

MINIESTRUTURAS PARA REMOÇÃO DE PARTÍCULAS USADAS NO ENSINO DE ENGENHARIA

Lílian Marques Silva – lillamarques@uol.com.br

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Av. Prof. Luciano Gualberto, 158 – Travessa 3
05508900 - São Paulo - SP

Leonardo Frois Hernandez – lfh@lsi.usp.br

Faculdade de Tecnologia de São Paulo
Pça. Cel. Fernando Prestes, 30
01124-060 - Bom Retiro- SP

Eliphaz Wagner Simões - eliphs@lsi.usp.br

Maria Lúcia P. da Silva – malu@lsi.usp.br

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

***Resumo:** Atualmente o ensino de engenharia enfrenta novas fronteiras, principalmente devido às reduzidas dimensões dos produtos, pois a redução das dimensões evidenciou fenômenos normalmente pouco relevantes. Ademais, não só as questões ambientais inerentes à contaminação do meio físico como também seu monitoramento devem ser continuamente abordadas, para garantir que o profissional possa atuar de modo sistêmico nessa nova condição. Um bom exemplo é o ensino de miniaturização e nanotecnologia e foi objetivo deste trabalho demonstrar como estruturas miniaturizadas podem ser usadas para o ensino dos fenômenos envolvidos na remoção de partículas de um meio líquido ou gasoso. Os testes utilizaram equipamentos comuns em laboratório de química e duas estruturas distintas. As estruturas apresentam comportamento muito semelhante ao encontrado por simulação e permitem ensinar os principais fenômenos envolvidos na separação de partículas de um meio físico. O uso destas estruturas pequenas apresenta uma série de vantagens, não só pela pequena dimensão, que facilita demonstrações, como também a possibilidade de apresentar simulação e medida simultaneamente. Ademais, corresponde ao uso de tecnologias mais limpas e favorece a inclusão das minorias no ensino de engenharia, devido ao baixo custo.*

***Palavras-chave:** Estruturas miniaturizadas, Impactador, Destilador.*

1 INTRODUÇÃO

Em amostras atmosféricas encontra-se desde grandes partículas até a emissão de aerossóis e *smog* (LIGHTY, VERANTH & SAROFIM, 2004), havendo compostos tóxicos na composição de alguns deles (TELGHEDER & KHVOSTIKOV, 1997). Essas partículas não são devidas apenas às fontes naturais e aos seres humanos, mas também às indústrias, que

estão constantemente emitindo particulados para a atmosfera, responsáveis, entre outras coisas, pela formação destes aerossóis e *smog*. As dimensões dos particulados podem variar de centenas de *angstroms* a micras de diâmetro e podem causar sérios problemas ambientais. Por esta razão, a poluição do ar é um dos maiores problemas da vida moderna e, sendo assim, as análises de amostras de ar se tornam de suma importância, especialmente no que se refere às partículas pequenas, por exemplo, aerossóis, que podem permanecer suspensas na atmosfera por longos períodos (VERANTH & ADEL, 2000).

Em amostras aquosas, isto é, dentro do ciclo hidrológico, as partículas têm dimensões amplamente variadas e também podem se tornar um grande problema ambiental. Muitos dos contaminantes presentes em águas comuns (LAWLER, 1997) e/ou resíduos se transformarão em partículas instantaneamente ou posteriormente a coleta de amostras e acabarão por influenciar o comportamento das amostras (LEVINE & TCHOBANOGLIOUS, 1991). SANTOS (2004) afirma que tanto em água comum como residuária o tamanho das partículas pode variar de 10^{-4} μm a valores maiores que 10^2 μm . Assim, as partículas com peso molecular de aproximadamente 10.000 são compostas de proteínas e pequenas enzimas, principalmente. Alguns vírus e fragmentos celulares são tão grandes quanto um décimo de nanômetro, algas e protozoários têm aproximadamente 10 μm ou mais.

