



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE QUÍMICA



ANA MARIA DALCIN FORNARI

**GERAÇÃO DE MICROBOLHAS DE OZÔNIO  
ATRAVÉS DE MATERIAIS POROSOS PARA  
APLICAÇÃO EM TRATAMENTO DE EFLUENTES**

Porto Alegre, 2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE QUÍMICA

ANA MARIA DALCIN FORNARI

Trabalho de conclusão de curso apresentado junto à atividade de ensino “Projeto Tecnológico” do Curso de Química Industrial, como requisito parcial para a obtenção do grau de Químico Industrial

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Isabel Cristina Tessaro

Orientadora

Dra. Carolina Pereira Kechinski

Co-orientadora

Porto Alegre, 2011

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, João Viane e Zilá, que nunca permitiram que eu desistisse e que fizeram de tudo para me proporcionar a oportunidade de me formar em uma universidade de qualidade. Às minhas irmãs, Mônica e Gabriela, pela força e carinho incondicionais.

Aos meus tios, Jairo e Anísia, e minha prima, Camila, que fizeram fortemente parte da minha jornada universitária, me acolhendo e torcendo por mim sempre.

Aos meus amigos, Camila Fornari, Cristiane Zanotteli, Daniel Sanchez, Douglas Marques, Eduarda Furini, Fernanda Bastos, Gisele Rasia, Gustavo Corte Real, Larissa Furini, Leonardo Pressi, Marluza Abreu, Monique Hansen, Priscila Dick, Rodrigo Feijó, Tatiana Schreiber, que estiveram ao meu lado durante o curso, me apoiando em todos os momentos.

Aos professores Fabiano Rodembusch e Leandra Campo, que marcaram e motivaram minha vida acadêmica. Às Dras. Ursula Bolke e Tatiana Calvete, por todos os momentos de incentivo durante a faculdade. Participando da minha formação pessoal e acadêmica.

À minha orientadora, Prof<sup>a</sup>. Dra. Isabel Tessaro por todo apoio, dedicação e atenção necessárias para realização do trabalho.

À minha co-orientadora, Dra. Carolina Pereira Kechinski, por toda dedicação, auxílio e desempenho, que me auxiliou de segunda a segunda, sem restrição de horário.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelas oportunidades oferecidas.

À banca examinadora pela participação neste trabalho.

## RESUMO

Atualmente a preocupação ambiental apresenta-se como uma condição de sobrevivência no mercado industrial. Devido às leis ambientais mais restritivas, escassez de recursos naturais, um aumento da percepção ambiental, novas tecnologias disponíveis, as indústrias tem buscado a melhoria de seus processos de forma a minimizar o impacto ambiental. No que se refere ao tratamento do chorume, este tem se tornado cada vez mais importante à medida que novos aterros sanitários são construídos de acordo com as legislações vigentes, tornando-se cada vez mais difícil devido às mudanças constantes que o chorume sofre durante vida útil do aterro. Neste contexto, o presente trabalho aborda o uso de materiais porosos como método de geração de microbolhas de ozônio para tratamento de efluentes, tendo como objetivo o estudo do aumento da transferência de massa de ozônio devido ao aumento da área de contato entre a superfície gás-líquido (redução do tamanho das bolhas). Os materiais utilizados para a geração de microbolhas foram: ponta de pipeta, pedras porosas (1 e 2) e membrana polimérica. Para realizar o estudo a respeito do aumento da transferência de massa de ozônio, primeiramente observou-se a produção de ozônio utilizando diferentes meios porosos, borbulhado diretamente sobre uma solução de iodeto de potássio. Após, foi analisada a redução de cor para amostras de chorume ozonizadas, utilizando para tanto os mesmos materiais. Foram obtidos os maiores de valores de produção de ozônio para as pedras porosas (2,2 mg de O<sub>3</sub>). Entretanto, a pedra porosa 2 foi a que apresentou uma maior redução de cor aparente e segundo o índice de cor, calculado pelo coeficiente *DFZ*.

*Palavras-chaves: Chorume; Coeficiente de Cor; Turbidez.*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONCEITOS TEÓRICOS .....</b>	<b>9</b>
2.1 HISTÓRICO DO OZÔNIO.....	9
2.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICAS DO OZÔNIO .....	10
2.3 EQUIPAMENTOS GERADORES DE OZÔNIO .....	13
2.4 TOXICIDADE DO OZÔNIO .....	14
2.5 OZÔNIO PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	15
<b>2.5.1 Chorume.....</b>	<b>15</b>
2.6 MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DO OZÔNIO .....	16
2.7 TRANSFERÊNCIA DE MASSA E DIFUSÃO DO OZÔNIO .....	17
<b>2.7.1 Influência do tamanho das bolhas.....</b>	<b>18</b>
2.8 ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA O AUMENTO DA TRANSFERÊNCIA DE MASSA .....	19
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>21</b>
3.1 MEIOS POROSOS.....	21
3.2 SISTEMA OPERACIONAL PARA OZONIZAÇÃO .....	22

3.3 DETERMINAÇÃO DA PRODUÇÃO DE OZÔNIO.....	23
3.4 CHORUME .....	24
3.5 CARACTERIZAÇÃO DO CHORUME.....	25
<b>3.5.1 Avaliação da cor .....</b>	<b>25</b>
3.5.1.1 Coeficiente de Cor (DFZ).....	25
<b>3.5.2 Medidas de pH .....</b>	<b>26</b>
<b>3.5.3 Medidas de turbidez .....</b>	<b>26</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>27</b>
4.1 PRODUÇÃO DE OZÔNIO UTILIZANDO DIFERENTES MATERIAIS .....	27
4.2 APLICAÇÃO DE OZÔNIO PARA A REDUÇÃO DA COR DO CHORUME .....	29
<b>4.2.1 Caracterização do chorume.....</b>	<b>29</b>
<b>4.2.2 Avaliação da redução de cor do chorume .....</b>	<b>30</b>
<b>5 CUSTOS E IMPACTO AMBIENTAL .....</b>	<b>33</b>
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>34</b>
<b>7 BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>35</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente a maior preocupação das indústrias tem sido buscar a adaptação dos seus processos de forma a minimizar ou anular o impacto ambiental gerado pelos mesmos. Nesse cenário, o número de indústrias preocupadas em adotar medidas para o tratamento e reuso das águas residuais vem aumentando. Além disso, devido à disponibilidade cada vez menor de água natural de boa qualidade e aos custos associados ao tratamento de água, essas medidas se fazem cada vez mais necessárias e urgentes.

O ozônio surge como uma solução eficiente e versátil no tratamento de efluentes industriais e vem sendo usado no tratamento de água há mais de 100 anos. O ozônio é conhecido como um poderoso oxidante, sendo amplamente utilizado para melhorar o sabor e a cor da água potável e águas residuais, bem como para remover compostos orgânicos e inorgânicos. O seu uso permite uma melhora na qualidade do efluente a ser descartado e até mesmo a sua reutilização no processo, uma vez que ocorre uma redução: da carga microbiana, do sabor, da cor e da matéria orgânica.

O processo de ozonização é um exemplo típico de absorção de gás envolvendo reação química, no qual a taxa de reação total pode ser afetada tanto pela cinética da reação quanto pela transferência de massa. Estudos determinaram que o fator limitante no processo é a transferência de massa, devido à baixa solubilidade do ozônio na água. Constatou-se que a eficácia da transferência de massa pode ser aumentada tendo-se uma maior área de contato de ozônio através da geração de bolhas menores.

Os dois métodos amplamente utilizados, citados pela literatura, para geração de micro e nanobolhas são baseados em descompressão e circulação gás-água. Também são usados geradores do tipo Venturi, que têm seu processo semelhante à descompressão. Como método ainda mais recente cita-se o método do oscilador fluídico.

Este trabalho propõe um método diferente para a geração de microbolhas: o uso de materiais porosos. O objetivo é realizar um estudo teórico-experimental sobre a geração de microbolhas através de materiais porosos, e demonstrar a maior eficácia do processo de ozonização quando o mesmo é feito através da geração de microbolhas e, desta forma, obter um processo mais eficiente e atrativo industrialmente. Para alcançar esses objetivos, foi proposto o estudo de diversos materiais porosos a fim de se determinar o mais eficiente no

processo geração de microbolhas e, como consequência, a dispersão de ozônio no meio; bem como foi avaliada a eficiência do processo, através da mudança da cor de um efluente durante o processo de ozonização, para cada tipo de material.

