



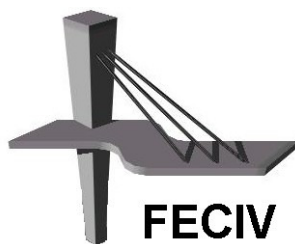
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA DA
ATIVIDADE AUTOMOTIVA POR OZONIZAÇÃO
CONVENCIONAL E CATALÍTICA**

LUCIENE OLIVEIRA DE PAULA

UBERLÂNDIA, 15 DE JULHO DE 2014



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



Luciene Oliveira de Paula

**TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA DA ATIVIDADE
AUTOMOTIVA POR OZONIZAÇÃO CONVENCIONAL E
CATALÍTICA**

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. Marcio Ricardo Salla

Uberlândia, 15 de julho de 2014



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



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

ATA Nº: 129/2014

CANDIDATA: Luciene Oliveira de Paula

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcio Ricardo Salla

TÍTULO: "Tratamento de água residuária da atividade automotiva por ozonização convencional e catalítica"

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia Urbana

LINHA DE PESQUISA: Planejamento e Infraestrutura Urbana

DATA DA DEFESA: 15 de julho de 2014

LOCAL: Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa

HORÁRIO DE INÍCIO E TÉRMINO DA DEFESA: INÍCIO: 14:00hs / TÉRMINO: 16:10hs

Após avaliação do documento escrito, da exposição oral e das respostas às arguições, os membros da Banca Examinadora decidem que a candidata foi:

☒ APROVADA

☐ REPROVADA

OBS:

Atender as sugestões da Banca Examinadora

Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata que está assinada pelos membros da Banca:

Professor Orientador: **Prof. Dr. Marcio Ricardo Salla - FECIV/UFU**

Membro externo: **Prof. Dr. Leonardo Vieira Soares - DECA/UFPB**

Membro: **Profª. Drª. Sueli Moura Bertolino - ICIAG/UFU**

Uberlândia, 15 de julho de 2014.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho em especial para minha mãe Telma, para meu pai Denilson, meus irmãos Cristiane e Rafael, ao meu noivo Gustavo, aos meus amigos e a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização do meu trabalho de mestrado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar forças para alcançar meus objetivos e sonhos, me amparar e me confortar nos momentos difíceis.

Ao meu orientador, Prof. Marcio Ricardo Salla, pelo apoio, dedicação e disponibilidade demonstrada ao longo do trabalho. Agradeço todas as sugestões, as críticas, os elogios e o incentivo para fazer sempre mais e melhor e a ajuda incansável que me deu nos últimos dias de escrita da dissertação.

Ao Prof. Carlos Eugênio por estar sempre solícito e pronto para ajudar. Aos funcionários da FECIV e especialmente à Marianny e ao Josildo, muito obrigada pela presteza em ajudar.

Aos alunos Hélio, Geraldo, Raphael Gomes e Rafael Silva pela participação nas coletas do efluente.

Ao Marcos Peixoto pelo apoio e intermediação junto à empresa de transportes de passageiros, onde foi coletado o efluente e aos funcionários dessa empresa Élcio e Vinícius pela colaboração.

Ao Prof. Cesar Augusto Garcia, da Faculdade de Medicina Veterinária da Universidade Federal de Uberlândia, agradeço pela presteza e disposição em ajudar.

À Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós Graduação da UFU, pelo auxílio financeiro concedido em uma das etapas da pesquisa.

Agradeço a CAPES pelo apoio financeiro.

Às minhas queridas companheiras de mestrado, Aline Martins e Alice Dalmônica, que se tornaram minhas grandes amigas, agradeço de pela amizade, o companheirismo, a ajuda, as conversas, os desabafos, e todos os bons momentos que passamos juntas. Com vocês por perto a caminhada até aqui se tornou mais fácil e mais leve.

Obrigada a minha amiga Aila Rios, pessoa muito querida que sempre me incentivou e apoiou. Agradeço também a minha grande amiga Fernanda.

A minha amiga Amara Amaral agradeço muito pela força, compreensão, apoio e por acreditar em mim.

Embora a minha família saiba que os amo e sou eternamente grata por tudo o que fazem por mim, não poderia deixar de citar a minha Mãe, Telma, o meu Pai, Denilson e meus irmãos Cristiane e Rafael, que certamente se orgulham de me verem chegar ao fim desta etapa.

Finalmente, ao Gustavo, meu noivo e futuro marido, a pessoa com quem eu partilho tudo (o que inclui os melhores e os piores momentos) agradeço o amor, o apoio incondicional e por fazer de mim uma pessoa melhor.

“Se mantivermos os olhos e os ouvidos bem abertos para o mundo notável em que vivemos, descobriremos sempre alguma coisa pela primeira vez.”

(Jostein Gaarder)

PAULA, L. O. **Tratamento de água residuária da atividade automotiva por ozonização convencional e catalítica**. 2014. 117p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2014.

RESUMO

A lavagem de veículos é uma atividade que utiliza elevados volumes de água e gera efluentes, que possuem turbidez, demanda química de oxigênio (DQO), cor, além da presença de surfactantes e óleos e graxas elevados, que lhe conferem alto potencial poluidor. Assim, a potencialidade do processo de ozonização convencional e catalítica para o tratamento das águas residuárias da lavagem de veículos foi avaliada, levando-se em conta principalmente o aumento da biodegradabilidade dos compostos orgânicos presentes. Para tal, estudou-se o efeito da ozonização convencional em relação aos parâmetros cor verdadeira, turbidez, alcalinidade e DQO, para diferentes valores de pH. Também estudou-se a ozonização catalítica, com adição de carvão ativado no meio reacional. Ainda, a fim de se avaliar a real oxidação da matéria orgânica ocorrida durante o processo de ozonização, foram realizados estudos de arraste de gases voláteis por meio do borbulhamento de ar comprimido e oxigênio puro, constatando-se proporções mínimas de arraste. O processo de ozonização convencional apresentou-se eficiente principalmente na descoloração do efluente, entretanto, utilizando-se apenas o ozônio não ocorre elevado grau de mineralização do efluente, evidenciado pela baixa redução do parâmetro DQO. Com a adição de carvão ativado, as eficiências de remoções aumentaram para todos os parâmetros analisados. Tal situação permite concluir que o carvão ativado foi capaz de catalisar a decomposição do ozônio molecular em espécies altamente reativas na fase aquosa, como o radical hidroxila, assim como atuar como adsorvente no processo.

Palavras-chave: Ozônio – Carvão Ativado – Água residuária da atividade automotiva

PAULA, L. O. **Wastewater treatment of the automotive activity by conventional and catalytic ozonation**. 2014. 117p. MSc Dissertation, School of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2014.

ABSTRACT

The car wash is an activity that uses large volumes of water and generates effluents which have turbidity, chemical oxygen demand (COD), color and the presence of surfactants and oils and greases high, giving it high potential as a pollutant. In this context, the potential of the process of conventional and catalytic ozonation for residual water treatment of vehicle washing was evaluated taking into account mainly the increase of the biodegradability of organic compounds. For this purpose, we assessed conventional ozonation effects on the following parameters: true color, turbidity, alkalinity and COD, for different values of pH. Catalytic ozonation was also evaluated in respect to the addition of activated carbon in reaction medium. In order to evaluate the actual oxidation of organic matter that occurred during the process of ozonation, studies of stripping of volatile gases through the bubbling compressed air and pure oxygen were performed using minimum stripping. Conventional ozonation was effective especially on effluent discoloration, however, when only ozone was applied into the process it did not reach a high effluent mineralization degree, which was evidenced by low reduction of COD parameter. Activated carbon addition increased the removals efficiencies for all parameters analyzed. This fact allows us to conclude that activated carbon was able to catalyze the decomposition of molecular ozone in highly reactive species in the aqueous phase, as the hydroxyl radical, as well as acting as adsorbent in the process.