Várias são as operações unitárias utilizadas para a remoção de partículas e/ou aerossóis em fase gasosa e partículas ou emulsões/dispersões em fase líquida. No ar, partículas com diâmetro igual a 100 μm são tipicamente removidas por efeitos gravitacionais, de 10 μm por efeitos de centrifugação, de 1 μm por filtros e 0,1 μm com filtros eletrostáticos. No líquido a remoção de moléculas com alto peso molecular faz uso da adsorção e osmose reversa, as nanopartículas podem ser eliminadas por ultrafiltração e as partículas grandes com filtração ou sedimentação.

Os equipamentos capazes de responder às características descritas acima são, em geral, grandes e onerosos. Contudo, devido à miniaturização de dispositivos, que permitiu desde a fabricação de simples sensores *one way* até sistemas complexos para análise de matrizes complexas, como os *μ TAS (micro total analysis system)* (CAVE, 2000), é possível a produção de estruturas simples e de baixo custo, para remoção de partículas, adsorção de compostos, etc. Assim, operações unitárias correspondentes à remoção de partículas e compostos, tanto da fase líquida como da gasosa, serão abordadas neste trabalho com o objetivo de criar ferramentas simples capazes de demonstrar os fenômenos envolvidos.

2 METODOLOGIA E MATERIAIS

2.1 Condições de contorno

São condições de contorno assumidas neste trabalho:

1) o uso de ensino por resolução de problemas (PBL – *problem based learning*) (FELDER & BRENT, 2003): com esta abordagem privilegia-se a atitude pró-ativa do aluno além de permitir a aprendizagem para atuação em equipes.

2) o respeito aos “12 Princípios da Engenharia Química Verde” (SHONNARD *et. al.*, 2003): o que significa que o aluno é exposto a uma situação mais ambientalmente correta, o que permite discutir/ensinar novos conceitos ambientais, tais como, sustentabilidade.

3) o uso de instrumentos comuns em laboratório de ensino de química: para garantir que todo o desenvolvimento se torne de baixo custo.

2.2 Confecção das estruturas miniaturizadas

É importante desenhar, simular, construir e caracterizar estruturas miniaturizadas, da ordem de centenas de micrometros, para estudar possíveis efeitos gerados no fluido pela existência das partículas. Do mesmo modo, deve-se poder analisar adsorção/dessorção, permeação e retenção, e suas respectivas implicações para as estruturas.

Para retenção de partículas foram desenvolvidas, pelo escalamento linear de estruturas macroscópicas. Miniaturização de impactadores em cascata e, como resultado obteve-se comportamento satisfatório para testes realizados em fase gasosa (BERALDO, 2006). De modo semelhante obteve bons resultados com chicanas na retenção de partículas grandes (50 μm ou mais) ou substâncias viscosas, como silicone, em fase líquida (SANTOS, 2006). Como estas estruturas apresentam limitações, novos desenhos foram propostos e testados. Tal proposta é o objetivo de discussão neste trabalho.

O desenho das estruturas miniaturizadas foi previamente otimizado pela simulação, utilizando FEMLAB 3.2®, com o auxílio de um microcomputador *Pentium IV* com plataforma de 2.4 GHz, 2 GB de RAM, como proposto previamente (SIMÕES, 2005) para estudos teóricos do comportamento interno destas estruturas.

As estruturas foram usinadas em vidro usando jato de areia e fita adesiva como máscara. A principal vantagem é a facilidade de usinagem e devido a esta técnica, além de fornecer grande transparência do material, gera-se a facilita para a filmagem. A selagem foi feita com fita acrílica adesiva dupla face (3M, YR-9767) e lâmina de PCV (cloreto de polivinila) de 2 mm de espessura. As vantagens do PVC são a flexibilidade do material, que facilita o uso com vidro, e boa transparência. Para fazer a conexão de entrada e de saída das estruturas são utilizados capilares de aço inoxidável de 1,6 mm de diâmetro externo e tubos de *poliflow*® para interligações. A confecção de entrada e saída exige apenas a pressão do capilar contra a lâmina de PVC. Todo o conjunto é de baixo custo e exige poucos homens-hora para sua realização.

