

O USO DE ESTRUTURAS MINIATURIZADAS PARA ENSINO DA MODIFICAÇÃO NO FLUXO PELO PREENCHIMENTO DE CANAIS

Michele Yuriko Ieiri¹, Mayara Marques Botteon², Leonardo Frois Hernandez³, Lilian Marques Silva⁴, Alexsander Tressino de Carvalho⁵, Maria Lúcia Pereira da Silva⁶

^{1,2} Alunas do curso de Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos da FATEC-SP

³Instrutor da FATEC-SP

^{4,5}Escola Politécnica da USP

⁶Prof. Dra. Plena do curso de Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos da FATEC-SP

lfh@fatecsp.br, malu@lsi.usp.br

Resumo

A utilização de canais preenchidos com material particulado ocorre tanto na Engenharia Química, em equipamentos de processos de produção, como na Química, para a análise de substâncias. Assim, foi objetivo deste trabalho desenvolver testes simples e não custosos para ensinar sobre o comportamento dos fluidos no interior de estruturas onde partículas dificultam a passagem deste fluido. Foram assumidas como condições de contorno o uso de ensino por resolução de problemas e os 12 Princípios da Engenharia Química verde. A estrutura utilizada possui seis câmaras distintas e foi testada em meio líquido e gasoso usando traçadores. Para o meio líquido a existência do material particulado elimina caminhos preferenciais, visíveis quando o preenchimento inexistente. Para fluido gasoso substâncias puras saem totalmente da estrutura em intervalo de tempo bem curto se comparado a misturas. Os resultados permitem montar tabelas qualitativas que descrevem vários fenômenos, tais como difusão, separação de compostos, perda de carga, etc.

1. Introdução

Em dispositivos para uso em processos químicos, tanto de análise como de produção, muitas vezes é utilizado o preenchimento dos caminhos que o fluido percorre com material particulado. O preenchimento pode ser bastante útil para aumentar o contato de dois ou mais fluidos, acelerar reações, por garantir contato com a superfície de um catalisador, etc [1]. Esse preenchimento, por exemplo, na área de análises químicas é comum em colunas cromatográficas e é feito por partículas com dimensões da ordem de μm e de grande área superficial [2], para favorecer a adsorção de material em sua superfície. Dispositivos miniaturizados, tais como microrreatores, também utilizam partículas, estes dispositivos normalmente são formados por pequenos canais [3], com dimensão normalmente entre 0,25mm e 5mm [4], e material de fabricação bem variado, desde quartzo ou sílica [5,6,7,8] a zeólita [9,10] ou mesmo carbono [11]. Equipamentos de maior porte, tais como as colunas de destilação [12] 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 [1], 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.

Assim, foi objetivo deste trabalho desenvolver testes simples e não custosos para ensinar sobre o comportamento dos fluidos no interior de estruturas onde partículas dificultam a passagem deste fluido. Especial ênfase foi dada à interação do fluido com a partícula e a conceitos como tempo de residência.

2. Metodologia, Materiais e Métodos

2.1. Condições de contorno

Foram assumidas como condições de contorno o uso de ensino por resolução de problemas (PBL – *problem based learning*) [13] e o respeito aos “12 Princípios da Engenharia Química verde” [14,15].

2.2. Estruturas utilizadas

A estrutura utilizada é de baixo custo e, em testes anteriores, mostrou-se interessante para retenção de partículas tanto em fluido líquido como gasoso [16]. As estruturas foram usinadas em vidro com jato de areia, seladas com uso de placas PVC flexível e fita adesiva dupla face. A Figura 1A apresenta o esquema desta estrutura e observa-se que para as seis câmaras é possível permitir a saída do fluido lateralmente ou para a próxima câmara. O comprimento total da estrutura é de cerca de 10 cm e as saídas/entrada correspondem a tubos de aço de 1mm de diâmetro externo.

A estrutura foi empacotada com pequenos tubos, semelhantes aos anéis de Raschig. Estes tubos são de latão com 1mm de comprimento e de diâmetro e espessura da parede desprezível. Tais tubos podem ser adquiridos em lojas de artesanato. A Figura 1B apresenta foto da estrutura empacotada montada e com os tubos de entrada e saída. É relevante observar que essa estrutura tem cerca de 1mm de espessura, ou seja, é planar, diferentemente dos equipamentos normalmente utilizados em Engenharia Química, onde mesmo microrreatores [4] podem apresentar dimensões maiores e são normalmente tridimensionais [1]. Essa pequena espessura e a vazão utilizada favorecem o fluxo laminar.