Keywords: Ozone - Activated Carbon - Wastewater of the automotive activity

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

SÍMBOLOS

NH_3	Amônia gasosa
HCO_3^-	Bicarbonato
CO_3^{2-}	Carbonato
$CaCO_3$	Carbonato de cálcio
cv	Cavalo-vapor
cm^2	Centímetro quadrado
e^-	Elétron
<i>E.coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
ETA	Estação de tratamento de água
CO_2	Gás carbônico
g/h	Grama por hora
g/L.h	Grama por litro por hora
NH_4OH	Hidróxido de amônio
OH^-	Hidroxila
h	Hora
H_2S	Sulfeto de hidrogênio
NH_4^+	Íon amônio
H^+	Íon hidrogênio
L	Litro
L/h	Litro por hora
L/min	Litro por minuto
log	Logaritmo
m	Metro
$\mu g/L$	Micrograma por litro
μm	Micrômetro
mg/L	Miligrama por litro
mg/L.min	Miligrama por litro por minuto
mL	Mililitro

mm	Milímetro
min	Minutos
R	Moléculas orgânicas
O_2^*	Molécula de oxigênio excitada
ng/L	Nanograma por litro
nm	Nanômetro
N	Nitrogênio
O	Oxigênio
O_2	Oxigênio molecular
O_3	Ozônio molecular
H_2O_2	Peróxido de hidrogênio
Pt-Co	Platina-Cobalto
%	Porcentagem
E°	Potencial de oxidação
KV	Quilovolt
$CO_3^{\cdot-}$	Radical carbonato
$\cdot OH$	Radical hidroxila / Hidroxila radicalar
$\cdot O_2^-$	Radical hiperóxido
s^{-1}	Segundo a menos um / Por segundo
uT	Unidade de turbidez
UFC	Unidade formadora de colônia
uH	Unidade Hazen
UNT	Unidade Nefelométrica de Turbidez
V	Volt
Q	Vazão

SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APHA	American Public Health Association
CA	Carvão Ativado
CERH	Conselho Estadual de Recursos Hídricos
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente

COT	Carbono Orgânico Total
CRQ	Conselho Regional de Química
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Efluente
EPA	Environmental Protection Agency
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MG	Minas Gerais
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
ppm	Parte por Milhão
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
pH	Potencial Hidrogeniônico
POA	Processos Oxidativos Avançados
SAO	Separador água e óleo
SDO	Sistema de drenagem oleosa
UV	Ultravioleta
UV-VIS	Ultravioleta-Visível

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema do processo Corona para geração de ozônio	30
Figura 2 - Comportamento da fase líquida em escoamento descontínuo	46
Figura 3 – Tipos de fluxo ascensional das bolhas	47
Figura 4 – Imagem do sistema de tratamento do efluente gerado na lavagem de veículos da empresa	51
Figura 5 – Aparato experimental	53
Figura 6 – Difusor de ar microporoso utilizado	54
Figura 7 – Rotâmetro utilizado	54
Figura 8 – Equipamento gerador de ozônio utilizado	55
Figura 9 – Excesso de espuma formado durante a execução dos experimento iniciais.....	56
Figura 10 – Ventoinha instalada junto ao topo da coluna.....	56
Figura 11 – Borbulhamento de ar comprimido no efluente e amostras coletadas após o ensaio	58
Figura 12 – Eficiência de redução (em %) de: 1) Cor verdadeira, 2) Turbidez, 3)DQO e 4) Alcalinidade, para os níveis líquidos: a) 0,5 m, b) 1,0 m e c) 1,5 m, pelo borbulhamento de ar comprimido	65
Figura 13 – Eficiência de redução (em %) de: 1) Cor verdadeira, 2) Turbidez, 3)DQO e 4) Alcalinidade, para os níveis líquidos: a) 0,5 m, b) 1,0 m e c) 1,5 m, pelo borbulhamento oxigênio puro.....	71
Figura 14 – Amostras de efluente coletadas ao longo do tempo de contato	73

Figura 15 – Eficiência de redução (em %) de: (a) Cor verdadeira, (b) Turbidez, (c) DQO e (d) Alcalinidade, a partir da ozonização convencional	74
Figura 16 – Eficiência de redução (em %) de: (a) Cor verdadeira, (b) Turbidez, (c) DQO total e (d) DQO filtrada, para ozonização com adição de CA 1g/L e 2g/L, em pH <i>in natura</i> , pH 3 e comparativo sem adição de CA.....	80
Figura 17 – Eficiência de redução (em %) de alcalinidade, para ozonização com adição de CA 1g/L e 2g/L, em pH <i>in natura</i> e comparativo sem adição de CA	81
Figura 18 – Espectro de varredura (200 – 750 nm), - pH <i>in natura</i> – Ensaio 1, 2 e 3.....	83
Figura 19 – Espectro de varredura (200 – 750 nm) - pH 3 – Ensaio 1, 2 e 3.	84
Figura 20 – Espectro de varredura (200 – 750 nm) - pH 10 – Ensaio 1, 2 e 3.	85
Figura 21 – Espectro de varredura (200 – 750 nm) – Ozônio sem CA - pH <i>in natura</i>	88
Figura 22 – Espectro de varredura (200 – 750 nm) – Ozônio + CA 1g/L - pH <i>in natura</i>	88
Figura 23 – Espectro de varredura (200 – 750 nm) – Ozônio + CA 2g/L - pH <i>in natura</i>	89
Figura 24 - Espectro de varredura (200 a 750 nm) - Ozônio + CA 1 g/L - pH 3.....	89
Figura 25 – Espectro de varredura (200 – 750 nm) – Ozônio + CA 2g/L - pH 3.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características de efluentes de lavagem de veículos.....	22
Tabela 2 – Resumo de trabalhos encontrados na literatura sobre o tratamento de efluentes de lavagem de veículos.....	24
Tabela 3 – Potencial de oxidação de alguns oxidantes em água	29
Tabela 4 – Porcentagem removida de diferentes fármacos em solução aquosa.....	37
Tabela 5 – Datas das coletas e ensaios realizados	51
Tabela 6 – Configurações analisadas para o arraste de gases	57
Tabela 7 – Configurações analisadas para a ozonização convencional.....	59
Tabela 8 – Configurações analisadas para a ozonização catalisada por carvão ativado.....	59
Tabela 9 – Características físico-químicas do efluente bruto, antes do borbulhamento de ar comprimido.	64
Tabela 10 – Eficiência de redução para os parâmetros cor verdadeira, turbidez, DQO e alcalinidade, a partir do borbulhamento de ar comprimido	64
Tabela 11 – Características físico-químicas do efluente bruto, antes do borbulhamento de oxigênio puro.....	69
Tabela 12 – Eficiência de redução para os parâmetros cor verdadeira, turbidez, DQO e alcalinidade, a partir do borbulhamento de oxigênio puro.....	69
Tabela 13 – Características físico-químicas do efluente bruto, antes do ensaio de ozonização convencional.....	73
Tabela 14 – Eficiência de redução da cor verdadeira, turbidez, DQO e alcalinidade, a partir da ozonização convencional	74

