



II-390 - OZONIZAÇÃO DE EFLUENTE DE REATOR UASB: HIDRODINÂMICA E INATIVAÇÃO DE *E. coli*

Leonardo Vieira Soares⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal da Paraíba. Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Professor Adjunto da Universidade Federal da Paraíba.

Marcio Ricardo Salla

Engenheiro Civil pela Faculdade de Engenharia Civil de Araraquara. Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos. Professor Adjunto da Universidade Federal de Uberlândia - UFU.

Luiz Antonio Daniel

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Professor Doutor do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo - USP.

Endereço⁽¹⁾: Universidade Federal da Paraíba. Av. Castelo Branco s/n. Caixa Postal Nº 350. CEP: 58.051-900. João Pessoa – PB. Voip: (83) 32167984 (11700622). e-mail: lvsoares@ct.ufpb.br.

RESUMO

Neste trabalho foram medidas e avaliadas as características hidrodinâmicas das bolhas de ozônio (velocidade e concentração) e a eficiência de inativação de *Escherichia coli*, durante a desinfecção de esgoto sanitário tratado em reator UASB. A coluna de ozonização utilizada tinha 100 mm de diâmetro, 2 m de altura e, em sua base, foi instalado um difusor poroso para o borbulhamento do ozônio, produzido por um gerador do tipo *Corona Discharge* com capacidade máxima de $7 \pm 0,7$ g O₃/h. Os ensaios foram feitos em três etapas diferenciadas pelo nível de água ou esgoto na coluna de ozonização – Etapa I: 1,02 m; Etapa II: 1,52 m e Etapa III: 1,92 m. As doses de ozônio aplicado foram de 10 e 20 mg/L e o tempo de contato de 5, 10, 15 e 20 minutos. Para cada par dose e tempo de contato, foram aplicadas duas vazões de ozônio distintas que variaram entre 37 e 298 L/h. Pode-se observar em relação às características hidrodinâmicas das bolhas de ozônio, que as concentrações e velocidades calculadas foram diretamente proporcionais ao aumento da vazão de ozônio, e os valores obtidos variaram, respectivamente, de 0,23 a 5,26% e de 6,84 a 10,81 cm/s. A inativação *E. coli* variou entre 1,7 e 6,3 log e foi influenciada pela velocidade das bolhas de ozônio – tendência de maiores eficiências para velocidades mais baixas. Assim, o controle das características hidrodinâmicas das bolhas de ozônio podem otimizar o processo de ozonização de esgoto sanitário, tornando-o técnica e economicamente atrativo.

PALAVRAS-CHAVE: Desinfecção, Ozonização, Hidrodinâmica, Velocidade e Concentração de Bolhas, Inativação de *E. coli*.

INTRODUÇÃO

O reúso de águas residuárias apresenta-se como alternativa viável, entre as propostas de desenvolvimento sustentado, para prover a crescente demanda de água necessária à realização de diversas atividades humanas.

Nesse contexto, faz-se necessário aplicar a desinfecção, pois, do ponto de vista bacteriológico, os processos usados para o tratamento de esgoto doméstico não são completamente eficientes para remoção ou redução de microrganismos patogênicos. A presença desses organismos, dado o uso múltiplo das águas, por exemplo, irrigação de hortaliças e recreação, favorece a manutenção dos ciclos de doenças veiculadas pela água.

Sabe-se que o cloro é o desinfetante mais utilizado no tratamento de águas de abastecimento ou residuárias devido à sua eficiência como germicida e ao seu baixo custo e facilidade de aplicação. Entretanto, pesquisas mais recentes relatam problemas oriundos da reação do cloro com matéria orgânica, naturalmente presente nas águas naturais e nos esgotos, que pode gerar uma variedade de subprodutos organoclorados, como trihalometanos (THMs) e ácidos haloacéticos, em sua maioria considerados potencialmente cancerígenos e mutagênicos podendo ser acumulados nas cadeias tróficas. Além disso, o cloro é ineficiente na inativação de microrganismos mais resistentes, como oocistos de *Cryptosporidium parvum*, não atendendo a padrões de potabilidade mais restritivos.



