

# DESINFECÇÃO DE EFLUENTES SANITÁRIOS ATRAVÉS DE DIÓXIDO DE CLORO

## DISINFECTION OF DOMESTIC WASTEWATER USING CHLORINE DIOXIDE

*FLÁVIO RUBENS LAPOLLI*

Engenheiro Civil e Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Especialista em Engenharia Sanitária e Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo (USP, São Carlos) com Doutorado Sanduíche na Université de Montpellier II (França). Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

*MARIA ELIZA NAGEL HASSEMER*

Engenheira Sanitarista, Mestre em Engenharia Ambiental e Doutoranda em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

*JEFFERSON GREYCO CAMARGO*

Químico Industrial pela Universidade Metodista de Piracicaba. Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

*DIEDRE LAUFFER DAMÁSIO*

Engenheira Sanitarista pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

*MARÍA ÁNGELES LOBO-RECIO*

Graduada, Mestre e Doutora em Química pela Universidade Complutense de Madrid - Espanha. Pós-Doutorado em Química pela Université de Montpellier II - França. Pesquisadora do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Recebido: 27/12/04 Aceito: 25/05/05

### RESUMO

A desinfecção dos esgotos deve ser considerada quando se pretende reduzir os riscos de transmissão de doenças infecto-contagiosas. Nesse sentido, os requisitos de qualidade de uma água devem ser avaliados em função dos usos previstos para a mesma. O dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) possui excelentes propriedades bactericidas, virucidas, esporocidas e algicidas e, devido a isso, é usado como desinfetante de água de abastecimento e efluente doméstico, bem como inibidor de crescimento de algas. O objetivo do trabalho foi estudar a melhor dosagem para uma boa desinfecção de efluentes sanitários previamente tratados mediante lodos ativados por aeração prolongada, avaliar a inativação de coliformes e o residual de dióxido de cloro remanescente. Foram realizados ensaios para diferentes dosagens de dióxido de cloro e diferentes tempos de contato. Os resultados obtidos mostraram que a dosagem mais indicada para desinfecção do efluente estudado foi 2,0 mg  $\text{ClO}_2$ /L com um tempo de contato de 20 minutos, condições sob as quais é atingido 100% de remoção de coliformes fecais e oxidada parcialmente a matéria orgânica remanescente, em tanto que os valores de pH e residual de  $\text{ClO}_2$  do efluente mantêm-se dentro dos admitidos pelas normativas brasileira e estadunidense em vigor. O estudo econômico levado a cabo permitiu concluir que a desinfecção de efluente doméstico mediante dióxido de cloro pode ser economicamente viável.

**PALAVRAS-CHAVE:** Desinfecção, dióxido de cloro, efluentes sanitários, residual de dióxido de cloro.

### ABSTRACTS

*Disinfection of sewage must be considered when reduction of infect-contagious disease transmission risks is intended. Thus, water quality requirements have to be evaluated in function of its predetermined uses. Chlorine dioxide ( $\text{ClO}_2$ ) has excellent bactericide, virucide, sporicide and algacide properties and, by these reasons, it is used as a disinfectant for drinking water and municipal sewage and as an algal growing inhibitor. The objective of this work was to investigate the most adequate  $\text{ClO}_2$  doses for an adequate disinfection of municipal sewage previously treated by an activate sludge with extended aeration process, evaluating the fecal coliform inactivation and the remaining residual chlorine dioxide. Essays were carried out for different  $\text{ClO}_2$  doses and different contact times. The results showed that the most adequate dose for sewage disinfection was 2,0 mg  $\text{ClO}_2$ /L in 20 min of contact time. Under this condition, 100% coliform removal is attained, the remaining organic matter is partially oxidized and pH and residual  $\text{ClO}_2$  values of effluent are maintained in the range determined by the Brazilian and USA regulations. It was concluded, from the economical study carried out, that disinfection of municipal sewage using chlorine dioxide is economically viable.*

**KEYWORDS:** Disinfection, chlorine dioxide, municipal sewage, residual chlorine dioxide.

## INTRODUÇÃO

O interesse na desinfecção dos efluentes sanitários é cada vez maior dada a crescente deterioração das fontes de abastecimento de água para uso humano. O objetivo principal da desinfecção é destruir os microorganismos enteropatógenicos, que podem estar presentes no efluente tratado, para tornar segura a água receptora de uso posterior. O risco de contaminação está relacionado ao fato que os esgotos contêm uma série de organismos patogênicos que são excretados juntamente com as fezes de indivíduos infectados. Nem sempre os processos convencionais de tratamento de esgotos são suficientes para a remoção de microorganismos patogênicos. Nesse sentido, a desinfecção dos esgotos deve ser considerada a fim de se reduzir os riscos de propagação de doenças infecciosas, quando é provável que ocorra o contato humano com águas contaminadas.

Na maioria das estações de tratamento de esgotos sanitários do Brasil inexistem processos de desinfecção e, quando existem, dá-se comumente, por meio de cloração do efluente produzido no tratamento secundário. Durante as décadas recentes, o cloro tem sido o desinfetante mais largamente utilizado no mundo todo, apresentando-se, a partir de então, uma grande melhoria na saúde da população mundial. Contudo, foi descoberto que a interação do cloro com a matéria orgânica natural do meio produz subprodutos da desinfecção, entre eles os trihalometanos (THMs), presumidos como carcinogênicos (Baird, 2001). Este problema estimulou a procura por um desinfetante alternativo, passando-se a investigar o dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ), o ozônio e a radiação ultravioleta entre outros.

O dióxido de cloro foi estudado como um dos substitutos do cloro por ser um desinfetante de ação rápida, igual ou superior ao cloro na inativação de bactérias e vírus, sendo mais efetivo na destruição de cistos de protozoários patogênicos. Ao contrário do cloro, as propriedades oxidantes e desinfetantes do dióxido de cloro permanecem praticamente inalteradas em uma grande faixa de pH (de 4 a 10). Segundo Caffaro (2004), a dosagem de dióxido de cloro requerida para a remoção de 90% de bactérias do grupo coliforme em efluentes sanitários é baixa, estando compreendida numa faixa de 1,5 a 3 mg/L.