Adicionalmente, com vistas à implantação do processo de ozonização com geração de microbolhas na indústria, foi realizado um breve estudo dos custos, benefícios e dificuldades inerentes ao sistema proposto.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONCEITOS TEÓRICOS

Neste capítulo será apresentada uma breve revisão bibliográfica e os principais conceitos e características inerentes ao processo de ozonização. Na parte teórica as referências básicas foram Chernicharo e colaboradores (2001) e Gonçalves & Kechinski (2011).

### 2.1 HISTÓRICO DO OZÔNIO

Os primeiros relatos do ozônio datam de 1785, quando Van Marun, um químico holandês, observou que a descarga elétrica do oxigênio resultava em um odor característico e bastante irritante. Entretanto, a descoberta do ozônio foi anunciada oficialmente somente por Schönbein, em 1840, ao perceber um odor peculiar nas vizinhanças de um equipamento elétrico no laboratório onde trabalhava. O nome ozônio é derivado da palavra grega *ozein*, que significa cheiro (SANTOS, 2008).

O ozônio vem sendo usado no tratamento de água há mais de 100 anos, tendo sido usado pela primeira vez em Nice, na França, em 1906 e depois disso, em estações de tratamento de água em todo o mundo (RICE, 2005). Diversos outros usos comerciais foram encontrados para o ozônio, incluindo a desinfecção de água engarrafada, piscinas, branqueamento de tecidos, tratamento de águas residuais, conservação de alimentos, entre outras aplicações.

Nos Estados Unidos, o ozônio foi usado pela primeira vez em 1908, com um crescimento mínimo até 1985. Em 1980 havia menos de 10 estações conhecidas que utilizavam ozônio na operação de tratamento. No entanto, dentro das duas últimas décadas mais de 300 estações de tratamento de ozônio foram projetadas, construídas e operadas para atender a desinfecção dos produtos e subprodutos (DBP's), sabor e odor, cor, micro coagulação (microfiltração) e outras necessidades do tratamento de água potável.

No Brasil, o uso da tecnologia de ozônio começou em 1983 quando algumas estações de tratamento de água necessitaram de alternativas para os métodos convencionais para pré-cloração e pré-areação de águas superficiais. Em 1985, algumas indústrias, como a Pirelli e a Cutrale, iniciaram o processo de tratamento de água em suas estações por meio da pré-ozonização. Nessa mesma época, as indústrias de água mineral também passaram a utilizar o ozônio no controle bacteriológico da água (SANTOS, 2008).

## 2.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICAS DO OZÔNIO

O ozônio ( $O_3$ ) é uma forma alotrópica do oxigênio ( $O_2$ ), isto é, ambos são formados pelo mesmo elemento, mas estão combinados de forma diferente. É um gás instável, incolor, de odor característico, solúvel em água, sendo sua solubilidade dependente da temperatura (Tabela 1). É também muito conhecido por ser um dos mais poderosos oxidantes existentes, o que lhe confere uma forte capacidade de desinfecção e esterilização.

Tabela 1. Solubilidade do ozônio em água.

T (°C)	Solubilidade ( $LO_3/LH_2O$ )
0	0,640
15	0,456
27	0,270
40	0,112
60	0

A capacidade de desinfecção do ozônio tem amplo espectro de ação, sendo capaz de destruir toda a classe de bactérias e fungos, e alguns tipos de vírus, não permitindo seu desenvolvimento. Além de ter a capacidade de decompor os compostos responsáveis por dar sabor e cheiro na água.

A alta reatividade do ozônio é atribuída à configuração eletrônica de sua molécula. Pois a ausência de elétrons em um dos átomos de oxigênio terminal em uma de suas estruturas de ressonância (Figura 1) confirma o caráter eletrofílico do ozônio. Por outro lado o excesso de carga negativa presente em algum outro átomo de oxigênio lhe dá um caráter nucleofílico.

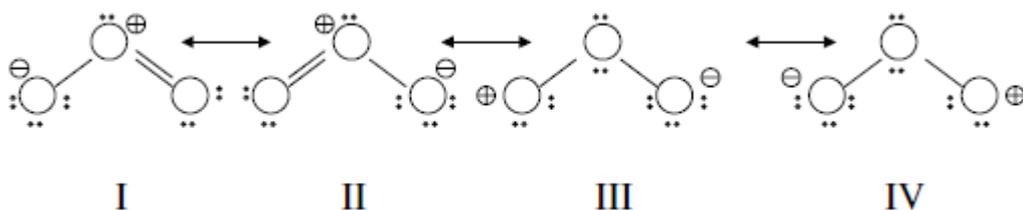


Figura 1: Formas de ressonância da molécula de ozônio (BELTRÀN, 2003).

Devido a sua forte capacidade de oxidação (Tabela 2) o ozônio é muito utilizado no tratamento de água com alto teor de matéria orgânica, pois oxida facilmente os compostos orgânicos e também muitos compostos inorgânicos. O ozônio pode ser usado sozinho para o tratamento de água, ou associado a outros reagentes como peróxido de hidrogênio ou cloro.

Tabela 2. Potencial de oxidação de alguns reagentes. (GONÇALVES & KECHINSKI, 2011).

<b>Agente Oxidante</b>	<b>Potencial de Oxidação (mV)</b>	<b>Poder relativo de Oxidação</b>
Flúor	3,06	2,25
Ozônio	2,07	1,52
Peróxido de hidrogênio	1,77	1,30
Ácido Hipocloroso	1,49	1,10
Cloro gasoso	1,36	1,00

A superioridade do ozônio sobre outros desinfetantes tem sido cada vez mais ressaltada, por exemplo, o ozônio pode ser comparado com o cloro, mostrando uma ação antibacteriana mais forte e mais rápida do que o cloro. Entretanto, seu uso deve ser feito com atenção e assim como qualquer outro reagente químico deve-se conhecer suas características de modo que possa ser utilizado com segurança. Na Tabela 3 estão apresentadas algumas características do ozônio quanto ao poder teórico oxidativo.

Tabela 3. Características físico-químicas do ozônio. (Adaptado de ROSA, 2009.)

<b>Propriedades</b>	<b>Ozônio gasoso (O<sub>3</sub>)</b>
Massa molar (g/mol)	48
Ponto de fusão (°C)	-192
Ponto de ebulição (°C)	-112
Massa específica (a 0 °C e 1 atm) (g/L)	2,14
Solubilidade em água	Pouco solúvel
Cor	Levemente azulado
Odor	Característico e irritante

O tempo de meio-vida do ozônio gasoso é mais longo do que o de ozônio dissolvido em água (pH 7), mas para ambos há um decréscimo do tempo de meia vida com o aumento da temperatura. Por exemplo, para o ozônio gasoso o tempo de meia-vida a -50 °C é de três meses, enquanto que em 250 °C o tempo de meia vida é de 1,5 segundos. Para o ozônio dissolvido em água (pH 7), na temperatura de 25 °C seu tempo de meia-vida é de 15 minutos.

Segundo Chernicharo (2001) as principais variáveis que influenciam a eficiência do processo de desinfecção são: o pH, a alcalinidade, a temperatura, a matéria orgânica, os sólidos em suspensão, a concentração em ozônio dissolvido (ou ozônio residual) e os sistemas de contato ar ozonizado-água (tanque de contato).

Uma vez dissolvido em água, o ozônio molecular não é estável, pois sua forte reatividade com numerosos composto minerais e orgânicos, faz com que o ozônio seja consumido, se desgaseifique (fraca proporção) ou se decomponha em entidades radicalares (radicais hidroxilas OH<sup>•</sup>), sob efeito inicializador dos íons hidroxila (OH<sup>-</sup>). Assim, em pH alcalino, o ozônio se decompões mais rapidamente. Por outro lado, mantendo-se um residual de ozônio constante, as atividades bactericida e virucida ficam estáveis na faixa de pH 5,6 a 9,8. Já a alcalinidade, devido à presença de bicarbonato e carbonato, na água, inibe a decomposição do ozônio, mantendo-o na forma molecular, que é mais eficiente para a desinfecção.

As variações de temperatura compreendidas entre 0 e 37°C afetam relativamente pouco a eficiência desinfetante do ozônio. Nos casos mais extremos, a elevação da temperatura aumenta a cinética de inativação dos microrganismos.