As estruturas têm altura de 500 μm , porém, a diversidade esta nas dimensões externas, os impactadores têm dimensões da ordem de 2,5 cm X 2,5 cm, enquanto a chicana é da ordem de 8 cm X 1 cm.

2.3 Métodos de análise

Para caracterização destas estruturas utilizou-se como fluido ar (fase gasosa) ou água (fase líquida). Para interagir com o fluido de arraste utilizaram-se partículas com dimensões da ordem de 50 μm (cerâmica SG-85, da Fillite Co. Fornecida no Brasil pela Adexim S/C) e 13 μm (carbeto de silício, abrasivo comum, granulometria 1000 na série Tyler, Casa Florêncio). Para realização das medidas, foi montado arranjo experimental, esquematizado na Figura 1, composto de bomba para impulsionar o fluido, estrutura, filmagem e recipiente para recolhimento do fluido, caso seja usada água. A bomba usada pode ser normalmente encontrada em lojas que forneçam materiais para aquários. Válvulas de baixo custo, para controle do fluxo de ar, são encontradas no mesmo local. Para determinar o fluxo do fluido gasoso faz-se uso de uma bureta com solução diluída de detergente e um cronômetro. Utilizando este equipamento observa-se que o fluxo é da ordem de 0,1 mL/min para água e 10 mL/min para ar.

Para avaliação de comportamento de um fluido numa estrutura um conceito relevante é o de traçador. A utilização de um traçador corresponde à injeção de produtos no fluxo para compreender e estes produtos devem se assemelhar, tanto quanto possível, ao fluido pelo aspecto hidrodinâmico (BEDMAR, 1972). Neste trabalho usaram-se traçadores apenas para a fase líquida e trata-se de solução 10% em massa de azul de metileno, em água destilada ou

glicerol (como solvente), o que permite avaliar a importância da variação de viscosidade do fluido. O comportamento dos traçadores foi avaliado 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. Para situações onde observação de pequenas áreas é vantajosa usou-se microcópio óptico (Quimis, Q719TK-PL). As filmagens apresentam como vantagem a possibilidade de visualização em tempo real do comportamento do fluxo do fluido em toda a estrutura e a microscopia a análise de região específica.

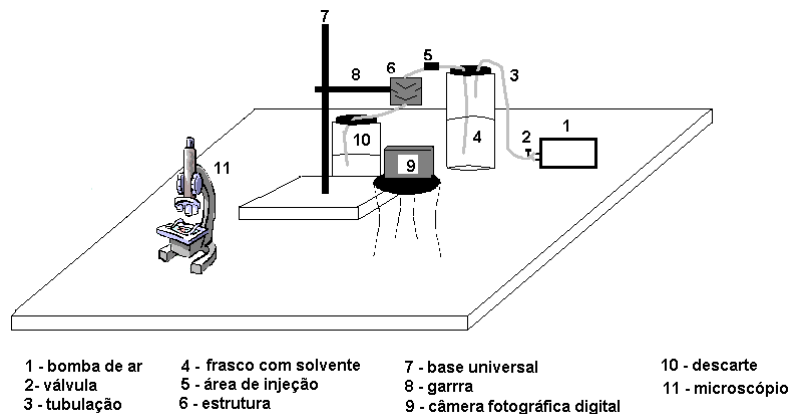


Figura 1 – Esquema do aparato utilizado durante as filmagens.

2.4 Procedimentos de análise

Os procedimentos usados baseiam-se no já descrito por BERALDO e SANTOS (2006) anteriormente. A inserção de traçador ocorre simplesmente pelo uso de seringas de 1 mL de volume total e inserção bem próxima entrada da estrutura. A inserção, apesar de manual, pode ser pulsada ou contínua. Admissão pulsada corresponde a uma massa pequena e bem definida do traçador, da ordem de mg ou menor, admitida no menor tempo possível. Admissão contínua ocorre por tempo indeterminado, mas o fluxo adicionado de traçador deve ser bem menor que o do fluido.

