

# ESTRUTURAS MINIATURIZADAS E EMPACOTADAS USADAS PARA ENSINO EM ENGENHARIA

Lílian Marques Silva<sup>1</sup>; Roberto da Rocha Lima<sup>3</sup>; Eliphaz W. Simões<sup>1</sup>; José Fabio Santos Barros<sup>2</sup>; Maria Lúcia P. da Silva<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Av. Prof. Luciano Gualberto, 158 – Travessa 3  
05508900 - São Paulo – SP  
email: malu@lsi.usp.br

<sup>2</sup> Faculdade de Tecnologia de São Paulo  
Pça. Cel. Fernando Prestes, 30  
01124-060 - Bom Retiro- SP

<sup>3</sup> Instituto de Física da Universidade de São Paulo  
Rua do Matão, 187 - Travessa R  
05508900 - São Paulo – SP  
email: rrlima@if.usp.br

**Resumo:** A utilização de canais preenchidos com material particulado ocorre tanto na Engenharia Química, para produção de compostos, como na Química, para a análise de substâncias. O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma metodologia simples para testes e de baixo custo voltada para o ensino sobre o comportamento dos fluidos no interior de estruturas onde partículas dificultam a passagem deste fluido. A estrutura utilizada possui seis celas diferentes e foi testada em meio gasoso usando diferentes reagentes. Para fluido gasoso, têm-se para as substâncias puras menor tempo de residência quando comparadas as misturas. Os resultados permitem montar tabelas qualitativas que descrevem vários fenômenos, tais como, difusão, separação de compostos, perda de carga, etc.

**Palavras-chave:** Separação de misturas, Destilação, Filmes Adsorventes.

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, encontra-se em amostras atmosféricas desde grandes partículas até a emissão de aerossóis e *smog* (LIGHTY, 2000) (GROSJEAN, 1995) (FOX, 1995). A poluição do ar tornou-se um dos maiores problemas da modernidade e, desta forma, fazer análises de amostras de gasosas torna-se de suma importância (VERANTH, 2000) (KANAKIDOU, 2000) (DAMLE, 1982). Várias podem ser as operações unitárias usadas na remoção de partículas e/ou aerossóis em fase gasosa.

Em processos químicos a maioria dos dispositivos usados para análise podem ter sua superfície alterada com filme adsorvente, particulados, com anéis de *Raschig* entre outros, o intuito é favorecer a adsorção de material em sua superfície. Equipamentos de maior porte, tais como, as colunas de destilação também utilizam dispositivos no caminho do fluxo, isto é, o recheio, que não deve reagir com o material sendo separado na coluna. Um dos recheios mais comuns são os anéis de *Raschig*, que correspondem a anéis com diâmetro igual ao comprimento. A dimensão destes anéis é bem variada, como também o tamanho das colunas a que eles se

destinam, mas é da ordem de mm ou cm. Como exemplo, pode-se citar na área de análises químicas as colunas cromatográficas que utilizam partículas com dimensões da ordem de micra e com grande área superficial (GROB, 2004), com a intenção de favorecer a adsorção de material em sua superfície. Estes equipamentos são grandes e onerosos. A miniaturização destes equipamentos torna-se viável principalmente em questões de ensino, pois nem sempre a instituição pode disponibilizar equipamentos onerosos para testes simples e voltadas para o ensino, mesmo porque a maioria destas máquinas não são didáticas.

Por este motivo, desenvolveu-se estruturas simples, de baixo custo, fácil manipulação e visualização capazes de facilitar o estudo e o ensino do comportamento dos fluidos no interior de estruturas onde partículas dificultam a passagem deste fluido (CARVALHO, 2006) (NASCIMENTO Fo, 2006) (BERALDO, 2006) e especial ênfase dada à interação entre o fluido e as partículas envolvendo conceitos como, o tempo de residência.

## 2. METODOLOGIA E MATERIAIS

### 2.1 Estruturas miniaturizadas

A miniaturização de impactadores em cascata proposta por BERALDO (2006) e por SANTOS (2006) mostrou-se eficiente em fase gasosa. Devido às limitações destas estruturas novos desenhos foram propostos e testados por SILVA (2007). Com base nos estudos construiu-se estruturas que são objetos de discussão neste artigo.

Utilizando os mesmos princípios de fabricação de estruturas propostos por SILVA (2007) teve-se a idéia de construir estruturas capazes de separar misturas que fossem de baixo custo, fácil fabricação, fácil manipulação, visualização e compreensão dos fenômenos envolvidos.

Estas estruturas são usinadas em vidro, com 80 mm de comprimento e 10 mm de espessura, com jato de areia controlado para profundidade de aproximadamente 500  $\mu\text{m}$ , seladas com fita adesiva dupla face (3M, YR-9767) e com de placas PVC flexível (cloreto de polivinila) de 2 mm de espessura, entrada/saídas feitas com capilares de aço inoxidável de aproximadamente 1,6 mm de diâmetro externo, planares, como mostra a Figura 1. Formada por seis celas, 1 entrada e 5 de saída, que possibilitam a saída do gás de acordo com a volatilidade dos reagentes inseridos. Para a realização dos testes utilizamos várias situações. Na primeira etapa a estrutura estava limpa, ou seja, não havia nenhum tipo de interferente na superfície. Num segundo momento fez-se a inserção de minitubos metálicos simulando anéis de *Raschig*<sup>1</sup>. Após a realização destas medidas depositou-se filme de HMDS apenas na estrutura e por último depositou-se também nos minitubos que foram inseridos na estrutura, como mostra a Figura 2.