A matéria orgânica influencia em uma maior demanda de desinfetante. Neste caso, o ozônio residual dissolvido na água aparece somente quando a taxa de desinfetante injetado ultrapassa a quantidade crítica correspondente à demanda de ozônio. Antes do surgimento de residual, pode-se observar a oxidação da matéria orgânica e, paralelamente, a inativação dos microrganismos. Este fenômeno, interessante para o tratamento de esgoto, pode ser explicado pela existência de zona de forte concentração em ozônio na interface da fase líquido-ar ozonizado; isto levou a proposições de novas tecnologias para melhor dispersão do ozônio no tanque de contato.

Os sólidos em suspensão representam, em diversas ocasiões, veículo que possibilita a adsorção de microrganismos. Com frequência, esta adsorção limita o efeito do ozônio e diminui a eficiência do processo de desinfecção, fazendo com que na fração da quantidade de microrganismos seja dificilmente inativável, mesmo na presença de elevadas doses de ozônio.

O ozônio residual é habitualmente considerado como parâmetro chave no término da desinfecção de águas. Após a aparição de ozônio residual na água, ou no esgoto, em concentração que atenda o mínimo exigido, as curvas de sobrevivência de microrganismos apresentam descontinuidade importante, traduzindo um aumento da cinética de inativação dos germes (comumente se fala em ausência ou presença). Em presença de ozônio residual, na faixa entre 0,1 e 0,4 mg/L, a cinética de inativação dos microrganismos, em particular dos vírus, pode ser descrita como uma reação de primeira ordem. Esta inativação resulta num aumento importante do potencial de oxirredução e ocorre relativamente rápida, entre dez segundos e cinco minutos, dependendo do tipo de microrganismo.

### 2.3 EQUIPAMENTOS GERADORES DE OZÔNIO

Devido ao fato do ozônio gasoso possuir um tempo de meia vida curto a temperatura ambiente, cerca de horas, não pode ser comprimido nem estocado, por isso deve ser produzido *in situ* e utilizado imediatamente. Existem métodos para a geração de ozônio, em decorrência disso e o mercado vem oferecendo diversas opções de equipamentos industriais para a produção de ozônio.

O ozônio pode ser produzido através de oxigênio puro ou ar atmosférico, sendo o método mais largamente utilizado o de geração elétrica através do efeito corona. A sua maior

utilização se deve ao fato de a geração elétrica ser a forma mais econômica, prática e segura para aplicações de ozônio em larga escala. A Figura 2 mostra, genericamente, o funcionamento do efeito corona.



Figura 2. Esquema de formação de gás ozônio – efeito corona. (ELETRICIDADE, 2011)

O gerador corona acelera os elétrons dando-lhes energia suficiente para romper a dupla ligação existente entre os átomos de oxigênio da molécula desse gás ( $O_2$ ). Os dois átomos de oxigênio que são produzidos pela colisão reagem com outras moléculas diatômicas de oxigênio para formar ozônio, de acordo com a reação:



Existem ainda outras formas de obtenção de gás ozônio, como através de luz ultravioleta e eletrólise do ácido perclórico.

## 2.4 TOXICIDADE DO OZÔNIO

O ozônio possui alta toxicidade para o ser humano se essa se der por inalação direta do gás. Em contrapartida, a ingestão indireta, através de água ozonizada, não representa perigo sério ao ser humano, pois a meia vida do ozônio dissolvido em água é relativamente curta (ROSA, 2009).

As regulamentações governamentais quanto à exposição ao ozônio gasoso variam para cada local. Na Europa, o máximo permitido para exposição contínua ao ozônio é 0,15 ppm. No Canadá, o limite de exposição máxima é de até 1,0 ppm. Já nos Estados Unidos, o OSHA (Segurança Ocupacional e Administração da Saúde) permite exposição máxima de 0,1 ppm de ozônio no ambiente de trabalho, não podendo exceder de 8h diárias (SANTOS,2008).

No Brasil, os limites de exposição ao gás ozônio, em atividades ou operações nas quais trabalhadores ficam expostos ao gás, são determinados pela Norma Regulamentadora (NR 15), aprovada pela Portaria N° 3.214/78, por determinações Ministério do Trabalho e do Emprego. O limite de exposição ao gás ozônio para jornadas de trabalho de até 48 h semanais é de 80 ppb (SANTOS,2008).

Para diminuir o risco de intoxicação, os locais de trabalho de ozonização devem possuir meios de destruição do ozônio residual no ar ambiente e dispositivos de ventilação, de modo que o teor de ozônio no local de trabalho e nas vizinhanças não ultrapasse o valor de 10 ppb (KECHINSKI, 2007).

## 2.5 OZÔNIO PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES

A reutilização de águas residuais tornou-se uma opção atraente para proteger o meio ambiente e diminuir o uso dos recursos hídricos existentes. Nos últimos anos, tem havido uma significativa diversificação das práticas de reutilização das águas residuais, tais como irrigação de culturas, aplicações industriais, recarga de reservatório. O reuso seguro das águas residuais depende da confiabilidade de desinfecção e despoluição das águas residuais. Nesse cenário, o ozônio tem provado ser um dos mais eficazes desinfetantes e despoluidores (XU et. al., 2002).

O ozônio pode ser usado para tratamento de efluentes em diversos setores industriais, como por exemplo, indústria de celulose e papel (branqueamento da celulose e tratamento de efluentes secundários), indústrias têxteis (branqueamento das fibras e remoção de cor do efluente), fabricação de corantes, algumas indústrias farmacêuticas, entre outros.

Os principais benefícios do uso do ozônio para o tratamento de efluentes são a remoção de cor, a maior redução de COD (carga orgânica total) e DQO (demanda química de oxigênio) em comparação com a oxidação biológica, a degradação de moléculas orgânicas (fenóis clorados, clorobenzenos) e a oxidação de compostos inorgânicos, como por exemplo, o íon cianeto (GOGATE & PANDIT, 2004).

### 2.5.1 Chorume

A norma brasileira NBR 8849/1985 define o chorume como sendo o líquido proveniente da umidade natural e da água de constituição proveniente da matéria orgânica dos resíduos, dos produtos de degradação biológica dos materiais orgânicos e da água de infiltração da camada de cobertura e células de infiltração na camada de cobertura e interior

das células de aterramento, somando a materiais dissolvidos ou suspensos que foram extraídos da massa do resíduo (ALVES, TESSARO & CASSINI, 2010).

O chorume possui uma grande quantidade de matéria orgânica, elevada concentração de nitrogênio e também são encontrados nele alguns íons metálicos. Além disso, possui elevada turbidez, grande quantidade de material em suspensão, seu pH também varia com tempo de aterramento, mas geralmente encontra-se na faixa de 6,5-7,5 sua biodegradabilidade varia com o tempo e é dependente da razão DBO/DQO, sendo o mesmo refratário a biodegradação (IWAI,2005).

Devido às características singulares do chorume, muitos estudos têm sido feitos no sentido de buscar tratamentos eficientes. De um modo geral se aplicam tratamentos semelhantes aos de águas residuárias, sendo os mais utilizados os tratamentos biológicos. Porém a complexidade do chorume tem dificultado a eficiência dos tratamentos, podendo citar a elevada carga orgânica, a grande concentração de nitrogênio e a existência de íons metálicos tóxicos. Por exemplo, a DQO e a DBO do chorume pode chegar a 200 vezes o valor encontrado em esgotos sanitários.

Ainda é importante ressaltar que cada aterro possui características próprias, gerando chorume com características particulares que variam e se tornam mais complexas com o passar dos anos.

Os processos amplamente utilizados são aqueles baseados em tratamentos físico-químicos ou tratamentos biológicos. Contudo a ineficiência dos tratamentos atuais tem motivado estudos para a utilização de novas tecnologias, como processos oxidativos avançados, tratamento com ozônio e fotocatalise heterogênea.

## 2.6 MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DO OZÔNIO

Existem diferentes métodos para a quantificação de ozônio. Esses métodos são classificados como físicos, químicos e físico-químicos. Os métodos físicos são baseados em medidas de propriedades particulares do ozônio, como a intensidade de absorção no espectro ultravioleta, do visível ou do infravermelho. Os métodos físico-químicos medem os efeitos físicos da reação de ozônio com diferentes tipos de reagentes, como os efeitos da luminescência química ou o calor da reação. Os métodos químicos medem a quantidade dos produtos da reação decorrentes da reação com o ozônio com uma determinada substância, geralmente iodeto de potássio (KI) ou iodeto de hidrogênio (HI) (CHIATTONE, TORRES & ZAMBIAZI, 2008).