Para inserir as partículas nas estruturas, com o fluido gasoso coloca-se uma pequena quantidade na região de entrada da estrutura e inicia-se a admissão do ar, observando-se que parte interna a estrutura fica recoberta pelas partículas. A estrutura é então desmontada e pesada, para determinar eficiência. Para o fluido líquido produz-se uma dispersão e adiciona-se, *on line*, com seringa de 5mL.

2.5 Materiais utilizados

Como substrato utilizou-se vidro comum para usinagem de microestruturas. Todos os traçadores utilizados são P.A. (pressão atmosférica) e obtidos na Casa Americana S.A. Água destilada, e gravimetria com balança analítica, foram utilizadas para a montagem das soluções.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este trabalho será apresentado enfatizando cada uma das estruturas propostas e os fenômenos envolvidos durante sua utilização.

3.1 Escolha de desenho das estruturas e simulações

Como mencionado na introdução teórica, é interesse deste trabalho avaliar o uso de impactadores e chicanas na remoção de partículas e testadas para ensino (SILVA, 2006), mas, como tinham uso limitado, foram propostas estruturas mais adequadas para uso tanto em fase líquida quanto gasosa. Foi também interesse deste trabalho encontrar modos para evidenciar os fenômenos envolvidos na separação das partículas de um fluido.

Impactadores funcionam pela interrupção do fluxo gasoso, que preferencialmente será laminar, por uma placa coletora. Devido à inércia das partículas estas tendem a se alocar na placa, contudo, para fluidos líquidos, devido à pequena distância entre as moléculas, a transferência de momento é grande e as partículas podem ser facilmente arrastadas da placa. Para suplantiar essas dificuldades várias modificações foram adicionadas ao desenho e a Figura 2 apresenta o impactador original e o novo desenho proposto. No novo desenho, as placas coletoras do impactador foram modificadas, adicionando-se um ângulo agudo em seu centro, o que permite que a partícula se mova em região com baixa velocidade, especialmente se o fluido é água. O impactador original era em cascata, ou seja, reuniformiza-se o fluxo após a placa coletora e adiciona-se nova cela para separação de partículas. Para fase líquida, a adição de constrições severas pode criar vórtice ou mesmo facilitar a oclusão da passagem, pelo acúmulo de partículas, assim tal orifício, tornando-o uma região de passagem. Assim, a estrutura completa tem o tamanho reduzido, pois, a região de reuniformização do fluxo é menor.