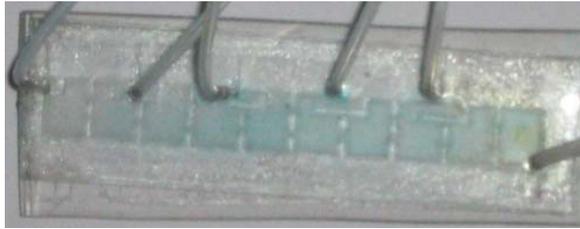
Além do baixo custo e da facilidade de usinagem por esta técnica tem-se como vantagem a transparência do material utilizado, o que facilita a visualização dos fenômenos internos a estruturas. É relevante mencionar que a pequena espessura e a vazão utilizadas favorecem o fluxo laminar.

Para verificar a parte teórica dos dados fez-se previamente a otimização das estruturas pela simulação, utilizando FEMLAB 3.2®, com o auxílio de um microcomputador Pentium IV com

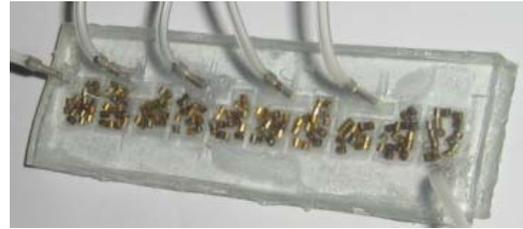
---

<sup>1</sup> Anéis que apresentam dimensões de comprimento e diâmetros iguais a 1 mm e espessura da parede desprezível.

plataforma de 2.4 GHz, 2 GB de RAM, como proposto previamente (SIMÕES, 2005) para estudos teóricos do comportamento interno destas estruturas.



**Figura 1 - Foto da estrutura inicialmente testada.**



**Figura 2 - Foto da estrutura empacotada com os minitubos metálicos.**

## 2.2 *Filme Adsorvente*

Filmes adsorventes são muito usados em cromatografia há várias décadas. Na cromatografia, especialmente a cromatografia gasosa, há uma série de filmes adsorventes, desenvolvidos para muitas separações distintas, entre elas, compostos orgânicos em larga faixa de polaridade, macromoléculas etc.

Por outro lado, filmes adsorventes depositados por polimerização por plasma não são comuns. Os filmes finos podem ser usados para uma série de aplicações, tais como a compatibilização das interfaces e a proteção de superfície.

A polimerização por plasma também apresenta uma série de vantagens, entre elas produção de filmes que não poderiam ser obtidos por outro método de produção. Outras vantagens são o baixo consumo de reagentes e de formação de resíduos, pois trata-se de uma tecnologia mais limpa. Uma propriedade muito importante da polimerização por plasma é a possibilidade da mudança das características do filme pelas mudanças nas condições do plasma, como potência e pressão.

Neste trabalho utilizou-se filmes finos obtidos a partir da polimerização por plasma de Hexametildissilazana (HMDS) (NOGUEIRA, 2000). A vantagem do uso desses filmes é encontrarem-se previamente caracterizados, como será verificado a seguir.

### 2.2.1 *Filmes Depositados Por Plasma*

Dentre os diversos processos de obtenção de filmes finos, a deposição feita em fase gasosa e ativada por descarga luminescente, (PECVD - Plasma Chemical Enhanced Vapor Deposition) destaca-se devido a algumas de suas particularidades. O processo é de fácil execução, limpo, seco, rápido e resulta em materiais uniformes, homogêneos, livres de defeitos e com propriedades bastante dependentes dos parâmetros de deposição. O plasma é gerado devido à aplicação de campos elétricos contínuos normalmente com gás a baixa pressão ( $10^{-1}$  a  $10^3$  Pa). Devido aos elétrons livres do gás adquirem energia no campo elétrico eles são acelerados. Colisões inelásticas entre elétrons energéticos e moléculas dão origem a uma série de espécies, tais como, outros elétrons, íons, radicais livres, átomos e moléculas em estados excitados. De modo geral, espécies orgânicas ativadas pela descarga são muito reativas e tendem a interagir com as

superfícies, muitas vezes formando um filme por polimerização. A técnica de PECVD permite a obtenção de filmes com uma ampla gama de propriedades através do controle dos parâmetros do processo. Uma outra vantagem deste processo é que a estrutura é totalmente embebida pelo plasma. Assim, toda a estrutura, mesmo que com formato complexo e mesmo perfurações recebem uma camada de filme com alto grau de uniformidade.

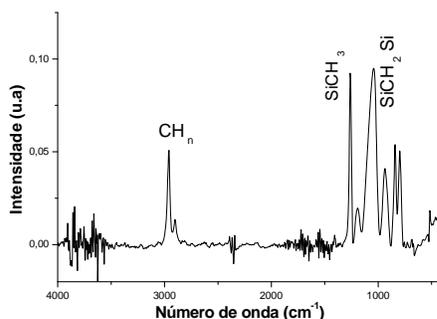
### 2.2.1.1 HMDS

Entre os organo-silanos mais conhecidos, o HMDS apresenta a vantagem de radicais CH<sub>3</sub> (metil), que podem tornar as superfícies hidrofóbicas e/ou organofílicas.

Como mencionado anteriormente, há um grande interesse no desenvolvimento de detectores de baixo custo e, para tanto, pode-se utilizar a deposição de filmes adsorventes para aumentar a eficácia de tais estruturas. Filmes a base de HMDS e com alto conteúdo de radicais CH<sub>3</sub> são capazes de adsorver compostos orgânicos, polares e apolares. Compostos orgânicos são encontrados numa ampla variedade de matrizes ambientais, em emissões gasosas, sendo genericamente denominados VOC's (compostos orgânicos voláteis) e devem ser determinados. Portanto, pelo exposto acima, vê-se que há grandes motivos para a caracterização do comportamento do filme a base de HMDS em microcanais.