Os reagentes utilizados para determinação do ozônio são oxidados pelo próprio ozônio, mas podem também ser oxidados por muitos produtos de decomposição da oxidação do ozônio. Devido à presença desses oxidantes secundários, os métodos analíticos para quantificação de ozônio medem a totalidade de oxidantes presentes. Os métodos mais utilizados atualmente para a determinação da quantidade de ozônio são o colorimétrico ou o índigo azul, o iodométrico e o eletroquímico. Entre estes, o método mais utilizado é o iodométrico, que é aceito pela Associação Internacional de Ozônio na Europa (SANTOS,2008)

## 2.7 TRANSFERÊNCIA DE MASSA E DIFUSÃO DO OZÔNIO

A aplicação do ozônio no tratamento de águas e efluentes é sempre realizada pela dispersão do gás na água ou no efluente (entre 0,4 e 5 gO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> de água, ou seja em torno de 0,01 a 0,2 Nm<sup>3</sup> de ar/m<sup>3</sup> de água). Várias formas de difusão são utilizadas, sendo os mais comuns reatores ou tanques de contato para difusão de ar ozonizado através de placas porosas, aplicáveis para águas com baixa turbidez e fracamente concentradas em metais precipitáveis, isto é, geralmente em inter-ozonização e em pós-ozonização; hidrojetores, emulsantes e misturadores estáticos, aplicáveis principalmente para as águas brutas em pré-ozonização. O transporte de massa corresponde ao fenômeno de difusão, regido pela Lei de Fick, descrita pela Equação 1 para os fenômenos de transporte sob a forma:

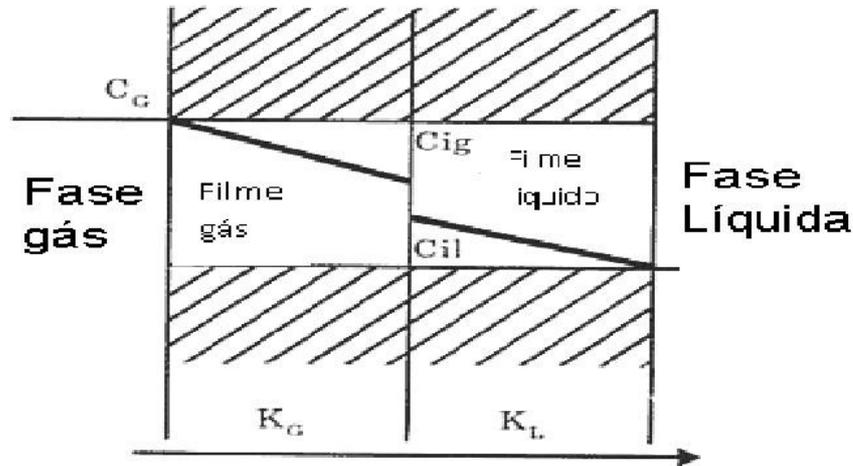
$$J = -CD_{AB} \nabla X_A \quad (1)$$

onde C é a concentração molar total (mol/cm<sup>3</sup>), D<sub>AB</sub> é o coeficiente de difusão da espécie A em relação à espécie B (cm<sup>2</sup>/s), J<sub>A</sub> é a densidade de fluxo molar de difusão (mol/cm<sup>2</sup>.s) e X<sub>A</sub> é a fração molar da espécie A.

O fluxo é definido como a quantidade física transportada por unidade de área perpendicular à direção de transporte e por unidade de tempo. O sinal negativo indica que o transporte se dá no sentido de menor concentração da espécie A, ou seja, o transporte de massa se dá da região de maior concentração para de menor concentração.

A transferência de matéria de uma fase para outra é denominada transferência de massa. Em um sistema gás - líquido, há dois filmes, um para cada fase. Em casos mais comuns o gás é borbulhado na fase líquida, como no caso do ozônio dissolvido em água, de modo que a superfície interfacial criada é devida à superfície externa das bolhas (BELTRÀN,

2003). Como resultado é gerado um gradiente de concentração. A Figura 3 representa o modelo de transferência de massa para o ozônio (modelo dupla camada).



**Figura 3.** Modelo para transferência de massa do ozônio em água; onde  $K_G$  é o coeficiente de transferência de massa na fase gás e  $K_L$  é o coeficiente de transferência de massa na fase líquida.

Durante a transferência de ozônio a partir de gás para líquido, ocorrem as seguintes etapas: a difusão do ozônio gasoso para fase líquida, para então dissolver-se no líquido e, por final, a difusão no líquido. Embora, a transferência de massa do ozônio na água não ser um processo muito bem compreendido, sabe-se que a eficiência desse processo depende de alguns fatores como a concentração de ozônio gasoso, da área de contato gás - líquido, da turbulência (SUMMERFELT & HOCHHEIMER, 1997).

### 2.7.1 Influência do tamanho das bolhas

O aumento de transferência de massa pelo aumento da área de contato entre gás – líquido pode ser feito pela redução do tamanho das bolhas. A área de superfície das bolhas é inversamente proporcional ao diâmetro das mesmas, bolhas menores têm maior área de superfície para mesmo volume de gás e mesmo volume de líquido. Portanto, a transferência de massa será aumentada quando forem usadas técnicas em que se diminua o tamanho da bolha (SUMMERFELT & HOCHHEIMER, 1997).

Microbolhas são definidas como bolhas que têm diâmetro menor que  $10 \mu\text{m}$ . Comparada com o diâmetro de bolhas convencionais, que possuem diâmetro de vários milímetros, as microbolhas possuem uma enorme área interfacial, um pequeno aumento na velocidade em fase líquida e pressão interna alta. Como consequência, a aplicação de

microbolhas em processos de ozonização pode oferecer uma nova abordagem para melhorar a eficiência de ozonização (CHU et. al., 2007).

## 2.8 ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA O AUMENTO DA TRANSFERÊNCIA DE MASSA

Existem vários dispositivos que podem ser usados para melhorar a transferência de massa de ozônio em água, os dois processos mais frequentemente usados são o borbulhamento do gás através de pedras difusoras (através de uma coluna de água) e a injeção de ozônio em água (mistura agressiva) através de um venturi (Mc COLLUN, 2008). Quando se começou a usar ozônio para o tratamento de água potável, o principal método utilizado para borbulhar ozônio na solução a ser tratada e aumentar a transferência de massa eram as pedras difusoras. Entretanto, hoje, são mais utilizados venturis, baseados em sistemas de transferência de massa integrados.

Na tentativa de aumentar a eficiência da transferência de massa de ozônio, diferentes métodos vêm sendo estudados para a produção de microbolhas, principalmente os que utilizam geradores do tipo descompressão, circulação gás – água e do tipo venturi. Para geradores do tipo descompressão, a condição de dissolução supersaturada do gás é dada pelas altas pressões (304-405 kPa). A uma pressão tão alta, o gás supersaturado é altamente instável, e eventualmente escapa para fora da água. Como resultado, um grande número de microbolhas é criado instantaneamente. Já em geradores do tipo circulação de gás – água, o gás é introduzido num vórtice de água e as bolhas são posteriormente divididas em microbolhas ao quebrar o vórtice. Semelhante ao método de geração por descompressão, o gerador de microbolhas do tipo venturi tem sido amplamente utilizado. Este tem como vantagem o tamanho compacto, baixa potência de bomba e a geração de alta densidade de microbolhas, normalmente com diâmetro inferior a 10  $\mu\text{m}$ . Além desses métodos para geração de microbolhas, tem sido usado um eletrodo de paládio acoplado com um ultrassom, capaz de gerar inclusive nanobolhas (AGARWAL, JERN & LIU, 2011).

Por outro lado, têm sido pesquisados e testados novos materiais para o aumento de transferência de massa de ozônio através da geração de microbolhas. Recentemente, estudaram-se as bolhas formadas pela dispersão de um gás através dos poros de uma membrana cerâmica e notou-se que formava bolhas de diâmetro na faixa de 0,05 a 10  $\mu\text{m}$ . Desse modo, a utilização de uma membrana para o desenvolvimento de um aparelho de alta eficiência para dispersão de gás mostrou-se promissora (TRUSHIN, DIMITRIEV & AKIMOV, 2010). Estudos recentes também foram realizados com tubos porosos de PTFE

(teflon) para testar a eficácia da transferência de massa de ozônio na água. Esse tipo de tubo, geralmente utilizados em piscinas, se mostrou um processo de borbulhamento benéfico para a redução dos níveis de bactérias, comportando-se de modo semelhante aos difusores de ar e pedra porosa (ROSEMAN, 2004).

