



## II-335 - ESTUDO DA VELOCIDADE E CONCENTRAÇÃO DE BOLHAS DE OZÔNIO EM COLUNAS COM SEÇÃO TRANSVERSAL DE DIFERENTES FORMATOS

**Marcio Ricardo Salla<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Civil. Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Professor Efetivo Adjunto I na Faculdade de Engenharia Civil de Uberlândia – Universidade Federal de Uberlândia (FECIV-UFU).

**Leonardo Vieira Soares**

Engenheiro Civil – Doutor em Hidráulica e Saneamento

**Harry Edmar Schulz**

Engenheiro Civil – Doutor em Hidráulica e Saneamento

**Luiz Antonio Daniel**

Engenheiro Civil – Doutor em Hidráulica e Saneamento

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1Y, Campus Santa Mônica - Uberlândia, CEP 38400-902, Tel.: (34) 3239-4170 ramal 227, Fax.: (34) 3239-4159, e-mail: [mrsalla@feciv.ufu.br](mailto:mrsalla@feciv.ufu.br)

### RESUMO

A seção transversal de uma coluna de ozonização tem influência direta sobre as características hidrodinâmicas dessa coluna, o que reflete nos fenômenos que dependem da transferência de massa na interface gás-líquido. Neste estudo foram utilizadas duas colunas com seções transversais diferentes quanto à forma e quanto ao tamanho. A primeira com seção transversal quadrada de 0,19 m e a segunda com seção transversal circular de 0,10 m de diâmetro. Foram medidas as velocidades ascensionais das bolhas e sua concentração. Os resultados obtidos mostram que o aumento da seção transversal na proporção aqui estudada não implica em aumento semelhante da seção transversal da pluma ascendente de bolhas, quando computadas as velocidades e concentrações médias. Os resultados de velocidade média e de concentração média para a coluna de seção menor mostraram-se independentes da altura de líquido, enquanto que os resultados de velocidade média e de concentração média obtidos para a coluna de seção maior mostraram dependência para com a altura do líquido. A evolução da razão das áreas da pluma ao longo do eixo longitudinal das colunas é apresentada, mostrando que esta razão diminui na direção do topo das colunas.

**PALAVRAS-CHAVE:** ozônio, velocimetria a laser não-intrusiva, transferência de massa gás-líquido, sonda de cézio-137, difusor.

### INTRODUÇÃO

O Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, através de pesquisas nesta área de conhecimento, constata que a aplicação de ozônio na oxidação de matéria orgânica e inativação de microrganismos indicadores têm revelado situações muito particulares de queda de eficiência, possivelmente associadas ao processo de transferência de massa na interface ozônio-água das bolhas de ozônio. Características geométricas dos equipamentos podem ser controladas, e, nesse contexto, a escolha do difusor microporoso, que determina o diâmetro das bolhas emitidas, bem como das dimensões da coluna de ozonização têm-se mostrado de importância. O difusor microporoso deve evidentemente propiciar os menores diâmetros de bolhas. Quanto ao nível de líquido utilizado, devem ser evitados níveis muito reduzidos ou muito elevados. Os níveis reduzidos podem levar à liberação de parte do ozônio para atmosfera, sem que tenha reagido com compostos químicos ou microrganismos existentes no líquido da coluna. Para níveis elevados, o ozônio é totalmente consumido na parte inferior da coluna, prejudicando, por exemplo, parâmetros médios como o coeficiente de transferência de massa global  $K_{La}$ , que é influenciado pela área interfacial específica, a qual é inversamente proporcional ao aumento do volume líquido (Singer et al., 2000). A definição do nível líquido ótimo é dependente de um conjunto de variáveis, podendo-se evidenciar o diâmetro das bolhas, a seção transversal da coluna, a vazão de ozônio aplicada e a velocidade ascensional das bolhas (Singer et al., 2000).



A velocidade ascensional das bolhas de ozônio é importante na quantificação da transferência de massa gás-líquido, estando inserida, por exemplo, nas equações do coeficiente de transferência de massa gás-líquido existentes na literatura (ver Treybal, 1980; Motarjemi et al., 1978; Perry et al., 1984; Levec et al., 1978; Jun et al., 1993; Innocentini, 1996; Zhou et al., 1994; Zhou et al., 2000; Schulz et al., 1995). Considerando essa relevância, visou-se inicialmente gerar dados de velocidade utilizando PIV para determinar a velocidade ascensional em planos localizados ao longo dos eixos longitudinais de colunas de ozonização. Os trabalhos existentes geralmente mencionam a velocidade ascensional de bolhas individuais. Entretanto, a literatura também aponta para as diferenças entre velocidades ascensionais de bolhas individuais e de conjuntos de bolhas (ver Motarjemi et al., 1978; Becker et al., 1994; Houghton et al., 1957; Haberman et al., 1954). Diferentes causas modificam a velocidade em diferentes sentidos. Por exemplo, a coalescência entre bolhas propicia aumento da velocidade ascensional, em decorrência do aumento do diâmetro das bolhas. Entretanto, maiores velocidades implicam em maiores tensões de cisalhamento e maior probabilidade de novamente dividir as bolhas. Adicionalmente, o aumento da concentração de bolhas implica em retardamento. O entendimento detalhado de cada causa e sua consequência é motivo de contínuos estudos na área (Otake et al., 1977; Zieminski et al., 1970).

Este trabalho apresenta resultados para a velocidade ascensional das bolhas de ozônio e sua concentração média ao longo de duas colunas de ozonização com geometrias diferentes, sendo uma com seção transversal circular e outra com seção transversal quadrada, utilizando metodologias não-intrusivas, com velocimetria a laser e medidas de concentração com sonda de Césio 137. Os resultados mostram que maiores seções transversais podem gerar resultados de velocidade e concentração mais sensíveis à pressão da coluna de água e que o aumento da seção transversal não necessariamente é acompanhado de um aumento transversal equivalente da pluma ascendente de bolhas.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Coluna de ozonização

A coluna de seção transversal quadrada possui 0,19 m de lado e 2,00 m de altura, composta de duas faces paralelas de acrílico e duas faces paralelas de vidro, com espessuras de 15 mm para ambos os materiais. A coluna de formato circular possui seção transversal de 0,10 m de diâmetro interno e mesma altura de 2,00 m. O material da coluna é acrílico com espessura de 5 mm. A coluna de seção maior e quadrada é denominada, neste trabalho, de “coluna 1”, enquanto que a coluna de seção menor circular é denominada de “coluna 2”.

A base interna de ambas as colunas de ozonização é provida de um difusor poroso, confeccionado em plástico microporoso, com poros de 20  $\mu\text{m}$ , para vazão de ar até 3  $\text{m}^3/\text{h}$ , 75 mm de diâmetro em sua base e 70 mm de altura, que fornece bolhas com diâmetro entre 0,5 e 3 mm.

A parte superior de ambas as colunas possui uma tampa em acrílico com uma cavidade para a saída do ozônio que não reagiu com os compostos químicos e orgânicos existentes na água. A eliminação do ozônio dos gases lançados na atmosfera foi feita através de borbulhamento desses gases em solução de iodeto de potássio 2%.

### Gerador de ozônio

O ozonizador utilizado apresenta uma escala de produção relativa à sua máxima capacidade de geração de ozônio, com as porcentagens de 20%, 40%, 60%, 80% e 100% da produção máxima. Nas condições de trabalho, a geração de ozônio oscilou fracamente em torno de 3,0 g  $\text{O}_3/\text{h}$  para 100% de produção. A vazão de oxigênio foi de 300 L/h (5 L/min), com 5 minutos de contato entre as bolhas de ozônio e o meio líquido. A vazão foi controlada utilizando um rotâmetro inoxidável, fixo ao ozonizador.