O dióxido de cloro foi descoberto por Sir Humphrey Davy em 1811, acidificando clorato de potássio com áci-

do sulfúrico e assim produzindo o gás (Ribeiro, 2000). O dióxido de cloro, à temperatura ambiente, é um gás verde-amarelado e parece-se com o cloro na aparência e no odor. No estado gasoso, é altamente instável e pode tornar-se explosivo se sua concentração no ar for superior a 10% em volume. Porém, ao contrário do cloro, o  $\text{ClO}_2$  não sofre hidrólise em contato com água, permanecendo estável na solução como gás dissolvido sob condições de temperatura inferior a 25°C e ambiente preservado da luz. (Junli et al, 1997). Se estas condições não forem obedecidas haverá uma aceleração na decomposição do mesmo, formando clorito e clorato (Caffaro, 2002). O dióxido de cloro é altamente solúvel em água, até mesmo, mais que o cloro e o ozônio. Como o dióxido de cloro é um gás relativamente instável, ele não pode ser comprimido ou liquefeito e deve, assim, ser gerado *in situ* e dissolvido em água. Existem muitos processos de produção de dióxido de cloro para aplicação em escala real; em resumo, pode ser obtido por oxidação do clorito ou por redução do clorato.

Segundo Chernicharo et al (2001), a característica química mais destacada do dióxido de cloro é a sua capacidade de oxidar outras substâncias através de um mecanismo de transferência de um único elétron, onde o  $\text{ClO}_2$  é reduzido a clorito ( $\text{ClO}_2^-$ ) sem produção de hipoclorito ou cloro gasoso. Por não produzir cloro nem hipoclorito quando oxida matéria orgânica, e por oxidar os precursores dos trihalometanos, o dióxido de cloro apresenta reduzida formação de subprodutos organoclorados. Além disso, não reage com amônia, fato que evita a formação de cloraminas potencialmente tóxicas. No entanto, cloro e clorato, potencialmente nocivos à saúde humana e suspeitos de produzir anemia hemofílica e outros efeitos, são apontados como subprodutos da reação de obtenção de  $\text{ClO}_2$ , embora em concentrações muito baixas (praticamente ausência de  $\text{Cl}_2$  e menos que 5% de  $\text{ClO}_3^-$ ) se o sistema gerador de  $\text{ClO}_2$  é operado nas condições adequadas. As quantidades de haletos orgânicos absorvíveis e totais encontradas em águas tratadas com  $\text{ClO}_2$  são mínimas, entre 1% e 25% das encontradas em águas tratadas com cloro (Caffaro, 1997). Estudos toxicológicos demonstram que as dosagens de dióxido de cloro usadas no tratamento de águas não apresentam risco para a saúde humana (Zavaletta, 1992).

Os fatores mais importantes que influenciam a desinfecção da água são:

natureza e concentração do agente desinfetante, tempo de contato, temperatura, número e tipo de microorganismos presentes e qualidade da água a ser desinfetada. Pode-se dizer que quanto maior a concentração do desinfetante e o tempo de contato e menores o número de microorganismos e o teor de sólidos suspensos na água, mais efetiva será a desinfecção. A avaliação da eficiência da desinfecção geralmente é baseada no fator CT (concentração x tempo), ou seja, a concentração (C, em mg/L) do residual de dióxido de cloro e o tempo de contato (T, em min) necessários para a inativação da espécie selecionada (Bassani, 2003).

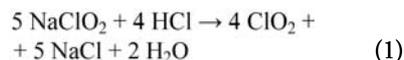
Através do fator CT, em relação a um microorganismo selecionado, é possível comparar a eficiência de remoção via dióxido de cloro com a eficiência via outros desinfetantes. Quanto mais baixo for o fator CT, maior será a ação do desinfetante. Dessa forma é evidente que, quanto mais alto o valor CT, mais resistente é o microorganismo em questão. Na Tabela 1, os valores do fator CT estão relacionados com a eficácia de alguns desinfetantes na inativação de 99% dos microorganismos.

O objetivo do presente trabalho é estudar a desinfecção mediante dióxido de cloro de esgoto sanitário previamente tratado em sistema de lodos ativados de aeração prolongada, visando a determinação da dosagem e do tempo de contato mínimos que levam ao grau de desinfecção necessário requerido pelas normativas. O estudo foi efetuado em planta piloto como uma primeira etapa prévia à implementação de um sistema de desinfecção a escala de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). Foi também efetuado um estudo econômico sobre os custos de implementação e operação do processo em nível de ETE ao objeto de determinar sua viabilidade econômica. O trabalho foi iniciado dentro das pesquisas correspondentes ao Programa de Pesquisa em Saneamento Básico – PROSAB 3 (Gonçalves et al, 2003).

## METODOLOGIA

Para o estudo da desinfecção de esgoto tratado por dióxido de cloro foram instalados dois sistemas piloto junto à Estação de Tratamento de Esgotos Insular da CASAN (Companhia Catarinense de Águas e Saneamento) – Florianópolis, SC, que atende 150.000 habitantes. Como afluente para os estudos de desinfecção foi usado o efluente proveniente do sistema de lodos ativados por aeração prolongada desta ETE.

A produção de dióxido de cloro foi feita *in situ*, através de gerador da marca BI-O-CHLOR, modelo BOC PLUS 10000, com capacidade produtiva de 12 a 120 g ClO<sub>2</sub>/h. A reação química foi feita em ambiente controlado, a partir dos reagentes químicos clorito de sódio (NaClO<sub>2</sub>, 25% m/m, densidade 1,22 kg/L) e ácido clorídrico (HCl, 33% m/m, densidade 1,16 kg/L), bem como água de arraste para evitar a formação de ClO<sub>2</sub> em concentração explosiva. A reação química de formação de ClO<sub>2</sub> é a seguinte:



Seguindo indicações do fabricante, a reação efetuou-se com aproximadamente 300% de excesso de HCl, sendo a eficiência do gerador de 90-95%. Assim, segundo o fabricante, para gerar 1 grama de ClO<sub>2</sub> são necessários 6 mL de solução de NaClO<sub>2</sub>, 6 mL de HCl e 18,4 mL de água (Sodi Científica S.P.A., 1996).

O esquema do gerador de ClO<sub>2</sub> piloto pode ser visto na Figura 1a.

