophoresis* **21** 12-26
- [9] Xu T B and Su J 2005 Development, characterization and theoretical evaluation of electroactive polymer-based micropump diaphragm *Sensors and Actuators A* **121** 267-274
- [10] Fox R W and McDonald A T 1999 Introduction to fluid mechanics. New York: Wiley
- [11] Hao P-F, Ding Y-T, Zhao-Hui Y, Feng H and Zhu K-Q 2005 Size effect on gas flow in micro nozzle *Journal of Micromechanics and Microengineering* **15** 2069-2073
- [12] Bayt R L and Breuer K S 1998 Viscous effects in supersonic MEMS-fabricated micronozzles *Proceedings of the 3rd ASME Microfluids Symposium* Anaheim, CA
- [13] Stehr M, Messner S, Sandmaier H and Zengerle R 1996 The Vamp – a new device for handling liquids or gases *Sensors and Actuators A* **57** 153-157
- [14] Belloy E, Sayah A and Gijs M A M 2000 Powder blasting for three-dimensional microstructuring of glass *Sensors and Actuators A* **86** 231-237
- [15] Piezotech S.A. piezoelectric polymers, St. Louis/France, web site: www.piezotech.fr

Development of microvalves for gas flow control in micronozzles using PVDF piezoelectric polymer

R S Wiederkehr¹, M C Salvadori¹, F T Degasperi² and M Cattani¹

¹ Institute of Physics, University of São Paulo,
CP 66318, CEP 05315-970, São Paulo, SP, Brazil

² Faculdade de Tecnologia de São Paulo, Centro Estadual de
Educação Tecnológica Paula Souza – CEETEPS – UNESP – São Paulo, SP,
Brazil

E-mail: rodrigoserio@hotmail.com

Abstract. This work describes a fabrication and test sequence of microvalves installed on micronozzles. The technique used to fabricate the micronozzles was powder blasting. The microvalves are actuators made from PVDF (polivinyldene fluoride), that is a piezoelectric polymer. The micronozzles have convergent-divergent shape with external diameter of 1mm and throat around 230 μ m. The polymer have low piezoelectric coefficient, for this reason a bimorph structure with dimensions of 2mm width and 4mm of length was build (two piezoelectric sheets were glued together with opposite polarization). Both sheets are recovered with a conductor thin film used as electrodes. Applying a voltage between the electrodes one sheet expands while the other contracts and this generate a vertical movement to the entire actuator. Applying +300V DC between the electrodes the volume flux rate, for a pressure ratio of 0.5, was 0.36 sccm. Applying -200V DC between the electrodes (that means it closed) the volume flux rate was 0.32 sccm, defining a possible range of flow between 0.32 and 0.36 sccm. The third measurement was performed using AC voltage (200V AC with frequency of 1Hz), where the actuator was oscillating. For pressure ratio of 0.5, the flow rate was 0.62 sccm.

(Some figures in this article are in colour only in the electronic version)

1. Introduction

Piezoelectric actuators are very often used to fabricate microvalves because of the viability to obtain an opening and closing movement by changing the direction of the electric field applied on it. The actuators can be built in two different modes: unimorph or bimorph. The unimorph device is a piezoelectric layer bonded to a non piezoelectric substrate [1] and a bimorph actuator is two piezoelectric layers of different polarization glued together [2].

Most of the design and fabrication techniques known uses piezoelectric ceramics as material due the high piezoelectric coefficient [2,3]. The disadvantage of using the ceramic is their high cost and the difficulty to cut them to obtain the desired size and shape. Using polymer as the material to fabricate the actuator it is possible to have devices lightweight, with low cost and with complex design [4]. Poli(vinylidene fluoride) was used because it exhibits the strongest piezoelectric coefficients when comparing to others polymeric piezoelectric materials [5].

In this paper we describe the fabrication sequence of a bimorph PVDF actuator used as a microvalve to control the gas flux through a micronozzle present in a glass substrate. The micronozzle was convergent-divergent with a throat diameter of 230 μ m and an external diameter entrance of 1mm. The tests were performed in a gas line under low pressures (inlet pressure was kept constant as 266 Pa) with different values of applied voltage. In addition,

similar flow tests were performed with a micronozzle without actuator (uncovered) to compare the results.