### Laser

O método PIV (Particle Image Velocimetry) foi utilizado para determinação dos campos de velocidade instantâneos que ocorrem no interior das colunas. O princípio de funcionamento do método PIV é o uso de um feixe de luz laser que ilumina partículas que se deslocam no escoamento e permite o registro sucessivo de suas posições com o uso de equipamento fotográfico. No presente trabalho, as partículas de interesse são as bolhas de ozônio com movimento ascendente. O registro das posições foi feito com uma câmera CCD (1024 x 1024 pixels) e as velocidades determinadas com o uso de softwares específicos. No presente trabalho foram



registradas 15 imagens (frames) por segundo. A vantagem principal do método PIV é a sua característica não-intrusiva, ou seja, o método não modifica o escoamento que está medindo.

Foi utilizado um laser de vapor de cobre, com potência média na saída do feixe entre 10 e 20 W, com uma taxa de repetição de pulsos de 10 kHz, com duração do pulso entre 20 e 60 ns. O laser é emitido em dois comprimentos de onda: verde (510,6 nm) e amarelo (578,2 nm). A luz foi transportada até a seção de medição através de fibras óticas e convertida em uma folha de luz com o uso de um conjunto de lentes convergentes e divergentes conectado à fibra ótica.

### **Processamento das imagens**

Foi utilizado o programa Visiflow®, instalado em ambiente Windows. O algoritmo de análise das imagens foi de autocorrelação, com interpolação dos campos de velocidade incompletos. Para a autocorrelação apenas uma imagem é utilizada, mas contendo posições sucessivas das bolhas no escoamento. A imagem original é dividida em áreas de interrogação menores (até o mínimo de 16 x 16 pixels) e a velocidade mais provável é calculada estatisticamente nessas áreas de interrogação, através do deslocamento das bolhas registradas no seu interior. O campo de velocidade instantâneo de toda a região de interesse é obtido com todos os vetores calculados em cada área de interrogação.

### **Medidas das velocidades**

Ambientes translúcidos, como os líquidos que compõem os esgotos domiciliares, não são adequados para a medida das velocidades com a técnica PIV. Assim, água de abastecimento público foi utilizada na determinação das velocidades das bolhas. As características físicas da água de abastecimento permitem extrapolar os dados para os esgotos domiciliares. Eventuais alterações comportamentais das velocidades (ainda que reduzidas) ocorrem igualmente em ambas as colunas, permitindo ainda assim o estudo comparativo.

Foram determinados perfis de velocidades instantâneos e médios ao longo de toda a altura de água dentro das colunas de ozonização com o equipamento esquematizado na Figura 1.

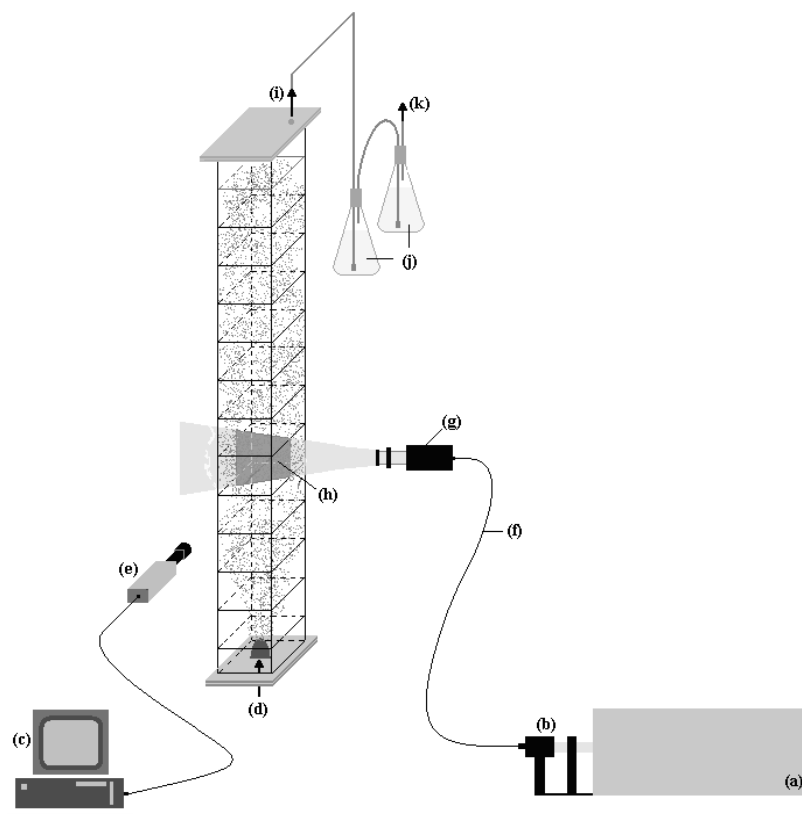
As medidas de velocidade foram feitas, para a coluna 2 (circular), em seções verticais localizadas ao longo do diâmetro, com a folha de luz introduzida em um lado da coluna e emitida através do outro lado sem haver desvios devido à curvatura da superfície. Para a coluna 1 (quadrada) foram utilizados planos ao longo do eixo vertical da coluna e paralelos às faces de vidro, conforme esquematizado na Figura 2.

A sequência básica dos experimentos foi: fixar o nível de água, focar a câmara CCD na seção de trabalho, estabelecer a vazão de trabalho e obter as imagens sucessivas para cada vazão. Cada passo da sequência básica incluía procedimentos intermediários, vinculados ao experimento como um todo. Assim, pode-se citar:

- Fixar o nível de água: incluía encher os frascos de borbulhamento com iodeto de potássio 2%.
- Focar a câmara CCD: incluía posicionar a folha de luz laser e efetuar a calibração da imagem para o experimento. Isto consistia em efetuar os procedimentos de conversão da medida decimal (métrica) em pixels.
- Estabelecer a vazão de trabalho: incluía fechar a parte superior da coluna, colocar o ozonizador em operação, ajustar a porcentagem de produção de ozônio para o experimento e ajustar a vazão controlando-a através da posição do rotâmetro.
- Obter as imagens sucessivas: 200 imagens foram registradas para cada vazão de gás.

Para o cálculo dos campos de velocidade utilizaram-se autocorrelações com áreas de interrogação de 64 x 64 pixels e sobreposição de 75%. Inicialmente foram calculados os campos instantâneos e, posteriormente, os campos médios de velocidade para cada conjunto “nível de líquido, seção de medida e vazão de trabalho”.

O controle da troca da solução de iodeto de potássio 2% dos frascos lavadores de gás foi colorimétrico. A saturação por ozônio implica em uma forte coloração amarelo-ouro, indicando a necessidade de troca da solução. Rotineiramente a solução de iodeto de potássio era trocada ao término de cada dia de experimento.



**Figura 1 - (a) equipamento laser; (b) imagem real de bolhas de ozônio iluminadas por luz laser; (c) micro-computador; (d) entrada de ozônio na coluna; (e) câmera CCD; (f) fibra ótica; (g) conjunto de lentes convergentes e divergentes; (h) bolhas de ozônio iluminadas pela luz laser; (i) saída de ozônio; (j) iodeto de potássio 2%; (k) liberação de oxigênio para a atmosfera.**

### Sonda de cézio-137

Para as medidas de concentração, radiação foi emitida de uma sonda de Césio 137 através do escoamento de bolhas de ozônio no meio líquido.