Tabela 15 – Características físico-químicas do efluente bruto, antes da ozonização catalisada por carvão ativado..... 78

Tabela 16 – Eficiência de redução para os parâmetros cor verdadeira, turbidez, alcalinidade, DQO bruta e Filtrada, para ozonização com adição de CA 1g/L e 2g/L, em pH *in natura* e pH 3 e comparativo sem adição de CA..... 78

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	18
1.1 APRESENTAÇÃO	18
1.2 JUSTIFICATIVA	19
1.3 OBJETIVOS	20
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 EFLUENTE GERADO NA LAVAGEM DE VEÍCULOS	21
2.2 LEGISLAÇÕES E NORMAS SOBRE O TEMA	25
2.3 OZONIZAÇÃO	27
2.3.1 Oxidação Química	28
2.3.2 Princípios para Formação do Ozônio	29
2.3.3 Reatividade do Ozônio	30
2.3.4 Ozônio no Tratamento de Água para Consumo Humano	33
2.3.5 Ozônio no Tratamento de Lixiviados e de Esgoto Doméstico	34
2.3.6 Ozônio no Tratamento de Esgoto Industrial	36
2.3.7 Ozonização Catalítica	40
2.3.8 Ozonização Catalisada por Carvão Ativado	41
2.4 ARRASTE DE GASES	44
2.5 HIDRODINÂMICA EM COLUNA	46
METODOLOGIA	50
3.1 CONSIDERAÇÃO SOBRE A EMPRESA	50
3.2 COLETAS DE AMOSTRAS	51
3.3 COLUNA DE AERAÇÃO	52
3.4 OZONIZADOR	55
3.5 CONFIGURAÇÕES DOS ENSAIOS	55
3.5.1 ARRASTE DE GASES	57
3.5.2 OZONIZAÇÃO CONVENCIONAL	58
3.5.3 OZONIZAÇÃO CATALISADA POR CARVÃO ATIVADO	59
3.5.4 PARÂMETROS ANALISADOS	60
RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1 ARRASTE DE GASES – AR COMPRIMIDO	63
4.2 ARRASTE DE GASES – OXIGÊNIO PURO	68
4.3 OZONIZAÇÃO CONVENCIONAL	72
4.4 OZONIZAÇÃO CATALISADA POR CARVÃO ATIVADO	77
4.5 ESPECTRO DE VARREDURA UV-VIS	83
4.5.1 OZONIZAÇÃO CONVECIONAL	83
4.5.2 OZONIZAÇÃO CATALISADA POR CARVÃO ATIVADO	87
CONCLUSÕES	92
RECOMENDAÇÕES	95
REFERÊNCIAS	96
APÊNDICE A	109
APÊNDICE B	112
APÊNDICE C	115
APÊNDICE D	117

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Nos últimos anos verificou-se um crescimento acentuado no número de automóveis, principalmente os carros populares, incentivado em grande proporção por políticas fiscais de incentivo à indústria automobilística (SILVA, 2012).

No Brasil, segundo dados do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN), até o final de 2002 havia cerca de 35 milhões de veículos e em abril de 2014 esse número já havia ultrapassado 83 milhões de veículos, fazendo com que os impactos ambientais negativos provenientes dos processos de manutenção e lavagem aumentem consideravelmente.

As atividades automotivas estão presentes em vários estabelecimentos dos setores de comércio e prestação de serviço, que lidam com veículos automotivos de uma forma geral, sejam estes de características leves, como carros de passeio e motos, ou de características pesadas, como caminhões e ônibus.

A lavagem de veículos é uma atividade realizada, principalmente, nos setores urbanos e industriais, em empresas de transporte de passageiros e cargas (especialmente empresas de ônibus), lava rápidos comerciais, postos de combustíveis, empresas rurais que possuem frota de veículos e empresas de logísticas.

Os efluentes líquidos dessas atividades estão contaminados, principalmente, por óleos, graxas, surfactantes, alta concentração de matéria orgânica, material argiloso em suspensão, metais pesados e sólidos totais suspensos e recebem, na maioria dos casos, apenas o tratamento preliminar antes de ser lançado na rede coletora de esgoto da cidade. Isso ocasiona o aumento de carga poluidora, principalmente orgânica de difícil biodegradação, enviada aos sistemas convencionais de tratamento de efluente administrados pelos municípios.

O óleo e outros derivados de petróleo, contidos neste tipo de efluente, possuem substâncias recalcitrantes para o meio ambiente, apresentam elevado potencial de toxicidade e de bioacumulação, podendo causar vários danos ecológicos, afetando indiretamente a saúde humana.

O descarte de efluente sem tratamento prévio adequado tem se tornado uma preocupação dos órgãos ambientais, governos, indústrias e sociedade pública, devido a maior conscientização destes com relação às questões ambientais.

1.2 JUSTIFICATIVA

A lavagem de veículos é uma atividade com utilização de elevados volumes de água e geração de efluentes. Esse efluente possui características, como elevada turbidez, DQO, cor, presença de surfactantes, óleos e graxas conferindo ao mesmo alto potencial poluidor. Como recebem, geralmente, apenas tratamento primário, sendo a única exigência legal dos órgãos ambientais a presença de caixa separadora de água e óleo, não atingem os parâmetros de emissão ou condições necessárias para um possível reuso.

Sabe-se que o processo de ozonização tem sido amplamente utilizado no tratamento de água potável para a desinfecção em todo o mundo. Também apresenta potencialidade no tratamento de efluentes domésticos (SILVA, 2008; SOARES, 2007; SALLA, 2006; RODRIGUES, 2004; COSTA, 2003; BILOTTA, 2006, entre outros) e industrial (KERN, 2012, KRAUSE, 2009; SOUZA, 2009; ASSALIN *et al.*, 2006; SILVA, 2006). Contudo, não há na literatura referência destes estudos em efluente advindo da atividade automotiva.

A falta de estudos relacionados ao tratamento de efluente da atividade automotiva por ozonização convencional e catalítica, e a influência do arraste de compostos orgânicos voláteis no processo de borbulhamento das bolhas de ozônio é que motivaram o presente estudo.

Neste trabalho, a potencialidade do processo de ozonização convencional e catalítica para o tratamento das águas residuárias da lavagem de veículos foi avaliada, levando-se em conta principalmente o aumento da biodegradabilidade dos compostos presentes no efluente para possível descarte.

1.3 OBJETIVOS

Este estudo teve como objetivo geral avaliar a capacidade oxidativa da ozonização convencional e catalítica em efluente advindo da atividade automotiva.

Importa salientar que, ao se avaliar o processo de ozonização no efluente é relevante considerar o arraste de gás (*gas stripping*) existente, para verificar a ocorrência da transferência da parcela volátil da matéria orgânica para o interior das bolhas e sua consequente eliminação na atmosfera, visando-se avaliar a real oxidação da matéria orgânica ocorrida durante o processo de ozonização.