2. Fabrication sequence

2.1. Development of microactuators using poly(vinylidene fluoride) piezoelectric polymer

The actuators were fabricated using polymer sheets from Piezotech S.A. [6] with 25 μ m thick, already polarized and coated with a conducting thin film as electrode in one side. PVDF presents piezoelectric proprieties only if its molecules are mainly oriented in the same direction (state known as β phase) [5]. To develop the bimorph structure, low viscous epoxy glue, presenting good adhesion with the PVDF, was used to glue two pieces of different polarization. The first step was to cut two squares of 30 x 30 mm² of PVDF sheet to be glued to each other. To obtain a thin layer of glue, an epoxy viscous composite (Araldit Cristal[®]) was diluted in xylene (0.6g of epoxy in 0.2ml of xylene). Using a spinner (5000rpm for 10s) it was possible to deposit a homogeneous layer of glue in the surface of the square sheet that was clamped in a silicon substrate and then join the two parts. It's important to note that, to obtain a bimorph structure, the polymer squares must be glue with their polarization in the opposite directions (so when the electric field is applied through the electrodes one layer will contract while the other layer will expand causing a deflection on the whole device). With a sharp knife the bimorph structure was cut in rectangles with 3 mm width and 6 mm length. The size and format chosen created a device with good deflection and enough force to be used as microvalve in a nozzle with a pressure difference of 266 Pa between the inlet and outlet.

2.2. Fabrication of micronozzles in glass substrate using the powder blasting technique

Powder blasting has been used for glass decoration and to remove layers of paint and clean dirt from metallic devices. If the glass surface is masked (that means expose just small areas that will be removed and protect the remained area) it's possible to fabricate very small structures.

The material to make the mask must have low erosion rate, capability and accuracy in patterning. Several masks were tested by different research groups like polymer mask and metallic thin film mask [7,8]. But, to use these materials as masks for powder blasting, it is necessary to deposit them and microfabricate structures for each surface to be eroded. To simplify the method we chose to use a metal plate mask (like ref.[8]). For this work purpose, it was possible to transfer the desired patterns (circular hole) just using a drill.

The fabrication process of the micronozzles was divided in 5 steps. Initially (I) a metal mask was fabricated with holes of 1mm diameter (made with a drill); then (II) the mask was fixed in a glass substrate with 25x25 mm² and 1.2mm thick, using a plastic glue; in the sequence, (III) the powder blasting erosion was performed; then (IV) the mask was transferred to the back side of the glass substrate and a new powder blasting erosion was performed, in this point it is necessary to align the mask so as to coincide both erosion; and, finally, (V) to remove the mask and clean the substrate.

2.3. Microvalve installation

To install the microvalve on the glass substrate, it was necessary to deposit a conductive film on the substrate surface that was to be in contact with the bimorph PVDF structure. A platinum film 200 nm thick was deposited by filtered vacuum arc. Using an insulate tape the actuator was clamped and aligned with the micronozzle. In this way, one of the actuator contacts was the substrate platinum film, since it was in mechanical contact with the lower electrode of the bimorph structure. And the second actuator contact was the top electrode of the bimorph structure. Wire connections were glued in the substrate platinum film and in the top electrode of the actuator, using conductive glue. The last step was the encapsulation of the device using a glass plates with a circular hole of 2mm diameter. Figure 1(a) shows the upside view and figure 1(b) shows the schematic draw of the device (lateral view) after been mounted.

Figure 1: (a) Upside view of the microvalve mounted. In the borders the white epoxy glue was used to seal and prevent leaks (the scale of the rules is in centimeter). (b) Scheme of the complete device. The gas enters in one side pass by the micronozzle, the bimorph actuator and quit by the opposite side. The scheme is out of scale.

3. Microvalve Operation with DC and AC Voltage

In this section we present the mechanical response of the microvalve described. When a positive DC voltage is applied on the top electrode, the actuator opens (it moves vertically in the direction of the top electrode). When a negative DC voltage is applied to the top electrode, the actuator close (it moves vertically in the direction of the lower electrode). Applying an AC voltage the actuator oscillates according to the voltage frequency.

4. Characterization of the microvalve using a gas flow line

The device was characterized keeping at a constant pressure the inlet of the microvalve and measuring the gas flow rate at the outlet. The gas flow tests were performed using a maximum pressure difference of 266 Pa.

A large chamber X ($V_X = 263$ liters) was kept in the same pressure ($P_X = 266$ Pa) during all the experiments and was in contact with the device entrance. A small chamber Y ($V_Y = 0.343$ liters), initially in a lower pressure ($P_X > P_Y = 4$ Pa), is connected with chamber X through the device to be characterized. The gas used in all measurements was the atmospheric air. Each chamber was monitored with a pressure pirani sensor (model APG-M from BOC Edwards). A Data Acquisition Switch from Agilent (model 34970A) was used to acquire the chambers pressure and ambient temperature from the sensors as function of the time (t). The data were stored in a computer.