Nessa metodologia, a radiação atravessa pontualmente a seção transversal e é dirigida a um tubo fotomultiplicador, que a transforma em pulsos elétricos. Estes pulsos elétricos são quantificados e utilizados na determinação da porcentagem de bolhas de ozônio no meio líquido. A Figura 3 apresenta um esboço do equipamento utilizado.

A calibração do equipamento foi feita utilizando uma seção transversal da coluna completamente cheia de água e, posteriormente, completamente cheia de gás fornecido pelo ozonizador. Os valores medidos quando a coluna está em funcionamento localizam-se entre os extremos de calibração mencionados. Os efeitos de atenuação para os diferentes materiais foram devidamente inseridos no modelo utilizado no computador para a quantificação da concentração.

O termo “concentração de bolhas de ozônio” expressa a razão entre o volume de ar (oxigênio + ozônio) e o volume da mistura água + ar e é diferente da concentração de ozônio (mg/L).

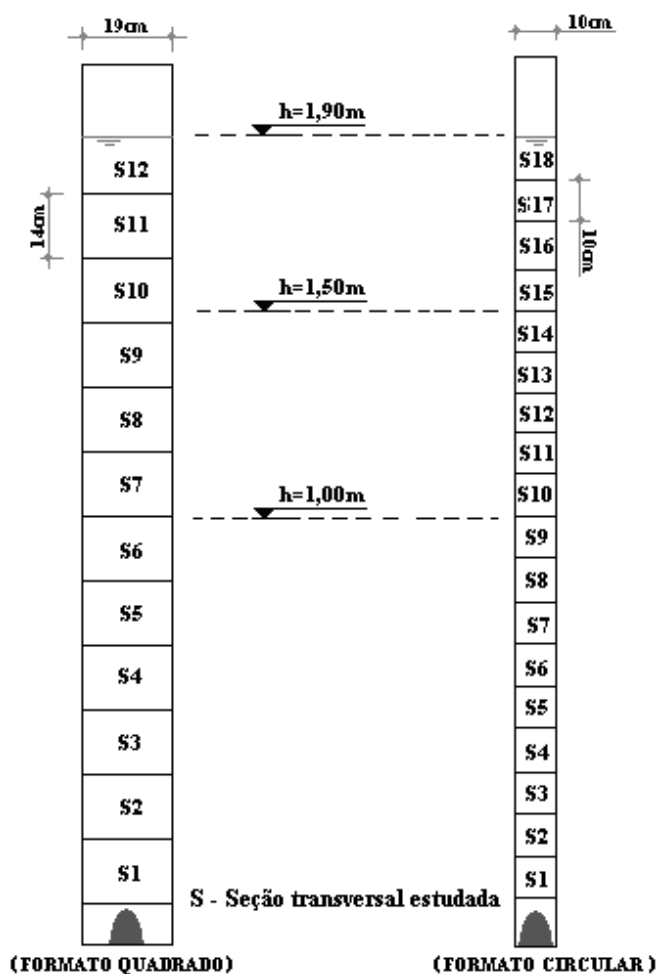


Figura 2 – Seções verticais de estudo do campo de velocidade ascensional.

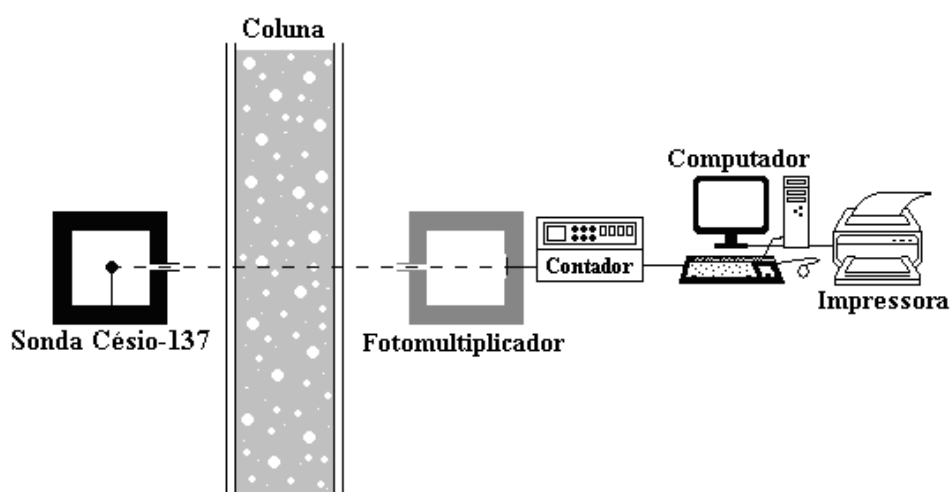


Figura 3 - Sonda de Césio, coluna, fotomultiplicador, contador de partículas e computador utilizados na determinação da concentração de bolhas nas diferentes seções da coluna.

### Medidas de concentração de bolhas

Utilizou-se água de abastecimento e o gerador de ozônio ajustado para 20% de sua capacidade máxima. Em ambas as colunas de ozonização a sonda de césio-137 foi posicionada em 4 alturas diferentes a partir da base das colunas: 0,15 m, 0,55 m, 0,95 m e 1,45 m. A radiação foi emitida de forma a sempre interceptar o eixo

central da coluna. Na coluna 1 (quadrada) a radiação era emitida paralela às paredes de vidro e na coluna 2 (circular) ao longo do diâmetro. Foram estudados 3 níveis de água: 1,00 m, 1,50 m e 1,90 m. No nível de 1,00 m apenas as primeiras três posições puderam ser utilizadas. Foram analisadas diversas vazões no intervalo de 37 L/h até 300 L/h. As concentrações foram registradas em 20 seqüências de 20 segundos, para cada vazão. O valor de concentração utilizado para cada posição de medida foi a média aritmética das 20 concentrações assim obtidas. Posteriormente, considerando a semelhança entre os valores obtidos nas quatro posições de medida, efetuou-se a média aritmética desses valores para cada conjunto “nível de líquido e vazão de trabalho”.

### Variáveis de Controle

A Tabela 1 apresenta as variáveis de controle de cada ensaio. Essas variáveis são: nível de água (h, que determina o volume utilizado), vazão de gases (ozônio+oxigênio), e dose de ozônio aplicada na coluna, tendo sido aplicadas as curvas de calibração do aparelho gerador de ozônio.

**Tabela 1: Variáveis de controle: vazão aplicada, dose aplicada e nível de líquido (C<sub>i</sub> é utilizado para designar o número do experimento na coluna 1 e D<sub>i</sub> para designar o número do experimento na coluna 2).**

	Coluna 1 – Seção quadrada						Coluna 2 – Seção circular				h (m)		
Experimento	C1	C2	C3	C4	C5	C6	D1	D2	D3	D4			
Vazão (L/h)	50	100	150	200	250	300	63	76	220	298	1,0		
Dose (mg/L)	11,2	15,98	19,67	22,8	22,56	28,07	10	20	20	10			
Experimento	C7	C8	C9	C10	C11	C12	D5	D6	D7	D8	D9	D10	
Vazão (L/h)	50	100	150	200	250	300	37	45	67	129	157	232	1,5
Dose (mg/L)	11,2	15,98	19,67	22,8	22,56	28,07	10	10	20	10	20	10	
Experimento	C13	C14	C15	C16	C17	C18	D11	D12	D13	D14	D15	D16	
Vazão (L/h)	50	100	150	200	250	300	56	68	106	197	239	284	1,9
Dose (mg/L)	11,2	15,98	19,67	22,8	22,56	28,07	10	10	20	10	20	10	

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Medidas de velocidade

As medidas efetuadas no presente trabalho permitem comparar as velocidades ascensionais nas duas configurações geométricas das colunas de ozonização. Diferentes níveis líquidos e vazões de ozônio foram testados. O campo de velocidade das bolhas foi medido ao longo da altura de água para averiguar se existem diferenças significativas no valor das velocidades. Adicionalmente, verificou-se se há interferência da pressão na velocidade das bolhas, através da análise dos resultados obtidos em uma mesma seção sujeita aos diferentes níveis de água.