Foram consideradas, como objetivos específicos, as atividades independentes mencionadas a seguir:

- Avaliar a parcela de remoção de matéria orgânica volátil por meio do borbulhamento de ar comprimido e oxigênio puro, como gases inertes ou de baixa capacidade de oxidação. Este estudo é justificado pela ocorrência acentuada de *stripping* no pós-tratamento de efluente doméstico observado por Salla (2006);
- Avaliar a capacidade oxidativa do ozônio convencional e ozônio na presença de carvão ativado como catalisador, para diferentes valores de pH, utilizando cor verdadeira, turbidez, demanda química de oxigênio (DQO) e alcalinidade como parâmetros de análise;

De uma forma geral, as atividades a serem realizadas permitirão investigar a real oxidação da matéria orgânica ocorrida no processo ozonização por meio da avaliação de resultados da técnica de arraste de gases e ozonização.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica realizada engloba as principais vertentes sobre o tema estudado, tais como: caracterização dos efluentes gerados na lavagem de veículos, legislações e normas sobre o tema, arraste de gases, hidrodinâmica em coluna, ozonização convencional e catalítica e suas aplicações no tratamento de água para consumo humano, de efluentes doméstico e industrial.

2.1 EFLUENTE GERADO NA LAVAGEM DE VEÍCULOS

As principais características do efluente de lavagem de veículos e seus principais poluentes são reportados na literatura, destacando principalmente os óleos e graxas, areias, sólidos suspensos, surfactantes e carga orgânica (TEIXEIRA, 2003; HAMADA e MIYAZAKI, 2004; MAGALHÃES, 2005; CARISSIMI, 2007; RUBIO e ZANETI, 2009). Alguns fatores são importantes em relação às características destes efluentes, tais como: poluentes impregnados na superfície dos veículos; produtos químicos utilizados e quantidade de água utilizada na lavagem; tipo de veículo (carro, ônibus, caminhão, entre outros) e efeitos sazonais climáticos (ETCHEPARE, 2012).

Teixeira (2003) e Magalhães (2005) descreveram que os três principais sistemas de lavagem de veículos utilizados são do tipo: túnel, *rollover* e jato manual. Esses autores destacaram que o tipo de lavagem mais comum no Brasil é a jato manual. Na lavagem tipo túnel o veículo segue pelo interior de um equipamento em formato de túnel, passando por áreas de lavagem, com aplicação de detergentes, enxágue, enceramento e secagem, respectivamente. Na lavagem tipo *rollover* o automóvel permanece parado enquanto a máquina de lavagem se movimenta em seu entorno, sendo o equipamento dotado de escovas em formas cilíndricas que giram em torno de seu próprio eixo. No sistema de lavagem a jato manual é utilizada mangueira com jatos de alta pressão de ar e água, aplicação manual de xampus, desengraxantes e enxágue.

Magalhães (2005) e Etchepare (2012) reportaram em seus trabalhos os valores dos principais parâmetros e substâncias tóxicas que estão presentes em efluentes provenientes das diferentes tipologias de lavagem de veículos, conforme apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Características de efluentes de lavagem de veículos

Parâmetros	Túnel		<i>Rollover</i>		Lavagem manual	
	Média	Máxima	Média	Máxima	Média	Máxima
pH	8,7	9,0	7,7	7,7	7,4	8,3
DBO (mg/L)	42	147	20	132	69	220
DQO (mg/L)	178	517	135	254	238	1120
COT (mg/L)	31	169	31	173	79	160
SST (mg/L)	101	848	158	576	659	2970
Óleos e graxas (mg/L)	20	239	9,4	188	90	404
Fósforo (mg/L)	1,9	24	0,41	1,9	2,8	3,2

Fonte: Adaptado de Etchepare (2012).

Para Jonsson e Jonsson (1995), este efluente além de conter óleo, graxa, partículas de poeira, carbono e asfalto carregados da superfície do carro, pode conter fluido hidráulico e óleo proveniente do motor e sistema de freios. Sua composição é bastante complexa, constituindo uma fonte significativa de DQO.

Para Teixeira (2003), os detergentes constituem uma das maiores preocupações na remoção de poluentes deste tipo de água residuária, pelo fato de manifestar-se em altas concentrações e pela dificuldade de sua redução nas etapas de tratamento.

Esses efluentes muitas vezes são denominados como água oleosa, termo genérico usado para descrever todas as águas que apresentam quantidades variáveis de óleos, graxas e lubrificantes, além de uma variedade de outros materiais em suspensão, que podem incluir areia, terra, argila e outros, e uma gama de substâncias coloidais e dissolvidas, tais como detergentes, sais, metais pesados (ANNUNCIADO, 2005).

Segundo a ABNT NBR 14605 (2010), que dispõe sobre o sistema de drenagem oleosa, efluente oleoso são os resíduos oriundos das operações comumente realizadas em postos, tais como abastecimento de veículos, descarga de combustíveis, lavagem de veículos, troca de

óleo e serviços gerais que possam contribuir com resíduos oleosos. São efluentes caracterizados pela presença de hidrocarbonetos derivados do petróleo que, quando lançados no corpo receptor sem tratamento prévio, são responsáveis pela contaminação deste com benzeno, tolueno, xileno e etilbenzeno. Tais elementos são considerados cancerígenos e/ou tóxicos, capazes de causar diminuição da concentração de oxigênio dissolvido, podendo resultar na mortandade da biota aquática e/ou terrestre.

Os óleos minerais e sintéticos utilizados nos estabelecimentos automotivos compreendem, na sua grande maioria, óleos lubrificantes, silicone e óleos combustíveis, os quais também podem ser empregados para limpeza de peças, atuando como solventes na dissolução do resíduo oleoso impregnado nas superfícies das peças e veículos (SECRON *et al.*, 2010).

Os agentes desengraxantes tradicionalmente utilizados durante o processo de lavagem veicular são constituídos por derivados de petróleo e causam muitos prejuízos ao meio ambiente (SILVA, 2009).

Os inúmeros produtos de limpeza, solventes e combustíveis empregados na lavagem de veículos e limpeza de peças são denominados produtos coadjuvantes e não são retidos pelos Separadores Água e Óleo (SAO). Estes possuem características de emulsificação do óleo presente no efluente automotivo, reduzindo a eficiência de retenção nos SAO, além de possuir um potencial poluidor em função da presença de carga orgânica e compostos refratários (SECRON *et al.*, 2010).

As misturas água-óleo presentes nos efluentes oleosos se classificam em cinco formas:

- a) óleo livre – consiste em gotículas de óleo com diâmetro igual ou superior a 20 μm . Estas gotículas possuem pouca ou nenhuma água associada e, dessa forma, flutuam na superfície devido ao seu peso específico ser inferior ao da água. Este estado pode ser facilmente separado por um método de separação gravitacional (SAWAMURA, 1999);
- b) óleo fisicamente emulsionado - consiste na emulsão formada por gotículas de óleo com diâmetro variando entre 5 a 20 μm . Nesse caso, o óleo disperso na água se encontra sob uma forma estável. As emulsões mecânicas são formadas por ações de agitação causadas por bombeamento, operações de abertura e fechamento de válvula ou outras restrições ao fluxo. Também podem ser formadas por incidência direta de chuvas ou

jateamento de água diretamente na câmara de separação do SAO. Estas emulsões instáveis podem ser quebradas, mecânica ou quimicamente e, então, separadas da fase oleosa. Entretanto, as emulsões estáveis requerem um tratamento mais sofisticado para serem separadas (SAWAMURA, 1999);

- c) óleo quimicamente emulsificado – são emulsões formadas por gotículas de óleo com diâmetros inferiores a 5 μm . Normalmente, são formadas por meio do uso de detergentes, desengraxantes, solventes e produtos afins (ALTHER, 1995);
- d) óleo dissolvido – são as gotículas de óleo com diâmetros inferiores a 0,01 μm , que solubilizam-se na água (ALTHER, 1995);
- e) óleo adsorvido em partículas sólidas – consiste no óleo que adere ao material particulado e sedimenta devido à ação da força gravitacional. Nos sistemas separadores água e óleo, este tipo de óleo é removido como borra (ALTHER, 1995).