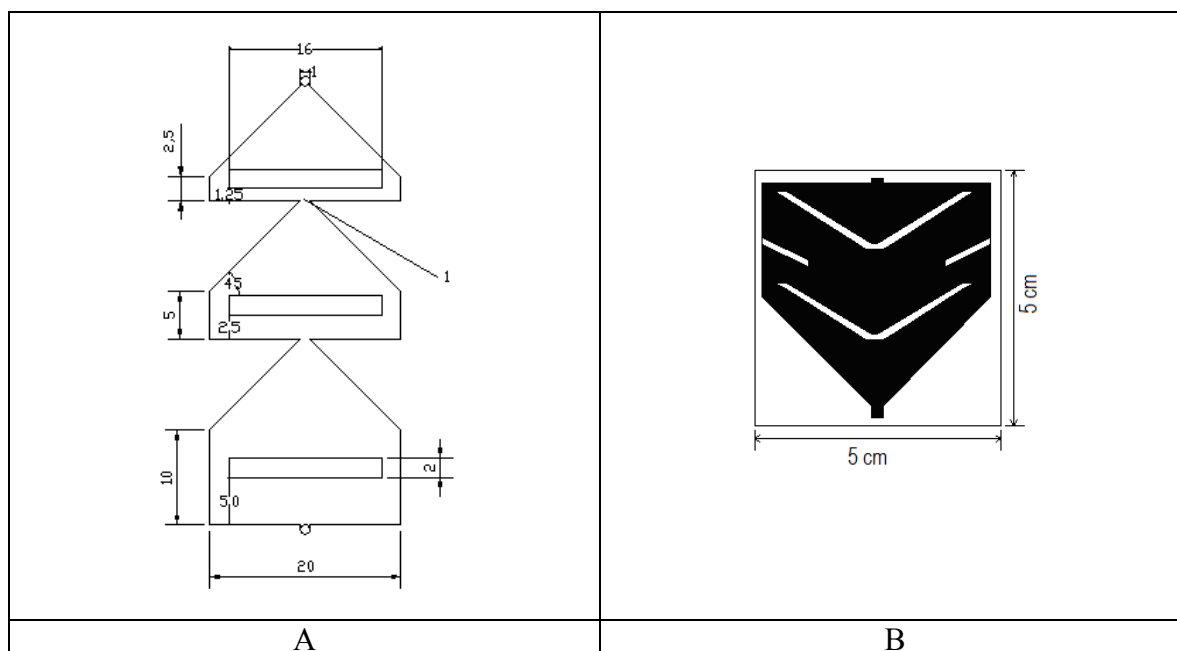


Figura 2 - Desenho (A) do impactador original e (B) novo desenho proposto.

As simulações deste desenho são mostradas na Figura 3. A Figura 3A mostra uma região com velocidade muito baixa, como previsto, e a concentração de partículas (Figura 3B) não é zero no centro do impactador.

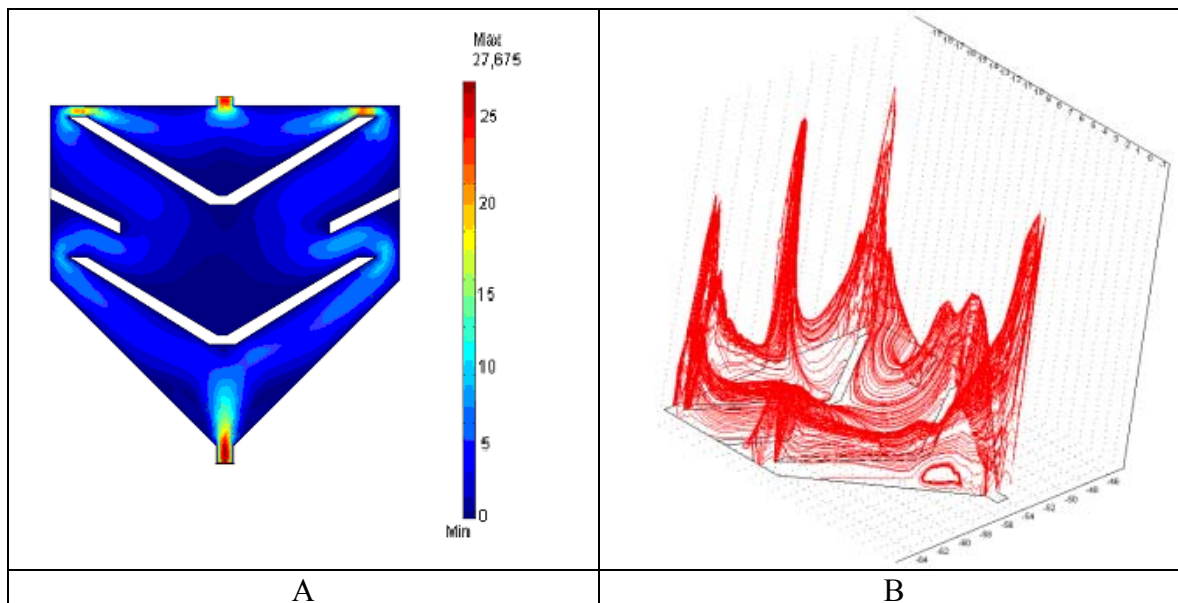


Figura 3 - Simulações do desenho do impactador (A) velocidade no interior da estrutura com fluxo de 0,1 mL/min de água; (B) linhas de fluxo da concentração de partículas em visão tridimensional.