Os campos de velocidade obtidos incluem preferencialmente as velocidades das bolhas, mas também captam os movimentos do fluido em regiões onde as bolhas estão ausentes. Isto ocorre principalmente nas extremidades laterais das seções estudadas, permitindo visualizar os movimentos descendentes do fluido. No cálculo das velocidades das bolhas ascensionais, essas regiões foram desconsideradas. A coluna 1 mostrou o movimento descendente preferencial de líquido junto às paredes de forma mais evidente que a coluna 2. A área do difusor em relação à área da seção transversal da coluna influencia esse comportamento, observando-se regiões com ausência de bolhas junto à base das colunas, o que foi mais evidente na coluna 1. As medidas na coluna 1 foram feitas em seções transversais distantes 15,0 cm entre si, enquanto que as medidas na coluna 2 foram feitas em seções transversais distantes 10,0 cm entre si. As posições das seções são mostradas nas figuras 4a, 4b e 4c, na apresentação dos valores das velocidades.

A Figura 4a mostra todos os dados de velocidade obtidos para altura de água de 1,0 m em ambas as colunas. Observa-se, conforme esperado, a tendência geral da velocidade ascensional aumentar com o aumento da vazão de ozônio. As curvas para cada vazão tendem a se localizar em posições relativas iguais para as diferentes seções de medida. Na faixa de vazões testadas (de 50 a 300 L/s para a coluna 1 e de 37 a 298 L/s





para a coluna 2) houve evidente influência da geometria da seção. O diâmetro equivalente da coluna 1 é de 21,4 cm, cerca de duas vezes o diâmetro da coluna 2 (10 cm). É interessante observar que a velocidade média para a coluna 1 também se mostrou cerca de duas vezes maior que a velocidade média para a coluna 2.

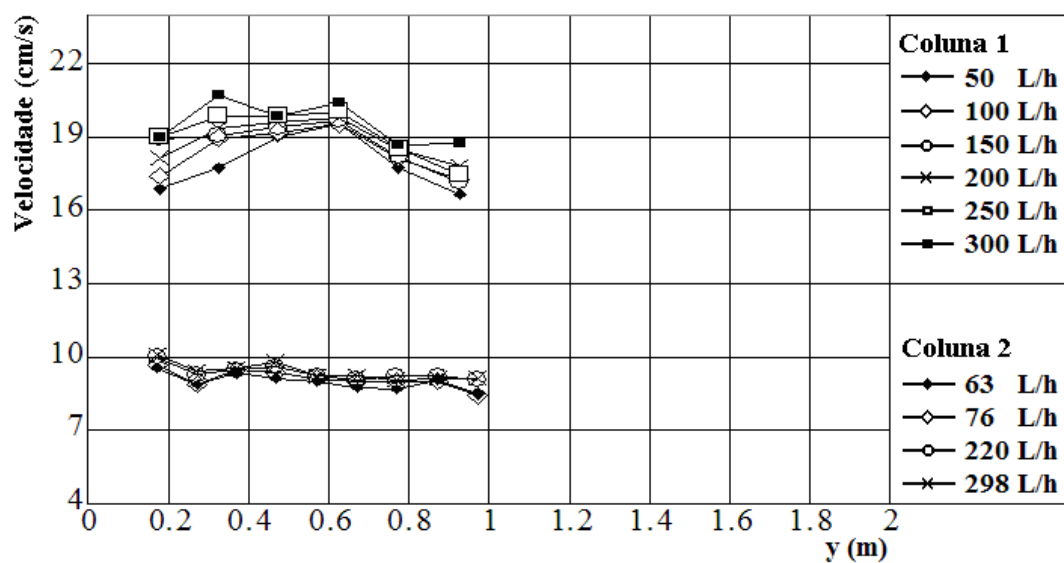
Quanto ao difusor microporoso utilizado, com diâmetro de 7,5 cm, ele engloba cerca de 56% e 12% das áreas das seções transversais das colunas 1 e 2, respectivamente. Como a quantidade de bolhas borbulhadas em ambas as colunas é a mesma (mesmo nível de água e mesma vazão), as diferenças na velocidade ascensional estão relacionadas apenas às diferenças geométricas mencionadas.

As Figuras 4b e 4c, com todos os dados obtidos para as alturas de água de 1,50 m e 1,80 m em ambas as colunas, mostram tendências gerais semelhantes às da Figura 4a.

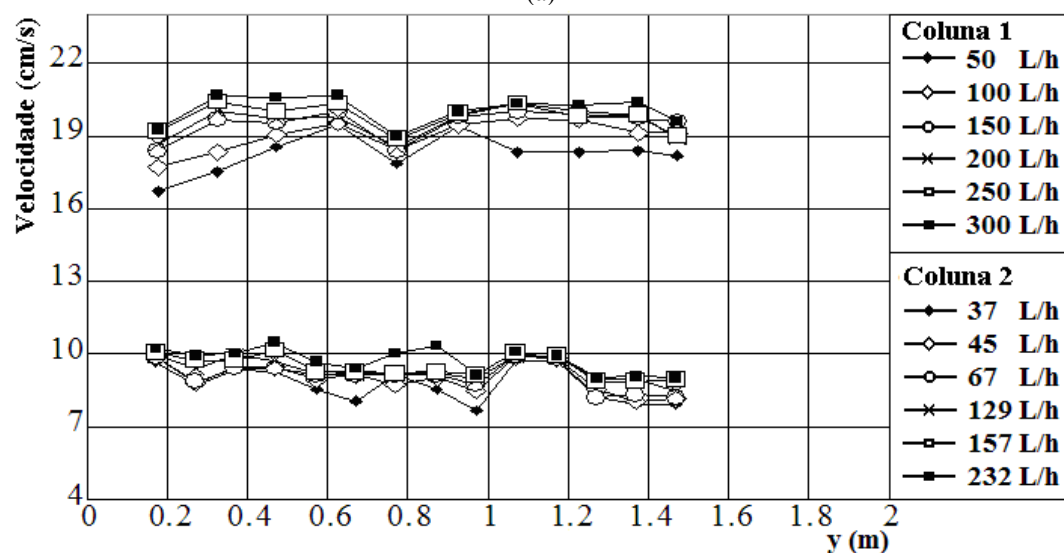
As Figuras 4a, 4b e 4c permitem ainda observar que para a coluna 2 as velocidades permaneceram razoavelmente constantes ao longo das seções de medida, com uma suave tendência de decréscimo em se aproximando do topo da coluna. Para a coluna 1 observa-se que há uma região de aceleração nas primeiras seções de medida junto à base da coluna, que é mais evidente para as menores vazões nas três alturas de água estudadas. A Figura 4a mostra um comportamento de aceleração seguido de desaceleração para todas as vazões na coluna de seção maior, quando a altura de água é de 1,0 m. A Figura 4c mostra a região de aceleração para esta coluna e a tendência geral de estabilização da velocidade, enquanto que a Figura 4b mostra um comportamento intermediário entre as duas situações anteriores. Os comportamentos gerais de aceleração, desaceleração ou constância podem ser evidenciados efetuando-se a média das velocidades para todas as vazões em uma mesma seção transversal.