Os filmes a base de HMDS também apresentam características interessantes na adsorção de compostos orgânicos, polar ou apolar, na fase gasosa ou líquida. Assim, os compostos orgânicos com baixa polaridade dissolvidos numa matriz polar, como é o caso da solução aquosa de clorofórmio, foram adsorvidos na superfície do filme, apesar da baixa concentração. Portanto, o uso destes filmes na fabricação de estruturas de separação são consideravelmente válidos.

Os filmes obtidos para os testes de adsorção nessas estruturas foram polimerizados em reator de plasma DC eletrônico confinado por meio de campos magnéticos intensos (~ 300 G, na região de colisões e passagem de reagentes). As condições de deposição foram feitas com porta substrato aterrado e tensão variando entre 340 a 440 V, pressão de trabalho sempre em 100 mTorr e o tempo de deposição fixado em 20 minutos. Os ângulos de contatos de todas as amostras depositadas em lâminas de silício foram maiores de 90°. O espectro típico do filme de HMDS pode ser visto na figura 3. Como pode ser visto no espectro apesar do filme ser muito fino existe uma grande concentração de espécies SiCH<sub>3</sub> e SiCH<sub>2</sub>Si, que são muito presentes em filmes de HMDS como já dito anteriormente.



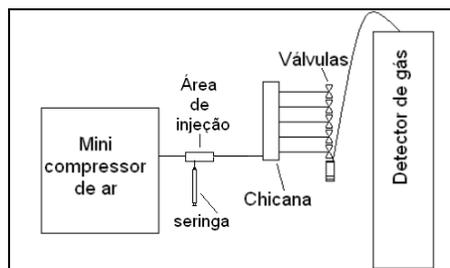
**Espectro 1 – Espectro típico do filme de HMDS obtido nas deposições.**

### 2.3 *Materiais e Métodos*

Para realizar a metodologia de análise fez-se o uso dos modos de admissão contínua e pulsada. O modo pulsado corresponde à admissão de uma quantidade pequena e bem definida, da ordem de mg ou menor, do reagente e em menor tempo possível, da ordem de segundo. Uma alternativa é a adição em intervalos regulares de vários “pulsos” de reagentes; assim, é possível verificar se um reagente funciona como eluente para o anteriormente admitido.

Para o método pulsado é possível que ocorra a retenção do primeiro pulso do reagente utilizado; assim, torna-se necessária a admissão de vários pulsos do mesmo reagente, para determinar o mínimo exigido para a “saturação” da superfície.

O arranjo experimental (Figura 4) para medidas em modo de admissão pulsado é composto de minicompressor de ar (Inalar Compact motor 1/40HP, potência 200 VA, frequência 60 Hz, Voltagem 127 V, Sistema a Pistão, vazão de 10 mL/min) para empurrar o reagente para a estrutura, conexões foram realizadas com o auxílio de tubulação de polipropileno de ¼” (*poliflow*®), detector de fuga de gás combustível (INSTRUTHERM, Modelo DFG-4000, sensibilidade de 50 ppm, sensor tipo semi-condutor de baixo consumo, tempo de resposta inferior a 2 segundos, alimentação de 3 pilhas de 1,5 V “C”, indicação audiovisual). Há uma região específica para a inserção de reagentes através de seringas de 1,00 mL, localizada bem próxima entrada da estrutura. A análise dos fenômenos envolvidos se dá com o auxílio de um detector de gás.



**Figura 4 - Esquema do aparato utilizado durante os testes no modo de admissão pulsada.**

Para controle do fluxo de ar, usam-se válvulas comuns à bomba adquirida. A duração das medidas é determinada por um cronômetro TAKSUN®, Modelo TS\*613A, alimentação 1,0V. Para medição do fluxo de ar nas medidas gasosas faz-se uso de um sistema simples de medição, baseado na passagem de um bolha de ar em uma bureta preenchida com solução aquosa capaz de gerar bolhas de sabão, método conhecido como “bolhometro”. Este sistema é o mais antigo método de medida desenvolvido para a cromatografia e até o momento apresenta valores de medida bastante precisos. As medidas de vazão são feitas tanto com as estruturas quanto sem as estruturas. A vantagem do uso deste sistema é que é possível medir o fluxo na saída da estrutura, considerando, portanto, sua perda de carga.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos experimentos propostos fez-se medidas utilizando estruturas limpas e com filme da HMDS (hexametildissilazano) depositado por plasma. Para a realização dos testes fez-se uso de

dois métodos de admissão pulsada e contínua no caso de estruturas empacotadas. Em alguns casos foi necessário para facilitar a visualização dos fenômenos a utilização de traçadores em meio líquido e partículas em meio gasosos. Também alterou-se os reagentes para realização dos testes utilizando isopropanol, gasolina comum, acetona, varsol, mistura (1 mL de cada reagente: isopropanol+acetona+vasol), nesta ordem, respectivamente. Para determinar se o aquecimento poderia alterar as respostas fez-se o aquecimento utilizando água em diferentes temperaturas (92° a 87° C; 70° a 58° C; 34° a 20° C; 12° a 3° C; 0° C) sob as estruturas. Repetiu-se 5 vezes cada teste nas mesmas condições para todas as estruturas e reagentes para verificação da reprodutibilidade.

Como já mencionado na introdução, é de interesse deste trabalho estudar o comportamento das chicanas na remoção de partículas. Segundo Maio (Gonçalves, 2004) (Maio, 2005), são inegáveis as vantagens da utilização de métodos/formas que privilegiem a informação visual o que facilita o ensino.

O funcionamento das chicanas se dá pela variação abrupta da velocidade do fluxo, o que possibilita a separação de partículas e, pelo aumento do tempo de residência das substâncias dentro do canal, a remoção por reação (SASSAKI, 2005). Contudo, fica difícil definir as partículas que serão removidas devido às dimensões da estrutura. Com este desenho a estrutura apresenta maior probabilidade de retenção.