5. Data analyses and results

The data collected from the measurements were basically the chamber Y pressure (P_Y) as function of the time (t). In the range of pressures used in this work ($4 < P < 266$ Pa), the air can be considered as an ideal gas. In this way the following equation was used:

$$\frac{dv_y}{dt} = \frac{M_{air} V_Y}{\rho_{airS} R T} \frac{dP_Y}{dt} \quad (1)$$

where dv_y/dt is the standard volume flow rate thought the device, M_{air} is the average molecular mass of the air, ρ_{airS} is the air density in standard conditions of temperature and pressure, R is the universal gas constant and T is the ambient temperature.

The chamber Y pressure (P_Y) as function of the time (t) has been adjusted by a polynomial best fit and the derivate dP_Y/dt has been calculated. With this result and the measured values of V_Y and T , the standard volume rate (dv_y/dt) thought the device was obtained as function of the pressure ratio P_{out}/P_{in} , where P_{out} is the pressure in the chamber Y and P_{in} is the pressure in the chamber X

Figure 2(a) shows the results of dv_y/dt as function of P_{out}/P_{in} for three different actuation conditions: applying +300V DC, +200V DC, -200V DC on the actuator electrodes and also for the case where the micronozzle is without actuator. The micronozzle used has throat of 230 μ m and external diameter of 1mm. Figure 2(b) shows the results of dv_y/dt as function of P_{out}/P_{in} for the actuation conditions: applying 200V AC voltage with 5Hz of frequency and the case where the micronozzle is without actuator. The standard volume rates (dv_y/dt) are in sccm (stander cubic centimeter per minute).

Figure 2: (a) Results of the standard volume rates dv_y/dt as function of P_{out}/P_{in} for three different actuation conditions and for the case where the micronozzle is without actuator. (b) Standard volumes rates for the case applying an AC voltage with 5Hz of frequency. The standard volume rates (dv_y/dt) are in sccm (stander cubic centimeter per minute). The inlet pressure was kept constant as 266 Pa.

6. Conclusions

In this work was presented a device fabrication that allows controlling precisely the flow rate through it. The device was a composition of micronozzle fabricated in glass substrate and a piezoelectric actuator. The actuation was controlled applying DC and AC voltages on the actuators electrodes. For the pressure ratio P_{out}/P_{in} of 0.5, the standard volume rates dv_y/dt for the open position +300V DC was 0.36 sccm, for -200V DC was 0.32 sccm and for 200V AC was 0.62 sccm.

Acknowledgments

We are grateful to the to the Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) and the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brazil, for financial support.

References

- [1] Fu Y, Harvey E C, Ghantasala M K and Spinks G M 2006 Design, fabrication and testing of piezoelectric polymer PVDF Microactuators, *Smart Materials and Structures* **15** s141-46
- [2] Stehr M, Messner S, Sandmaier H and Zengerle R 1996 The Vamp- A new device for handling Liquids or gases, *Sensors and Actuators A* **57** 153-57
- [3] Li S and Chen S 2003 Analytical analysis of a circular PZT actuator for valveless micropumps, *Sensors and Actuators A* **104** 151-61
- [4] Shao P, Rummeler Z and Schomburg W K 2004 Polymer micro piezo valve with a small dead volume, *Journal of Micromechanics and Microengineering* **14** 305-09
- [5] Lovinger A J 1983 Ferroelectric Polymers *Science* **220** no:4602 115-21
- [6] Piezotech S.A. piezoelectric polymers, St. Louis/France, web site: www.piezotech.fr
- [7] Wensink H, Jansen H V, Berenschot J W and Elwenspoek M C 2000 Mask materials for powder blasting, *Journal of Micromechanics and Microengineering* **10** 175-80
- [8] Belloy E, Sayah A and Gijs M A M 2000 Powder blasting for three-dimensional microstructuring of glass, *Sensors and Actuators A* **86** 231-237

