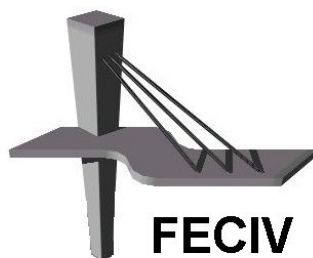


DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**OZONIZAÇÃO CONVENCIONAL E *GAS STRIPPING* NO PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE SANITÁRIO**

**RAÍSSA FARIA DE ARAÚJO**

**UBERLÂNDIA, 19/12/2018**



**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**  
**Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**



**Raíssa Faria de Araújo**

## **OZONIZAÇÃO CONVENCIONAL E *GAS STRIPPING* NO PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE SANITÁRIO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

**Orientador: Prof. Dr. Márcio Ricardo Salla**

Uberlândia, 19/12/2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

A659o  
2018      Araújo, Raíssa Faria de, 1990-  
            Ozonização convencional e gas stripping no pós-tratamento de  
            efluente sanitário [recurso eletrônico] / Raíssa Faria de Araújo. - 2018.

            Orientador: Márcio Ricardo Salla.

            Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

            Modo de acesso: Internet.

            Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.332>

            Inclui bibliografia.

            Inclui ilustrações.

            1. Engenharia civil. 2. Águas residuais - Purificação. 3. Ozonização.  
4. . I. Salla, Márcio Ricardo, 1976- (Orient.) II. Universidade Federal de  
Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III.  
Título.

---

CDU: 624

Maria Salete de Freitas Pinheiro - CRB6/1262



ATA

**ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGE**

**ATA Nº:** 231/2018

**CANDIDATO:** Raíssa Faria de Araújo      **Nº. Matrícula:** 11622ECV013

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Marcio Ricardo Salla

**TÍTULO:** “Ozonização convencional e *gas stripping* no pós-tratamento de efluente sanitário”.

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:** Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

**LINHA DE PESQUISA:** Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

**PROJETO DE PESQUISA:** Estudos de aproveitamento hídrico e autodepuração em bacias hidrográficas nas unidades de planejamento de gestão em recursos hídricos dos Rios Paranaíba e Grande (lado mineiro)

**DATA DA DEFESA:** 19 de dezembro de 2018

**LOCAL:** Sala de Reuniões Prof. Márcio Antônio Ribeiro da Silva, bloco 1Y.

**HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO:** 14:00h/17:00h

Reuniu-se na **Sala de Reuniões Prof. Márcio Antônio Ribeiro da Silva, bloco 1Y - Campus Santa Mônica** da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do PPGE, assim composta pelos professores doutores: **Patrícia Bilotta – PGAMB/UP; Maria Lyda Bolaños Rojas – FECIV/UFU e Marcio Ricardo Salla – FECIV/UFU**, orientador da candidata. Ressalta-se que a Prof.<sup>a</sup> Patrícia Bilotta participou da banca via webconferência desde a cidade Curitiba/PR e a discente e os demais membros da banca participaram in loco.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa **Prof. Dr. Marcio Ricardo Salla**, apresentou a Comissão Examinadora e concedeu à discente a palavra para a exposição do trabalho. A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou a candidata APROVADA. Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU. Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos e foi lavrada a presente ata que após lida e aprovada foi assinada pela Banca Examinadora.

**Membros titulares:**

Prof. Dr. Marcio Ricardo Salla – FECIV/UFU

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Patrícia Bilotta – PGAMB/UP

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Lyda Bolaños Rojas – FECIV/UFU

Uberlândia, 19 de dezembro de 2018.



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Ricardo Salla, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/12/2018, às 16:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Lyda Bolaños Rojas, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/12/2018, às 16:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Patricia Bilotta, Usuário Externo**, em 19/12/2018, às 17:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0887963** e o código CRC **2BCA40F0**.

À minha família pelo apoio imensurável  
prestado em todos os momentos de minha  
vida.

# AGRADECIMENTOS

---

A Deus por ter me concedido o dom da vida e por ter proporcionado fé, saúde e sabedoria ao longo desta árdua caminhada.

Ao meu pai, Antônio, por ser um verdadeiro exemplo de pai, sempre preocupado em zelar bem de sua família e proporcionar amor, carinho e conselhos valiosos. À minha mãe, Uilma, por ser a minha verdadeira amiga, minha guerreira, minha inspiração, por estar sempre me apoiando e dando palavras de apoio para superar as adversidades da vida e, além do mais, por demonstrar o amor puro de mãe em todas as suas atitudes. Hoje, tudo o que sou, eu agradeço à vocês.

Ao meu irmão, Renê, por ser o meu companheiro de todas as horas e se fazer presente em todos os momentos de minha vida, mesmo estando longe fisicamente. Obrigada por todas as suas atitudes que me motivaram continuar nesta caminhada.

Ao meu esposo e grande amor, Charles Augusto, por sempre ser tão atencioso e nunca deixar faltar amor em todas as suas atitudes. Obrigada por ser tão compreensivo nos momentos de ausência e por zelar tão bem da nossa família, me fazendo sentir a pessoa mais feliz e realizada.

A todos os meus amigos que se fizeram presentes ao longo de toda a caminhada, em especial à Júlia Borges e à Nathalia Cunha, por dividir os momentos de alegria e, principalmente, por me dar forças para superar o cansaço físico das viagens semanais para Uberlândia.

Ao meu professor e orientador, Márcio Ricardo Salla, por todo o conhecimento compartilhado e a disposição em ajudar em todos os momentos.

À Aline por compartilhar todo o conhecimento laboratorial e pelo auxílio prestado nos momentos de dificuldades enfrentados ao longo da pesquisa.

À Alessandra pelo auxílio prestado durante a realização dos ensaios laboratoriais e por compartilhar bons momentos durante esse período.

À professora Vicelma Luiz Cardoso por auxiliar no empréstimo do rotâmetro e do balão de destilação.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFU por todo o conhecimento técnico adquirido ao longo desse período.

Aos meus amigos e companheiros do IFG/Câmpus Uruaçu, em especial à Chefia de Departamento e ao NDE do curso de Engenharia Civil, por serem tão compreensivos e por proporcionarem condições de concluir esta etapa tão importante da minha vida.

Ao Instituto Federal de Goiás pelo apoio financeiro concedido por meio do Programa PIQS/IFG.

Ao DMAE pela disponibilidade do efluente em estudo, em especial ao Jader, por estar à frente na autorização das campanhas amostrais. Além do mais, à Sara e ao Fabiano, por serem tão prestativos em auxiliar durante todas as coletas realizadas.

Às professoras Maria Lyda e Patrícia Bilotta pela disposição em avaliar o presente trabalho.

A todos vocês, os meus sinceros agradecimentos!



ARAÚJO, R. F. **Ozonização convencional e *gas stripping* no pós-tratamento de efluente sanitário**. 146 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

## RESUMO

---

A presente pesquisa, de cunho experimental, focou-se no pós-tratamento de efluente sanitário por meio de ozonização convencional e *gas stripping* em coluna de borbulhamento. O efluente sanitário matriz é proveniente de uma cidade com aproximadamente 700 mil pessoas, efluente este tratado em reator UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) seguido por floculação/flotação. Quanto à configuração experimental, na ozonização convencional foram aplicadas cargas de ozônio de 2,07, 5,38 e 7,15 gO<sub>3</sub>/h (taxas de aplicação superficial de 127,4, 382,2 e 636,9 L/min.m<sup>2</sup>, respectivamente) para os tempos de contato entre as bolhas ascensionais e o meio líquido de 30 e 60 minutos. Os experimentos de *gas stripping* mantiveram as mesmas taxas de aplicação superficial e tempos de contato. Na ozonização convencional foram investigados os parâmetros pH, cor, turbidez, DQO, nitrogênio amoniacal, nitrato e *E. Coli*; enquanto que, no *gas stripping*, foram investigados os parâmetros pH, cor, turbidez, DQO, nitrogênio amoniacal e nitrato. O método estatístico da Anova permitiu identificar quais variáveis (vazão e tempo de contato) eram relevantes para as investigações experimentais em estudo. Na ozonização e arraste de gás, respectivamente, houve elevação nos valores de pH (10,39% ± 2,18 e 20,17% ± 1,04) e reduções nos parâmetros cor (89,11% ± 4,05 e 42,44% ± 6,97), turbidez (68,28% ± 9,78 e 36,51% ± 18,58), DQO (70,11% ± 8,87 e 35,49% ± 7,37), amônia (10,82% ± 1,55 e 9,25% ± 0,54) e *E. Coli* (99,82% ± 0,28); no entanto, o nitrato elevou-se apenas nos ensaios de ozonização (na ordem de 6 vezes), mantendo-se constantes nos de arraste de gases. Para todos os casos, os parâmetros físico-químicos e biológico não sofreram influências significativas das dosagens de gás aplicadas, mas apenas dos tempos de contato. Os resultados obtidos permitiram inferir que a ozonização é capaz de promover a remoção dos compostos orgânicos presentes no efluente em estudo por meio da oxidação e *gas stripping* de compostos orgânicos voláteis, ao passo que a

técnica de *gas stripping* se mostra capaz de remover os compostos orgânicos voláteis e a amônia livre. A partir dos resultados experimentais, estima-se que cerca de 50% da remoção de matéria orgânica durante os ensaios de ozonização convencional referem-se ao *stripping* de compostos orgânicos voláteis presente na massa líquida.

**Palavras-chave:** Ozonização convencional. *Gas stripping*. Efluente sanitário. Pós-tratamento.

ARAÚJO, R. F. **Conventional ozonization and gas stripping in post-treatment of sanitary effluent**. 146 p. MSc Dissertation, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2018.

## ABSTRACT

---

The present research, of experimental character, focused on post-treatment of sanitary effluent through conventional ozonation and gas stripping in bubbling column. The matrix sanitary effluent comes from a city with approximately 700 thousand people, effluent this treated in UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) reactor followed by flocculation/flotation. As for the experimental configuration, in the conventional ozonation were applied ozone loads of 2.07, 5.38 and 7.15 gO<sub>3</sub>/h (surface application rates of 127.4, 382.2 and 636.9 L/min.m<sup>2</sup>, respectively) to the contact times between the ascending bubbles and the liquid medium of 30 and 60 minutes. Gas stripping experiments maintained the same rates of surface application and contact times. In the conventional ozonation were investigated the pH, color, turbidity, COD, ammoniacal nitrogen, nitrate and *E. Coli* parameters; while, in the gas stripping, were investigated the pH, color, turbidity, COD, ammoniacal nitrogen and nitrate parameters. The statistical method of Anova allowed to identify which variables (flow rate and contact time) were relevant to the experimental investigations under study. In the ozonation and gas stripping, respectively, there was an increase in pH values (10.39% ± 2.18 e 20.17% ± 1.04) and reductions in color (89.11% ± 4.05 e 42.44% ± 6.97), turbidity (68.28% ± 9.78 e 36.51% ± 18.58), DQO (70.11% ± 8.87 e 35.49% ± 7.37) and ammoniacal nitrogen (10.82% ± 1.55 e 9.25% ± 0.54) and *E. Coli* (99.82% ± 0.28) parameters; however, nitrate was only raised in the ozonation tests (on the order of 6 times), remaining constant in the gas stripping. For all cases, the physical-chemical and biological parameters were not influenced significantly by the applied gas dosages, but only the contact times. The results obtained allowed to infer that the ozonation is able to promote the removal of the organic compounds present in the study effluent through of the oxidation and of the gas stripping of volatiles organic compounds, while the gas stripping technique is able to remove the volatiles organic

compounds and free ammonia. From the experimental results, it is estimated that about 50% of the organic matter removal during the conventional ozonation tests refers to the stripping of volatile organic compounds present in the liquid mass.

**Keywords:** Conventional Ozonation. Gas stripping. Sanitary effluent. Post-treatment.

# LISTA DE FIGURAS

---

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Estrutura molecular do ozônio .....  | 31 |
| Figura 2 - Esquema de geração do ozônio a partir do efeito corona .....   | 33 |
| Figura 3 - Decomposição do ozônio em meio aquoso por meio do mecanismo direto e indireto.....   | 34 |
| Figura 4 - Adição do ozônio em ligações insaturadas (Mecanismo de Criegee) .....  | 34 |
| Figura 5 - Decomposição do intermediário ozonídeo em carbonila e peróxido de hidrogênio.....  | 35 |
| Figura 6 - Reação eletrofílica do ozônio com compostos aromáticos .....   | 36 |
| Figura 7 - Reação nucleofílica do ozônio com compostos que possuem duplas ligações carbono-nitrogênio.....  | 36 |
| Figura 8 - Processo de transferência de massa gás-líquido: Teoria dos Dois Filmes.....  | 43 |
| Figura 9 - Diâmetro médio das bolhas de gás versus vazão de gás.....  | 44 |
| Figura 10 - Área interfacial específica em função da vazão de gás para a água de abastecimento público e esgoto doméstico, considerando o nível líquido de 1,80 m .....                       | 46 |
| Figura 11 - Velocidade ascendente de bolhas gás simples .....   | 47 |
| Figura 12 – Velocidade média das bolhas de ozônio (m/s) em função da vazão de ozônio aplicada (L/h). (h = 1,80 m).....  | 48 |
| Figura 13 - Velocidade média das bolhas de ozônio (m/s) em função dos cortes, para as vazões de ozônio aplicadas de 250 e 300 (L/h). (Seção 8).....   | 49 |
| Figura 14 - Classificação dos sistemas de arraste com base nos sentidos dos fluxos das fases líquida e gasosa: (a) contracorrente, (b) co-corrente e (c) cruzado .....                        | 51 |
| Figura 15 - Coleta de amostra no final do canal Flot-Flux 1 .....   | 54 |
| Figura 16 - Aparato experimental.....   | 56 |
| Figura 17 - Base da coluna de ozonização .....  | 57 |
| Figura 18 – Presença de espumas no final do canal Flot-Flux 1 da ETE Uberabinha .....   | 61 |
| Figura 19 – Espuma formada durante os ensaios de ozonização .....   | 63 |
| Figura 20 – Valores mínimos, máximos e médios de pH obtidos a partir da ozonização convencional: (a) 2,07 gO <sub>3</sub> /h, (b) 5,38 gO <sub>3</sub> /h e (c) 7,15 gO <sub>3</sub> /h ..... | 70 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 21 – Remoção da cor de uma amostra do efluente bruto da ETE Uberabinha a partir da aplicação da carga de ozônio de 2,07 gO <sub>3</sub> /h nos tempos de contato de 0, 30min e 60min .....  | 73  |
| Figura 22 – Valores médios de Cor (mg Pt-Co/L) e eficiências médias de remoção (%) obtidos a partir da ozonização convencional: (a) 2,07 gO <sub>3</sub> /h, (b) 5,38 gO <sub>3</sub> /h e (c) 7,15 gO <sub>3</sub> /h .....                   | 74  |
| Figura 23 - Valores médios de Turbidez (UNT) e eficiências médias de remoção (%) obtidos a partir da ozonização convencional: (a) 2,07 gO <sub>3</sub> /h, (b) 5,38 gO <sub>3</sub> /h e (c) 7,15 gO <sub>3</sub> /h .....                     | 77  |
| Figura 24 - Valores médios de DQO (mg O <sub>2</sub> /L) e eficiências médias de remoção (%) obtidos a partir da ozonização convencional: (a) 2,07 gO <sub>3</sub> /h, (b) 5,38 gO <sub>3</sub> /h e (c) 7,15 gO <sub>3</sub> /h .....         | 79  |
| Figura 25 - Valores médios de Nitrogênio Amoniacal (mg/L) e eficiências médias de remoção (%) obtidos a partir da ozonização convencional: (a) 2,07 gO <sub>3</sub> /h, (b) 5,38 gO <sub>3</sub> /h e (c) 7,15 gO <sub>3</sub> /h .....        | 82  |
| Figura 26 - Valores médios de Nitrato (mg/L) obtidos a partir da ozonização convencional: (a) 2,07 gO <sub>3</sub> /h, (b) 5,38 gO <sub>3</sub> /h e (c) 7,15 gO <sub>3</sub> /h .....   | 84  |
| Figura 27 - Valores médios de Inativação de <i>E. Coli</i> (log) e eficiências médias de remoção (%) obtidas a partir da ozonização convencional: (a) 2,07 gO <sub>3</sub> /h, (b) 5,38 gO <sub>3</sub> /h e (c) 7,15 gO <sub>3</sub> /h ..... | 87  |
| Figura 28 – Balanço de massa de ozônio: (a) 2,07 gO <sub>3</sub> /h, (b) 5,38 gO <sub>3</sub> /h e (c) 7,15 gO <sub>3</sub> /h   | 89  |
| Figura 29 - Valores mínimos, máximos e médios de pH obtidos a partir do ensaio de <i>gas stripping</i> : (a) 1 L/min, (b) 3 L/min e (c) 5 L/min .....  | 92  |
| Figura 30 - Valores médios de Cor (mg Pt-Co/L) e eficiências médias de remoção (%) obtidos a partir do ensaio de <i>gas stripping</i> : (a) 1 L/min, (b) 3 L/min e (c) 5 L/min .....   | 95  |
| Figura 31 - Valores médios de Turbidez (UNT) e eficiências médias de remoção (%) obtidos a partir do ensaio de <i>gas stripping</i> : (a) 1 L/min, (b) 3 L/min e (c) 5 L/min .....   | 97  |
| Figura 32 - Valores médios de DQO (mg O <sub>2</sub> /L) e eficiências médias de remoção (%) obtidos a partir do ensaio de <i>gas stripping</i> : (a) 1 L/min, (b) 3 L/min e (c) 5 L/min .....   | 99  |
| Figura 33 - Valores médios de nitrogênio amoniacal (mg/L) e eficiências médias de remoção (%) obtidos a partir do ensaio de <i>gas stripping</i> : (a) 1 L/min, (b) 3 L/min e (c) 5 L/min .....  | 102 |

Figura 34 - Valores médios de Nitrato (mg/L) obtidos a partir do ensaio de *gas stripping*:  
(a) 1 L/min, (b) 3 L/min e (c) 5 L/min..... 104

# LISTA DE TABELAS

---

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 1- Propriedades físico-químicas do ozônio.....  | 32  |
| Tabela 2 - Ensaio de natureza físico-química e biológica: parâmetros, metodologias, equipamentos e prazos para análise.....                | 65  |
| Tabela 3 – Características do efluente bruto proveniente da ETE Uberabinha.....  | 69  |
| Tabela 4 – Características do efluente bruto proveniente da ETE Uberabinha.....  | 91  |
| Tabela 5 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 2,07 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 1.....  | 118 |
| Tabela 6 - Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 5,38 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 1.....  | 118 |
| Tabela 7- Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 7,15 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 1.....   | 118 |
| Tabela 8 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 2,07 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 2.....  | 119 |
| Tabela 9 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 5,38 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 2.....  | 119 |
| Tabela 10 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 7,15 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 2..... | 119 |
| Tabela 11 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 2,07 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 3..... | 120 |
| Tabela 12 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 5,38 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 3..... | 120 |
| Tabela 13 - Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 7,15 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 3..... | 120 |
| Tabela 14 - Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 2,07 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 4..... | 121 |
| Tabela 15 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 5,38 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 4..... | 121 |
| Tabela 16 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 7,15 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 4..... | 121 |



|   |     |
|---|-----|
| Tabela 17 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 2,07 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 5.....  | 122 |
| Tabela 18 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 5,38 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 5.....  | 122 |
| Tabela 19 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 7,15 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 5.....  | 122 |
| Tabela 20 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 2,07 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 6.....  | 123 |
| Tabela 21 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 5,38 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 6.....  | 123 |
| Tabela 22 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 7,15 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 6.....  | 123 |
| Tabela 23 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 2,07 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 7.....  | 124 |
| Tabela 24 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 5,38 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 7.....  | 124 |
| Tabela 25 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 7,15 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 7.....  | 124 |
| Tabela 26 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 2,07 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 8.....  | 125 |
| Tabela 27 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 5,38 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 8.....  | 125 |
| Tabela 28 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 7,15 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 8.....  | 125 |
| Tabela 29 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 2,07 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 9.....  | 126 |
| Tabela 30 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 5,38 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 9.....  | 126 |
| Tabela 31 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 7,15 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 9.....  | 126 |
| Tabela 32 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 2,07 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 10..... | 127 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 33 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 5,38 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 10..... | 127 |
| Tabela 34 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para $P = 7,15 \text{ gO}_3/\text{h}$ – Amostra 10..... | 127 |
| Tabela 35 – Resultados experimentais obtidos no processo <i>gas stripping</i> para $Q = 1 \text{ L/min}$ – Amostra 1 .....                  | 128 |
| Tabela 36 – Resultados experimentais obtidos no processo <i>gas stripping</i> para $Q = 3 \text{ L/min}$ – Amostra 1 .....                  | 128 |
| Tabela 37 – Resultados experimentais obtidos no processo <i>gas stripping</i> para $Q = 5 \text{ L/min}$ – Amostra 1 .....                  | 128 |
| Tabela 38 – Resultados experimentais obtidos no processo <i>gas stripping</i> para $Q = 1 \text{ L/min}$ – Amostra 2 .....                  | 129 |
| Tabela 39 – Resultados experimentais obtidos no processo <i>gas stripping</i> para $Q = 3 \text{ L/min}$ – Amostra 2 .....                  | 129 |
| Tabela 40 – Resultados experimentais obtidos no processo <i>gas stripping</i> para $Q = 5 \text{ L/min}$ – Amostra 2 .....                  | 129 |
| Tabela 41 – Resultados experimentais obtidos no processo <i>gas stripping</i> para $Q = 1 \text{ L/min}$ – Amostra 3 .....                  | 129 |
| Tabela 42 – Resultados experimentais obtidos no processo <i>gas stripping</i> para $Q = 3 \text{ L/min}$ – Amostra 3 .....                  | 130 |
| Tabela 43 – Resultados experimentais obtidos no processo <i>gas stripping</i> para $Q = 5 \text{ L/min}$ – Amostra 3 .....                  | 130 |
| Tabela 44 – Resultados experimentais obtidos no processo <i>gas stripping</i> para $Q = 1 \text{ L/min}$ – Amostra 4 .....                  | 130 |
| Tabela 45 – Resultados experimentais obtidos no processo <i>gas stripping</i> para $Q = 3 \text{ L/min}$ – Amostra 4 .....                  | 130 |
| Tabela 46 – Resultados experimentais obtidos no processo <i>gas stripping</i> para $Q = 5 \text{ L/min}$ – Amostra 4 .....                  | 131 |
| Tabela 47 - Resultados experimentais obtidos no processo <i>gas stripping</i> para $Q = 1 \text{ L/min}$ – Amostra 5 .....                  | 131 |
| Tabela 48 – Resultados experimentais obtidos no processo <i>gas stripping</i> para $Q = 3 \text{ L/min}$ – Amostra 5 .....                  | 131 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 49 – Resultados experimentais obtidos no processo <i>gas stripping</i> para Q = 5 L/min – Amostra 5 .....   | 131 |
| Tabela 50 – Análise estatística para o parâmetro pH no processo de ozonização convencional.....  | 132 |
| Tabela 51 – Análise estatística para o parâmetro cor no processo de ozonização convencional.....   | 132 |
| Tabela 52 – Análise estatística para o parâmetro turbidez no processo de ozonização convencional.....  | 132 |
| Tabela 53 – Análise estatística para o parâmetro DQO no processo de ozonização convencional.....   | 132 |
| Tabela 54 – Análise estatística para o parâmetro nitrogênio amoniacal no processo de ozonização convencional.....  | 133 |
| Tabela 55 – Análise estatística para o parâmetro nitrato no processo de ozonização convencional.....   | 133 |
| Tabela 56 – Análise estatística para o parâmetro <i>E. Coli</i> no processo de ozonização convencional.....  | 133 |
| Tabela 57 - Análise estatística para o parâmetro pH no processo de <i>gas stripping</i> .....  | 134 |
| Tabela 58 – Análise estatística para o parâmetro cor no processo de <i>gas stripping</i> .....   | 134 |
| Tabela 59 – Análise estatística para o parâmetro turbidez no processo de <i>gas stripping</i> .  | 134 |
| Tabela 60 – Análise estatística para o parâmetro DQO no processo de <i>gas stripping</i> .....   | 134 |
| Tabela 61 – Análise estatística para o parâmetro nitrogênio amoniacal no processo de <i>gas stripping</i> .....  | 135 |
| Tabela 62 – Análise estatística para o parâmetro nitrato no processo de <i>gas stripping</i> ....  | 135 |
| Tabela 63 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 2,07 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 1..... | 136 |
| Tabela 64 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 5,38 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 1..... | 136 |
| Tabela 65 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 7,15 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 1..... | 136 |
| Tabela 66 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 2,07 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 2..... | 137 |
| Tabela 67 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 5,38 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 2..... | 137 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 68 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 7,15 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 2..... | 137 |
| Tabela 69 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 2,07 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 3..... | 138 |
| Tabela 70 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 5,38 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 3..... | 138 |
| Tabela 71 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 7,15 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 3..... | 138 |
| Tabela 72 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 2,07 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 4..... | 139 |
| Tabela 73 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 5,38 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 4..... | 139 |
| Tabela 74 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 7,15 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 4..... | 139 |
| Tabela 75 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 2,07 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 5..... | 140 |
| Tabela 76 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 5,38 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 5..... | 140 |
| Tabela 77 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 7,15 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 5..... | 140 |
| Tabela 78 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 2,07 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 6..... | 141 |
| Tabela 79 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 5,38 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 6..... | 141 |
| Tabela 80 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 7,15 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 6..... | 141 |
| Tabela 81 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 2,07 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 7..... | 142 |
| Tabela 82 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 5,38 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 7..... | 142 |
| Tabela 83 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 7,15 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 7..... | 142 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 84 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 2,07 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 8.....  | 143 |
| Tabela 85 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 5,38 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 8.....  | 143 |
| Tabela 86 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 7,15 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 8.....  | 143 |
| Tabela 87 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 2,07 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 9.....  | 144 |
| Tabela 88 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 5,38 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 9.....  | 144 |
| Tabela 89 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 7,15 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 9.....  | 144 |
| Tabela 90 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 2,07 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 10..... | 145 |
| Tabela 91 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 5,38 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 10..... | 145 |
| Tabela 92 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás ( <i>off-gas</i> ) encaminhado para os frascos lavadores para P = 7,15 gO <sub>3</sub> /h – Amostra 10..... | 145 |
| Tabela 93 – Balanço de massa de ozônio para P = 2,07 gO <sub>3</sub> /h .....   | 146 |
| Tabela 94 - Balanço de massa de ozônio para P = 5,38 gO <sub>3</sub> /h .....   | 146 |
| Tabela 95 - Balanço de massa de ozônio para P = 7,15 gO <sub>3</sub> /h .....   | 146 |

# LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

---

## SÍMBOLOS

|                                |                                      |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| Å                              | - Ångström                           |
| Br <sup>-</sup>                | - Íon brometo                        |
| CH <sub>4</sub>                | - Gás metano                         |
| Cl <sub>2</sub>                | - Cloro molecular                    |
| cm                             | - Centímetro                         |
| CO <sub>2</sub>                | - Dióxido de carbono/Gás carbônico   |
| CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>  | - Íons carbonato                     |
| eV                             | - Elétron-volt                       |
| F                              | - Estatística F                      |
| g                              | - Grama                              |
| gl                             | - Grau de liberdade                  |
| g/h                            | - Grama por hora                     |
| gO <sub>3</sub>                | - Grama de ozônio                    |
| gO <sub>3</sub> /h             | - Grama de ozônio por hora           |
| gO <sub>3</sub> /L.h           | - Grama de ozônio por litro por hora |
| g/mL                           | - Grama por mililitro                |
| g/m <sup>3</sup>               | - Grama por metro cúbico             |
| h                              | - hora                               |
| H <sub>0</sub>                 | - Hipótese nula                      |
| H <sub>1</sub>                 | - Hipótese alternativa               |
| HOBr                           | - Ácido hipobromoso                  |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | - Íons Bicarbonato                   |
| H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | - Ácido carbônico                    |
| HO <sub>2</sub> •              | - Radical hidroperoxila              |
| H <sub>2</sub> O               | - Água                               |
| H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>  | - Peróxido de hidrogênio             |

|                          |  |
|--------------------------|--|
| $\text{H}_2\text{S}$     | - Sulfeto de hidrogênio                  |
| $\text{H}^+$             | - Íon hidrogênio                         |
| $\text{kg/m}^3$          | - Quilograma por metro cúbico            |
| $\text{kJ/kg}$           | - Quilojoule por quilograma              |
| $\text{km}$              | - Quilômetro                             |
| $\text{kPa}$             | - Quilopascal                            |
| $\text{KI}$              | - Iodeto de potássio                     |
| $\text{KV}$              | - Quilovolt                              |
| $\log$                   | - Logaritmo                              |
| $\text{L}$               | - Litro                                  |
| $\text{L/h}$             | - Litro por hora                         |
| $\text{L/min}$           | - Litro por minuto                       |
| $\text{L/s}$             | - Litro por segundo                      |
| $\text{m}$               | - Metro                                  |
| $\text{mg/L}$            | - Miligrama por litro                    |
| $\text{mgCl}_2/\text{L}$ | - Miligrama de cloro por litro           |
| $\text{mg Pt-Co/L}$      | - Miligrama de Platina-Cobalto por litro |
| $\text{mg O}_2/\text{L}$ | - Miligrama de oxigênio por litro        |
| $\text{mgO}_3/\text{L}$  | - Miligrama de ozônio por litro          |
| $\text{min}$             | - Minuto                                 |
| $\text{mL}$              | - Mililitro                              |
| $\text{m}^3$             | - Metro cúbico                           |
| $\text{m}^3/\text{h}$    | - Metro cúbico por hora                  |
| $\text{m}^3/\text{kg}$   | - Metro cúbico por quilograma            |
| $\text{mm}$              | - Milímetro                              |
| $\text{m/s}$             | - Metro por segundo                      |
| $\text{MQ}$              | - Média dos Quadrados                    |
| $\text{N}$               | - Normalidade                            |
| $\text{N}^\circ$         | - Número                                 |
| $\text{N}_2$             | - Nitrogênio                             |
| $\text{NH}_2$            | - Radical Amino                          |
| $\text{NH}_3$            | - Amônia livre                           |
| $\text{NH}_4^+$          | - Íon amônio                             |

NMP/100 mL - Número mais provável por cem mililitros

OH<sup>-</sup> - Ânion Hidroxila/Íon Hidroxila

OH• - Radical hidroxila

O<sub>2</sub> - Oxigênio

O<sub>2</sub>•<sup>-</sup> - Ânion radical superóxido

O<sub>3</sub>•<sup>-</sup> - Ânion radical ozonóide

O<sub>3</sub> - Ozônio molecular

O\* - Oxigênio atômico

Q - Vazão

SQ - Soma dos Quadrados

°C - Graus Celsius

π - Pi

σ - Sigma

μm - Micrometro

± - Mais ou menos

% - Porcentagem

” - Polegada

~ - Aproximadamente

## SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA - *Analise of Variance* (Análise de Variância)

CA - Carvão Ativado

CBZ - Carbamazepina

COD - Carbono Orgânico Dissolvido

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

DCF - Diclofenaco

DMAE - Departamento Municipal de Água e Esgoto

DQO - Demanda Química de Oxigênio

*E. Coli* - *Escherichia Coli*

EDCs - *Endocrine Disrupting Chemicals* (Compostos desreguladores endócrinos)



|       |   |
|-------|---|
| ERY   | - Eritromicina  |
| ETAR  | - Estação de Tratamento de Águas Residuárias                                    |
| ETE   | - Estação de Tratamento de Esgoto   |
| IBGE  | - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                               |
| MTE   | - Ministério do Trabalho e Emprego  |
| NBR   | - Norma Brasileira  |
| NMP   | - Número Mais Provável  |
| NR    | - Norma Regulamentadora   |
| OMS   | - Organização Mundial da Saúde  |
| PE1   | - Pré-ensaio 1  |
| PE2   | - Pré-ensaio 2  |
| pH    | - Potencial Hidrogeniônico  |
| PEAD  | - Polietileno de Alta Densidade   |
| POA   | - Processo Oxidativo Avançado   |
| PPCPs | - Produtos para Cuidados Pessoais   |
| ppm   | - Parte por milhão  |
| PVC   | - Policloreto de Vinila   |
| SMX   | - Sulfametoxazol  |
| SP    | - São Paulo   |
| TLF   | - Tanque de Lodo dos Flotadores   |
| TMP   | - Trimetoprima  |
| UASB  | - <i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i> (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente) |
| UNT   | - Unidade Nefelométrica de Turbidez   |
| USEPA | - <i>United States Environmental Protection Agency</i>                          |
| USP   | - Universidade de São Paulo   |
| UV-B  | - Ultravioleta B  |
| UV-C  | - Ultravioleta C  |
| VOCS  | - <i>Volatile Organic Compounds</i> (Compostos orgânicos voláteis)              |
| WEF   | - <i>Water Environment Federation</i>   |

# SUMÁRIO

---

|  |    |
|--|----|
| <b>INTRODUÇÃO</b>                                    | 27 |
| 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS                             | 27 |
| 1.2 OBJETIVO GERAL                                   | 29 |
| 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS                            | 29 |
| 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO                          | 29 |
| <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                         | 31 |
| 2.1 OZONIZAÇÃO                                       | 31 |
| 2.1.1 Características do ozônio                      | 31 |
| 2.1.2 Geração do ozônio                              | 32 |
| 2.1.3 Mecanismos de reação do ozônio                 | 34 |
| 2.1.4 Aplicações do ozônio                           | 39 |
| 2.2 ESTUDO DA HIDRODINÂMICA EM COLUNA DE OZONIZAÇÃO  | 42 |
| 2.2.1 Transferência de massa gás-líquido             | 42 |
| 2.2.2 Características hidrodinâmicas                 | 43 |
| 2.3 ARRASTE DE GASES (GAS STRIPPING)                 | 49 |
| <b>METODOLOGIA</b>                                   | 53 |
| 3.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O EFLUENTE UTILIZADO         | 53 |
| 3.2 AMOSTRAGEM                                       | 54 |
| 3.3 DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL             | 55 |
| 3.3.1 Coluna de ozonização                           | 56 |
| 3.3.2 Gerador de ozônio                              | 57 |
| 3.3.3 Frascos lavadores de ozônio ( <i>off-gas</i> ) | 58 |
| 3.4 ATIVIDADES EXPERIMENTAIS                         | 59 |
| 3.4.1 Descrição das atividades experimentais         | 59 |
| 3.4.2 Parâmetros de análise                          | 65 |
| 3.4.3 Balanço de massa de ozônio                     | 67 |
| 3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS               | 67 |
| <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>                       | 69 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.1 OZONIZAÇÃO CONVENCIONAL .....            | 69  |
| 4.1.1 Caracterização do efluente bruto ..... | 69  |
| 4.1.2 pH .....                               | 70  |
| 4.1.3 Cor .....                              | 72  |
| 4.1.4 Turbidez .....                         | 75  |
| 4.1.5 DQO .....                              | 78  |
| 4.1.6 Nitrogênio Amoniacal .....             | 81  |
| 4.1.7 Nitrato .....                          | 83  |
| 4.1.8 <i>E. Coli</i> .....                   | 86  |
| 4.1.9 Balanço de massa de ozônio .....       | 88  |
| 4.2 ARRASTE DE GASES (GAS STRIPPING) .....   | 91  |
| 4.2.1 Caracterização do efluente bruto ..... | 91  |
| 4.2.2 pH .....                               | 91  |
| 4.2.3 Cor .....                              | 94  |
| 4.2.4 Turbidez .....                         | 96  |
| 4.2.5 DQO .....                              | 98  |
| 4.2.6 Nitrogênio amoniacal .....             | 101 |
| 4.2.7 Nitrato .....                          | 104 |
| CONCLUSÕES .....                             | 106 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....             | 109 |
| APÊNDICE A .....                             | 118 |
| APÊNDICE B .....                             | 128 |
| APÊNDICE C .....                             | 132 |
| APÊNDICE D .....                             | 134 |
| APÊNDICE E .....                             | 136 |

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A água é considerada um recurso natural indispensável para o desenvolvimento da vida humana e de outras formas de vida, sendo apontada como um elemento fundamental para o progresso da sociedade. Entretanto, sabe-se que a água é considerada um recurso limitado, alicerçado a isto, a diminuição de sua disponibilidade em virtude do aumento populacional e da poluição dos recursos hídricos por meio das ações antrópicas tem causado uma preocupação a nível mundial.

Assim, como forma de garantir a qualidade do meio ambiente por meio da preservação dos recursos hídricos e, conseqüentemente, garantir a manutenção da vida no planeta, surge a necessidade de realização do tratamento das águas residuárias antes do lançamento nos corpos hídricos (MARCE, 2016). Existem inúmeras técnicas capazes de promover o tratamento dos efluentes e, assim, atender aos limites de qualidade para lançamento no corpo receptor definidos pela Resolução N° 430, de 13 de maio de 2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2011).

Dentre os diversos tipos de tratamento, Capodaglio, Hlavínek e Raboni (2015) citam os tratamentos biológicos como sendo amplamente aplicados no tratamento de águas residuárias municipais e, até mesmo, industriais. Neste tipo de tratamento, Cheng *et al.* (2011) enfatizam que as estações têm como intuito principal promover a remoção de compostos orgânicos coloidais ou solúveis para que o efluente atenda a um determinado padrão de lançamento.

Entretanto, existem diversos tipos de contaminantes industriais e microrganismos patogênicos que não degradados pelos tratamentos biológicos e, por conseguinte, são descartados nos corpos receptores. Dentre os principais tipos de compostos industriais, podem-se citar os compostos recalcitrantes ou refratários, que são descartados nos corpos

receptores e, em virtude do efeito acumulativo, podem alcançar concentrações maiores que as doses letais e, assim, provocar a morte de algumas espécies aquáticas tais como os invertebrados e os peixes. Além disso, os efeitos bioacumulativos de tais compostos ao longo da cadeia alimentar poderiam, eventualmente, culminar em efeitos cancerígenos e mutagênicos nos seres humanos (ALVARES; DIAPER; PARSONS, 2001).

Em decorrência disso, surge a necessidade de estudar técnicas alternativas de tratamento que ofereçam eficiência satisfatória em relação à remoção de compostos contaminantes e de microrganismos patogênicos. Dentro deste contexto, é pertinente a utilização da ozonização convencional, sendo enquadrada como um tratamento terciário ou avançado.

A ozonização utiliza o gás ozônio ( $O_3$ ), sendo que este apresenta duas características marcantes, tais como: é considerado um poderoso agente oxidante capaz de reagir com substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no meio líquido, além disso, não é considerado uma fonte capaz de gerar poluição a partir de sua degradação (OPPENLANDER, 2003).

Entretanto, é válido ressaltar que, nos ensaios de ozonização, a capacidade do ozônio em remover compostos orgânicos não se limita apenas à sua ação oxidativa, mas também pela ação do arraste de gases, conforme cita Salla (2006) e Silva *et al.* (2010). Ou seja, durante o processo de ozonização convencional, no qual o contato do gás ozônio com o efluente ocorre por meio do borbulhamento, parte da fração volátil da matéria orgânica pode ser absorvida pelas bolhas e, posteriormente, lançada para a atmosfera quando estas se rompem, conseqüentemente, pode-se dizer que a fração volátil da matéria orgânica é arrastada da massa líquida.

Assim, com o intuito de se estudar a capacidade do ozônio em remover compostos orgânicos, seja por meio da oxidação e/ou do processo de arraste de gases, é que se propõe o desenvolvimento da presente pesquisa, tendo em vista que o processo tem se mostrado bastante eficiente quando aplicado como uma etapa de pós-tratamento de efluentes provenientes de estações de tratamento convencionais (TRIPATHI; TRIPATHI, 2011; ONEBY *et al.*, 2010).

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Este estudo de mestrado tem como objetivo avaliar a eficiência da ozonização convencional e do arraste de gases (*gas stripping*) no pós-tratamento de efluente sanitário.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral da pesquisa, foram traçados alguns objetivos específicos:

- Avaliar a eficiência de remoção dos parâmetros físico-químicos e biológico (pH, cor, turbidez, DQO, nitrogênio amoniacal, nitrato e *E. Coli*) a partir da ozonização convencional, utilizando o oxigênio puro como fonte de alimentação para a geração do ozônio;
- Avaliar a eficiência de remoção dos parâmetros físico-químicos (pH, cor, turbidez, DQO, nitrogênio amoniacal e nitrato) a partir do arraste de gases (*gas stripping*), utilizando o nitrogênio como o gás responsável por promover o arraste;
- Correlacionar a eficiência de remoção dos parâmetros físico-químicos e biológico com a vazão de gás ozônio, nitrogênio e tempo de contato entre as bolhas ascensionais e o meio líquido.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta pesquisa encontra-se dividida, basicamente, em cinco capítulos ademais das referências bibliográficas e dos apêndices. A disposição dos capítulos encontra-se apresentada a seguir:

Capítulo 1 – Introdução: apresenta uma contextualização geral do tema, no qual se encontra inserido o propósito para o desenvolvimento deste trabalho; além disso, são expostos os objetivos a serem alcançados com a realização da pesquisa, bem como a organização de sua estrutura;

Capítulo 2 – Referencial Teórico: expõe os aspectos teóricos relacionados ao ozônio, à hidrodinâmica em coluna de ozonização e ao arraste com gases, levando em consideração os trabalhos desenvolvidos por outros pesquisadores. Este capítulo permite

facilitar a compreensão do leitor quanto à temática do trabalho, assim como introduzir diversos conceitos defendidos por vários autores da área;

Capítulo 3 – Metodologia: destina-se à caracterização do efluente em estudo e da instalação experimental a ser utilizada nesta pesquisa, bem como define a metodologia que culminará no alcance dos resultados.