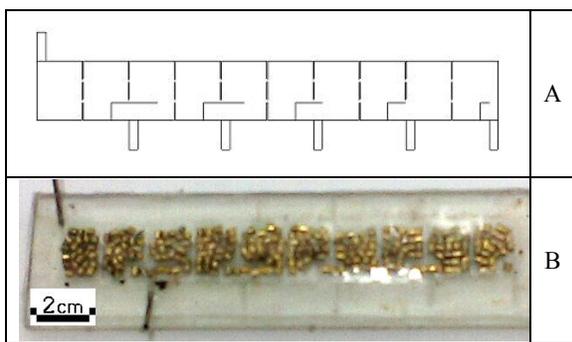


Figura 1 – Esquema da estrutura testada (A) e respectiva foto após o empacotamento com anéis (B).

2.3. Testes das estruturas

As estruturas foram testadas com traçadores, tanto em fase gasosa como líquida, e os fluidos de arraste foram nitrogênio (vazão de 10 mL/min, CNTP) e água (1 mL/min), respectivamente. Os traçadores em fase gasosa correspondem a vapores de substância pura (isopropanol, P.A., Casa Americana, Brasil) e/ou misturas (acetona de remoção de esmalte de unha, gasolina comum e Varsol®, Brasil). Na fase líquida usaram-se corantes para consumo humano, várias cores (Arcolor Ltda., Brasil), ou solução aquosa de azul de metileno 10% em peso (Casa Americana, Brasil). Os testes em fase gasosa correspondem a obter a variação da concentração do reagente ou mistura em função do tempo e da localização da saída, utilizando-se detector de gases (Instrutherm DFG-4000, Brasil). Para fase líquida avaliou-se a vazão em cada câmara, por medida volumétrica, com proveta e cronômetro. Ademais, analisou-se a interação do fluido com os anéis usando filmagem em microscópio (Quimis, Brasil) do traçador, como descrito anteriormente [17].

Em todos os casos analisou-se a coluna sem os anéis (padrão) e comparou-se com a adição destes.

3. Resultados e discussão

Inúmeros são os métodos e as formas de ensino, contudo, são inegáveis as vantagens da utilização de métodos/formas que privilegiem a informação visual [18,19], tanto pelo aspecto empírico como para favorecer a racionalização do conhecimento. Para a geração atual, bastante acostumada ao uso de instrumentos de informática, a linguagem linear (tipográfica) é menos eficiente que aquelas que favorecem a existência de imagens [20]. Portanto, privilegiaram-se inicialmente os procedimentos de ensino em fase líquida, pois esses utilizam imagens, o que tende a facilitar a compreensão dos resultados.

3.1. Procedimentos em fase líquida

O primeiro procedimento estabelecido foi a medida de vazão para as duas configurações: com e sem preenchimento. O procedimento é bem simples e corresponde a:

- Adiciona-se o fluxo de água no interior da estrutura com apenas a última câmara aberta para o ambiente. Espera-se até que não seja visualizada a existência de áreas sem o fluido (preenchimento da estrutura);
- Libera-se uma das câmaras (preferencialmente a primeira) para a atmosfera, e adiciona-se 0,01 mL do traçador. Recolhe-se o líquido em proveta e mede-se o tempo necessário para o traçador começar a ser removido da estrutura;
- Repete-se o procedimento para as outras câmaras.

A vazão é calculada simplesmente dividindo-se o volume pelo tempo. É possível observar que a estrutura sem preenchimento tem vazão constante e a velocidade do fluido é alta, permitindo a retirada do traçador em menos de 15 s. Por outro lado, para a estrutura preenchida há uma variação aproximadamente linear da vazão em relação à distância da entrada, o que indica que a passagem do fluido é grandemente dificultada pela existência dos anéis. A Figura 2 apresenta gráfico da vazão medida em função da câmara avaliada.

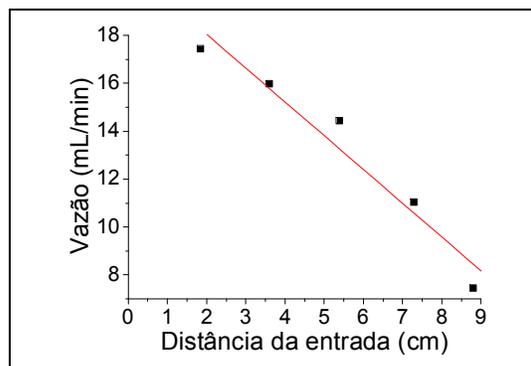


Figura 2 - Resultados típicos para a vazão em estruturas empacotadas em função da distância da entrada.