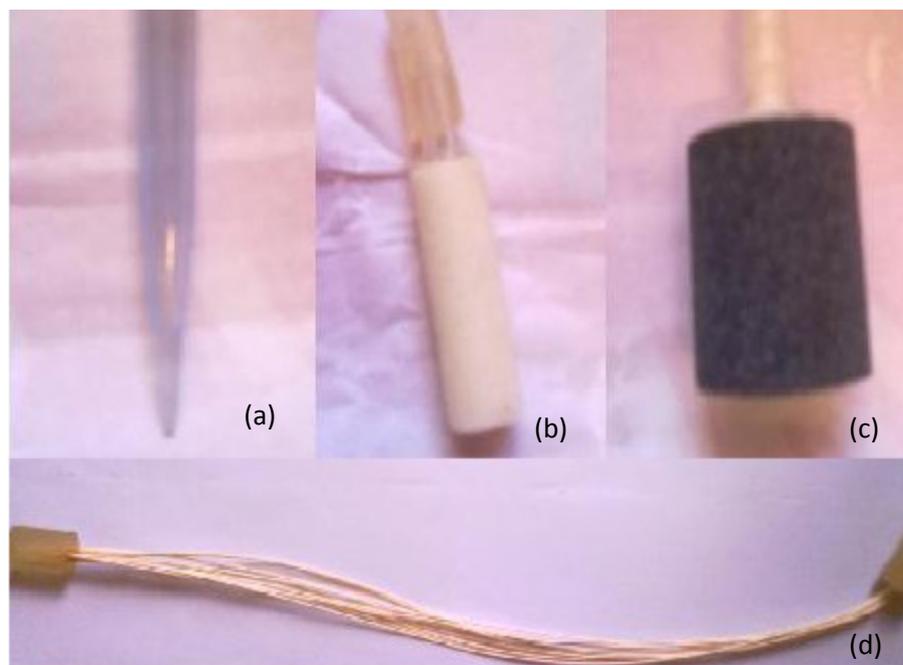
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse trabalho o estudo do aumento da transferência de massa de ozônio foi avaliado, utilizando para tanto diferentes materiais para a produção de microbolhas, através da produção de ozônio em uma solução de iodeto de potássio e pela resposta da amostra de chorume a cada tipo de módulo testado.

A produção de bolhas com diferentes diâmetros foi testada através de uma ponta de pipeta, pedras porosas com diferentes tamanhos de poro e porosidades e membrana polimérica.

#### 3.1 MEIOS POROSOS

Na Figura 4 estão apresentados os diferentes materiais utilizados para aumentar a eficiência da produção de ozônio. A ponta de pipeta (Figura 4a) foi utilizada como sendo o método de geração de bolhas convencional, os demais foram usados com o intuito de produzirem microbolhas de ozônio: pedra porosa 1 (Figura 4b), pedra porosa 2 (Figura 4c) e membrana polimérica (Figura 4d). As pedras porosas, embora não tragam especificações do fabricante, visualmente diferenciam entre si quanto a área superficial (maior para pedra porosa 2) e quanto ao tamanho dos poros (maior para pedra porosa 1).

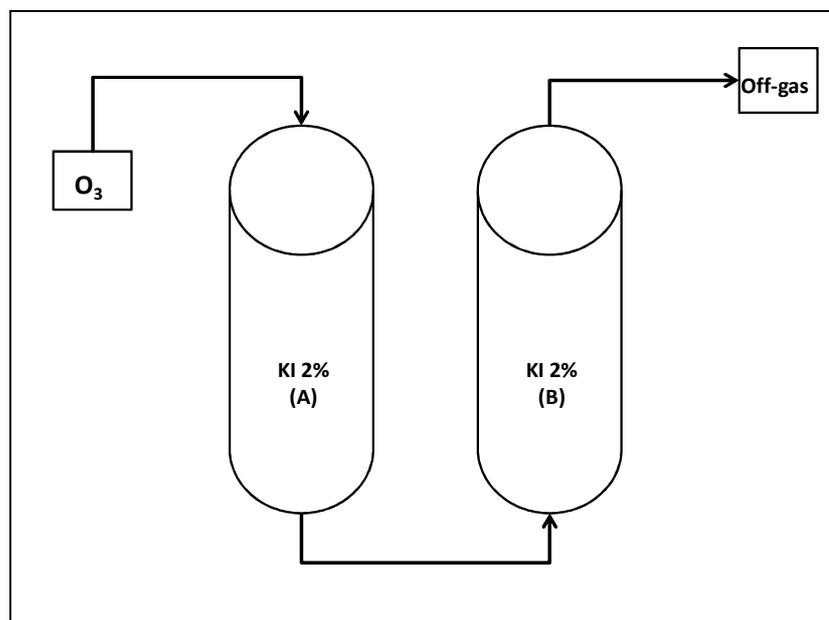


**Figura 4.** Imagem dos materiais utilizados para geração de bolhas e microbolhas de ozônio: (a) ponta de pipeta; (b) pedra porosa 1; (c) pedra porosa 2; (d) membrana polimérica.

### 3.2 SISTEMA OPERACIONAL PARA OZONIZAÇÃO

Para a realização do experimento, foi utilizado um sistema de ozonização, cujo fluxograma simplificado está apresentado na Figura 5. O gás ozônio foi obtido por meio de um gerador de ozônio baseado no método Efeito Corona, desenvolvido pela empresa *Ozonium Systems Ltda.* No processo de geração de ozônio foi utilizado oxigênio analítico, grau de pureza 4,0. Todos os experimentos foram realizados no LASEM (Laboratório de Separação por Membranas), localizado na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

A amostra a ser ozonizada, de KI 2% ou chorume, é inserida no primeiro frasco borbulhador de gás (frasco A, conforme a Figura 4). A seguir, abriu-se a válvula do cilindro de oxigênio puro e ajustou-se o rotâmetro para vazão desejada, de 1L/min; em seguida, liga-se o ozonizador e inicia-se a contagem no cronometro relativo ao tempo de ozonização da amostra.



*Figura 5. Esquema representativo do sistema de ozonização.*

A quantidade de ozônio produzida para cada módulo gerador de microbolhas foi possível de ser calculada através do borbulhamento direto de ozônio em uma solução de iodeto de potássio (KI) 2%, para cada módulo foi usado um volume de 1L. Posteriormente, testou-se cada módulo gerador de microbolhas em uma amostra de chorume, utilizando para tanto 500 mL para cada módulo.

O tempo de ozonização para cada módulo, quando testado em solução de iodeto de potássio, foi de 2 min, numa vazão de O<sub>2</sub> de 1 L/min. Já para a amostra de chorume o tempo de ozonização foi de 1h para cada módulo, numa vazão de O<sub>2</sub> de 1 L/min.

### 3.3 DETERMINAÇÃO DA PRODUÇÃO DE OZÔNIO

O método utilizado para quantificar a produção de ozônio (O<sub>3</sub>) foi o iodométrico, por meio de titulação indireta, utilizando-se de volumetria de oxirredução. Esse método, descrito na literatura (EATON, 2005), consiste no borbulhamento do ozônio residual em uma solução de iodeto de potássio (KI).

A reação empregada para a determinação quantitativa da massa de ozônio em corrente gasosa consiste na liberação do iodo (I<sub>2</sub>) na solução de iodeto de potássio. Nesta reação, o elemento ativo é o oxigênio atômico liberado pela molécula de ozônio, que se reverte em oxigênio molecular. A reação de oxidação de iodeto de potássio pelo ozônio é dada pela equação (3):



Para garantir o deslocamento da reação para a produção de I<sub>2</sub> é necessário acidificar o meio. Para tal, após o borbulhamento de ozônio ter cessado, foram adicionados na solução de KI 10 mL de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 2N para reduzir o pH abaixo de 2. Então foi feita a determinação do ozônio que reagiu pela titulação com tiosulfato de sódio, S<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>-2</sup>. O iodo liberado é titulado com uma solução de padronizada de tiosulfato de sódio 1N. A reação de oxidação dos íons tiosulfato pelo iodo produz o tetracionato, dada pela equação (4) abaixo:



Inicialmente foram testados os tempos de 1 a 5 min para que o ozônio fosse absorvido pela solução de KI. Verificou-se que o tempo de 2 min era o melhor tempo para a absorção do ozônio em 1 L de KI 2%. Na Figura 6 observa-se a mudança de coloração durante a titulação com tiosulfato de sódio para quantificação do iodo (I<sub>2</sub>).