A Figura 5 mostra as médias obtidas com os dados das Figuras 4a, 4b e 4c, permitindo observar as diferentes tendências de aceleração, desaceleração e constância da velocidade na coluna 1, de acordo com o nível de água, e de decréscimo da velocidade na coluna 2 para todos os níveis.

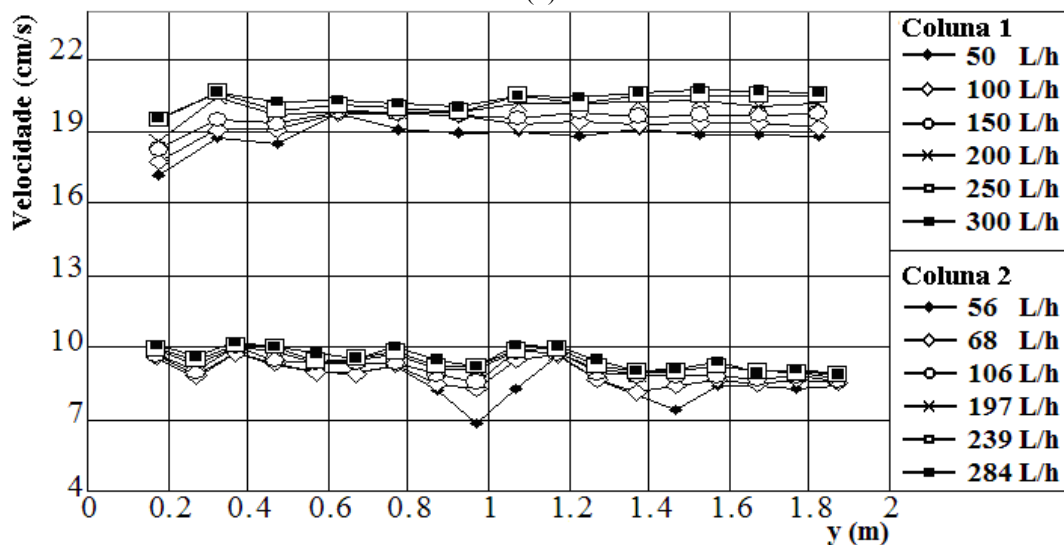
Uma segunda forma de efetuar a média é considerar cada vazão em separado e efetuar as médias das velocidades correspondentes ao longo de todas as seções transversais. A Figura 6 mostra a evolução dessas velocidades médias, também apresentadas na Tabela 2. Verificam-se influências perceptíveis da pressão da coluna de água. A Figura 6 mostra que os dados da coluna 2 não são segregados pelo valor do nível da coluna líquida, enquanto que os dados da coluna 1 mostram maiores velocidades médias para maiores níveis de líquido. Equações previsivas podem ser fornecidas, com base em análises de regressão, válidas para condições experimentais semelhantes às aqui seguidas. A Figura 6 apresenta uma equação de regressão (equação 1), obtida para a coluna 2, cujos dados não são segregados pelo nível de líquido em seu interior.



(a)



(b)



(c)

Figura 4 – Evolução da velocidade das bolhas ascensionais do ozônio ao longo da altura da coluna; (a) nível d'água 1,00 m; (b) nível d'água 1,50 m; (c) nível d'água 1,80 m.



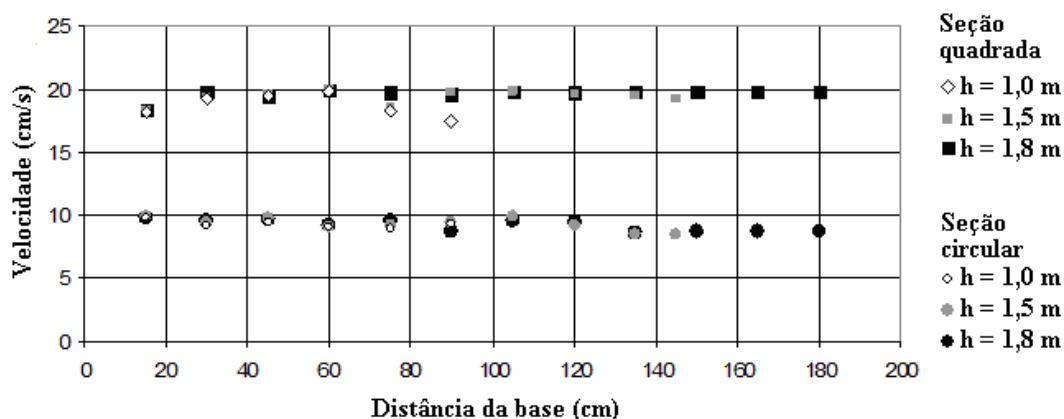


Figura 5 – Médias das velocidades obtidas em cada coluna. Há tendência de aumento inicial e constância posterior das velocidades para a coluna 1, em aumentando a distância da base e o nível do líquido, enquanto que há tendência de decréscimo da velocidade para a coluna 2, independente do nível de líquido.

Tabela 2 - Velocidades médias obtidas para as duas colunas, de acordo com a vazão ensaiada e a altura de água em cada coluna.

	Coluna 1 - Seção Quadrada						Coluna 2 - Seção Circular				h(m)
Vazão(L/h)	50	100	150	200	250	300	63	76	220	298	1,0
v (cm/s)	17,93	18,42	18,75	18,86	19,13	19,56	8,97	9,1	9,34	9,4	
Vazão(L/h)	50	100	150	200	250	300	37	45	67	129	1,5
v (cm/s)	18,25	19,01	19,49	19,56	19,75	20,07	8,76	9,04	9,11	9,36	
Vazão(L/h)	50	100	150	200	250	300	56	68	106	197	1,9
v (cm/s)	18,79	19,22	19,52	19,92	20,2	20,38	8,59	8,89	9,13	9,33	

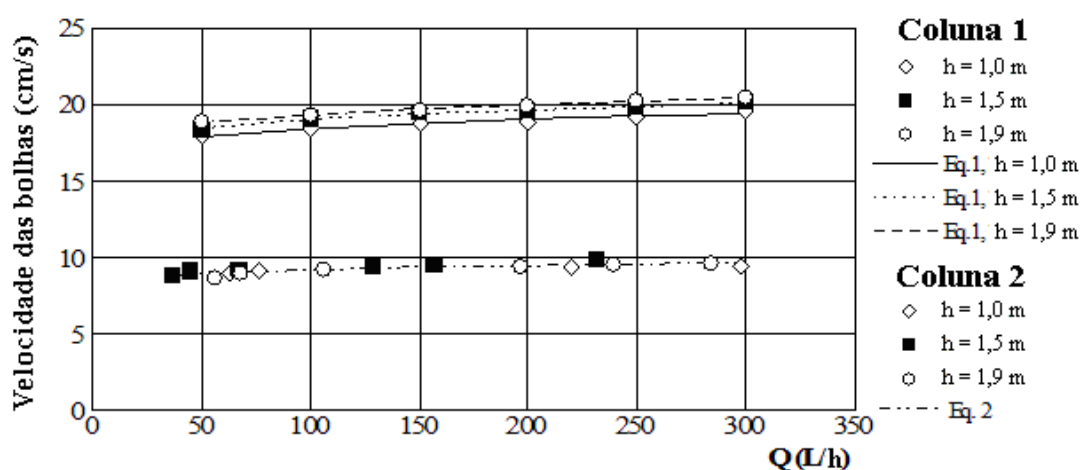


Figura 6 - Velocidade ascensional das bolhas de ozônio em função da vazão de ozônio para os dois formatos de coluna de ozonização estudados.

$$V_1 = 14.8.h^{0.0730}.Q^{0.0469} \quad \text{equação (1)}$$

$$V_2 = 7.56.Q^{0.0412} \quad \text{equação (2)}$$

Onde:  $V_1$  and  $V_2$  são as velocidades médias nas colunas 1 e 2 (cm/s), respectivamente;  $Q$  é a vazão de gás aplicada (L/h);  $h$  é o nível d'água (m).