Capítulo 4 – Resultados: apresenta os resultados obtidos a partir dos procedimentos metodológicos aplicados no capítulo anterior e, concomitantemente, são expostas as discussões pertinentes.

Capítulo 5 – Conclusões: exhibe as principais conclusões obtidas com o desenvolvimento da pesquisa, além disso, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

# CAPÍTULO 2

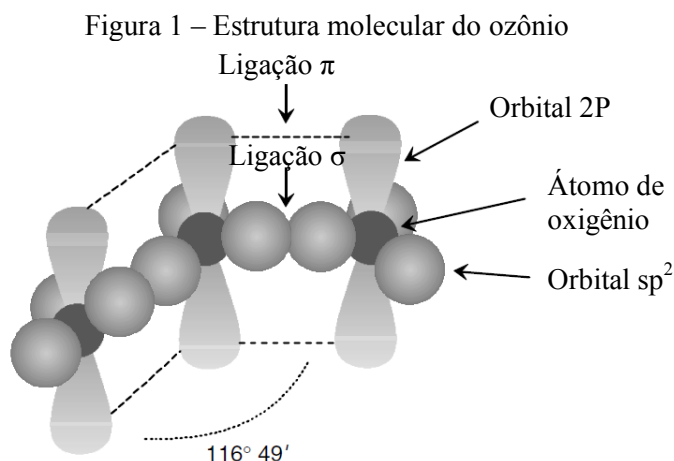
## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 OZONIZAÇÃO

#### 2.1.1 Características do ozônio

De acordo com Beltrán (2004), o ozônio é encontrado naturalmente nas camadas mais altas da atmosfera (aproximadamente a 25 km acima do nível do mar), sendo capaz de proteger o planeta da radiação UV-B e UV-C. Todavia, quando se encontra presente na superfície terrestre, o ozônio passa a ser considerado um composto altamente tóxico que, à temperatura ambiente, se apresenta como um gás incolor e de odor característico perceptível em concentrações em torno de 0,02 ppm em volume (GOTTSCALK; LIBRA; SAUPE, 2000).

Ainda segundo Beltrán (2004), o ozônio possui três átomos de oxigênio unidos por ligações  $\sigma$  e  $\pi$ , sendo considerado um híbrido de ressonância no qual o comprimento médio da ligação entre os átomos de oxigênio é 1,278 Å e o ângulo da molécula é 116°49', conforme apresentado na Figura 1. As principais propriedades desse gás estão apresentadas na Tabela 1.



Fonte: Beltrán (2004), traduzido.



Tabela 1- Propriedades físico-químicas do ozônio

| <b>Propriedade</b>                                      | <b>Unidade</b>     | <b>Valor</b> |
|---|--------------------|--------------|
| Peso molecular  | g                  | 48           |
| Ponto de ebulição                                       | °C                 | -111,9 ± 0,3 |
| Ponto de fusão  | °C                 | -192,5 ± 0,4 |
| Calor latente de vaporização a 111,9 °C                 | kJ/kg              | 14,9         |
| Densidade líquida a -183 °C                             | kg/m <sup>3</sup>  | 1574         |
| Densidade gasosa a 0 °C e 1 atm                         | g/mL               | 2,154        |
| Solubilidade em água a 20 °C                            | mg/L               | 12,07        |
| Pressão de vapor a -183 °C                              | kPa                | 11           |
| Densidade de vapor em relação ao ar seco a 0 °C e 1 atm | -                  | 1,666        |
| Volume específico de vapor a 0 °C e 1 atm               | m <sup>3</sup> /kg | 0,464        |
| Temperatura crítica                                     | °C                 | -12,1        |
| Pressão crítica   | kPa                | 5532,3       |

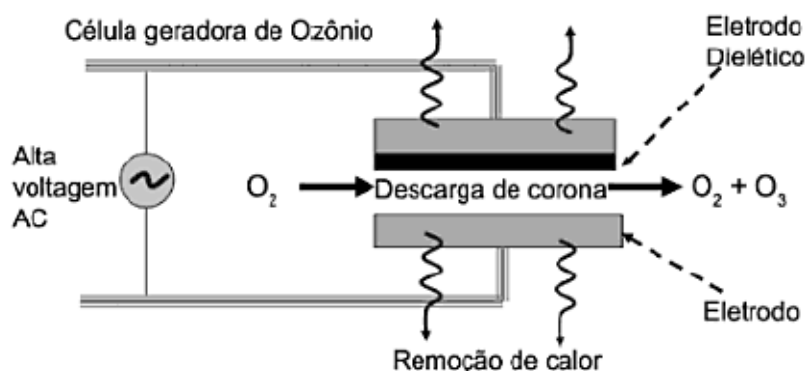
Fonte: Adaptado de Metcalf & Eddy (2014).

### 2.1.2 Geração do ozônio

Como o ozônio é um gás muito instável, a sua geração deve ocorrer *in situ* sem que haja qualquer tipo de armazenamento e/ou transporte. Existem diferentes técnicas de produção de ozônio, tais como: descarga elétrica, eletrólise, irradiação (abstração de elétrons), raios-X e ionização de arco de luz (DEZOTTI *et al.*, 2008). Dentre as diversas técnicas apresentadas, pode-se afirmar que a descarga elétrica, também conhecida por efeito corona, é a mais usual, uma vez que possibilita uma maior taxa de conversão de oxigênio em ozônio, sendo assim, o método mais difundido pelos ozonizadores comerciais (ALMEIDA; ASSALIN; ROSA, 2004).

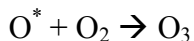
No método do tipo efeito corona, o ozônio é gerado a partir de uma fonte de gás de alimentação que contém oxigênio, podendo ser o ar ou o oxigênio puro. De acordo com Magara; Itoh; Morioka (1995), o processo consiste basicamente na passagem do gás por dois eletrodos com grande diferença de potencial, que estão separados por um material dielétrico e, além disso, submetidos a uma descarga elétrica (4 KV a 15 KV), conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Esquema de geração do ozônio a partir do efeito corona



Fonte: Dezotti *et al.* (2008).

Ao receber a descarga elétrica, a molécula de oxigênio dissocia-se em oxigênio atômico ( $O^*$ ) e, posteriormente, associa-se a outra molécula de oxigênio molecular originando, assim, o ozônio (DEZOTTI *et al.*, 2008). As reações que caracterizam a formação do ozônio podem ser descritas pelas reações que seguem, podendo estas ser catalisadas por radiação, ultra-som,  $H_2O_2$  ou catalisadores homogêneos, como exemplo, os metais (Fe, Mn, Ni, Co, Zn e Cr).

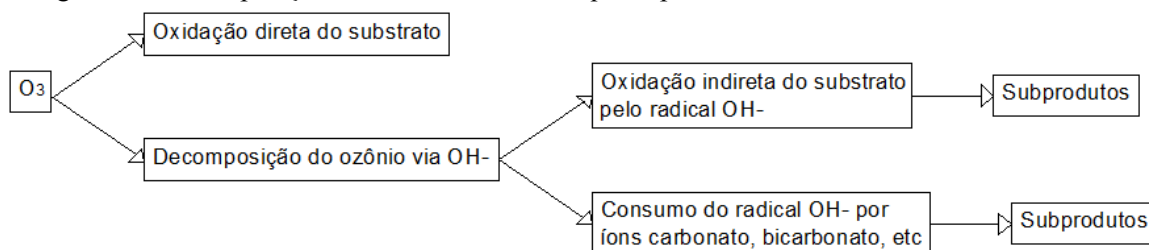


Magara, Itoh e Morioka (1995) enfatizam que a temperatura dos eletrodos deve ser mantida baixa para garantir uma maior produção do ozônio, pois, caso contrário, o ozônio gerado poderá ser degradado rapidamente e transformado em oxigênio no interior do gerador. Além disso, o rendimento do processo varia conforme o gás utilizado no sistema de alimentação, sendo que as concentrações podem variar cerca de 1 a 3% de ozônio em peso para o processo a partir do ar e cerca de 8 a 12% de ozônio em peso para o processo no qual se utiliza o oxigênio puro (METCALF & EDDY, 2014).

### 2.1.3 Mecanismos de reação do ozônio

Segundo Gottschalk, Libra e Saupe (2000), o ozônio em meio líquido pode interagir com as substâncias-alvo por meio de reação direta e indireta, conforme esquematizado na Figura 3. Na reação direta, as substâncias orgânicas ou inorgânicas reagem diretamente com o ozônio molecular ( $O_3$ ) e não há formação de radicais. Já na reação indireta, o ozônio se decompõe em radicais  $OH^\bullet$ , sendo que estes reagem, por sua vez, com as substâncias-alvo.

Figura 3 - Decomposição do ozônio em meio aquoso por meio do mecanismo direto e indireto

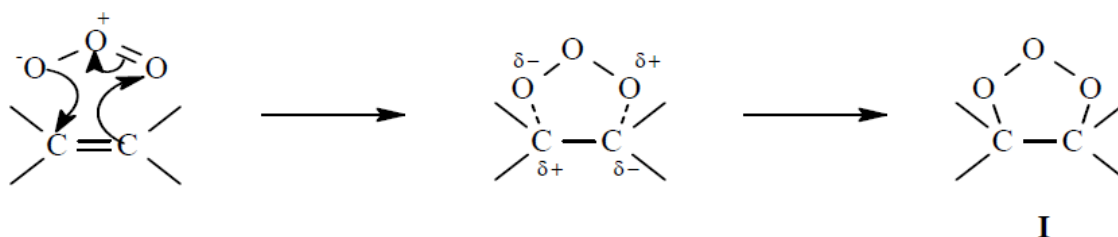


Fonte: USEPA (1999), traduzido.

No mecanismo direto, em virtude de suas estruturas de ressonância, o ozônio é capaz de atuar como um dipolo, como um agente eletrofílico e também como um agente nucleofílico (BAILEY, 1978).

No primeiro caso, tendo em vista a sua estrutura dipolar, Langlais *et al.* (1991) explicam que o ozônio promove a ciclo adição 1-3 dipolar em ligações do tipo insaturadas formando, assim, o ozonídeo primário (I) (Figura 4).

Figura 4 - Adição do ozônio em ligações insaturadas (Mecanismo de Criegee)

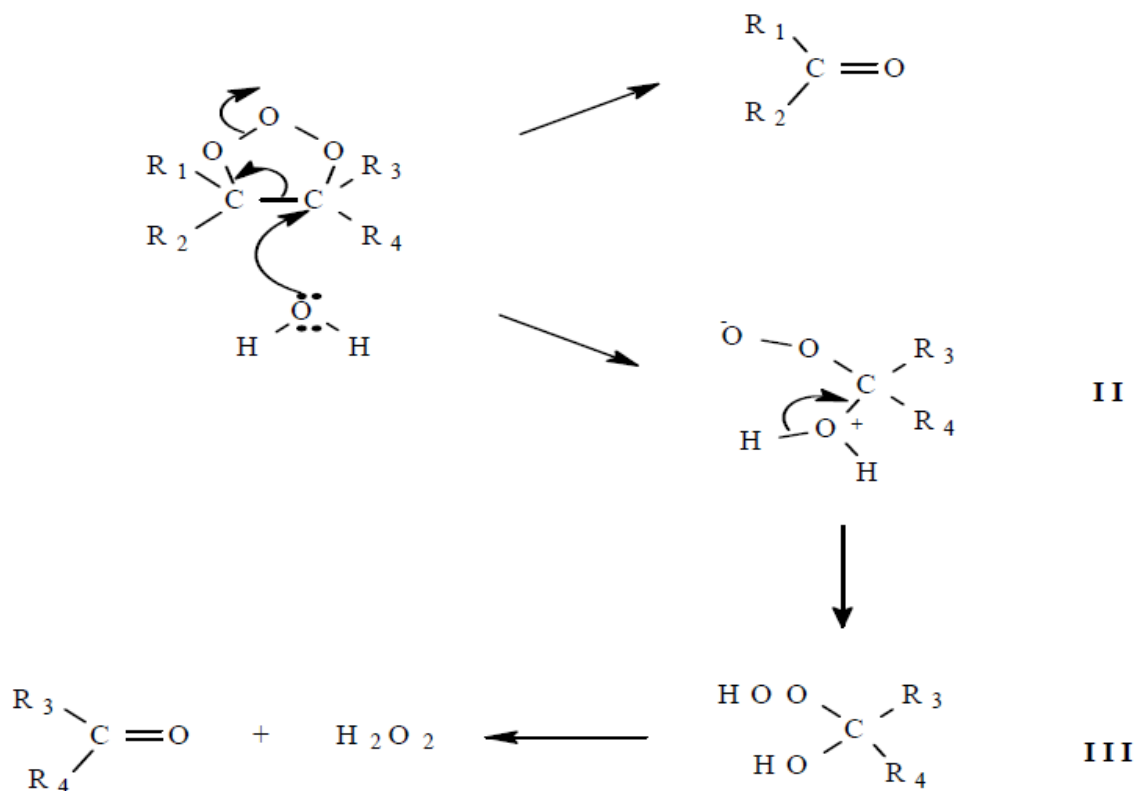


Fonte: Langlais *et al.* (1991).

Em água, o ozonídeo primário se decompõe formando um composto carbonila (aldeído e cetona) e um zwitterion (II), sendo que este, por sua vez, se transforma

rapidamente em hidroxi-hidroperóxido (III) e, por conseguinte, em um composto carbonila e peróxido de hidrogênio (Figura 5).

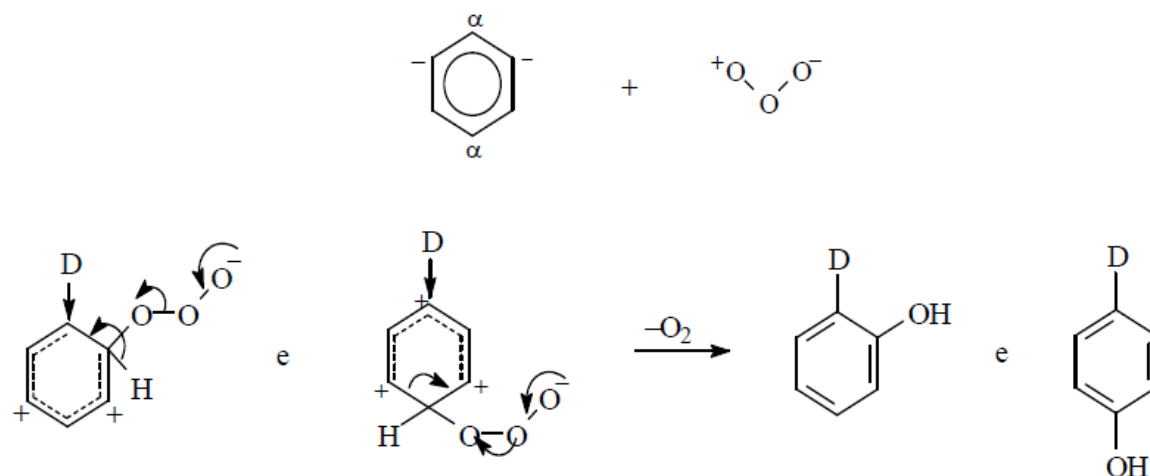
Figura 5 - Decomposição do intermediário ozonídeo em carbonila e peróxido de hidrogênio



Fonte: Langlais *et al.* (1991).

Quanto à reação eletrofílica, Langlais *et al.* (1991) explicam que esta é atribuída aos compostos que possuem alta densidade eletrônica e, além disso, em alguns compostos aromáticos como, por exemplo, aromáticos substituídos por grupos doadores de elétrons (OH, NH<sub>2</sub> e compostos semelhantes). Nesta reação, o ataque inicial do ozônio promove a formação de subprodutos do tipo orto-e-para-hidroxilados. Os subprodutos em questão, por sua vez, se tornam mais susceptíveis à ação do ozônio dando origem aos quinoides, aos produtos alifáticos com carbonila e funções carboxila (Figura 6).

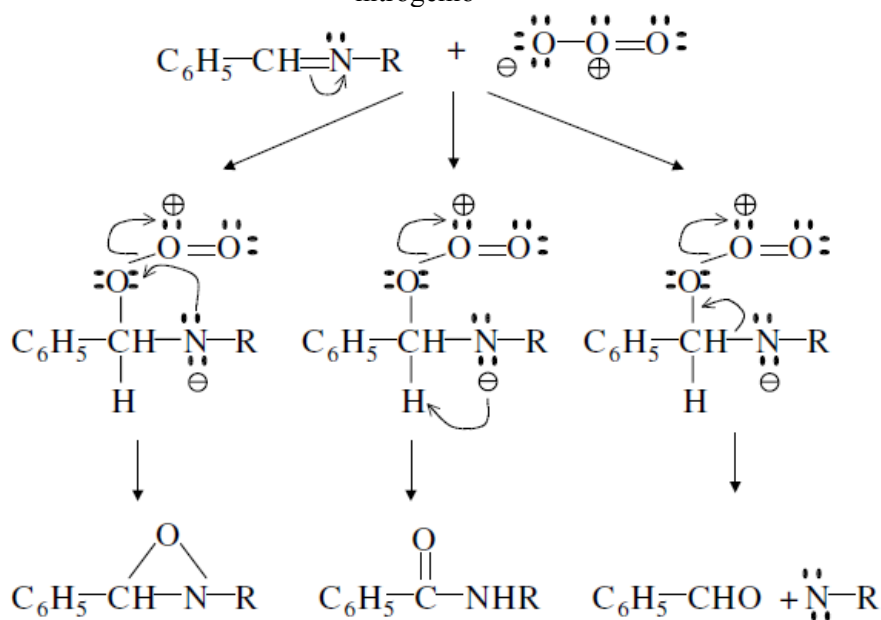
Figura 6 - Reação eletrofilica do ozônio com compostos aromáticos



Fonte: Langlais *et al.* (1991).

Por fim, quanto à reação nucleofílica, pode-se dizer que o ataque do ozônio molecular se limita aos compostos que possuem duplas ou triplas ligações carbono-nitrogênio ou grupos carbonila (Figura 7) (RIEBEL *et al.*, 1960).

Figura 7 - Reação nucleofílica do ozônio com compostos que possuem duplas ligações carbono-nitrogênio



Fonte: Beltrán (2004).

Gottschalk, Libra e Saupe (2000) caracterizam a reação direta como sendo seletiva, cujas constantes cinéticas são consideravelmente lentas. De um modo geral, a oxidação das

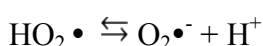
substâncias alvo ocorre por meio da reação direta quando se tem condições ácidas ( $\text{pH} \leq 4$ ).

Em se tratando do mecanismo indireto, Beltrán (2004) considera que as reações ocorrem em virtude da ação dos radicais livres, particularmente dos radicais hidroxila ( $\text{OH}\cdot$ ), com as substâncias-alvo presentes na água. Esses radicais livres são provenientes da decomposição do ozônio em meio aquoso e são considerados fortes espécies oxidantes, uma vez que são altamente instáveis e se submetem a reagir imediatamente com outras moléculas. Em razão disso, pode-se dizer que a oxidação dos compostos orgânicos e inorgânicos ocorre em um processo denominado de oxidação avançada ou também como processo oxidativo avançado (POA).

Mahmoud e Freire (2007) ressaltam que a decomposição do ozônio em meio aquoso é desencadeada basicamente pela presença do ânion hidroxila ( $\text{OH}^-$ ), sendo que a reação entre eles culmina em uma vasta gama de reações radicalares que conduzem à formação dos radicais hidroxila. Por se tratar de uma reação muito complexa e que sofre influência de muitas substâncias, principalmente de espécies químicas presente no meio, Gottschalk; Libra e Saupe (2000) apresentam, de forma simplificada, o referido mecanismo de reação em três etapas:

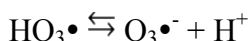
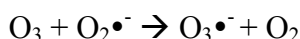
- Etapa 1: Iniciação

Nesta etapa ocorre a reação entre o ozônio e o íon hidroxila para formar o ânion radical superóxido e o radical hidroperoxila, de acordo com as reações que seguem.

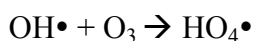


- Etapa 2: Propagação

Nesta etapa tem-se a reação entre o ozônio e o ânion radical superóxido que conduz a formação do ânion radical ozonóide. Por conseguinte, este se decompõe e dá origem aos radicais hidroxila, de acordo com as reações que seguem.



É possível que o radical hidroxila ( $\text{OH}\cdot$ ) reaja com o ozônio conforme as seguintes reações.

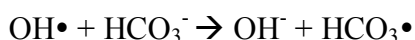
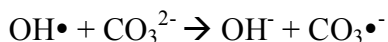




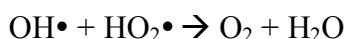
Diante disso, o decaimento de  $\text{HO}_4\bullet$  em  $\text{O}_2 + \text{HO}_2\bullet$  caracteriza uma reação em cadeia. As substâncias capazes de proporcionar a formação de  $\text{O}_2\bullet^-$  e/ou  $\text{HO}_2\bullet$  a partir de  $\text{OH}\bullet$  são designadas como promotoras, uma vez que estas desencadeiam a reação em cadeia. Staehelin e Hoigné (1985 apud LANGLAIS *et al.*, 1991) exemplificam algumas substâncias promotores, tais como grupos arilo, ácido fórmico, álcoois primários, dentre outros.

#### - Etapa 3: Terminação

Algumas substâncias presentes no meio aquoso podem reagir diretamente com o  $\text{OH}\bullet$  e, assim, formar radicais secundários que, por sua vez, não desencadeiam a formação de  $\text{O}_2\bullet^-$  e/ou  $\text{HO}_2\bullet$ . Tais substâncias podem ser designadas como inibidores, já que não promovem a reação em cadeia. Como exemplo de substâncias inibidoras, Hoigné e Bader (1985 apud LANGLAIS *et al.*, 1991) citam os íons carbonato e bicarbonato, alquilas, álcoois terciários e substâncias húmicas.



Além disso, a reação entre dois radicais também possibilita o término da reação, sendo esta:



Apesar do mecanismo de decomposição do ozônio apresentar uma alta complexidade, em razão da influência de diversos fatores, Beltrán (2004) considera que o pH é um fator de suma importância, haja vista que os íons hidroxila são responsáveis por desencadear o processo. Geralmente, para valores de pH acima de 9, predomina-se a ocorrência da reação indireta para oxidar as moléculas orgânicas e inorgânicas. Além disso, para valores de pH entre 4 e 9, é possível que ocorra a oxidação tanto pela reação direta quanto pela reação indireta (MAHMOUD; FREIRE, 2007; GOTTSCHALK; LIBRA; SAUPE, 2000; SALLA, 2006; CARVALHO, 2015).

Assim, devido ao fato dos radicais hidroxila possuírem um alto potencial de oxidação (2,8 eV), pode-se dizer que o ataque aos compostos orgânicos e inorgânicos ocorre de forma não seletiva e rápida (GOTTSCHALK; LIBRA; SAUPE, 2000). Diante disso, Mahmoud e Freire (2007) afirmam que a utilização do ozônio, a partir da reação

indireta, tem sido uma técnica bastante utilizada, haja vista que se trata de um mecanismo com grande eficiência para promover a mineralização das substâncias-alvo.

### 2.1.4 Aplicações do ozônio

De acordo com Oneby *et al.* (2010), o ozônio é um poderoso agente oxidante capaz de reagir com uma variedade de compostos orgânicos e inorgânicos, além de ser capaz de promover a desinfecção de numerosos microrganismos. Associado a estas vantagens, pode-se destacar ainda que o ozônio é capaz de reduzir consideravelmente as concentrações de compostos químicos como os desreguladores endócrinos (EDCs), os medicamentos e os produtos para cuidados pessoais (PPCPs), tornando-o propício para o tratamento de água de abastecimento e águas residuárias, além de efluentes industriais (indústrias de papel e celulose, têxtil, efluentes contaminados com produtos farmacêuticos e pesticidas).

Bilotta e Daniel (2011) utilizaram a ozonização para promover a desinfecção de efluentes reais provenientes da Estação de Tratamento de Esgoto da Universidade de São Paulo, em São Carlos (SP) e, assim, atender aos padrões de lançamento de efluentes definidos na Resolução CONAMA 430 (2011). Para avaliar a desinfecção dos efluentes, os autores utilizaram exames microbiológicos para a determinação de coliformes totais e *Escherichia Coli* (indicadores de bactérias), colifagos (indicador de vírus) e *Clostridium Perfringens* (indicador de protozoários). Dentre os resultados obtidos, Bilotta e Daniel (2011) observaram que 1,0 mgO<sub>3</sub>/L na pré-desinfecção culminou em inativação superior a 1 log para as três espécies citadas anteriormente. Assim, a ozonização se mostrou eficiente na desinfecção de efluentes sanitários, uma vez que esta foi capaz de promover a inativação de microrganismos, inclusive os mais resistentes como os coliformes totais e *Clostridium perfringens*. Além disso, os autores observaram que a referida técnica proporcionou a adequação do efluente final às diretrizes para o seu lançamento em corpos d'água classificados como classe 2 e, ainda, garantiu que este se enquadrasse nos limites microbiológicos máximos determinados pela Organização Mundial da Saúde (OMS) para o seu reuso na irrigação irrestrita; todavia, fica a ressalva para a realização de exames complementares.

Com o intuito de reduzir a cor dos efluentes de uma indústria têxtil, Guimarães *et al.* (2010) propuseram a ozonização convencional considerando o meio básico, uma vez que o processo oxidativo é capaz de degradar os compostos responsáveis pela coloração



dos efluentes. Os autores observaram que, para menores concentrações iniciais de ozônio como, por exemplo, 0,4 gO<sub>3</sub>/L.h, era necessário um maior tempo de contato com o ozônio para se obter uma redução de 80% de cor; porém, quando comparado aos experimentos com dosagens mais elevadas como, por exemplo, 4,3 gO<sub>3</sub>/L.h, os autores observaram que o consumo específico de ozônio foi menor. Além disso, constataram que o oxigênio molecular complementa a oxidação inicial estabelecida pelos radicais hidroxilas oriundos da aplicação da tecnologia em pH básico.

Como forma de promover a utilização de uma tecnologia alternativa ao processo de cloração, Silva e Daniel (2015) propuseram a utilização do ozônio seguido de cloro a fim de analisar a formação de subprodutos e inativação dos coliformes termotolerantes. Para isto, os autores submeteram os efluentes oriundos de uma da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Universidade de São Paulo (USP), em São Carlos (SP), a uma unidade experimental de ozonização em escala-piloto instalada próxima à ETE e, ainda, ao equipamento de Jar-Test. Os autores observaram que as reduções médias da demanda química de oxigênio para os efluentes ozonizados/clorados foram de 9, 32 e 37% quando submetidos às seguintes condições: 5,0 mgO<sub>3</sub>/L + 10 mgCl<sub>2</sub>/L (ensaio 1), 8,0 mgO<sub>3</sub>/L + 20 mgCl<sub>2</sub>/L (ensaio 2) e 10,0 mgO<sub>3</sub>/L + 30 mgCl<sub>2</sub>/L (ensaio 3); sob os tempos de contato de 5 + 10 min (ensaio 1), 10 + 20 min (ensaio 2) e 15 + 30 min (ensaio 3), para as respectivas técnicas. Além disso, foi possível observar que a técnica de ozonização seguida de cloração proporcionou resultados satisfatórios para inativação dos coliformes fecais e *E. Coli* culminando, assim, em um efluente de boa qualidade perante a Resolução CONAMA 357/05.

Schaar *et al.* (2010) utilizaram a técnica de ozonização para a remoção dos micropoluentes presentes nas águas residuárias, uma vez que esta é considerada uma tecnologia adequada e eficiente para a remoção de tais compostos. Para isto, Schaar *et al.* (2010) submeteram os efluentes, provenientes de um tratamento biológico convencional de uma Estação de Tratamento de Águas Residuárias (ETAR) Austríaca, a uma aplicação 0,6 g de O<sub>3</sub>/g de COD. Dentre os resultados obtidos, os autores observaram que a ozonização proporcionou a remoção da maioria dos micropoluentes, principalmente aqueles que não foram removidos no tratamento biológico, tais como a carbamazepina (CBZ) e o diclofenaco (DCF), além dos antibióticos eritromicina (ERY), sulfametoxazol (SMX) e trimetoprima (TMP).

Os contaminantes emergentes tais como: “produtos farmacêuticos, produtos de cuidados pessoais, hormônios sexuais esteróides, drogas ilícitas, retardadores de chama e compostos perfluorados” (PRIETO-RODRÍGUEZ *et al.*, 2012, tradução nossa) são considerados contaminantes que não são capazes de serem degradados nas estações de tratamento de águas residuárias convencionais. Sendo assim, para eliminá-los das águas residuárias, Prieto-Rodríguez *et al.* (2012) mencionaram que, após o tratamento com um tempo de contato de 60 minutos e uma taxa de consumo de 9,5 mg/L de O<sub>3</sub>, cerca de 98% da concentração dos micropoluentes foram degradados.

Knopp *et al.* (2016) enfatizaram que as estações convencionais de tratamento de águas residuárias não são capazes de degradar alguns micropoluentes oriundos de produtos farmacêuticos, cosméticos e químicos industriais, uma vez que estes estão sendo detectados no meio aquático. Assim, no intuito de promover a eliminação dos micropoluentes, os autores propuseram a utilização da técnica de ozonização seguida de processos biológicos ativos tais como filtros de areia ou filtros de carvão ativado granular. De acordo com os resultados obtidos, Knopp *et al.* (2016) observaram que a ozonização foi capaz de eliminar uma grande quantidade de micropoluentes a uma taxa de consumo de ozônio de  $0,87 \pm 0,29$  gO<sub>3</sub>/gCOD e um tempo de retenção hidráulica de  $17 \pm 3$  min. Além disso, os autores detectaram que os produtos formados após a ozonização, cujas propriedades e toxicidade são desconhecidas, obtiveram uma melhor resposta frente ao tratamento em que se utilizaram os filtros de carvão ativado granular.

Dentre as utilizações do ozônio, Rivas, Gimeno e Beltrán (2009) destacam o uso combinado como, por exemplo, O<sub>3</sub>/carvão ativado (CA), ozônio/peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) e ozônio/radiação ultravioleta (UV), com o intuito de buscar melhorias no processo de tratamento. De acordo com os autores, o nível de mineralização foi de 40% quando se utilizava o O<sub>3</sub> como o único reagente de oxidação, todavia, quando se utilizava o ozônio combinado, os níveis de mineralização aumentaram significativamente, alcançando valores de até 70% para o O<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

Com o intuito de promover a degradação de compostos presentes em efluentes têxteis, Souza, Bonilla e Souza (2010) utilizaram a técnica de ozonização seguida de um tratamento biológico para avaliar a eficiência, em termos de remoção de cor e de matéria orgânica – com relação à demanda química de oxigênio (DQO) - de uma solução na qual continha o corante hidrolisado Remazol Black B. Dentre os resultados obtidos, os autores observaram que a técnica de ozonização foi eficaz para tratar a solução contendo o corante

Remazol Black B em faixas de pH variando de 3 a 11, uma vez que houve uma tendência de diminuição da DQO com o aumento do tempo de ozonização, além disso, as remoções de cor do efluente obtidas foram superiores 96% para diferentes concentrações do corante.

## 2.2 ESTUDO DA HIDRODINÂMICA EM COLUNA DE OZONIZAÇÃO

### 2.2.1 Transferência de massa gás-líquido

O desempenho da técnica de ozonização no tratamento das águas residuárias está intimamente relacionado com a introdução do gás ozônio na fase líquida que, por sua vez, depende do contato gás/líquido e da transferência de massa deste gás que se encontra na fase gasosa para a fase líquida (DEZOTTI *et al.*, 2008; LÓPEZ-LÓPEZ *et al.*, 2007; PANDA; MATHEWS, 2008). Sendo assim, Kunz *et al.* (1999) consideram o processo de transferência do ozônio da fase gasosa para a fase líquida como um fator limitante no que se refere a sua utilização no processo de oxidação.

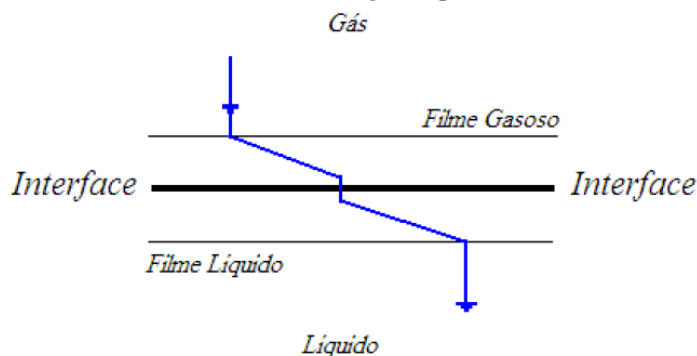
O contato do ozônio, que se encontra na fase gasosa, com as águas residuárias ocorre em locais apropriados designados como câmaras de contato. Water Environment Federation (WEF) (1996 *apud* SOARES, 2007) estabelece alguns critérios que devem ser levados em consideração para a definição do modelo da câmara de contato, sendo estes: “o grau de distribuição de bolhas do difusor, a concentração de ozônio no gás de alimentação, o tempo de contato requerido, o modo de coleta do *off-gas*, e limitações como a taxa de transferência de massa e o espaço físico disponível”.

Dentre os diversos tipos de câmaras de contato, López-López *et al.* (2007) citam que as colunas de bolhas ou colunas de borbulhamento são um dos tipos de reatores de contato mais empregados, nos quais a dispersão do gás ocorre por meio de bolhas ascensionais. Shah *et al.* (1982) destacam as principais vantagens na utilização das colunas de bolhas, tais como: manutenção reduzida em virtude de não haver partes móveis, maior área interfacial entre o gás e o líquido; possibilidade de manuseio de sólidos na massa líquida sem que haja problemas decorrentes de entupimentos; redução de espaço físico ocupado pela coluna e maior facilidade na operação.

Já com relação ao processo de transferência de massa gás-líquido, é possível citar algumas teorias capazes de explicar a ocorrência do fenômeno, tais como: Teoria dos Dois Filmes, Teoria da Penetração e Teoria da Renovação Superficial. Dentre estas, a Teoria dos Dois Filmes, proposta por Lewis e Whitman (1924), considera que o contato do gás com o

líquido ocorre por meio de uma interface na qual existem duas camadas estacionárias designadas como filme (filme gasoso e filme líquido). A existência desses filmes confere uma resistência à passagem de um meio para outro, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Processo de transferência de massa gás-líquido: Teoria dos Dois Filmes



Fonte: Soares (2007).

Segundo Lewis e Whitman (1924), a transferência de massa gás-líquido pelos filmes ocorre por meio do processo de difusão. Pode-se dizer que a difusão através do filme gasoso se processa a uma taxa que é proporcional à diferença entre as concentrações de soluto do gás no exterior e dentro do filme gasoso, enquanto que a difusão através do filme líquido se processa a uma taxa que é proporcional à diferença entre as concentrações de soluto dentro do filme líquido e fora deste. Diante disso, os autores em questão consideram que os filmes gasoso e líquido funcionam como duas resistências difusórias ligadas em série.

Existem alguns fatores que influenciam a máxima transferência do gás ozônio para o meio líquido, podendo-se destacar: a vazão na qual o gás é injetado para o interior da coluna, as condições na qual é estabelecida a mistura gás-líquido, o tamanho das bolhas que irão promover a dispersão, as características da câmara de contato (SALLA, 2006; SOARES, 2007).

### 2.2.2 Características hidrodinâmicas

- Diâmetro das bolhas de gás

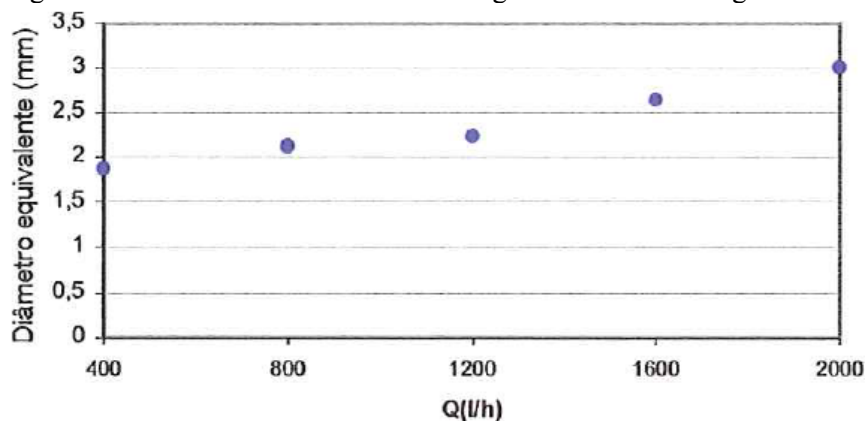
Segundo Mariñas, Liang e Aieta (1993), geralmente utiliza-se o difusor de bolhas como o dispositivo responsável por introduzir, na parte inferior da coluna, as bolhas ascensionais de gás ozônio que irão reagir com o meio líquido. O tamanho das bolhas a

serem formadas será função, basicamente, do fluxo de gás que percorre o difusor e penetra na coluna, do diâmetro dos poros que constituem o difusor, da existência de turbulência na coluna e das propriedades do fluido (TREYBAL, 1980).

Para Eiger, Ferreira Filho e Lage Filho (1998), os diâmetros das bolhas de gás podem variar de 1,0 a 4,0 mm, sendo que essa variação é decorrente, principalmente, do tipo de difusor utilizado. Dentre os diversos tipos de difusores existentes, os autores em questão consideram que os difusores de bolha fina, cujo diâmetro da bolha varia de 1,0 a 2,5 mm, são os mais usuais, uma vez que garantem maiores áreas superficiais de gás por unidade de volume da câmara.

Levando em consideração a vazão de entrada do gás pelo difusor, pode-se dizer que o diâmetro das bolhas ascensionais de gás aumenta conforme o aumento da vazão de gás aplicada. Tal fato pode ser constatado nos estudos realizado por Salla (2002), no qual observou que, a uma dada altura de água na coluna (1,80 m), o aumento do diâmetro das bolhas de gás ocorre de forma praticamente linear com o aumento da vazão de gás (Figura 9).

Figura 9 - Diâmetro médio das bolhas de gás versus vazão de gás



Fonte: Salla (2002).

Costa (2003) reforça a constatação obtida por Salla (2002) no tocante que, o aumento da vazão não implica no aumento do diâmetro de cada bolha, mas sim no aumento da quantidade de bolhas para a massa líquida. Em virtude disto, com um número maior de bolhas em trajetória ascensional, tem-se a colisão (fenômeno da coalescência) e, por conseguinte, a formação de bolhas com diâmetro maior.

Além disso, considerando uma vazão constante, pode-se observar o aumento no diâmetro das bolhas de gás ao longo da altura da coluna, tendo em vista que a pressão da

coluna de água é menor próxima à superfície livre, conseqüentemente, tem-se uma menor atuação dos efeitos de “achatamento” sob as bolhas de gás (SOARES, 2007).

Motarjemi & Jameson (1978) enfatizam a necessidade de estabelecer um diâmetro conveniente para as bolhas, uma vez que o aumento no diâmetro implica em uma redução na área superficial e, além disso, tem-se um alcance mais rápido do gás à superfície livre, conseqüentemente, tem-se uma redução na interação entre gás/líquido. Em contrapartida, caso se utilize bolhas com diâmetro muito reduzido, a área superficial será maior, logo a interação gás/líquido ocorrerá no início, o que não se torna viável para as colunas que apresentam profundidades consideráveis.

Diante disso, é preferível se trabalhar com diâmetros que possibilitem às bolhas percorrerem a distância entre a saída do difusor e a superfície livre do líquido em tempos maiores, pois assim, se garante um tempo maior de contato entre as bolhas e o meio líquido e, conseqüentemente, possibilita uma maior transferência do gás para o líquido.

#### - Área interfacial

A área interfacial é caracterizada como um parâmetro de suma importância e que compõe o coeficiente de transferência de massa. Sendo assim, Salla (2002) enfatiza que quanto maior o valor da área interfacial, maior será o processo de transferência de massa do gás para a fase líquida. Em um dado volume de ar, é necessário que o diâmetro das bolhas se apresente em menores dimensões e, por conseguinte, em maiores quantidades, tendo em visto que área interfacial e diâmetro são grandezas inversamente proporcionais.