O detector de gás utilizado permite observar a remoção do reagente ou mistura baseando-se apenas pela intensidade do sinal sonoro. É necessária apenas uma calibração prévia, como descrita no manual do fabricante.

### **3.1 Estrutura limpa**

Para que seja alcançada uma boa metodologia de ensino são inegáveis as vantagens da utilização de métodos que privilegiem a informação visual. Portanto, privilegiou-se inicialmente os procedimentos de ensino em fase líquida, pois esses utilizam imagens, o que tende a facilitar a compreensão dos resultados. Para a caracterização destas estruturas é necessária a construção de um arranjo experimental (*setup*) e no presente caso o arranjo deve atender não só testes com fluidos gasosos como também líquidos.

#### **3.1.1 Comportamento do fluido nas estruturas fase líquida**

Para as realizar as análises referentes ao comportamento do fluxo de fluidos nas estruturas, definiu-se como método de análise Filmagens (*in situ e on line*). A análise deste comportamento permite avaliar possível retenção por outros meios que não a adsorção na superfície, tais como retenção em constrições. Esta medida, por outro lado, só será usada em líquidos.

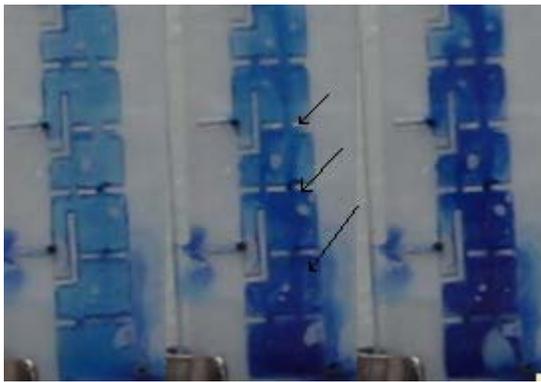
As filmagens são feitas com o auxílio de uma câmera digital *Cânon Power A430*, com 4 Mega *Pixels*, sensor de imagem CCD de 1/3 de polegada, lente objetiva com grade angular de 5.4, e telefoto 21.6 mm, *zoom digital* de 7.9 aproximações quando associado com *zoom* ótico, visor ótico LCD a cores.

Como traçador são usadas inserções de solução aquosa de azul de metileno 10% em peso e solução em glicerol de azul de metileno em 10% em peso. A principal diferença entre as soluções é a viscosidade, o que facilita a compreensão dos mecanismos de retenção.

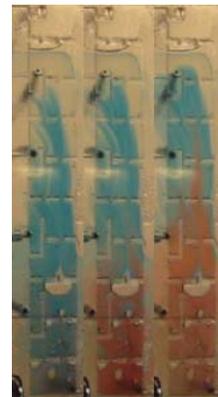
O método apresenta como vantagem a possibilidade de visualização em tempo real do comportamento do fluxo do fluido e respostas instantâneas obtidas em meio aquoso com o

auxílio de azul de metileno e respectiva solução em glicerol, para simulação de viscosidade. Além de permitir avaliar o comportamento interno das estruturas, principalmente no que se refere a mecânica de fluidos, estas medidas, quando comparadas à simulação, que pode ser feita dinamicamente, isto é em função do tempo, comprovam quais os principais fenômenos que estão ocorrendo devido à viscosidade, solubilidade, dimensões etc.

Assim, foi objetivo deste item verificar qual é o comportamento do fluido nestas estruturas. O método utilizado foi experimental (filmagens). Na Figura 5 a estrutura sem preenchimento apresenta caminhos preferenciais e é possível também, em uma seqüência de fotos, observar a difusão do traçador no fluxo, igualmente laminar.



**Figura 5 – Imagens da chicana com solução 10% de azul de metileno em glicerol.**



**Figura 6 – Fotografia para observação do momento do encontro dos traçadores.**

Utilizando solução aquosa com 10% de azul de metileno e anilina vermelha fez-se a inserção de duas cores ao mesmo tempo para observar se ocorreria a mistura delas e em qual prato teórico isto ocorreria. Segue a fotografia demonstrando o momento da mistura dos traçadores.

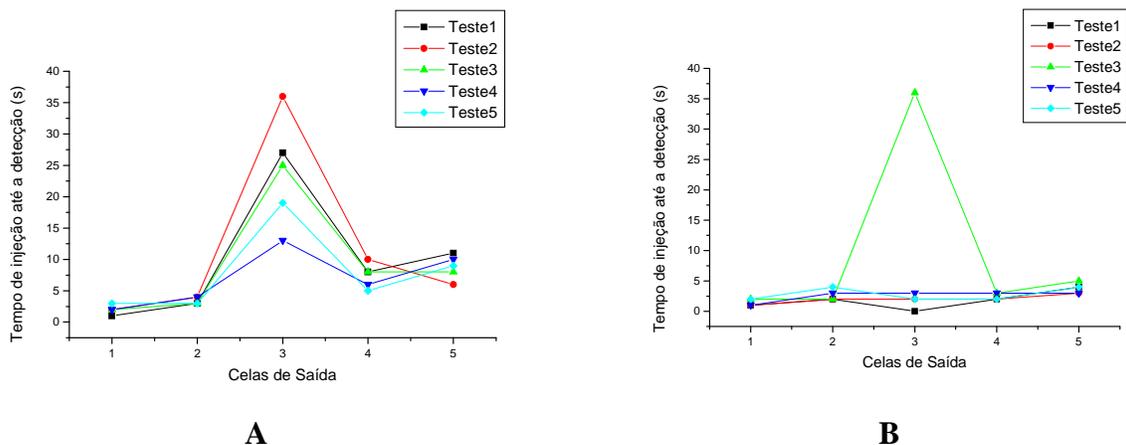
De acordo com o teste observou-se que a mistura de duas cores ocorre imediatamente na primeira cela de saída. A Figura 6 mostra o fenômeno em questão. A adição de uma substância/partícula em um fluxo pode funcionar tanto como traçador, para compreender os processos físico-químicos ocorrendo, ou como amostra, para testar a funcionalidade da estrutura.

