

## ESTUDO COMPARATIVO DE CONCENTRAÇÃO DE BOLHAS DE OZÔNIO EM COLUNAS COM SEÇÕES TRANSVERSAIS QUADRADA E CIRCULAR OBJETIVANDO OTIMIZAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE MASSA.

*Marcio Ricardo Salla<sup>1</sup>; Leonardo Vieira Soares<sup>2</sup>; José Eduardo Alamy Filho<sup>3</sup>; Luiz Antonio Daniel<sup>4</sup> & Harry Edmar Schulz<sup>5</sup>*

**RESUMO** --- A evolução da concentração de bolhas gasosas é uma importante ferramenta no estudo de transferência de massa gás-líquido. Neste estudo, duas colunas de ozonização com geometria e dimensões deferentes – uma com seção transversal circular com 10 cm de diâmetro e outra com seção quadrada de 19 cm de lado – foram utilizadas para determinar a evolução da concentração de bolhas de ozônio e tiveram seus resultados comparados. Para determinar estas concentrações, foi utilizada uma fonte de cézio-137 que emite radiação gama quantificada em forma de pulsos elétricos. Em ambas as colunas, foi observado que o aumento da vazão de ozônio aumenta a concentração de bolhas de ozônio, porém isso ocorreu com maior intensidade na coluna de seção circular devido à maior ocorrência de coalescência e à sua dimensão e geometria semelhantes a do difusor poroso.

**ABSTRACT** --- The evolution of the concentration of gaseous bubbles is an important tool in the study of mass transference gas-liquid. In this study, two deferential columns of ozonization with geometry and dimensions - one with circular section with 10 cm of diameter and another one with square shaped section of 19 cm of side - had been used to determine the evolution of the concentration of ozone bubbles and had its comparative results. To determine these concentrations, a cesium-137 source was used that emits radiation gamma quantified in form of electric pulses. In both the columns, it was observed that the increase of the ozone outflow increases the concentration of ozone bubbles, however this occurred with bigger intensity in the column with circular section due to bigger occurrence of coalescence and to its similar dimension and geometry of the porous diffuser.

**Palavras-chave:** Sonda de cézio-137, transferência de massa gás-líquido, ozonização.

- 1) Professor Doutor na FECIV da UFU, Av. João Naves de Ávila, 2121, bloco 1Y - 38400-902 - Uberlândia. E-mail: mrsalla@feciv.ufu.br
- 2) Doutorando no SHS da EESC/USP, Avenida Trabalhador São Carlense, 400, 13566-590 - São Carlos. E-mail: lvsoares@uol.com.br
- 3) Professor Doutor na FECIV da UFU, Av. João Naves de Ávila, 2121, bloco 1Y - 38400-902 - Uberlândia. E-mail: zealamy@feciv.ufu.br
- 4) Professor Doutor no SHS da EESC/USP, Avenida Trabalhador São Carlense, 400, 13566-590 - São Carlos. E-mail: ldaniel@sc.usp.br
- 5) Professor Titular no SHS da EESC/USP, Avenida Trabalhador São Carlense, 400, 13566-590 - São Carlos. E-mail: heschulz@sc.usp.br

## INTRODUÇÃO

Pesquisas realizadas no Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos com ozônio para 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. Assim, pesquisas coordenadas pelos professores Harry Edmar Schulz e Luiz Antonio Daniel estão sendo desenvolvidas com a finalidade de determinar características hidrodinâmicas das bolhas de ozônio - concentrações, diâmetros e velocidades - e relacioná-las aos resultados de ensaios de desinfecção de esgoto doméstico. Neste artigo, está apresentado um estudo que compara a evolução da concentração de bolhas de ozônio ao longo de duas colunas de ozonização com geometrias diferentes: uma com seção transversal circular e outra com seção transversal quadrada.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Colunas de ozonização

A coluna de ozonização de seção transversal quadrada usada neste estudo comparativo da concentração de bolhas de ozônio possui 0,19m de lado e 2,00m de altura, com 2 faces paralelas de acrílico e 2 faces paralelas de vidro, cuja espessura é de 15mm. Já a coluna de formato circular possui seção transversal de 0,10m de diâmetro interno e mesma altura de 2,00m, cuja espessura do acrílico é de 5mm.

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.

A parte superior de ambas as colunas possui uma tampa em acrílico com uma cavidade para saída do ozônio que não reagiu quimicamente com compostos orgânicos e organismos patogênicos do efluente doméstico. Visto que o ozônio é um gás tóxico ao ser humano, foi necessário realizar sua eliminação antes do lançamento na atmosfera. Tal eliminação foi alcançada com borbulhamento do ozônio em solução de iodeto de potássio, transformando-se em uma molécula de oxigênio e um átomo de oxigênio.

### Ozonizador

Para formação do ozônio, oxigênio puro entra em um reator e sofre uma descarga elétrica de alta tensão, fazendo com que uma molécula de oxigênio se junte com um átomo de oxigênio, formando o ozônio molecular. O ozonizador usado possibilita escolher a porcentagem desejada de produção de ozônio, depois de fixado o tempo de contato entre bolhas de ozônio e meio líquido e a vazão de ozônio aplicada. As disponibilidades de variações das porcentagens de produção de ozônio são: 20%, 40%, 60%, 80% e 100%.

O equipamento gerador de ozônio estava dimensionado para produzir  $7,0 \pm 0,7\text{gO}_3/\text{h}$ . Após realizado a calibração, o máximo que se conseguiu produzir, para este ozonizador, é aproximadamente  $3,0\text{gO}_3/\text{h}$ , na porcentagem de produção de ozônio máxima de 100% e vazão de ozônio aplicada de  $300\text{L/h}$  ( $5\text{L/min}$ ) em 5 minutos de contato entre as bolhas de ozônio e o meio líquido.