Frente a esses problemas gerados pela cloração, outras tecnologias foram desenvolvidas, como o ozônio. A ozonização se destaca como método promissor para desinfecção de esgoto sanitário, pois é eficiente na inativação de bactérias, vírus e protozoários, bem como na remoção de cor, odor e sabor. Ao mesmo tempo, sua característica fortemente oxidante lhe possibilita reagir com grupos funcionais orgânicos e organometálicos originando subprodutos de menor peso molecular e mais biodegradáveis que seus precursores.

Embora seja conhecida sua eficiência para desinfecção e oxidação de águas residuárias, acredita-se que a otimização do processo de transferência de massa gás-líquido possa aumentar esta eficiência e, conseqüentemente, tornar a desinfecção com ozônio uma alternativa atrativa, também, economicamente.

As técnicas não intrusivas de velocimetria a laser e de radiação gama foram utilizadas respectivamente para determinação de campos de velocidades bi-dimensionais e da evolução da concentração de bolhas, auxiliando, desta forma, os estudos do processo de transferência em ensaios de desinfecção de esgoto por ozônio. Nesse sentido, foram determinadas as características hidrodinâmicas das bolhas de ozônio – concentração e velocidade – e avaliada a inativação de *E. coli*.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para manter as mesmas características de escoamento dos ensaios de caracterização hidrodinâmica e de desinfecção, foi decidido trabalhar com vazões de ozônio relativas a diferentes tempos de contato e dosagens de ozônio. Isto é, definidos o nível de água na coluna (NA), o tempo de contato (t) e a dosagem de ozônio aplicado (D), a respectiva vazão de ozônio era calculada de acordo com as curvas obtidas na calibração do gerador de ozônio. A Tabela 1 apresenta os resumos desses ensaios.

Tabela 1: Características dos Ensaios Hidrodinâmicos e de Desinfecção. Notas: (1) Nível de água/sgoto; (2) volume ozonizado; (3) dose de ozônio aplicado; (4) tempo de contato; (5) vazão aplicada de ozônio.

Ensaio	NA ⁽¹⁾ (m)	V ⁽²⁾ (L)	D ⁽³⁾ (mg/L)	t ⁽⁴⁾ (min)	Q ⁽⁵⁾ (L/h)
A	1,02	8	10	10	298
B	1,02	8	10	10	63
C	1,02	8	20	10	76
D	1,02	8	20	10	220
E	1,02	8	20	20	298
F	1,02	8	20	20	63
G	1,52	12	10	10	45
H	1,52	12	10	10	129
I	1,52	12	10	20	37
J	1,52	12	10	20	232
K	1,52	12	20	10	67
L	1,52	12	20	10	157
G'	1,52	12	20	20	45
H'	1,52	12	20	20	129
M	1,92	15	10	10	68
N	1,92	15	10	10	197
O	1,92	15	10	20	56
P	1,92	15	10	20	284
Q	1,92	15	20	10	106
R	1,92	15	20	10	239
M'	1,92	15	20	20	68
N'	1,92	15	20	20	197



Coluna de Ozonização

A coluna de ozonização foi construída em acrílico transparente a partir de um tubo de 2 m de altura, 100 mm de diâmetro interno e 5 mm de espessura. A base desta coluna possui uma tampa em acrílico, onde uma conexão de 1", em PVC com rosca interna (fêmea), foi colada para fixação do difusor poroso, que serve para geração de bolhas ascensionais. A Figura 1 apresenta um desenho esquemático e uma fotografia da coluna de ozonização.

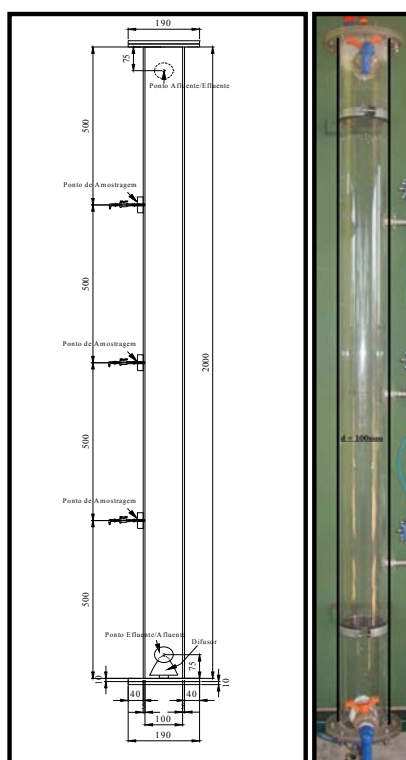


Figura 1 - Desenho esquemático e fotografia da coluna de ozonização em acrílico (cotas em milímetro).