A solução de dióxido de cloro formada no gerador foi injetada em tanques de contato de fluxo-pistão de 1,8 m<sup>3</sup> e 11,0 m<sup>3</sup> de volume útil (sistemas piloto 1 e 2 respectivamente). Ambos os tanques de contato foram preservados da luz, constando de várias chicanas para homogeneização (Figuras 1b e 1c). As amostras para análise dos parâmetros físico-químicos e biológicos foram coletadas em seis pontos do tanque de contato, possibilitando a variação dos tempos de contatos em intervalos de 5 minutos até um tempo de contato máximo de 30 minutos, que foi determinado usando azul de metileno como traçador químico.

Tabela 1 – Valores do fator CT (mg.min/L) de alguns desinfetantes para remoção de 99% dos microorganismos

Microorganismo	Cloro (pH = 6-7)	Cloramina (pH = 8-9)	Dióxido de Cloro (pH = 6-7)	Ozônio (pH = 6-7)
<i>Escherichia coli</i>	0,034-0,05	95-180	0,4-0,75	0,02
Pólvirus 1	1,1-2,5	768-3740	0,2-6,7	0,1-0,2
Rotavírus	0,01-0,05	3806-6476	0,2-2,1	0,006-0,06
Cistos de <i>Giardia lamblia</i>	47-150	2200	26	0,5-0,6
Cistos de <i>Giardia muris</i>	30-630	1400	7,2-18,5	1,8-2,0
<i>Criptosporidium parvum</i>	7200	7200	78	5-10

Fonte: Adaptado de Caffaro (2004)

Na Tabela 2 são apresentadas as diferentes condições experimentais ensaiadas.

A avaliação da capacidade de desinfecção do dióxido de cloro foi verificada através do monitoramento físico-químico e biológico do efluente bruto e do efluente desinfetado. Os ensaios foram efetuados uma vez para o sistema piloto 1 e em triplicata para o sistema piloto 2. O pH foi medido com um pHmetro Hach modelo senSION™. As análises de cor aparente, residual de dióxido de cloro livre e demanda química de oxigênio (DQO) foram efetuadas em um espectrofotômetro da marca HACH, modelo DR/2010, operando a 1455, 530 e 420 nm respectivamente, segundo o *Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater* (APHA, 1995). As análises bacteriológicas de coliformes totais e coliformes fecais (*Escherichia coli*) foram determinadas pela técnica de fluorescência Colilert® através do meio enzimático MUG.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### a) Sistema piloto 1

O efluente do sistema de lodos ativados por aeração prolongada da ETE Insular da CASAN foi submetido à desinfecção por ClO<sub>2</sub> no tanque de contato 1, em diferentes condições experimentais de dosagem de ClO<sub>2</sub> e tempo de contato (Tabela 2). Os valores dos diferentes parâmetros biológicos e físico-químicos estudados para o efluente bruto e o efluente desinfetado apresentam-se nas Tabelas 3 e 4, respectivamente. Os dados das Tabelas são referentes ao tempo mínimo de contato com ClO<sub>2</sub> necessário para atingir o maior grau de desinfecção possível. Em todos os ensaios, os valores obtidos de turbidez e sólidos suspensos totais foram inferiores ao limite de detectabilidade do equipamento, o que indica o bom funcionamento do decantador secundário da ETE.

Tabela 2 - Condições experimentais dos diferentes ensaios

	Sistema Piloto 1						Sistema Piloto 2				
Capacidade útil (m <sup>3</sup> )	1,8						11,0				
Vazão (m <sup>3</sup> /h)	3,6	3,6	3,6	3,6	1,2	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
População equivalente (hab.)*	540	540	540	540	180	3300	3300	3300	3300	3300	3300
Dosagem ClO <sub>2</sub> (mg/L)	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	
Carga ClO <sub>2</sub> (g/h) **	7,2	14,4	21,6	28,8	12,0	22,0	33,0	44,0	55,0	66,0	
Tempo máx. contato	30 min										
Temperatura	Ambiente (-21°C)										

\* Calculada para uma geração de esgoto de 160 L/hab.d; \*\* Carga = Dosagem x Vazão

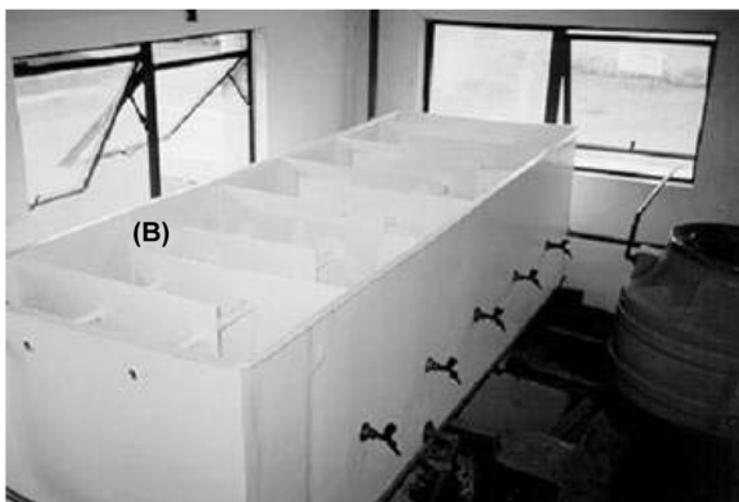
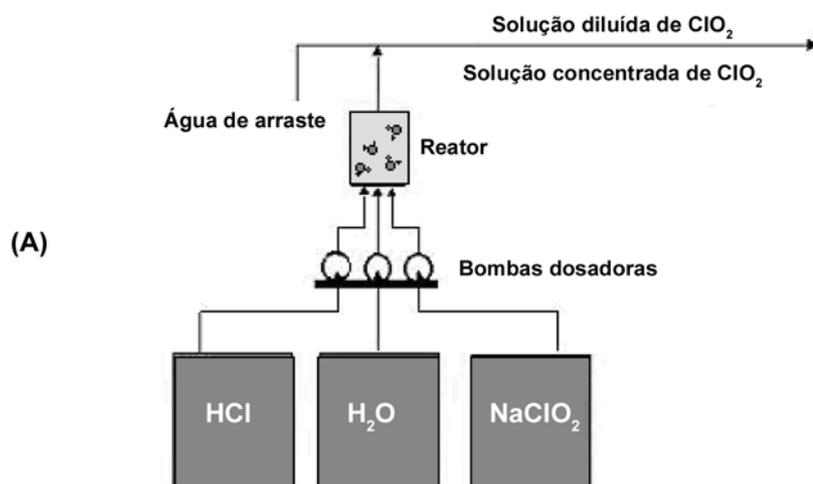