Antes de o ozônio formado difundir-se na coluna de ozonização, por meio das bolhas, o gás passa por um rotâmetro inoxidável, graduado de  $1\text{L/min}$  até  $5\text{L/min}$ , objetivando fixar a vazão desejada do gás na entrada da coluna.

### Sonda de céσιο-137

O estudo da evolução da concentração de bolhas ao longo da altura da coluna foi procedido através de sonda de céσιο-137, ligada a um contador de radiação.

O princípio do ensaio consiste em, através de uma sonda de céσιο-137, emitir radiação sobre o escoamento de bolhas ascensionais de ozônio dentro do meio líquido, atravessando pontualmente a seção transversal da coluna em direção a um tubo fotomultiplicador, que transforma esta radiação em pulsos elétricos. Estes pulsos elétricos são quantificados e transformados em números pelo aparelho analisador do tamanho do pulso. Enfim, estes valores obtidos são usados em equações matemáticas, apresentadas em seguida, para determinação da porcentagem pontual de bolhas de ozônio com relação ao meio líquido. A Figura 01 e 02, respectivamente, mostram “in loco” todos os equipamentos citados que integram o aparato experimental em experimento realizado na coluna circular e quadrada.

Os suportes da sonda de céσιο-137 mostrados na Figura 01 e 02 trabalham sob o princípio do equilíbrio de pesos, para facilitar o manuseio da sonda de céσιο-137 em toda a altura da coluna (frisa-se que o céσιο está encapsulado em um invólucro de chumbo, que confere ao conjunto um grande peso).

Para diagnosticar se o equipamento está emitindo valores coerentes, necessita-se, antes do início dos experimentos, calibrar o equipamento. Efetuam-se medidas extremas apenas com líquido e apenas com ozônio, anotando os valores medidos para a radiação. Caso os valores medidos na presença de bolhas de ozônio no meio líquido seja intermediária às duas anteriores, significa que o equipamento está bem alinhado.

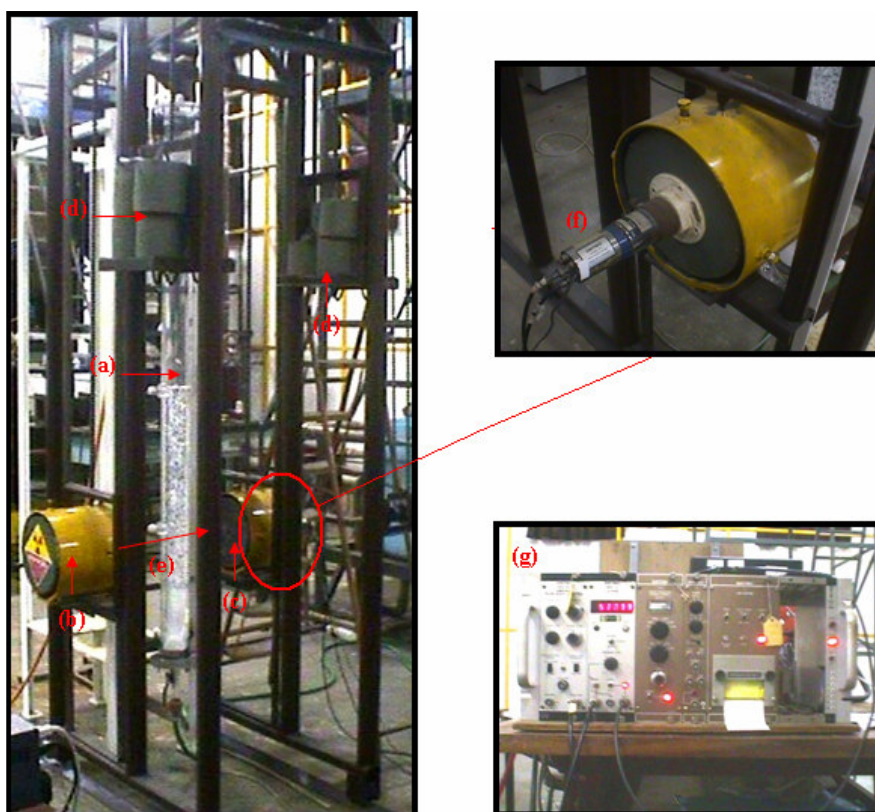


Figura 01 – Instalação experimental para ensaio com céσιο-137: (a) coluna de ozonização com seção transversal circular; (b) invólucro de chumbo que contém a fonte de céσιο-137 à montante da coluna (a cavidade no invólucro por onde é emitida a radiação tem 3mm de diâmetro); (c) invólucro de chumbo que recebe a radiação, à jusante da coluna e emite ao tubo fotomultiplicador; (d) pesos para equilibrar o suporte da sonda de céσιο-137; (e) sentido da emissão do céσιο-137; (f) tubo fotomultiplicador; (g) aparelho analisador.



Figura 02 – Instalação experimental para ensaio com cézio-137 na coluna de ozonização com seção transversal quadrada. Englobam os mesmos equipamentos descritos na Figura 01.

### Equacionamento do sistema de incidência de radiação do cézio-137 na determinação da concentração de bolha.

No equacionamento do sistema de incidência de radiação do cézio-137, são consideradas 4 variáveis as que influenciam na atenuação do feixe incidente, a saber:

- Espessura do material a ser atravessado,  $X$  (cm);
- Intensidade do feixe incidente,  $I$  ( $n^o$  fótons/ $m^2 \cdot seg$ );
- Densidade aparente do meio,  $\rho$  ( $g/cm^3$ );
- Coeficiente de atenuação de massa do absorvedor,  $\mu$  ( $cm^2/g$ ).