Medidas de Concentração de Bolhas

Uma sonda de cézio-137, quando ligada a um contador de radiação, pode ser usada na determinação da concentração de bolhas com relação ao meio líquido, permitindo o estudo da evolução desta proporção ao longo da altura da coluna que contém o meio líquido.

O princípio desse ensaio consiste em emitir radiação de cézio-137, passando pela coluna de ozonização preenchida com líquido e borbulhada com ozônio, para um tubo fotomultiplicador que transforma esta radiação em pulsos elétricos. Estes pulsos elétricos são quantificados e transformados em números por um aparelho analisador. Enfim, estes valores obtidos são usados para determinação da concentração de bolhas com relação ao meio líquido conforme equações a seguir.

$$X_{AR} = \frac{I}{\mu_W \cdot \rho_W} \ln \left(\frac{I_2}{I_1} \right) \quad \text{equação (1)}$$

$$C_{AR} = \frac{X_{AR}}{10} \quad \text{equação (2)}$$

Após obter os valores de I_1 e I_2 (intensidade do feixe incidente) nos ensaios experimentais, determina-se o valor de X_{AR} (espessura de ar) usando a Equação 1 e, conseqüentemente, a concentração de bolhas de ar C_{AR} em relação ao meio líquido pela Equação 2.

Medidas de Velocidade

O método de Velocimetria a Laser por Processamento de Imagens (VLPI) ou método PIV (Particle Image Velocimetry) foi utilizado na obtenção das imagens para determinação dos campos de velocidades instantâneos e médios das bolhas ascensionais de ozônio em um campo bi-dimensional de seu escoamento. A vantagem principal da utilização deste método foi de se tratar de uma técnica não-intrusiva, não atrapalhando o escoamento normal das bolhas ascensionais de ozônio.

O princípio da técnica VLPI consiste de registrar as partículas em suspensão que passam por um campo bi-dimensional iluminado por um plano de luz laser. No caso desta pesquisa, estas partículas em suspensão foram as bolhas de ozônio em movimento ascensional na coluna de ozonização que passavam pelo campo bi-dimensional iluminado pelo plano de luz laser e eram registradas por uma câmera fotográfica digital acoplada a um computador, no qual as imagens foram armazenadas para posterior determinação dos campos de velocidades instantâneas e médios pelo uso do software Visiflow.

Ensaio de Desinfecção

Os ensaios de desinfecção foram realizados com efluente do reator UASB, visando à inativação de *E. Coli* (bacteriológico) e à determinação do balanço de massa do ozônio para o estudo de sua transferência e consumo. Também foram medidos pH, temperatura e alcalinidade total. A quantificação de *E. Coli* foi feita pelo método de membrana filtrante com meio Chromocult®. A medida de temperatura, pH e alcalinidade seguiram recomendações da APHA (1998), enquanto a concentração de ozônio residual foi medida utilizando-se método DPD MERCK® e a fração *off-gas* pelo método iodométrico (APHA, 1998).

RESULTADOS

Medidas de Concentração de Bolhas

O termo “concentração de bolhas ascensionais de ozônio (CO_3 , %)” expressa uma relação volumétrica entre o volume de ar e o volume de mistura água-ar e é diferente do termo “concentração de ozônio (mg/L)”. O resultado do estudo da evolução da concentração de bolhas ascensionais de ozônio ao longo da altura da coluna de ozonização para o nível de água de 1,92 m pode ser visualizado na Figura 2.