Figura 1 – a) Esquema do gerador de dióxido de cloro; b) Fotografia do tanque de contato do sistema piloto 1; c) Fotografia do tanque de contato do sistema piloto 2

Tabela 3 - Coliformes totais (NMP/100 mL) e coliformes fecais (NMP/100 mL) do esgoto tratado em função da dosagem e do tempo de contato com  $\text{ClO}_2$ 

Dosagem $\text{ClO}_2$ (mg/L)	Tempo contato (min) <sup>a</sup>	Coliformes totais	Coliformes fecais	% Remoção coliformes fecais	
2	Afluyente	---	$1,0 \times 10^3$	---	
	Efluyente	30	$5,1 \times 10^2$	$3,7 \times 10^1$	96,29
4	Afluyente	---	$2,4 \times 10^6$	$1,5 \times 10^6$	---
	Efluyente	10	$1,0 \times 10^0$	$1,0 \times 10^0$	99,99
6	Afluyente	---	$7,2 \times 10^4$	$5,6 \times 10^3$	---
	Efluyente	5	$1,0 \times 10^0$	$1,0 \times 10^0$	99,99
8	Afluyente	---	$7,2 \times 10^4$	$5,6 \times 10^3$	---
	Efluyente	5	$1,0 \times 10^0$	$1,0 \times 10^0$	99,99
10	Afluyente	---	$2,1 \times 10^5$	$3,6 \times 10^4$	---
	Efluyente	10	$1,0 \times 10^1$	$1,0 \times 10^1$	99,99

<sup>a</sup> Tempo de contato mínimo para atingir a percentagem de remoção máxima possível de coliformes fecais.

Os melhores resultados quanto à remoção de coliformes fecais (Tabela 3) obtiveram-se com dosagens de 6 e 8 mg  $\text{ClO}_2$ /L, casos em que foi atingido aproximadamente 100% de remoção de coliformes fecais do efluente tratado no tempo de contato ensaiado menor (5 minutos). Para uma dose de 4 mg  $\text{ClO}_2$ /L foram necessários 10 min para atingir este resultado. A remoção de 100% de coliformes fecais com dose de 2 mg  $\text{ClO}_2$ /L não foi possível mesmo após 30 min de contato. O resultado de 10 min de tempo de contato mínimo para conseguir 100% de remoção de coliformes fecais do efluente na dose de 10 mg  $\text{ClO}_2$ /L parece em princípio inconsistente, uma vez que com dosagens menores conseguiu-se em 5 min. Porém, as cargas de  $\text{ClO}_2$  nos ensaios com dosagens de 2 e 10 mg/L foram 7,2 e 12,0 g/h respectivamente (Tabela 2), abaixo e no limite inferior de carga recomendado pelo fabricante do gerador de  $\text{ClO}_2$ . Devido a este fato, é provável que a concentração de  $\text{ClO}_2$  não se mantivesse constante durante o tempo do ensaio, dando lugar a fluxos de solução de  $\text{ClO}_2$  de composição não homogênea, o que impediu a adequada desinfecção do efluente.

Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros físico-químicos estudados. Observou-se em todos os casos uma diminuição da cor aparente e da DQO após a aplicação do dióxido de cloro. Estes fatos podem ser indicativos de uma certa oxidação da matéria orgânica contida no esgoto pelo  $\text{ClO}_2$ , de maneira que não

todo o  $\text{ClO}_2$  gerado estaria disponível para desinfecção. Na Tabela 4 não estão incluídos os dados de DQO para dosagem de 2 mg/L devido ao efluente conter uma concentração de cloretos muito elevada (acima de 1500 mg/L) que interfere na análise de DQO. Esta alta concentração de cloretos deve-se à infiltração de água do mar nas elevatórias de esgotos da rede coletora, fato que ocorre em períodos de maré cheia, já que algumas elevatórias do sistema localizam-se à beira-mar.

Tabela 4 - Parâmetros físico-químicos do esgoto tratado em função da dosagem e do tempo de contato com  $\text{ClO}_2$ 

Dosagem $\text{ClO}_2$ (mg/L)	Tempo contato (min) <sup>a</sup>	pH	Cor aparente (PtCo)	DQO (mg/L)	$\text{ClO}_2$ residual (mg/L)	CT (mg.min/L) <sup>b</sup>
2	Afluyente	---	6,1	148	---	---
	Efluyente	30	6,1	69	1,80	42,0
4	Afluyente	---	6,7	80	111	---
	Efluyente	10	6,6	59	0,80	7,0
6	Afluyente	---	6,6	63	103	---
	Efluyente	5	5,2	45	1,20	3,0
8	Afluyente	---	6,6	63	103	---
	Efluyente	5	4,1	42	1,50	3,8
10	Afluyente	---	6,6	80	58	---
	Efluyente	10	6,3	45	1,50	8,5

<sup>a</sup> Tempo de contato mínimo para atingir a percentagem de remoção máxima possível de coliformes fecais.

<sup>b</sup> Calculado a partir da área sob os gráficos do perfil do residual de  $\text{ClO}_2$  em função do tempo de contato (Fig. 2).

Pode-se observar que o pH diminuiu em todos os casos após a desinfecção (Tabela 4). A concentração residual de dióxido de cloro permaneceu praticamente constante após atingir a eficiência de remoção de coliformes fecais de 100% (Figura 2), exceto no caso da dosagem de 10 mg/L, devido provavelmente à não homogeneidade já comentada da solução. A estabilidade do  $\text{ClO}_2$  em água propicia que o seu residual permaneça no efluente por um longo tempo, quando observadas as condições de pH inferior a 11 e ausência de luz. Os valores do fator CT para cada dose de  $\text{ClO}_2$  (Tabela 4) foram calculados através das áreas sob os gráficos correspondentes aos tempos de contato mínimos necessários para atingir o máximo grau de desinfecção possível (Figura 2). Estes valores apresentam-se altos em relação com os valores bibliográficos de CT para  $\text{ClO}_2$  (0,4-0,75 mg.min/L, Tabela 1).