Na estrutura sem preenchimento o cálculo do número de Reynolds demonstra que este é menor que 1000 (fluxo laminar) em qualquer ponto considerado no desenho. A observação do fluido com o uso de microscópio e de traçador permite encontrar várias formas de interação entre o fluido e a estrutura e/ou os anéis e exemplificar essa característica de fluxo laminar. O procedimento é idêntico ao anterior, porém a estrutura é filmada durante o processo. A estrutura sem preenchimento apresenta caminhos preferenciais (locais mais escuros ao longo do fluxo) e é possível observar, em uma seqüência de fotos, por exemplo, que o traçador caminha sem grande dispersão para os lados, indicando que provavelmente o fluxo é laminar. Ademais, a coloração mais branda ao redor do fluxo principal indica como ocorre a difusão do traçador nesse fluxo e que ocorrem espaços mortos (locais sem coloração do traçador) próximo às saídas. A Figura 3 apresenta uma seqüência destas fotos para as duas primeiras câmaras.

Na estrutura preenchida, é possível observar que a passagem do fluido pelo interior desta é aparentemente aleatória, isto é, sem caminhos preferenciais, provavelmente devido às dimensões reduzidas dos anéis, como comentado anteriormente. Verifica-se

também que o fluido transita não só ao redor do anel como também no interior deste. Como esperado, o fluxo é laminar e a Figura 4 apresenta seqüência de fotos para exemplificar os fenômenos possíveis de se observar. As Figuras 4A e 4B apresentam situação onde os traçadores percorrem o fluido sem qualquer mistura, isto é, o fluxo deve ser laminar, e a Figura 4C apresenta a passagem desse traçador internamente ao anel.

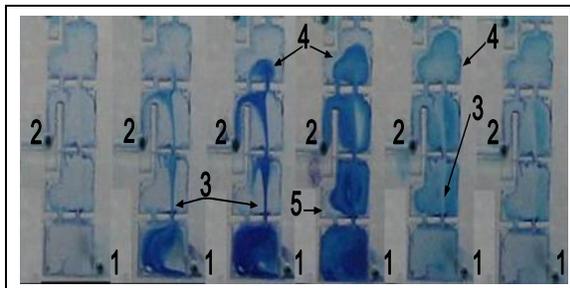


Figura 3 – Seqüência de fotos na estrutura não preenchida após a adição do traçador: (1) entrada do fluido; (2) saída do fluido; (3) caminho preferencial; (4) difusão; (5) espaço morto.

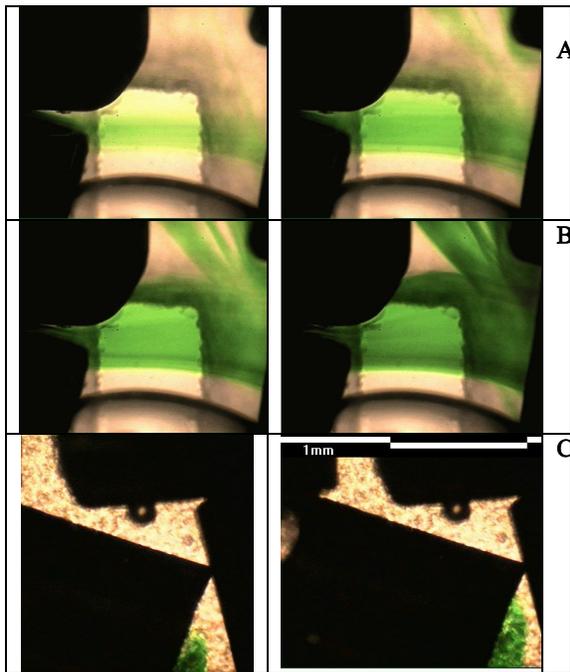


Figura 4 – Seqüência de fotos exemplificando fenômenos possíveis de se observar na estrutura preenchida com anéis: (A) início do encontro de dois fluxos de traçadores; (B) caminho de dois fluxos de traçadores; (C) passagem do traçador internamente ao anel.