Alguns dos relevantes trabalhos encontrados na literatura sobre o tratamento de efluentes de lavagem de veículos estão apresentados na Tabela 2. Ressalta-se que não foram encontrados na literatura trabalhos reportando sobre o tratamento de efluente da lavagem de veículos utilizando a ozonização.

Tabela 2 – Resumo de trabalhos encontrados na literatura sobre o tratamento de efluentes de lavagem de veículos

Referência	Pesquisa Desenvolvida
Hamada e Miyazaki (2004)	<ul style="list-style-type: none"> - Escala: real; - Estudo: recuperação de água de lavagem de carros com ultrafiltração em membrana e auxílio de floculação e filtração em carvão ativado; - Principais resultados: DBO e DQO do efluente tratado entre 2,5 a 14 mg/L e 4 a 16 mg/L; valores de pH, concentrações de Na^+, Cl^-, SO_3^{3-}, condutividade elétrica e dureza similares a água potável; E. coli < 5 CFU/mL no efluente.
Magalhães (2005)	<ul style="list-style-type: none"> - Escala: piloto; - Estudo: sistema com biofiltros aerados submersos seguidos por flotação por ar dissolvido para o tratamento de efluentes de lavagem de caminhão; - Principais resultados: remoções próximas a 50% para a turbidez e DQO, mesmo sem o uso de coagulantes na entrada do sistema.

Caríssimo (2007)	<ul style="list-style-type: none">- Escala: piloto e bancada;- Estudo: unidade de floculação associada a um flotador ou sedimentador para o tratamento de águas e efluentes;- Principais resultados: concepção, desenvolvimento e aplicações de uma nova unidade de floculação helicoidal, denominada Reator Gerador de Flocos (RGF); redução de turbidez (95%), cor (80%) e sólidos suspensos (95%) no tratamento de efluentes de lavagem de ônibus (RGF + flotador), possibilitando o reuso da água na lavagem dos veículos.
Rubio e Zaneti (2009)	<ul style="list-style-type: none">- Escala: piloto;- Estudo: floculação-flotação em coluna (FFC) para tratamento de efluente de lavagem de ônibus;- Principais resultados: Desenvolvimento de processo de FFC para o tratamento e reuso de efluentes de lavagem de ônibus; alta taxa de aplicação (até 25 m/h) do sistema; alto potencial da tecnologia para reuso de água de lavagem de veículos.
Etchepare (2012)	<ul style="list-style-type: none">- Escala: bancada e piloto;- Estudo: Floculação-flotação em coluna, seguida de filtração em areia (FFC-A) e polimento com hipoclorito de sódio e adsorção em carvão ativado para o tratamento e reuso de água de um lava rápido comercial (LRC) e de efluentes de um posto de manutenção de locomotivas (PML);- Principais resultados: o processo no LRC apresentou baixa turbidez (8 NTU), entretanto, a mesma água apresentou uma alta contagem de coliformes totais e <i>E. coli</i>. Com a inclusão de etapa de cloração com hipoclorito de sódio o efluente apresentou alta clarificação, foi inodora e os coliformes totais e <i>E. coli</i>. foram (92 a 96%); para o PML houve redução dos principais parâmetros: turbidez (97%), SST (91%), DQO (76%), DBO (70%), óleos e graxas (51%).

Fonte: Próprio autor (2014).

2.2 LEGISLAÇÕES E NORMAS SOBRE O TEMA

Não há uma legislação específica que regulamenta as empresas de lavagem de veículos, de pequeno ou grande porte, obrigando a instalação de dispositivos de tratamento dos efluentes provenientes destes processos. No entanto, alguns princípios da Resolução CONAMA 273/2000, que dispõe sobre prevenção e controle da poluição em postos de combustíveis e serviços, têm sido aplicados para as empresas de lavagem de veículos, isso porque anteriormente essas atividades eram processadas apenas em postos de combustíveis.

Dentre as determinações dessa resolução, destaca-se o artigo 4º, que exige a licença prévia, a licença de instalação e a licença de operação do empreendimento. No caso específico das empresas de lavagem de veículos, para a liberação da licença ambiental, conforme a mesma resolução, compete ao órgão responsável exigir o tratamento prévio com a instalação de caixa de areia e caixa separadora de água e óleo, como forma de reduzir os poluentes presentes no

efluente produzido por esses serviços (ROSA *et al.*, 2011).

A ABNT NBR 14605 (2010) estabelece os parâmetros para projeto, metodologia de dimensionamento de vazão, instalação, operação e manutenção do sistema de drenagem oleosa em postos revendedores veicular. Segundo esta norma, o sistema de drenagem oleosa (SDO) tem a função de coletar os afluentes oleosos, tratar, remover os resíduos oleosos livres, sólidos flutuantes e sedimentáveis, e destinar os efluentes para a rede coletora, corpo receptor ou para compartimento de contenção para posterior destinação, em conformidade com a legislação pertinente. O SDO é basicamente composto pela área de contribuição, canaletas, tubulações, caixa de areia, sistema de retenção de resíduos flutuantes, separador de água e óleo, reservatório de óleo separado, caixa de amostragem de efluente e compartimento de contenção.

Em relação à proteção da qualidade dos Recursos Hídricos, a Resolução CONAMA 357/2005 dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento e foi alterada pela Resolução 430/2011, que estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Esta resolução estabelece que a tolerância em relação aos óleos minerais é de até 20 mg/L e aos óleos vegetais e gorduras animais de até 50 mg/L. Em relação ao material sedimentável, a tolerância é de 1 mL/L, em teste de 1 hora em cone *Inmhoff*. Para o lançamento em lagos e lagoas, cuja velocidade de circulação seja praticamente nula, os materiais sedimentáveis deverão estar virtualmente ausentes.

No Estado de Minas Gerais, as legislações vigentes para o licenciamento dos postos revendedores de combustíveis são a Deliberação Normativa COPAM 50/2001, que estabelece os procedimentos para o licenciamento ambiental de postos revendedores, postos de abastecimento, instalações de sistemas retalhistas e postos flutuantes de combustíveis e a Deliberação Normativa COPAM 108/2007, que altera a redação da Deliberação Normativa COPAM 50 de 28 de novembro de 2001.

Os limites de lançamento de efluentes, determinados pela legislação estadual de Minas Gerais através da Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 1 (MINAS GERAIS, 2008), de 05 de Maio de 2008, permite o lançamento de efluentes direta ou indiretamente em corpos hídricos com substâncias tensoativas reativas ao azul de metileno de até 2,0 mg/L; exige um limite máximo de DQO de até 180 mg/L ou tratamento com eficiência de redução em no mínimo 70% e média anual igual ou superior a 75%; e não delibera sobre o padrão de cor.

No caso específico de Uberlândia (MG), cidade na qual foi realizado o presente estudo, os

procedimentos para a aprovação da construção dos postos revendedores de combustíveis junto à Prefeitura Municipal de Uberlândia são estabelecidos na Lei Complementar nº 524, de 08 de abril de 2011, Seção VII - da Construção e Funcionamento de Postos Revendedores de Combustíveis.