Embora estes ensaios tenham demonstrado o alto poder oxidante e biocida do dióxido de cloro no tratamento de esgotos, devem, porém investigar-se outras condições experimentais que levem a um valor menor do fator CT, com objeto de otimizar a desinfecção com dióxido de cloro mediante um baixo consumo do desinfetante.

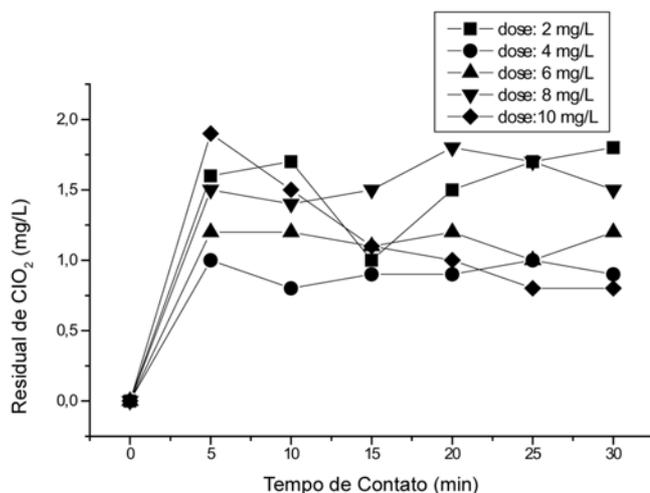


Figura 2 - Perfis do residual de  $\text{ClO}_2$  para as diferentes dosagens ensaiadas

## b) Sistema piloto 2

O sistema piloto 2 foi construído com o mesmo gerador de  $\text{ClO}_2$  do sistema piloto 1, mas com um tanque de contato de capacidade maior ( $11,0 \text{ m}^3$ ), que possibilitou operar com dosagens menores de  $\text{ClO}_2$  e maiores cargas (Tabela 2), para evitar os problemas derivados de trabalhar no limite inferior de carga do gerador de  $\text{ClO}_2$ .

Foram realizados ensaios microbiológicos do efluente inicial e desinfetado em seis pontos de coleta do tanque de contato (Figura 1c) correspondentes a tempos de contato do esgoto com  $\text{ClO}_2$  de 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos.

Os dados obtidos referentes à concentração de coliformes fecais mostram-se na Tabela 5, aparecendo representados graficamente na Figura 3. É de destacar a grande queda no número de coliformes fecais nos primeiros cinco minutos de contato, especialmente nas doses maiores de  $\text{ClO}_2$  aplicadas, e a pouca influência do tempo de contato após os primeiros 5 minutos para as dosagens menores (Figura 3).

O número de coliformes fecais após desinfecção ( $N$ ) pode ser calculado a partir da equação (2), obtida por regressão múltipla, onde se considerou o número inicial de coliformes fecais ( $N_0$ ), a dose do desinfetante ( $D$ ) e o tempo de

contato ( $t$ ). Os valores calculados reproduziram a faixa média dos valores observados, sendo o valor do coeficiente de correlação,  $R^2 = 0,91$  (Camargo, 2004).

$$N = N_0 \cdot e^{-2,25D^{1,075} \cdot t^{0,154}} \quad (2)$$

Não foi possível 100% de remoção de coliformes fecais para dosagens de 1,0 e 1,5  $\text{mg ClO}_2/\text{L}$  mesmo após 30 minutos de contato. Entretanto, dosagens de 2,0, 2,5 e 3,0  $\text{mg ClO}_2/\text{L}$  levaram a 100% de remoção de coliformes fecais em tempos de contato de 20, 15 e 10 minutos respectivamente (Tabela 5). Estes resultados são consistentes com os obtidos por Junli et al (1997), que evidenciaram uma remoção de coliformes fecais de 99,9% num tempo de contato de 20 minutos utilizando uma concentração de  $\text{ClO}_2$  de 2,0  $\text{mg/L}$ , e substancialmente melhores que os obtidos por Ribeiro (2001), que precisou de uma dose de 6,46  $\text{mg ClO}_2/\text{L}$  e um tempo de contato de 10 minutos para atingir a mesma remoção, devido ao esgoto desinfetado proceder de lagoas de estabilização e, conseqüentemente, possuir um teor relativamente alto de sólidos suspensos que elevam o consumo de desinfetante. Segundo as diretrizes bacteriológicas para lançamento de esgotos tratados em águas superficiais sugeridas pela norma NBR 13969 da ABNT (1997), os valores limites de concentração de coliformes fecais no efluente devem ser inferiores a 1000 NPM/100 mL para águas das classes a, b e d, e inferiores a 500 NPM/100 mL para águas da classe<sup>1</sup>.

Tabela 5 - Concentração (NMP/100 mL) e percentagem de remoção de coliformes fecais no esgoto tratado em função da dosagem e do tempo de contato com  $\text{ClO}_2$

Tempo contato (min)	Dosagem aplicada de $\text{ClO}_2$ (mg/L)									
	1,0		1,5		2,0		2,5		3,0	
	Col. fecais	% remoção	Col. fecais	% remoção	Col. fecais	% remoção	Col. fecais	% remoção	Col. fecais	% remoção
0	$2,6 \times 10^4$	---	$2,6 \times 10^4$	---	$2,6 \times 10^4$	---	$2,6 \times 10^4$	---	$2,6 \times 10^4$	---
5	$1,3 \times 10^3$	95,12	$1,1 \times 10^2$	99,57	$9,0 \times 10^1$	99,66	$1,5 \times 10^1$	99,94	$1,0 \times 10^1$	99,96
10	$1,2 \times 10^3$	95,50	$8,5 \times 10^1$	99,67	$2,8 \times 10^1$	99,89	$7,4 \times 10^0$	99,97	0	100
15	$1,1 \times 10^3$	95,96	$8,0 \times 10^1$	99,69	$1,5 \times 10^1$	99,94	0	100	0	100
20	$1,0 \times 10^3$	96,08	$6,6 \times 10^1$	99,75	0	100	0	100	0	100
25	$1,0 \times 10^3$	96,15	$3,8 \times 10^1$	99,86	0	100	0	100	0	100
30	$1,0 \times 10^3$	96,15	$3,4 \times 10^1$	99,87	0	100	0	100	0	100

<sup>1</sup>Classe a: na represa destinada ao abastecimento público, ou nos rios formadores de represa até 10 km a montante dela, independente da distância do ponto de captação e do volume de reservação da represa; Classe b: nos corpos receptores com captação a jusante para abastecimento público; Classe c: nas águas litorâneas, praias e nos rios que deságuam nas praias frequentadas pelas pessoas para recreação; Classe d: nos demais corpos receptores.