### **3.1.2 Fase gasosa**

Para testes em fase gasosa com a possibilidade de visualização foi necessário o uso de partículas com dimensões de 13  $\mu\text{m}$  que apresentam facilidade de migrar com o fluxo e a deposição destas ocorre não só na região onde há alta velocidade, mas também, nas regiões onde estão as celas mais distantes da entrada (penúltima e última) mesmo sendo regiões de menor fluxo. Pelos tamanhos de partículas utilizados (13  $\mu\text{m}$ ) e em por ser fase gasosa pode-se esperar que ocorram fenômenos gravitacionais e de centrifugação, inércia das partículas ou formação de ciclone.

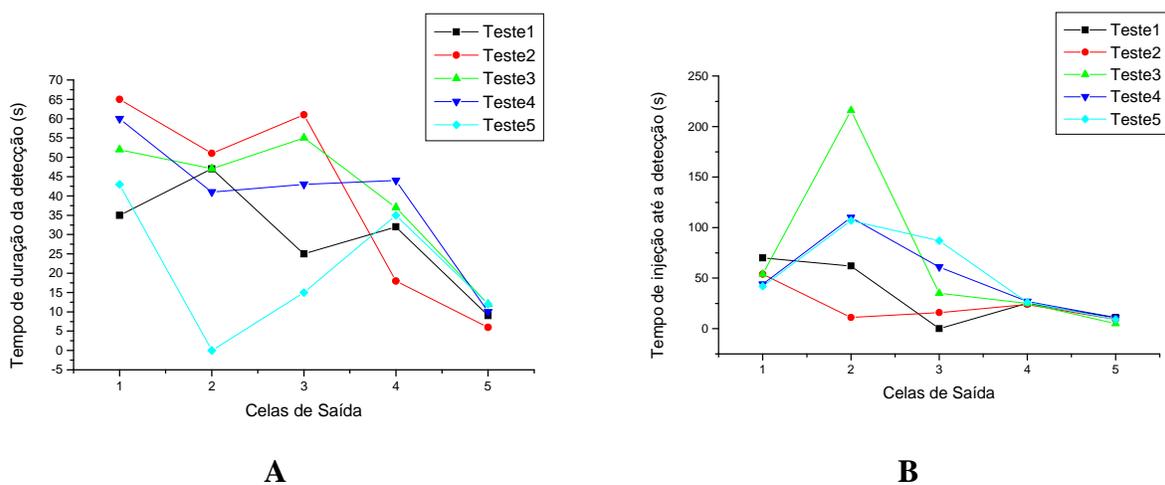
### 3.1.3 Modo de admissão pulsada para meio gasoso sem aquecimento

Os testes na estrutura sem preenchimento ocorreram (gás de arraste de modo contínuo, fluxo de 0,10mL/min) com injeções de 0,10 mL dos reagentes como isopropanol e gasolina comum, nesta ordem respectivamente. Segue os gráficos referentes aos tempos de injeção até a detecção para ambos reagentes.



**Gráfico 1 - Tempos de injeção até a detecção (A) usando isopropanol e (B) usando gasolina comum.**

Enquanto o tempo de detecção para o isopropanol (substância pura) tem sua detecção em torno de 45 segundos a gasolina comum (mistura) tem os tempo de detecção após a injeção no Maximo de cinco segundos. Ou seja, a pressão de vapor gerada pelos produtos contidos na gasolina é maior quando comparada ao isopropanol. Isto indica que ocorreu separação de compostos de acordo com a variação de pressão (Gráfico 1).

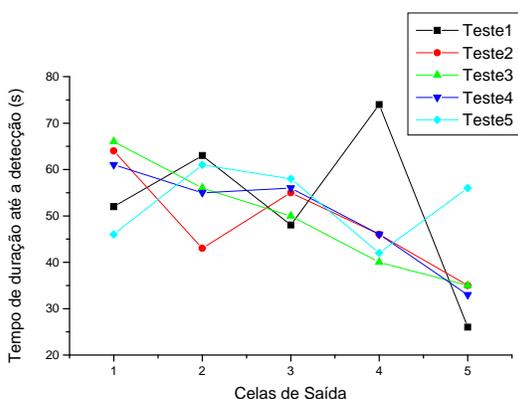


**Gráfico 2 - Tempos de duração da detecção (A) usando isopropanol e (B) usando gasolina comum.**

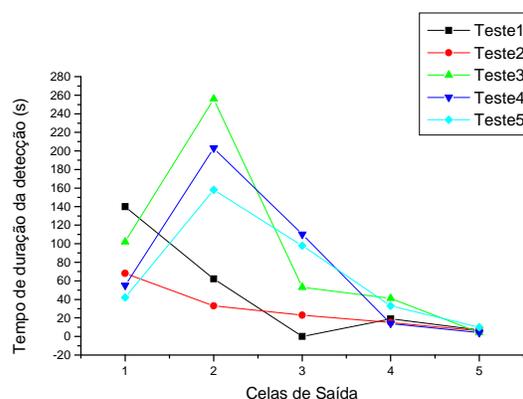
Através do Gráfico 2 observa-se o reagente puro tem tempo de residência menor que a mistura e por este motivo é detectado com maior facilidade em todas as celas de saída.