Esta aparelhagem da sonda de cézio-137 foi utilizada anteriormente por LIMA, A.C..M (2004), para determinar concentração de ar. Conseqüentemente, os ajustes feitos na aparelhagem serão aproveitados nesta oportunidade. LIMA, A.C..M (2004) e PIMENTEL, V.E. (1999) enfrentaram uma limitação no equipamento na realização de seus experimentos. Nesta época, necessitava-se deixar o aparelho ligado vários horas antes do começo dos ensaios (aproximadamente 5 horas), até o momento em que os valores de intensidade de radiação obtidos na saída de dados passassem a ter um nível de estabilidade. Na realização deste trabalho não houve a necessidade desta enorme espera, pois a contagem dos pulsos era transferida automaticamente para o micro, após serem emitidos pelo contador de pulsos. Foi desenvolvido um programa computacional em DELPHI que possibilita escolher qualquer intervalo de tempo para a contagem dos pulsos, além da escolha do número total de contagens. As contagens de pulsos foram armazenadas em um banco de dados.

O equacionamento do sistema apresentado abaixo foi extraído de (PIMENTEL, V.E. 1999).

A atenuação do feixe é dependente de 4 variáveis, como foi dito anteriormente. Admitindo um feixe incidente em uma coluna cheia de água, resulta:

$$I_1 = I_0 \cdot e^{-[\mu_w \cdot \rho_w \cdot X_w + \mu_{acrílico} \cdot \rho_{acrílico} \cdot X_{acrílico}]} \quad (1)$$

Sendo:

$I_1$  = contagem de absorção da radiação gama apenas com água, ou seja, sem ar;

$\mu_w$  = coeficiente de atenuação da água (valor teórico =  $0,0857 \text{ cm}^2/g$ );

$\rho_w$  = densidade aparente da água,  $\rho$  ( $g/cm^3$ );

$X_w$  = espessura de ocupação da água, cm;

$\mu_{acrílico}$  = coeficiente de atenuação do acrílico;

$\rho_{acrílico}$  = densidade aparente do acrílico;

$X_{acrílico}$  = espessura de ocupação do acrílico.

Já que os valores de  $\mu_{acrílico}$ ,  $\rho_{acrílico}$  e  $X_{acrílico}$  são constantes, pode-se considerar  $G = \mu_{acrílico} \cdot \rho_{acrílico} \cdot X_{acrílico}$ . Voltando em (1):

$$I_1 = I_o \cdot e^{-[\mu_w \cdot \rho_w \cdot X_w + G]} \quad (2)$$

Admitindo-se agora a mesma coluna sendo ozonizada. Neste caso, obtêm-se uma nova equação:

$$I_2 = I_o \cdot e^{-[\mu_w \cdot \rho_w \cdot X_w + \mu_{acrílico} \cdot \rho_{acrílico} \cdot X_{acrílico} + \mu_{ar} \cdot \rho_{ar} \cdot X_{ar}]} \quad (3)$$

Sendo:

$I_2$  = contagem de absorção da radiação gama com água+ar (escoamento aerado);

$\mu_{ar}$  = coeficiente de atenuação do ar;

$\rho_{ar}$  = densidade aparente do ar;

$X_{ar}$  = espessura de ocupação do ar.

Considerando que a absorção do feixe incidente pelo ar seja desprezível, têm-se:

$$\mu_{ar} \cdot \rho_{ar} \cdot X_{ar} \approx 0 \quad (4)$$

Sabe-se que a coluna possui uma seção útil de:

$$X_w + X_{ar} = 19 \text{ cm}$$

$$X_w = 19 - X_{ar} \quad (5)$$

Substituindo as equações (4) e (5) na equação (3), resulta em:

$$I_2 = I_o \cdot e^{-[\mu_w \cdot \rho_w \cdot (19 - X_{ar}) + G]} \quad (6)$$

Desenvolvendo a equação (6) fica:

$$I_2 = I_o \cdot e^{-[\mu_w \cdot \rho_w \cdot 19 - \mu_w \cdot \rho_w \cdot X_{ar} + G]}$$

ou,

$$I_2 = I_o \cdot e^{-[\mu_w \cdot \rho_w \cdot 19 + G]} \cdot e^{[\mu_w \cdot \rho_w \cdot X_{ar}]} \quad (7)$$

Substituindo a equação (2) na equação (7), fica:

$$I_2 = I_1 \cdot e^{[\mu_w \cdot \rho_w \cdot X_{ar}]}$$

$$\ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right) = \mu_w \cdot \rho_w \cdot X_{ar}$$

$$X_{ar} = \frac{1}{\mu_w \cdot \rho_w} \cdot \ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right) \quad (8)$$

Onde:

$X_{ar}$  = espaço ocupado pelo ar no eixo de incidência de radiação.

Agora, tendo a concentração de ar ( $C_{ar}$ ) como a relação entre volume de ar ( $V_{ar}$ ) e volume de mistura água-ar ( $V_w + V_{ar}$ ), fica:

$$C_{ar} = V_{ar} / (V_{ar} + V_w) \quad (9)$$

Se A for a área do feixe incidente, então os volumes de ar e água atingidos pelo feixe de radiação podem ser escritos como:

$$V_{ar} = X_{ar} \cdot A \quad (10)$$

$$V_w = X_w \cdot A \quad (11)$$

Agora, substituindo as equações (10) e (11) em (9), fica:

$$C_{ar} = X_{ar} \cdot A / (X_{ar} \cdot A + X_w \cdot A)$$

$$C_{ar} = X_{ar} \cdot A / (X_{ar} + X_w) \cdot A$$

$$C_{ar} = X_{ar} / (X_{ar} + X_w)$$

Sabendo que  $X_w + X_{ar} = 19$  cm, pode-se determinar a equação para concentração de ar no escoamento aerado como:

$$C_{ar} = \frac{X_{ar}}{19} \quad (12)$$

É importante observar que em todo o equacionamento do sistema de incidência de radiação do cézio-137 na determinação da concentração de bolhas, utilizaram-se o ar como gás borbulhante. É válida a utilização do ar, ao invés do ozônio, no equacionamento da determinação da concentração de bolhas, uma vez que os 20% de produção de ozônio utilizados na realização dos experimentos com a sonda de cézio-137 acarretam em uma produção muito baixa de gás ozônio.