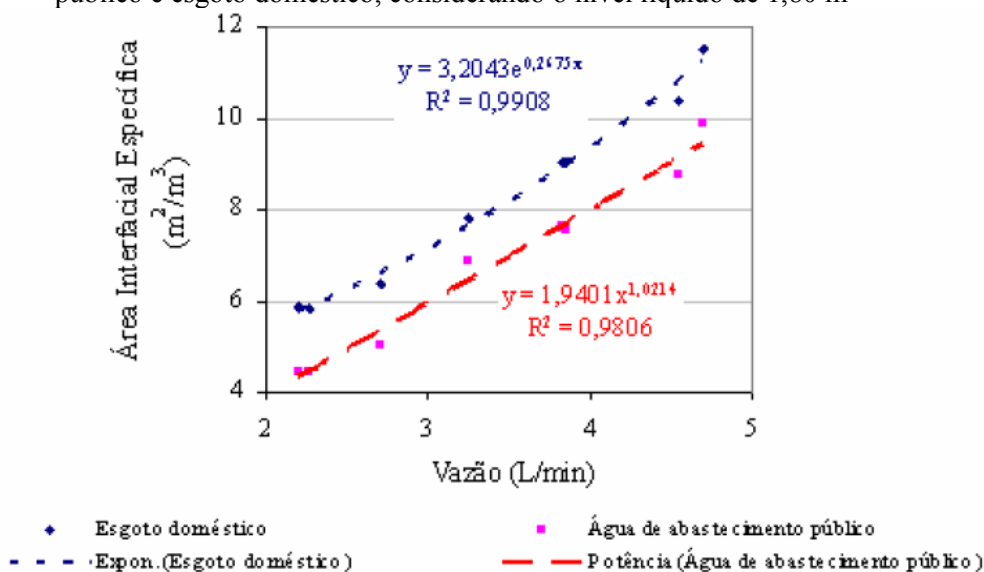
Dentre os principais fatores que alteram a área interfacial pode-se citar a vazão de injeção de gás no interior da coluna, a qualidade do líquido a ser trabalhado e os efeitos da coalescência. Na pesquisa desenvolvida por Salla (2006), foi possível determinar a interferência das vazões nos cálculos das áreas interfaciais; para isto foi utilizada água de abastecimento e águas residuárias domésticas como os meios líquidos de estudo, submetidos ao borbulhamento com o gás oxigênio e fixados a 1,80 m de altura na coluna. Por meio dos resultados obtidos, o referido autor observou que, em ambos os líquidos estudados, a área interfacial aumenta concomitantemente com o aumento da vazão de gás, e isto se deve ao aumento no número de bolhas presente na massa líquida com o aumento da vazão de gás.

Considerações similares a respeito da interferência da vazão na área interfacial também foram obtidas por Zhou e Smith (2000). Nesta pesquisa, os autores utilizaram 3 tipos de líquidos distintos para promover a interação com o ozônio: água deionizada, água de abastecimento público e efluente proveniente de uma lagoa de aeração. Assim, os autores identificaram que a área interfacial aumentava de acordo com o aumento da vazão de gás, sendo que esse aumento se dava de forma praticamente linear.

Além disso, conforme cita Salla (2002), é possível observar a interferência das características da fase líquida na área interfacial das bolhas. Entretanto, Pereira (2010) caracteriza que estas interferências podem apresentar efeitos considerados mais complexos. Ainda com relação à pesquisa desenvolvida por Zhou e Smith (2000), foi possível identificar que, no efluente proveniente de uma lagoa de aeração, se obteve uma maior área interfacial das bolhas, quando comparada à água deionizada e água de abastecimento público. Isto ocorre devido os compostos químicos presentes no efluente (surfactantes e outros compostos orgânicos) que alteram a viscosidade do líquido e a tensão superficial das bolhas de gás, promovendo o retardamento no aumento das bolhas e, consequentemente, propiciando a formação de bolhas de diâmetro menores.

Salla (2006) também identificou que as águas residuárias domésticas, por apresentar uma viscosidade maior comparada à água de abastecimento, possuem maior interferência na movimentação das bolhas de gás, consequentemente, estas proporcionam uma maior área interfacial, conforme observado na Figura 10.

Figura 10 - Área interfacial específica em função da vazão de gás para a água de abastecimento público e esgoto doméstico, considerando o nível líquido de 1,80 m



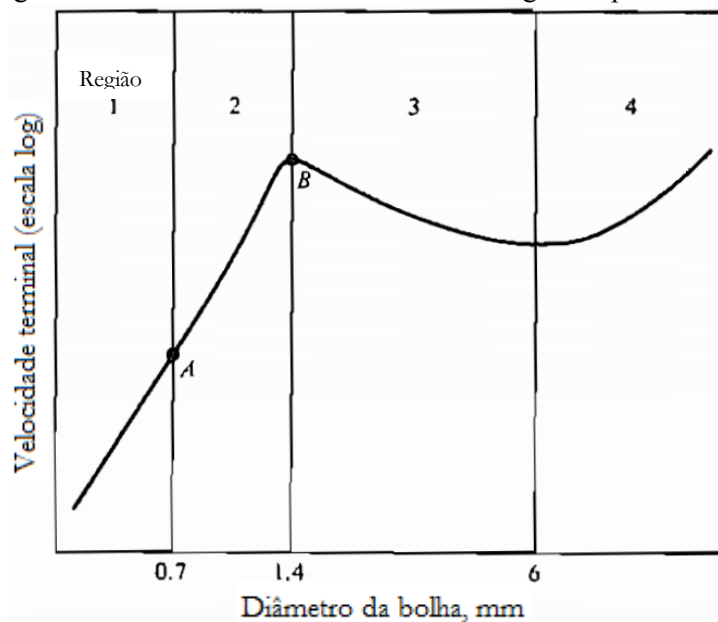
Fonte: Salla (2006).

A área interfacial também pode ser afetada pelos efeitos da coalescência na massa líquida. De acordo com Lehr e Mewes (2001), a ocorrência do fenômeno da coalescência promove a formação de novas bolhas de dimensões maiores, além disso, o número de bolhas diminui devido à fusão de bolhas menores. Em decorrência disso, a área interfacial diminui e, conseqüentemente, pode ocorrer uma diminuição no coeficiente de transferência de massa (WANG; WANG, 2007).

#### - Velocidade ascensional das bolhas de gás

Em relação à velocidade ascensional, pode-se dizer que este parâmetro é função direta do tamanho das bolhas geradas, sendo de suma importância no processo de transferência de massa. Para demonstrar a relação entre o diâmetro de bolhas individuais e a velocidade ascensional, Treybal (1980) apresenta 4 regiões de interesse, conforme observado na Figura 11.

Figura 11 - Velocidade ascendente de bolhas gás simples



Fonte: Treybal (1980), traduzido.

Treybal (1980) apresenta diferentes equações para o cálculo da velocidade ascendente, conforme cada região da Figura 11. De maneira sintetizada, Treybal (1980) considera que, na região 1, as bolhas de gás assumem formas esféricas e rígidas e atendem à Lei de Stokes; enquanto que, na região 2, as bolhas de gás sobem de forma rápida,

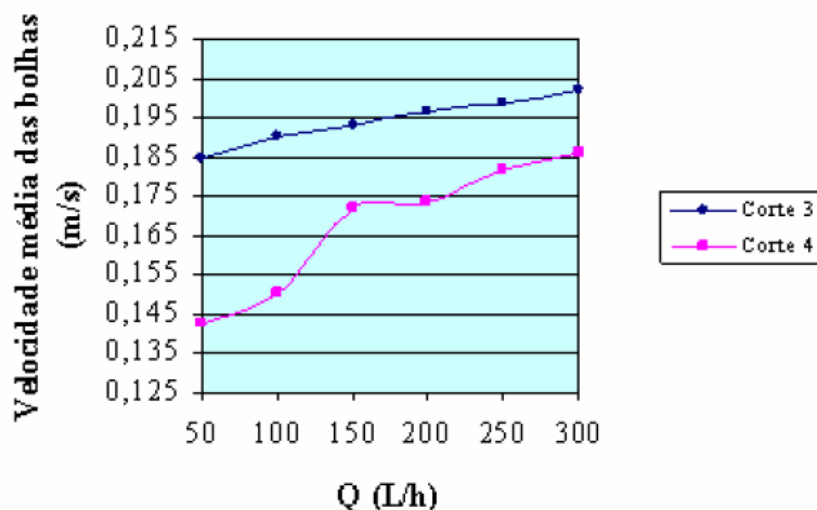


quando comparada às bolhas de esferas rígidas com o mesmo diâmetro, sendo que a velocidade neste caso pode ser estimada a partir da equação da reta que liga os pontos A e B (o ponto A deverá atender a região 1 e o ponto B deverá atender a região 3). Por fim, nas regiões 3 e 4, as bolhas de gás não assumem o formato esférico e, durante a subida, apresentam o caminho em ziguezague ou helicoidal, com cálculo específico para a velocidade ascensional.

Entretanto, de acordo com Salla (2006), a velocidade ascensional de bolhas individuais se difere de um conjunto de bolhas, tendo em vista que os efeitos da coalescência podem promover um incremento na velocidade ascensional das bolhas, ou ainda, pode ocorrer uma redução neste parâmetro em função de uma maior concentração das bolhas.

Nos resultados obtidos a partir de sua pesquisa experimental, Salla (2006) observou que a velocidade ascensional das bolhas de ozônio aumenta em função do aumento da vazão do gás, conforme mostra a Figura 12. Para isto, o autor dividiu a coluna em 12 seções, sendo analisados 5 cortes ao longo da seção transversal da coluna, sendo que cada corte apresentava 4,75 cm de distância (A Figura 12 traz apenas os cortes 3 e 4).

Figura 12 – Velocidade média das bolhas de ozônio (m/s) em função da vazão de ozônio aplicada (L/h). ( $h = 1,80$  m)

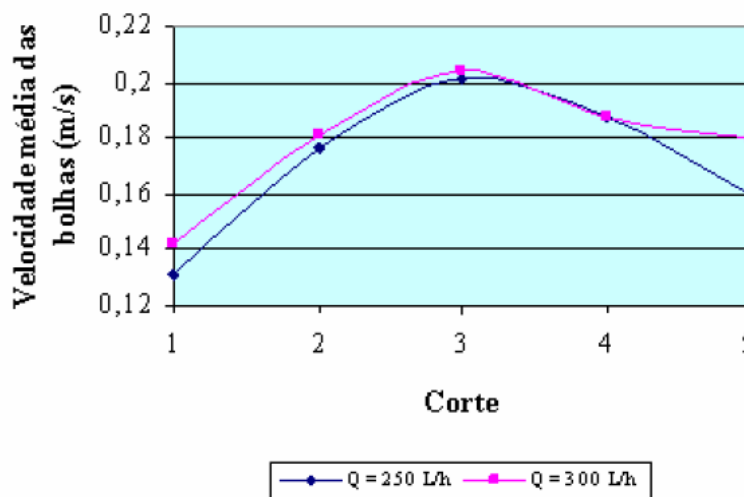


Fonte: Salla (2006).

Para uma dada vazão, Salla (2006) identificou que o pico da velocidade ascensional se dava na região central da seção transversal e, à medida que se direcionava para as paredes da coluna, a velocidade ascensional ia diminuindo até atingir um valor mínimo

(Figura 13). Isso ocorre devido à coalescência na região central da coluna, em virtude disso, tem-se um aumento no diâmetro das bolhas, consequentemente, um aumento na velocidade ascensional das bolhas nessa posição (na Figura 13, o corte 3 refere-se ao centro da coluna, enquanto os cortes 1 e 5 estão próximos às paredes da coluna).

Figura 13 - Velocidade média das bolhas de ozônio (m/s) em função dos cortes, para as vazões de ozônio aplicadas de 250 e 300 (L/h). (Seção 8)



Fonte: Salla (2006).

Considerando a análise da velocidade ascensional ao longo da altura da coluna, ou seja, ao longo das 12 seções de estudo, Salla (2006) identificou que, para uma dada vazão, a velocidade na seção próxima ao difusor (Seção 1) é menor, quando comparada às demais. Isso se deve à resistência provocada pela coluna de água e por não ocorrer efeitos significativos da coalescência na saída do difusor.

## 2.3 ARRASTE DE GASES (GAS STRIPPING)

De acordo com Souto (2009), o processo de arraste de gás consiste basicamente no transporte acelerado de massa da fase líquida para a fase gasosa a partir do contato com um gás que não possua o composto que se pretende remover, ou caso contenha, é necessário que este se encontre em concentrações muito baixas para que não haja comprometimento no processo.

O arraste de gases é uma técnica considerada bastante eficiente para remoção de gases dissolvidos em águas residuárias como, por exemplo, amônia ( $\text{NH}_3$ ), sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ), além de uma variedade de compostos orgânicos voláteis (VOCS, do

inglês *volatile organic compounds*). Em relação aos gases dissolvidos, é necessário que estes se encontrem na forma não ionizada para que, somente assim, ocorra o arraste, pois nesta forma tem-se a garantia da fase gasosa que é considerada volátil. (METCALF & EDDY, 2014). Como exemplo, tem-se a reação que segue.

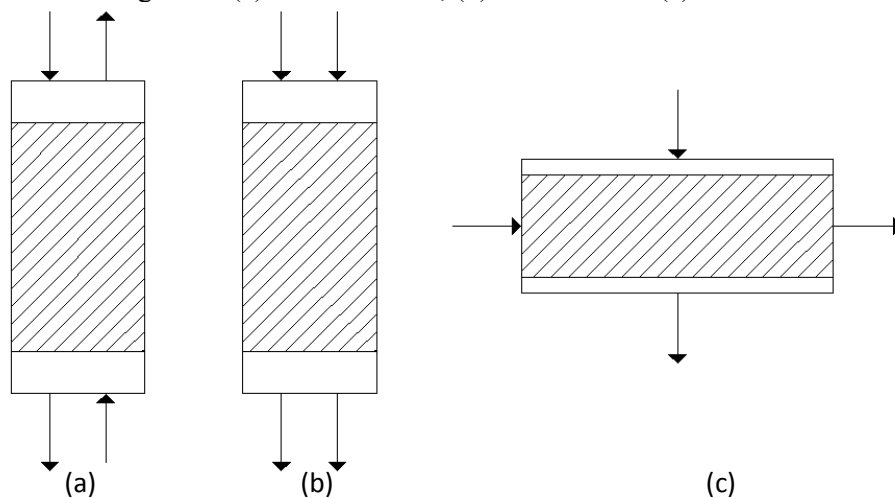


Como a remoção da amônia ocorrerá somente na forma gasosa, então os íons amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) devem ser convertidos em amônia gasosa ( $\text{NH}_3$ ). Todavia, para que isto ocorra é necessário elevar o pH ( $\text{pH} > 7$ ), pois assim tem-se a garantia de que o equilíbrio é deslocado para a direita, uma vez que a adição dos íons hidroxila ao meio líquido ocasiona uma diminuição nas concentrações dos íons  $\text{H}^+$ , consequentemente, tem-se uma maior produção da amônia na forma gasosa.

Em relação aos sistemas de arraste com gases, é possível dividir em 2 grupos principais: tanques de arraste e torres de arraste. Os sistemas do tipo tanques de arraste contam com reservatórios nos quais possuem aeradores, sendo que estes são responsáveis por promover um aumento na superfície de contato entre gás e líquido, seja pelo borbulhamento de ar ou pela ação de agitadores mecânicos. Já nos sistemas do tipo torres de arraste, o aumento da superfície de contato entre gás e líquido é decorrente do escoamento do líquido na forma de um filme fino sobre a superfície de um determinado material de recheio, concomitantemente a isto, realiza-se a passagem de uma corrente de ar por esse recheio, cujo sentido é contrário ao do escoamento do líquido (LaGREGA *et al.*, 2001 *apud* SOUTO, 2009).

No que se refere à direção e ao sentido de escoamento do líquido e do ar, Metcalf & Eddy (2014) apresentam três tipos de fluxo para os sistemas de arraste, tais como: contracorrente, co-corrente e cruzado (Figura 14). Dentre os tipos de fluxo apresentados, os autores citam que o fluxo de contracorrente é o mais utilizado nas operações de transferência de massa.

Figura 14 - Classificação dos sistemas de arraste com base nos sentidos dos fluxos das fases líquida e gasosa: (a) contracorrente, (b) co-corrente e (c) cruzado



Fonte: Adaptado de Metcalf & Eddy (2014).

Como exemplo de pesquisa relacionada a esta temática, é válido mencionar os estudos realizados por Wu *et al.* (1998). Os autores observaram que a ozonização aplicada ao efluente oriundo da limpeza de uma granja suína é responsável por promover a remoção de diversos compostos químicos, sendo que esta remoção se dá em virtude da oxidação da matéria orgânica pelo ozônio e, além disso, foi observado o arraste de compostos a partir da utilização dos gases nitrogênio e oxigênio.

Na referida pesquisa, os autores se propuseram a analisar a remoção dos compostos fenol e *p*-etilfenol pelos processos de *stripping* com nitrogênio, oxigenação e ozonização. Em todos os processos, os autores utilizaram-se uma vazão de 1,8 L/min e um tempo de contato de 40 minutos. Dentre os resultados obtidos, Wu *et al.* (1998) identificaram que o *stripping* com o gás nitrogênio foi capaz de reduzir o fenol em cerca de 3% e o *p*-etilfenol em 10%, já a oxigenação garantiu uma redução de aproximadamente 15% para o fenol e 35% para o *p*-etilfenol e, por fim, a ozonização possibilitou uma redução de cerca 79% para o fenol e 91,5% para o *p*-etilfenol.

Os efeitos de *stripping* também foram observados por Salla (2006). O autor identificou que nos experimentos referentes às cargas de produção de ozônio de 0,97 gO<sub>3</sub>/h e 2,92 gO<sub>3</sub>/h e tempo de contato 60 min, as maiores remoções em massa de DQO em relação à massa de ozônio aplicada ocorreram nos primeiros 5 minutos de contato com o gás, isto foi atribuído às reações de oxidação do ozônio associada ao fenômeno do *stripping* de compostos orgânicos. Apesar do autor não ter realizado a quantificação dos

efeitos de *stripping* de compostos orgânicos, foi possível identificar que, nos primeiros 5 minutos de ozonização, tal fenômeno ocorreu em maior proporção quando comparado ao da oxidação.

# CAPÍTULO 3

## METODOLOGIA

### 3.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O EFLUENTE UTILIZADO

O efluente utilizado na presente pesquisa foi proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Uberabinha, situada no Distrito Industrial do município de Uberlândia (MG). Esta ETE é responsável pelo tratamento de 95% do esgoto gerado no município de Uberlândia, cuja estimativa populacional para o ano de 2018 é de 683.247 habitantes, segundo informações do IBGE (2018). Atualmente, o tratamento é realizado em 3 fases: fase 1 (tratamento preliminar), fase 2 (tratamento secundário com reator anaeróbico de fluxo ascendente) e fase 3 (tratamento final com floculação/flotação).

Na primeira fase, designada como tratamento preliminar, o esgoto passa, inicialmente, por grades grossas, grades finas mecanizadas e desarenadores mecanizados para que haja a remoção de sólidos grosseiros e areia. Posteriormente, o esgoto é encaminhado para a calha Parshall para a medição da vazão de esgoto que chega à estação.

Já na segunda fase, conhecida como tratamento secundário, o esgoto é encaminhado para os reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB), que são responsáveis por reduzir a carga orgânica, transformando-a em lodo digerido e biogás. Atualmente, a estação conta com doze reatores, sendo que cada reator possui um volume de 5.400 m<sup>3</sup> e cuja eficiência de projeto é de 70% de remoção de carga orgânica. É interessante ressaltar que nesta fase ocorre também a desidratação do lodo formado nos reatores, cuja destinação final é o aterro sanitário do município.

Por fim, na terceira fase, caracterizada como tratamento final, o esgoto é destinado aos canais Flot-Flux, nos quais se baseiam na aplicação sequencial e em fluxo das técnicas de floculação e flotação, com a utilização de coagulantes e floculantes, respectivamente. O Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) caracteriza esta etapa como um pós-tratamento da etapa anterior, uma vez que é possível obter remoções de carga orgânica superiores a 90%.

### 3.2 AMOSTRAGEM

As amostras do efluente foram coletadas após a passagem pelo canal Flot-Flux, ou seja, após a passagem por todo o tratamento dentro da ETE e antes do lançamento no corpo receptor. Visto que a ETE conta com 2 canais Flot-Flux, as coletas foram realizadas no final do Canal 1 (vazão máxima de tratamento de 1400 L/s). É interessante ressaltar que todas as coletas foram realizadas no momento em que não havia o fornecimento do antiespumante para o efluente tratado e não se fazia a dragagem do lodo para o TLF (Tanque de Lodo dos Flotadores). A adoção desta padronização teve como intuito evitar possíveis interferências do antiespumante na aplicação da técnica de ozonização e, além disso, evitar que as eventuais partículas remanescentes de lodo, encaminhadas para o corpo receptor, interferissem nos ensaios de caracterização. A Figura 15 traz uma coleta de amostra no final do canal Flot-Flux 1.

Figura 15 - Coleta de amostra no final do canal Flot-Flux 1



Fonte: Arquivo pessoal (2018).

Com relação ao número de coletas, o gerente geral responsável pela ETE Uberabinha autorizou, inicialmente, uma coleta de amostra por mês. Todavia, ao longo dos ensaios, verificou-se que as características do efluente se alteravam drasticamente quando armazenado por um longo período de tempo. A partir disso, foi autorizada a realização de três coletas de amostras mensais, em períodos especificados pelo supervisor de operações da ETE, sendo que estas foram distribuídas entre os meses de abril a setembro de 2018.

Em cada campanha amostral, foi autorizado que se coletasse 25L de efluente tratado, todavia essa quantidade era insuficiente para a execução dos ensaios de ozonização e *gas stripping* em uma mesma amostra. Em decorrência disto, em determinadas campanhas, foi autorizada a coleta de 50L de amostras de efluente para a execução de ambos os ensaios.

As amostras de efluente eram armazenadas em recipientes do tipo polietileno de alta densidade (PEAD). Após cada coleta, no intuito de se preservar as características do efluente, os recipientes cheios eram acondicionados em uma geladeira que se encontrava no Laboratório de Saneamento da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia.

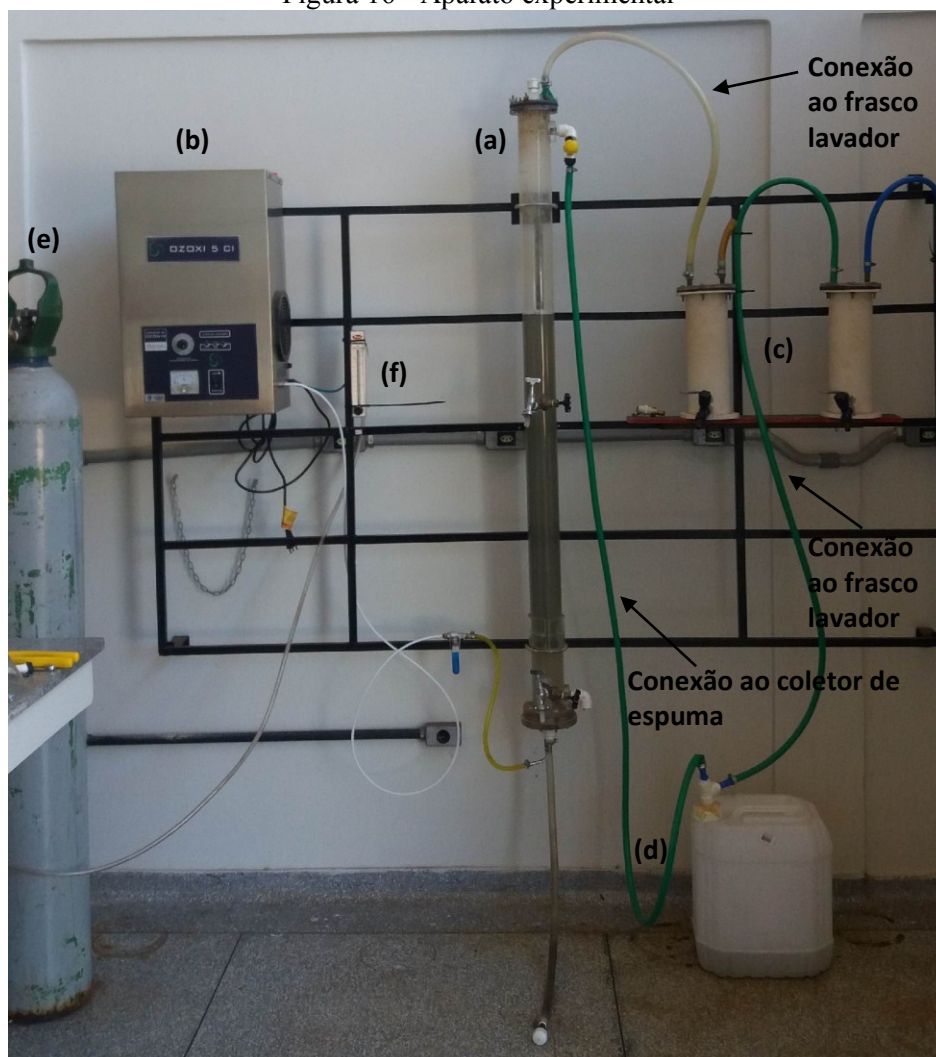
### 3.3 DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

A instalação experimental que norteou o desenvolvimento da presente pesquisa se encontra no Laboratório de Saneamento da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia – Campus Santa Mônica.

A instalação experimental é composta basicamente por: coluna de ozonização (a), gerador de ozônio (b), frascos lavadores de ozônio (*off-gas*) (c), frasco coletor de espumas (d), cilindros de oxigênio e nitrogênio (e) e rotâmetro (f). A Figura 16 ilustra os componentes básicos do aparato experimental.



Figura 16 - Aparato experimental



Fonte: Arquivo pessoal (2018).

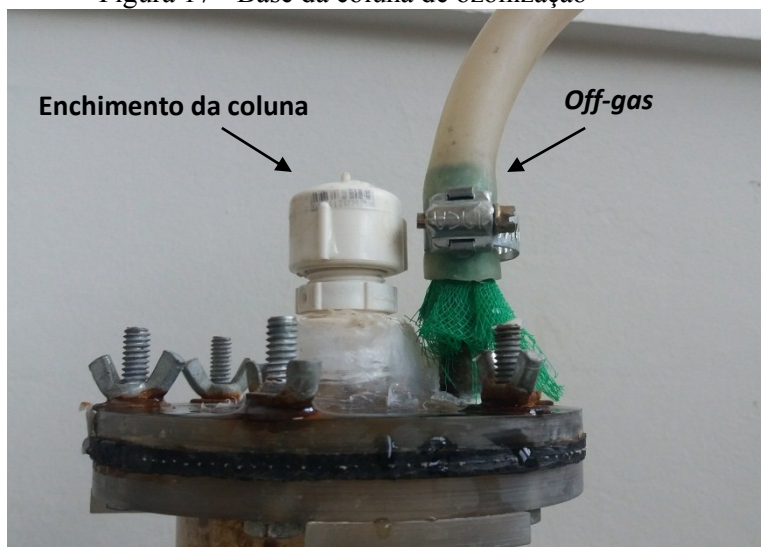
### 3.3.1 Coluna de ozonização

A coluna de ozonização utilizada é constituída de material acrílico transparente, seção transversal circular de 100 mm de diâmetro, 1,5 m de altura e 5 mm de espessura da parede. Ao longo da altura da coluna foram instaladas duas torneiras para a coleta de amostras do efluente, sendo que estas se encontram posicionadas a 0,10 m e 0,70 m da base da coluna.

Na base da coluna tem-se uma tampa circular em acrílico flangeada e presa por parafusos igualmente espaçados em aço inox de 1/4'', além de um difusor de ar responsável por gerar bolhas ascensionais e confeccionado em plástico microporoso de 75 mm de diâmetro, 70 mm de altura e com poros de 20  $\mu\text{m}$  de abertura, capaz de gerar uma vazão máxima de ar de 3  $\text{m}^3/\text{h}$ .

Na parte superior da coluna também existe uma tampa circular em acrílico flangeada e presa por parafusos igualmente espaçados em aço inox de 1/4'', na qual constam 2 aberturas, sendo uma para encher a coluna com efluente ou água para limpeza e outra para encaminhar o ozônio residual gasoso para os lavadores de gás. É interessante ressaltar que na abertura referente ao *off-gas* utilizou-se uma tela para permitir a passagem apenas do gás residual e impedir que as espumas, formadas durante o borbulhamento do gás, alcançassem o frasco lavador de gás (*off-gas*), conforme mostrado na Figura 17.

Figura 17 - Base da coluna de ozonização



Fonte: Arquivo pessoal (2018).

Diante das quantidades excessivas de espumas geradas, optou-se por utilizar um recipiente que permitisse a coleta e promovesse o acúmulo de tais espumas sem interferências para o sistema. Para isto, foi necessário instalar, na face lateral direita da coluna, um joelho e um registro de pressão de policloreto de vinila (PVC) ligado a uma mangueira de plástico que, por sua vez, se encontrava acoplada ao frasco coletor de espumas, conforme demonstrado na Figura 16.

### 3.3.2 Gerador de ozônio

O gerador de ozônio (ozonizador) utilizado na presente pesquisa é o Ozoxi 5 CI da empresa OZOXI. De acordo com as informações obtidas pela empresa, o ozonizador é capaz de produzir o ozônio a partir do ar comprimido ou do oxigênio puro, todavia é interessante ressaltar que, para o desenvolvimento da pesquisa, optou-se por utilizar o

oxigênio puro como fonte de alimentação, uma vez que este possibilita um maior rendimento na ozonização.

A produção do ozônio é realizada mediante o mecanismo de descarga elétrica, também conhecida por efeito corona, responsável por promover a dissociação da molécula de oxigênio que, por sua vez, se ligará a outra molécula de oxigênio molecular para dar origem ao gás ozônio. É importante salientar que o ozonizador possui uma chave que permite escolher a porcentagem de ozônio a ser produzida, sendo que, em todos os ensaios de ozonização, optou-se por trabalhar com a porcentagem máxima de produção de ozônio (100%).

Com relação à capacidade real de produção de ozônio, utilizaram-se os dados de calibração de Mendonça *et al.* (2017), os quais foram obtidos a partir do método iodométrico previsto pelo *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998). Os autores obtiveram as seguintes capacidades de produção em função da vazão: 2,07 gO<sub>3</sub>/h para a vazão de 60 L/h ou 1 L/min, 5,38 gO<sub>3</sub>/h para a vazão de 180 L/h ou 3 L/min e 7,15 gO<sub>3</sub>/h para a vazão de 300 L/h ou 5 L/min (estas foram as vazões utilizadas no presente estudo de mestrado). É válido ressaltar que os referidos valores de produção de ozônio foram obtidos a partir das mesmas configurações experimentais utilizadas na pesquisa em questão, ou seja, tendo o oxigênio puro como a fonte de geração de ozônio (99,95% de pureza) e a porcentagem de produção de ozônio na posição de 100%.

Acoplado ao ozonizador, foi utilizado um rotâmetro para fixar a vazão de entrada do gás ozônio para o interior da coluna. O rotâmetro em questão é da marca Dwyer e possui uma graduação de 0,5 a 5,0 L/min.

### 3.3.3 Frascos lavadores de ozônio (*off-gas*)

A parcela de ozônio que não reagir com a fração líquida no interior da coluna de ozonização deverá ser conduzida para os frascos lavadores de gás, pois como se trata de um gás tóxico, é necessário que haja a quebra de suas moléculas para a sua posterior liberação para a atmosfera. Para isto, os frascos lavadores foram preenchidos com solução de iodeto de potássio (KI) a 2%, que é responsável por reagir com o ozônio por meio da quebra de suas moléculas e, assim, permitir a liberação do oxigênio gerado para a atmosfera (SALLA, 2006).

De acordo com Salla (2006), a prática laboratorial sugere que sejam colocados 2 frascos lavadores de gás dispostos em série, no intuito de garantir que uma determinada parcela de ozônio que não foi eliminada no primeiro frasco escape para a atmosfera, sendo assim, eliminada no segundo frasco. Todavia, diante das condições operacionais encontradas no laboratório, não foi possível atender tal sugestão, sendo utilizado um único frasco para recolher o ozônio residual gasoso proveniente da coluna e outro para recolher a parcela de ozônio não reacional proveniente do frasco coletor de espumas.

Assim, a instalação experimental contou com apenas 2 frascos lavadores de gás, cuja capacidade individual é de 3L. No intuito de garantir a quebra das moléculas de ozônio a partir de sua imersão na solução de KI a 2%, utilizou-se um tubo difusor poroso no interior de cada frasco lavador, sendo este responsável por formar bolhas do gás ozônio e, assim, garantir uma rápida transferência de massa do gás para a solução em questão.

A conexão entre a coluna, o frasco coletor de espumas e os frascos lavadores de gás era realizada por meio de mangueira de silicone e de plástico, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 16. Um lavador estava conectado diretamente à coluna e outro frasco (independente do primeiro) mantinha um coletor de espuma entre a coluna e o frasco lavador.

### 3.4 ATIVIDADES EXPERIMENTAIS

#### 3.4.1 Descrição das atividades experimentais

Como a presente pesquisa é de caráter experimental, foram realizadas 2 investigações experimentais para alcançar os objetivos propostos, sendo que em ambas foi utilizada a mesma instalação experimental, sob as condições de parâmetros de projeto e de análise semelhantes em sua grande maioria.

A primeira investigação experimental remete à aplicação da técnica de ozonização convencional para avaliar a capacidade do ozônio em oxidar compostos orgânicos e inorgânicos presentes no efluente. Para isto, utilizou-se o gás oxigênio puro como a fonte de alimentação necessária para gerar o ozônio. Já a segunda investigação experimental trata da aplicação da técnica de arraste com gás (*gas stripping*) para analisar a remoção de compostos voláteis presentes no efluente. Para isto, empregou-se o nitrogênio como o gás responsável por promover o arraste.

### - Ozonização convencional

Os ensaios de ozonização convencional foram realizados em batelada, a partir da instalação experimental mencionada no subitem 3.3, no intuito de determinar a influência dos parâmetros de projeto – vazão de ozônio (L/min) ou produção de ozônio (gO<sub>3</sub>/h) e tempo de contato (min) – na eficiência de remoção das variáveis físico-químicas e biológica em estudo.

Primeiramente, foi definida a altura do nível do efluente no interior da coluna de ozonização durante o enchimento, a qual ficou estabelecida em 1,00 m. Considerando a seção circular da coluna com D = 100 mm e adotando a altura de 1,00 m, tem-se que o volume de efluente utilizado nos ensaios de ozonização foi de 7,85 L.

Em seguida, definiu-se as vazões de ozônio em 1 L/min, 3 L/min e 5 L/min. Conforme mencionando no subitem 3.3.2, Mendonça *et al.* (2017) determinaram, a partir do método iodométrico, que o gerador de ozônio em estudo possui uma capacidade de produção de 2,07 gO<sub>3</sub>/h 5,38 gO<sub>3</sub>/h e 7,15 gO<sub>3</sub>/h para as respectivas vazões adotadas.

Além disso, para que ocorresse uma mistura suficiente entre os gases e o efluente em estudo, optou-se por fixar os tempos de contato em 0, 30 e 60 min, sendo estes utilizados para cada vazão de gás afluente. O tempo de contato de 0 min refere-se ao momento anterior ao do início do borbulhamento, ou seja, para a condição em que não há contato entre efluente e gás, por isso que, para este tempo, o efluente foi designado como efluente bruto.

Posteriormente, foi definida a altura de coletas de amostras de efluente ozonizadas como sendo a 0,7 m da base da coluna, na qual já se tinha instalada uma torneira. Apesar de a coluna possuir 2 torneiras, optou-se por realizar as coletas apenas na referida altura, pois esta proporcionaria uma melhor eficiência de transferência de massa gás-líquido quando comparada à torneira instalada a 0,10 m de altura da base, tendo em vista que alturas maiores proporcionam um tempo de contato maior entre as bolhas de gás ozônio e meio líquido.

Concomitantemente à altura, também foram definidos, para cada ensaio, os volumes de amostra coletados, sendo estes de 120 e 270 mL para os tempos de contato de 30 e 60 min, respectivamente. Os referidos volumes foram estabelecidos em função de volumes mínimos necessários para a execução dos ensaios de caracterização físico-química e biológica; além disso, optou-se por realizar os ensaios de caracterização referentes ao

nitrogênio amoniacal e nitrato somente para o tempo de contato de 60 min, por isso que se coletou um volume maior para o referido tempo. A explicação para tal decisão será apresentada no subitem 3.4.2.

O efluente em estudo apresentava grande quantidade de espumas - provavelmente ocasionadas por produtos de limpeza - sendo possível observá-las, até mesmo, nas coletas realizadas na ETE, conforme mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Presença de espumas no final do canal Flot-Flux 1 da ETE Uberabinha



Fonte: Arquivo pessoal (2018).

Nos testes iniciais, verificou-se que as espumas formadas na parte superior da coluna eram direcionadas para a mangueira de silicone ligada ao frasco lavador de gás. Como as partículas sólidas em suspensão eram carregadas juntamente com as espumas, então havia obstrução do difusor poroso que se encontrava no interior do frasco lavador, impossibilitando, assim, a realização dos ensaios.

Diante disso, foram realizados alguns testes preliminares, por meio da adição de alguns compostos, no intuito de minimizar a formação das espumas. Dentre os compostos testados, pode-se citar a terra diatomácea e o antiespumante AF 130.

A terra diatomácea foi testada por possuir composição química semelhante a um antiespumante comercializado pela empresa Assunção Distribuição – responsável por comercializar produtos químicos, compósitos, dentre outros - e por estar disponível no Laboratório de Saneamento da Faculdade. Todavia, a partir dos ensaios preliminares, verificou-se que a sua utilização seria inviável em virtude de não haver uma padronização

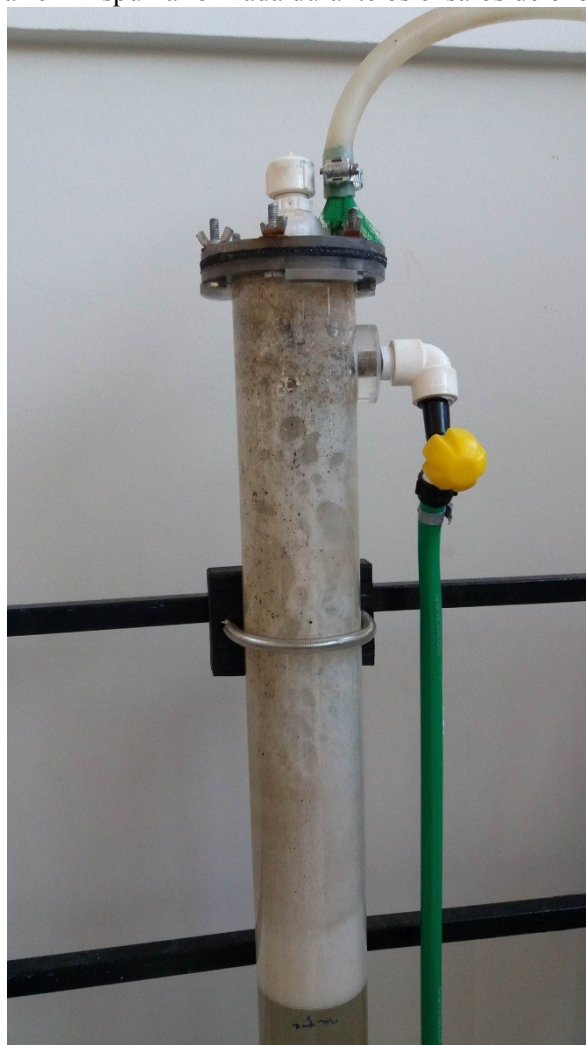
nas quantidades de uso, até porque o efluente em estudo apresentava características bastante variáveis em cada amostragem.

Posteriormente, testou-se o antiespumante AF 130 da empresa Faxon, também utilizado pela ETE Uberabinha no ponto final de tratamento, ou seja, no mesmo local onde eram realizadas as campanhas amostrais. Os testes realizados permitiram concluir que o antiespumante em questão alterava as características do efluente tratado, promovendo um aumento nos valores dos parâmetros em estudo, principalmente com relação à DQO. Assim, ao aplicar a técnica da ozonização, havia melhorias nos parâmetros, entretanto, observou-se que os parâmetros, para o tempo de 60 min, apresentaram valores similares ao efluente bruto (sem antiespumante).

Diante de tais circunstâncias, foi necessário adotar uma nova alternativa para a contenção das espumas formadas durante o processo (Figura 19). Baseando-se nas pesquisas desenvolvidas por Salla (2006), Silva (2008) e Soares (2007), verificou-se que poderia ser instalado um dispositivo entre a coluna de ozonização e o frasco lavador, de modo que permitisse a captação das espumas e, ainda, destinasse o ozônio residual para o *off-gas*. Assim, optou-se por utilizar um frasco de PEAD, conforme mostrado na Figura 16. Como o ozônio residual também era encaminhado para o recipiente juntamente com as espumas, foi necessário utilizar uma conexão em tê (PVC) para permitir a ligação ao segundo frasco lavador de gás.



Figura 19 – Espuma formada durante os ensaios de ozonização



Fonte: Arquivo pessoal (2018).

Com isso, tornou-se possível a realização dos ensaios de ozonização para o efluente em estudo, de acordo com o aparato experimental apresentado na Figura 16.

Cabe mencionar que o aparato experimental apresentou um funcionamento satisfatório somente a partir de junho de 2018, além disso, em decorrência da disponibilidade limitada de amostras de efluente tratado pelo DMAE (3 coletas mensais), foi possível realizar os ensaios de ozonização convencional em 10 amostras distintas de efluente. Os resultados provenientes de coletas anteriores a esse período se caracterizam como testes preliminares e que, por sua vez, não serão contemplados na presente pesquisa.