### 3.1.4 *Modo de admissão pulsada para meio gasoso com aquecimento*

Repetindo a mesma metodologia anteriormente citada, porém, com aquecimento alternado em varias faixas (92° -87° C; 70° -58° C; 34° -20° C; 12° -3° C; 0° C). Temperaturas controladas com um termômetro analógico de 0° - 100°C. Quando comparado os dados obtidos nas medidas com aquecimento com os de sem aquecimento tem-se um tempo de injeção até a detecção não tão imediata, porém, o tempo de detecção obtido é aumentado nas terceira cela. Isto mostra que ao aquecer tem-se um maior desprendimento do reagente principalmente na terceira celas.



**A**



**B**

**Gráficos 3 - Tempos de duração da detecção (A) usando isopropanol e (B) usando gasolina comum, com aquecimento.**

O Gráfico 3A mostra as medidas usando gasolina têm o tempo de injeção até a detecção na primeira cela aproximadamente igual ao dobro dos dados obtidos na primeira cela da chicana em medidas sem aquecimento mostrando que o aquecimento pode alterar a remoção dos reagentes, permanecendo aproximadamente igual na última cela de saída, regiões onde o aquecimento não altera as medidas. Para a gasolina os dados permanecem praticamente iguais o que indica que o aquecimento não foi suficiente para gerar alterações nas medidas (Gráfico 3B).

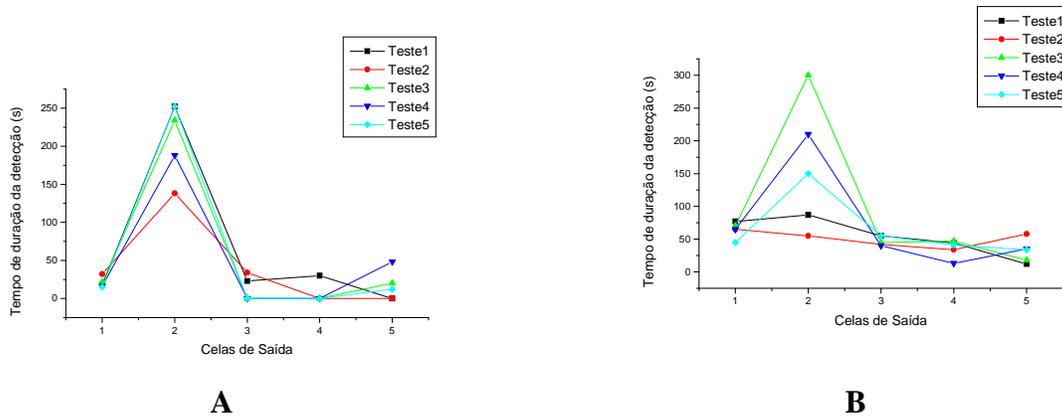
## 3.2 *Estrutura com filme de HMDS*

As medidas realizadas em estruturas com filme de HMDS depositado por plasma tem o intuito de avaliar se ocorre interferência no comportamento da estrutura ao inserir filme adsorvente.

### 3.2.1 *Modo de admissão pulsada para meio gasoso sem aquecimento*

Com o intuito de reproduzir as mesmas condições dos testes realizados nas estruturas limpas fez-se os testes idênticos para as estruturas com filme de HMDS (hexametildissilazano) depositados por plasma. A idéia é verificar se a presença de filmes adsorventes pode ou não alterar a remoção ou separação gerada pela estrutura.

Não se observa alteração significativa para os tempos da injeção até a detecção. Ao contrário do que ocorre nas estruturas limpas, medição de uma única vez para todas as celas de saídas, tem-se situações com medidas intermitentes e de baixo detecção o que indica que o filme esta interagindo com o reagente, como mostra o Gráfico 4.



**Gráfico 4 - Tempos de duração da detecção (A) usando isopropanol e (B) usando gasolina comum, estrutura com filme a base de HMDS e medidas com aquecimento.**

Quando realizou-se as medidas usando gasolina comum observa-se o produto parado por aproximadamente 14 minutos na região imediatamente anterior ao primeiro anteparo. Após isto o produto se concentra antes do segundo anteparo por alguns segundos e desaparece rapidamente.

### 3.2.2 *Modo de admissão pulsada para meio gasoso com aquecimento*

Nas mesmas condições dos testes anteriores fez-se testes idênticos para as estruturas com filme de HMDS, porém, desta vez, estes se encontram sobre aquecimento em temperatura variadas ((92° -87° C; 70° -58° C; 34° -20° C; 12° -3° C; 0° C) em ordem crescente para garantir que a remoção e o comportamento do reagente interno a estrutura seja alterado.

Quando comparado ao método de admissão pulsada sem aquecimento em estruturas limpas tem-se um tempo de injeção até a detecção ainda maior, porém, o tempo de detecção é reduzido a partir de terceira cela de saída. Isto mostra que mesmo com o aquecimento não se foi capaz de remover o reagente. As medidas usando gasolina têm o tempo de injeção até a detecção na primeira cela reduzido aproximadamente o dobro dos dados obtidos na primeira cela da chicana em medidas sem aquecimento mostrando que o aquecimento pode alterar a remoção dos reagentes menos voláteis.

### 3.3 *Estrutura empacotada*

Assim como realizamos os testes com a estrutura limpa repetimos todo o processo para a estrutura empacotada. Segue a Figura 7 com a fotografia da estrutura usada com e sem aquecimento.



**Figura 7 - Chicana empacotada com filme a base de HMDS.**

Quando as estruturas estão empacotadas tem-se o tempo de remoção ainda maior podendo ultrapassar 10 minutos, mesmo utilizando os reagentes citados no item anterior. Como demonstrado no item anterior ocorre uma grande variação de comportamento entre substancias puras e misturas o que possivelmente indica que a estrutura está funcionando como separador. Para provar que realmente a estrutura apresenta este comportamento testes mais específicos foram realizados na mesma.