**Figura 6.** Titulação iodométrica para a determinação da quantidade de ozônio absorvida pela solução de iodeto de potássio.

Devido à instabilidade do ozônio, a determinação da quantidade de ozônio residual no meio deve ser feita imediatamente após o fim do borbulhamento. Para determinar a massa de  $O_3$ , em mg, calcula-se a sua massa a partir da equação (5):

$$\text{Ozônio residual (mg)} = V \times N \times 24, \quad (5)$$

onde  $V$  é a média dos volumes titulados em mL,  $N$  é a normalidade do tiosulfato de sódio em mg/mEq e 24 é o fator de conversão (24.000 mEq/L por 1.000 mL/L).

### 3.4 CHORUME

A amostra de chorume foi coletada de um aterro sanitário localizado no Rio Grande do Sul. Foram coletados 10L de chorume, armazenados em frascos plásticos brancos e mantidos sob refrigeração. Nesse trabalho foram usados como parâmetros para sua caracterização as análises de pH e turbidez.

No início dos experimentos, utilizando as amostras de chorume, foi constatada a necessidade da utilização de antiespumante, uma vez que a quantidade de espuma formada durante a ozonização impossibilitava os testes. A espuma formada durante o processo de ozonização pode ser visualizada na Figura 7. Para solucionar esse problema foi usado o antiespumante *Dow Corning® 1920*, numa concentração de 0,05 g para amostras de 500 mL, de acordo com as recomendações do fabricante.



*Figura 7. Espuma formada durante o processo de ozonização do chorume.*

### 3.5 CARACTERIZAÇÃO DO CHORUME

#### 3.5.1 Avaliação da cor

No desenvolvimento deste trabalho utilizou-se a redução da cor do chorume como indicador de eficiência da ozonização. Primeiramente se fez um estudo apenas visual, um comparativo entre a cor do chorume antes e depois da ozonização para cada tratamento utilizado. Complementarmente, determinou-se o coeficiente de cor DFZ para os comprimentos de onda de 436, 525 e 620 nm, conforme descrito na norma alemã DIN 7887/1994 para determinação de cor em efluentes (GONÇALVES, 2007).

##### 3.5.1.1 Coeficiente de Cor (DFZ)

O procedimento para determinação do índice de cor segue a norma alemã DIN 7887/1994. A amostra bruta e as alíquotas do efluente tratado pelos diferentes métodos de geração de microbolhas de ozônio foram analisadas em um espectrofotômetro UV-Visível Varian, modelo Cary 1E, em cubetas de 1 cm de caminho ótico para os comprimentos de onda de 436, 525 e 620 nm.

O coeficiente de cor foi determinado pela equação (6):

$$DFZ = \frac{A}{m} \quad (6)$$

onde  $A$  é a absorvância e  $m$  o caminho ótico, em metros.

### **3.5.2 Medidas de pH**

O pH foi medido em um pHmetro Denver Instruments (modelo UB-10). O pHmetro foi calibrado com soluções padrão tampão de pH 4 e 7, conforme indicado no manual do equipamento.

### **3.5.3 Medidas de turbidez**

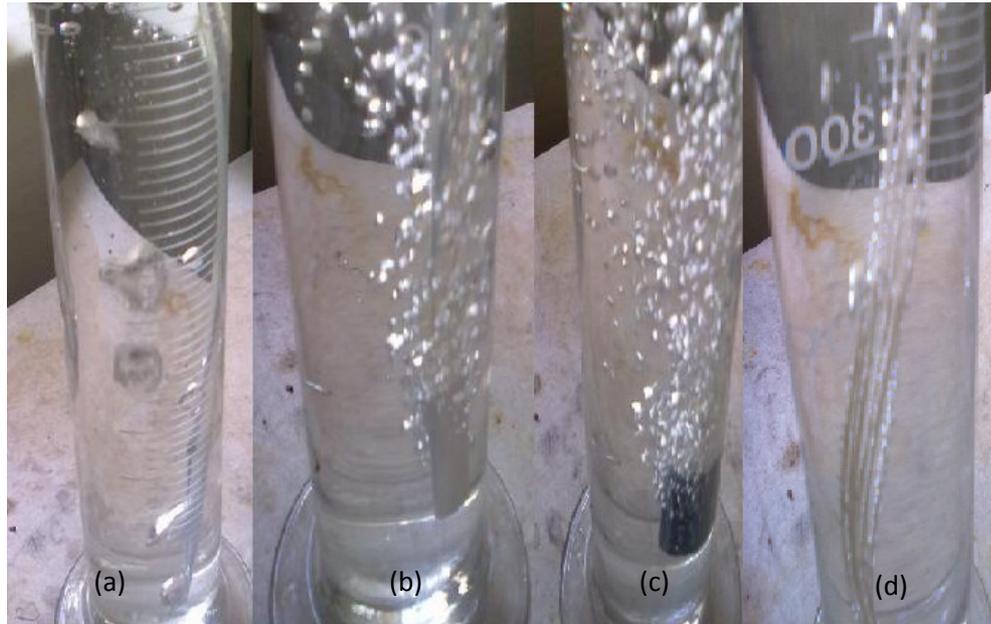
A turbidez foi determinada no turbidímetro da marca Policontrol, modelo AP 2000. O equipamento foi calibrado seguindo-se as instruções do manual.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse tópico são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante este trabalho; primeiramente os resultados dos experimentos para a produção de ozônio utilizando diferentes meios porosos, borbulhado diretamente sobre uma solução de iodeto de potássio. Após, são apresentados e analisados os resultados quanto à redução de cor para amostras de chorume ozonizadas, utilizando para tanto os mesmos materiais.

### 4.1 PRODUÇÃO DE BOLHAS OZÔNIO UTILIZANDO DIFERENTES MATERIAIS

Para difundir o ozônio utilizaram-se quatro diferentes meios: ponta de pipeta, duas pedras porosas e uma membrana polimérica. Na Figura 8 estão apresentadas as fotografias dos experimentos utilizando os diferentes materiais para a produção de ozônio em uma solução de iodeto de potássio. Nessa figura observa-se que o tamanho das bolhas produzidas pela membrana porosa (Figura 8d) foi menor, porém em menor quantidade, indicando que a membrana impede em parte a passagem do gás. Ainda nessa figura verifica-se que a maior intensidade de bolhas foi para pedra porosa 2 (Figura 8c). Este resultado está associado ao diferente tamanho dos poros e à porosidade de cada material.



**Figura 8.** Fotografias dos processos de produção de bolhas para os diferentes materiais utilizados: (a) ponta de pipeta; (b) pedra porosa 1; (c) pedra porosa 2; (d) membrana polimérica.

Para verificar se o tamanho das bolhas influencia transferência de massa de ozônio foi avaliada a produção de ozônio para os diferentes materiais testados e os resultados podem ser observados na Tabela 4. Nesta tabela verifica-se que as pedras porosas 1 e 2 apresentaram a maior produção de ozônio, igual a aproximadamente 2,2 mg de  $O_3$ . A membrana polimérica gerou bolhas visivelmente menores e uma menor quantidade de ozônio, este resultado pode estar relacionado com a pequena área de membrana utilizada, fazendo com que a quantidade de bolhas produzidas e conseqüentemente de ozônio seja menor do que para as pedras porosas.

Uma vez que não foi medido o real tamanho das bolhas não há uma garantia de que as bolhas produzidas sejam realmente microbolhas. Entretanto, é possível observar através das fotografias que o menor tamanho de bolha é atribuído a membrana polimérica.

Tabela 4: Produção de ozônio para os diferentes materiais utilizados.