3.2. Procedimentos em fase gasosa

O procedimento desenvolvido utiliza um detector de baixo custo, porém qualitativo e sem conexão com computador. Portanto, o resultado pode ser muito afetado pelo operador, o que requer cuidado na explicação do procedimento e na análise dos dados.

Assim, para validar o uso deste instrumento monitorou-se o sinal sonoro emitido pelo instrumento, que corresponde ao sinal a ser utilizado pelo aluno e avaliou-se se as conclusões seriam as mesmas com um aluno utilizando o detector de baixo custo e outro o freqüencímetro. A avaliação do sinal pode ser obtida montando-se um aparato virtual e esse procedimento pode ser instaurado com uso de *softwares* gratuitos, como segue:

- Acopla-se o equipamento detector de gases diretamente à entrada de microfone de um microcomputador, utilizando-se a saída de fonte de ouvido do equipamento e cabo de áudio comum;
- Utilizando-se um *software* que simula um freqüencímetro digital [21], monitora-se a freqüência do sinal sonoro emitido pelo detector;
- O tempo decorrido de análise pode ser monitorado com o uso de um *software* que simula um cronômetro [22];
- As medidas realizadas podem ser salvas utilizando-se um *software* que captura a imagem da tela do microcomputador [23].

A Figura 5 apresenta uma seqüência de imagens obtidas com os *softwares* sugeridos. Como é possível observar nessas imagens, o longo tempo decorrido entre o início, máximo e final do sinal permite uma avaliação segura do comportamento do fluido nesse arranjo experimental. Neste caso é proveitoso estabelecer (por treinamento do aluno) não só o início e o fim do sinal, isto é, o começo e o término da saída do produto sob análise de uma das câmaras, como também o ponto de máximo sonoro, que corresponde a uma maior concentração do produto em questão.

A comparação da freqüência medida e da interpretação do sinal sonoro pelo aluno permitiu concluir que, de modo geral, o equipamento é adequado para avaliar a saída da substância ou mistura baseando-se apenas no sinal sonoro. É necessária apenas uma calibração prévia, como descrita no manual do fabricante.



Figura 5 – Seqüência de imagens obtidas com os *softwares* sugeridos para validar o detector de gases.

Os procedimentos para entender o comportamento do fluido gasoso na estrutura são semelhantes ao da fase líquida, com injeções de 0,10 mL dos reagentes

(isopropanol, acetona para unhas, gasolina comum e Varsol®, nesta ordem respectivamente) em um fluxo gasoso.

As Tabelas I a IV apresentam os resultados obtidos para os produtos testados em estrutura sem preenchimento. Para permitir averiguar a reprodutibilidade do procedimento procedeu-se a cinco medidas para cada produto sob análise.

Tabela I – Tempo para detecção de isopropanol na estrutura sem preenchimento (5 medidas consecutivas) e tempo para total retirada deste (5 medidas consecutivas).

Câmara	Tempo (s)									
	Tempo decorrido entre a Injeção e o início da detecção					Duração da detecção				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	1	2	2	2	3	35	65	52	60	43
2	3	4	3	4	3	47	51	47	41	
3	27	36	25	13	19	25	61	55	43	15
4	8	10	8	6	5	32	18	37	44	35
5	11	6	8	10	9	9	6	12	10	12

Tabela II – Tempo para detecção de acetona de unhas na estrutura sem preenchimento (5 medidas consecutivas) e tempo para total retirada deste (5 medidas consecutivas).

Câmara	Tempo (s)									
	Tempo decorrido entre a Injeção e o início da detecção					Duração da detecção				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	1	1	2	1	2	200	135	120	107	76
2	2	1	3	2	14	177	153	133	40	46
3	2	1	3	3	1	42	120	73	54	35
4	3	4	12	3	2	43/9/ 7/14/4	50/8/ 14/5/10	61/9/ 22/3/5	78/10/ 18/2/5	42/5/ 22/8/12
5	3	4	3	4	6	91/27/12	145	118/33/ 4/20	25/10/ 36/6	7/3/ 9/7/3

Tabela III – Tempo para detecção de gasolina na estrutura sem preenchimento (5 medidas consecutivas) e tempo para total retirada deste (5 medidas consecutivas).