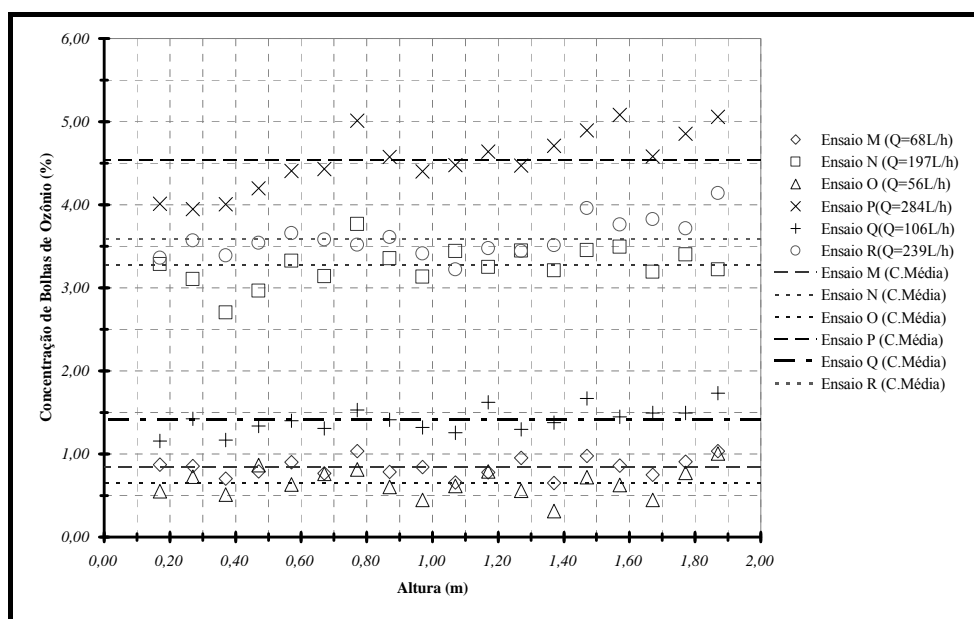


Figura 2: Relação entre a concentração de bolhas ascensionais de ozônio e a altura da coluna de ozonização: ensaios M a R (NA = 1,92 m).



Para cada uma das vazões de ozônio aplicadas, as concentrações de bolhas de ozônio determinadas nos diferentes pontos de incidência foram próximas umas das outras. Possivelmente, este comportamento ocorreu devido à forma cilíndrica e ao diâmetro da coluna de ozonização relativamente pequeno (100 mm) que distribuíram o volume de bolhas de ozônio uniformemente.

Pôde-se observar correlação linear positiva entre a vazão de ozônio e concentração de bolhas, ou seja, aumentando-se a primeira variável existe uma tendência em aumentar a concentração de bolhas também. Isso ocorreu conforme se esperava, pois maiores vazões de ozônio implicam em maiores volumes de bolhas de ozônio injetados. A Equação 3 expressa a correlação entre vazão e concentração de bolhas de ozônio, válidas para condições experimentais semelhantes às aplicadas nesta pesquisa.

$$CO_3 = 0,017 Q - 0,314, R^2 = 0,9935$$

equação (3)

CO_3 : Concentração de bolhas de ozônio, %;

Q: Vazão de ozônio, Lg/h.

Medidas de Velocidade

A velocidade ascensional das bolhas de ozônio é um parâmetro muito importante no estudo da transferência de massa gás-líquido, pois algumas equações sobre coeficiente de transferência de massa gás-líquido existentes na literatura contêm esta variável em seu equacionamento. O comportamento das velocidades médias das bolhas de ozônio ao longo da altura da coluna de ozonização está apresentado na Figura 3.