### Medidas de concentração

A Tabela 3 apresenta os resultados das concentrações médias (médias sobre as quatro posições da sonda de Césio-137), de acordo com as vazões aplicadas e as alturas de líquido no interior das colunas. A Figura 7 mostra a evolução dessas concentrações com a vazão aplicada. Observa-se que o conjunto de pontos para a coluna 2 não apresenta segregação quanto ao nível do líquido. Entretanto, o conjunto de pontos para a coluna 2 mostra os dados obtidos para o nível de 1,0m preferencialmente acima dos demais dados. Assim, da mesma forma que ocorreu com a velocidade, observa-se efeito do nível de água sobre os resultados da coluna 1.

Para a construção da Figura 7 considerou-se que, idealmente, as concentrações podem ser entendidas como o volume macroscópico de ar (ozônio + oxigênio) dividido pelo volume macroscópico da mistura ar + líquido, que conduz à expressão:

$$C = [\text{Volume de gás}]/[\text{Volume da mistura}]$$

Considerando duas colunas com igual altura de água em seu interior e igual volume de ozônio fornecido, a relação ideal entre as concentrações é:

$$C_1/C_2 = (D_2/D_1)^2 \quad \text{equação (3)}$$

**Tabela 3: Concentrações médias obtidas para as duas colunas, de acordo com a vazão ensaiada e a altura de água em cada coluna.**

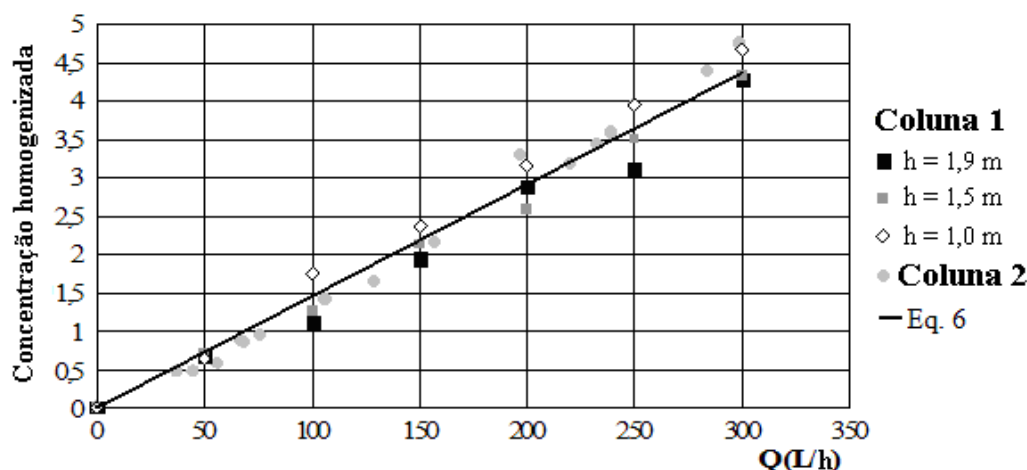
	altura de água em cada coluna.											h (m)	
	Coluna 1 - Seção Quadrada						Coluna 2 - Seção Circular						
Vazão (L/h)	50	100	150	200	250	300	63	76	220	298		1,0	
Conc. (%)	0,18	0,48	0,65	0,87	1,09	1,29	0,80	0,94	3,18	4,75			
Vazão (L/h)	50	100	150	200	250	300	37	45	67	129	157	232	1,5
Conc. (%)	0,19	0,35	0,59	0,71	0,97	1,20	0,47	0,47	0,86	1,64	2,16	3,43	
Vazão (L/h)	50	100	150	200	250	300	56	68	106	197	239	284	1,9
Conc. (%)	0,19	0,31	0,54	0,80	0,86	1,18	0,59	0,86	1,41	3,30	3,57	4,37	

No presente caso, a concentração é obtida ao longo de uma dimensão linear, que determina o valor médio medido. Para a coluna 1 essa dimensão é o lado de 19,0 cm e para a coluna 2 essa dimensão é o diâmetro de 10,0cm. Lançando esses valores na equação 3, tem-se uma relação ideal entre as concentrações medidas em ambas as colunas:

$$3,61.C_1 = C_2 \quad \text{equação (4)}$$

Em outras palavras, multiplicando o valor da concentração obtida na coluna 1 por 3,61, ela deve sobrepor-se à concentração obtida na coluna 2. Denomina-se aqui essa multiplicação de “conversão da concentração”. Nesse caso, nenhum efeito secundário, como a pressão, foi considerado. Entretanto, em havendo esse efeito, ele aparece evidenciado porque o mesmo fator de conversão foi aplicado a todos os pontos da coluna 1. A equação 4 foi utilizada para apresentar conjuntamente os dados de ambas as colunas, fornecendo boa sobreposição entre eles. O gráfico mostra que as condições experimentais impuseram uma variação das concentrações para com a vazão que pode ser expressa adequadamente por uma função linear. A reta de melhor ajuste dos dados (equação 5) é apresentada na figura 7.

$$C = 0,0146.Q \quad \text{equação (5)}$$



**Figura 7: Concentração como função da vazão de ozônio. Observa-se ausência de segregação para a coluna com seção menor (circular) e segregação para a coluna com seção maior (quadrada - pontos para h = 1,0 m acima dos demais). Igualmente verifica-se que o fator 3,61 (equação 3) se aplica bem aos presentes dados.**

Nesse caso C representa a concentração convertida (fator de conversão 3,61 para a coluna 1 e 1,0 para a coluna 2), que não tem dimensão, e Q é a vazão em L/h.

### Relação $A_1/A_2$ das bolhas ascensionais

O fato de se possuir as grandezas médias das concentrações e das velocidades permite avaliar também a relação existente entre as áreas médias atravessadas pela pluma de bolhas nas colunas. É preciso lembrar que, embora na concentração média se tenha considerado a dimensão do lado da coluna ou o seu diâmetro, o mesmo não ocorreu para a velocidade média. Nesse caso, foram consideradas apenas as informações do escoamento ascendente, o que eliminou partes dos dados obtidos com PIV em cada fotografia. A relação entre as áreas transversais das plumas de cada coluna pode ser obtida de forma simples, como segue. Para uma mesma vazão de ozônio em ambas as colunas, as seguintes relações são válidas:

$$Q_{\text{Bolhas}} = V_1 \cdot A_1 \cdot C_1 \quad \text{equação (7a)}$$

$$Q_{\text{Bolhas}} = V_2 \cdot A_2 \cdot C_2 \quad \text{equação (7b)}$$

$$A_1/A_2 = [(V_2 \cdot C_2)] / [(V_1 \cdot C_1)] \quad \text{equação (8)}$$

Onde:  $Q_{\text{Bolhas}}$  é a vazão de ozônio imposta às colunas (L/h); V é a velocidade média das bolhas (cm/s); C é a percentagem (concentração) pontual das bolhas (%); A é a área teórica atravessada (m<sup>2</sup>).