Conseqüentemente, a desinfecção com  $\text{ClO}_2$  em dosagens de 2,0 2,5 e 3,0 mg/L durante 20, 15 e 10 minutos respectivamente, atende os padrões exigidos pela normativa vigente.

Os valores médios dos parâmetros físico-químicos analisados em triplicata do esgoto antes e após 30 minutos de tempo de contato com o desinfetante estão apresentados na Tabela 6. Analogamente ao caso do sistema piloto 1, o dióxido de cloro reduziu os valores de cor aparente e DQO, sendo maiores as reduções quanto maiores as doses de  $\text{ClO}_2$  aplicadas, fato indicativo da capacidade do  $\text{ClO}_2$  para oxidar a matéria orgânica ainda contida no esgoto. A concentração residual de  $\text{ClO}_2$  cresceu na medida em que a dosagem aumentou. Não há dados na legislação brasileira sobre o controle de residual de  $\text{ClO}_2$ . Entretanto, segundo normas ditadas em 1994 pela EPA (Agência de Proteção Ambiental dos EE.UU.), o valor máximo permitido para o lançamento do residual de dióxido de cloro após desinfecção é 0,8 mg  $\text{ClO}_2$ /L.

Por outro lado, o valor do pH do esgoto desinfetado também diminuiu na medida que a dosagem de  $\text{ClO}_2$  aumentou. Para dosagens entre 1,0 e 2,0 mg  $\text{ClO}_2$ /L, o valor do pH permaneceu entre 6 e 9, conforme determina a norma NBR 13969 da ABNT (1997). Porém, o valor do pH do esgoto desinfetado foi menor que 6,0 nos casos de dosagens de 2,5 e 3,0 mg  $\text{ClO}_2$ /L.

Assim, considerando os valores de residual de  $\text{ClO}_2$  e pH, as dosagens de 2,5 e 3,0 mg  $\text{ClO}_2$ /L ficam descartadas embora consiga-se 100% de remoção de coliformes fecais em tempos de contato baixos (Tabela 5). Conseqüentemente, a dosagem de  $\text{ClO}_2$  mais adequada para atingir 100% de remoção de coliformes fecais do esgoto considerado é 2,0 mg  $\text{ClO}_2$ /L, dado que atende o valor permitido pela EPA de  $\text{ClO}_2$  residual e os padrões bacteriológicos e de pH da normativa da ABNT.

### c) Análise de custos

Os custos do sistema de desinfecção de esgoto mediante dióxido de cloro foram calculados mediante a avaliação dos custos de aquisição do gerador de  $\text{ClO}_2$  e dos custos operacionais e de manutenção do sistema. Os custos de instalação do reator e da energia elétrica e a água de diluição utilizadas na operação do sistema foram desconsiderados devido os baixos valores quando comparados aos outros componentes do sistema.

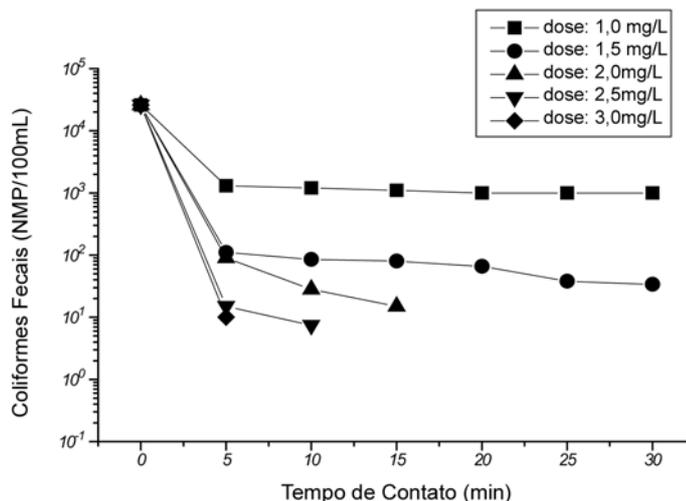


Figura 3 - Inativação de coliformes fecais em função do tempo para diversas doses de dióxido de cloro

Tabela 6 - Parâmetros físico-químicos [valores médios (n = 3) ± desvio padrão] do esgoto desinfetado em função da dosagem de  $\text{ClO}_2$  após 30 min de tempo de contato

Dosagem $\text{ClO}_2$ (mg/L)	pH	Cor aparente (PtCo)	DQO (mg/L)	$\text{ClO}_2$ residual (mg/L)
0	6,7 ± 0,2	41,3 ± 2,8	39,0 ± 1,4	---
1,0	6,6 ± 0,1	34,7 ± 0,6	33,5 ± 8,7	0,0 ± 0,0
1,5	6,4 ± 0,1	32,0 ± 1,0	32,5 ± 2,0	0,6 ± 0,1
2,0	6,0 ± 0,1	24,0 ± 1,0	29,0 ± 1,0	0,7 ± 0,1
2,5	5,8 ± 0,1	20,3 ± 0,6	25,7 ± 2,5	1,1 ± 0,1
3,0	5,6 ± 0,1	16,2 ± 0,3	19,2 ± 2,6	1,2 ± 0,1

O preço de aquisição do gerador aumenta com o aumento da capacidade de geração de  $\text{ClO}_2$ , embora o custo por unidade de geração de  $\text{ClO}_2$  diminua com o aumento da capacidade de geração, como pode ser observado na Figura 4 (Camargo, 2004).

Para calcular a capacidade de geração de  $\text{ClO}_2$  necessária considerou-se uma dosagem de 2,0 mg/L (0,002 kg/m<sup>3</sup>) dado que, como determinado anteriormente, foi a dosagem testada mais adequada, e uma geração de 0,16 m<sup>3</sup> de efluente por habitante e dia. Assim, a capacidade de geração mensal necessária de  $\text{ClO}_2$  (CG), em kg/mês, é dada pela Equação (3):

$$CG = 0,16 \times 30 \times P \times D(\text{ClO}_2) \quad (3)$$

na qual P = população (hab.) e D( $\text{ClO}_2$ ) é a dosagem aplicada de desinfetante (kg/m<sup>3</sup>).