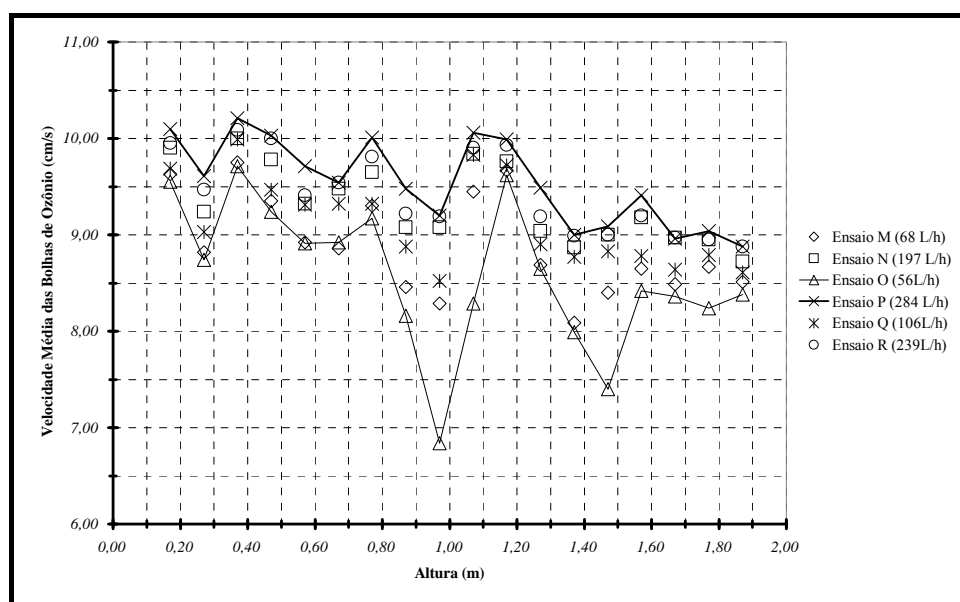


Figura 3: Relação entre a velocidade média das bolhas de ozônio e a altura da coluna de ozonização (NA = 1,92 m).

Pode-se observar pela Figura 3 que os valores médios das velocidades das bolhas ascensionais de ozônio apresentam as seguintes características:

1. Variaram de acordo com a vazão aplicada de ozônio e são maiores aqueles valores referentes às maiores vazões;
2. Apresentaram tendência de diminuir seu valor com o aumento da altura da coluna de ozonização; e
3. Os maiores valores das velocidades ascensionais de ozônio foram determinados nas regiões próximas ao difusor poroso, e, enquanto isso, os menores valores nas seções mais afastadas, próximas ao nível máximo de água. Era esperado que as velocidades aumentassem ao longo da altura da coluna de ozonização, conforme diminui a pressão. Isto não ocorreu, embora tenha se verificado que as velocidades ascensionais das bolhas de ozônio, durante o percurso, diminuem e aumentam sucessivamente. Segundo SOARES (2007), possivelmente, este comportamento ocorreu devido a fenômenos de coalescência e ruptura/quebra de bolhas que, respectivamente, aumentam e diminuem o diâmetro das bolhas e, conseqüentemente, a velocidade.

Ensaio de Desinfecção

A redução na concentração de *E. coli* variou de 1,7 log (ensaio E, Ct = 68 mg.min/L) para 6,3 log (ensaio G, Ct = 49 mg.min/L), conforme ilustrado na Figura 4. Este baixo valor de inativação para o ensaio E, quando comparado aos demais ensaios, pode ter ocorrido devido à alta concentração inicial de *E. coli* (1×10^7 UFC/100 mL), ao baixo nível de água adotado (1,02 m) e à alta vazão aplicada de ozônio (298 L/h), que implicam em tempos de percursos curtos devido à alta velocidade das bolhas de ozônio, reduzindo o contato entre as bolhas de ozônio e o meio líquido.

Os ensaios mais eficientes na inativação de *E. coli* foram aqueles realizados com menor vazão, quando se compararam os ensaios de mesmas características (dosagem de ozônio aplicado e tempo de contato), exceção feita aos pares A e B e G' e H'. De acordo com SOARES (2007), quanto menor a vazão de ozônio, menores serão os diâmetros das bolhas e as suas velocidades ascensionais, o que aumenta o contato entre as bolhas e o meio líquido beneficiando a transferência de ozônio do meio gasoso para o meio líquido.