Os índices 1 e 2 correspondem às colunas 1 e 2, respectivamente. Nesse caso, as áreas são definidas como aquelas atravessadas pela concentração média de bolhas se deslocando com velocidade média.

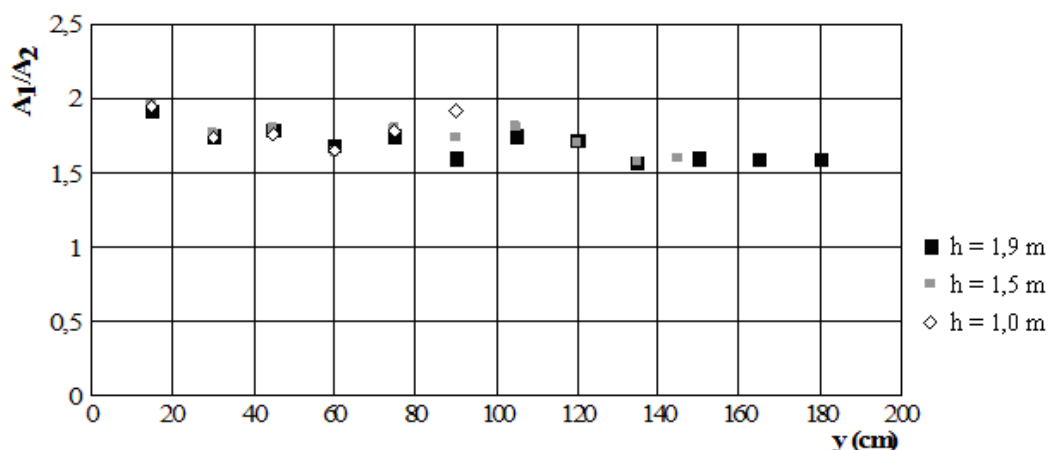
Apesar de haver um aumento de 4,58 vezes da área seção transversal da coluna 1 com relação à área da seção transversal da coluna 2, a pluma de bolhas que ascende na coluna 1 não sofre um aumento equivalente em de sua área transversal, em relação à pluma que ascende na coluna 2. Isto pode ser visto na Figura 8, que mostra a evolução da razão entre as áreas ao longo dos eixos verticais das colunas, para os diferentes níveis de líquido utilizados. Na construção da Figura 8 foram feitas interpolações lineares entre os valores de velocidade medidos ao longo da coluna 2, de forma a comparar com valores de velocidade em posições coincidentes da coluna 1. Nessa figura, os valores de concentração média utilizam o fator de conversão 3,61. Os valores de velocidade média utilizados correspondem àqueles da Figura 5. Nota-se que a razão entre as áreas  $A_{\text{maior}}/A_{\text{menor}}$  decresce à medida que a pluma avança para a parte superior das colunas.

Na coluna de maior seção transversal (1) as bolhas se espalham mais no sentido transversal, porém mantém um núcleo central ascendente que se desloca com menos resistência do que na coluna 2. Os valores relativos

de velocidades, concentrações e razão transversal das plumas de bolhas, obtidas nas condições experimentais apresentadas, são resumidos na Tabela 4.

**Tabela 4 - Resumo dos resultados apresentados.**

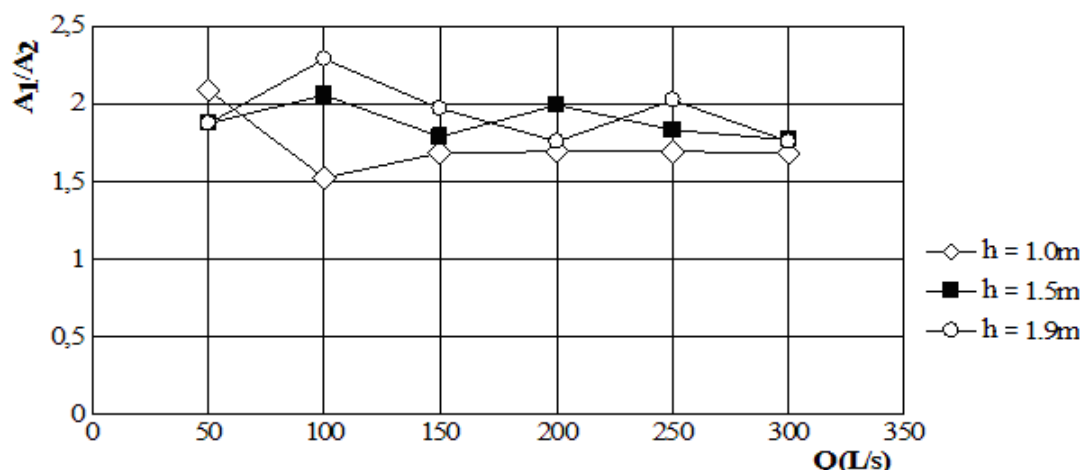
Condições experimentais	Dimensões: Coluna 1: Lado = 19.0 cm Coluna 2: Diâmetro = 10.0 cm Profundidade d'água: 1.0; 1.5 e 1.9 m Diâmetro de bolhas na saída do difusor: 2 a 3 mm
	Vazão de gás: $37 \text{ L/h} \leq Q \leq 300 \text{ L/h}$
Relação de velocidade	$2.00 \leq \frac{V_1}{V_2} \leq 2.12$
Relação de concentração	$\frac{C_1}{C_2} \approx \frac{1}{3.61}$
Razão da área transversal	$1.5 \leq \frac{A_1}{A_2} \leq 2.3$



**Figura 8 - Evolução da razão entre as áreas  $A_1/A_2$  ao longo do eixo longitudinal das colunas.**

Na coluna de menor seção transversal (2), não havendo possibilidade tão ampla de espalhamento, o deslocamento é retardado devido à maior resistência provocada pelo líquido. As condições do presente conjunto de experimentos são tais que a evolução da largura média das plumas (ou suas áreas transversais) decresce enquanto as plumas ascendem.

Uma vez que a coluna 1 produziu dados influenciados pela pressão (nível da coluna de líquido), o que é evidenciado nas Figuras 6 e 7, onde essas variáveis são apresentadas como função da vazão aplicada, os dados das Tabelas 2 e 3 foram utilizados para construir a Figura 9, que mostra a razão entre as áreas como função da vazão. Para obter velocidades na coluna 2 relativas às mesmas vazões da coluna 1 utilizou-se a equação de regressão 5. Embora o conjunto de dados da Figura 9 seja mais esparso, ainda se observa alguma influência do nível de líquido, uma vez que os resultados referentes ao nível de 1,0m localizam-se preferencialmente abaixo dos demais pontos.



**Figura 9: Influência do nível do líquido sobre a razão  $A_1/A_2$ . Os valores de velocidade e de concentração isoladamente se mostraram segregados de forma mais evidente, mas ainda se observa que os valores da razão  $A_1/A_2$  obtidos para  $h = 1,0\text{m}$  se encontram preferencialmente abaixo dos demais pontos.**

## CONCLUSÕES

Foram realizadas medidas de velocidade e concentração ao longo da altura de duas colunas com seções transversais diferentes, utilizando diferentes níveis de líquido em seu interior, de forma a permitir a comparação dessas grandezas.