A Lei Complementar nº 524/2011 regulamenta as atividades que são permitidas aos postos revendedores de combustíveis de Uberlândia, conforme relatado no Art. 105.

Art. 105. São atividades permitidas aos postos revendedores:

I – lavagem e lubrificação de veículos e garagem;

II – suprimento de água, ar e borracharia;

III – comércio de peças e acessórios para veículos relacionados, com a higiene, conservação, aparência e segurança de veículos;

IV – comércio de bar, restaurante, café, mercearia, mini-shopping e correlatos (UBERLÂNDIA, 2011).

O artigo 111º determina que, o posto revendedor, deverá dispor de um sistema para recepção das águas residuárias oriundas dos processos de lavagem de veículos e áreas de abastecimento cobertas, devidamente segregadas das redes de águas pluviais, a ser ligado à rede de esgoto. No § 2º do mesmo artigo, define-se que as águas residuárias, após o tratamento e antes de serem lançadas na rede de esgoto, deverão estar enquadradas aos padrões de emissão estabelecidos pela legislação vigente (UBERLÂNDIA, 2011).

Algumas regiões do país já estão aplicando medidas de gestão, formulando leis ambientais direcionadas especificamente para as empresas de lavagem de veículos, com a preocupação não apenas de propor o tratamento do efluente gerado nessas empresas, mas também o reuso da água. Como exemplo: a Lei 3.812/2006, sancionada em Brasília, Distrito Federal, em 08 de fevereiro de 2006, torna obrigatória a reutilização da água utilizada nos postos de gasolina e na lavagem de veículos (BRASÍLIA, 2006); e da Lei 9.439/2010, de 04 de maio de 2010, sancionada no Espírito Santo, dispõe sobre a obrigatoriedade dos postos de combustíveis, lava-jatos e empresas de ônibus, instalarem equipamentos de tratamento e reutilização da água usada na lavagem de veículos (ESPÍRITO SANTO, 2010).

2.3 OZONIZAÇÃO

Neste item é dada ênfase à oxidação química, princípios para formação do ozônio, reatividade do ozônio, decomposição do ozônio, ozônio no tratamento de água para consumo humano, ozônio no tratamento de lixiviados e de esgoto doméstico, ozônio no tratamento de efluente industrial, ozonização catalítica e ozonização catalisada por carvão ativado.

2.3.1 OXIDAÇÃO QUÍMICA

Do ponto de vista químico, uma reação de oxidação/redução é aquela que envolve transferência de elétrons entre os reagentes. Para que isto ocorra, deve-se ter um elemento que perde elétron (oxida), enquanto outro elemento ganha elétrons (reduz). Sob uma ótica mais aplicada, a do tratamento de efluentes e remediação de solos contaminados, a oxidação química é uma forma de transformar moléculas ambientalmente indesejáveis em outras moléculas menos tóxicas, para que estas possam ser assimiladas de modo mais harmonioso nos ciclos da natureza (JARDIM e CANELA, 2004).

A oxidação pode ser completa ou parcial. Algumas vezes, quando a oxidação é incompleta, nem sempre se pode garantir que o subproduto (ou subprodutos) formado será menos tóxico que o composto de partida (é o caso dos trihalometanos, que são subprodutos da cloração). No entanto, a oxidação total de um composto orgânico (também chamada de mineralização) gera como produto final dióxido de carbono, água e íons inorgânicos, caso haja algum heteroátomo na molécula. Assim, quando num tema ambiental se fala em oxidação, a meta almejada é sempre a mineralização, muito embora nem sempre isto seja factível (JARDIM e CANELA, 2004).

Inúmeros oxidantes químicos são frequentemente usados em tratamento de águas (como agentes de desinfecção e redução de odor) e de efluentes domésticos e industriais, tais como peróxido de hidrogênio (H_2O_2), ozônio (O_3), cloro (Cl_2), dióxido de cloro (ClO_2) e permanganato ($KMnO_4$).

O tratamento de efluentes que contenham substâncias recalcitrantes e tóxicas, muitas vezes só é possível por meio de técnicas não biológicas, como floculação, precipitação, adsorção em carvão ativado, arraste, osmose inversa, entre outros. Uma alternativa às tecnologias já estabelecidas são os processos oxidativos avançados (POA) e a ozonização, que se baseiam na destruição química da matéria orgânica pelo radical hidroxila ($\cdot OH$) e/ou pelo ozônio, respectivamente (ANDREOZZI *et al.*, 1999).

Durante a oxidação química de uma substância, os elétrons são removidos, aumentando o estado de oxidação. Na maioria dos casos, a oxidação de compostos orgânicos, embora seja termodinamicamente favorável, é de cinética lenta (DEZOTTI, 2008). Entretanto, nas reações que envolvem o radical $\cdot OH$ ou O_3 , a cinética é rápida, devido ao seu potencial de oxidação ser superior aos de oxidantes comumente utilizados, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Potencial de oxidação de alguns oxidantes em água

Oxidante	Potencial de Oxidação (eV)
Radical hidroxila	2,80
Oxigênio atômico	2,42
Ozônio	2,07
Peróxido de hidrogênio	1,77
Radical peridróxido	1,70
Cloro	1,36
Oxigênio	1,23

Fonte: Lide (2014).

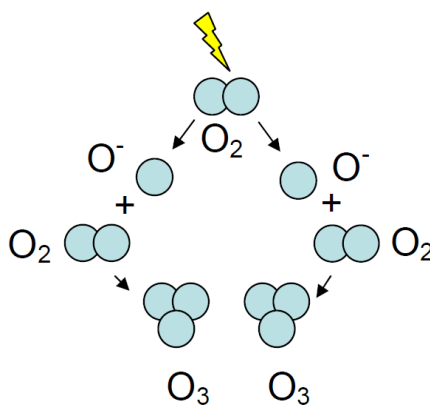
Para Schneider (2010), os processos oxidativos apresentam algumas vantagens frente a outros tratamentos, tais como: degradação de compostos recalcitrantes; possibilidade de mineralização dos poluentes a CO_2 , água e íons inorgânicos; taxa de reação química rápida com os contaminantes; tecnologia limpa (baixa produção de resíduos).

2.3.2 PRINCÍPIOS PARA FORMAÇÃO DO OZÔNIO

O ozônio é uma forma alotrópica do oxigênio, formado naturalmente quando moléculas de oxigênio são irradiadas por raios UV, clivando as ligações do O_2 e formando átomos de oxigênio que reagem com outras moléculas de O_2 e formam o ozônio (EPA, 1999). É um gás incolor de odor pungente, em fase aquosa o ozônio se decompõe rapidamente a oxigênio e espécies radicalares (KUNZ, *et al.*; 2002).