<b>Materiais</b>	<b>O<sub>3</sub> (mg)</b>
<b>Ponta de pipeta</b>	1,274±0,060
<b>Pedra porosa 1</b>	2,245±0,276
<b>Pedra porosa 2</b>	2,253±0,156
<b>Membrana polimérica</b>	1,739±0,008

## 4.2 APLICAÇÃO DE OZÔNIO PARA A REDUÇÃO DA COR DO CHORUME

### 4.2.1 Caracterização do chorume

A caracterização do chorume foi feita através de medidas de pH e turbidez. A Tabela 5 mostra os resultados obtidos para o chorume bruto assim como para os tratamentos com os diferentes materiais utilizados nesse trabalho. A partir dos resultados obtidos pode-se notar um aumento do pH para as amostras de chorume ozonizadas com os diferentes materiais em comparação com o chorume bruto. A transferência de ozônio para a água baseia-se em conceitos de equilíbrio. A solubilidade do ozônio na água pura é dependente do pH (ela diminui quando o pH aumenta), ao passo que a velocidade de transferência depende de numerosas variáveis.

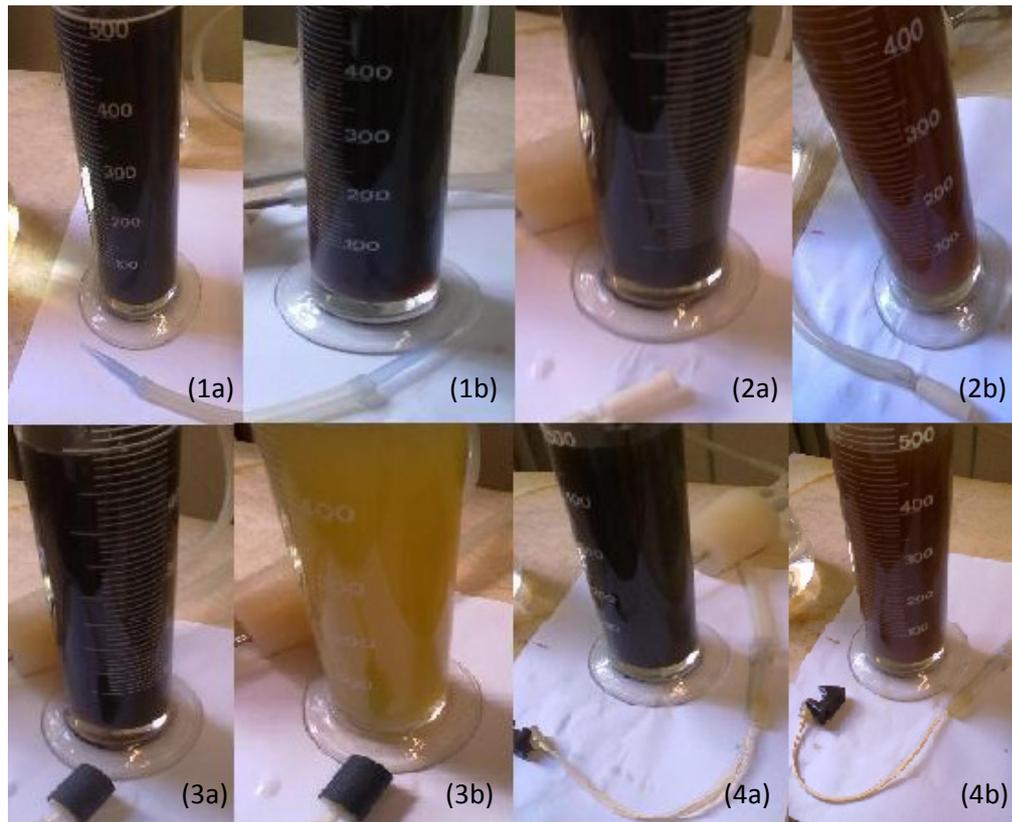
A Tabela 5 também mostra que apenas o tratamento com a pedra porosa 2 (Figura 4c) resultou em uma redução de turbidez do efluente.

Tabela 5: Caracterização do chorume bruto e ozonizado utilizando como parâmetros as medidas de pH e turbidez.

<b>Tratamento</b>	<b>pH</b>	<b>Turbidez (NTU)</b>
<b>Chorume Bruto</b>	7,02	1999
<b>Ponta de pipeta</b>	7,17	1999
<b>Pedra Porosa 1</b>	7,34	1999
<b>Pedra Porosa 2</b>	7,51	794
<b>Membrana Polimérica</b>	7,45	1999

#### 4.2.2 Avaliação da redução de cor do chorume

Para analisar a redução de cor do chorume foram utilizados dois parâmetros, a redução de cor aparente (visual) e o índice de cor dado pelo coeficiente *DFZ*. Na Figura 9 estão apresentadas as fotografias para cada experimento de ozonização utilizando os diferentes materiais. O tempo de ozonização foi de 1h para todos os materiais, utilizando para tanto uma vazão de oxigênio  $1 \text{ L.min}^{-1}$ . Pelas fotografias é possível observar que para a ozonização com a ponta de pipeta (Figura 8a) não houve mudança aparente na cor. O melhor resultado foi obtido para a pedra porosa 2 (Figura 9c), que era o esperado uma vez que foi o material que apresentou uma das maiores produção de ozônio.



*Figura 8: O antes e depois das amostras de chorume ozonizadas e os respectivos materiais utilizados, onde: (1a) chorume bruto, (1b) chorume ozonizado (ponta de pipeta); (2a) chorume bruto, (2b) chorume ozonizado (pedra porosa 1); (3a) chorume bruto, (3b) chorume ozonizado (pedra porosa 2); (4a) chorume bruto), (4b) chorume ozonizado (membrana polimérica).*

Na Tabela 6 estão apresentados os resultados para o coeficiente *DFZ* e seus respectivos desvios. O índice de cor *DFZ* foi calculado para o chorume bruto e para as amostras ozonizadas com os diferentes materiais para os comprimentos de onda de 436nm, 525nm e 620nm. O menor valor de *DFZ* nos três comprimentos de onda medido foi para a pedra porosa 2, comprovando que, para as condições testadas, foi o material mais eficiente para a redução de cor.

Os testes em que foi utilizada a pedra porosa 2 apresentaram a melhor redução de cor para as amostras de chorume. Os resultados de geração de ozônio para as pedras porosas 1 e 2 são praticamente os mesmos, no entanto observa-se que as bolhas geradas pela pedra porosa 2 são menores e também em maior quantidade, o que confirma a hipótese de que quanto menor o tamanho das bolhas e maior a porosidade melhor o processo de transferência de massa.

A membrana polimérica apresentou as menores bolhas e uma menor quantidade de ozônio quando comparada com as placas porosas, para verificar se este material é mais eficiente seria necessário aumentar a área de membrana de forma a se obter o mesmo volume de ozônio gerado. Outro aspecto importante em relação ao material polimérico é a sua durabilidade, uma vez que o ozônio é um forte oxidante que pode degradar o material polimérico e contaminar a água que está sendo tratada. Uma alternativa neste caso é o emprego de membranas cerâmicas.

Tabela 6: Índice de cor medido pelo coeficiente DFZ

Tratamento	Coeficiente <i>DFZ</i>		
	436 nm	525 nm	620 nm
<b>Chorume Bruto</b>	0,9943	0,9885	0,9846
<b>Ponta de pipeta</b>	0,9920	0,9866	0,9823
<b>Pedra porosa 1</b>	0,9890	0,9837	0,9802
<b>Pedra porosa 2</b>	0,9810	0,9761	0,9732
<b>Membrana Polimérica</b>	0,9902	0,9847	0,9807

\*Desvios maiores que  $10^{-6}$ .

## 5 CUSTOS E IMPACTO AMBIENTAL

A avaliação dos custos para uma ozonização utilizando pedra porosa, a qual apresentou o melhor resultado, foram levantados em nível de bancada. A pedra porosa 2 utilizada nesse trabalho apresenta baixo valor agregado (R\$ 3,00), enquanto que o oxigênio puro utilizado para a produção de ozônio possui um alto valor agregado (R\$ 10,05/litro).

Uma alternativa tecnológica para redução do valor agregado ao processo é utilizar um concentrador de oxigênio do ar. O valor de mercado de um concentrador de oxigênio para ser utilizado em escala de laboratório varia em torno de R\$ 2.500 (concentrador de oxigênio *Everflo – Respironics*) a R\$3.000 (concentrador de oxigênio *PerfectO2 – Invacare*). Para a indústria um concentrador de oxigênio tem seu preço dependente da vazão máxima de oxigênio produzida, podendo variar de R\$ 12.000 (vazão de 8L/min de O<sub>2</sub>) a R\$ 500.000 (vazão de 500L/min de O<sub>2</sub>). Os concentradores de oxigênio podem gerar oxigênio em concentrações maiores que 90%, que é muito superior a do ar ambiente (21%). Além de ele produzir uma quantidade ilimitada de oxigênio, possuindo uma vida útil média de 2 anos.