Chicanas funcionam pela variação abrupta da velocidade do fluxo, o que facilita a separação de partículas e, pelo aumento do tempo de residência das substâncias dentro do canal, a remoção por reação. Contudo, as dimensões são bastantes críticas para definir que tamanho de partícula será removido. Assim, a chicana original foi modificada, utilizando-se agora outros conceitos além do tempo de residência. A Figura 4 apresenta a (A) estrutura original e (B) o novo desenho. Com este novo desenho, a estrutura é maior, porém, apresenta maior probabilidade de retenção. Em cada uma das várias regiões deste novo desenho, é possível que o fluxo se uniformize antes de deixar a estrutura. Após sair pela primeira saída há duas outras possibilidades de remoção do fluido: a próxima cela ou fora da estrutura. Como a saída da estrutura apresenta uma região isolada, onde a velocidade do fluido pode diminuir consideravelmente, é possível que ocorra retenção e/ou seleção de partículas.

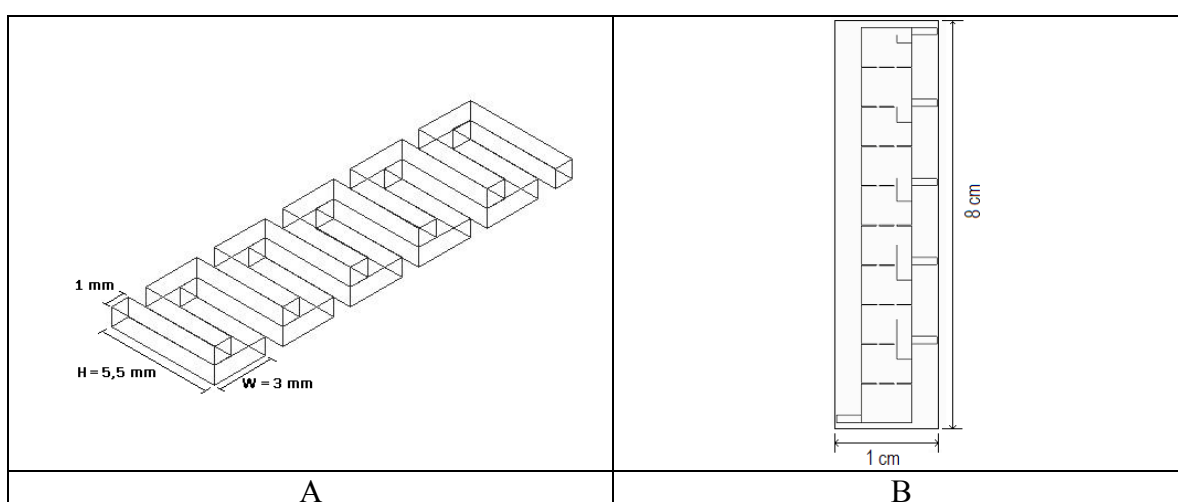


Figura 4 - Desenho da (A) chicana original e (B) novo desenho proposto.

As simulações deste novo desenho são mostradas na Figura 5. A Figura 5A 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 5B apresenta regiões onde a concentração de partículas é maior, e provavelmente, sua remoção é possível, que correspondem às celas mais próximas da entrada.