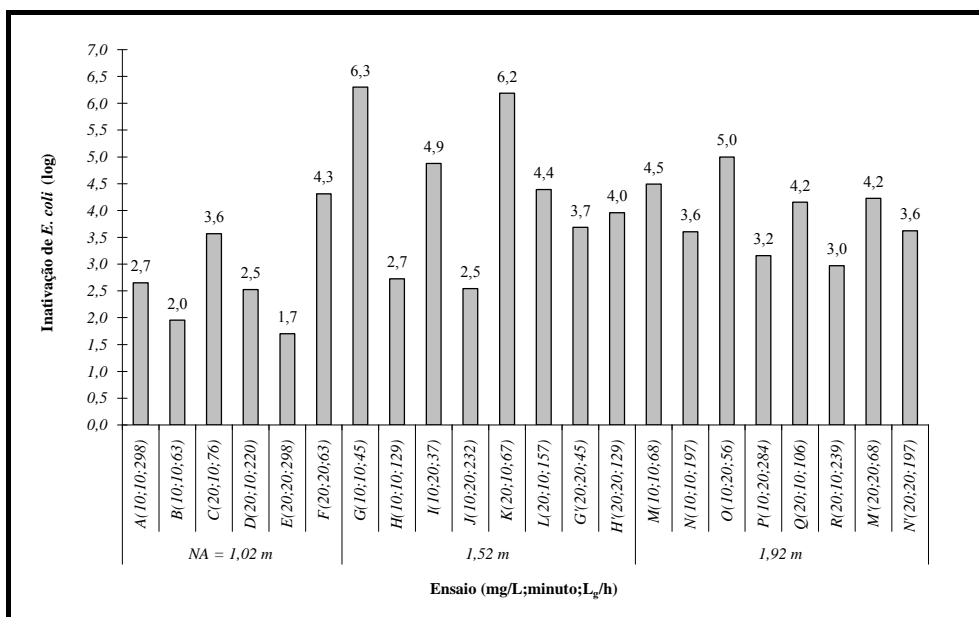


Figura 4 – Inativação de *E. coli*.

A interação entre a dosagem de ozônio aplicado e o tempo de contato foi verificada pelo método de planejamento fatorial 2^2 – dois fatores e dois níveis. Os ensaios escolhidos para tal estudo também foram o M, O, Q e M'.

Primeiro foi avaliada a influência do tempo de contato sobre a dosagem de ozônio aplicado. Mantendo a dosagem igual a 10 mg/L e passando o tempo de contato de 10 minutos para 20 minutos, a inativação de *E. coli* aumentou de 4,5 log para 5 log, correspondendo a uma variação positiva de 0,5 log. Mantendo-se a dosagem de ozônio igual a 20 mg/L e aumentando o tempo de contato de 10 minutos para 20 minutos, a inativação de *E. coli* se manteve constante.

A influência da dosagem de ozônio aplicado sobre o tempo de contato foi realizada mantendo-se este igual a 10 minutos e dobrando-se a dosagem de 10 mg/L para 20 mg/L. Assim, a inativação de *E. coli* caiu de 4,5 log para 4,2 log, um decréscimo de 0,3 log. Depois se manteve o tempo de contato igual a 20 minutos e variou-se a dosagem de 10 mg/L para 20 mg/L, o que resultou em decréscimo de 0,8 log na inativação de *E. coli*, que passou de 5 log para 4,2 log.

Os resultados de inativação de *E. coli* foram relacionados às velocidades e concentrações das bolhas de ozônio, conforme pode ser observado nas Figuras 5 e 6.

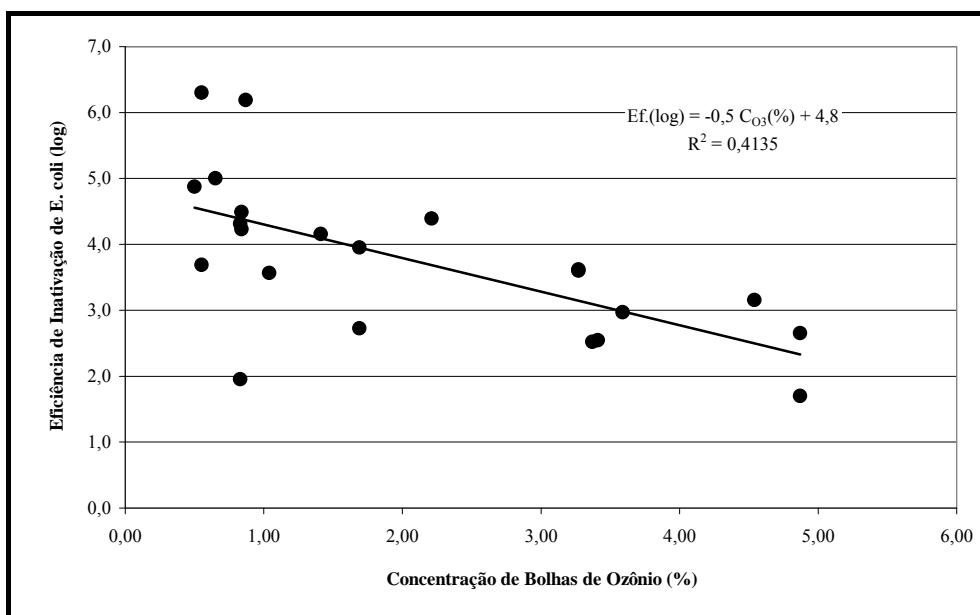


Figura 5: Relação entre eficiência de inativação de *E. coli* e concentração de bolhas de ozônio.