- Arraste de gás (*Gas stripping*)

Os ensaios referentes à aplicação da técnica de arraste com gás (*gas stripping*) também foram realizados em batelada, com o objetivo de determinar a influência dos parâmetros de projeto – vazão de gás nitrogênio (L/min) e tempo de contato (min) – na eficiência de remoção das variáveis físico-químicas em estudo. Para isto, utilizou-se parte da instalação experimental apresentada no tópico referente à ozonização convencional, seguida de alguns ajustes operacionais que serão mencionados a seguir.

Os parâmetros adotados foram mantidos os mesmos dos ensaios de ozonização convencional, com exceção da altura do nível de efluente no interior da coluna. Em testes preliminares, verificou-se que as espumas, formadas durante o processo de borbulhamento, se apresentavam de forma mais acentuada durante todo o período de realização de ensaio, diferentemente daquelas produzidas nos ensaios de ozonização, as quais ocorriam em grandes quantidades apenas nos primeiros minutos de contato com o gás ozônio. Além disso, observou-se que, em determinados momentos, as espumas não alcançavam o ponto de saída e, conseqüentemente, retornavam para a massa líquida, promovendo, desta forma, oscilações nas eficiências de remoção dos parâmetros em estudo.

Em decorrência disto, foi necessário adotar alturas diferentes em função da vazão, de modo que garantisse que todas as espumas formadas se mantivessem fora da massa líquida. Assim, foi adotado as alturas de efluente de 1,475 m, 1,41 m e 1,35 m para as vazões de 1 L/min, 3 L/min e 5 L/min, respectivamente.

Além disso, é importante frisar que o gás nitrogênio, utilizado para promover o arraste de compostos voláteis, é considerado um gás inerte e não tóxico. Em virtude disso, não houve a necessidade de encaminhá-lo para os frascos lavadores de gás. Todavia, alguns trabalhos (SANTOS, 2011; FERRAZ, 2010; SOUTO, 2009) mencionam a importância de recuperar a amônia removida durante o processo de *gas stripping*, tendo em vista que esta pode provocar a poluição do ar e problemas à saúde humana, quando liberada em grandes proporções. Entretanto, como a presente pesquisa promoveu remoções de amônia inferiores ao limite de tolerância do ar para condições consideradas insalubres prevista pela Norma Regulamentadora (NR) 15 do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE), determinado como 20 mg/L, então, não se utilizaram os frascos lavadores para a recuperação da amônia removida.

Deste modo, o aparato experimental utilizado para a realização dos ensaios de *gas stripping* apresentou pequenas modificações daquele proposto para os ensaios de ozonização. Como as alturas do nível de esgoto eram maiores e, para algumas vazões, haveria o extravasamento de efluente pela saída lateral, então, optou-se por fechar o registro de pressão do frasco coletor de espumas e conectar uma mangueira de plástico a uma das aberturas da parte superior da coluna para destinar as espumas a um balde. Além disso, não foi utilizado o gerador de ozônio, assim, o gás nitrogênio passava pelo rotâmetro e alimentava diretamente o difusor de ar.

Os ensaios referentes ao arraste de gás foram realizados concomitantemente aos ensaios de ozonização para algumas amostras de efluente sanitário. Assim, como havia certa limitação de volume nas coletas de amostras, conforme mencionado no subitem 3.2, foi possível realizar os ensaios referentes à investigação experimental em questão em 5 amostras distintas de efluente.

### 3.4.2 Parâmetros de análise

Com o intuito de analisar os efeitos da oxidação nas substâncias-alvo e do arraste de compostos voláteis no efluente em estudo, a partir da ozonização e *gas stripping*, respectivamente, foram realizados ensaios de caracterização de natureza físico-química e biológica que permitiram quantificar as referidas interferências. Os parâmetros avaliados neste estudo foram: pH, cor, turbidez, DQO, nitrogênio amoniacal, nitrato e *E. Coli* (apenas na ozonização).

A Tabela 2 apresenta os parâmetros de análise que nortearam a pesquisa, bem como a metodologia empregada para a quantificação, os equipamentos utilizados e, por fim, o prazo máximo para análise estipulado pela NBR 9898/1987 (ABNT, 1987).

Tabela 2 - Ensaio de natureza físico-química e biológica: parâmetros, metodologias, equipamentos e prazos para análise

| Parâmetro | Unidade    | Metodologia para quantificação | Equipamento       | Prazo para análise |
|-----------|------------|--------------------------------|-------------------|--------------------|
| pH        | -          | Potenciométrico                | Phmetro digital   | 6 h                |
| Cor       | mg Pt-Co/L | Espectrofotométrico            | Espectrofotômetro | 48 h               |

|                      |                      |                                     |   |        |
|----------------------|----------------------|-------------------------------------|---|--------|
| Turbidez             | UNT                  | Nefelométrico                       | Turbidímetro digital                          | 24 h   |
| DQO                  | mg O <sub>2</sub> /L | Colorimétrico por refluxo fechado   | Bloco digestor de DQO e Espectrofotômetro     | 7 dias |
| Nitrogênio amoniacal | mg/L                 | Destilação seguida da Nesslerização | Aparelhos para destilação e Espectrofotômetro | 24 h   |
| Nitrato              | mg/L                 | Método do ácido fenoldissulfônico   | Estufa de secagem e Espectrofotômetro         | 48 h   |
| <i>E. Coli</i>       | NMP/100 mL           | Tubos múltiplos                     | Exposição à luz ultravioleta                  | 24 h   |

Fonte: Autoria própria (2018).

Para todos os parâmetros em estudo, as análises foram realizadas em triplicata, no intuito de tornar os resultados mais representativos, com exceção da *E. Coli* e do pH. Além disso, é válido ressaltar que foi realizada a análise dos parâmetros físico-químicos e biológico para todos os tempos de contato em estudo, com exceção ao tempo de 30 min, no qual não foi possível analisar os parâmetros nitrato e nitrogênio amoniacal.

Verificou-se, em ensaios preliminares, que a diluição das amostras de efluente ensaiadas (ozonização e arraste com gás), para a análise do nitrato, apresentavam resultados abaixo do limite de detecção do equipamento. Assim, foi necessário realizar a leitura a partir do volume real da amostra (sem diluições). Para isto foi necessário 150 mL de amostra para as análises em triplicata, uma vez que cada análise demandava um volume de 50 mL. No entanto, notou-se que esta quantidade de volume retirada, para o tempo de 30 min, poderia interferir na hidrodinâmica da coluna - em função da redução da altura do nível efluente - para o tempo posterior, tendo em vista que a coluna possui pequenas dimensões. Diante disso, optou-se por realizar as análises de nitrato apenas para os tempos de contato de 0 e 60 min. Todavia, como as análises de nitrato e nitrogênio amoniacal são complementares, tal medida também foi adotada para este último parâmetro.

Com relação à determinação da eficiência de remoção de cada parâmetro, foi utilizada a equação 1.

$$E (\%) = [(C_{\text{inicial}} - C_{\text{final}}) / C_{\text{final}}] * 100 \quad \text{Eq. (1)}$$

Na qual: E é a eficiência de remoção (%);  $C_{\text{inicial}}$  é a concentração inicial (mg/L);  $C_{\text{final}}$  é a concentração final (mg/L).

### 3.4.3 Balanço de massa de ozônio

Por fim, para a determinação do balanço de massa de ozônio, utilizou-se apenas os dados de cargas de produção de ozônio e os resultados provenientes do excesso de gás encaminhado para os frascos lavadores, obtidos a partir do método iodométrico previsto pelo *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998). Para quantificar o excesso de gás no interior dos frascos lavadores, empregou-se a equação 2, conforme prevê Salla (2006) e Soares (2007).

$$Off\ gas\ (g\ O_3/h) = [(N_t * \Delta V_t * V_{Ki} * 24000 * 60) / (V_{amostra} * t * 1000)] \quad Eq. (2)$$

Na qual: *Off gas* é o excesso de ozônio gasoso (g O<sub>3</sub>/h); N<sub>t</sub> é a normalidade do tiossulfato de sódio (0,0205 N, 0,0252 N, 0,0267 N); ΔV<sub>t</sub> é a diferença entre o volume de tiossulfato consumido na titulação da amostra e o volume de tiossulfato consumido na titulação do branco (mL); V<sub>Ki</sub> é o volume da solução de iodeto de potássio 2% usado no frasco lavador de gás (L); V<sub>amostra</sub> é o volume da amostra coletada para titulação (mL); t é o tempo de aplicação do ozônio na coluna de ozonização (min); 24000, 60 e 1000 são os fatores de conversão para obtenção da produção em g/h.

## 3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Com a obtenção dos resultados referentes aos parâmetros físico-químicos e biológico após os ensaios de ozonização convencional e *gas stripping*, foram realizadas análises estatísticas no intuito de verificar se existiam diferenças significativas nos valores médios dos parâmetros em função das seguintes variáveis: cargas/vazões de gás aplicadas (ozônio e nitrogênio) e tempos de contato em estudo. Para isto, aplicou-se o método estatístico *Analyse of Variance* (ANOVA), tendo em vista que este permite a comparação dos dados que envolvem mais de 2 tratamentos ou situações experimentais. As análises estatísticas foram realizadas a partir da ferramenta computacional Excel 2010.

Como a ANOVA se enquadra como um teste de hipótese, então se testou duas hipóteses: hipótese nula (H<sub>0</sub>), na qual as médias de remoção são consideradas iguais para uma dada variável (cargas/vazões ou tempos de contato); hipótese alternativa (H<sub>1</sub>), na qual as médias de remoção são consideradas diferentes para uma dada variável (cargas/vazões ou tempos de contato), ou seja, existe pelo menos uma das médias que difere das demais.

Assim, para validar uma das hipóteses, estabeleceu-se o nível de significância de 5%, consequentemente, se o valor-p obtido pelo teste fosse menor que o nível de significância estabelecido de 0,05, então se rejeitou a hipótese nula e, consequentemente, afirmou-se que as médias de remoção são diferentes em relação a uma dada variável. Entretanto, caso o valor-p obtido pelo teste fosse maior que o nível de significância estabelecido de 0,05, então se admitiu a hipótese nula, por conseguinte, concluiu-se que as médias de remoção são consideradas iguais para uma dada variável.

# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 OZONIZAÇÃO CONVENCIONAL

No processo de ozonização convencional foram investigadas as eficiências de remoção das variáveis físico-químicas e biológica após 30 e 60 minutos de tempo de contato, a partir da variação das dosagens de ozônio aplicadas ao efluente sanitário (2,07 gO<sub>3</sub>/h, 5,38 gO<sub>3</sub>/h e 7,15 gO<sub>3</sub>/h). Os resultados experimentais obtidos a partir da primeira investigação experimental, referentes a 10 amostras de efluente tratado, encontram-se disponíveis no Apêndice A.

#### 4.1.1 Caracterização do efluente bruto

Os resultados referentes aos parâmetros físico-químicos e biológico do efluente bruto, ou seja, sob a condição em que não houve contato entre efluente e gás ( $t = 0$ ), encontram-se disponíveis na Tabela 3. É importante frisar que, para cada parâmetro em estudo, exceto para o pH e a *E. Coli*, as medidas foram realizadas em triplicatas.

Tabela 3 – Características do efluente bruto proveniente da ETE Uberabinha

| Parâmetros                  | Valor Mínimo | Valor Máximo | Média ± Desvio Padrão |
|-----------------------------|--------------|--------------|-----------------------|
| pH                          | 7,00         | 7,48         | 7,14 ± 0,12           |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 66,33        | 304,67       | 158,23 ± 59,82        |
| Turbidez (UNT)              | 24,75        | 70,93        | 45,39 ± 9,96          |
| DQO (mg O <sub>2</sub> /L)  | 104,60       | 387,21       | 218,48 ± 65,93        |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 26,40        | 47,87        | 36,45 ± 4,79          |
| Nitrato (mg/L)              | 0,12         | 0,22         | 0,15 ± 0,03           |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400,000     | 2400,00      | 2400 ± 0              |

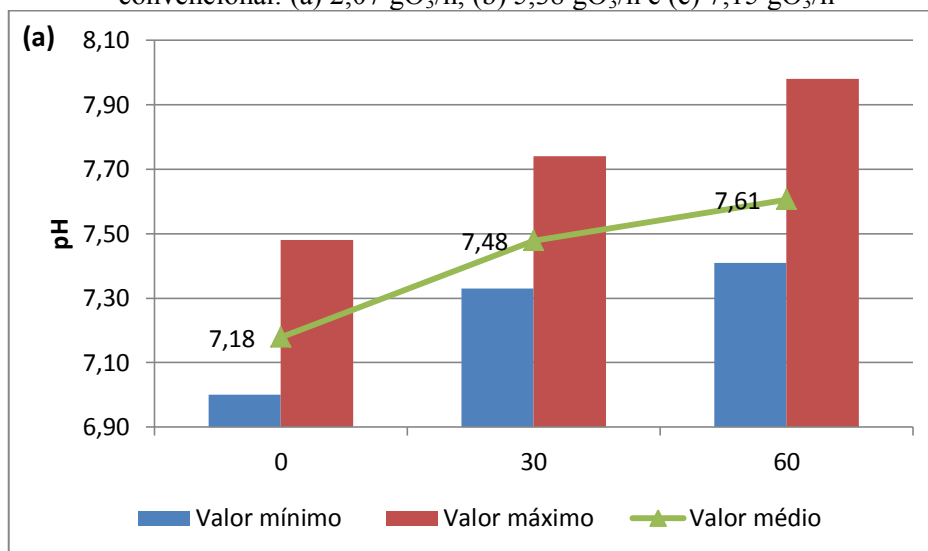
Fonte: Autoria própria (2018).

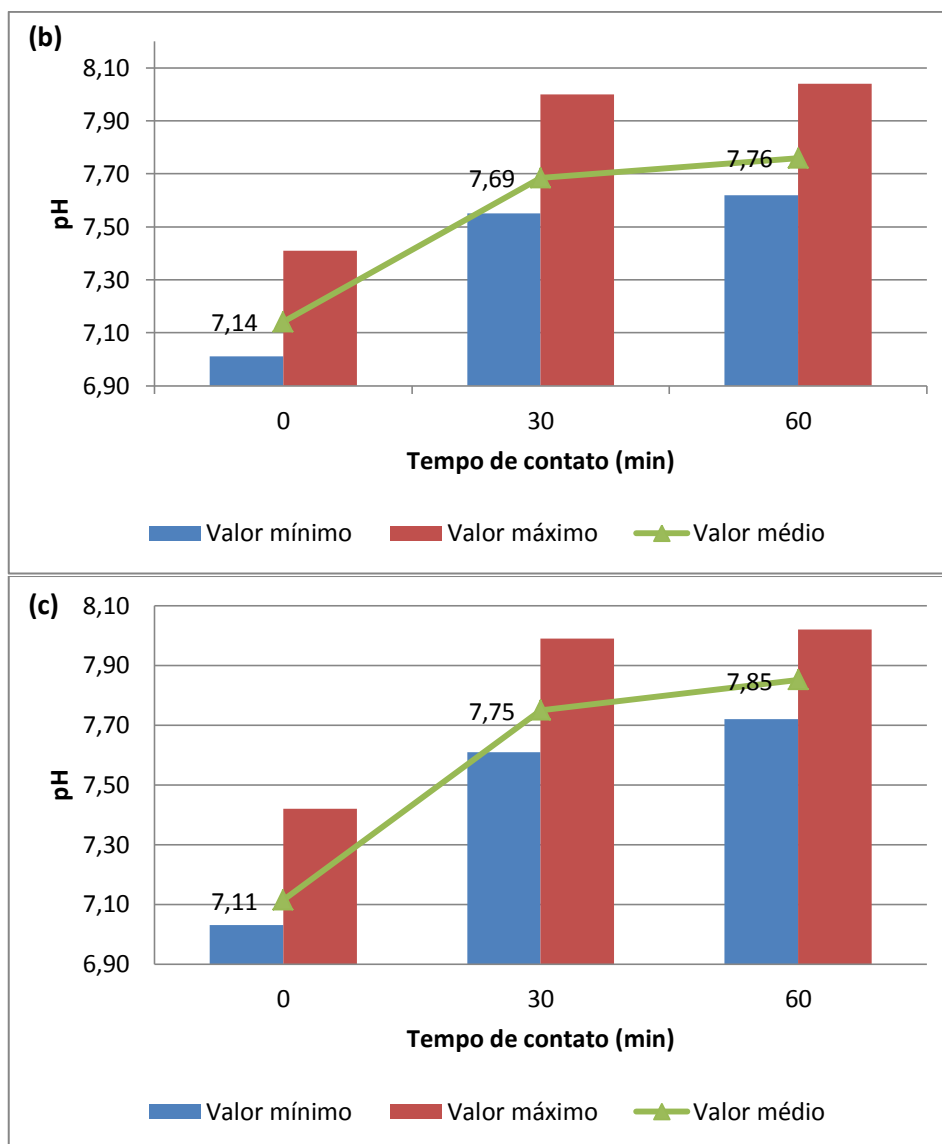
### 4.1.2 pH

Conforme mencionado anteriormente, o pH é uma variável de grande importância no estudo do processo de ozonização convencional, uma vez que o seu valor pode favorecer a ocorrência de um determinado tipo de oxidante (ozônio molecular e/ou radicais hidroxila) que irá promover a oxidação dos compostos orgânicos e inorgânicos, propiciando, assim, determinados níveis de remoções das substâncias alvo.

A partir da realização dos ensaios de ozonização obteve-se os valores médios de pH, sob diferentes cargas de ozônio aplicadas (2,07 gO<sub>3</sub>/h, 5,38 gO<sub>3</sub>/h e 7,15 gO<sub>3</sub>/h) e tempos de contato (0, 30 min e 60 min), para as 10 amostras de efluente. Diante desses resultados, confeccionaram-se os gráficos com os valores mínimos, máximos e médios de pH referentes a cada tempo de contato e a cada carga de ozônio aplicada, conforme observado na Figura 20.

Figura 20 – Valores mínimos, máximos e médios de pH obtidos a partir da ozonização convencional: (a) 2,07 gO<sub>3</sub>/h, (b) 5,38 gO<sub>3</sub>/h e (c) 7,15 gO<sub>3</sub>/h





Fonte: Autoria própria (2018).

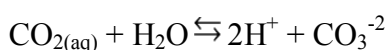
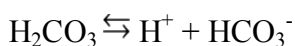
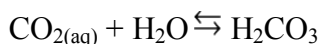
Nos ensaios nos quais se aplicou a carga de 2,07 gO<sub>3</sub>/h, o pH variou de 7,00 a 7,98 ao longo dos tempos de exposição ao ozônio, assumindo os valores médios de 7,18, 7,48 e 7,61 para os tempos de contato de 0, 30 e 60 min, respectivamente. Com relação aos ensaios nos quais se aplicou a carga de 5,38 gO<sub>3</sub>/h, o pH oscilou de 7,01 a 8,04, sendo que os valores médios foram de 7,14, 7,69 e 7,76 para os tempos de contato de 0, 30 e 60 min, respectivamente. Por fim, ao se aplicar a carga de 7,15 gO<sub>3</sub>/h nas amostras, o pH apresentou uma variação de 7,03 a 8,02, apresentando os valores médios de 7,11, 7,75 e 7,85 para os tempos de contato de 0, 30 e 60 min, respectivamente.

Para todas as cargas de ozônio aplicadas, é possível notar uma elevação progressiva do pH ao longo dos tempos de contato, sendo ocasionada, possivelmente, pelo *stripping* de CO<sub>2</sub>. Camilo Júnior (2018); Pasqualini (2010); Silva (2008); Silva e Daniel (2015); Soares



(2007); Schons (2017) também identificaram um aumento do pH à medida que se aumentavam o tempo de exposição ao ozônio.

Lei e Li (2014) explicam que a ozonização promove a oxidação (via molecular e/ou radicalar) dos compostos orgânicos e, com isso, produz-se o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). À medida que ocorre o processo de borbulhamento do  $\text{O}_3$  com a massa líquida, pode ocorrer o *stripping* de  $\text{CO}_2$  e, consequentemente, as reações de equilíbrio do ácido carbônico ficam comprometidas acarretando, assim, na redução da concentração dos íons  $\text{H}^+$ . Tal processo pode ser explicado a partir das reações que seguem.



A partir destas reações, observa-se que o *stripping* de  $\text{CO}_2$  implica no deslocamento do equilíbrio no sentido da redução dos íons  $\text{H}^+$ , com isso, tem-se um aumento no valor do pH. Além disso, Lei e Li (2014) enfatizam que, em condições básicas ( $\text{pH} > 7$ ), fato observado em todas as doses de  $\text{O}_3$  aplicadas, os íons bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) e carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) podem reagir os radicais hidroxila produzindo os íons hidroxila que, por sua vez, proporcionam um aumento no valor do pH.

Os valores médios de pH apresentaram variações significativas ( $p < 0,05$ ) somente para os tempos de contato em estudo, alcançando o valor-p de 0,0033. Já com relação às cargas de ozônio aplicadas, observa-se que os valores médios de pH não variaram significativamente, pois o valor-p foi igual a 0,2560. Diante disso, pode-se constatar que a ozonização promove um aumento no valor do pH somente em função dos tempos de exposição ao gás ozônio.

#### 4.1.3 Cor

O processo de ozonização convencional promoveu remoções significativas de cor para todas as cargas de ozônio aplicadas, sendo possível identificar percentuais de remoção ao longo de todo o período de exposição ao  $\text{O}_3$ . A Figura 21 permite verificar a ação do ozônio na remoção da cor de uma determinada amostra de efluente bruto da ETE Uberabinha ao longo do tempo.

Figura 21 – Remoção da cor de uma amostra do efluente bruto da ETE Uberabinha a partir da aplicação da carga de ozônio de 2,07 gO<sub>3</sub>/h nos tempos de contato de 0, 30min e 60min



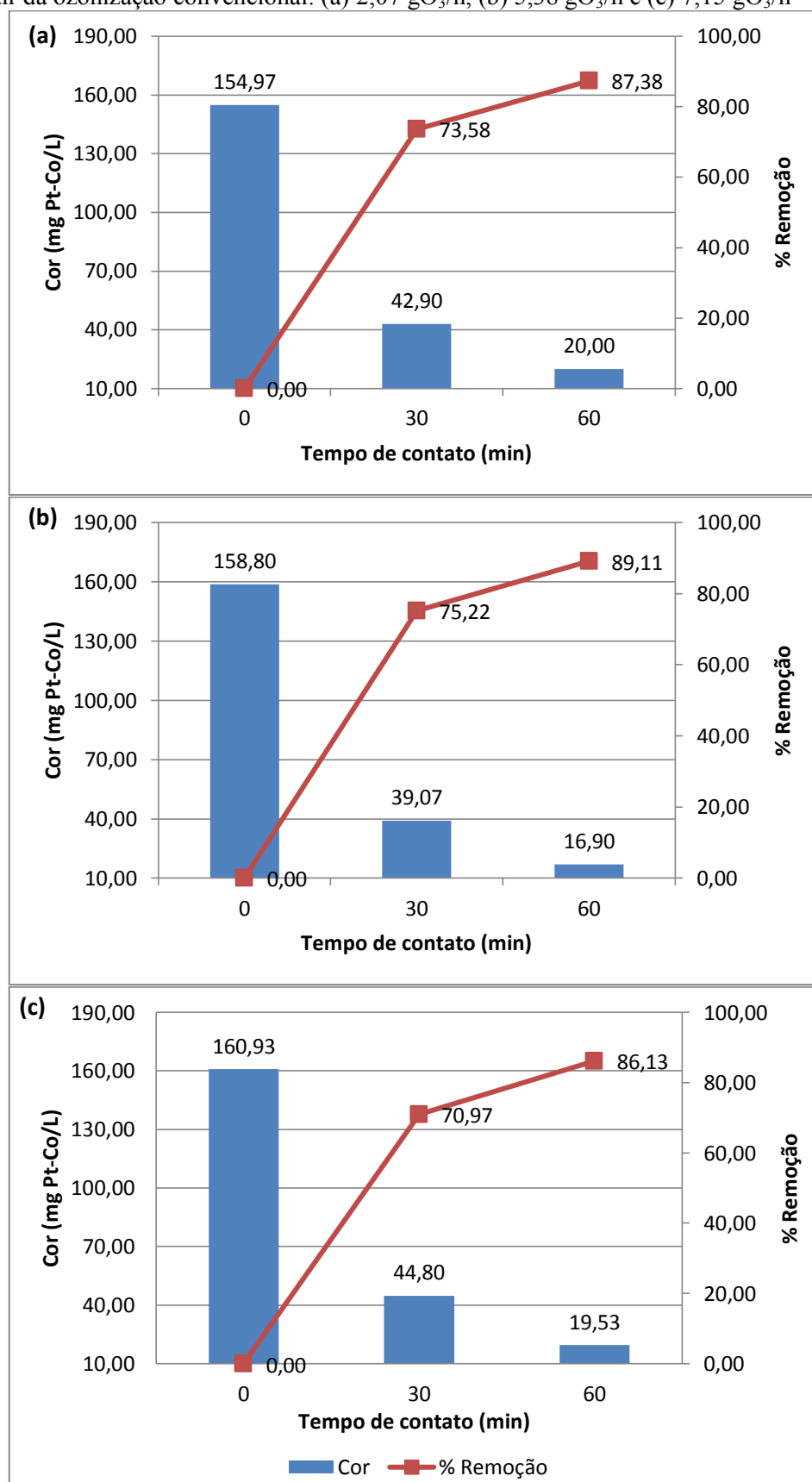
Fonte: Arquivo pessoal (2018).

De acordo com Costa (2003), as principais substâncias capazes de conferir cor ao efluente são provenientes principalmente de compostos aromáticos. A atuação do ozônio sob esses compostos se dá a partir do ataque direto sobre as ligações insaturadas, destruindo-as e gerando novos compostos como ácidos alifáticos, cetonas e aldeídos; promovendo, assim, a redução da cor do efluente (GOTTSCHALK; LIBRA; SAUPE, 2000; CHENG *et al.*, 2011).

Com base na Figura 22, observa-se que a carga de 5,38 gO<sub>3</sub>/h proporcionou remoções relativamente maiores, alcançando porcentagens médias de 75,22% e 89,11% para os tempos de contato de 30 e 60 min, respectivamente. Posteriormente, é possível identificar que, para a carga de 2,07 gO<sub>3</sub>/h, as médias de remoção foram de 73,58% e 87,38% para os tempos de contato de 30 e 60 min, respectivamente, seguida das médias de remoção de 70,97% e 86,13% para a carga de 7,15 gO<sub>3</sub>/h nos respectivos tempos. É importante ressaltar que, apesar das cargas de ozônio terem sido diferentes, as porcentagens de remoção alcançadas foram muito próximas para todos os tempos analisados.

A partir da análise estatística, pode-se concluir que as cargas de ozônio aplicadas, de fato, não alteraram de forma estatisticamente significativa os valores do parâmetro cor ( $p = 0,2766$ ). Entretanto, com base nos tempos de contato em estudo, observa-se que a remoção da cor apresentou uma variação significativa, tendo em vista que o valor-p alcançou um valor muito baixo ( $p = 4,14 \cdot 10^{-7}$ ).

Figura 22 – Valores médios de Cor (mg Pt-Co/L) e eficiências médias de remoção (%) obtidos a partir da ozonização convencional: (a) 2,07 gO<sub>3</sub>/h, (b) 5,38 gO<sub>3</sub>/h e (c) 7,15 gO<sub>3</sub>/h



Fonte: Autoria própria (2018).

Além disso, verifica-se que, para todas as cargas aplicadas, as maiores remoções de cor ocorreram nos primeiros 30 minutos de contato com o  $O_3$ , sendo que, após esse período, as remoções se deram de forma mais lenta. O fato em questão também foi observado por Tizaoui *et al.* (2007), os quais identificaram que a descoloração do efluente ocorreu de forma rápida apenas nos 12 min iniciais e, após esse período, a redução da cor se deu de forma lenta. Os referidos autores acreditavam que isto se deve às modificações nos mecanismos de reação do ozônio em virtude dos compostos intermediários gerados. Dore, Langlais e Legube (1980) observaram que a ozonização de compostos aromáticos ocorre, inicialmente, de forma bastante rápida. Todavia, em virtude dos subprodutos gerados na primeira etapa (ácidos e aldeídos), a segunda etapa da ozonização se processa de forma lenta, diminuindo, assim, a eficiência da remoção com o decorrer do tempo de contato.

A eficiência da técnica de ozonização na remoção da cor de efluentes sanitários é citada por diversos trabalhos; como exemplo, Salla (2006) obteve remoções de, aproximadamente, 39% e 82% para as respectivas cargas de ozônio de 0,97 g/h e 2,92 g/h, sob o tempo de contato de 20 min em ambos os experimentos. Além disso, a técnica em questão também se mostrou bastante eficiente para remover a cor de lixiviados provenientes de aterros sanitários, conforme mostrado por Tizaoui *et al.* (2007), no qual obteve remoção de 87% na cor sob uma dose de ozônio de 80 mg/L e tempo de contato de 60 min.

#### 4.1.4 Turbidez

Soares (2007) considera que, nos efluentes sanitários, a presença da turbidez está intimamente relacionada com a presença de partículas sólidas em suspensão. A remoção da turbidez pela ozonização pode ocorrer tanto por oxidação quanto pela flotação dos sólidos suspensos.

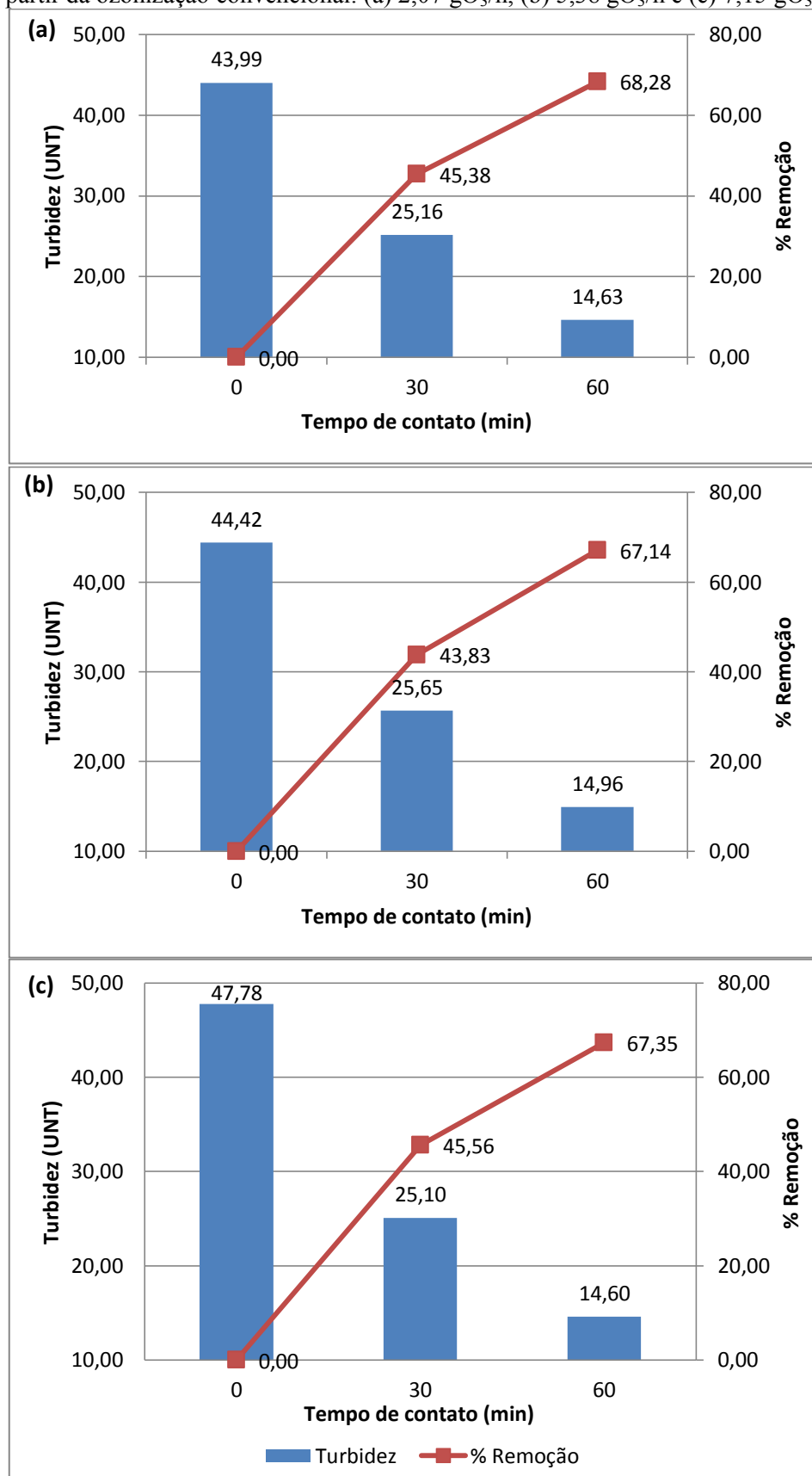
De acordo com Marce *et al.* (2016), o ozônio pode atacar as partículas sólidas da matéria orgânica logo no início da reação, promovendo uma diminuição no teor de sólidos e, conseqüentemente, uma rápida redução na turbidez. Além disso, durante o borbulhamento ascensional do gás ozônio, as partículas sólidas em suspensão podem aderir às bolhas e, por conseguinte, ser transportadas até a superfície líquida, sendo removidas pelo fenômeno da flotação (COSTA, 2003; SALLA *et al.*, 2011).

A partir da Figura 23 pode-se observar que, para todas as cargas de ozônio aplicadas, houve uma remoção da turbidez ao longo dos tempos de contato estudados. Em todos os casos, as porcentagens de remoção apresentaram resultados bastante semelhantes, sendo que as remoções foram mais acentuadas nos primeiros 30 min de exposição ao  $O_3$ , cujos valores médios foram de 45,38%, 43,83% e 45,56% para as respectivas cargas de ozônio de 2,07 g $O_3$ /h, 5,38 g $O_3$ /h e 7,15 g $O_3$ /h. Tal fato pode estar relacionado ao rápido ataque do ozônio às partículas sólidas, que proporciona remoções rápidas de turbidez, conforme menciona Marce *et al.* (2016); ou ainda, devido a remoção de grande parte desses sólidos junto às espumas que se formavam logo nos primeiros minutos de borbulhamento do gás, cuja deposição se dava no frasco coletor de espumas, ou seja, fora da massa líquida.

Com relação ao tempo de contato de 60 min, observa-se que houve reduções da turbidez, porém menos expressivas quando comparadas ao tempo de 30 min. Para as cargas de ozônio de 2,07 g $O_3$ /h, 5,38 g $O_3$ /h e 7,15 g $O_3$ /h, os valores médios de remoção foram de 68,28%, 67,14% e 67,35%, respectivamente.

A análise estatística permitiu concluir que o processo de ozonização convencional influencia a remoção da turbidez apenas no tocante aos tempos de contato aplicados, tendo em vista que esta variável promove uma influência estatisticamente significativa no parâmetro, pois o valor-p apresentou-se muito baixo ( $p = 1,98.10^{-5}$ ). Já com relação às cargas de ozônio aplicadas, o teste estatístico permitiu concluir que esta variável não é significativa na remoção do parâmetro em estudo, uma vez que o valor-p apresentou-se maior do que 0,05 ( $p = 0,5385$ ).

Figura 23 - Valores médios de Turbidez (UNT) e eficiências médias de remoção (%) obtidos a partir da ozonização convencional: (a) 2,07 gO<sub>3</sub>/h, (b) 5,38 gO<sub>3</sub>/h e (c) 7,15 gO<sub>3</sub>/h



Fonte: Autoria própria (2018).

A ozonização convencional também se mostrou eficiente para remover a turbidez do efluente sanitário proposto pela pesquisa de Camilo Júnior (2018), o qual conseguiu remoções de 58,9% e 81,5% para as dosagens de ozônio de 12 mg/L e 17 mg/L e tempos de contato de 120 min e 30 min, respectivamente. Além disso, pode-se citar também os estudos de Petala *et al.* (2006), os quais testaram 4 dosagens de ozônio (7,1, 15,4, 24,2 e 26,7 mg/L), para o mesmo tempo de contato, e verificaram que a maior remoção, cerca de 80%, ocorreu para a maior dosagem de ozônio aplicada.

#### 4.1.5 DQO

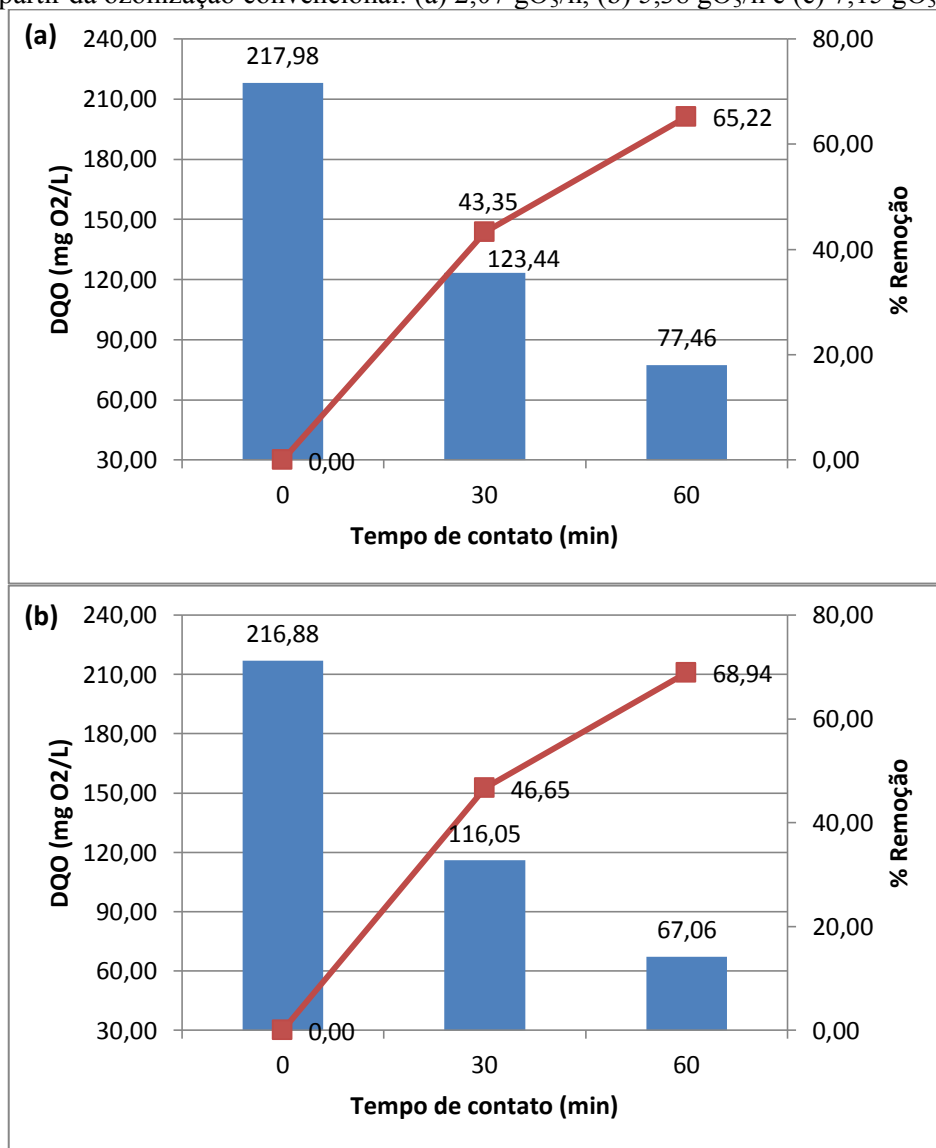
O ozônio pode oxidar os compostos orgânicos por meio de reações direta ou indireta, sendo que a atuação destas é definida basicamente conforme o pH do meio, a natureza e a concentração dos poluentes presentes nos efluentes sanitários (BELTRÁN, 2004).

Como visto no capítulo anterior, na reação direta, a oxidação ocorre por meio do ozônio molecular, o qual reage com compostos que apresentam grupos funcionais específicos (anéis aromáticos, hidrocarbonetos insaturados, etc) e geram compostos intermediários, considerados mais resistentes ao seu ataque, tais como: aldeídos, cetonas, álcoois e ácidos carboxílicos. A referida reação se caracteriza por ser seletiva, uma vez que o ataque ocorre em compostos específicos, além do mais, a sua ocorrência se dá em condições predominantemente ácidas ( $\text{pH} \leq 4$ ). Já na reação indireta, a oxidação ocorre por meio de radicais hidroxila, que possuem a característica de ser menos seletivo, por conseguinte, reagem com uma variedade de compostos orgânicos. Esta reação ocorre predominantemente em condições básicas ( $\text{pH} \geq 9$ ) e pode propiciar a oxidação completa dos poluentes orgânicos e, consequentemente, gerar compostos tais como  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ . É válido ressaltar que, em condições intermediárias de pH ( $4 < \text{pH} < 9$ ), as duas reações ocorrem concomitantemente (GOTTSCHALK; LIBRA; SAUPE, 2000; MAHMOUD FREIRE, 2007; CARVALHO, 2015).