Vale ressaltar que o termo “concentração de bolhas ascensionais de ozônio ( $C_{O_3}$ , %)” 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)”.

### Metodologia dos ensaios com sonda de cézio-137

Os ensaios com a sonda de cézio-137 foram realizados no Laboratório de Hidráulica Ambiental do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA) da EESC/USP.

O líquido utilizado para efetuar os experimentos com a sonda de cézio-137 foi água de abastecimento do laboratório.

Como pode ser visto na Figura 03, em ambas as colunas de ozonização a sonda de cézio-137 foi colocada em 4 alturas diferentes: 0,15m (Ponto 1), 0,55m (Ponto 2), 0,95m (Ponto 3) e 1,45m (Ponto 4). Em todas as alturas, a radiação de cézio-137 sempre foi emitida no ponto central da coluna (0,95m da extremidade interna para a seção transversal quadrada e 0,05m da extremidade interna para a seção transversal circular).

Foram estudados 3 níveis diferentes de água dentro da coluna: 1,00m, 1,50m e 1,90m. No nível de água de 1,00m a sonda foi posicionada nos pontos 1, 2 e 3. Já para os níveis de água de 1,50m e 1,80m a sonda foi posicionada nos pontos 1, 2, 3 e 4. Para cada conjunto de interesse nível de água/ponto estudou-se diversas vazões diferentes dentro do intervalo de 37 L/h até 300 L/h.

Na realização dos experimentos com a sonda de cézio-137, o conjunto gerador de ozônio fixou-se na posição de 20% de produção de ozônio gasoso. Optou-se por essa porcentagem pois em porcentagens maiores houve baixa transferência de ozônio na água, saturando rapidamente o iodeto de potássio contido nos frascos lavadores de ozônio. Visto que o ozonizador chegava a trabalhar 12 horas por dia, em porcentagens altas de produção de ozônio precisaria de grande quantidade de iodeto de potássio 2% (KI), inviabilizando o experimento. Caso os experimentos fossem realizados com esgoto domiciliar, viabilizar-se-ia trabalhar com 100% de produção de ozônio, já que as reações químicas ocorridas entre ozônio, matérias orgânicas e microorganismos contidos no esgoto fariam com que o ozônio fosse consumido rapidamente, diminuindo significativamente a concentração do gás disposto nos frascos lavadores.

Pontualmente, a sequência de procedimentos na obtenção das contagens de pulsos, em ambas as colunas de ozonização, foram efetuadas da seguinte maneira:

- Fixava-se a sonda de cézio-137 no ponto de interesse e no nível de água de interesse ;
- Depois de fixada a sonda, enchia-se a coluna de ozonização com água até o nível desejado;
- Enchia-se os frascos lavadores de gás com uma solução de iodeto de potássio 2%;
- Antes de iniciar o borbulhamento de ozônio, programou-se, em DELPHI, a obtenção de 20 contagens de pulsos (20 segundos para cada contagem). Efetuava-se a contagem de

pulsos para a coluna de ozonização cheia de água, obtendo-se os valores de intensidade radioativa  $I_1$  aplicados no equacionamento anteriormente descrito;

- Terminada a contagem de pulsos para a coluna de ozonização cheia de água, programou-se, também em DELPHI, a obtenção de 20 contagens de pulsos (20 segundos para cada contagem) para cada vazão de ozônio aplicada dentro da coluna de ozonização, obtendo-se os valores de intensidade radioativa  $I_2$  aplicados no equacionamento anteriormente descrito;
- Terminada a obtenção das contagens de pulsos para este ponto específico, a sonda era posicionada em outro ponto;
- Depois que a sonda era posicionada em outro ponto, trocava-se a água dentro da coluna e repetia-se novamente todo o processo de obtenção de contagem de pulsos.

Terminada a obtenção de todas as contagens de pulsos, foi determinada a média aritmética para cada sequência de 20 contagens de pulsos.

Para um mesmo ponto, o valor médio obtido das contagens de pulsos para a coluna cheia de água e sem ozonização ( $I_1$ ) e o valor médio das contagens de pulsos para a coluna cheia de água sendo ozonizada ( $I_2$ ) eram substituídos na equação padronizada para determinação da concentração de bolha, descrita acima.