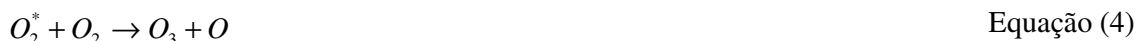
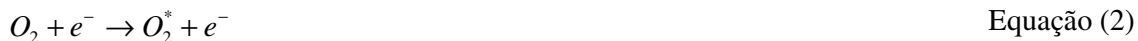
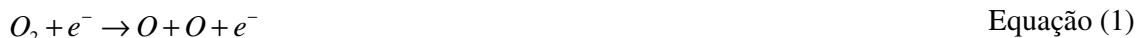
A geração de ozônio pode ser realizada por diversas tecnologias, entretanto, o processo corona é o mais utilizado (SALLA, 2006). Este é baseado na aplicação de uma voltagem alternada entre dois eletrodos, separados por um fluxo de oxigênio puro seco ou ar. O campo elétrico aplicado fornece energia suficiente aos elétrons, para que estes rompam as duplas ligações da molécula de O_2 gerando dois átomos de oxigênio. Estes átomos de oxigênio reagem com outra molécula de O_2 para formar as moléculas de O_3 (SILVA, 2008). A Figura 1 ilustra o esquema do processo Corona para geração de ozônio.

Figura 1 – Esquema do processo Corona para geração de ozônio



Fonte: Silva (2008)

No processo de formação do ozônio, a conversão de oxigênio molecular O_2 (forma alotrópica mais estável) em ozônio O_3 é realizada de forma endotérmica que exige 142,2 KJ por mol de O_3 formado, representado por $3O_2 \rightarrow 2O_3$ ($\Delta H = 284,4$ KJ) (NOVAIS, 1998). As reações que ocorrem na formação do ozônio podem ser descritas pelas equações (1) até (6).



Nas quais: O_2 é oxigênio molecular; e^- é elétron; O é átomo de oxigênio; O_2^* é a molécula de oxigênio excitada; M é o catalisador; O_3 é o ozônio molecular.

2.3.3 REATIVIDADE DO OZÔNIO

O ozônio é um oxidante muito poderoso, apresentando um potencial de oxi-redução somente menor que o do radical hidroxila, conforme apresentado na Tabela 3. É uma substância com alta reatividade, desempenhando a função de um agente oxidante bastante eficiente; aliás, em meio ácido, o único gás com caráter oxidante superior é o flúor. Esse elevado caráter oxidante explica o uso do O_3 como bactericida, podendo ser usado para desinfetar o ar e os gases emanados do esgoto, para purificar água, tanto em estações de tratamento quanto em aparelhos de uso doméstico (NOVAIS, 1998).

São reportados pela literatura reação do ozônio molecular com grande número de compostos inorgânicos, apresentando constantes cinéticas de segunda ordem. Alguns destes são muito reativos, independente do pH (como sulfito, sulfeto e nitrito), enquanto outros exibem constante cinética baixa em meio ácido e um aumento significativo na reatividade com o aumento do pH (como ácidos hipocloroso, ácido hipobromoso e amônia). Fe(II) e Mn(I), que estão presentes em águas naturais, podem ser prontamente oxidadas por ozônio gerando óxidos insolúveis facilmente removíveis por filtração (PEIXOTO, 2008).

O ozônio é capaz de reagir com uma numerosa classe de compostos orgânicos, devido, principalmente, ao seu elevado potencial de oxidação ($E_0 = 2,07$ V), superior ao de compostos reconhecidamente oxidantes, como H_2O_2 e o próprio cloro. O ozônio possui um dos maiores potenciais de redução, sendo o oxidante convencional mais usado para oxidação de fenóis (KUNZ *et. al.*, 2002; ROBINSON *et. al.*, 2001). Segundo Koch *et al.* (2002), Mascolo *et al.* (2002) e Peng e Fan (2005), é um tratamento de descoloração muito efetivo e rápido, degrada fenóis e reduz a DQO.

Sano *et al.* (2007) relatam que a purificação de água com ozônio para degradar compostos orgânicos tem sido amplamente desenvolvida devido a alguns motivos, tais como: reatividade é bastante forte para degradar de forma eficaz os compostos orgânicos; pode ser facilmente gerado pelo uso de luz ultravioleta ou descarga elétrica; pode ser facilmente convertido em O_2 ; a reação com ozônio pode ser combinada com outro método para obter uma maior purificação da água.

Na indústria, emprega-se O_3 para branquear ou descolorir azeites, ceras, amido, farinha, fibras têxteis, já que oxida pequenas quantidades de compostos indesejáveis – responsáveis pela coloração – que podem estar presentes nesses produtos. O ozônio é capaz de quebrar as duplas ligações de compostos orgânicos, adicionando a elas oxigênio, pelo processo chamado ozonólise (NOVAIS, 1998).

A ozonização também pode inibir ou destruir as propriedades espumantes de surfactantes residuais e pode oxidar uma porção significativa da matéria orgânica presente. Além disso, pode melhorar a biodegradabilidade desses efluentes que contêm uma alta fração de componentes não biodegradáveis e tóxicos, pela transformação em compostos intermediários mais facilmente biodegradáveis (SILVA, 2006).

Após o ozônio ser transferido para a água, as substâncias contidas nesta, que devem ser tratadas, são oxidadas nas próprias colunas a partir do ozônio dissolvido. As reações entre o ozônio dissolvido e as substâncias podem ser reações diretas de moléculas de ozônio, ou, reações indiretas, em que radicais hidroxila ($\cdot\text{OH}$), formados durante a autodecomposição do ozônio. Na reação direta, a matéria orgânica ou inorgânica reage diretamente com o ozônio e não forma radicais (SALLA, 2006).

Segundo Gottschalk *et al.* (2009), sob condições ácidas ($\text{pH} < 4$), o mecanismo direto predomina, porém em pH maior que 10 o mecanismo se torna predominantemente indireto, ou seja, via radicalar. Para águas superficiais ou subterrâneas com pH em torno de 7, ambos os mecanismos – direto e indireto – podem estar presentes e outros fatores (como tipo do composto alvo e presença de metais de transição) contribuirão para definir a extensão de cada um deles.

Além da inativação de uma série de organismos patogênicos, os efeitos depuradores do ozônio são mais pronunciados na redução de cor e formação de moléculas menores, com maior hidrofiliabilidade e menor toxicidade, pois as etapas oxidativas tendem a fragmentar macromoléculas poluentes (MORAES *et al.*, 2000).

O ozônio é uma molécula instável, com tempo de meia-vida na água de segundos a minutos, dependendo do pH , temperatura e qualidade do efluente. A decomposição do ozônio no efluente aumenta com o pH do meio, com tempo de meia-vida de 20 minutos em pH de 6 até a decomposição instantânea em pH acima de 10 (DEZOTTI, 2008).

No caso de tratamento de águas residuárias, a instabilidade do ozônio tem um aspecto positivo, que é acrescentar oxigênio dissolvido ao efluente. Entretanto, essa mesma característica não permite a sua estocagem, exigindo que a sua geração seja junto ao ponto de utilização (SCHNEIDER, 2010). A instabilidade do ozônio, aproximadamente 3 segundos na fase gasosa, impede o seu armazenamento, sendo necessária a sua geração *in situ* (ROBINSON *et al.*, 2001).

O ozônio pode ser utilizado como oxidante na redução de cor, no auxílio do processo de coagulação/floculação, na oxidação de compostos orgânicos recalcitrantes, no aumento da biodegradabilidade de compostos orgânicos, na redução da produção de excesso de lodo biológico e na desinfecção de água (GONÇALVES *et al.*, 2003).

2.3.4 OZÔNIO NO TRATAMENTO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO

A primeira instalação de tratamento de água potável utilizando ozônio para desinfecção foi construída em Oudshoorn/Holanda (em 1893), seguido por Nice/França (em 1906). O cloro ainda era preferido em relação ao ozônio, até que em 1970 foram descobertos os trihalometanos (THM), que são subprodutos tóxicos resultantes das reações de desinfecção utilizando cloro (LANGLAIS *et al.*, 1991).