Câmara	Tempo (s)									
	Tempo decorrido entre a Injeção e o início da detecção					Duração da detecção				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	1	1	2	1	2	70	54	54	44	42
2	2	2	2	3	4	62	11	216	110	107
3	-	2	36	3	2	-	16	35	61	87
4	2	2	3	3	2	10/ 10/ 10/ 86/10	11/ 12/ 11/ 75/13	12/ 11/ 12/ 82/ 10	11/12/ 13/89/ 10	10/11/ 11/90/ 10
5	4	3	5	3	4	12/11/ 8/19/4	9/6/11	5/2/8	10/20/2	5/12/10

Tabela IV – Tempo para detecção de Varsol® na estrutura sem preenchimento (5 medidas consecutivas) e tempo para total retirada deste (5 medidas consecutivas).

Câmara	Tempo (s)									
	Tempo decorrido entre a Injeção e o início da detecção					Duração da detecção				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	2	1	2	3	2	12	19	17	14	12
2	12	95	-	-	3	2	1	-	-	3
3	25	3	44	-	-	2	26	4	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

O tempo de resposta, desde o momento da injeção até a detecção, se deu quase que instantaneamente, aproximadamente 2 segundos, para quase todos os reagentes, exceto para o Varsol®, onde existem situações em que o reagente não foi detectado. O tempo de detecção, do momento em que o equipamento começa a medir até o momento em que para de emitir o sinal, é diferente para cada reagente. Quando se trata do isopropanol fica em torno de 45 segundos de medição de uma única vez para todas as saídas. Para a gasolina têm-se tempos de aproximadamente 135 segundos para as primeiras saídas e a partir da 4a saída já ocorre a partição de detecção, ou seja, o equipamento passa a emitir sinal por etapas, tempo de emissão de um sinal à outro de aproximadamente 50 segundos. Para a acetona têm-se situações semelhantes às da gasolina, porém, o tempo de detecção a partir da 4a saída é dividido em aproximadamente 30 segundos entre uma detecção e outra. Quando se utiliza o Varsol® tem-se situação semelhante à do isopropanol com detecções únicas e rápidas, porém, na maioria das medidas não foi possível detectar sinal algum, provavelmente devido ao limite de detecção do aparelho.

Esse resultado é coerente com a existência de espaços mortos, que facilitam o aprisionamento da amostra em determinadas regiões. Como todas as amostras, exceção à isopropanol, são misturas, a saída dos produtos de dentro da estrutura é bastante dependente das propriedades dos reagentes. Assim, essa estrutura facilita a compreensão de processos de separação.

A estrutura empacotada apresenta comportamento ainda mais dispare entre substâncias puras e misturas. Ademais, os tempos de remoção são bem longos, podendo chegar a vários minutos (~10 minutos). Portanto, uma série de conceitos concernente às propriedades dos fluidos admitidos na estrutura, tais como viscosidade, pode ser ensinada.

4. Conclusões

O ensino de engenharia deve, sempre que possível, privilegiar meios lúdicos de ensino. Este trabalho demonstrou o uso de um dispositivo simples e de baixo custo no ensino de engenharia que além de viável principalmente para instituições de ensino superior pode ser também usado em demonstrações no ensino técnico ou médio. Portanto, corresponde a um meio de ensino

socialmente relevante e que colabora com escolas com poucas fontes de recursos.

O estudo de vários fenômenos observados e sua comparação com o que ocorre em um equipamento de maior porte, por exemplo, um sistema de destilação de laboratório, permite ao aluno apreender sobre as novas tendências, tais como miniaturização, e suas implicações para a descrição dos fenômenos, já que fenômenos não relevantes em equipamentos macroscópicos são essenciais em sistemas miniaturizados como, por exemplo, os efeitos de capilaridade.

O objetivo nesse estudo é que o aluno possa correlacionar os fenômenos ocorrendo no interior do sistema com o resultado final, por exemplo, o tempo de residência e sua variação com a dificuldade de remoção de produtos das estruturas, a formação de caminhos preferenciais com a possível falta de reprodutibilidade da estrutura, etc.

As pequenas dimensões utilizadas e o baixo fluxo permitem que pouco volume de recursos naturais seja gasto, tanto na produção como no uso da estrutura, portanto, este desenvolvimento está de acordo com os princípios da Engenharia Química verde e torna o conjunto adequado para a abordagem sobre outros temas aparentemente menos correlatos, como tecnologias mais limpas e sustentabilidade.