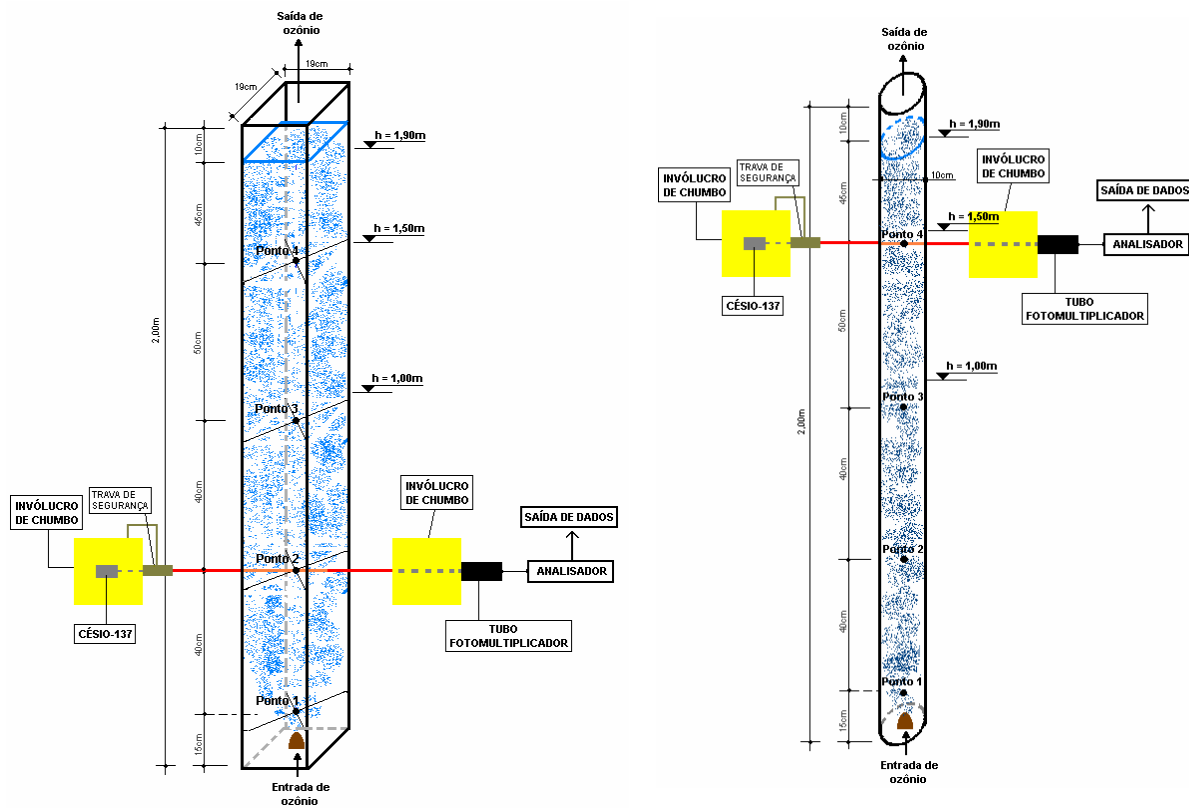


Figura 03 - Perfis das colunas de ozonização com seção quadrada e circular definidos nos ensaio com a sonda de césio-137.

## RESULTADOS

Conforme dito anteriormente, para ambas as colunas de ozonização (de seção transversal quadrada e circular), estudou-se a porcentagem da concentração de bolhas de ozônio em 3 níveis de água diferentes: 1,00m, 1,50m e 1,90m.

Foram feitas comparações entre os dois tipos de colunas, das seguintes maneiras: para um nível de água fixo, traçou-se gráficos de vazão em função da porcentagem de concentração de bolhas para todos os pontos estudados; ainda para um nível de água fixo, traçou-se gráficos dos pontos estudados em função da porcentagem de concentração de bolha para todas as vazões estudadas.

Visto que os trabalhos de determinação da concentração de bolhas nos dois tipos de colunas foram realizados separadamente, sem intenção a priori de realizar este estudo comparativo, as vazões estudadas foram distintas, mas manteve-se dentro do intervalo de 37 L/h até 300 L/h.

As figuras 04, 05 e 06 mostram os estudos comparativos dos dois tipos de colunas mantendo-se o nível de água em 1,00m, 1,50m e 1,90m, respectivamente, sendo vazão de ozônio (abscissa) em função da porcentagem de concentração de bolhas de ozônio (ordenada) em todos os pontos de fixação da sonda de cézio-137. Para todos os níveis de água alcançou-se o mesmo comportamento das linhas de tendência.

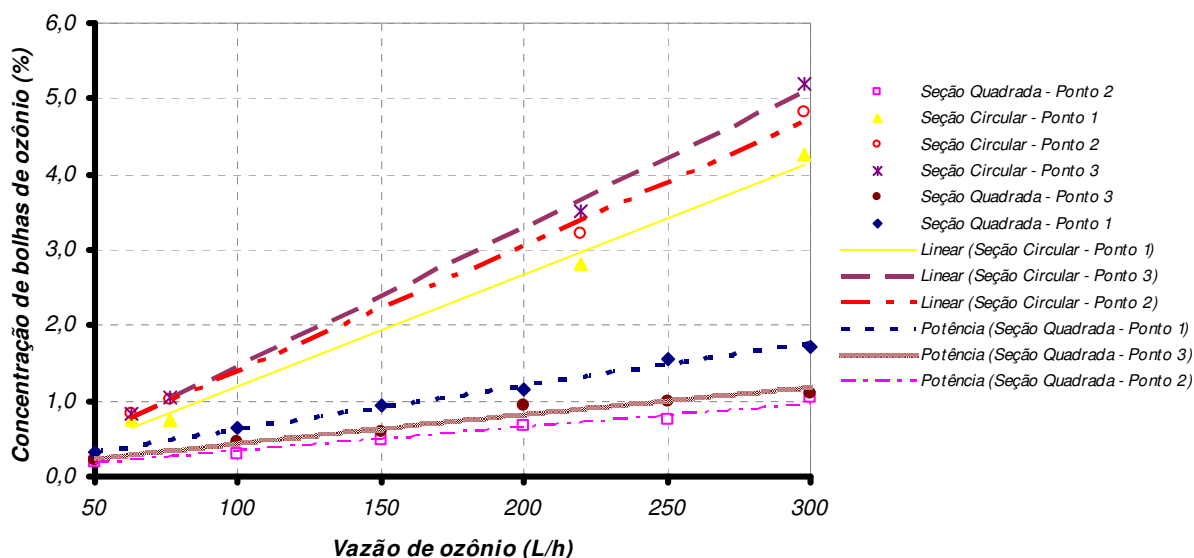


Figura 04 – Estudo comparativo dos dois tipos de colunas mantendo-se o nível de água em 1,00m, sendo vazão de ozônio em função da porcentagem de concentração de bolhas de ozônio para todos os pontos de fixação da sonda de cézio-137.