### **3.4 Estrutura empacotada com filme de HMDS**

Visto que o filme de HMDS gera alterações na superfície seria interessante acrescentar outros interferentes, tais como, minitubos metálicos que simulem anéis de *Raschig*.

#### **3.4.1 Modo de admissão pulsada sem aquecimento**

Medidas na estrutura empacotada com filme de HMDS usando-se um mini-compressor de ar com fluxo igual a 10 mL obtém-se uma redução de 40% após a saída da estrutura empacotada. A idéia é testar o comportamento da estrutura para diferentes reagentes de polares a apolares. Para certificar de que os dados seriam reprodutíveis realizaram-se as medidas cinco vezes consecutivas.

Para isopropanol os dados se apresentaram quase imperceptíveis em sua maioria indicando que o filme proporcionou um maior tempo de residência do reagente na estrutura. Já para a gasolina foi possível detectá-la com maior facilidade devido a sua pouca interação com o filme. Entretanto, nota-se que a gasolina não foi totalmente removida logo após a injeção e sim que ocorreu detecções intermitentes o que indica que, mesmo que seja pouca, que ocorre interação entre o filme e os compostos da gasolina além da presença de caminhos preferenciais.

#### **3.4.2 Modo de admissão pulsada com aquecimento**

Para avaliar se realmente a pressão de vapor dos reagentes influi nas medidas também realizou-se testes com aquecimento. Adotou-se a mesma metodologia utilizada para as estruturas limpas. Mesmo com aquecimento o tempo da injeção até a detecção não sofre grandes alterações quando comparado com os tempos obtidos nas medidas sem aquecimento. Já no que diz respeito a tempo de detecção obtém-se tempos mais prolongados o que pode indicar que o aquecimento

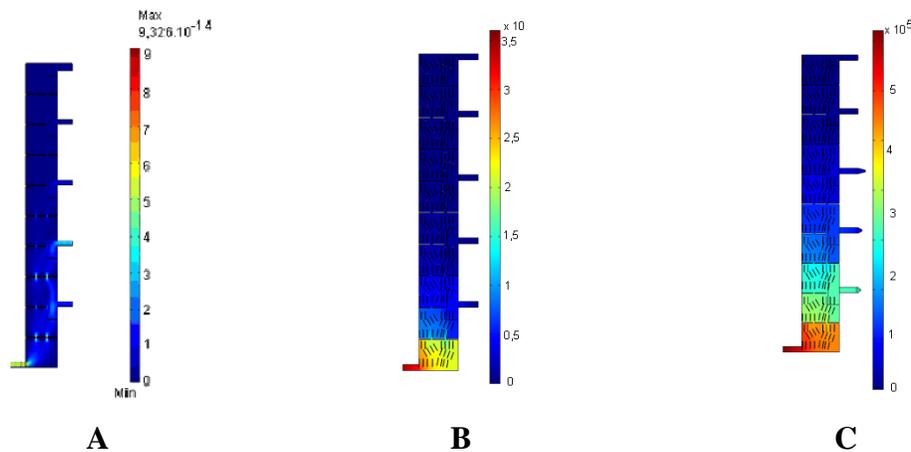
esta induzindo a reagente a percorrer toda a estrutura. Isto pode ser observado nos dados obtidos na quinta cela.

O tempo de injeção até a detecção apresenta alterações na terceira, quarta e quinta cela. E o tempo de detecção se dá de forma crescente. Fatos estes indicam que mesmo com aquecimento os diferentes reagentes da gasolina estão sofrendo interferência tanto pelo filme de HMDS quanto pelos minitubos metálicos. Comprovando que o fluxo interno a estrutura é laminar e que ocorre a formação de caminhos preferenciais.

#### 4. SIMULAÇÕES

Assim como foram realizadas comparações entre estruturas sem e com empacotamento durante os testes experimentais, fez-se também comparações usando programa de simulação FEMLAB 3.2®. Desta forma, fica possível comparar resultados teóricos e experimentais. A Figura 8A mostra a simulação de fluxo obtida para a estrutura limpa e Figura 8B mostra a simulação para a estrutura empacotada.

Para a confirmação entre os dados experimentais e teóricos fez-se simulações deste novo desenho são mostradas na Figura 8. A Figura 8A indica que há um caminho preferencial do fluxo (correspondente ao orifício mais à esquerda no desenho), o que facilita o preenchimento das celas, ao mesmo tempo que, a Figura 8B apresenta regiões onde a concentração de partículas é maior, e provavelmente, sua remoção é possível, que correspondem às celas mais próximas da entrada.



**Figura 8 - Simulação de *Navier Stokes* (NS) (A) estrutura limpa variação de pressão usando água; estrutura empacotada variação de pressão (B) usando querosene e (C) usando querosene e restrições.**

Como a estrutura em questão utiliza a concepção de prato teórico de coluna de destilação é possível que esta favoreça a separação de compostos caso aquecimento seja aplicado ao conjunto. Nota-se que o fluxo fica bem próximo de zero nas regiões mais afastadas da entrada (observado pela coloração intensa de azul). Logo, nesta região tem-se a maior concentração de partículas, pois não há força suficiente para remoção das mesmas, ou seja, fluxo muito baixo gera obstrução da saída. Como pode ser visto na Figura 8B nota-se que a pressão mostra-se muito alta logo na entrada reduzindo gradativamente até o término da primeira cela e chegando a valores mínimos

nas últimas celas de saída. Da mesma forma como é observado nos testes experimentais há necessidade de se ter restrições para que o fluxo seja capaz de chegar até a última cela de saída. Por este motivo também foram feitas simulações utilizando este artifício e confirmou-se os resultados obtidos nas simulações (Figura 8C).

O comportamento do fluido observado no método experimental assemelha-se ao obtido nas simulações.