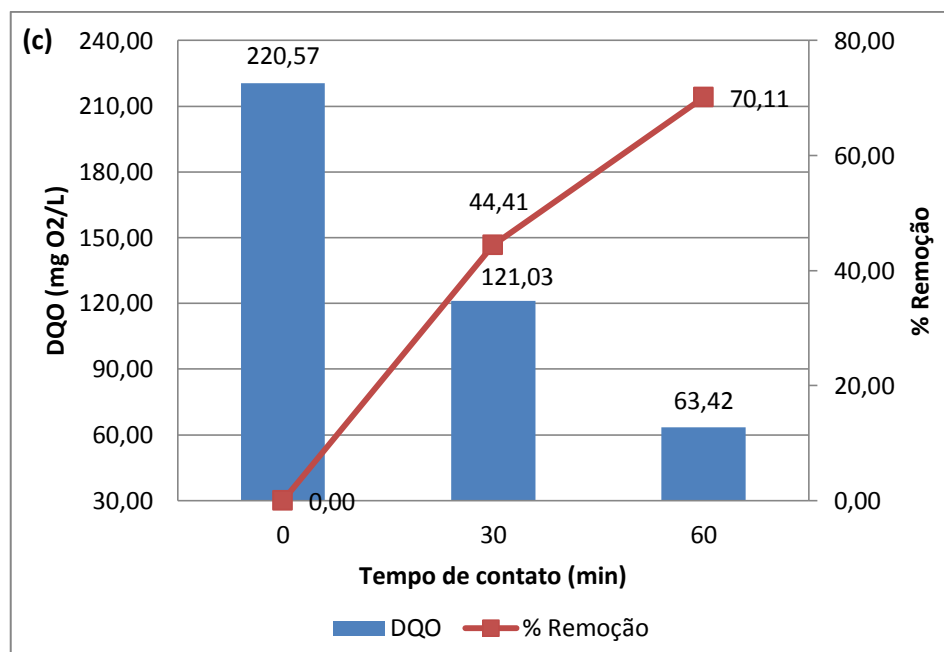
A partir dessas informações pode-se concluir que as reações direta e indireta foram responsáveis por promover a degradação dos compostos orgânicos, tendo em vista que o pH do efluente bruto da ETE Uberabinha apresentou um valor médio de 7,14. Diante disso, foi possível observar remoções de DQO ao longo de todo o processo de ozonização, independente da carga de ozônio aplicada, conforme mostra a Figura 24. Acredita-se que o

ozônio molecular foi responsável por degradar os compostos insaturados, enquanto que os radicais hidroxila pela degradação dos demais compostos, incluindo aqueles provenientes das reações diretas (aldeídos, cetonas, álcoois e ácidos carboxílicos); propiciando, desta forma, remoções consideráveis de DQO ao longo de todo o tempo de exposição ao  $O_3$ .

Figura 24 - Valores médios de DQO ( $mg\ O_2/L$ ) e eficiências médias de remoção (%) obtidos a partir da ozonização convencional: (a)  $2,07\ gO_3/h$ , (b)  $5,38\ gO_3/h$  e (c)  $7,15\ gO_3/h$







Fonte: Autoria própria (2018).

As maiores remoções de DQO ocorreram nos 30 min iniciais de contato ao O<sub>3</sub>, alcançando valores de 43,35%, 46,65% e 44,41% para as respectivas cargas de ozônio de 2,07 gO<sub>3</sub>/h, 5,38 gO<sub>3</sub>/h e 7,15 gO<sub>3</sub>/h. Apesar das porcentagens serem menores nos tempos de 60 min, é possível observar que houve a continuidade na remoção dos compostos orgânicos, já que, para este tempo, os valores alcançados foram de 65,22%, 68,94% e 70,11% para as cargas de ozônio de 2,07 gO<sub>3</sub>/h, 5,38 gO<sub>3</sub>/h e 7,15 gO<sub>3</sub>/h, respectivamente.

É importante ressaltar que os valores obtidos de remoção de DQO podem estar associados não somente à oxidação, como também ao fenômeno de arraste de gases orgânicos (*gas stripping*). Tal consideração também foi relatada por Salla (2006), Silva (2008), Soares (2007) e Wu *et al.* (1999).

Diante do exposto, é possível constatar que as cargas de ozônio aplicadas não influenciaram nas porcentagens de remoção da DQO, mas apenas os tempos de contato entre O<sub>3</sub> e efluente. Tal constatação também pode ser fundamentada com base na análise estatística, que permitiu identificar que as cargas de ozônio não promoveram uma variação significativa nos valores de DQO, já que o valor-p se apresentou maior que 0,05 ( $p = 0,3026$ ); enquanto que, para os tempos de contato em estudo, houve diferença estatisticamente significativa na remoção desta variável, uma vez que o valor-p mostrou-se muito baixo ( $p = 5,09 \cdot 10^{-6}$ ).

Além do mais, cabe mencionar que as diferentes remoções ao longo dos tempos podem estar associadas à presença de gases orgânicos na massa líquida, cujas

concentrações podem ser variadas; além disso, devido à natureza e a concentração dos compostos orgânicos que irão reagir com as diferentes vias do ozônio.

Nos estudos referentes à ozonização convencional em efluente sanitário, Salla (2006) obteve remoções de DQO próximas de 31% e 27% para os Experimentos 1 ( $P = 0,97 \text{ gO}_3/\text{h}$ ,  $C = 5 \text{ mg/L}$  e  $t = 20 \text{ min}$ ) e 2 ( $P = 2,92 \text{ gO}_3/\text{h}$ ,  $C = 15 \text{ mg/L}$  e  $t = 20 \text{ min}$ ), respectivamente. A partir disso, o autor também constatou que as dosagens de ozônio adotadas não influenciaram nas porcentagens de remoção de DQO.

#### 4.1.6 Nitrogênio Amoniacal

De acordo com Domenjoud *et al.* (2011), Singer e Zilli (1975) e Wang e Pai (2001), o processo de ozonização convencional é capaz de oxidar o nitrogênio amoniacal presente em amostras de efluente, para isto, é necessário que a amônia esteja sob a forma não ionizada ( $\text{NH}_4^+ \rightleftharpoons \text{NH}_3 + \text{H}^+$ ), sendo esta dependente do pH do meio reacional. A amônia se encontra na forma livre em valores de pH acima de 7, podendo ser removida pelo  $\text{O}_3$  por meio da reação direta ou indireta (HOIGNÉ; BADER, 1978).

Conforme apresentado nos resultados dos subitens 4.1.1 e 4.1.2, o valor médio do pH das amostras de efluente bruto se encontrava acima de 7 e, durante todo o processo de ozonização, os valores de pH se elevaram, independentemente da carga de ozônio aplicada, o que implica que havia disponibilidade da amônia livre passível de ser oxidada pelo  $\text{O}_3$ . Além do mais, como os referidos valores se encontravam na faixa entre 7 e 8 durante a ozonização, acredita-se que a amônia livre pode ter sido oxidada por meio de reações diretas, assim como se prevê no estudo desenvolvido por Hoigné e Bader (1978).

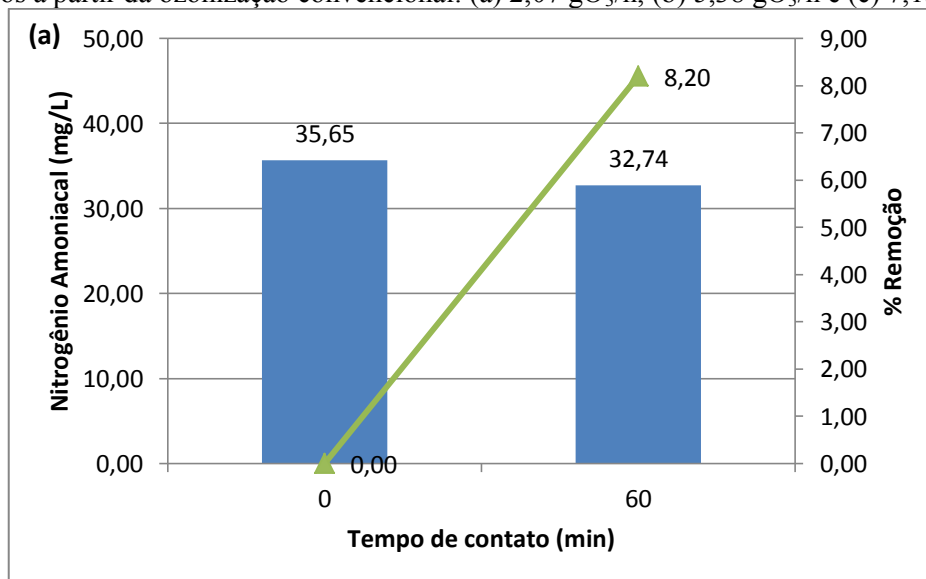
Com base nos resultados apresentados na Figura 25, verifica-se que houve baixas remoções de amônia ao longo dos tempos de contato em estudo, cujos valores alcançados foram de 8,20%, 10,44% e 10,82% para as respectivas cargas de  $2,07 \text{ gO}_3/\text{h}$ ,  $5,38 \text{ gO}_3/\text{h}$  e  $7,15 \text{ gO}_3/\text{h}$ . Analisando apenas os resultados referentes ao nitrogênio amoniacal, observa-se que as remoções não sofreram influência significativa das cargas de ozônio aplicadas, tendo em vista que as porcentagens de remoções foram muito próximas. Tal fato pode ser constatado por meio do teste estatístico aplicado, no qual detectou que o aumento da carga de ozônio não surtiu variação estatisticamente significativa na remoção do nitrogênio amoniacal, uma vez que o valor-p apresentou-se maior do que 0,05 ( $p = 0,2998$ ). Em contrapartida, para o tempo de contato analisado, o teste mostrou que há uma diferença

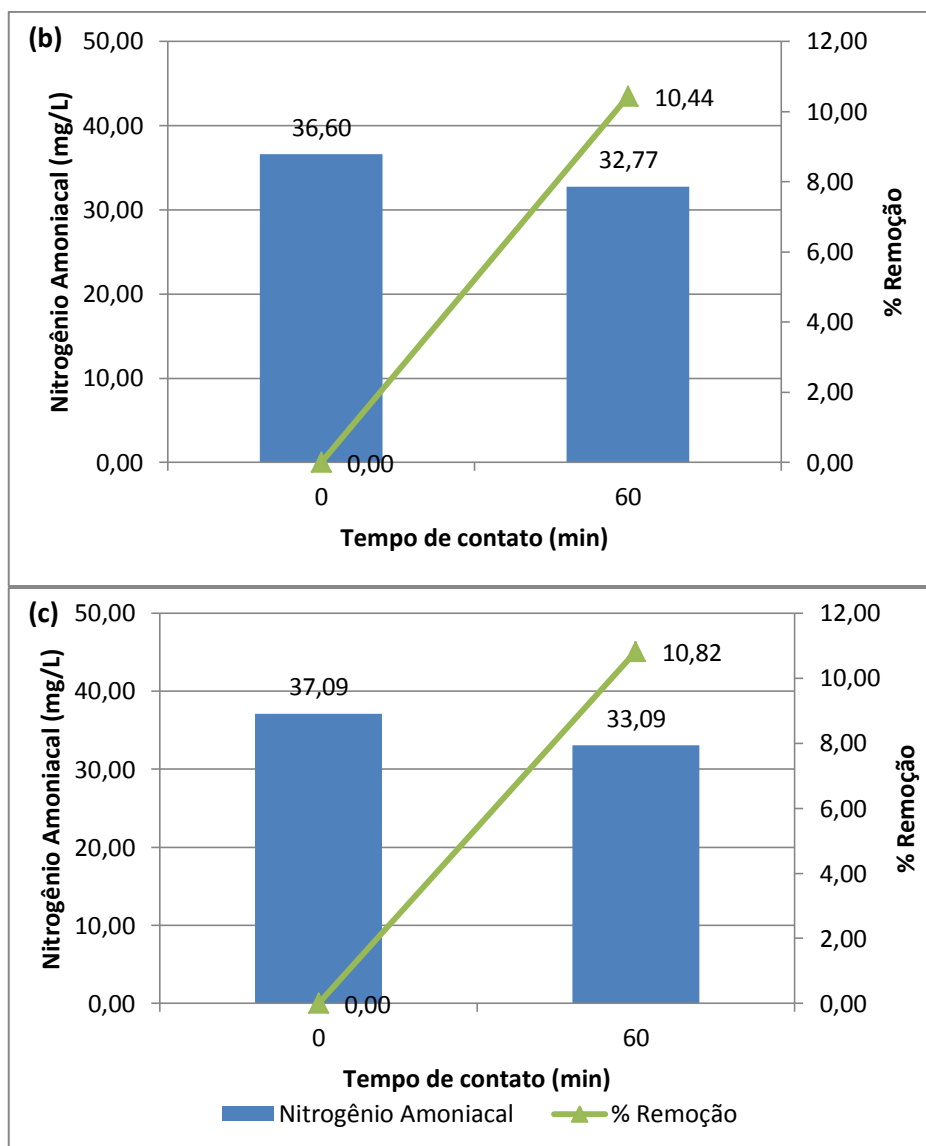
estatisticamente significativa na remoção do referido parâmetro, já que o valor-p apresentou-se menor do que 0,05 ( $p = 0,0088$ ).

Entretanto, os resultados referentes ao nitrato não permite chegar a esta conclusão, uma vez que houve maior formação de nitrato para a maior carga aplicada (7,15 gO<sub>3</sub>/h) em função de uma maior oxidação do nitrogênio amoniacal para a carga de 7,15 gO<sub>3</sub>/h. Então, o fato que justificaria os valores de remoções se manterem próximos, deve-se a uma maior oxidação do nitrogênio orgânico para a carga de 7,15 gO<sub>3</sub>/h. Assim, a concentração do nitrogênio amoniacal era equilibrada pela oxidação do nitrogênio orgânico, consequentemente, não se verificou variações significativas na concentração desse parâmetro.

Domenjoud *et al.* (2011) também obtiveram remoções de amônia durante o processo de ozonização de efluente sanitário. Na pesquisa em questão, os autores submeteram o efluente proveniente de uma estação de tratamento secundário ao contato com o ozônio sob as seguintes condições operacionais: vazão do gás de 0,1 m<sup>3</sup>/h, concentração de O<sub>3</sub> na fase gasosa de  $12 \pm 1$  g/m<sup>3</sup>, tempo de contato de 90 min e valor do pH da amostra de efluente igual  $7,8 \pm 0,1$ . A partir da ozonização, identificou-se uma diminuição na concentração de amônia de 31 mg/L para 21 mg/L, ou seja, uma remoção de 32,26%. Além disso, os autores também observaram que, após a ozonização, houve uma maior concentração na formação do nitrato quando comparada à redução da amônia, então, foi alegado que isso se deve à oxidação do nitrogênio orgânico.

Figura 25 - Valores médios de Nitrogênio Amoniacal (mg/L) e eficiências médias de remoção (%) obtidos a partir da ozonização convencional: (a) 2,07 gO<sub>3</sub>/h, (b) 5,38 gO<sub>3</sub>/h e (c) 7,15 gO<sub>3</sub>/h





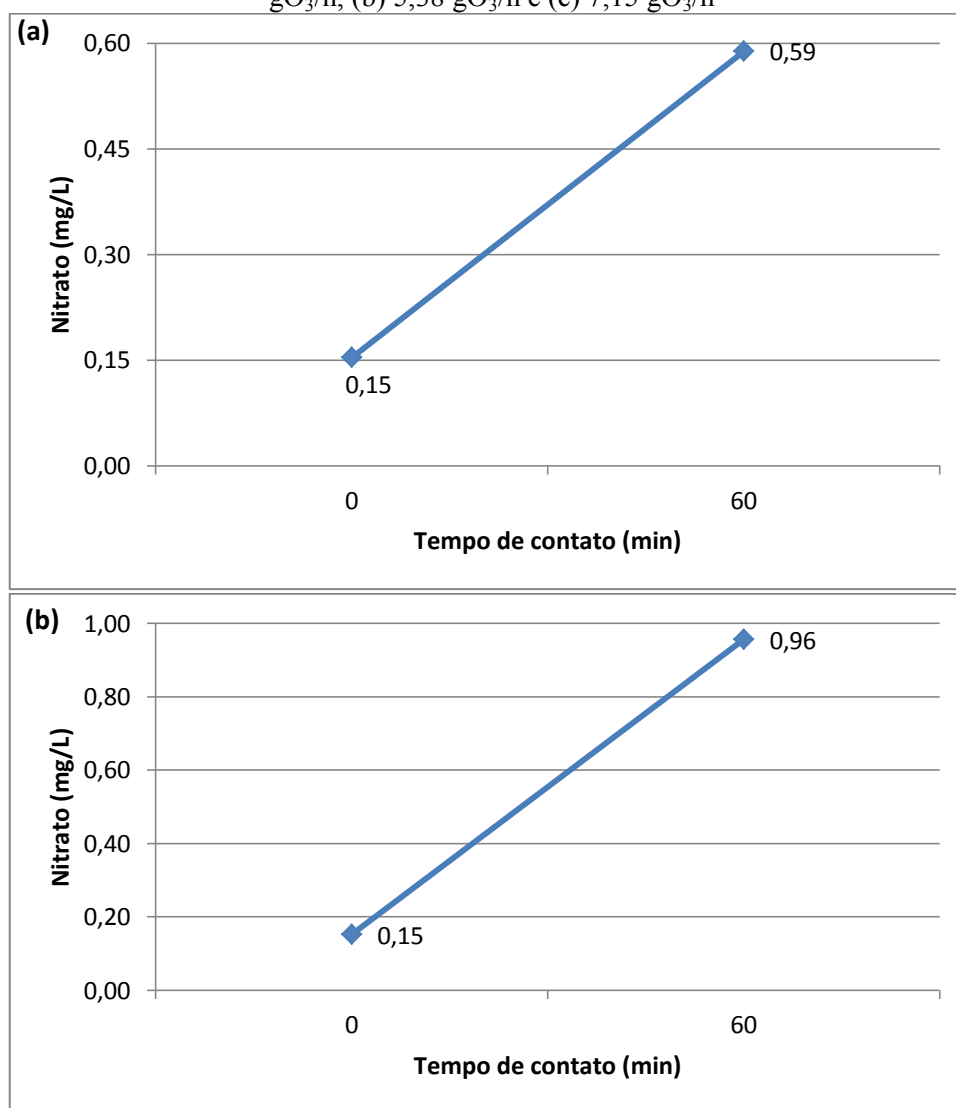
#### 4.1.7 Nitrato

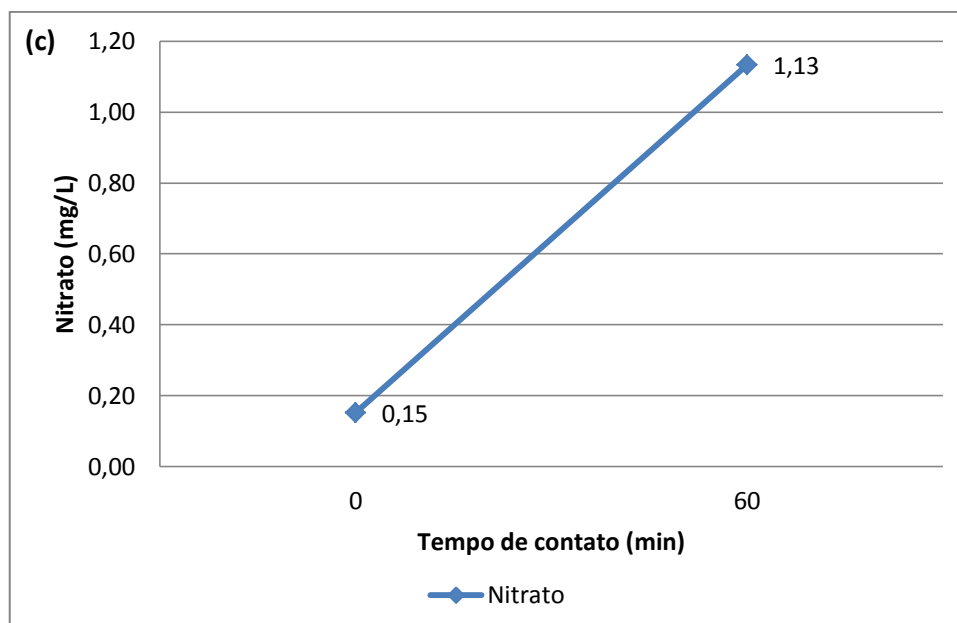
Os valores médios de nitrato obtidos durante os ensaios de ozonização convencional encontram-se dispostos na Figura 26. A partir desta figura, é possível verificar que houve formação de nitrato durante a ozonização, visto que houve um aumento na concentração de nitrato com o decorrer do tempo de contato com o  $O_3$ . As concentrações de nitrato obtidas foram de 1,13 mg/L, 0,96 mg/L e 0,59 mg/L para as cargas de ozônio de 2,07 g $O_3$ /h, 5,38 g $O_3$ /h e 7,15 g $O_3$ /h, respectivamente.

Apesar da concentração de nitrato ter apresentado um relativo aumento à medida que se aumentava a carga de ozônio aplicada, a análise estatística permitiu concluir que as

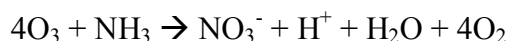
variações entre as cargas não foram estatisticamente significativa ( $p = 0,5030$ ) para promover o aumento na concentração deste parâmetro. Entretanto, em se tratando do tempo de contato, nota-se que a diferença foi estatisticamente significativa ( $p = 0,0442$ ); assim, pode-se inferir que apenas o tempo de exposição ao  $O_3$  tem influência significativa na formação de nitrato.

Figura 26 - Valores médios de Nitrato (mg/L) obtidos a partir da ozonização convencional: (a) 2,07  $gO_3/h$ , (b) 5,38  $gO_3/h$  e (c) 7,15  $gO_3/h$



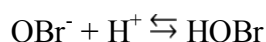
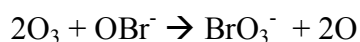
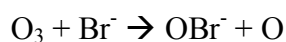


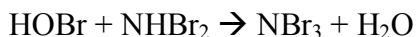
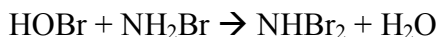
Segundo Wang e Pai (2001) e Singer e Zilli (1975), o ozônio é capaz de oxidar completamente a amônia e gerar como produto o nitrato, conforme apresentado na reação que segue. Diante disso, a diminuição na concentração da amônia deve ser correspondente ao aumento na concentração do nitrato.



A partir dos resultados referentes ao nitrogênio amoniacal e nitrato, verifica-se que, em todas as cargas de ozônio aplicadas, a concentração de nitrato formada não foi correspondente à diminuição na concentração de amônia, tendo em vista que se removeu uma quantidade maior de amônia; contrariando, assim, a pesquisa de Singer e Zilli (1975), que prevê a constância na soma dos dois constituintes ao longo da ozonização.

A explicação para este fenômeno se deve, possivelmente, à presença de íons brometo ( $\text{Br}^-$ ) no efluente, que reage com o ozônio e forma o ácido hipobromoso ( $\text{HOBr}$ ). Este, por sua vez, reage com a amônia livre e converte em gás nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) diretamente, por meio das reações que seguem (EUSEBI; BATTISTONI, 2016; KHUNTIA; MAJUMDER; GHOSH, 2013; TANAKA; MATSUMURA, 2003):





Com base nestas reações, observa-se que o ozônio, sob a presença de íons brometo, remove a amônia livre pela sua conversão direta a nitrogênio gasoso. Isto pode justificar o fato da diminuição na concentração de amônia ter sido maior do que a produção de nitrato, uma vez que uma parcela da amônia pode ter sido oxidada a nitrato e a outra ter reagido diretamente e formado o gás nitrogênio.

Na pesquisa desenvolvida por Domenjoud *et al.* (2011) também foi possível observar a formação de nitrato ao longo do processo de ozonização, sendo que, para as condições impostas pelos pesquisadores, obteve-se um aumento na concentração de nitrato em 16,5 mg/L, além disso, houve uma diminuição na concentração de amônia de 31 para 21 mg/L. Como citado no subitem 4.1.6, os autores alegaram que a maior formação do nitrato quando comparada à redução da amônia se deve, basicamente, à oxidação do nitrogênio orgânico.

#### 4.1.8 *E. Coli*

A partir dos resultados apresentados na Figura 27, nota-se que a ozonização convencional mostrou-se bastante eficiente na desinfecção de *E. Coli*, tendo em vista que, para todas as cargas de ozônio, houve inativações significativas ao longo dos tempos de contato. Segundo Ishizaki *et al.* (1987), a inativação de *E. Coli* ocorre devido à ação do ozônio que penetra na membrana celular e reage com as substâncias citoplasmáticas, além disso, o ozônio pode atacar o DNA das células bacterianas culminando, assim, na morte celular.

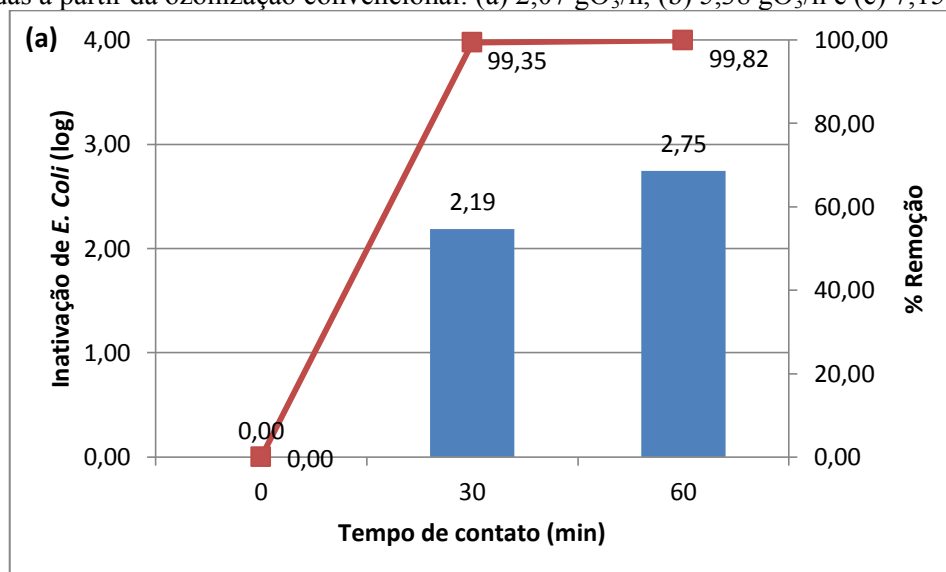
De acordo com a Figura 27, para todas as cargas de ozônio estudadas, constatou-se que as porcentagens médias de remoção foram muito próximas, se apresentando de forma significativa nos 30 minutos iniciais de contato com gás ozônio, cujos valores médios alcançados foram de 99,35%, 99,28% e 99,22%, o que corresponde à inativação de 2,19 log, 2,14 log e 2,11 log para as cargas de ozônio de 2,07 gO<sub>3</sub>/h, 5,38 gO<sub>3</sub>/h e 7,15 gO<sub>3</sub>/h, respectivamente. Já para o tempo de 60 min, as remoções foram consideradas insignificantes quando comparadas às remoções do tempo de 30 min, haja vista que as porcentagens foram próximas, alcançando as médias de remoção de 99,82%, 99,79% e

99,59%, o que corresponde à inativação de 2,75 log, 2,68 log e 2,39 log para as respectivas cargas de ozônio de 2,07 gO<sub>3</sub>/h, 5,38 gO<sub>3</sub>/h e 7,15 gO<sub>3</sub>/h.

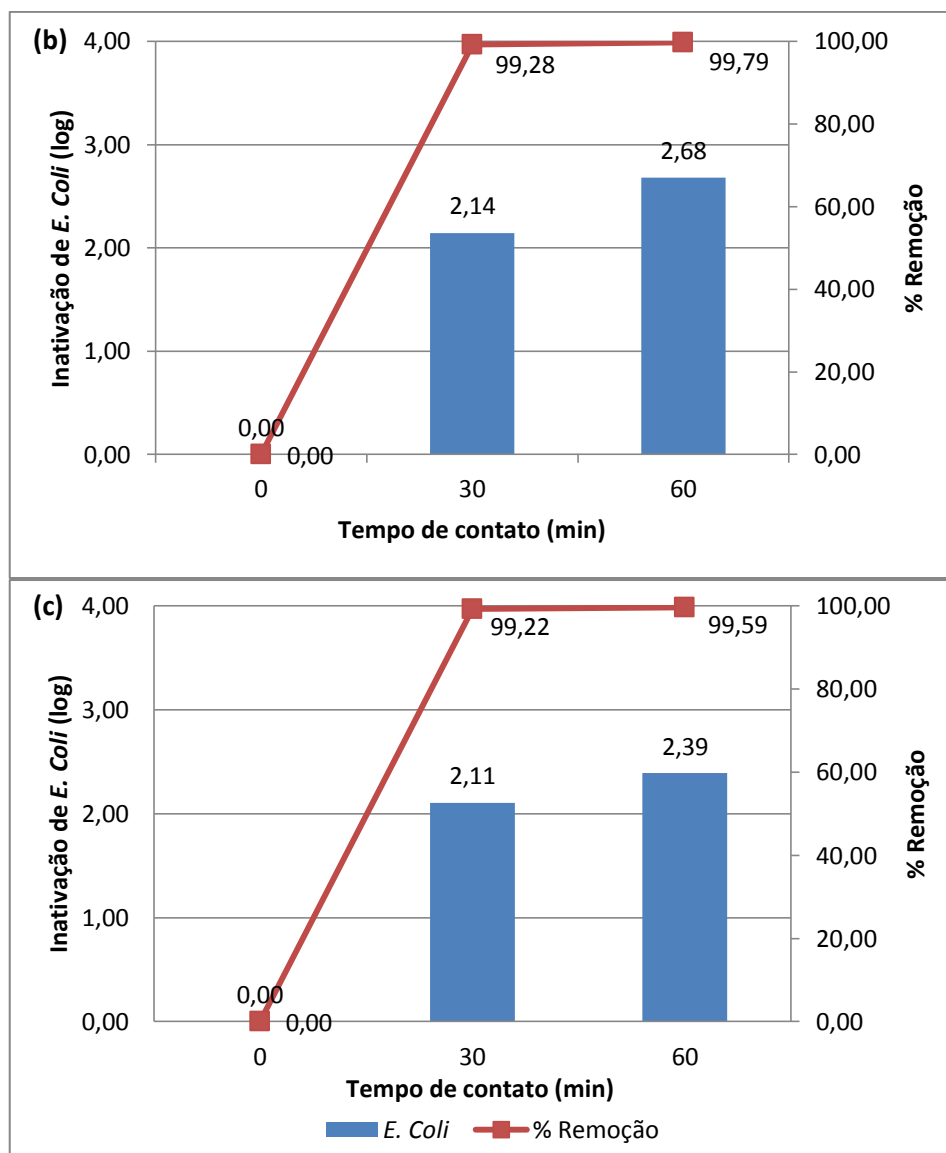
Os testes estatísticos realizados, em consonância com os resultados dispostos na Figura 27, permitiram identificar que as cargas de ozônio não foram capazes de promover inativação significativa de *E. Coli*, visto que o valor-p se apresentou maior que 0,05 ( $p = 0,2922$ ). Entretanto, observou-se que um tempo maior de exposição ao gás ozônio influencia significativamente na eficiência de inativação de *E. Coli*, uma vez que, para esta variável, o valor-p apresentou muito baixo ( $p = 1,24 \cdot 10^{-5}$ ). Nos experimentos desenvolvidos por Silva (2008) também foi possível verificar que o tempo de contato foi considerado uma variável significativa capaz de promover a inativação de *E. Coli*, tendo em vista que um tempo de contato maior culminou em uma maior inativação deste grupo de microrganismos.

Tripathi *et al.* (2011) também realizaram os ensaios de ozonização em amostras de efluente secundário - obtidas por uma Estação Tratamento de Esgoto (Bhagwanpur) localizada na Índia - para verificar a eficiência do processo na inativação de *E. Coli*. Os autores notaram que a ozonização se mostrou altamente eficiente, uma vez que foi possível obter remoções de *E. Coli* em torno de 98% para as amostras de efluentes submetidas à concentração de ozônio de 10,0 mgO<sub>3</sub>/L e tempo de exposição de 5 min.

Figura 27 - Valores médios de Inativação de *E. Coli* (log) e eficiências médias de remoção (%) obtidas a partir da ozonização convencional: (a) 2,07 gO<sub>3</sub>/h, (b) 5,38 gO<sub>3</sub>/h e (c) 7,15 gO<sub>3</sub>/h





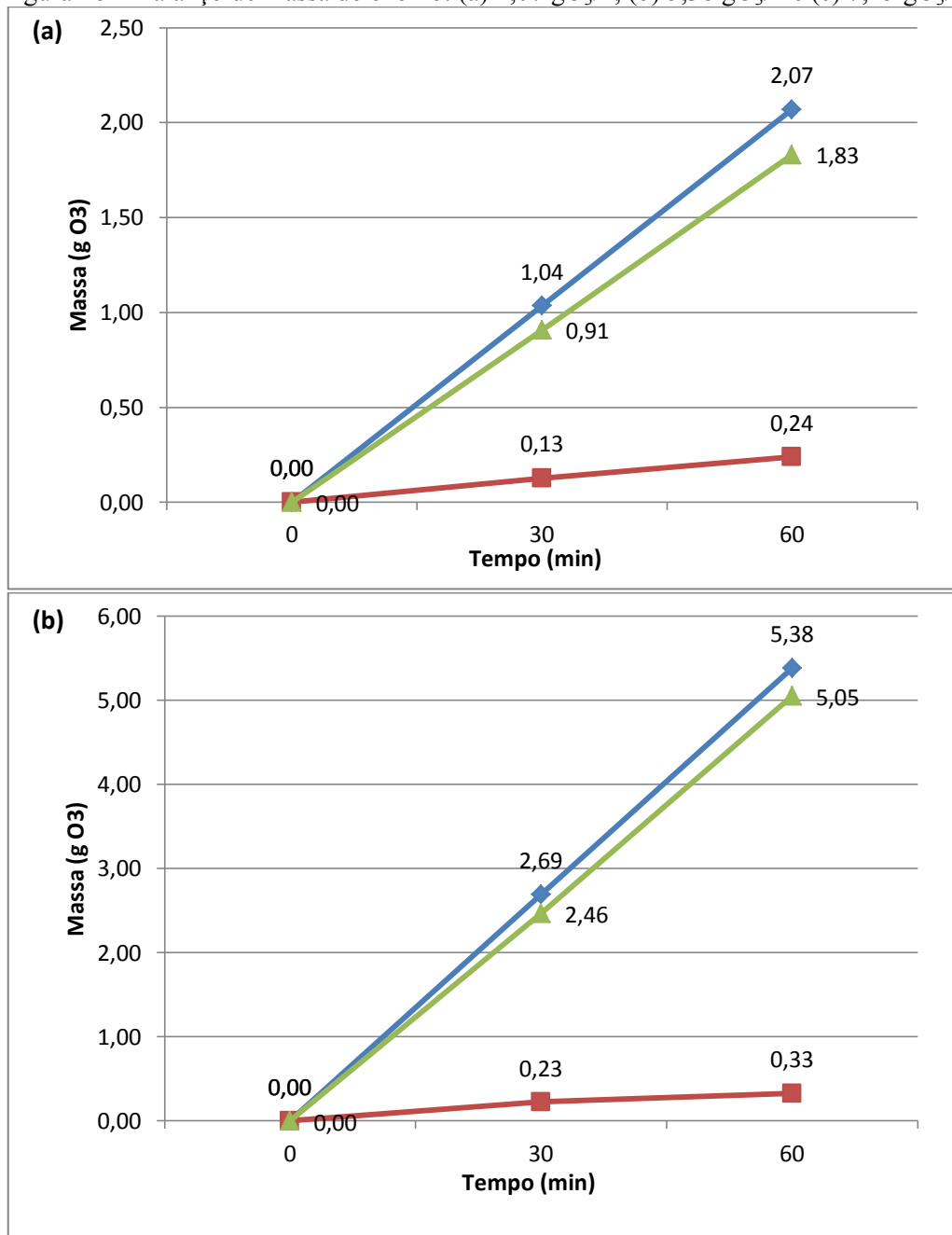


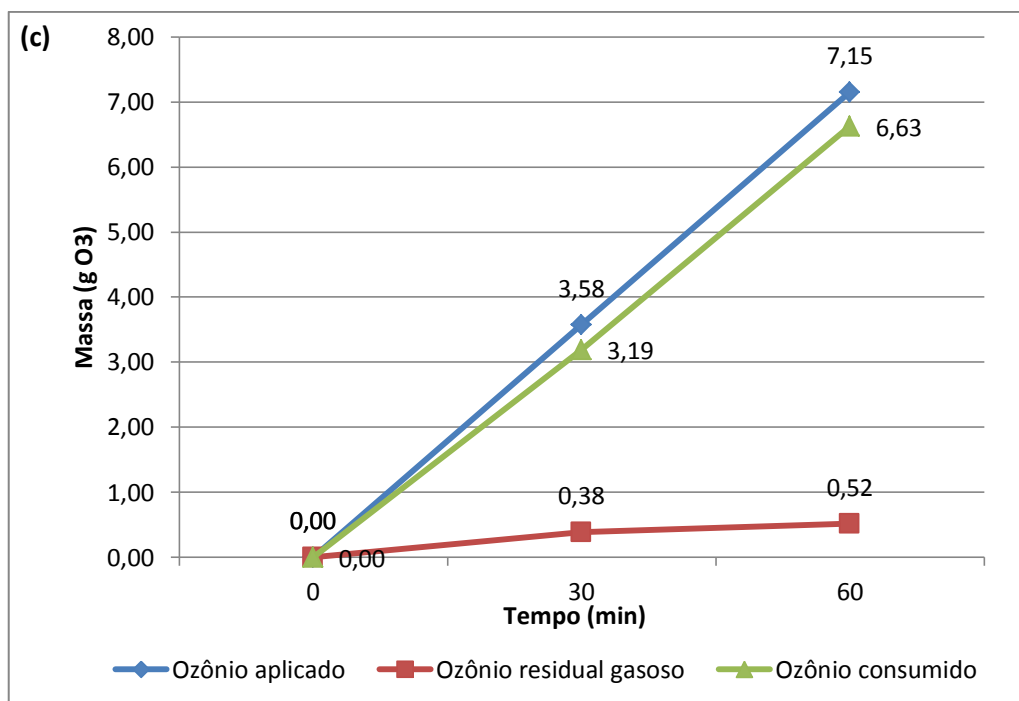
#### 4.1.9 Balanço de massa de ozônio

Conforme mencionado no capítulo anterior, o balanço de massa de ozônio foi realizado a partir das cargas de ozônio aplicadas e dos resultados obtidos nos frascos lavadores pelo método iodométrico (Apêndice E). Por meio do balanço de massa de ozônio, foi possível determinar, para cada carga aplicada, a massa de ozônio que supostamente reagiu com as substâncias orgânicas e inorgânicas presentes na massa líquida, além disso, a massa de ozônio residual gasoso que ficou retida na solução de KI. Utiliza-se aqui o termo “supostamente”, pois se assume que todo o ozônio transferido à massa líquida reagiu com os compostos orgânicos e inorgânicos, não restando ozônio

residual na massa líquida. A Figura 28 esboça o balanço de ozônio realizado para cada carga de ozônio estudada.

Figura 28 – Balanço de massa de ozônio: (a) 2,07 gO<sub>3</sub>/h, (b) 5,38 gO<sub>3</sub>/h e (c) 7,15 gO<sub>3</sub>/h





Fonte: Autoria própria (2018).

Analisando apenas os resultados apresentados na Figura 28, observa-se que, para todas as cargas aplicadas, grande parte do ozônio injetado foi consumido durante o processo. Isso implicaria no fato de que as cargas com as maiores concentrações de ozônio consumido promoveriam melhores remoções nos parâmetros físico-químicos e biológico em estudo. Entretanto, os ensaios de caracterização permitiram identificar que as porcentagens de remoção foram praticamente iguais para todas as cargas de ozônio estudadas. Diante disso, acredita-se que, possivelmente, existe uma parcela de ozônio que está sendo perdida, principalmente para as maiores concentrações, e que, por sua vez, não está sendo contabilizada nos frascos lavadores. Além disso, pode haver uma significativa parcela de ozônio residual líquido que não foi contabilizada e que esteja interferindo nos resultados.

Assim, diante do exposto, verifica-se que seria necessário efetuar a medição do ozônio residual na massa líquida da coluna e na espuma, além disso, seria interessante dispor de, pelo menos, 2 frascos lavadores em série, conforme cita Salla (2006), para garantir que uma determinada parcela de ozônio não eliminada no primeiro frasco escape para a atmosfera, sendo assim, eliminada no segundo frasco. Também seria necessário avaliar a influência da vazão de gás, do diâmetro das bolhas e da altura da coluna líquida na eficiência de transferência de massa gás-líquido.

## 4.2 ARRASTE DE GASES (GAS STRIPPING)

No processo de *gas stripping* foram investigadas as eficiências de remoção das variáveis físico-químicas ao longo dos tempos de contato, a partir da variação das vazões de gás nitrogênio aplicadas ao efluente sanitário. Os resultados experimentais obtidos a partir da segunda investigação experimental, referentes a cinco amostras de efluente bruto, encontram-se disponíveis no Apêndice B.

### 4.2.1 Caracterização do efluente bruto

Apesar de serem as mesmas amostras de efluente bruto utilizadas nas campanhas amostrais do processo de ozonização, foram realizados novos ensaios de caracterização, tendo em vista que as amostras apresentavam pequenas variações em suas características com o decorrer do tempo, mesmo sob o armazenamento na geladeira. Os resultados referentes aos parâmetros físico-químicos do efluente bruto, ou seja, sob a condição em que não houve contato entre efluente e gás nitrogênio ( $t = 0$ ), encontram-se disponíveis na Tabela 4. Vale ressaltar que, para cada parâmetro em estudo, exceto para o pH, as medidas foram realizadas em triplicatas, no intuito de tornar os resultados mais representativos.