Referências Bibliográficas

- [1] S. M. Walas, **Chemical process equipment, selection and design**, Butterworth-Heinemann, 774 p., 1990.
- [2] R. L. Grob, **Modern practice of gas chromatography**, 4th Ed., John Wiley & Sons, Inc., New Jersey., 1036 p., 2004.
- [3] A. Rouge, B. Spoetzel, K. Gebauer, R. Schenk, A. Renken, **Microchannel reactors for fast periodic operation: the catalytic dehydration of isopropanol**, Chem. Eng. Sci. Vol. 56, No. 4. p. 1419, Fev. 2001.
- [4] Editorial, **The microchannel revolution**, Focus on Catalysts Vol. 2005, No. 2, p. 1-2, Fev. 2005.
- [5] S. Mukherjee, M. K. Hatalis, M.V. Kothare, **Water Gas Shift Reaction in a glass microreactor** Catalysis Today Vol. 120, No. 1, p. 107-120, Jan. 2007.
- [6] A. Stefanescu, A. C. van Veen, C. Mirodatos, J. C. Beziat, E. Duval-Brunel, **Wall coating optimization for microchannel reactors**, Catalysis Today, Vol. 125, No. 1-2, p. 16-23, Jul. 2007.
- [7] O. Görke, P. Pfeifer, K. Schubert, **Highly selective methanation by the use of a microchannel reactor**, Catalysis Today, Vol. 110, No. 1-2, p. 132-139, Dez. 2005.
- [8] Y. Men, G. Kolb, R. Zapf, V. Hessel, H. Löwe, **Selective methanation of carbon oxides in a microchannel reactor—Primary screening and impact of gas additives**, Catalysis Today, Vol. 125, No. 1-2, p. 81-87, Jul. 2007.
- [9] O. de la Iglesia, V. Sebastián, R. Mallad, G. Nikolaidis, J. Coronas, G. Kolb, R. Zapf, V. Hessel, J. Santamaría, **Preparation of Pt/ZSM-5 films on**

stainless steel microreactors, Catalysis Today, Vol. 125, No. 1-2, p. 2-10, Jul. 2007.

[10] G. Yang, X. Zhang, S. Liu, K. L. Yeung, J. Wang. **A novel method for the assembly of nano-zeolite crystals on porous stainless steel microchannel and then zeolite film growth**, J. of Phys. and Chem. of Solids, Vol. 68, No. 1, p. 26-31, Jan. 2007.

[11] Y. Chin, J. Hu, C. Cao, Y. Gao, Y. Wang, **Preparation of a novel structured catalyst based on aligned carbon nanotube arrays for a microchannel Fischer-Tropsch synthesis reactor**, Catalysis Today, Vol. 110, No. 1-2, p. 47-52, Dez. 2005.

[12] **Destilação**, www.sugarsoft.com.br/DESTILA%C3%87%C3%83O1a.htm Acesso em 11/12/2007

[13] R. M. Felder, R. Brent, **The Intellectual Development Of science And Engineering Students 2. Teaching To Promote Growth**, Journal of Engineering Education, 93 (4), p. 279–291, 2004.

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

[15] D. L. Hjeresen et. al., **Green Chemistry and Education**, Journal of Chemical Education, Vol. 77 No. 12, p. 1543-1547, Dec. 2000.

[16] Silva, L. M.; Hernandez, L. F.; Simões, E. W.; Silva, M. L. P. **Miniestruturas Para Remoção De Partículas Usadas No Ensino De Engenharia**. Anais do XXXV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia – COBENGE 2007, 2P17 – 1-10; Curitiba Paraná; 10 à 13 de setembro de 2007.

[17] M. M. Botteon, R. O. Martins, R. Perseghini, L. F. Hernandez, R. A. M. Carvalho, M. L. P. Silva **Metodologia para ensino de membranas seletivas e filmes finos**, Boletim Técnico da Fatec-SP, bt.fatecsp.br/index.php?action=3&boletim=22&artigo=10 Acesso em 11/12/2007

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

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

[20] P. Babin, M. Kouloumdjian, Os novos modos de compreender: A geração do audiovisual e do computador, Paulinas, São Paulo, 1989.

[21] Por ex. Frequency Counter 1.01, home.nexgo.de Acesso em 11/12/2007.

[22] Por ex. 1Time, www.atma-software.com/ Acesso em 11/12/2007.

[23] Por ex SnagIt7, www.techsmith.com/products/snagit/index Acesso em 11/12/2007.

Agradecimentos

À FAPESP e ao CNPq, pelo apoio financeiro.