## 5. CONCLUSÃO

Via de regra, o ensino em engenharia é custoso o que dificulta o acesso das minorias. Assim sendo, o uso de instrumentos de baixo custo devem ser amplamente incentivados. As reduções de estruturas podem ser muito úteis para análises de amostras gasosas *in situ*, assim como, para pré-seleção de compostos em misturas de acordo com o vapor de pressão. Além de apresentarem para o ensino uma série de vantagens, desde a facilidade de uso, verificação do comportamento de fluidos, formas diferentes de análises de detecção de reagentes puros e impuros separados como numa coluna cromatográfica, favorecer a abordagem sistêmica de processos químicos e permitir um ensino mais dinâmico.

### *Agradecimentos*

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERALDO, F.P., Santos, L.C., Simões, E.W., Silva, M.L.P. Design Of New Miniaturized Structures For Removal Of Particles From Gaseous Fluids, *11th International Meeting on Chemical Sensors*, July 16-19, Brescia, Italy, 2006.

CARVALHO, A. T., Lima, R. R., Silva, M. L. P., Fachini, E. Nanostructured copper thin film used for Catalysis, *11th International Meeting on Chemical Sensors*, July 16-19, Brescia, Italy, A331, 2006.

DAMLE, A.S. ; Ensor, D.S. ; Ranade, M.B. Review: **Coal combustion aerosol formation mechanisms: Aerosol**, *Sci. Technol.* v.1, ed.1, p. 119-133, 1982.

GONÇALVES, B. S. **Cor aplicada ao design gráfico: um modelo de núcleo virtual para aprendizagem baseado na resolução de problemas**. Tese de doutorado, Engenharia de Produção, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 146p., 2004.

GROB, R. L. Modern practice of gas chromatography, 4<sup>th</sup> Ed., *John Wiley & Sons, Inc.*, New Jersey., p. 1036, 2004.

FOX, D. L. Air Pollution, *Anal. Chem.*, v. 67, p. 183R-198R, 1995.

GROSJEAN, D. In situ organic aerosol formation during a smog episode. Estimated production and chemical functionality, *Atmospheric Environment*. v. 26A, n. 6, p. 953-963, 1992.

KANAKIDOU, M.; Tsigaridis, K.; Dentener, F. J.; Crutzen, P. J. Human-activity-enhanced formation of organic aerosols by biogenic hydrocarbon oxidation, *Journal of Geophysical Research*, v. 105, ed. D7, p. 9243-9254, 2000.

LIGHTY, J. S.; Veranth, J. M. e Sarofim, A. F. Combustion Aerosols: Factors Governing Their Size and Composition and Implications to Human Health. Lighty, Veranth, and Sarofim. *Journal of the Air & Waste Management Association*. v. 50, p. 1565-1618, 2000.

MAIO, A. Z. F. **Um modelo de núcleo virtual de aprendizagem sobre percepção visual aplicado às imagens de vídeo: análise e criação**, Tese de doutorado, Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, p. 223, 2005.

NASCIMENTO Fo, A. P.; Carvalho, A. T.; Silva, M. L. P.; Demarquette, N. R. **Preconcentration in Gas or Liquid Phases Using Adsorbent Thin Films**, Materials Research. v. 9, ed. 1, p. 33-40, 2006.

NOGUEIRA, S. **Polimerização por plasma de Hexametildissilazana**. Dissertação de Mestrado. v.1. São Paulo (São Paulo): EPUSP. 2000.

SANTOS, L.C., et. al. Miniaturization of macroscopic structures for removal of particles from liquid fluids, 11TH INTERNATIONAL MEETING ON CHEMICAL SENSORS, July 16-19, Brescia, Italy, 353, 2006.

SANTOS; L.C.; Beraldo, F.P.; Hernandez; L.F.; Carvalho, R. A. M. e Silva, M. L. P. Desenvolvimento de Testes Semi-Automatizados de Miniestruturas. *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, v. 25, n. 2, p. 75-81, 2006.

SASSAKI, R. A. **Distribuição de Tempos de Residência em Sistemas Alimentados com Vazão Variável**. p. 89, Tese de doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Engenharia Civil, COPPE/UFRJ. 2005.

SILVA, L. M et. al. Miniestruturas Para Remoção De Partículas Usadas No Ensino De Engenharia. XXXV CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA. **Anais do XXXV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia – COBENGE 2007**, 2P17 – 1-10; Curitiba Paraná; 10 à13 de setembro de 2007.

SILVA, M. L. P et. al. Use of plasma polymerized highly hydrophobic hexamethyldissilazane (HMDS) films for sensor development. *Sensors and Actuators*, B91 2003. p. 362-369.

SIMÕES, E. W. et al. Microfluidic oscillator for gas flow control and measurement. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 16, ed.1, p. 7–12, 2005.

VERANTH, J. M. e Sarofim, A. F. Combustion Aerosols: Factors Governing Their Size and Composition and Implications to Human Health. JoAnn Slama Lighty, Sarofim Lighty, Veranth, and Sarofim. *Journal of the Air & Waste Management Association*. v. 50, p. 1565-1618, 2000.

## **MINIATURIZED STRUCTURES AND PACKED USED FOR TEACHING IN ENGINEERING**

**Abstract:** *The use of channels packed with particles happens so much not only in the Chemical Engineering for production of compositions but also in the Chemistry for the analytical purposes. The aim of this work was the development of a simple methodology for tests in low cost miniaturized structures useful for teaching fluid mechanics, especially inside structures where particles hinder the passage of this fluid. The proposed structure presents six different cells and it was tested not only in gas but also in liquid fluids with several reagents. For gas fluid, the resident time of pure substances is lower than mixture reactants. The results allow to set up qualitative tables that describe several phenomena, such as, diffusion, separation of compounds, load loss, etc.*

**Keyword:** *Separation of mixtures, Distillation, Adsorbents thin films.*