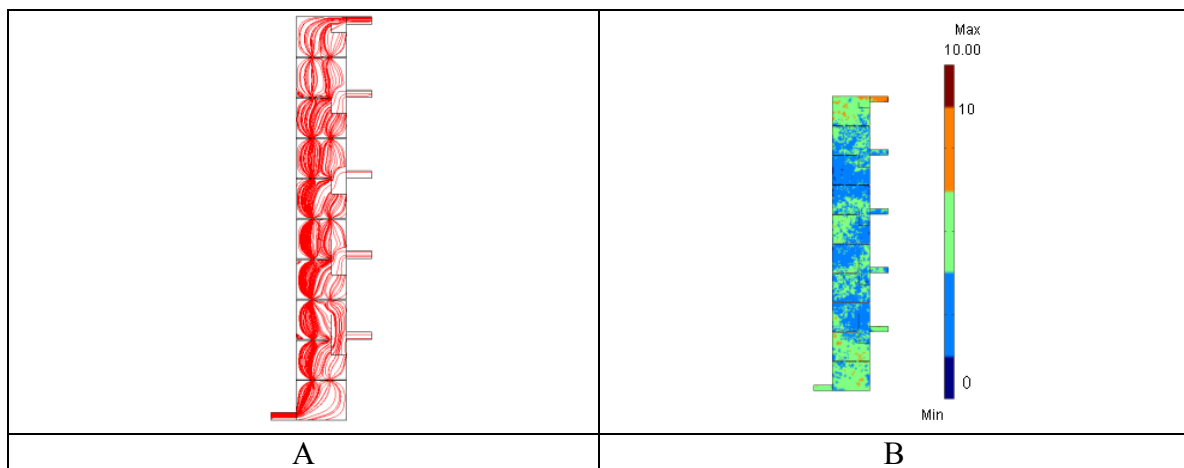


Figura 5 - Simulação (A) do fluxo de água (0,1 mL/min) e (B) concentração de partículas neste fluxo.

3.2 Avaliação do impactador

Os testes tiveram por objetivo mostrar o comportamento do fluxo e a retenção de partículas.

3.2.1 Fase líquida

O comportamento do fluido assemelha-se ao obtido nas simulações. Durante as filmagens inicialmente observa-se que na região central onde o ângulo é bastante acentuado, ocorre à formação de vórtices, mas logo em seguida observa-se a dispersão do fluxo pelas laterais. Imediatamente abaixo, nas laterais da região de uniformização, nota-se alto fluxo, que é quase ausente na região central da estrutura. Assim, o aluno pode perceber que as partículas mais “pesadas” se concentram no primeiro coletor e as mais “leves” no segundo. O uso de glicerol facilita visualizar como partículas muito leves se comportariam.

3.2.2 Fase gasosa

As partículas de 13 μm apresentam facilidade de migrar com o fluido e a retenção destas ocorre não só na região onde há baixa velocidade, mas também onde existem contrações.

Por outro lado, as partículas de 50 μm apresentam maior tendência de se localizar no centro da placa coletora, ou seja, nessa dimensões o impactador é favorável à sua retenção.

3.3 Avaliação da chicana

Os testes tiveram por objetivo mostrar o comportamento do fluxo e a retenção de partículas.

3.3.1 Fase líquida

O uso da solução aquosa de azul de metileno revela que o caminho preferencial existe, em toda a estrutura e a saída lateral favorece o acúmulo de produto. Esta condição é mais evidente com o uso de glicerol, que corresponde a uma solução mais viscosa.

3.3.2 Fase gasosa

As partículas de 13 μm 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 os pratos mais distantes da entrada (último e penúltimo).

Por outro lado, as partículas de 50 μm apresentam maior tendência de se localizar no centro da placa coletora (região onde fez-se o jateamento), ou seja, nessas dimensões o impactador é favorável à sua retenção.

4 PRINCIPAIS FENÔMENOS ENVOLVIDOS

Em fase gasosa, e pelos tamanhos de partículas utilizados (10 μm), pode-se esperar fenômenos gravitacionais e de centrifugação. Para os alunos é comum verbalizar tais condições como inércia das partículas ou formação de ciclone.

No líquido, pela dimensão das partículas é de esperar a sedimentação de partículas, o que pode ser verbalizado pelo aluno novamente como inércia.

As duas condições, contudo, são facilmente percebidas pelo aluno, o que motiva discussões, tais como, o tamanho escolhido para cada estrutura, o que por sua vez, favorece a discussão sobre simulação de fluxo. O fato de se utilizar pequena quantidade de solvente e gerar como resíduo pequenas quantidades de soluções que podem ser descartadas sem dificuldades, corresponde ao desenvolvimento de tecnologias mais limpas e favorece a sustentabilidade, o que deve ser uma preocupação constante no currículo das áreas de engenharia.