O uso da tecnologia do ozônio em escala industrial tem como principal desvantagem um alto investimento inicial. Dados cedidos pela empresa *Ozonium Systems* mostram que o valor para uma estação de tratamento de efluente com ozônio é dependente da vazão de ozônio por hora, podendo variar entre R\$ 36.000 (8gO<sub>3</sub>/h) a R\$ 55.000 (45gO<sub>3</sub>/h). Entretanto, em longo prazo é um investimento que reduzirá custos, pois o processo de ozonização descarta a utilização de outros reagentes descolorantes que aumentam a carga tóxica do efluente; não há geração de subprodutos do tratamento, pois o ozônio residual se decompõe em oxigênio; o ozônio é produzido no momento do consumo, não havendo necessidade de estoque como em outros métodos. Além de todas essas vantagens, a tecnologia do ozônio é limpa, segura e sustentável.

A tecnologia de ozônio utilizando microbolhas ainda precisa ser desenvolvida, aprimorando o melhor método para a geração de microbolhas, seja ele por material poroso ou de forma mecânica. Mas devido há relatos, disponíveis na literatura, que evidenciam a melhora do processo com a utilização de microbolhas acredita-se que é promissor o desenvolvimento de um gerador de microbolhas de ozônio que possa ser usado em nível industrial e nas mais variadas aplicações tecnológicas.

## 6 CONCLUSÕES

Para esse trabalho verificou-se que o menor tamanho de bolha gerada para os diferentes materiais usados foi para membrana polimérica; enquanto que a ponta de pipeta foi a que obteve o maior tamanho de bolha. Não foi possível calcular o diâmetro médio das bolhas, como proposto primeiramente, pois não se achou a forma mais adequada para fazê-lo; seriam necessários muitos testes e um software de análise de imagens.

A eficiência na redução da cor do chorume pelo ozônio foi maior principalmente para a pedra porosa 2, onde a redução de cor aparente foi a melhor bem como o índice de cor, determinado pelo coeficiente *DFZ*, foi o menor para os três comprimentos de onda nos quais foi calculado.

As pedras porosas 1 e 2 foram os materiais que apresentaram as maiores produções de ozônio. Mas, devido à pedra porosa 2 produzir aparentemente uma maior quantidade de bolhas, devido a sua quantidade de poros e porosidade, foi a que obteve uma maior redução de cor do chorume após a ozonização, tanto aparente como a calculada pelo coeficiente *DFZ*; enquanto que a ponta de pipeta apresentou a menor produção de ozônio bem como a menor redução de cor pelo avaliando-se o coeficiente *DFZ*, sendo que não houve melhora nenhuma quando se avalia a sua cor aparente antes e depois da ozonização.

A pedra porosa 2 foi o único material que mostrou diminuição de turbidez em relação ao chorume bruto, nas condições testadas. Sendo também o material que teve maior aumento de pH.

Uma vez que foi possível provar que a transferência de massa aumenta com a redução do tamanho do diâmetro das bolhas, sugere-se para trabalhos futuros testar um módulo de membrana polimérica com maior área capaz de produzir uma mesma quantidade de ozônio que as pedras porosas. Bem como fazer uso de novos materiais porosos, como por exemplo, membranas cerâmicas e tubos teflon na tentativa de conseguir bolhas ainda menores, e como consequência processos mais eficientes.

## 7 BIBLIOGRAFIA

- AGARWAL, A.; JERN, W.; LIU, Y. **Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment.** Chemosphere, v. 84, p. 1175-1180, 2011.
- ALVES, L. R.; TESSARO, I. C.; CASSINI, A. S. **Estudo do aumento da Biodegradabilidade de chorume de aterro sanitário.** Seminário do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, UFRGS, 2010.
- BELTRÀN, F.J. **Ozone rection kinectics for water and wastewater systems.** Nova Iorque: Lewis Publishers, 2003.
- CHERNICHARO, C.A.L. **Pós Tratamento de efluentes de reatores anaeróbicos.** Belo Horizonte: Segrac, 2001.
- CHIATONNE, P. V.; TORRES, L. M.; ZAMBIAZI, R. C. **Aplicação de ozônio na indústria de alimentos.** Alim. Nutr. Araraquara, v.19, n.3, p. 341-349, jul./set. 2008. ISSN 0103-425.
- CHU, L.; XING, X.; YU, A.; ZHOU, Y.; SUN, X.; JURCIK, B. **Enhanced ozonation of simulated dyestuff Wastewater by microbubble.** Chemosphere, v.68, p. 1854-1860, 2011.
- EATON, A. D. **Standart ethods for the examination of water and wastewater.** 21th edition, 2005.
- ELETRICIDADE. **Efeito corona, já ouviu ou viu falar?** Disponível em <<http://mundoeletrizado1a.blogspot.com>>. Acesso em: 30 out. 2011.
- GOGATE, P. R.; PANDIT, A. B. **A review of imperative technologies for wastewater treatment I: oxidation technologies at ambient conditions.** Advances in Environmental Research, v.8, p. 501-551, 2004.
- GONÇALVES, A. A.; KECHINSKI, C. P. **Ozone technology in food industry.** In: Brendam C. Siegler. (Org.). Refrigeration: Theory, Techonology and Aplications. Hauppauge, NY, 2011, 423p., ISBN 978-1-61728-913-2.
- GONÇALVES, M. J. **Biodescoloração de efluentes têxteis.** Faculdade de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis: s.n. 2007, p.113, Dissertação de mestrado em Engenharia Química.

IWAI, K. C. **Tratamento de chorume através de percolação em solos empregados como material de cobertura de aterros para resíduos sólidos urbanos.** Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de São Paulo. Bauru: s.n. 2005, p. 205, Dissertação de mestrado em Engenharia Industrial.

KECHINSKI, C. P. **Avaliação do uso de ozônio e de outros tratamentos alternativos para a conservação do mamão papaia (*Carica papaya L.*).** Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: s.n. 2009, p.10, Dissertação de Mestrado.

Mc COLLUN, S. B. F. **Mastering the fundamentals of ozone: mass transfer.** (2008). Disponível em: <<http://www.wqpmag.com/Mastering-the-Fundamentals-of-Ozone-Feed-Gas-Preparation-article9297>> Acesso em: 30 out. 2011.

RAKNESS, K.L. **Ozone in drinking water treatment: process design, operation and optimization.** 5 e.d. Denver: American Water Works Association, 2005.

RICE, R.G. **Principles and practices of chemical oxidation in wastewater treatment.** April 13-14,1996. Nashville, Tennessee.

ROSA, D. F. **Estudo preliminar da degradação de corantes têxteis através de processos oxidativos com ozônio.** Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: s.n. 2009, p.49, Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Química.

ROSEMAN, J. **Testing and applications of porous PTFE tubing for transferring ozone in to lake water to reduce bacteria, coliform and E. Coli** (2004). Disponível em: <<http://www.wqpmag.com/wqp/index.cfm?fuseaction=showArticle&articleID=5638&learnMore=yes&CFID=65510947&CFTOKEN=87924571>> Acesso em: 30 out. 2011.

SANTOS, J.E. **Difusão e cinética de decomposição do ozônio no processo de fumigação de grãos de milho (*Zea mays*).** Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Vicosa. Vicosa: s.n. 2008, p.64, Tese em Engenharia Agrícola.

SUMMERFELT, S. T.; HOCHEIMMER, J. N. **Review of ozone processes and applications as an Oxidizing Agent in Aquaculture.** The progressive fish-culturist, v.59, p.94-105, 1997.

TRUSHIN, A. M.; DMITRIEV, E. A.; AKIMOV, V. V. **Mechanics of the formation of microbubbles in gas dispersion through the pores of microfiltration membranes.** Theoretical Foundations of Chemical Engineering, v.45, p.26-32, 2011. ISSN 0040-5795

ZIMMERMAN, W.; TESAR, V.; BANDULASENA, H.C.H. **Towards energy efficient nanobubble generation with fluidic oscillation.** Current opinion in Colloid & Interface Science, v. 16, p. 350-356, 2011.

XU, P.; JANEX, M.; SAVOYE, P.; COCKX, A.; LAZAROVA, V. **Wastewater disinfection by ozone: main parameters for process design.** Water Research, vol.36, p. 1043-1045, 2002.