O custo unitário de aquisição do gerador (CUN), em R\$/Kg  $\text{ClO}_2$ , foi calculado a partir da equação 4, que é a equação correspondente à curva da Figura 4:

$$CUN = 28406.CG^{-0,7604} \quad (4)$$

O preço do gerador (PG) em R\$ é dado pela Equação 5:

$$PG = CG.CUN \quad (5)$$

O custo de aquisição do gerador por economia familiar (CAE), considerando uma família média de 3,75 habitantes, é dado pela Equação 6:

$$CAE = PG.3,75/P \quad (6)$$

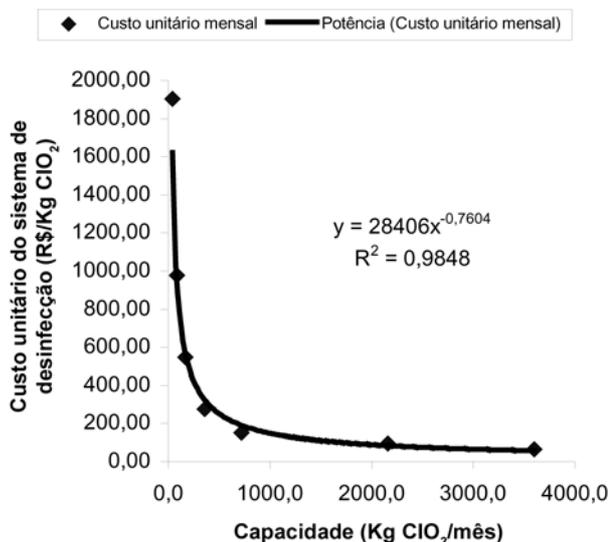


Figura 4 - Custo unitário de geração de ClO<sub>2</sub> em função da capacidade de geração

Os resultados das equações 3 - 6 aplicadas a diferentes populações estão apresentados na Tabela 7. O custo de aquisição do gerador por economia familiar cai, por exemplo, de R\$ 41,70 no caso de atender uma população de 7.000 habitantes, para R\$ 4,06, no caso de atender uma população de 150.000 habitantes.

No caso de amortização do gerador mediante prestações constantes, o valor

da prestação mensal (PRE) é dado pela equação 7, na qual, PG = custo do gerador,  $i$  = taxa mensal de juros e  $n$  = número de prestações mensais.

$$PRE = \frac{PG \frac{i}{100} \left(1 + \frac{i}{100}\right)^x}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)^x - 1} \quad (7)$$

Tabela 7 - Custo de aquisição do gerador de ClO<sub>2</sub> em função da população atendida<sup>2</sup>

População	CG <sup>a</sup> (Kg ClO <sub>2</sub> /mês)	CUN <sup>b</sup> (R\$/Kg ClO <sub>2</sub> )	PG <sup>c</sup> (R\$)	CAE <sup>d</sup> (R\$/econ. fam.)
7.000	67,2	1.158,45	77.847,84	41,70
10.000	96,0	883,27	84.793,92	31,80
20.000	192,0	521,42	100.112,64	18,77
25.000	240,0	440,05	105.612,00	15,84
30.000	288,0	383,08	110.327,04	13,79
40.000	384,0	307,81	118.199,04	11,08
50.000	480,0	259,77	124.689,60	9,35
100.000	960,0	153,35	147.216,00	5,22
131.250	1260,0	124,72	157.147,20	4,48
150.000	1440,0	112,67	162.244,80	4,06
250.000	2400,0	76,40	183.360,00	2,75

<sup>a</sup> CG: capacidade de geração mensal necessária de ClO<sub>2</sub>; <sup>b</sup> CUN: custo unitário de aquisição do gerador; <sup>c</sup> PG: preço do gerador; <sup>d</sup> CAE: custo de aquisição do gerador por economia familiar.

Considerando 150.000 pessoas atendidas (aproximadamente a população insular de Florianópolis), o preço do gerador de ClO<sub>2</sub> ascenderia a R\$ 162.244,80 (Tabela 7). Admitindo-se um juro mensal de 1,00% ao mês e um prazo de 10 anos (120 prestações mensais), chega-se, mediante a Equação 7, a um valor mensal da prestação de R\$ 2.327,74, que corresponde-se com R\$ 0,016 *per capita* ou R\$ 0,058 por economia familiar.

Os custos operacionais do sistema referem-se ao custo dos reagentes necessários para geração do ClO<sub>2</sub>. No caso considerado de uma população de 150.000 habitantes, são necessários 1440,0 Kg ClO<sub>2</sub> por mês (Tabela 7), que se correspondem, em base à reação de geração de ClO<sub>2</sub> (eq. 1) e as condições operacionais indicadas pelo fabricante (Sodi Científica S.P.A., 1996), já comentadas na metodologia, com 8640 L de NaClO<sub>2</sub> e 8640 L de HCl por mês. Assumindo-se valores do litro de NaClO<sub>2</sub> de R\$ 4,24 e do litro de HCl de R\$ 0,68, o custo total mensal dos reagentes ascende a R\$ 42.508,80, ou seja, R\$ 0,283 *per capita* ou R\$ 1,063 por economia familiar e mês.

Os custos de manutenção do sistema foram avaliados em 15% sobre o valor dos reagentes (Bassani, 2003), o que se corresponde com R\$ 6.376,32 mensais, ou seja, R\$ 0,043 *per capita* ou R\$ 0,159 por economia familiar e mês.

Na Tabela 8 se mostra o custo total mensal da desinfecção após tratamento secundário, mediante dióxido de cloro, do esgoto produzido por uma população de 150.000 habitantes.

Quando comparado com outros métodos de desinfecção de esgotos, os custos de implantação do sistema mediante ClO<sub>2</sub> são mais elevados que mediante cloro e mais baixos que mediante radiação ultravioleta ou ozônio. Os custos de operação e manutenção do sistema mediante ClO<sub>2</sub> são da mesma ordem que os do sistema mediante ozônio, enquanto que são mais elevados que os dos sistemas mediante cloro ou radiação ultravioleta (Jordão e Sobrinho, 2003).