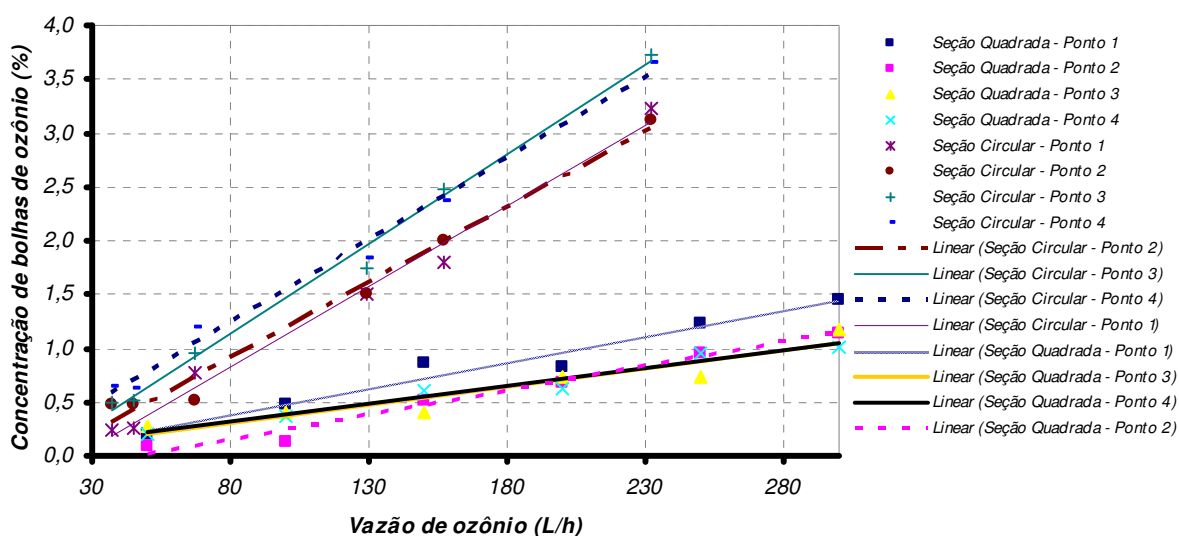


Figura 05 – Estudo comparativo dos dois tipos de colunas mantendo-se o nível de água em 1,50m, sendo vazão de ozônio em função da porcentagem de concentração de bolhas de ozônio para todos os pontos de fixação da sonda de césio-137.

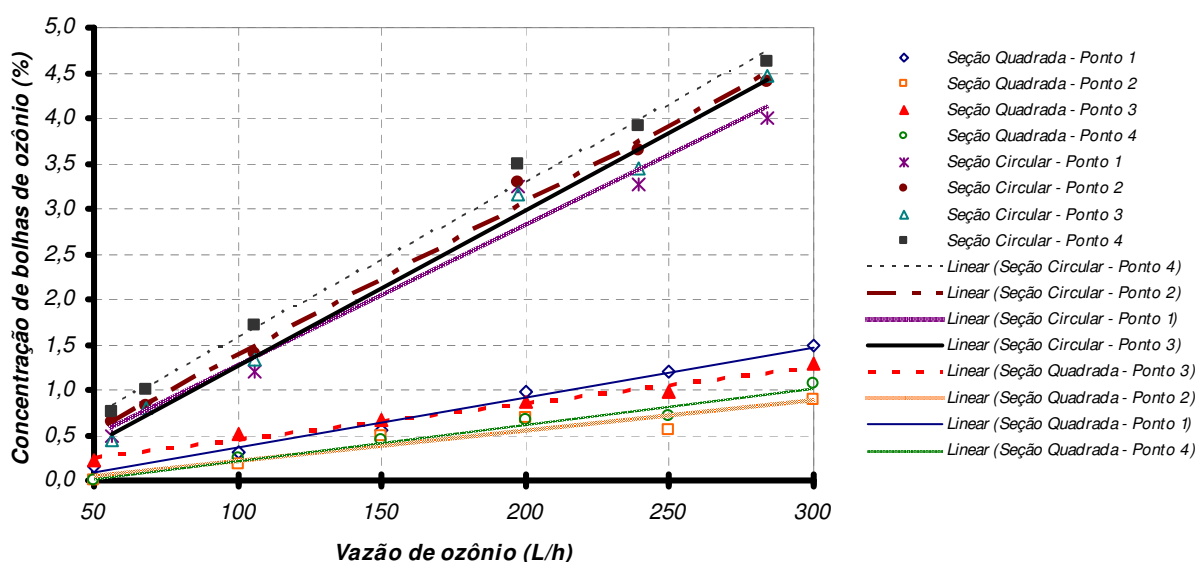


Figura 06 – Estudo comparativo dos dois tipos de colunas mantendo-se o nível de água em 1,90m, sendo vazão de ozônio em função da porcentagem de concentração de bolhas de ozônio para todos os pontos de fixação da sonda de césio-137.

Para todos os níveis de água estudados (figuras 04, 05 e 06), os estudos isolados na seção transversal circular mostram que a porcentagem da concentração de bolhas aumenta com o aumento da vazão de ozônio. Tal constatação também foi observada nos estudos na seção transversal quadrada, mas com intensidade de aumento bem inferior. Esta discrepância de intensidade entre as duas seções transversais (para mesma vazão) é ocasionada pela diferença geométrica das duas seções transversais associado ao tipo de difusor microporoso utilizado para borbulhamento. Na coluna de seção transversal circular de diâmetro interno 10cm, o difusor microporoso de formato cônico com diâmetro da base de 75cm ocupou quase toda a base interna da coluna. Na coluna de seção transversal quadrada de lado 19cm, o mesmo tipo de difusor posicionando no centro da base interna da coluna, proporcionou uma folga de 5,75cm entre as

extremidades da parede e do difusor. Como nesta comparação, a quantidade de bolhas borbulhadas é a mesma (mesmo nível de água e mesma vazão), tal diferença de porcentagem de concentração está relacionada às diferenças geométricas. Enquanto que na coluna de seção quadrada, as bolhas se espalham mais transversalmente, ocasionando baixa coalescência e consequentemente menor porcentagem de concentração, na coluna de seção circular as bolhas não se espalham, aumentando as coalescências e consequentemente maior será a porcentagem de concentração das bolhas.