5 CONCLUSÃO

O uso de estruturas pequenas para o ensino mostrou uma série de vantagens, desde a facilidade de demonstrações em classe como a possibilidade de unir a simulação e a verificação do comportamento de fluidos em uma única aula, favorecendo a abordagem sistêmica de processos e permitindo um ensino mais dinâmico.

O ensino de engenharia, via de regra, é caro o que dificulta o acesso das minorias. Assim, o uso de instrumentos de baixo custo deve ser amplamente incentivado.

Agradecimentos

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEDMAR, P. A. **Isótopos** em Hidrologia. Editora Alhambra SA, Madrid (in Spanish), 1972.

BERALDO, F. P. **Desenvolvimento de Estrutura para Retenção de partículas/Microorganismos Presentes em Fase Gasosa e Testes em Equipamento Dedicado.** São Paulo, 100 p., 2006. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo.

CAVE, Mark R. et. al. Environmental analysis. **J. Anal. at. Spectrom**, v. 15, p. 181-235, 2000.

FELDER, R. M. & BRENT, R. The Intellectual Development Of science And Engineering Students 2. Teaching To Promote Growth. **Journal of Engineering Education**, v. 93, ed. 4, p. 279–291, 2004.

LAWLER, D. F. Particle size distribution in treatment processes: theory and practice. **Wat. Sci. Tech.**, v. 36, n. 04, p. 15-23, 1997.

LEVINE, A. D.; TCHOBANOGLOUS, G. e ASANO, T. Size distribution of particulate contaminants in wastewater and their impact on treatability. **Wat. Res.**, v. 25, n. 08, p. 911-922, 1991.

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, 2000, p. 1565-1618.

SANTOS, H.R., PRADO, G.S., VIDAL, C.M.S. *et al.* Applicability of particle size measurement techniques in water and wastewater treatment systems. **Eng. Sanit. Ambient.**, Oct./Dec. 2004, vol.9, no.4, p.291-300. ISSN 1413-4152.

SANTOS, L. C. **Desenvolvimento de Equipamento de Teste de Estruturas Miniaturizadas: Testes em Estrutura Útil na Eliminação de Partículas**. São Paulo, 79 p., 2006. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo.

SHONNARD, D. R. et. al. **Green** Engineering Education Through A U.S. Epa/Academia Collaboration. *Environ. Sci. Technol.*, v. 37, p. 5453-5462, 2003.

SILVA, M. L. P.; FURLAN, R. e RAMOS, I. Development of Miniaturized Structures and Setups for Research and Teaching of New Concepts in Engineering. In: **9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING EDUCATION**, Session M3G, San Juan, PR. July 23 – 28, 2006.

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.

TELGHEDER, U. & KHVOSTIKOV. V. A. Collection and determination of metal contaminants in gases a review. **Journal of Analytical Atomic Spectrometry**, v. 12, 1997, p. 1–6.

MICROSTRUCTURE USED IN ENGINEERING EDUCATION FOR PARTICLES REMOVAL

Abstract: Nowadays, due to products miniaturization, engineering learning faces new horizons because this miniaturization also implies in enhancement of the secondary phenomena that rules products behavior. Furthermore, not only environmental contamination but also environmental monitoring must be addressed in the curricula in order to produce a systemic knowledge. In this scenario, learning miniaturization and nanotechnology is a prime concern and the aim of this work was to show how miniaturized structures could help in learning these secondary phenomena. In this case, the structures are able to remove particles from liquid and gaseous flow. Tests were carried out using equipment normally present in didactic labs on engineering school and two different structures. Simulations were also performed and the structure behavior shows good agreement with simulations data. This structures and respective simulation show to be useful on learning physical phenomena involved on particles removal from liquid and gas. The use of small structures shows several advantages because the small size favors class demonstrations and simulations and lab experiments can be performed simultaneously. Moreover, the uses of these structures are conforming to clean technologies development and, due to the small cost, it is a path to involve minorities on engineering carriers.

Key-words: Miniatured structures, Impactors, Destilators.