Referências

- [1] Petersen K E 1982 Silicon as mechanical material *Proceedings of IEEE* **70** (5) 420-57
- [2] Terry S C, Jerman J H e Angell J B 1979 A gas chromatographic air analyzer fabricated on silicon wafer *IEEE Transactions on Electron Devices* **26** 1880-6
- [3] Beebe D J, Moore J S, Bauer J M, Yu Q, Liu R H, Devadoss C e Jo B H 2000 Functional hydrogel structures for autonomous flow control inside microfluidics channel *Nature* **404** 588-90
- [4] Nguyen N-T e Truong T-Q 2004 A fully polymeric micropump with piezoelectric actuator *Sensors and Actuators B* **97** 137-43
- [5] Truong T-Q e Nguyen N-T 2004 A polymeric piezoelectric micropump based on lamination technology *Journal of Micromechanics and Microengineering* **14** 632-8
- [6] Hao P-F, Ding Y-T, Yao Z-H, He F e Zhu K-Q 2005 Size effect on gas flow micro nozzles *Journal of Micromechanics and Microengineering* **15** 2069-73
- [7] Pfahler J, Harley J C, Bau H e Zemel J N 1991 Gas and liquid flow in small channels *ASME DSC* **32** 49-60
- [8] Pong K C, Ho C M, Liu J e Tai Y C 1994 Non linear pressure distribution in uniform microchannels *ASME FED* **197** 51-56
- [9] Shih J C, Ho C M, Liu J M e Tai Y C 1996 Monoatomic and polyatomic gas flow through uniform microchannels *ASME DSC* **59** 197-203
- [10] Fox R W e Mc Donald A T 1981 Introduction to fluids mechanics John Wiley & Sons (New York, NY)

- [11] Bayt R L, Ayon A A e Breuer K S 1997 A performance evaluation of MEMS-based micronozzles 33rd *AIAA Joint Propulsion Conference* AIAA Paper **97-3169**
- [12] Li S, Freidhoff C B, Young R M e Ghodssi R 2003 Fabrication of micronozzles using low-temperature wafer-level bonding with SU-8 *Journal of Micromechanics and Microengineering* **13** 732-38
- [13] Silva S, Salvadori M C, Kawakita K, Pereira M T, Rossi W e Cattani M 2003 Fabrication of diamond flow controller micronozzles *Diamond and Related Materials* **11** 237-41
- [14] Veider C, Oehman O e Elderstig H 1995 A pneumatic activated microvalve with a silicon rubber membrane for integration with fluid-handling systems *Proceedings of Transducers'95* 284-86
- [15] Hosokawa K e Maeda R 2000 A pneumatically actuated three way microvalve fabricated with polydime-thylsiloxane using membrane transfer technique *Journal of Micromechanics and Microengineering* **10** 415-20
- [16] Sim D Y, Kurabayshi T and Esashi M 1995 Bakable silicon pneumatic microvalve *Proceedings of Transducers'95* 280-83
- [17] Rich C A e Wise K D 2003 A high flow thermopneumatic microvalve with improved efficiency and integrated state sensing *Journal of Microelectromechanical Systems* **12** 201-8
- [18] Takao H, Miyamura K, Ebi H, Ashiki M, Sawada K e Ishida K 2005 A MEMS microvalve with PDMS diaphragm and two chamber configuration of thermopneumatic actuator for integrated blood test system on silicon *Sensors and Actuators A* **119** 468-75
- [19] Ho C-M, Yang X, Grosjean C e Tai Y-C 1998 A MEMS thermopneumatic silicone rubber membrane valve *Sensors and Actuators A* **64** 101-8

- [20] Chu W, Mehregany M e Mullen R L 1993 Analysis of tip deflection and force of a bimetallic cantilever microactuator *Journal of Micromechanics and Microengineering* **3** 4-7
- [21] Jerman P W 1994 Electrically activated normally closed diaphragm valves *Journal of Micromechanics and Microengineering* **4** 210-6
- [22] Barth P W 1995 Silicon microvalves for gas flow control *Proceedings of Transducers'95* 276-7
- [23] Kolm M, Skrobanek K D e Miyazaki S 1999 Development of stress-optimized shape memory microvalves *Sensors and Actuators A* **72** 243-50
- [24] Kolm M, Dittmann D, Quandt E, Winzek B Miyazaki S e Allen D M 1999 Shape memory microvalves based on thin films or rolled sheets *Materials Science and Engineering A* **273-5** 784-8
- [25] Shikida M, Sato K, Tanaka K, Kawamura Y e Fumisaki Y 1994 Eletrostatically driven gas microvalve with high conductance *Journal of Microelectromechanical Systems* **3(2)** 76-80
- [26] Vandelli N, Wroblewski D, Velonis M e Bifano T 1998 Development of a MEMS microvalve array for fluid flow control *Journal of Microelectromechanical Systems* **7(4)** 395-403
- [27] Fu Y, Ghantasala M K, Harvey E e Qin L 2005 Design and fabrication of a hybrid actuator *Smart Materials and Structures* **14** 488-95
- [28] Lagorce L K, Brand O e Allen M G 1999 Magnetic microactuators based on polymer magnets *Journal of Microelectromechanical Systems* **8** 2-9
- [29] Pourahmadi F, Christel L, Petersen K, Mallon J e Bryzek J 1990 Variable flow microvalve structure fabricated with silicon fusion bonding *Technical Digest of IEEE Solid Sensor and Actuator Workshop* 78-81