As figuras 07, 08 e 09 mostram os estudos comparativos dos dois tipos de colunas mantendo-se o nível de água em 1,00m, 1,50m e 1,90m, respectivamente, sendo altura de fixação da sonda de césio-137 (abscissa) em função da porcentagem de concentração de bolhas de ozônio (ordenada) para todas as vazões estudadas. Para todos os níveis de água alcançou-se o mesmo comportamento das linhas de tendência.

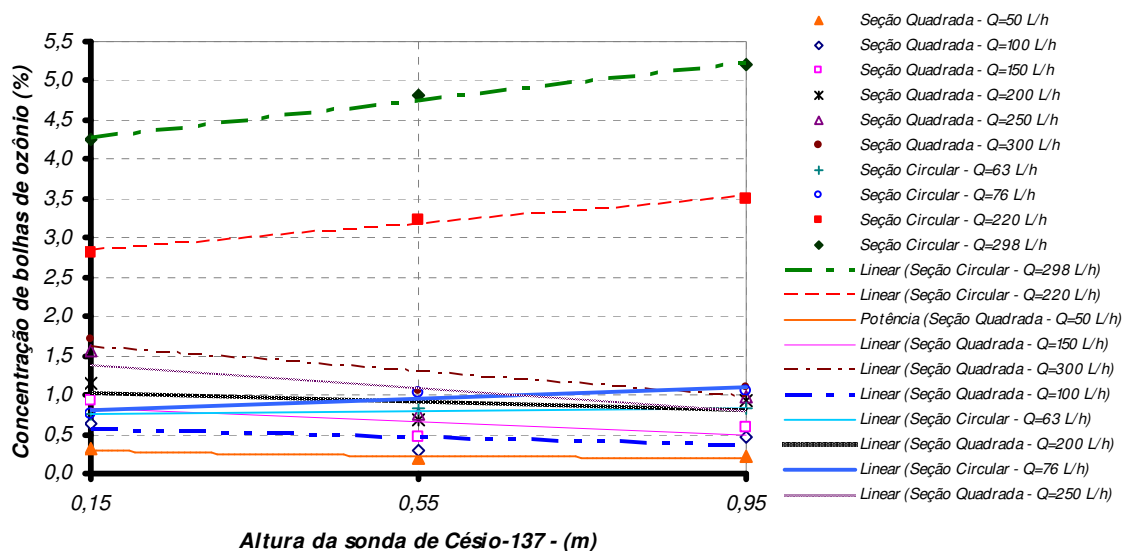


Figura 07 – Estudo comparativo dos dois tipos de colunas mantendo-se o nível de água em 1,00m, sendo altura de fixação da sonda de césio-137 em função da porcentagem de concentração de bolhas de ozônio para todas as vazões estudadas.

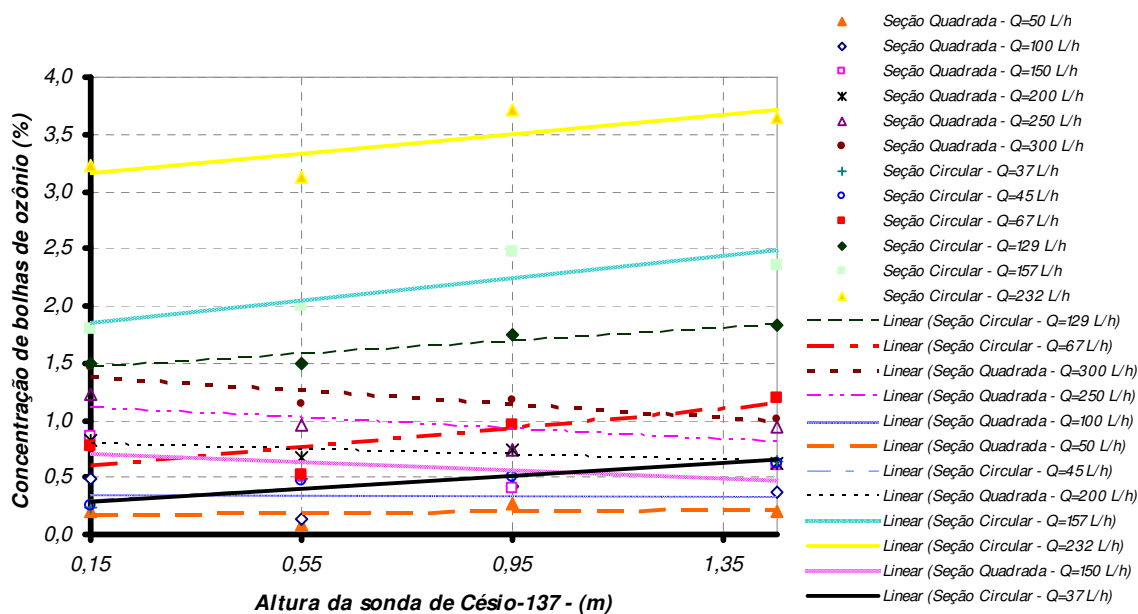


Figura 08 – Estudo comparativo dos dois tipos de colunas mantendo-se o nível de água em 1,50m, sendo altura de fixação da sonda de césio-137 em função da porcentagem de concentração de bolhas de ozônio para todas as vazões estudadas.