- A tendência geral esperada, de crescimento da velocidade média com o aumento da vazão, foi observada em ambas as geometrias. A coluna com maior dimensão transversal mostrou de forma mais evidente regiões com ausência bolhas, o que também está relacionado com a dimensão relativa do difusor, que era menor para esta coluna. A coluna de menor seção transversal apresenta, em princípio, melhores condições para a transferência de massa na interface ozônio-água. Nesse caso, tanto a menor velocidade ascensional das bolhas de ozônio, que aumenta o tempo de contato entre as bolhas e o meio líquido, como a maior concentração dessas bolhas, que aumenta a área específica de transferência, sustentam esta conclusão. As velocidades ascensionais medidas mostraram-se, em média, cerca de duas vezes maiores para a maior seção transversal.
- A razão entre as concentrações medidas pôde ser avaliada a partir das dimensões lineares características de ambas as seções transversais, levando ao valor 3,61. Ou seja, as concentrações da coluna com seção menor eram, em média, 3,61 vezes maiores que as concentrações da coluna com seção maior.
- Os resultados de velocidade e concentração obtidos para a coluna com maior seção transversal mostraram-se dependentes do nível de água existente na coluna (pressão). Maiores velocidades e menores concentrações foram obtidas para os maiores níveis de água. Essa segregação não foi observada nos resultados da coluna com menor seção transversal.
- As velocidades médias mostraram diferentes comportamentos ao longo de ambas as colunas. Para a coluna com menor seção transversal os valores médios de velocidade decresceram à medida que a seção de medida se afastava da base da coluna, independente do nível de líquido em seu interior. Para a coluna com maior seção transversal, observou-se aceleração da pluma de bolhas junto à base da coluna para todos os experimentos. Para o nível de 1,00 m observou-se desaceleração junto às seções superiores da coluna de líquido, enquanto que para o nível de 1,90 m observou-se estabilização da velocidade. Para o nível de 1,50 m observaram-se oscilações, caracterizando uma situação intermediária entre as duas anteriores.
- Os resultados mostraram que o crescimento da concentração de bolhas com o aumento da vazão pode ser expresso por uma equação linear para as condições experimentais deste trabalho.
- As medidas de concentração média e velocidade média permitiram avaliar a razão entre as áreas atravessadas pelas plumas de bolhas. Verificou-se que esta razão diminui à medida que as plumas ascendem.



Os valores obtidos para  $A_1/A_2$  variaram entre 1,5 e 2,0, mostrando que o aumento da área transversal disponível da coluna (4,84 vezes) não é necessariamente utilizado pela pluma.

- No presente estudo, os difusores instalados em ambas as colunas eram iguais (dimensão relativa menor para a maior seção transversal), o que influencia este resultado. Considerando a evolução da razão entre as áreas com a vazão, observou-se que os pontos relativos ao nível de água de 1,0 m (menor pressão), localizaram-se abaixo dos demais pontos. Nesse caso, os dados mostraram-se esparsos, não sendo segregados para os níveis de 1,50 e 1,90 m.

## AGRADECIMENTO

Os autores agradecem às instituições brasileiras FAPESP (processos 01/13586-6 e 02/13378-7) e CAPES pela manutenção das pesquisas e pela bolsa concedida ao último autor (processo CAPES 2201/06-2). O primeiro autor agradece a Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia pela viabilização da publicação deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BARBOSA, A.A. Correntes de densidade em reservatórios. São Carlos. 272p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1998.
2. BECKER, S.; SOKOLICHIN, A.; EIGENBERGER, G. Gas-liquid flow in bubble columns and loop reactors: Part II. Comparison of detailed experiments and flow simulations. *Chemical Engineering Science* – v. 49, n° 24B, p. 5747-5762, September. 1994.
3. HABERMAN, W.L.; MORTON, R.K. An experimental study of bubbles moving in liquids. *American Society of Civil Engineers – Transactions*, n° 2799, p.227-252, January. 1954.
4. HOUGHTON, G.; McLEAN, A.M.; RITCHIE, P.D. Mechanism of formation of gas bubble-beds. *Chemical Engineering Science* – v.7, p. 40-50, January. 1957.
5. INNOCENTINI, C.K.Z. Estudo da transferência de oxigênio da fase gasosa para a fase líquida, usando difusor cerâmico poroso. São Carlos. 87p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1996.
6. JUN, K.S.; JAIN, S.C. Oxygen transfer in bubbly turbulent- shear flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 119, n° 1, p. 21-36, January. 1993.
7. LEVEC, J.; PAVKO, S. Mass transfer in square gas-liquid contractors. *Chemical Engineering Science*, v. 34, p. 1159-1160, October. 1978.
8. LIMA, A.C.M. Caracterização da estrutura turbulenta em escoamentos aerados em canal de forte declividade com auxílio de técnicas de velocimetria a laser. São Carlos. 387 p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2003.
9. MOTARJEMI, M.; JAMESON, G.J. Mass transfer from very small bubbles – The optimum bubble size for aeration. *Chemical Engineering Science*, v. 33, p. 1415-1423, June. 1978.
10. OTAKE, T.; TONE, S.; NAKAO, K.; MITSUHASHI, Y. Coalescence and breakup of bubbles in liquids. *Chemical Engineering Science*, v. 32, p. 377-383, August. 1977.
11. PERRY, R.H.; GREEN, D.W. *Perry's Chemical Engineers – HandBook*, Sixth Edition, McGraw Hill, New York. 1984.
12. PIMENTEL, V.E. Medida de velocidade de escoamentos aerados por meio de tubos de pitot. *Simpósio de Iniciação Científica*, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1999.
13. SALLA, M. R. Bases hidrodinâmicas para processos de transferência de gases em colunas com difusores. São Carlos. 151p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2002.
14. SALLA, M. R. Sistema de ozonização em esgoto de reator anaeróbio: Estudo da hidrodinâmica e das respostas oscilantes de DQO. São Carlos. 446p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2006.
15. SCHULZ, H. E. Investigação do mecanismo de reoxigenação da água em escoamento e sua correlação com o nível de turbulência junto à superfície. São Carlos. 299p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1985.
16. SCHULZ, H.E. Investigação do mecanismo de reoxigenação da água em escoamento e sua correlação com o nível de turbulência junto à superfície. São Carlos. 516p. v2. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1989.



17. SINGER, P.C.; HULL, C.S. Modeling Dissolved Ozone Behavior in Ozone Contactors. Denver. AWWA Research Foundation and American Water Works Association, 273p. 2000.
18. TREYBAL, R.E. Mass transfer operations, Third edition, McGraw-Hill Book Company, London. 1980.
19. ZHOU, H.; SMITH, D.W. Ozone mass transfer in water and wastewater treatment: Experimental observations using a 2D laser particle dynamics analyzer. Water Research. v.(34), n ° 3, p. 909-921, February. 2000.
20. ZHOU, H.; SMITH, D.W.; STANLEY, S.J. Modeling of dissolved ozone concentration profiles in bubble columns. Journal of Environmental Engineering. v.(120), n ° 4, p. 821-840, July/August. 1994.
21. ZIEMINSKI, S.A.; WHITEMORE, R.C. Behavior of gas bubbles in aqueous electrolyte solutions. Chemical Engineering Science, v. 26, p. 509-520, July. 1970.