- [30] Bohm S, Burger G S, Korthorst M T e Roseboom F 2000 A micromachined silicon valve driven by a miniature bistable electromagnetic actuator *Sensors and Actuators A* **80** 77-83
- [31] Nguyen N-T e Wereley S 2006 Fundamentals and Applications of Microfluidics – second edition (Bostom, MA: Artec House)
- [32] Jaffe H e Berlincourt D A 1965 Piezoelectric transducers materials *Proceedings of the IEEE* **53(10)** 1372-86
- [33] Kawai H 1969 The piezoelectricity of the Poly(vinylidene fluoride) *Japanese Journal of Applied Physics* **8** 975-76
- [34] Waibel G, Kohnle J, Cernosa R, Storz M, Schmitt M, Ernst H, Sandmaier H, Zengerle R e Strotbelt T 2003 Highly integrated autonomous microdosage system *Sensors and Actuators A* **103** 225-30
- [35] Goettsche T, Kohnle J, Willmann M, Ernst H, Spieth S, Tischler R, Messner S, Zengerle R e Sandmaier H 2005 Novel approaches to particle tolerant valves for use in drug delivery systems *Sensors and Actuators A* **118** 70-77
- [36] Sokhanvar S, Packirisamy M e Dargahi J 2007 A multifunctional PVDF- based tactile sensor for minimally invasive surgery *Smart Materials and Structures* **16(4)** 989-98
- [37] Piezotech S.A. – Polímeros piezoelétricos, Endereço: Rue de Colmar 9, 68220 Héisingue/ França, web site: www.piezotech.fr
- [38] Measurements Specialities Inc. – Fábrica de polímeros e sensores piezoelétricos, Endereço: Lucas Way 1000, 23666 Hampton VA, EUA, web site: www.meas-spec.com

- [39] Harrison J S and Ounaies Z Piezoelectric Polymers, ICASE Report No. 2001-43 NASA/CR-2001-211422
- [40] Lovinger A J 1983 Ferroelectric Polymers *Science* **220** no:4602 115-21
- [41] Furukawa T 1989 Piezoelectricity and Pyroelectricity in Polymers *IEEE Transactions on Electrical Insulation* **24(3)** 375-394
- [42] Measurements and Specialties Inc. Piezo Film Sensors Technical Manual, Internet Version, part 6 of 18, Piezoelectric Basics, pp:2-6, available at: www.meas-spec.com
- [43] Tjerkstra R W, Boer M J De, Berenschot J W, Gardeniers J G E, Berg A Van Den, Elwenspoek M C 1997 Etching technology for microchannels, *Proceeding of MEMS 97, 10th IEEE International Workshop Micro Electromechanical Systems*, pp:147-151
- [44] Kovacs G T A, Maluf N I and Petersen, K E 1998 Bulk micromachining of silicon, *Proceedings of IEEE*, **86(8)**:1536-1551
- [45] Madou M (1997) Fundamentals of Microfabrication. CRC Press, New York
- [46] Bayt R and Breuer K 1998 Viscous effects in supersonic MEMS-Fabricated micronozzles *Proceedings of the 3rd ASME Microfluidics symposium*, Anaheim, CA
- [47] Wensink H, Jansen H V, Berenschot J W and Elwenspoek M C 2000 Mask materials for powder blasting, *Journal of Micromechanics and Microengineering* **10** 175-80
- [48] Belloy E, Sayah A and Gijs M A M 2000 Powder blasting for three-dimensional microstructuring of glass, *Sensors and Actuators A* **86** 231-237
- [49] Slikkerveer P J, Bouten P C P, Velt F H and Scholten H 1998 Erosion and damage by sharp particles, *Wear* **217** 237-50

- [50] Anders A 1997 Metal Plasma Immersion Ion Implantation and deposition: a review, *Surface and Coatings Technology* **93** 158-67
- [51] ISO9300 1990 – Measurement of gas flow by means of critical flow venturi nozzles, International Organization for Standardization, Switzerland
- [52] Mammana S S, Degasperi F T, Salvadori M C, Sparapani D C, Laino M F, Rangel R C, Teixeira F S and Cattani M 2007 Critical Parameters Determination of Sonic Flow Controller Diamond Microtubes and Micronozzles, *Journal of Vacuum Science and Technology B* **25(6)** 1804-1807
- [53] Silva S 2002 Microbocais de diamante, *Tese de doutoramento defendida do IFUSP em 06/2002*