## CONCLUSÕES

O dióxido de cloro demonstrou ser um desinfetante de alto poder oxidante e biocida em tempos de contato curtos. Em todos os testes, o dióxido de cloro promoveu a oxidação da matéria orgânica, diminuindo a DQO e promovendo a clarificação do efluente.

Tabela 8 - Custo mensal (R\$) da desinfecção por  $\text{ClO}_2$  para 150.000 habitantes<sup>2</sup>

	Custo global	Custo <i>per capita</i>	Custo por economia familiar
Custo aquisição	2327,74	0,016	0,058
Custo operação	42508,80	0,283	1,063
Custo manutenção	6376,32	0,043	0,159
Custo total	51212,86	0,340	1,280

O gerador de  $\text{ClO}_2$  não deve ser operado no limite inferior de carga, pois a desinfecção do esgoto não é homogênea, não sendo possível chegar a um nível aceitável de desinfecção. O aumento da capacidade do tanque de contato permitiu aumentar a vazão do esgoto e a carga de  $\text{ClO}_2$ , diminuindo ao mesmo tempo sua dosagem. A operação do gerador na faixa ideal de carga de  $\text{ClO}_2$  permitiu testar baixas dosagens do mesmo, entre 1,0 e 3,0 mg  $\text{ClO}_2/\text{L}$ .

Foi atingida remoção total de coliformes fecais com doses de  $\text{ClO}_2$  de 2,0, 2,5 e 3,0 mg/L em tempos de contato de 20, 15 e 10 minutos respectivamente, para efluentes com concentração de coliformes fecais de  $2,6 \times 10^4$  NMP/100 mL.

Porém, as dosagens de 2,5 e 3,0 mg  $\text{ClO}_2/\text{L}$  levaram, no esgoto desinfetado, a valores de pH abaixo do limite inferior estabelecido pela normativa brasileira (norma NBR 13969 da ABNT, 1997) e a concentrações de  $\text{ClO}_2$  residual acima do estabelecido pela EPA USA (1994).

Conseqüentemente, pode-se concluir que, nas condições ensaiadas, a dosagem mais indicada para desinfecção de esgoto tratado mediante lodos ativados é 2,0 mg  $\text{ClO}_2/\text{L}$ , dosagem com a qual é atingido 100% de remoção de coliformes fecais e oxidada parcialmente a matéria orgânica remanescente, em tanto que os valores de pH e residual de  $\text{ClO}_2$  do efluente mantêm-se dentro dos admitidos pelas normativas brasileira e estadunidense em vigor.

O dióxido de cloro demonstrou ser um desinfetante altamente eficaz no tratamento terciário de esgoto sanitário, dadas as baixas dosagens e curtos tempos de contato necessários para atingir 100% de remoção de coliformes fecais.

O estudo econômico levado a cabo permitiu concluir que a desinfecção de efluente doméstico mediante dióxido de cloro pode ser um processo economicamente viável.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CASAN, ao CNPq, à FINEP - PROSAB III e à firma C.O. MUELLER pelo apoio para o desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13969: *Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação*. Rio de Janeiro, 60 p., 1997.

APHA - American Public Health Association. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 19 ed. Washington: APHA-AWWA-WEF, 1995.

BAIRD, C. *Environmental Chemistry*, W.H. Freeman and Company Ed., 2 ed., NY, 2001.

BASSANI, L. *Desinfecção de Efluente Sanitário por Ozônio: Parâmetros Operacionais e Avaliação Econômica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

BASSANI, L. et al. *Desinfecção de Efluentes Sanitários Através da Ozonização*. In: X SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Braga, Portugal: APESB, Setembro 2002.

CAFFARO.S.P.A. – GRUPO SNIA. *Chemicals Business Unit: Chlorine Dioxide Wastewater Disinfection*. Disponível em <http://www.caffarochem.com>. Acesso em novembro 2004.

CAFFARO DIVISIONE TRATTAMENTO ACQUE. *Chlorine Dioxide Monograph*. Brescia (Itália), 1997.

CAMARGO, J. G.; *Aplicação do Dióxido de Cloro na Desinfecção de Efluentes Domésticos Tratados pelo Sistema de Lodos Ativados*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

CHERNICHARO, C. A. L. (coordenador). *Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios*. Belo Horizonte: Projeto PROSAB; FINEP, 2001.

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY OF UNITED STATES. *National Primary Drinking Water Regulations;*

*Disinfectants and Disinfection Byproducts; Proposed Rule*. Federal Register Environmental Documents: July 29, 1994. EPA 815-R-99-014. Disponível em <http://www.epa.gov/EPA-WATER/1996/May/Day-14/pr-20972DIR/Other/julya.txt.html>.

GONÇALVES, R. F. (coordenador). *Desinfecção de Efluentes Sanitários*. Rio de Janeiro: Projeto PROSAB; FINEP, 2003.

JORDÃO, E. P.; SOBRINHO, P. A. *Análise crítica*. In: DESINFECÇÃO DE EFLUENTES SANITÁRIOS. ABES. GONÇALVES, R. F. Ed. Rio de Janeiro, cap. 5, p. 409-422, 2003.

JUNLI, H. et al. *Disinfection Effect of Chlorine Dioxide on Bacteria in Water*. Water Research, v. 31, n. 3, p. 607-613, 1997.

RIBEIRO, L. *Aplicação de Dióxido de Cloro como Alternativa para Desinfecção de Esgotos Sanitários Tratados Através de Lagoas de Estabilização*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

SODI SCIENTIFICA S.P.A. *Manual Técnico de Instalação, Operação e Manutenção*. Revisado, 1996.

ZAVALETTA, O. (US EPA). *Chlorine Dioxide Risk Assessment for Drinking Water*. In: SECOND INT. SYMPOSIUM - CHLORINE DIOXIDE: DRINKING WATER ISSUES. Houston (USA), May 1992.

### Endereço para correspondência:

**Flávio Rubens Lapolli**  
**Universidade Federal de Santa Catarina**  
**Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental**  
**Campus Universitário Trindade**  
**88010-970 - Florianópolis - SC - Brasil**  
**Tel.: (48) 331-7744**  
**Fax: (48) 234-6459**  
**Email: [fri@ens.ufsc.br](mailto:fri@ens.ufsc.br)**