Tabela 4 – Características do efluente bruto proveniente da ETE Uberabinha

| Parâmetros                  | Valor Mínimo | Valor Máximo | Média $\pm$ Desvio Padrão |
|-----------------------------|--------------|--------------|---------------------------|
| pH                          | 6,96         | 7,10         | 7,06 $\pm$ 0,05           |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 72,00        | 215,67       | 149,76 $\pm$ 53,39        |
| Turbidez (UNT)              | 29,77        | 55,07        | 43,27 $\pm$ 9,33          |
| DQO (mg O <sub>2</sub> /L)  | 149,54       | 319,51       | 230,02 $\pm$ 66,87        |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 30,93        | 38,68        | 34,68 $\pm$ 2,66          |
| Nitrato (mg/L)              | 0,12         | 0,22         | 0,17 $\pm$ 0,03           |

Fonte: Autoria própria (2018).

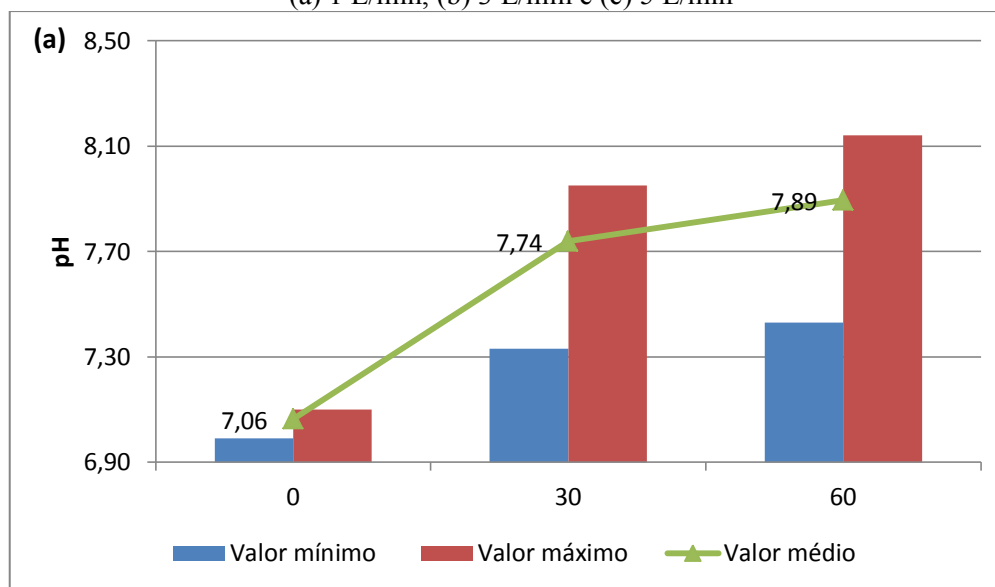
### 4.2.2 pH

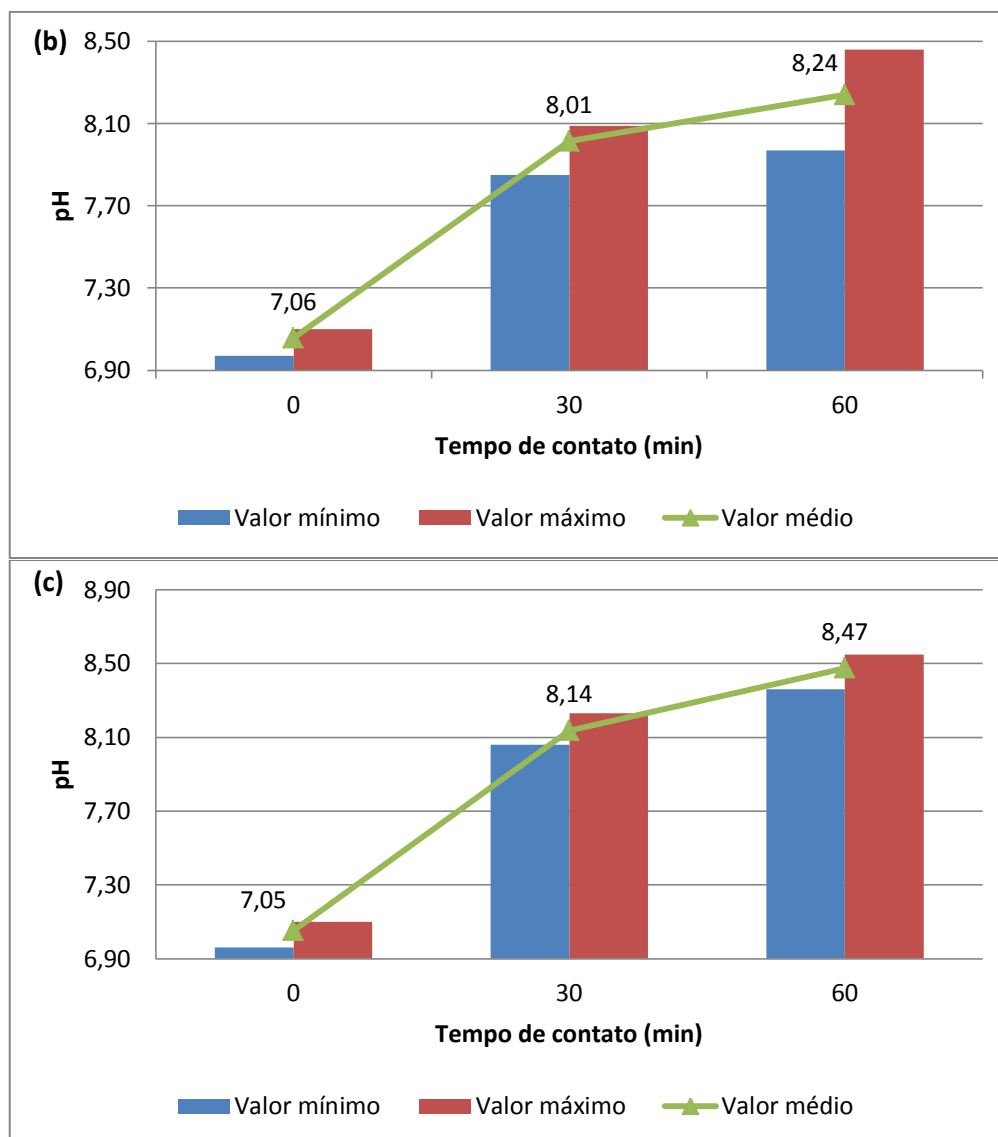
Os valores médios de pH, bem como os valores mínimos e máximos obtidos ao longo do processo de *gas stripping* para as 5 amostras, sob a variação de 3 vazões de gás nitrogênio (1 L/min, 3 L/min e 5 L/min), encontra-se dispostos na Figura 29. Os resultados demonstram um aumento no valor de pH com o decorrer do tempo de contato e com o

aumento da vazão de gás aplicada à massa líquida. Entretanto, o teste estatístico aponta que apenas as variações nos tempos de contato promoveram diferenças significativas nos valores de pH, tendo em vista que o valor-p alcançou o valor de 0,0017, enquanto que a variação da vazão de gás não é uma influência estatisticamente significativa para o parâmetro em questão ( $p = 0,1377$ ).

Para os ensaios nos quais se aplicou a vazão de 1 L/min, pode-se verificar que o pH variou de 6,99 a 8,14 ao longo de 60 min de contato com o gás, assumindo os valores médios de 7,06, 7,74 e 7,89 para os respectivos tempos de 0, 30 e 60 min. Já para a vazão de 3 L/min, o pH assumiu valores de 6,97 a 8,46, sendo que os valores médios observados foram de 7,06, 8,01 e 8,24 para os tempos de 0, 30 e 60 min, respectivamente. E, com relação à vazão de 5 L/min, o pH variou de 6,96 a 8,55, alcançando os valores médios de 7,05, 8,14 e 8,47 para os tempos de 0, 30 e 60 min, respectivamente.

Figura 29 - Valores mínimos, máximos e médios de pH obtidos a partir do ensaio de *gas stripping*: (a) 1 L/min, (b) 3 L/min e (c) 5 L/min





Fonte: Autoria própria (2018).

O aumento do pH ao longo do processo pode ser justificado devido ao *stripping* de  $\text{CO}_2$  presente na massa líquida. O  $\text{CO}_2$  pode ter sido produzido durante as etapas de tratamento realizadas na ETE Uberabinha ou ao longo do processo de *gas stripping*, devido à remoção de amônia, tendo em vista que à medida que se remove a amônia do sistema, tem-se um aumento nas concentrações de íons  $\text{H}^+$  que, por sua vez, reagem com íons carbonato do meio, promovendo a sua formação. Com o borbulhamento do gás nitrogênio na massa líquida, o  $\text{CO}_2$  é removido do meio, consequentemente, tem-se um consumo dos íons  $\text{H}^+$  na tentativa de se reestabelecer o equilíbrio químico, por conseguinte, tem-se um aumento no valor de pH (FERRAZ, 2010; SOUTO, 2009).

Ferraz (2010) observou que o pH do lixiviado de aterro sanitário aumentou de 7,76 para 9,17 durante 4 dias de aplicação da técnica de *gas stripping*, sob vazões de ar

comprimido e efluente equivalentes a 3600 L/h e 18 L/h , respectivamente. Além disso, Lei *et al.* (2007) relataram o mesmo comportamento do pH ao submeter o efluente proveniente de um reator anaeróbio, responsável por tratar excretas de porco e lixo de cozinha, ao processo de *gas stripping*. Os autores em questão observaram que o pH do efluente variou de 7,4 para 9,3 após aplicar uma vazão de gás de 1 L/min durante 24 horas.

### 4.2.3 Cor

Cheung, Chu e Wong (1997), Silva (2008), Santos (2011), Ferraz (2010) e Souto (2009) observaram que a etapa que antecede o arraste de gás e na qual ocorre a elevação do pH para a obtenção da amônia livre, conhecida como alcalinização, proporcionava remoções consideráveis na cor de lixiviados de aterros sanitários. Todavia, após a aplicação da etapa de *gas stripping* propriamente dita, não se tinha registros de remoções deste parâmetro.

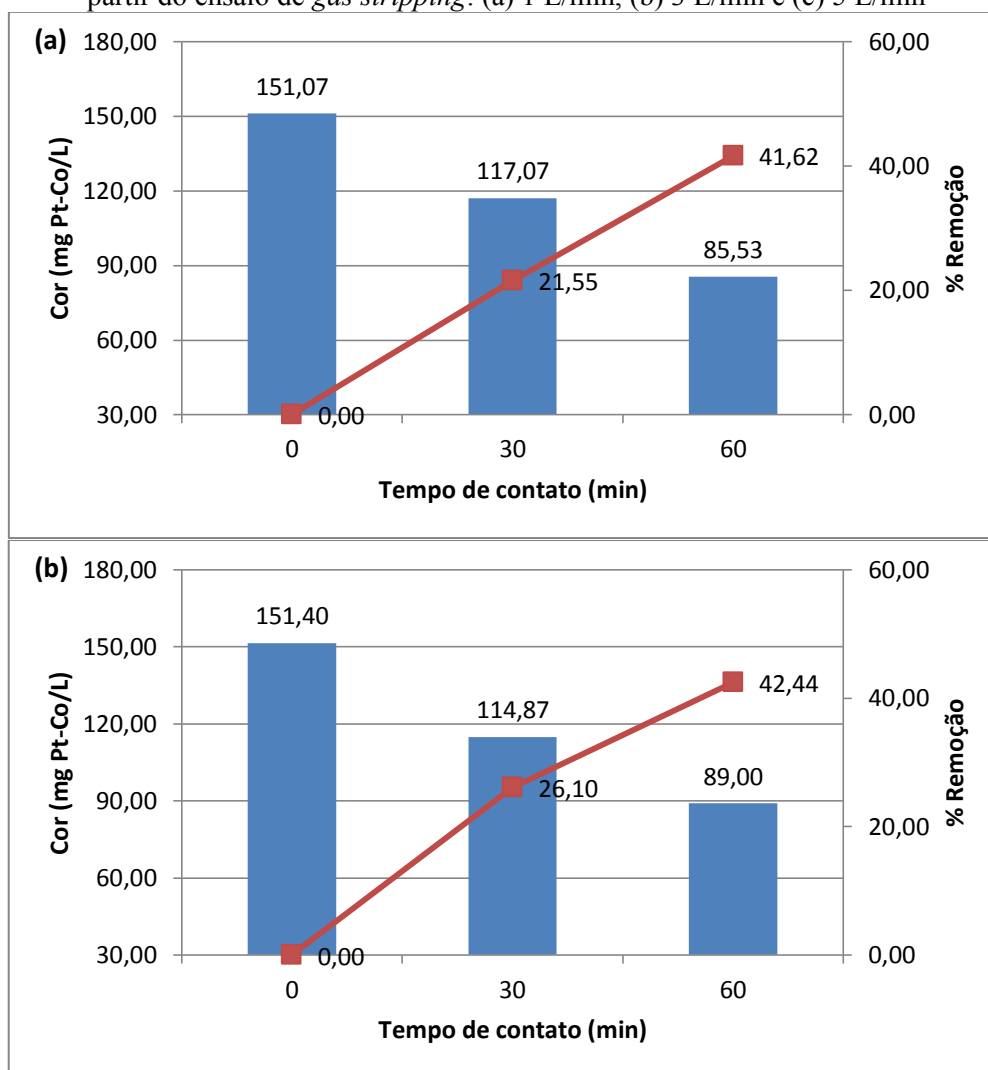
Castañeda, Passos e Benetti (2012) também utilizaram a técnica de arraste de gás, a partir do gás oxigênio (O<sub>2</sub>), para melhoria de alguns parâmetros nas águas de abastecimento oriundas da ETA Lomba do Sabão, situada na cidade de Porto Alegre. Nesta pesquisa, os autores notaram que a técnica em questão não promoveu alterações no parâmetro cor, considerando-a como um processo que não é importante para a redução de tal quesito.

Entretanto, com base nos resultados dispostos na Figura 30, verifica-se que o processo de *gas stripping* promoveu remoções significativas na cor do efluente em estudo. Além disso, nota-se que as porcentagens de remoção eram crescentes com o decorrer dos tempos de contato, porém não se tinha influência significativa da vazão de gás nitrogênio nas remoções, uma vez que os valores percentuais obtidos foram muito próximos durante os períodos de exposição ao gás. Tal constatação pode ser embasada na análise estatística realizada, na qual identificou que apenas os tempos de exposição ao gás são capazes de promover variações estatisticamente significativas na cor do efluente, uma vez que, para esta variável, obteve-se o valor-p de  $5,85 \cdot 10^{-5}$ . Já com relação às vazões de gás, o teste estatístico permitiu concluir que estas não são capazes de promover variações significativas no parâmetro em questão, tendo em vista que o valor-p assumiu um valor alto ( $p = 0,8326$ ).

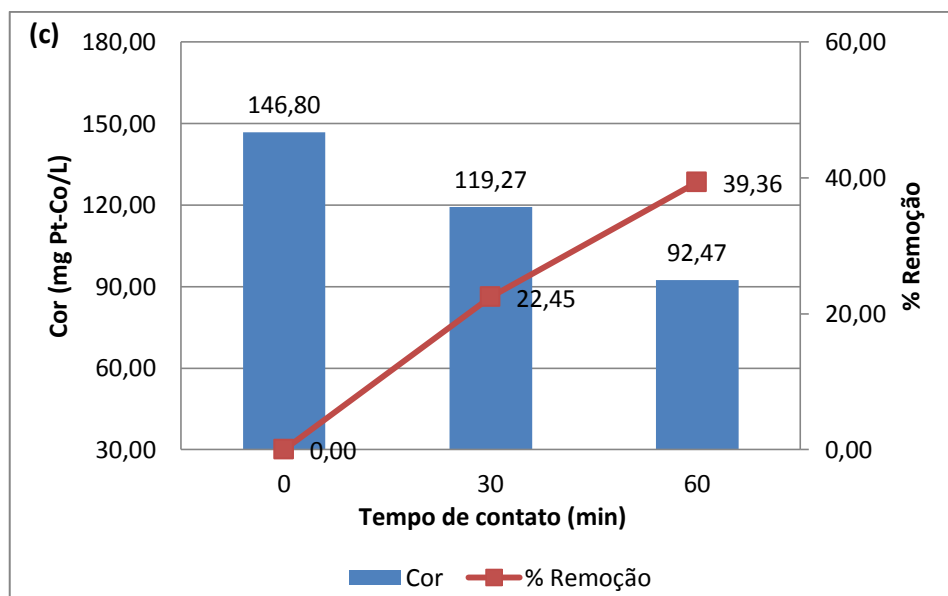
Com base na Figura 30, pode-se perceber que, durante os 30 min iniciais, as remoções de cor alcançaram as porcentagens médias de 21,55%, 26,10% e 22,45% para as vazões de 1, 3 e 5 L/min, respectivamente. Já para o tempo de contato de 60 min, as porcentagens médias de remoção obtidas foram de 41,62%, 42,44% e 39,36% para as respectivas vazões de 1, 3 e 5 L/min.

A justificativa para as remoções significativas deste parâmetro se deve à interferência das partículas sólidas em suspensão, devido à turbidez, na leitura da cor aparente. Assim, como tais partículas foram removidas pelas espumas durante o borbulhamento do gás nitrogênio, então houve uma redução na turbidez do efluente, consequentemente, a cor aparente também foi afetada diretamente, promovendo, por conseguinte, a sua remoção ao longo dos tempos de contato.

Figura 30 - Valores médios de Cor (mg Pt-Co/L) e eficiências médias de remoção (%) obtidos a partir do ensaio de *gas stripping*: (a) 1 L/min, (b) 3 L/min e (c) 5 L/min







#### 4.2.4 Turbidez

A partir da Figura 31 é possível verificar o comportamento da turbidez do efluente em estudo frente aos ensaios de *gas stripping*. Com base nesta figura, constata-se que houve remoções deste parâmetro ao longo do processo, tendo em vista que as porcentagens médias de remoção apresentaram valores positivos e crescentes com o decorrer do tempo de exposição ao gás.

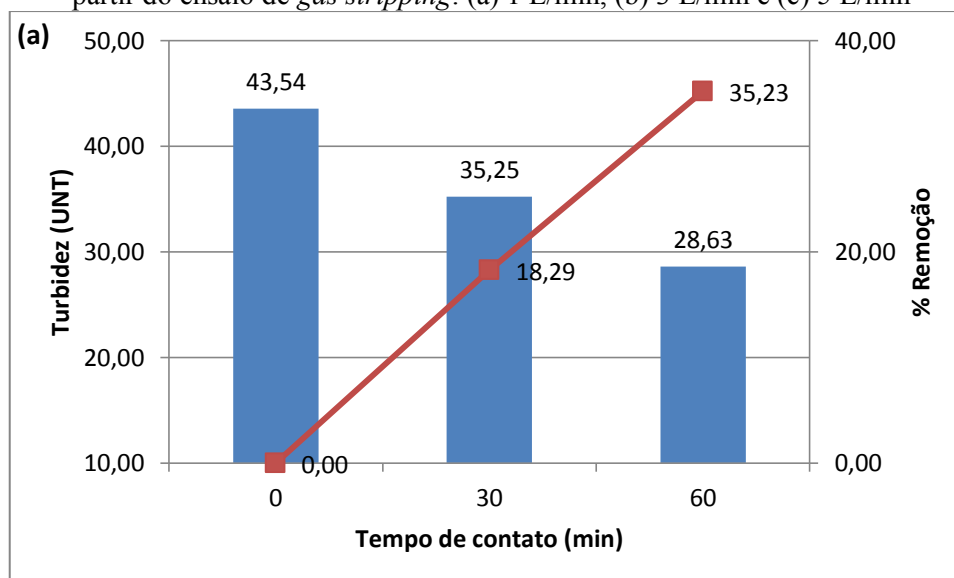
Para todas as vazões de gás aplicadas, observa-se que as porcentagens médias de remoção de turbidez assumiram valores muito próximos ao longo dos tempos de contato em estudo, sendo que, para o tempo de 30 min, os valores médios de remoção foram de 18,29%, 23,54% e 18,86% para as respectivas vazões de 1, 3 e 5 L/min. Já para o tempo de 60 min, observou-se que as médias de remoção alcançaram os valores de 35,23%, 35,32% e 36,51% para as vazões de 1, 3 e 5 L/min, respectivamente.

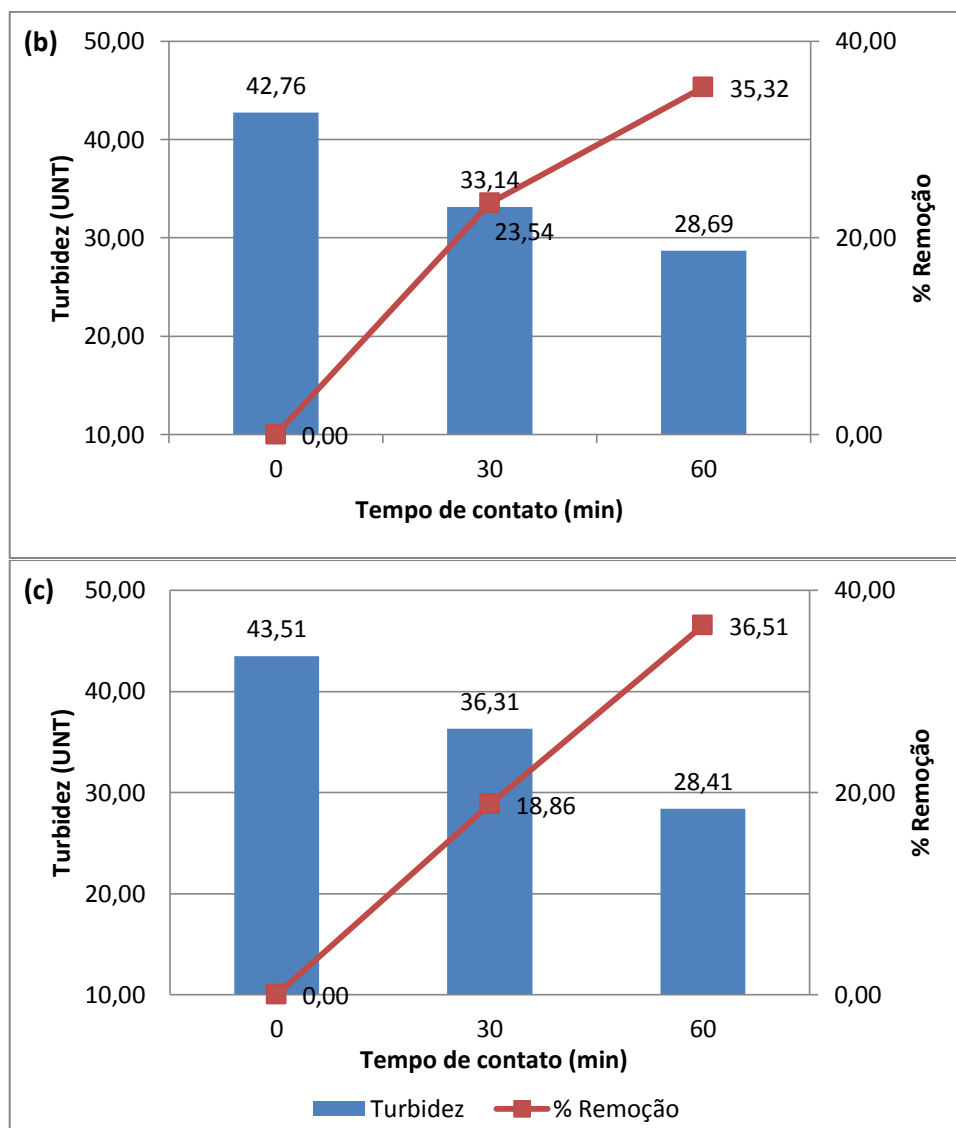
O teste estatístico também permitiu identificar que existem diferenças estatisticamente significativas na remoção de turbidez apenas em função dos tempos de contato aplicados durante o processo de arraste de gás, já que, para esta variável, o valor-p obtido foi de  $9,48 \cdot 10^{-5}$ . Entretanto, em se tratando das vazões aplicadas, as variações no parâmetro de turbidez não foram significativas sob o ponto de vista estatístico, pois o valor-p se apresentou maior do que 0,05 ( $p = 0,3231$ ).

Assim como mencionado no subitem 4.1.4, as remoções de turbidez pelo processo de *gas stripping* também podem estar associadas ao fenômeno da flotação. Com o borbulhamento ascensional de gás nitrogênio, as partículas sólidas que se encontram em suspensão na massa líquida se aderem às bolhas e são removidas até à superfície líquida (SALLA *et al.*, 2011). Por conseguinte, com a formação de espumas na superfície livre e a manutenção do borbulhamento, as partículas sólidas são removidas juntamente com as espumas da coluna e direcionadas para o recipiente destinado para tal fim.

Pinheiro (2014) também identificou a ocorrência de tal fenômeno durante a aplicação da referida técnica (com ar comprimido e oxigênio puro) em um efluente saneante domissanitário. Todavia, como não se tinha um recipiente para promover o recolhimento das espumas geradas, então estas retornavam à massa líquida e ocasionavam um comportamento oscilatório na remoção do parâmetro da turbidez.

Figura 31 - Valores médios de Turbidez (UNT) e eficiências médias de remoção (%) obtidos a partir do ensaio de *gas stripping*: (a) 1 L/min, (b) 3 L/min e (c) 5 L/min

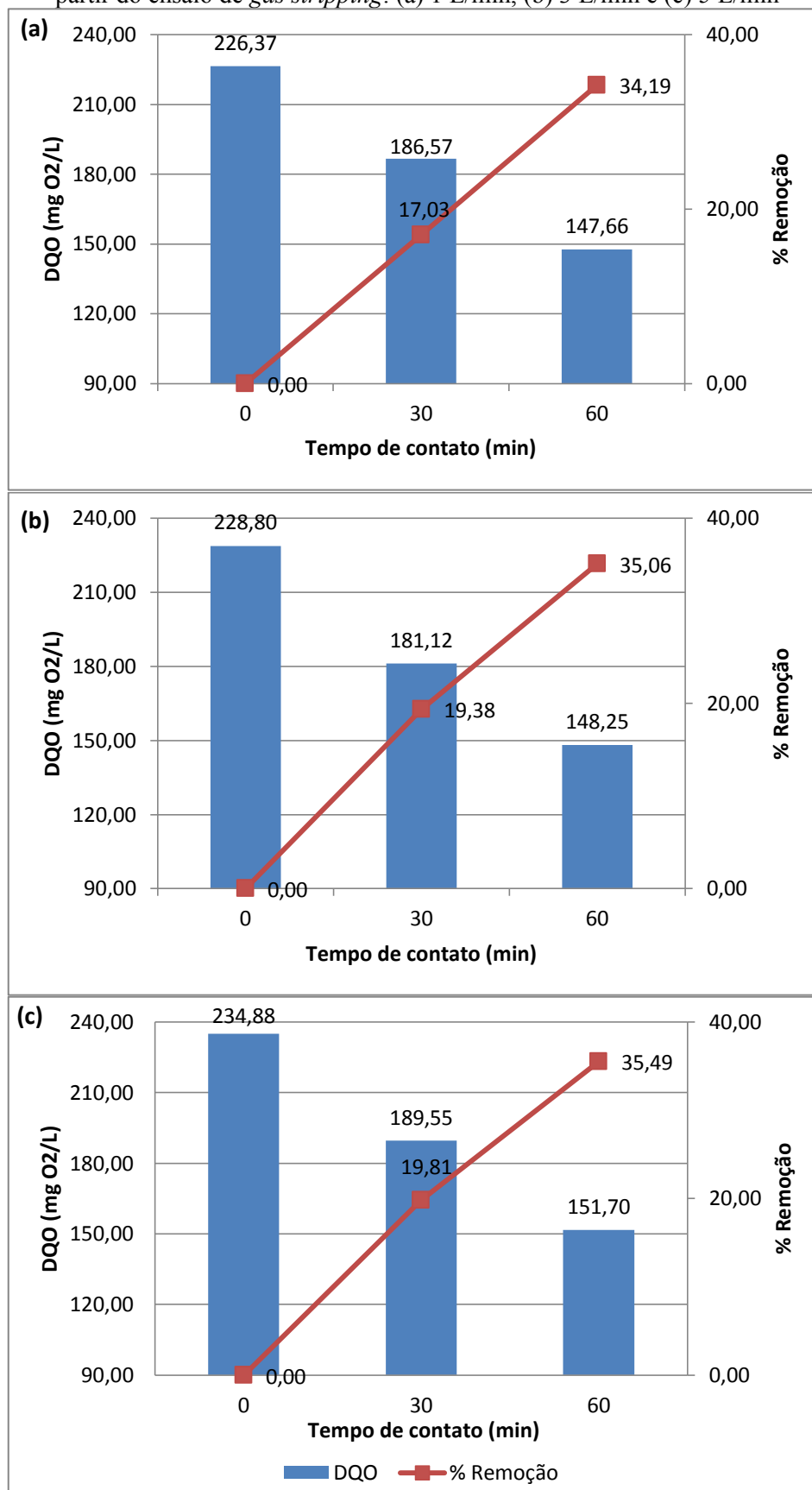




#### 4.2.5 DQO

Os valores médios de DQO e as porcentagens médias de remoção obtidas ao longo do processo de *gas stripping* encontram-se dispostos na Figura 32. Com base nesta figura, verifica-se que, para todas as vazões de gás empregadas, as porcentagens de remoção de DQO se mostraram crescentes ao longo dos tempos de contato estudados. Além do mais, constata-se que o aumento na vazão de gás nitrogênio não implicou em maiores taxas de remoção de DQO, tendo em vista que as porcentagens de remoção apresentaram valores similares para todas as vazões ao longo dos tempos de exposição ao gás.

Figura 32 - Valores médios de DQO ( $\text{mg O}_2/\text{L}$ ) e eficiências médias de remoção (%) obtidos a partir do ensaio de *gas stripping*: (a) 1 L/min, (b) 3 L/min e (c) 5 L/min



Fonte: Autoria própria (2018).

Os resultados obtidos por meio da análise estatística fundamentaram a afirmação supracitada, tendo em vista que apenas os tempos de contato foram capazes de promover remoções estatisticamente significativas no parâmetro da DQO, uma vez que, para a variável em questão, o valor-p se apresentou muito baixo ( $4,64.10^{-6}$ ). Além disso, verificou-se que as variações nas vazões de gás aplicadas não são capazes de promover diferenças significativas no parâmetro em estudo, haja vista que o valor-p se mostrou superior a 0,05 ( $p = 0,0630$ ).

Ainda de acordo com a Figura 32, nota-se que as inclinações das retas, que caracterizam os gráficos de porcentagens de remoção, se apresentam praticamente constantes com o decorrer do tempo, consequentemente, têm-se remoções progressivas e proporcionais ao longo dos tempos de contato. Para o tempo de 30 min, observa-se que os percentuais de remoção de DQO foram de 17,03%, 19,38% e 19,81% para as vazões de 1, 3 e 5 L/min, respectivamente. Já para o tempo de 60 min, constata-se que as porcentagens de remoção alcançaram valores de 34,19%, 35,06% e 35,49% para as respectivas vazões de 1, 3 e 5 L/min.

De acordo com Ferraz (2010) e SOUTO (2009), as remoções de DQO obtidas durante a aplicação da técnica de *gas stripping* podem estar associadas a uma combinação de fatores, tais como: eliminação de compostos orgânicos voláteis e, até mesmo, de nitrogênio amoniacal na presença de íons cloreto.

Segundo Aquino, Silva e Chernicharo (2006), os íons cloretos presentes no meio líquido, sob concentrações de 1000 mg/L, podem ser oxidados a cloro molecular ( $Cl_2$ ) e este, por sua vez, pode interagir com íons amônio e formar as cloraminas. As cloraminas podem ser oxidadas pelo dicromato de potássio e, assim, detectadas pela DQO. Diante disso, verifica-se que remoções de amônia durante o processo de *gas stripping* impossibilita a formação das cloraminas, consequentemente, pode ocasionar uma redução no parâmetro da DQO.

Todavia, é válido ressaltar que para Metcalf & Eddy (1991 apud AQUINO; SILVA; CHERNICHARO, 2006), as concentrações de íons de cloreto em esgoto sanitário são baixas (30 a 100 mg/L). Com isso, não se pode associar as remoções de DQO obtidas no presente estudo ao fenômeno da remoção de amônia, mas apenas ao fenômeno de arraste de compostos orgânicos voláteis.

Conforme mencionado por Metcalf & Eddy (2014), o processo de *gas stripping* é capaz de promover a remoção de compostos orgânicos voláteis presentes nos efluentes. Em

virtude disso, a remoção de tais compostos provoca reduções no parâmetro de DQO, de modo que estas interferências podem ser significativas dependendo de suas concentrações no meio líquido. Assim, diante dos resultados experimentais obtidos nos ensaios de ozonização convencional e *gas stripping*, estima-se que cerca de 50% da remoção de matéria orgânica durante os ensaios de ozonização convencional referem-se ao *stripping* de compostos orgânicos voláteis presente na massa líquida.

Nos experimentos realizados em lixiviados de aterro sanitário, Santos (2011) obteve remoções de DQO, ocasionadas pelo arraste de compostos orgânicos voláteis, alcançando valores de 57% no Pré-ensaio 1 (PE1) ( $Q_{AR} = 3.600$  L/h;  $Q_{LIX} = 18$  L/h; sem ajuste inicial de pH) e 40% no Pré-ensaio 3 (PE3) ( $Q_{AR} = 1.800$  L/h;  $Q_{LIX} = 9$  L/h; sem ajuste inicial de pH).

#### 4.2.6 Nitrogênio amoniacal

Conforme explicado por Metcalf & Eddy (2014), a técnica de *gas stripping* tem como um dos propósitos promover a remoção da amônia da fase líquida para a fase gasosa a partir do contato com um gás de arraste, entretanto, para que isto ocorra, é necessário que esta se encontre sob a forma de amônia livre.

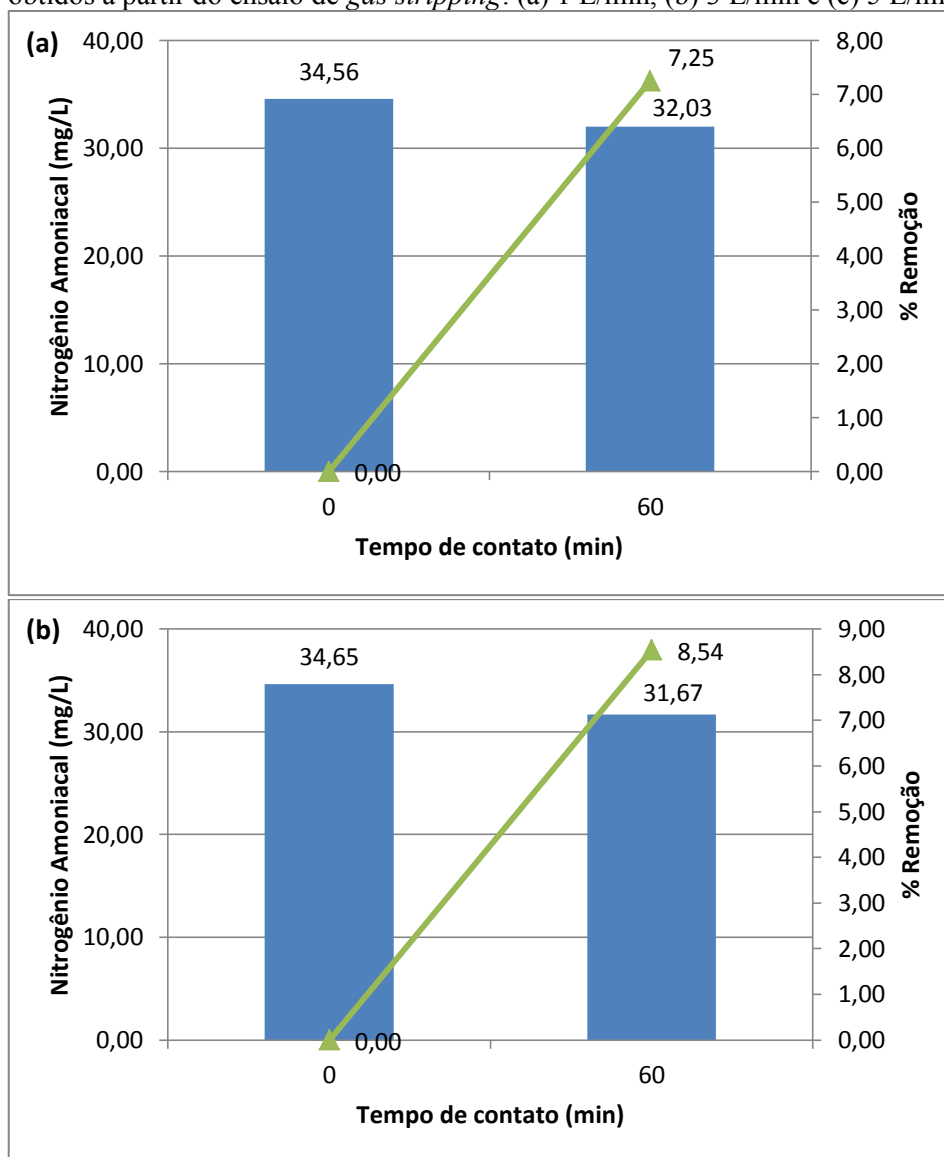
De acordo com Bonmatí e Flotats (2003), a concentração de amônia livre na fase líquida é função do pH do meio reacional, ou seja, quanto maior o pH, maior será a fração de amônia livre. Com base nisto, diversos autores, conforme citado no subitem 4.2.3, realizaram a alcalinização de suas matrizes no intuito de se obter uma maior eficiência no processo de arraste de gás.

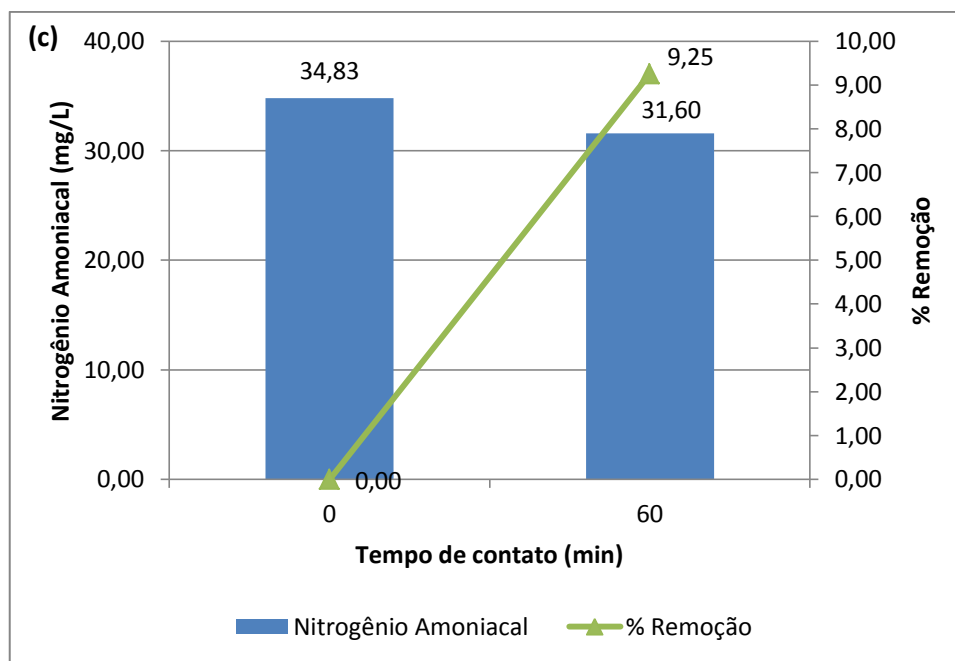
Na presente pesquisa não se realizou o tratamento prévio do efluente em estudo a partir da alcalinização, tendo em vista que o valor médio do pH das amostras do efluente bruto se apresentava acima de 7, conforme mostrado nos subitens 4.2.1 e 4.2.2. Além do mais, observou-se que, ao longo do processo de *gas stripping*, os valores médios de pH se elevaram para as todas as vazões de gás aplicadas, permitindo, assim, que houvesse a presença da amônia livre passível de ser removida.

A partir dos resultados mostrados na Figura 33 nota-se que, ao longo dos tempos de exposição ao gás nitrogênio, as remoções de amônia foram baixas, sendo que os valores médios alcançados foram de 7,25%, 8,54% e 9,25% para as vazões de 1, 3 e 5 L/min, respectivamente. Além disso, observa-se que as porcentagens médias de remoção

alcançaram valores muito próximos para todas as vazões de gás aplicadas, havendo variação apenas com o decorrer do tempo de contato analisado.

Figura 33 - Valores médios de nitrogênio amoniacal (mg/L) e eficiências médias de remoção (%) obtidos a partir do ensaio de *gas stripping*: (a) 1 L/min, (b) 3 L/min e (c) 5 L/min





Fonte: Autoria própria (2018).