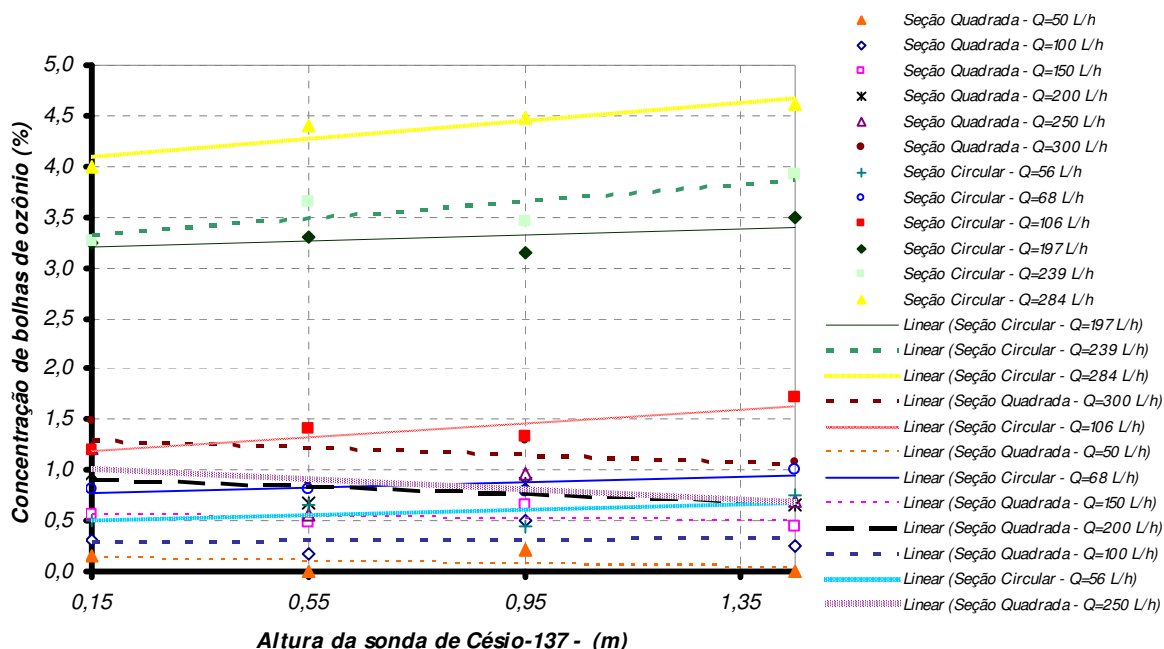


Figura 09 – Estudo comparativo dos dois tipos de colunas mantendo-se o nível de água em 1,90m, sendo altura de fixação da sonda de césio-137 em função da porcentagem de concentração de bolhas de ozônio para todas as vazões estudadas.

Para todos os níveis de água estudados (Figuras 07, 08 e 09), analisando agora a influência da pressão da coluna de água sobre a distribuição das bolhas é possível constatar que, para uma mesma vazão, tal influência está mais evidenciada na coluna de seção transversal quadrada para altas vazões (250 L/h e 300 L/h), onde a porcentagem de concentração das bolhas é maior no ponto 1 ( $h=0,15\text{m}$  - próximo ao difusor microporoso) do que no ponto 4 ( $h=1,45\text{m}$ ). Já na coluna de seção transversal circular, tal ocorrência não foi observada para nenhuma vazão.

Essa diferença no comportamento está relacionada às características geométricas. Na coluna de seção transversal quadrada, quando as bolhas saem do difusor e encontram o Ponto 1 ( $0,15\text{m}$  da base interna), ainda estão concentradas e sofrem altas coalescências nesta região central, proporcionando concentração máxima das bolhas. Essas mesmas bolhas, quando encontram ascensionalmente o Ponto 4 ( $1,45\text{m}$  da base interna), em virtude da possibilidade de espelhamento das bolhas até as extremidades, diminui a concentração das bolhas na região central da coluna. Esse comportamento não ocorre na coluna de seção transversal circular, visto que, como já foi dito anteriormente, as bolhas não se espalham logo que sai do difusor devido aos diâmetros da seção transversal da coluna ( $10\text{cm}$ ) ser muito próximo do diâmetro da base do difusor microporoso de formato cônico ( $7,5\text{cm}$ ).

## CONCLUSÕES

Depois de realizados todos os estudos comparativos entre colunas de ozonização com seções transversais quadrada e circular, com relação à porcentagem da concentração de bolhas de ozônio com relação ao meio líquido, possibilitou-se concluir que:

- Como já era de se esperar, independente da coluna estudada e do nível de água, a porcentagem de concentração das bolhas aumenta com o aumento da vazão de ozônio;
- A coluna de seção transversal circular mostrou-se mais eficiente do que a de seção transversal quadrada, pois em quaisquer situações, apresentou maior porcentagem de concentração

de bolhas. Como já dito anteriormente, tal constatação está relacionada às dimensões do difusor microporoso utilizado;

▪ Também, a coluna de seção transversal circular elimina as “zonas mortas” existentes nas colunas de seção transversal quadrada (junto aos vértices), otimizando o processo de transferência de massa ar-água.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, pelas reservas técnicas e bolsas de estudo concedidas aos dois primeiros autores. Agradecem também ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos/USP por toda a estrutura colocada a disposição no desenvolvimento deste trabalho.

O autor principal agradece à Faculdade de Engenharia Civil-FECIV da Universidade Federal de Uberlândia-UFU que viabilizou a publicação deste artigo.

## BIBLIOGRAFIA

a) Artigo em anais de congresso ou simpósio

PIMENTEL, V.E. (1999). *Medida de velocidade de escoamentos aerados por meio de tubos de pitot*. Simpósio de Iniciação Científica. São Paulo. Universidade de São Paulo.

b) Artigo em revista

LE SAUZE, N.; LAPLANCHE, A.; MARTIN, N.; MARTIN, G. (1993). *Modelling of ozone transfer in a bubble column*. Water Research. v.(27), n° 6, p. 1071-1083.

ZHOU, H.; SMITH, D.W.; STANLEY, S.J.(1994). *Modeling of dissolved ozone concentration profiles in bubble columns*. Journal of Environmental Engineering. v.(120), n° 4, p. 821-840, July/August.

c) Dissertação

SALLA, M. R. (2002). *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.

d) Tese

SALLA, M. R. (2006). *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.

BARBOSA, A.A. (1998). *Correntes de densidade em reservatórios*. São Carlos. 272 p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

LIMA, A.C.M. (2003). *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.