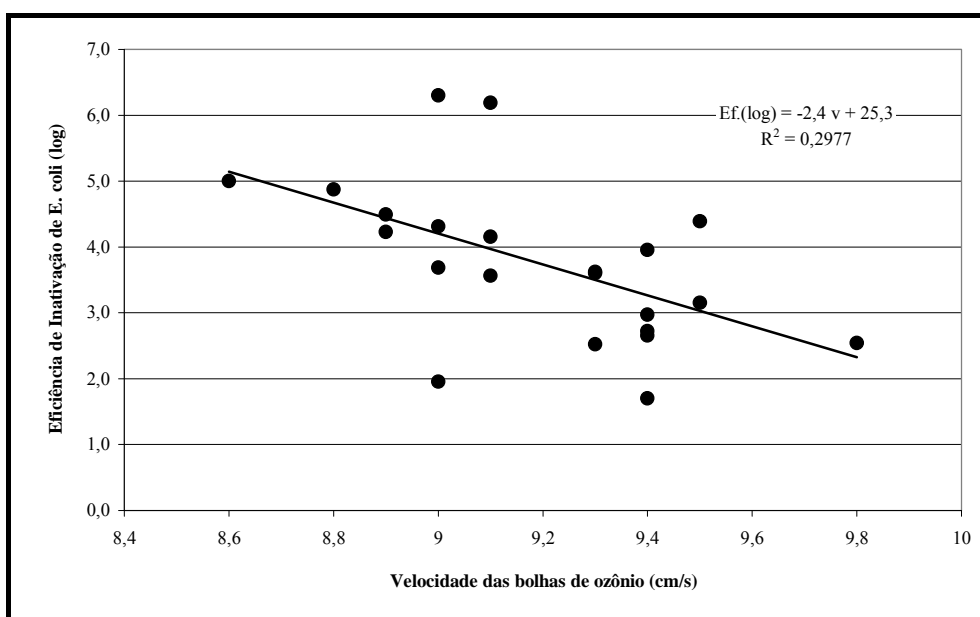


Figura 6: Relação entre eficiência de inativação de *E. coli* e velocidade média das bolhas de ozônio.

Os valores de inativação de *E. coli* apresentaram comportamento semelhante quando correlacionados aos valores medidos de concentração e velocidade das bolhas de ozônio: o aumento da velocidade ou concentração de bolhas tende a diminuir a eficiência de inativação de *E. coli* nas condições em que foram realizados os ensaios.

CONCLUSÕES

1. Os valores das características hidrodinâmicas das bolhas de ozônio (concentração e velocidade) foram proporcionais às vazões de ozônio aplicadas, nas condições operacionais em que foram realizados os ensaios desta pesquisa;
2. As concentrações de bolhas de ozônio calculadas ao longo da altura da coluna de ozonização foram consideradas constantes, independente da vazão aplicada de ozônio e do nível de água adotado;



3. As velocidades das bolhas de ozônio calculadas ao longo da coluna de ozonização apresentaram comportamento oscilante e com tendência de diminuir com o aumento da altura, devido a fenômenos de coalescência e ruptura/quebra de bolhas; e
4. A eficiência de inativação de *E. coli* tende a diminuir com o aumento da concentração e velocidade das bolhas de ozônio. Comportamento semelhante foi observado na relação entre concentração de ozônio consumido e concentração e velocidades de bolhas de ozônio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA, AWWA; WPCF (1998). Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 20th. Ed., American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington DC, USA.
2. SOARES, L. V. (2007). Ozonização de Esgoto Sanitário: Estudo da Hidrodinâmica, Transferência de Massa e Inativação de Microrganismos Indicadores. 259p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.