A aplicação do teste estatístico permitiu concluir a assertiva estabelecida anteriormente. A análise estatística identificou que as diferentes vazões de gás aplicadas ao efluente em estudo não são capazes de promover variações estatisticamente significativas nas concentrações de amônia, tendo em vista que o valor-p apresentou-se alto ( $p = 0,8750$ ). Todavia, em se tratando do tempo de contato, o teste identificou que há uma diferença estatisticamente significativa nas variações das concentrações do referido parâmetro, uma vez que o valor-p assumiu valor menor do que 0,05 ( $p = 0,0050$ ).

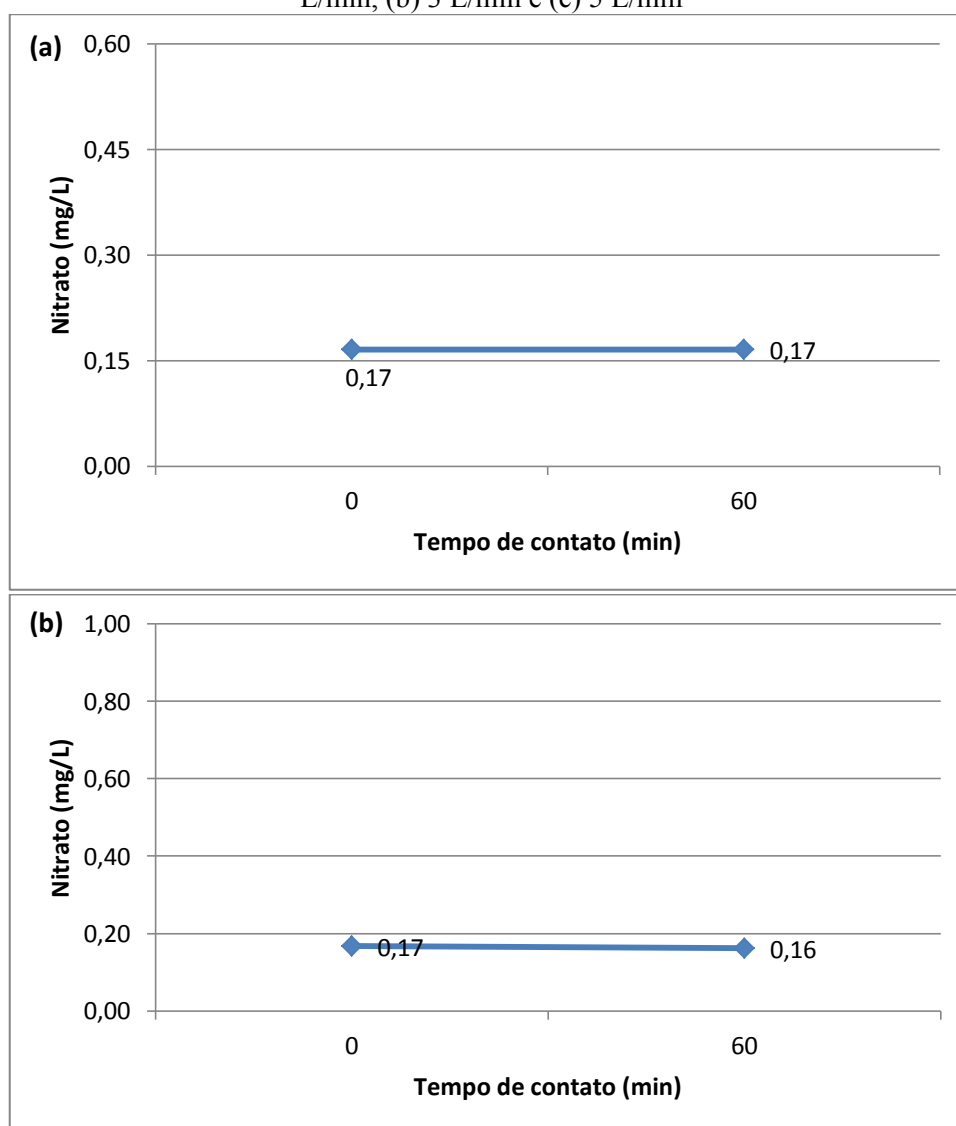
De acordo com Moura (2008), a partir dos ensaios preliminares (em batelada) com o lixiviado proveniente de um aterrado sanitário, foi possível identificar os efeitos da alcalinidade sobre a remoção da amônia a partir da técnica de arraste de gás, sendo que os valores de pH estudados foram: pH natural ( $\text{pH} = 8,3$ ), 9,5 e 11. Para isto, os autores submeteram amostras do lixiviado (2,5 L) ao contato com um compressor de aquário ( $Q_{\text{ar}} = 240 \text{ L/h}$ ), por meio de um béquer, nos quais foram homogeneizados com o auxílio de um agitador, durante um prazo de 7 h, sob a temperatura ambiente ( $\sim 25^\circ\text{C}$ ). A partir dos resultados obtidos, os referidos autores constataram que as remoções de nitrogênio eram mais significativas para as amostras cujos valores pH eram mais elevados, sendo que os valores de remoção obtidos foram de 16,8%, 21,4% e 36,6% para os respectivos valores de pH de 8,3, 9,5 e 11.

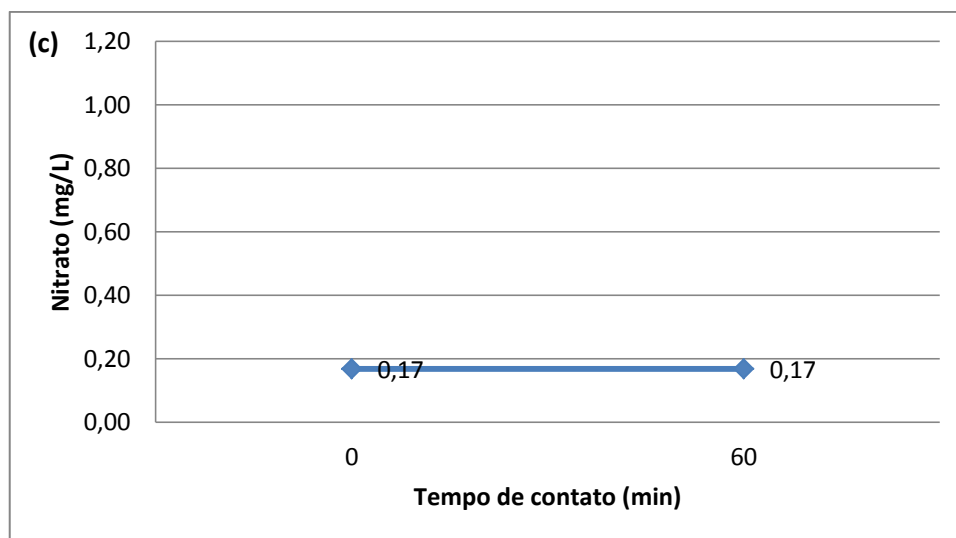


### 4.2.7 Nitrato

Os resultados de variação de nitrato após os ensaios de *gas stripping* estão disponíveis na Figura 34. A partir desta figura, nota-se que o processo de *gas stripping* não promoveu nenhuma influência nos resultados de nitrato, uma vez que as concentrações se mantiveram constantes ao longo do tempo de contato, independentemente da vazão de gás aplicada.

Figura 34 - Valores médios de Nitrato (mg/L) obtidos a partir do ensaio de *gas stripping*: (a) 1 L/min, (b) 3 L/min e (c) 5 L/min





Fonte: Autoria própria (2018).

Com base na análise estatística, nota-se que os tempos de contato em estudo e as vazões de gás não são considerados fatores estatisticamente significativos capazes de promover variações na concentração de nitrato, uma vez que os valores-p se apresentaram maiores do que 0,05, alcançando os valores de 0,4226 e 0,5625, respectivamente. Diante disso, pode-se afirmar que o processo de *gas stripping* não promoveu nenhuma influência sobre o nitrato.

Conforme citado no subitem 4.2.6, a amônia é passível de ser removida do meio líquido a partir da aplicação da técnica de arraste de gás, desde que esta se encontre sob a forma de amônia livre. Renou *et al.* (2008) enfatizam ainda que o lançamento da amônia para a atmosfera pode se caracterizar como uma grande preocupação ambiental, caso não seja recuperada por frascos com soluções apropriadas, pois a sua liberação pode causar sérios problemas de poluição do ar. Com base nisto, verifica-se que a remoção da amônia não ocorre por meio da conversão em subprodutos, mas apenas por meio da transferência de massa entre estados físicos (fase líquida para fase gasosa), consequentemente, não se tem formação de nitrato ao longo do processo. Assim, os resultados referentes às concentrações de nitrato, obtidos por meio da aplicação da técnica, comprovaram tal fato.

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de ozonização convencional, pode-se concluir que:

- Possivelmente houve a ocorrência de *stripping* de CO<sub>2</sub> ao longo do processo, culminando, assim, na redução das concentrações dos íons H<sup>+</sup>, uma vez que foi observada uma elevação nos valores médios de pH das amostras de efluentes ozonizadas;

- O processo de ozonização promoveu uma descoloração bastante significativa no efluente em estudo, tendo em vista que as remoções médias de cor alcançaram valores próximos a 89%;

- Em se tratando da turbidez, o processo de ozonização possibilitou uma remoção média de 68%, em virtude da oxidação e/ou a flotação dos sólidos suspensos;

- Com relação à degradação dos compostos orgânicos, observou-se que as reações oxidativas direta e indireta, associadas ao fenômeno de *stripping* de alguns compostos, foram responsáveis por promoverem consideráveis remoções de DQO, alcançando uma média de remoção próxima de 70%. A ocorrência de *stripping* de compostos voláteis foi comprovada nos ensaios de *gas stripping*, o que possibilitou concluir que, durante os ensaios de ozonização, os seus efeitos também poderiam ocasionar a remoção de matéria orgânica;

- A ozonização proporcionou baixas remoções de nitrogênio amoniacal, sendo que os valores médios de remoção se encontraram próximos a 10%. Provavelmente, isto se deve à baixa disponibilidade de amônia livre no meio reacional, tendo em vista que, durante os ensaios, os valores médios de pH se entravam na faixa entre 7 e 8. A remoção da pequena parcela de amônia pode ter sido motivada pelas reações diretas de oxidação do ozônio;

- Os ensaios de ozonização culminaram na formação de nitrato em virtude da oxidação da amônia. Entretanto, o aumento nas concentrações de nitrato não foi

correspondente à diminuição nas concentrações de amônia, tendo em vista que se removeu uma quantidade maior de amônia;

- A ozonização propiciou elevadas inativações de *E. Coli*, uma vez se alcançou remoções em torno de 99%; demonstrando, assim, ser uma técnica capaz de promover a desinfecção das amostras de efluente em estudo;

- Em todos os parâmetros analisados, verificou-se que as cargas de ozônio aplicadas não promoviam influência no processo de oxidação dos compostos orgânicos, tendo em vista que os valores médios de remoção foram semelhantes para todas as cargas aplicadas. Tal observação foi fundamentada nas análises estatísticas realizadas, que comprovaram que a carga de ozônio não é uma variável capaz de promover remoções significativas nos parâmetros em estudo;

- Já com relação ao tempo de contato, verificou-se que, em todos os parâmetros analisados, esta variável promovia remoções significativas. Tal constatação foi sustentada pelos testes estatísticos realizados, que possibilitaram identificar, em todos os casos, valores-p abaixo de 0,05.

De posse dos resultados obtidos nos ensaios de arraste de gás (*gas stripping*), pode-se concluir que:

- Em decorrência do aumento do pH ao longo do processo, observa-se que, possivelmente, houve o *stripping* de CO<sub>2</sub> presente na massa líquida;

- As remoções de cor obtidas ao longo do processo de *gas stripping* foram consideráveis, alcançando valores médios próximos de 42%. A explicação para tal fato se deve às remoções de turbidez em virtude do processo de borbulhamento de gás que, por sua vez, interferiram diretamente na leitura da cor aparente;

- Com relação à turbidez, os ensaios de *gas stripping* promoveram relativas remoções ao longo dos tempos de contato em estudo, sendo que os maiores valores alcançados foram de 36%. As remoções do referido parâmetro se devem à ocorrência da flotação, que promoveram a remoção das partículas sólidas da massa líquida durante o borbulhamento do gás nitrogênio;

- Em se tratando do parâmetro da DQO, notou-se a ocorrência de remoções de matéria orgânica ao longo do processo de *gas stripping*, tendo em vista que as médias de remoção alcançaram valores próximos de 35%. Isso se deve basicamente ao arraste (*stripping*) de compostos orgânicos voláteis presentes na massa líquida;

- O processo de arraste com gás nitrogênio culminou em baixas remoções de nitrogênio amoniacal, uma vez que os maiores valores médios alcançados foram de 9%. O motivo de tal fato pode estar relacionado com a baixa disponibilidade de amônia livre no meio líquido, em virtude dos valores médios de pH se encontrarem abaixo do valor típico (10 a 11) utilizado pela literatura para aplicação do método;

- As concentrações de nitrato se mantiveram constantes ao longo de todo o processo, demonstrando que amônia não é convertida em subprodutos, mas apenas transferida de um estado físico para outro (fase líquida para fase gasosa);

- As vazões de gás nitrogênio não promoveram variações significativas nos valores médios de remoção dos parâmetros em estudo. Os testes estatísticos permitiram comprovar a insignificância estatística de tal variável nas remoções dos parâmetros, tendo em vista que, para todos os parâmetros, os valores-p se encontraram acima de 0,05;

- Já os tempos de contato foram capazes de promover remoções estatisticamente significativas em todos os parâmetros analisados. Tal constatação foi embasada por meio dos testes estatísticos realizados, que permitiram identificar, para os todos os parâmetros em estudo, os valores-p muito baixos ( $p < 0,05$ ).

A seguir, têm-se algumas recomendações para pesquisas futuras:

- Avaliar a influência da altura da coluna líquida e do diâmetro das bolhas ascensionais na eficiência de transferência de massa gás/líquido;

- Adaptar a coluna para que seja possível implantar 2 frascos lavadores de gás dispostos em série e, assim, tornar-se possível a realização do balanço do ozônio;

- Quantificar o ozônio residual na massa líquida e, assim, tornar possível a realização do balanço do ozônio;

- Quantificar algumas espécies removidas durante o processo de arraste (*stripping*), como exemplo, o gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), o gás metano ( $\text{CH}_4$ );

- Realizar a identificação dos subprodutos gerados por meio dos ensaios de ozonização convencional;

- Realizar o estudo da desinfecção de outros tipos de microrganismos (vírus, protozoários) a partir dos ensaios de ozonização;

- Avaliar a eficiência de remoção dos parâmetros físico-químicos e biológico a partir da aplicação da ozonização catalítica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, E.; ASSALIN, M. R.; ROSA, M. A. Tratamento de efluentes industriais por processos oxidativos na presença de ozônio. **Química Nova**, v.27, n.5, p. 818-824, 2004.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-40422004000500023>

APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environmental Federation, 20th Edition, Washington DC. 1998.

ALVARES, A. B. C.; DIAPER, C.; PARSONS, S. A. Partial Oxidation by Ozone to Remove Recalcitrance from Wastewaters - a Review. **Environmental Technology**, v. 22, n. 4, p. 409–427, 2001.  
<https://doi.org/10.1080/09593332208618273>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9898**: Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores. Rio de Janeiro, 1987.

AQUINO, S. F.; SILVA, S. Q.; CHERNICHARO, C. A. L. Considerações práticas sobre o teste de demanda química de oxigênio (DQO) aplicado a análise de efluentes anaeróbios. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 11, n. 4, p. 295-304, 2006.  
<https://doi.org/10.1590/S1413-41522006000400001>

BAILEY, P. S. **Ozonation in organic chemistry**. New York: Academic Press. 1978. 498 p.

BELTRÁN, F. J. **Ozone reaction kinetics for water and wastewater systems**. Boca Raton: Lewis Publishers, 2004, p. 358.

BILOTTA, P.; DANIEL, L. A. Inativação de indicadores microbiológicos com ozônio no tratamento de esgoto sanitário visando o reúso de água. **Revista Aidis**, v. 4, n. 2, p. 48-56, 2011.

BONMATÍ, A.; FLOTATS, X. Air stripping of ammonia from pig slurry: characterisation and feasibility as a pre- or post-treatment to mesophilic anaerobic digestion. **Waste Management**, v. 23, n. 3, p. 261–272, 2003.  
[https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(02\)00144-7](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(02)00144-7)

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 15 - Atividades e Operações Insalubres**. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 1978.

CAMILO JÚNIOR, O. B. **Ozonização como pós-tratamento de efluente de esgoto doméstico**. 2018. 52f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade de Brasília, Brasília. 2018.

CAPODAGLIO, A. G.; HLAVÍNEK, P.; RABONI, M. Physico-chemical technologies for nitrogen removal from wastewaters: a review. **Revista Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 10, n. 3, 2015.

CARVALHO, M. C. S. **Ozônio no tratamento de águas residuárias de laticínios: otimização e cinética de degradação da matéria orgânica**. 2015. 92f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2015.

CASTAÑEDA, D. M. A.; PASSOS, K.; BENETTI, A. D. Remoção de sulfeto de hidrogênio, ferro e manganês de águas de abastecimento por aeração e dessorção por ar. **Revista DAE**, v. 60, p. 14-21, 2012.  
<https://doi.org/10.4322/dae.2014.087>

CHEUNG, K. C.; CHU, L. M.; WONG, M. H. Ammonia stripping as a pretreatment for landfill leachate. **Water, Air and Soil Pollution**, v. 94, n. 1, p. 209–221, 1997.  
<https://doi.org/10.1007/BF02407103>

CHENG, L. H., *et al.* Effect of Ozone Enhanced Flocculation on the Treatment of Secondary Effluent. **Procedia Environmental Sciences**, v. 10, p. 555–560, 2011.  
<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.090>

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). **Resolução Nº430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução Nº357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. 2011.

COSTA, H. S. **Estudo do comportamento do processo de ozonização como pós-tratamento de efluentes de sistema de tratamento anaeróbico de águas residuárias domiciliares**. 2003. 331 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

DEZOTTI, M., *et al.* **Processos e técnicas para o controle ambiental de efluentes líquidos**. Rio de Janeiro: E-papers. 2008. 360 p.

DOMENJOUR, B., *et al.* Ozone-Based Processes Applied to Municipal Secondary Effluents. **Ozone: Science & Engineering**, v. 33, n. 3, p. 243–249, 2011.  
<https://doi.org/10.1080/01919512.2011.571166>

DORE, M.; LANGLAIS, B.; LEGUBE, B. Mechanism of the reaction of ozone with Soluble Aromatic Pollutants. **Ozone: Science & Engineering**, v. 2, n. 1, p. 39–54, 1980. <https://doi.org/10.1080/01919518008550867>

EIGER, S.; FERREIRA FILHO, S. S.; LAGE FILHO, F. A. Modelagem matemática de sistemas de ozonização de contato. Parte I: formulação teórica. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 3, n. ja/ju 1998, p. 15-22, 1998.

EUSEBI, A. L.; BATTISTONI, P. The ozone treatment for nitrogen removal from liquid wastes at high salinity: full-scale optimization and economical aspect. **Ozone: Science & Engineering**, v. 38, n. 3, p. 219–224, 2016. <https://doi.org/10.1080/01919512.2015.1115336>

FERRAZ, F. M. **Recuperação da amônia liberada no processo de “air stripping” aplicado ao tratamento do lixiviado de aterros sanitários**. 2010. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2010.

GOTTSCHALK, C.; LIBRA, J. A.; SAUPE, A. **Ozonation of water and waste water: A practical guide to understanding ozone and its application**. Weinheim: Wiley-VCH, 2000, p. 189. <https://doi.org/10.1002/9783527613342>

GUIMARÃES, J. R., *et al.* Ozonização em meio básico para redução de cor do licor negro de indústria de celulose de algodão. **Engenharia Sanitária e Ambiental**; v. 15, n. 1, p. 93-98, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522010000100011>

HOIGNE, J., BADER, H. Ozonation of water: kinetics of oxidation of ammonia by ozone and hydroxyl radicals. **Environmental Science & Technology**, v. 12, p. 79–84, 1978. <https://doi.org/10.1021/es60137a005>

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Estimativas da população residente com data de referência 1º de julho de 2018**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/uberlandia/panorama>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

ISHIZAKI, K., *et al.* Effect of ozone on plasmid DNA of Escherichia coli in situ. **Water Research**, v. 21, n. 7, p. 823–827, 1987. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(87\)90158-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(87)90158-8)



KNOPP, G., *et al.* Elimination of micropollutants and transformation products from a wastewater treatment plant effluent through pilot scale ozonation followed by various activated carbon and biological filters. **Water Research**, v. 100, p. 580-592, 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.04.069>

KUNZ, A., *et al.* Construção e otimização de um sistema para produção e aplicação de ozônio em escala de laboratório. **Química Nova**, v. 22, n. 3, p. 425-428, 1999.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-40421999000300022>

KHUNTIA, S.; MAJUMDER, S. K.; GHOSH, P. Removal of ammonia from water by ozone microbubbles. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 52, n. 1, p. 318–326, 2013.  
<https://doi.org/10.1021/ie302212p>

LANGLAIS, B.; RECKHOW, D. A.; BRINK, D. R. **Ozone in water treatment: Application and engineering**. AWWA Research Foundation, Chelsea, Michigan: Lewis Publishers Inc., 1991.

LEHR, F.; MEWES, D. A transport equation for the interfacial area density applied to bubble columns. **Chemical Engineering Science**, v. 56, n. 3, p. 1159–1166, 2001.  
[https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00335-3](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00335-3)

LEI, L.; LI, Y. Effect of ozonation on recalcitrant chemical oxygen demand (COD), color and biodegradability of Hardwood Kraft Pulp (KP) Bleaching Effluent. **BioResources**, v. 9, n. 1, p. 1236-1245, 2014.  
<https://doi.org/10.15376/biores.9.1.1236-1245>

LEI, X., *et al.* Pretreatment of anaerobic digestion effluent with ammonia stripping and biogas purification. **Journal of Hazardous Materials**, v. 145, n. 3, p. 391–397, 2007.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.11.027>

LEWIS, W. K.; WHITMAN, W. G. A. Absorption Symposium – Principles of Gas Absorption. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 16, n. 12, p. 1215-1220, 1924.  
<https://doi.org/10.1021/ie50180a002>

LÓPEZ- LÓPEZ, A., *et al.* Influence of *t*-butanol and of pH on hydrodynamic and mass transfer parameters in an ozonation process. **Chemical Engineering and Processing**, v. 46, n. 7, p. 649-655, 2007.

MAGARA, Y; ITOH, M.; MORIOKA, T. Application of ozone to water treatment and power consumption of ozone generating systems. **Progress in Nuclear Energy**, v. 29 supplement, p. 175-182, 1995.  
[https://doi.org/10.1016/0149-1970\(95\)00041-H](https://doi.org/10.1016/0149-1970(95)00041-H)

MAHMOUD, A; FREIRE, R. S. Métodos emergentes para aumentar a eficiência do ozônio no tratamento de águas contaminadas. **Química Nova**. v. 30, n. 1, p. 198-205, 2007.

<https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000100032>

MARCE, M., *et al.* Ozonation treatment of urban primary and biotreated wastewaters: Impacts and modeling. **Chemical Engineering Journal**, v. 283, p. 768–777, 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.07.073>

MARINÑAS, B. J.; LIANG, S.; AIETA, E.M. Modeling hydrodynamics and ozone residual distribution in a pilot-scale ozone bubble-diffuser contactor. **Journal American Water Works Association**, p. 90-99, March, 1993.

<https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1993.tb05960.x>

MENDONÇA, M. Z. M.; SILVA, A. M.; AGUIAR, C. M. A.; SALLA, M. R. **Análise do processo de ozonização para tratamento de esgoto sanitário sintético**. In: IX Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental, XV Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Ambiental e III Fórum Latino Americano de Engenharia e Sustentabilidade. São Paulo: Editora Blucher, 2017. p. 1-10.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Wastewater engineering: treatment and resource recovery**. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. 2018 p.

MOTARJEMI, M.; JAMESON, G. J. Mass transfer from very small bubbles - The optimum bubble size for aeration. **Chemical Engineering Science**, v. 33, p. 1415-1423, 1978.

[https://doi.org/10.1016/0009-2509\(78\)85190-2](https://doi.org/10.1016/0009-2509(78)85190-2)

MOURA, D. A. G. **Remoção de amônia por arraste com ar de lixiviados de aterros sanitários**. 2008. 131 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

ONEBY, M. A. Ozone Treatment of Secondary Effluent at U.S. Municipal Wastewater Treatment Plants. **Ozone: Science & Engineering**, v. 32, n. 1, p. 43-55, 2010.

<https://doi.org/10.1080/01919510903482780>

OPPENLANDER, T. **Photochemical purification of water and air**. Weinheim: Wiley-VCH, 2003.

PANDA, K. K.; MATHEWS, A. P. Mass transfer of ozone in a novel in situ ozone generator and reactor. **Journal of Environmental Engineering**, v. 134, n. 10, p. 860-869, 2008.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2008\)134:10\(860\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2008)134:10(860))

PASQUALINI, L. N. **Estudo da oxidação de matéria orgânica de lixiviado de aterro sanitário por meio de tratamento com ozônio, peróxido de hidrogênio e radiação ultravioleta**. 2010. 144 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

PETALA, M.. P. Wastewater reclamation by advanced treatment of secondary effluents. **Desalination**, v. 195, n. 1, p. 109–118, 2006.  
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.10.037>

PEREIRA, G. **Transferência de massa em colunas de bolhas: Estudo da influência de propriedades físicas do líquido e de partículas sólidas**. 2010. 54 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Química, Universidade do Porto, Porto, 2010.

PINHEIRO, A. M. **Pós-tratamento de efluente saneante domissanitário por ozonização convencional e catalítica**. 2014. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

PRIETO-RODRÍGUEZ, L., *et al.* Application of solar AOPs and ozonation for elimination of micropollutants in municipal wastewater treatment plant effluents. **SciVerse ScienceDirect**. v. 47, n. 4, p. 1521-1528, 2012.

RENOU, S., *et al.* Landfill leachate treatment: Review and opportunity. **Journal of Hazardous Materials**, v. 150, n. 3, p. 468–493, 2008.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.077>

RIEBEL, A. H., *et al.*, Ozonation of carbon-nitrogen bonds. I. Nucleophilic attack of ozone, **J. Am. Chem. Soc.**, 82, 1801-1807, 1960.  
<https://doi.org/10.1021/ja01492a062>

RIVAS, J.; GIMENO, O.; BELTRÁN, F. Wastewater recycling: Application of ozone based treatments to secondary effluents. **Chemosphere**. v. 74, n. 6, p. 854-859, 2009.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.07.090>

SALLA, M. R. **Bases hidrodinâmica para processos de transferência de gases em colunas com difusores**. 2002. 154f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2002.

\_\_\_\_\_. **Sistema de ozonização em esgoto de reator anaeróbio: Estudo da hidrodinâmica e das respostas oscilantes de DQO**. 2006. 446 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

\_\_\_\_\_ *et al.* Interferência de partículas sólidas na transferência de massa ar/água em

coluna de aeração. **Ciência & Engenharia**, v. 20, n. 2, p. 01-10, 2011.

SANTOS, H. A. P. **Recuperação da amônia removida por processo de air stripping aplicado ao tratamento de lixiviados de aterro sanitário: estudo em escala piloto**. 2011. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

SCHAAR, H., *et al.* Micropollutant removal during biological wastewater treatment and a subsequent ozonation step. **Environmental Pollution**, v. 158, n. 5, p. 1399-1404, 2010.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.12.038>

SCHONS, A. **Tratamento combinado de lixiviado de aterro sanitário e esgoto doméstico utilizando ozônio**. 2017. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2017.

SHAH, Y. T., *et al.* Design parameters estimations for bubble column reactors. **AIChE Journal**, v. 28, n. 3, p. 353-379, 1982.  
<https://doi.org/10.1002/aic.690280302>

SILVA, F. M. S. **Avaliação do método de precipitação química associado ao stripping de amônia no tratamento do lixiviado do aterro da Muribeca-PE**. 2008. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

SILVA, G. H. R. **Formação de aldeídos e trialometanos da desinfecção por ozonização, cloração e ozonização/cloração de efluente de tratamento anaeróbio de esgoto sanitário**. 2008. 443 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SILVA, G. H. R.; DANIEL, L. A. Desinfecção de efluente anaeróbio com o uso de ozônio/cloro. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n. 2, p. 279-288, 2015.  
<https://doi.org/10.1590/S1413-41522015020000083662>

SILVA, G. H. R., *et al.* Anaerobic effluent disinfection using ozone: Byproducts formation. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 18, p. 6981–6986, 2010.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.022>

SINGER, P. C.; ZILLI, W. B. Ozonation of ammonia in wastewater. **Water Research**, v. 9, n. 2, p. 127-134, 1975.  
[https://doi.org/10.1016/0043-1354\(75\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0043-1354(75)90001-9)

- SOARES, L. V. **Ozonização de esgoto sanitário: estudo da hidrodinâmica, transferência de massa e inativação de microorganismos indicadores**. 2007. 249 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2007.
- SOUTO, G. D. B. **Lixiviado de aterros sanitários brasileiros – estudo de remoção do nitrogênio amoniacal por processos de arraste com ar (*stripping*)**. 2009. 371 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2009.
- SOUZA, S. M. A. G. U.; BONILLA, K. A. S.; SOUZA, A. A. U. Removal of COD and color from hydrolyzed textile azo dye by combined ozonation and biological treatment. **Journal of Hazardous Materials**, v. 179, n. 1, p. 35-42, 2010.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.02.053>
- TANAKA, J.; MATSUMURA, M. Application of ozone treatment for ammonia removal in spent brine. **Advances in Environmental Research**, v. 7, n. 4, p. 835–845, 2003.  
[https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(02\)00079-5](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00079-5)
- TIZAOUI, C., *et al.* Landfill leachate treatment with ozone and ozone/hydrogen peroxide systems. **Journal of Hazardous Materials**, v. 140, n. 1, p. 316–324, 2007.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.09.023>
- TREYBAL, R. E. **Mass Transfer Operations**. 3. ed. London: McGraw-Hill Book Company, 1980.
- TRIPATHI, S.; TRIPATHI, B. D. Efficiency of combined process of ozone and bio-filtration in the treatment of secondary effluent. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 13, p. 6850–6856, 2011.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.04.035>
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Alternative disinfectants and oxidants - Guidance manual**, Washington DC, EPA 815-R-99-014, 1999.
- VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. 472 p.
- WANG, G. S.; PAI, S. Y. Ozonation of dissolved organic matter in biologically treated wastewater effluents. **Ozone: Science & Engineering**, v. 23, n. 5, p. 351–358, 2001.  
<https://doi.org/10.1080/01919510108962018>
- WANG, T.; WANG, J. Numerical simulations of gas–liquid mass transfer in bubble columns with a CFD–PBM coupled model. **Chemical Engineering Science**, v. 62, n. 24, p. 7107–7118, 2007.

<https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.08.033>

WU, J. J., *et al.* The effect of storage and ozonation on the physical, chemical, and biological characteristics of swine manure slurries. **Ozone: Science & Engineering**. v. 20, p. 35-50, 1998.

<https://doi.org/10.1080/01919519808547289>

ZHOU, H; SMITH, D. W. Ozone mass transfer in water and wastewater treatment: experimental observations using a 2D laser particle dynamics analyzer. **Water Research**, v. 34, n. 3, p. 909–921, 2000.

[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00196-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00196-7)

## APÊNDICE A

Tabela 5 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 2,07 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 1

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |       |       |
|-----------------------------|------------------------|-------|-------|
|                             | 0                      | 30    | 60    |
| pH                          | 7,48                   | 7,74  | 7,75  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 66,33                  | 15,33 | 8,00  |
| Turbidez (UNT)              | 24,75                  | 8,61  | 5,18  |
| DQO (mg/L)                  | 104,60                 | 54,52 | 26,08 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 37,53                  | -     | 34,90 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,14                   | -     | 0,59  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | 23    | 23    |

Tabela 6 - Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 5,38 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 1

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |       |       |
|-----------------------------|------------------------|-------|-------|
|                             | 0                      | 30    | 60    |
| pH                          | 7,20                   | 7,76  | 7,86  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 87,00                  | 24,67 | 12,67 |
| Turbidez (UNT)              | 27,60                  | 14,40 | 8,64  |
| DQO (mg/L)                  | 125,25                 | 85,80 | 56,12 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 40,10                  | -     | 34,57 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,14                   | -     | 1,24  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | 23    | 23    |

Tabela 7- Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 7,15 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 1

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |       |       |
|-----------------------------|------------------------|-------|-------|
|                             | 0                      | 30    | 60    |
| pH                          | 7,05                   | 7,99  | 8,02  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 81,00                  | 49,33 | 37,00 |
| Turbidez (UNT)              | 25,23                  | 20,43 | 17,47 |
| DQO (mg/L)                  | 111,24                 | 85,93 | 58,45 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 39,40                  | -     | 34,43 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,13                   | -     | 1,04  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | 75    | 43    |

Tabela 8 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 2,07 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 2

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |       |       |
|-----------------------------|------------------------|-------|-------|
|                             | 0                      | 30    | 60    |
| pH                          | 7,18                   | 7,68  | 7,98  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 133,67                 | 47,00 | 29,67 |
| Turbidez (UNT)              | 40,44                  | 22,07 | 12,67 |
| DQO (mg/L)                  | 174,12                 | 82,39 | 41,92 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 40,32                  | -     | 35,83 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,13                   | -     | 0,82  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | 23    | < 3   |

Tabela 9 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 5,38 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 2

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |       |
|-----------------------------|------------------------|--------|-------|
|                             | 0                      | 30     | 60    |
| pH                          | 7,15                   | 8,00   | 8,04  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 140,00                 | 56,67  | 22,00 |
| Turbidez (UNT)              | 47,30                  | 28,50  | 15,93 |
| DQO (mg/L)                  | 202,17                 | 106,96 | 39,78 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 46,82                  | -      | 41,30 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,12                   | -      | 1,23  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | 23     | < 3   |

Tabela 10 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 7,15 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 2

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |       |
|-----------------------------|------------------------|--------|-------|
|                             | 0                      | 30     | 60    |
| pH                          | 7,05                   | 7,73   | 7,81  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 143,33                 | 47,00  | 23,33 |
| Turbidez (UNT)              | 45,30                  | 27,90  | 15,17 |
| DQO (mg/L)                  | 217,08                 | 144,88 | 47,93 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 47,87                  | -      | 42,58 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,12                   | -      | 0,78  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | 23     | 4     |



Tabela 11 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 2,07 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 3

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |       |       |
|-----------------------------|------------------------|-------|-------|
|                             | 0                      | 30    | 60    |
| pH                          | 7,24                   | 7,67  | 7,85  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 114,33                 | 23,00 | 13,67 |
| Turbidez (UNT)              | 40,44                  | 14,30 | 8,75  |
| DQO (mg/L)                  | 137,30                 | 60,58 | 37,38 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 26,40                  | -     | 23,88 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,13                   | -     | 0,78  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | 9     | < 3   |

Tabela 12 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 5,38 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 3

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |       |       |
|-----------------------------|------------------------|-------|-------|
|                             | 0                      | 30    | 60    |
| pH                          | 7,25                   | 7,76  | 7,79  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 114,33                 | 26,00 | 12,33 |
| Turbidez (UNT)              | 40,44                  | 14,27 | 9,52  |
| DQO (mg/L)                  | 152,32                 | 56,78 | 20,09 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 26,48                  | -     | 23,05 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,14                   | -     | 1,90  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | 4     | < 3   |

Tabela 13 - Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 7,15 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 3

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |       |
|-----------------------------|------------------------|--------|-------|
|                             | 0                      | 30     | 60    |
| pH                          | 7,18                   | 7,79   | 7,92  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 186,00                 | 45,33  | 14,00 |
| Turbidez (UNT)              | 70,93                  | 21,07  | 11,25 |
| DQO (mg/L)                  | 219,42                 | 105,60 | 57,96 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 32,78                  | -      | 28,30 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,13                   | -      | 2,73  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | 4      | < 3   |

Tabela 14 - Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 2,07 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 4

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |        |
|-----------------------------|------------------------|--------|--------|
|                             | 0                      | 30     | 60     |
| pH                          | 7,40                   | 7,44   | 7,5    |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 304,67                 | 88,00  | 43,67  |
| Turbidez (UNT)              | 60,53                  | 40,47  | 25,50  |
| DQO (mg/L)                  | 387,20                 | 198,48 | 106,00 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 39,45                  | -      | 36,27  |
| Nitrato (mg/L)              | 0,15                   | -      | 0,57   |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | 23     | < 3    |

Tabela 15 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 5,38 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 4

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |       |
|-----------------------------|------------------------|--------|-------|
|                             | 0                      | 30     | 60    |
| pH                          | 7,41                   | 7,73   | 7,75  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 266,00                 | 67,33  | 13,33 |
| Turbidez (UNT)              | 53,03                  | 40,44  | 24,47 |
| DQO (mg/L)                  | 342,47                 | 182,65 | 86,78 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 39,40                  | -      | 35,78 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,14                   | -      | 0,84  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | 64     | 9     |

Tabela 16 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 7,15 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 4

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |       |
|-----------------------------|------------------------|--------|-------|
|                             | 0                      | 30     | 60    |
| pH                          | 7,42                   | 7,78   | 7,82  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 239,00                 | 72,33  | 23,00 |
| Turbidez (UNT)              | 55,93                  | 40,44  | 24,37 |
| DQO (mg/L)                  | 347,37                 | 182,69 | 86,00 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 37,35                  | -      | 33,45 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,14                   | -      | 0,98  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | 23     | 9     |

Tabela 17 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 2,07 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 5

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |       |
|-----------------------------|------------------------|--------|-------|
|                             | 0                      | 30     | 60    |
| pH                          | 7,13                   | 7,39   | 7,56  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 119,00                 | 27,33  | 15,00 |
| Turbidez (UNT)              | 40,44                  | 18,23  | 12,13 |
| DQO (mg/L)                  | 267,50                 | 108,44 | 89,42 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 35,37                  | -      | 32,42 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,16                   | -      | 0,56  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | 4      | < 3   |

Tabela 18 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 5,38 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 5

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |       |       |
|-----------------------------|------------------------|-------|-------|
|                             | 0                      | 30    | 60    |
| pH                          | 7,06                   | 7,70  | 7,82  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 139,00                 | 33,00 | 12,67 |
| Turbidez (UNT)              | 40,44                  | 19,27 | 11,00 |
| DQO (mg/L)                  | 188,18                 | 90,06 | 52,63 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 34,83                  | -     | 31,33 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,15                   | -     | 0,77  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | 4     | < 3   |

Tabela 19 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 7,15 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 5

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |       |
|-----------------------------|------------------------|--------|-------|
|                             | 0                      | 30     | 60    |
| pH                          | 7,08                   | 7,74   | 7,88  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 126,33                 | 26,00  | 12,00 |
| Turbidez (UNT)              | 40,44                  | 16,53  | 10,43 |
| DQO (mg/L)                  | 197,72                 | 116,19 | 58,02 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 34,87                  | -      | 31,55 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,16                   | -      | 0,69  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | < 3    | < 3   |

Tabela 20 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 2,07 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 6

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |       |
|-----------------------------|------------------------|--------|-------|
|                             | 0                      | 30     | 60    |
| pH                          | 7,10                   | 7,39   | 7,56  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 145,67                 | 34,00  | 15,00 |
| Turbidez (UNT)              | 40,44                  | 24,03  | 12,87 |
| DQO (mg/L)                  | 198,96                 | 119,46 | 76,22 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 30,77                  | -      | 27,97 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,13                   | -      | 0,47  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | < 3    | < 3   |

Tabela 21 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 5,38 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 6

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |       |
|-----------------------------|------------------------|--------|-------|
|                             | 0                      | 30     | 60    |
| pH                          | 7,07                   | 7,63   | 7,65  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 146,33                 | 41,00  | 19,00 |
| Turbidez (UNT)              | 40,44                  | 26,13  | 14,70 |
| DQO (mg/L)                  | 205,00                 | 107,36 | 82,07 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 30,98                  | -      | 28,22 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,13                   | -      | 0,47  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | < 3    | < 3   |

Tabela 22 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 7,15 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 6

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |       |
|-----------------------------|------------------------|--------|-------|
|                             | 0                      | 30     | 60    |
| pH                          | 7,05                   | 7,71   | 7,89  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 149,33                 | 57,00  | 13,00 |
| Turbidez (UNT)              | 40,44                  | 26,40  | 10,60 |
| DQO (mg/L)                  | 207,84                 | 103,63 | 54,59 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 31,30                  | -      | 27,53 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,13                   | -      | 1,43  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | 9      | < 3   |

Tabela 23 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 2,07 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 7

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |       |
|-----------------------------|------------------------|--------|-------|
|                             | 0                      | 30     | 60    |
| pH                          | 7,14                   | 7,40   | 7,57  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 188,00                 | 87,00  | 22,00 |
| Turbidez (UNT)              | 48,73                  | 40,73  | 16,13 |
| DQO (mg/L)                  | 212,79                 | 166,99 | 74,21 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 37,95                  | -      | 35,27 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,17                   | -      | 0,48  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | 43     | 4     |

Tabela 24 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 5,38 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 7

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |       |
|-----------------------------|------------------------|--------|-------|
|                             | 0                      | 30     | 60    |
| pH                          | 7,16                   | 7,58   | 7,67  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 200,00                 | 43,00  | 21,00 |
| Turbidez (UNT)              | 48,67                  | 31,33  | 17,87 |
| DQO (mg/L)                  | 264,19                 | 122,87 | 80,32 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 38,52                  | -      | 34,57 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,16                   | -      | 0,87  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | 23     | < 3   |

Tabela 25 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 7,15 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 7

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |       |       |
|-----------------------------|------------------------|-------|-------|
|                             | 0                      | 30    | 60    |
| pH                          | 7,12                   | 7,76  | 7,85  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 186,33                 | 30,00 | 7,00  |
| Turbidez (UNT)              | 52,47                  | 24,73 | 15,40 |
| DQO (mg/L)                  | 226,60                 | 94,19 | 57,31 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 38,38                  | -     | 34,40 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,17                   | -     | 0,92  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | 23    | 23    |

Tabela 26 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 2,07 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 8

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |       |
|-----------------------------|------------------------|--------|-------|
|                             | 0                      | 30     | 60    |
| pH                          | 7,01                   | 7,37   | 7,45  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 200,67                 | 45,00  | 22,00 |
| Turbidez (UNT)              | 55,73                  | 36,33  | 22,83 |
| DQO (mg/L)                  | 232,26                 | 138,11 | 89,31 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 40,22                  | -      | 37,23 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,16                   | -      | 0,56  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | 23     | < 3   |

Tabela 27 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 5,38 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 8

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |        |
|-----------------------------|------------------------|--------|--------|
|                             | 0                      | 30     | 60     |
| pH                          | 7,04                   | 7,56   | 7,68   |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 202,00                 | 48,00  | 33,00  |
| Turbidez (UNT)              | 55,77                  | 36,83  | 19,40  |
| DQO (mg/L)                  | 227,38                 | 145,88 | 108,88 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 40,17                  | -      | 36,30  |
| Nitrato (mg/L)              | 0,16                   | -      | 0,77   |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | 23     | 4      |

Tabela 28 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 7,15 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 8

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |       |
|-----------------------------|------------------------|--------|-------|
|                             | 0                      | 30     | 60    |
| pH                          | 7,08                   | 7,68   | 7,77  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 202,67                 | 40,33  | 23,00 |
| Turbidez (UNT)              | 65,50                  | 25,63  | 13,73 |
| DQO (mg/L)                  | 218,47                 | 117,52 | 66,08 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 39,98                  | -      | 36,57 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,15                   | -      | 0,65  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | 23     | 9     |

Tabela 29 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 2,07 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 9

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |        |
|-----------------------------|------------------------|--------|--------|
|                             | 0                      | 30     | 60     |
| pH                          | 7,11                   | 7,37   | 7,41   |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 196,33                 | 48,33  | 25,00  |
| Turbidez (UNT)              | 48,77                  | 35,67  | 23,17  |
| DQO (mg/L)                  | 282,85                 | 176,36 | 150,29 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 35,42                  | -      | 32,90  |
| Nitrato (mg/L)              | 0,22                   | -      | 0,55   |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | 4      | < 3    |

Tabela 30 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 5,38 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 9

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |       |
|-----------------------------|------------------------|--------|-------|
|                             | 0                      | 30     | 60    |
| pH                          | 7,06                   | 7,58   | 7,62  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 212,33                 | 38,00  | 19,00 |
| Turbidez (UNT)              | 51,07                  | 34,70  | 21,23 |
| DQO (mg/L)                  | 276,87                 | 173,20 | 92,30 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 35,28                  | -      | 32,25 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,22                   | -      | 0,86  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | < 3    | < 3   |

Tabela 31 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 7,15 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 9

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |        |
|-----------------------------|------------------------|--------|--------|
|                             | 0                      | 30     | 60     |
| pH                          | 7,08                   | 7,61   | 7,72   |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 215,67                 | 68,33  | 35,00  |
| Turbidez (UNT)              | 51,23                  | 37,50  | 21,57  |
| DQO (mg/L)                  | 279,71                 | 186,75 | 101,70 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 35,65                  | -      | 32,07  |
| Nitrato (mg/L)              | 0,22                   | -      | 1,32   |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | 4      | < 3    |

Tabela 32 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 2,07 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 10

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |       |
|-----------------------------|------------------------|--------|-------|
|                             | 0                      | 30     | 60    |
| pH                          | 7,00                   | 7,33   | 7,43  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 81,00                  | 14,00  | 6,00  |
| Turbidez (UNT)              | 39,63                  | 11,17  | 7,05  |
| DQO (mg/L)                  | 182,20                 | 129,04 | 83,79 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 33,12                  | -      | 30,73 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,16                   | -      | 0,51  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | < 3    | < 3   |

Tabela 33 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 5,38 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 10

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |       |       |
|-----------------------------|------------------------|-------|-------|
|                             | 0                      | 30    | 60    |
| pH                          | 7,01                   | 7,55  | 7,72  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 81,00                  | 13,00 | 4,00  |
| Turbidez (UNT)              | 39,40                  | 10,67 | 6,83  |
| DQO (mg/L)                  | 184,97                 | 88,90 | 51,67 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 33,38                  | -     | 30,32 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,16                   | -     | 0,62  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | 4     | < 3   |

Tabela 34 – Resultados experimentais obtidos no processo de ozonização convencional para P = 7,15 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 10

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |       |       |
|-----------------------------|------------------------|-------|-------|
|                             | 0                      | 30    | 60    |
| pH                          | 7,03                   | 7,71  | 7,83  |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 79,67                  | 12,33 | 8,00  |
| Turbidez (UNT)              | 30,30                  | 10,40 | 6,04  |
| DQO (mg/L)                  | 180,23                 | 72,90 | 46,15 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 33,30                  | -     | 30,00 |
| Nitrato (mg/L)              | 0,17                   | -     | 0,77  |
| <i>E. Coli</i> (NMP/100 mL) | 2400                   | < 3   | < 3   |



## APÊNDICE B

Tabela 35 – Resultados experimentais obtidos no processo *gas stripping* para Q = 1 L/min – Amostra 1

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |        |
|-----------------------------|------------------------|--------|--------|
|                             | 0                      | 30     | 60     |
| pH                          | 7,08                   | 7,95   | 7,96   |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 130,00                 | 81,00  | 70,67  |
| Turbidez (UNT)              | 40,58                  | 30,8   | 19,93  |
| DQO (mg/L)                  | 203,68                 | 154,56 | 134,17 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 35,05                  | -      | 32,85  |
| Nitrato (mg/L)              | 0,16                   | -      | 0,16   |

Tabela 36 – Resultados experimentais obtidos no processo *gas stripping* para Q = 3 L/min – Amostra 1

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |        |
|-----------------------------|------------------------|--------|--------|
|                             | 0                      | 30     | 60     |
| pH                          | 7,08                   | 8,06   | 8,18   |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 133,00                 | 90,67  | 69,00  |
| Turbidez (UNT)              | 40,58                  | 32,10  | 22,53  |
| DQO (mg/L)                  | 209,04                 | 155,53 | 122,37 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 35,07                  | -      | 32,60  |
| Nitrato (mg/L)              | 0,16                   | -      | 0,15   |

Tabela 37 – Resultados experimentais obtidos no processo *gas stripping* para Q = 5 L/min – Amostra 1

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |        |
|-----------------------------|------------------------|--------|--------|
|                             | 0                      | 30     | 60     |
| pH                          | 7,10                   | 8,23   | 8,5    |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 129,33                 | 90,00  | 65,00  |
| Turbidez (UNT)              | 41,93                  | 32,50  | 23,80  |
| DQO (mg/L)                  | 228,92                 | 152,59 | 132,59 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 34,97                  | -      | 31,82  |
| Nitrato (mg/L)              | 0,16                   | -      | 0,16   |

Tabela 38 – Resultados experimentais obtidos no processo *gas stripping* para Q = 1 L/min – Amostra 2

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |        |
|-----------------------------|------------------------|--------|--------|
|                             | 0                      | 30     | 60     |
| pH                          | 7,07                   | 7,79   | 8,14   |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 121,67                 | 114,67 | 75,00  |
| Turbidez (UNT)              | 40,44                  | 35,63  | 30,20  |
| DQO (mg/L)                  | 184,22                 | 165,12 | 120,94 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 30,93                  | -      | 28,95  |
| Nitrato (mg/L)              | 0,12                   | -      | 0,12   |

Tabela 39 – Resultados experimentais obtidos no processo *gas stripping* para Q = 3 L/min – Amostra 2

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |        |
|-----------------------------|------------------------|--------|--------|
|                             | 0                      | 30     | 60     |
| pH                          | 7,10                   | 8,04   | 8,46   |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 121,33                 | 93,00  | 77,00  |
| Turbidez (UNT)              | 40,44                  | 31,60  | 29,10  |
| DQO (mg/L)                  | 164,48                 | 141,73 | 121,30 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 31,12                  | -      | 28,87  |
| Nitrato (mg/L)              | 0,13                   | -      | 0,12   |

Tabela 40 – Resultados experimentais obtidos no processo *gas stripping* para Q = 5 L/min – Amostra 2

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |        |
|-----------------------------|------------------------|--------|--------|
|                             | 0                      | 30     | 60     |
| pH                          | 7,05                   | 8,06   | 8,36   |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 122,00                 | 91,00  | 71,33  |
| Turbidez (UNT)              | 40,44                  | 36,57  | 33,87  |
| DQO (mg/L)                  | 171,03                 | 138,82 | 127,50 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 31,50                  | -      | 28,80  |
| Nitrato (mg/L)              | 0,13                   | -      | 0,13   |

Tabela 41 – Resultados experimentais obtidos no processo *gas stripping* para Q = 1 L/min – Amostra 3

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |        |
|-----------------------------|------------------------|--------|--------|
|                             | 0                      | 30     | 60     |
| pH                          | 7,08                   | 7,88   | 8,01   |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 193,67                 | 123,67 | 94,33  |
| Turbidez (UNT)              | 55,07                  | 40,44  | 38,33  |
| DQO (mg/L)                  | 294,14                 | 214,50 | 180,31 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 38,02                  | -      | 34,63  |
| Nitrato (mg/L)              | 0,17                   | -      | 0,16   |

Tabela 42 – Resultados experimentais obtidos no processo *gas stripping* para Q = 3 L/min – Amostra 3

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |        |
|-----------------------------|------------------------|--------|--------|
|                             | 0                      | 30     | 60     |
| pH                          | 7,06                   | 8,03   | 8,21   |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 193,33                 | 134,33 | 113,67 |
| Turbidez (UNT)              | 51,43                  | 40,44  | 39,00  |
| DQO (mg/L)                  | 283,55                 | 217,36 | 194,22 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 38,68                  | -      | 34,57  |
| Nitrato (mg/L)              | 0,17                   | -      | 0,17   |

Tabela 43 – Resultados experimentais obtidos no processo *gas stripping* para Q = 5 L/min – Amostra 3

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |        |
|-----------------------------|------------------------|--------|--------|
|                             | 0                      | 30     | 60     |
| pH                          | 7,07                   | 8,19   | 8,55   |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 195,00                 | 171,67 | 115,33 |
| Turbidez (UNT)              | 54,13                  | 51,00  | 32,83  |
| DQO (mg/L)                  | 291,13                 | 222,72 | 182,47 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 38,38                  | -      | 34,53  |
| Nitrato (mg/L)              | 0,17                   | -      | 0,17   |

Tabela 44 – Resultados experimentais obtidos no processo *gas stripping* para Q = 1 L/min – Amostra 4

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |        |
|-----------------------------|------------------------|--------|--------|
|                             | 0                      | 30     | 60     |
| pH                          | 7,10                   | 7,74   | 7,93   |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 215,67                 | 184,67 | 120,33 |
| Turbidez (UNT)              | 51,17                  | 42,67  | 36,93  |
| DQO (mg/L)                  | 300,25                 | 268,67 | 197,62 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 35,47                  | -      | 32,47  |
| Nitrato (mg/L)              | 0,22                   | -      | 0,22   |

Tabela 45 – Resultados experimentais obtidos no processo *gas stripping* para Q = 3 L/min – Amostra 4

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |        |
|-----------------------------|------------------------|--------|--------|
|                             | 0                      | 30     | 60     |
| pH                          | 7,08                   | 8,09   | 8,38   |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 215,33                 | 196,00 | 139,33 |
| Turbidez (UNT)              | 50,77                  | 42,20  | 40,44  |
| DQO (mg/L)                  | 319,51                 | 237,91 | 201,31 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 35,20                  | -      | 31,95  |
| Nitrato (mg/L)              | 0,22                   | -      | 0,21   |

Tabela 46 – Resultados experimentais obtidos no processo *gas stripping* para Q = 5 L/min – Amostra 4

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |        |
|-----------------------------|------------------------|--------|--------|
|                             | 0                      | 30     | 60     |
| pH                          | 7,08                   | 8,14   | 8,53   |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 215,67                 | 197,67 | 170,00 |
| Turbidez (UNT)              | 51,27                  | 44,73  | 40,44  |
| DQO (mg/L)                  | 310,36                 | 289,47 | 215,85 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 35,78                  | -      | 32,40  |
| Nitrato (mg/L)              | 0,22                   | -      | 0,22   |

Tabela 47 - Resultados experimentais obtidos no processo *gas stripping* para Q = 1 L/min – Amostra 5

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |        |
|-----------------------------|------------------------|--------|--------|
|                             | 0                      | 30     | 60     |
| pH                          | 6,99                   | 7,33   | 7,43   |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 94,33                  | 81,33  | 67,33  |
| Turbidez (UNT)              | 30,43                  | 26,70  | 17,73  |
| DQO (mg/L)                  | 149,54                 | 130,00 | 105,25 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 33,32                  | -      | 31,25  |
| Nitrato (mg/L)              | 0,16                   | -      | 0,17   |

Tabela 48 – Resultados experimentais obtidos no processo *gas stripping* para Q = 3 L/min – Amostra 5

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |        |
|-----------------------------|------------------------|--------|--------|
|                             | 0                      | 30     | 60     |
| pH                          | 6,97                   | 7,85   | 7,97   |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 94,00                  | 60,33  | 46,00  |
| Turbidez (UNT)              | 30,60                  | 19,37  | 12,37  |
| DQO (mg/L)                  | 167,44                 | 153,09 | 102,03 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 33,18                  | -      | 30,35  |
| Nitrato (mg/L)              | 0,16                   | -      | 0,16   |

Tabela 49 – Resultados experimentais obtidos no processo *gas stripping* para Q = 5 L/min – Amostra 5

| Parâmetro                   | Tempo de contato (min) |        |        |
|-----------------------------|------------------------|--------|--------|
|                             | 0                      | 30     | 60     |
| pH                          | 6,96                   | 8,06   | 8,43   |
| Cor (mg Pt-Co/L)            | 72,00                  | 46,00  | 40,67  |
| Turbidez (UNT)              | 29,77                  | 16,77  | 11,13  |
| DQO (mg/L)                  | 172,96                 | 144,16 | 100,07 |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/L) | 33,53                  | -      | 30,45  |
| Nitrato (mg/L)              | 0,16                   | -      | 0,16   |

## APÊNDICE C

Tabela 50 – Análise estatística para o parâmetro pH no processo de ozonização convencional

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i>  | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|------------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Tempo de contato (min)   | 0,60654956 | 2         | 0,303275  | 32,77072 | 0,003309       | 6,944272         |
| P (gO <sub>3</sub> /h)   | 0,03614156 | 2         | 0,018071  | 1,952659 | 0,256024       | 6,944272         |
| Erro                     | 0,03701778 | 4         | 0,009254  |          |                |                  |
| Total                    | 0,67970889 | 8         |           |          |                |                  |

Tabela 51 – Análise estatística para o parâmetro cor no processo de ozonização convencional

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Tempo de contato (min)   | 33439,04  | 2         | 16719,52  | 3106,862 | 4,14E-07       | 6,944272         |
| P (gO <sub>3</sub> /h)   | 19,40222  | 2         | 9,701111  | 1,802684 | 0,276617       | 6,944272         |
| Erro                     | 21,52593  | 4         | 5,381481  |          |                |                  |
| Total                    | 33479,97  | 8         |           |          |                |                  |

Tabela 52 – Análise estatística para o parâmetro turbidez no processo de ozonização convencional

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Tempo de contato (min)   | 1455,79   | 2         | 727,8951  | 447,1305 | 1,98E-05       | 6,944272         |
| P (gO <sub>3</sub> /h)   | 2,362023  | 2         | 1,181011  | 0,72547  | 0,538489       | 6,944272         |
| Erro                     | 6,511701  | 4         | 1,627925  |          |                |                  |
| Total                    | 1464,664  | 8         |           |          |                |                  |

Tabela 53 – Análise estatística para o parâmetro DQO no processo de ozonização convencional

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Tempo de contato (min)   | 34498,96  | 2         | 17249,48  | 884,5712 | 5,09E-06       | 6,944272         |
| P (gO <sub>3</sub> /h)   | 63,7855   | 2         | 31,89275  | 1,635493 | 0,302645       | 6,944272         |
| Erro                     | 78,00155  | 4         | 19,50039  |          |                |                  |
| Total                    | 34640,75  | 8         |           |          |                |                  |

Tabela 54 – Análise estatística para o parâmetro nitrogênio amoniacal no processo de ozonização convencional

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Tempo de contato (min)   | 19,23057  | 1         | 19,23057  | 112,7045 | 0,0088         | 18,51282         |
| P (gO <sub>3</sub> /h)   | 0,797203  | 2         | 0,398601  | 2,336081 | 0,2998         | 19               |
| Erro                     | 0,341256  | 2         | 0,170628  |          |                |                  |
| Total                    | 20,36903  | 5         |           |          |                |                  |

Tabela 55 – Análise estatística para o parâmetro nitrato no processo de ozonização convencional

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Tempo de contato (min)   | 0,821548  | 1         | 0,821548  | 21,146   | 0,04418        | 18,51282         |
| P (gO <sub>3</sub> /h)   | 0,076769  | 2         | 0,038385  | 0,987987 | 0,503021       | 19               |
| Erro                     | 0,077702  | 2         | 0,038851  |          |                |                  |
| Total                    | 0,976019  | 5         |           |          |                |                  |

Tabela 56 – Análise estatística para o parâmetro *E. Coli* no processo de ozonização convencional

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
|                          |           |           |           |          | 1,24E-         |                  |
| Tempo de contato (min)   | 11,60585  | 2         | 5,802923  | 566,1578 | 05             | 6,944272         |
| P (gO <sub>3</sub> /h)   | 0,034852  | 2         | 0,017426  | 1,700145 | 0,2922         | 6,944272         |
| Erro                     | 0,040999  | 4         | 0,01025   |          |                |                  |
| Total                    | 11,6817   | 8         |           |          |                |                  |

## APÊNDICE D

Tabela 57 - Análise estatística para o parâmetro pH no processo de *gas stripping*

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Tempo de contato (min)   | 2,186284  | 2         | 1,093142  | 46,48678 | 0,001701       | 6,944272         |
| Q (L/min)                | 0,159457  | 2         | 0,079728  | 3,39052  | 0,1377         | 6,944272         |
| Erro                     | 0,09406   | 4         | 0,023515  |          |                |                  |
| Total                    | 2,439801  | 8         |           |          |                |                  |

Tabela 58 – Análise estatística para o parâmetro cor no processo de *gas stripping*

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Tempo de contato (min)   | 5547,539  | 2         | 2773,769  | 259,3984 | 5,85E-05       | 6,944272         |
| Q (L/min)                | 4,101728  | 2         | 2,050864  | 0,191793 | 0,832647       | 6,944272         |
| Erro                     | 42,77235  | 4         | 10,69309  |          |                |                  |
| Total                    | 5594,413  | 8         |           |          |                |                  |

Tabela 59 – Análise estatística para o parâmetro turbidez no processo de *gas stripping*

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
|                          |           |           |           |          | 9,48E-         |                  |
| Tempo de contato (min)   | 325,9309  | 2         | 162,9655  | 203,4357 | 05             | 6,944272         |
| Q (L/min)                | 2,432542  | 2         | 1,216271  | 1,518315 | 0,32314        | 6,944272         |
| Erro                     | 3,204265  | 4         | 0,801066  |          |                |                  |
| Total                    | 331,5678  | 8         |           |          |                |                  |

Tabela 60 – Análise estatística para o parâmetro DQO no processo de *gas stripping*

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Tempo de contato (min)   | 9826,603  | 2         | 4913,302  | 926,6635 | 4,64E-06       | 6,944272         |
| Q (L/min)                | 63,2961   | 2         | 31,64805  | 5,968918 | 0,062989       | 6,944272         |
| Erro                     | 21,20857  | 4         | 5,302142  |          |                |                  |
| Total                    | 9911,108  | 8         |           |          |                |                  |

Tabela 61 – Análise estatística para o parâmetro nitrogênio amoniacal no processo de *gas stripping*

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Tempo de contato (min)   | 12,74098  | 1         | 12,74098  | 198,4519 | 0,005001       | 18,51282         |
| Q (L/min)                | 0,018337  | 2         | 0,009169  | 0,142808 | 0,875038       | 19               |
| Erro                     | 0,128404  | 2         | 0,064202  |          |                |                  |
| Total                    | 12,88772  | 5         |           |          |                |                  |

Tabela 62 – Análise estatística para o parâmetro nitrato no processo de *gas stripping*

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Tempo de contato (min)   | 6E-06     | 1         | 6E-06     | 1        | 0,4226         | 18,51282         |
| Q (L/min)                | 9,33E-06  | 2         | 4,67E-06  | 0,777778 | 0,5625         | 19               |
| Erro                     | 0,000012  | 2         | 6E-06     |          |                |                  |
| Total                    | 2,73E-05  | 5         |           |          |                |                  |



## APÊNDICE E

Tabela 63 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para  $P = 2,07 \text{ gO}_3/\text{h}$  – Amostra 1

| Tempo (min) | Volume de Tiosulfato (ml) |      |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|---------------------------|------|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                  |      | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 0,05                      | 0,04 | 1,85     | 2,21 | 0,04              | 2,03     | 52                   | 52,6     |
| 60          | 0,14                      | 0,14 | 2,03     | 2,32 | 0,14              | 2,18     | 54,8                 | 55,2     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,2887           | 1,2918   | 0,0205 | 0,0023                        | 0,1032   | 0,1055                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,2367           | 1,2392   | 0,0205 | 0,0069                        | 0,1103   | 0,1172                              |

Tabela 64 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para  $P = 5,38 \text{ gO}_3/\text{h}$  – Amostra 1

| Tempo (min) | Volume de Tiosulfato (ml) |      |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|---------------------------|------|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                  |      | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 0,06                      | 0,06 | 3,12     | 3,15 | 0,06              | 3,14     | 54,2                 | 52,7     |
| 60          | 0,15                      | 0,16 | 3,63     | 3,51 | 0,16              | 3,57     | 51,7                 | 51,6     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,3946           | 1,3961   | 0,0205 | 0,0033                        | 0,1723   | 0,1756                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,3404           | 1,3434   | 0,0205 | 0,0083                        | 0,1953   | 0,2036                              |

Tabela 65 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para  $P = 7,15 \text{ gO}_3/\text{h}$  – Amostra 1

| Tempo (min) | Volume de Tiosulfato (ml) |      |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|---------------------------|------|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                  |      | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 0,9                       | 0,85 | 2,41     | 2,55 | 0,88              | 2,48     | 53,1                 | 51,2     |
| 60          | 2,20                      | 2,23 | 3,88     | 3,7  | 2,22              | 3,79     | 52,3                 | 51,3     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,5              | 1,5      | 0,0205 | 0,0517                        | 0,1464   | 0,1981                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,4469           | 1,4488   | 0,0205 | 0,1280                        | 0,2211   | 0,3491                              |

Tabela 66 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para P = 2,07 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 2

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |      |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|------|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |      | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 0,45                       | 0,84 | 0,25     | 0,25 | 0,65              | 0,25     | 54                   | 55,4     |
| 60          | 2,1                        | 2,31 | 0,65     | 0,5  | 2,21              | 0,58     | 53                   | 54,3     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,3936           | 1,3956   | 0,0205 | 0,0354                        | 0,0137   | 0,0491                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,3396           | 1,3402   | 0,0205 | 0,1176                        | 0,0309   | 0,1485                              |

Tabela 67 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para P = 5,38 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 2

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |      |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|------|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |      | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 1,8                        | 1,8  | 5,1      | 4,81 | 1,80              | 4,96     | 54,3                 | 52,2     |
| 60          | 2,5                        | 2,31 | 6,95     | 6,9  | 2,41              | 6,93     | 52,1                 | 52,2     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,5              | 1,5      | 0,0205 | 0,1063                        | 0,2925   | 0,3988                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,4457           | 1,4478   | 0,0205 | 0,1407                        | 0,4048   | 0,5455                              |

Tabela 68 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para P = 7,15 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 2

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |      |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|------|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |      | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 1,81                       | 1,6  | 16,6     | 17,5 | 1,71              | 17,05    | 52                   | 53,9     |
| 60          | 2,05                       | 2,05 | 20,3     | 18,9 | 2,05              | 19,60    | 51,2                 | 51,1     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,5              | 1,5      | 0,0205 | 0,1007                        | 1,0066   | 1,1073                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,448            | 1,4461   | 0,0205 | 0,1203                        | 1,1518   | 1,2721                              |

Tabela 69 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para P = 2,07 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 3

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |      |          |     | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|------|----------|-----|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |      | Frasco 2 |     | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 1,71                       | 1,69 | 1,26     | 1,5 | 1,70              | 1,38     | 54,8                 | 54,2     |
| 60          | 4,16                       | 4,29 | 3,08     | 3,5 | 4,23              | 3,29     | 54,7                 | 57,3     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,3925           | 1,3956   | 0,0205 | 0,0932                        | 0,0758   | 0,1690                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,3377           | 1,3414   | 0,0205 | 0,2261                        | 0,1766   | 0,4028                              |

Tabela 70 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para P = 5,38 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 3

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |      |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|------|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |      | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 1,2                        | 1,31 | 4,72     | 4,65 | 1,26              | 4,69     | 54,1                 | 52       |
| 60          | 2,49                       | 2,42 | 7,85     | 7,5  | 2,46              | 7,68     | 53,4                 | 52,4     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,5              | 1,5      | 0,0205 | 0,0741                        | 0,2766   | 0,3507                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,4459           | 1,448    | 0,0205 | 0,1424                        | 0,4470   | 0,5894                              |

Tabela 71 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para P = 7,15 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 3

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |      |          |       | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|------|----------|-------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |      | Frasco 2 |       | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 0,7                        | 0,69 | 9,3      | 8,7   | 0,70              | 9,00     | 54,5                 | 51,8     |
| 60          | 1,71                       | 1,68 | 11,91    | 11,95 | 1,70              | 11,93    | 53,2                 | 52,4     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,2866           | 1,2859   | 0,0205 | 0,0352                        | 0,4555   | 0,4907                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,2321           | 1,2341   | 0,0205 | 0,0837                        | 0,5978   | 0,6815                              |

Tabela 72 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para P = 2,07 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 4

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |      |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|------|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |      | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 0,1                        | 0,1  | 2,3      | 2,35 | 0,10              | 2,33     | 54,9                 | 56       |
| 60          | 0,5                        | 0,42 | 5,4      | 5,49 | 0,46              | 5,45     | 56,6                 | 53,9     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,5              | 1,5      | 0,0252 | 0,0073                        | 0,1687   | 0,1760                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,4451           | 1,444    | 0,0252 | 0,0324                        | 0,3867   | 0,4192                              |

Tabela 73 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para P = 5,38 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 4

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |     |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|-----|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |     | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 1,11                       | 1,1 | 5,69     | 5,53 | 1,11              | 5,61     | 55,9                 | 53,1     |
| 60          | 2,11                       | 2,1 | 8,1      | 8,11 | 2,11              | 8,11     | 52,8                 | 54,5     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,3885           | 1,3901   | 0,0252 | 0,0742                        | 0,3773   | 0,4516                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,3326           | 1,337    | 0,0252 | 0,1387                        | 0,5387   | 0,6774                              |

Tabela 74 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para P = 7,15 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 4

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |      |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|------|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |      | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 0,39                       | 0,4  | 2,25     | 2    | 0,40              | 2,13     | 54,3                 | 53,7     |
| 60          | 0,59                       | 0,80 | 3,1      | 2,97 | 0,70              | 3,04     | 54                   | 56,1     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,2798           | 1,2825   | 0,0252 | 0,0245                        | 0,1319   | 0,1563                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,2255           | 1,2288   | 0,0252 | 0,0422                        | 0,1860   | 0,2282                              |

Tabela 75 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para P = 2,07 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 5

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |       |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|-------|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |       | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 0,02                       | 0,025 | 1,02     | 0,7  | 0,02              | 0,86     | 54,6                 | 51,7     |
| 60          | 0,05                       | 0,065 | 2        | 1,48 | 0,06              | 1,74     | 51,2                 | 54,4     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,283            | 1,2902   | 0,0252 | 0,0014                        | 0,0537   | 0,0551                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,2284           | 1,2385   | 0,0252 | 0,0035                        | 0,1064   | 0,1099                              |

Tabela 76 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para P = 5,38 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 5

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |      |          |     | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|------|----------|-----|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |      | Frasco 2 |     | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 0,07                       | 0,04 | 0,8      | 1   | 0,06              | 0,90     | 52,2                 | 52,5     |
| 60          | 0,08                       | 0,07 | 1,2      | 1,6 | 0,07              | 1,40     | 52,6                 | 52,1     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,3878           | 1,3948   | 0,0252 | 0,0037                        | 0,0607   | 0,0644                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,3356           | 1,3423   | 0,0252 | 0,0048                        | 0,0932   | 0,0980                              |

Tabela 77 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para P = 7,15 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 5

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |      |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|------|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |      | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 0,03                       | 0,03 | 3,4      | 3,05 | 0,03              | 3,23     | 57,8                 | 53,9     |
| 60          | 0,05                       | 0,07 | 4        | 3,9  | 0,06              | 3,95     | 54,4                 | 51,3     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,5              | 1,5      | 0,0252 | 0,0022                        | 0,2341   | 0,2362                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,4422           | 1,4461   | 0,0252 | 0,0043                        | 0,2848   | 0,2891                              |

Tabela 78 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para P = 2,07 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 6

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |     |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|-----|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |     | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 0,71                       | 0,8 | 1,32     | 1,29 | 0,76              | 1,31     | 52,9                 | 55,6     |
| 60          | 1,63                       | 1,7 | 2,93     | 3,3  | 1,67              | 3,12     | 53,1                 | 53,9     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,2901           | 1,286    | 0,0252 | 0,0471                        | 0,0812   | 0,1283                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,2372           | 1,2304   | 0,0252 | 0,1016                        | 0,1890   | 0,2906                              |

Tabela 79 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para P = 5,38 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 6

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |      |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|------|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |      | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 0,85                       | 0,95 | 4,9      | 3,22 | 0,90              | 4,06     | 52,2                 | 52,5     |
| 60          | 1,70                       | 1,60 | 6,78     | 6,01 | 1,65              | 6,40     | 52,6                 | 52,1     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,3949           | 1,3906   | 0,0252 | 0,0607                        | 0,2732   | 0,3339                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,3427           | 1,3381   | 0,0252 | 0,1095                        | 0,4243   | 0,5338                              |

Tabela 80 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para P = 7,15 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 6

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |      |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|------|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |      | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 0,71                       | 1,18 | 5,61     | 5,61 | 0,95              | 5,61     | 52                   | 53,4     |
| 60          | 1,60                       | 1,60 | 9        | 9,9  | 1,60              | 9,45     | 53,1                 | 56       |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,5              | 1,5      | 0,0252 | 0,0686                        | 0,4072   | 0,4757                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,448            | 1,4466   | 0,0252 | 0,1145                        | 0,6759   | 0,7904                              |

Tabela 81 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para  $P = 2,07 \text{ gO}_3/\text{h}$  – Amostra 7

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |      |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|------|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |      | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 0,21                       | 0,25 | 2        | 1,95 | 0,23              | 1,98     | 53,9                 | 51,6     |
| 60          | 1,16                       | 1,21 | 2,79     | 2,82 | 1,19              | 2,81     | 54,1                 | 55,8     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,5              | 1,5      | 0,0252 | 0,0167                        | 0,1433   | 0,1600                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,4461           | 1,4484   | 0,0252 | 0,0835                        | 0,2015   | 0,2850                              |

Tabela 82 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para  $P = 5,38 \text{ gO}_3/\text{h}$  – Amostra 7

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |      |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|------|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |      | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 0,02                       | 0,08 | 0,4      | 0,53 | 0,05              | 0,47     | 57,5                 | 57,7     |
| 60          | 0,05                       | 0,11 | 0,65     | 0,61 | 0,08              | 0,63     | 51,2                 | 55,5     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,3879           | 1,3914   | 0,0252 | 0,0034                        | 0,0313   | 0,0347                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,3304           | 1,3337   | 0,0252 | 0,0053                        | 0,0420   | 0,0472                              |

Tabela 83 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para  $P = 7,15 \text{ gO}_3/\text{h}$  – Amostra 7

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |      |          |       | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|------|----------|-------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |      | Frasco 2 |       | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 0,58                       | 0,52 | 7,74     | 7,61  | 0,55              | 7,68     | 55,1                 | 53,4     |
| 60          | 0,78                       | 0,73 | 10,6     | 10,49 | 0,76              | 10,55    | 57                   | 55,2     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,5              | 1,5      | 0,0252 | 0,0399                        | 0,5570   | 0,5969                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,4449           | 1,4466   | 0,0252 | 0,0542                        | 0,7579   | 0,8121                              |

Tabela 84 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para  $P = 2,07 \text{ gO}_3/\text{h}$  – Amostra 8

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |      |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|------|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |      | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 2,22                       | 2,3  | 0,01     | 0,01 | 2,26              | 0,01     | 53,3                 | 55,6     |
| 60          | 3,15                       | 3,27 | 0,02     | 0,02 | 3,21              | 0,02     | 52,5                 | 59,9     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,5              | 1,5      | 0,0267 | 0,1738                        | 0,0008   | 0,1746                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,4467           | 1,4444   | 0,0267 | 0,2442                        | 0,0015   | 0,2457                              |

Tabela 85 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para  $P = 5,38 \text{ gO}_3/\text{h}$  – Amostra 8

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |      |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|------|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |      | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 0,91                       | 0,82 | 1        | 1,06 | 0,87              | 1,03     | 52                   | 62,3     |
| 60          | 1,05                       | 1,17 | 1,3      | 1,25 | 1,11              | 1,28     | 51,7                 | 54,2     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,3915           | 1,3909   | 0,0267 | 0,0617                        | 0,0734   | 0,1351                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,3395           | 1,3286   | 0,0267 | 0,0785                        | 0,0901   | 0,1687                              |

Tabela 86 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para  $P = 7,15 \text{ gO}_3/\text{h}$  – Amostra 8

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |      |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|------|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |      | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 1,18                       | 1,3  | 2,1      | 2,12 | 1,24              | 2,11     | 54,8                 | 56,6     |
| 60          | 1,70                       | 1,63 | 2,7      | 2,67 | 1,67              | 2,69     | 53,7                 | 52,5     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,5              | 1,5      | 0,0267 | 0,0954                        | 0,1623   | 0,2576                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,4452           | 1,4434   | 0,0267 | 0,1268                        | 0,2048   | 0,3316                              |



Tabela 87 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para P = 2,07 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 9

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |      |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|------|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |      | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 0,05                       | 0,02 | 1,26     | 0,95 | 0,04              | 1,11     | 54,3                 | 53,3     |
| 60          | 0,67                       | 0,71 | 1,43     | 1,33 | 0,69              | 1,38     | 50,6                 | 51,1     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,2862           | 1,2882   | 0,0267 | 0,0023                        | 0,0730   | 0,0753                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,2319           | 1,2349   | 0,0267 | 0,0437                        | 0,0904   | 0,1341                              |

Tabela 88 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para P = 5,38 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 9

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |      |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|------|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |      | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 1,09                       | 1,19 | 0,98     | 0,87 | 1,14              | 0,93     | 53,3                 | 53,5     |
| 60          | 1,44                       | 1,46 | 1,25     | 1,3  | 1,45              | 1,28     | 52,9                 | 53,8     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,3924           | 1,3955   | 0,0267 | 0,0814                        | 0,0662   | 0,1475                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,3391           | 1,342    | 0,0267 | 0,1027                        | 0,0903   | 0,1929                              |

Tabela 89 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para P = 7,15 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 9

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |      |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|------|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |      | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 1,6                        | 1,5  | 1,51     | 1,5  | 1,55              | 1,51     | 52,7                 | 52,6     |
| 60          | 1,71                       | 1,73 | 2,32     | 2,35 | 1,72              | 2,34     | 54,9                 | 51,9     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,5              | 1,5      | 0,0267 | 0,1192                        | 0,1157   | 0,2349                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,4473           | 1,4474   | 0,0267 | 0,1318                        | 0,1773   | 0,3091                              |

Tabela 90 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para P = 2,07 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 10

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |      |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|------|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |      | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 2,31                       | 2,22 | 0,11     | 0,13 | 2,27              | 0,12     | 50,9                 | 55,3     |
| 60          | 2,9                        | 2,9  | 0,12     | 0,16 | 2,90              | 0,14     | 51,4                 | 55,3     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,5              | 1,5      | 0,0267 | 0,1742                        | 0,0092   | 0,1834                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,4491           | 1,4447   | 0,0267 | 0,2213                        | 0,0107   | 0,2321                              |

Tabela 91 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para P = 5,38 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 10

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |      |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|------|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |      | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 0,62                       | 0,54 | 1,68     | 1,62 | 0,58              | 1,65     | 51,2                 | 51,5     |
| 60          | 1,10                       | 0,95 | 2,21     | 2,06 | 1,03              | 2,14     | 53,1                 | 51,2     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,3977           | 1,3894   | 0,0267 | 0,0416                        | 0,1175   | 0,1591                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,3465           | 1,3379   | 0,0267 | 0,0723                        | 0,1508   | 0,2231                              |

Tabela 92 - Resultados experimentais referentes ao excesso de gás (*off-gas*) encaminhado para os frascos lavadores para P = 7,15 gO<sub>3</sub>/h – Amostra 10

| Tempo (min) | Volume de Tiossulfato (ml) |      |          |      | $\Delta V_t$ (ml) |          | Volume retirado (ml) |          |
|-------------|----------------------------|------|----------|------|-------------------|----------|----------------------|----------|
|             | Frasco 1                   |      | Frasco 2 |      | Frasco 1          | Frasco 2 | Frasco 1             | Frasco 2 |
| 30          | 0,35                       | 0,47 | 0,78     | 0,88 | 0,41              | 0,83     | 51,2                 | 51,5     |
| 60          | 0,54                       | 0,57 | 1,37     | 1,33 | 0,56              | 1,35     | 53,1                 | 51,2     |

| Tempo (min) | Volume titulação (ml) |          | Volume de KI (L) |          | N      | Off-gas (g O <sub>3</sub> /h) |          | Off-gas total (g O <sub>3</sub> /h) |
|-------------|-----------------------|----------|------------------|----------|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|
|             | Frasco 1              | Frasco 2 | Frasco 1         | Frasco 2 |        | Frasco 1                      | Frasco 2 |                                     |
| 30          | 25                    | 25       | 1,5              | 1,5      | 0,0267 | 0,0315                        | 0,0638   | 0,0954                              |
| 60          | 25                    | 25       | 1,4488           | 1,4485   | 0,0267 | 0,0423                        | 0,1024   | 0,1447                              |

Tabela 93 – Balanço de massa de ozônio para  $P = 2,07 \text{ gO}_3/\text{h}$ 

| <b>Tempo de contato (min)</b> | <b>Ozônio aplicado (g O<sub>3</sub>)</b> | <b>Off-gas (g O<sub>3</sub>)</b> | <b>Ozônio consumido (g O<sub>3</sub>)</b> |
|-------------------------------|--|----------------------------------|---|
| 0                             | 0,00                                     | 0,00                             | 0,00                                      |
| 30                            | 1,04                                     | 0,13                             | 0,91                                      |
| 60                            | 2,07                                     | 0,24                             | 1,83                                      |

Tabela 94 - Balanço de massa de ozônio para  $P = 5,38 \text{ gO}_3/\text{h}$ 

| <b>Tempo de contato (min)</b> | <b>Ozônio aplicado (g O<sub>3</sub>)</b> | <b>Off-gas (g O<sub>3</sub>)</b> | <b>Ozônio consumido (g O<sub>3</sub>)</b> |
|-------------------------------|--|----------------------------------|---|
| 0                             | 0,00                                     | 0,00                             | 0,00                                      |
| 30                            | 2,69                                     | 0,23                             | 2,46                                      |
| 60                            | 5,38                                     | 0,33                             | 5,05                                      |

Tabela 95 - Balanço de massa de ozônio para  $P = 7,15 \text{ gO}_3/\text{h}$ 

| <b>Tempo de contato (min)</b> | <b>Ozônio aplicado (g O<sub>3</sub>)</b> | <b>Off-gas (g O<sub>3</sub>)</b> | <b>Ozônio consumido (g O<sub>3</sub>)</b> |
|-------------------------------|--|----------------------------------|---|
| 0                             | 0,00                                     | 0,00                             | 0,00                                      |
| 30                            | 3,58                                     | 0,38                             | 3,19                                      |
| 60                            | 7,15                                     | 0,52                             | 6,63                                      |