As águas de abastecimento público e respectivos lençóis freáticos também sofrem os efeitos da poluição industrial e doméstica. A literatura reporta a contaminação das águas subterrâneas por meio de compostos como aromáticos voláteis incluindo benzeno, tolueno e xilenos (BTX); éter metil-terciário butílico (MTBE); e compostos voláteis organo-clorados. A ozonização e os processos oxidativos avançados (POA) têm se destacado como tecnologias eficientes na redução destes poluentes (BELTRÁN, 2005).

Souza e Daniel (2008) avaliaram a inativação de *E. coli*, colígafos e *C. perfringens* em água de abastecimento, empregando ozônio como desinfetante. Para tanto, foram testadas diferentes dosagens de ozônio (2, 3, 4 e 5 mg/L) e diferentes tempos de contato (5, 10, 15 e 20 minutos). A maior inativação de *E. coli* foi de 4,85 log(N/N₀), obtida com dosagem de 2 mg/L e 20 minutos de tempo de contato. A menor inativação observada foi de 1,40 log(N/N₀), para a dose de 3 mg/L e tempo de contato de 5 minutos.

Pereira (2007) comparou a eficácia do ácido hipocloroso, dióxido de cloro e ozônio na inativação de oocisto de *Cryptosporidium*. O ozônio foi o produto mais eficaz, conseguindo inativar 100% dos oocistos de *Cryptosporidium* na concentração de 0,24 mg/L.

Mouchet e Bonnelye (1998) estudaram a redução de cianobactérias e microalgas através de filtração direta e polimento com ozônio e carvão ativado granular. Os testes, conduzidos numa instalação piloto no sul da França, demonstraram que o tratamento com ozônio resultou numa redução superior a 99% de microalgas e cianobactérias, melhorando a qualidade de água produzida.

Rajala-Mustonen e Heininen-Tanski (1995) verificaram os efeitos da radiação UV isolada, UV combinada com peróxido de hidrogênio e combinada com ozônio na inativação de colifagos na água da torneira. Os autores verificaram que a inativação de colifagos utilizando

ozônio foi mais rápida, na qual alcançou-se a redução de colifagos de 6 a 8 log nos primeiros 2 minutos de exposição.

Tais citações evidenciam a potencialidade do ozônio no tratamento de água para consumo humano.

2.3.5 OZÔNIO NO TRATAMENTO DE LIXIVIADOS E DE ESGOTO DOMÉSTICO

A literatura mostra que o ozônio apresenta elevada aceitação no tratamento de lixiviados de aterros sanitários e efluentes domésticos.

Costa (2003) afirmou que a ozonização é muito eficiente para desinfetar efluentes de águas residuárias domiciliares quanto à inativação de coliformes totais (7,51 log) e fecais (6,98 log). E ainda, essa eficiência de inativação depende da eficiência da transferência do ozônio da fase gasosa para a líquida. Gehr *et al.* (2003) utilizaram ozônio para inativação de *Clostridium perfringens* e MS-2 Colifagos presentes no efluente de uma Estação de Tratamento de Esgoto no Canadá. Os autores concluíram que, aplicando dosagens de ozônio de 30 a 50 mg/L e tempos de contato de 5 a 45 minutos, foi obtida eficiência de 1 log na inativação de *Clostridium perfringens* e de 3 log na inativação de Colifagos MS-2, concluindo que o ozônio é um excelente desinfetante de vírus, uma vez que o colifago é indicador de vírus. Ainda, ressaltou a alta resistência do *Clostridium* à ação bactericida do ozônio.

Bila *et al.* (2005) avaliaram o tratamento de lixiviado gerado no aterro sanitário de Gramacho/RJ por meio de coagulação/floculação, seguido por ozonização e tratamento biológico. O lixiviado possuía baixa biodegradabilidade (relação DBO/DQO de 0,05) e concentração moderada de metais pesado. A ozonização foi realizada em coluna acrílica de contato de 1,0 m de comprimento e 0,1 m de diâmetro. Inicialmente, aplicou-se coagulação/floculação nos lixiviados bruto e pré-tratado. Os reagentes utilizados para o tratamento físico-químico foram $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ e FeCl_3 , juntamente com polieletrólito catiônico. As doses de ozônio aplicadas ao lixiviado bruto foram de 500, 1500, 3000, 5000, 7000 e 9000 mg/L. O lixiviado obtido depois do tratamento primário recebeu doses de ozônio de até 5000 mg/L. Quando aplicadas concentrações superiores de ozônio os autores não observaram consumo de ozônio.

Salla (2006) estudou a oxidação da matéria orgânica e inorgânica em esgoto sanitário através da ozonização, verificando os parâmetros físicos e químicos tais como: ozônio residual

dissolvido e gasoso, temperatura, pH, alcalinidade, condutividade, turbidez, cor verdadeira, sulfeto, DQO, série de sólidos e série de carbono. As características hidrodinâmicas das bolhas ascensionais também foram estudadas (velocidade ascensional, porcentagem pontual da concentração, diâmetro equivalente e área interfacial específica). Verificou-se que o aumento da vazão de gás ozônio injetado, no difusor microporoso, aumenta o valor de todas as características hidrodinâmicas estudadas. Constatou-se que, de forma geral, a redução de pH e alcalinidade não foram influenciadas pela dosagem de ozônio aplicada; que a porcentagem de redução de DQO teve um comportamento oscilatório; que a condutividade teve redução nula e que a turbidez e cor verdadeira tiveram influência da dosagem de ozônio na eficiência de redução.

Soares (2007) estudou a hidrodinâmica, a transferência de massa e a inativação de microorganismos indicadores durante o processo de ozonização de esgoto sanitário tratado previamente em reator UASB. Verificou-se que as concentrações, velocidades e diâmetros das bolhas de ozônio foram proporcionais às vazões de ozônio aplicadas e que a quantidade de ozônio consumido variou em relação à dose de ozônio aplicado, sendo que o valor foi decrescente com o aumento da vazão de ozônio. Em relação à inativação de microorganismos indicadores, o *C. perfringens* foi o mais resistente à ação bactericida do ozônio seguido por *E. coli* e colifagos.

Tizaoui *et al.* (2007) trataram lixiviado proveniente do aterro sanitário de Jebel Chakir/Tunísia, com alta DQO (superior a 5230 mg/L) e baixa biodegradabilidade (DBO/DQO = 1). O tratamento por processo oxidativo avançado, utilizando ozônio e peróxido de hidrogênio, foi realizado em reator de bancada com volume de 150 mL, operando em regime semi-contínuo. A concentração de ozônio na entrada do reator foi de aproximadamente 0,08 mg/L e a vazão de gás de 200 mL/min. O experimento foi conduzido a temperatura de 20 °C. Foi removida 94% da cor do lixiviado e aumento de biodegradabilidade com aumento da relação DBO/DQO para 0,7. Os autores consideraram que a concentração ótima de H₂O₂ foi de 2000 mg/L e acima desta concentração foi observado um declínio nas taxas de redução e no aumento da biodegradabilidade, assim como aumento dos custos operacionais.

Silva (2008), em uma das etapas de seu trabalho, estudou a formação de subprodutos (aldeídos e trialometanos) da desinfecção de efluente de tratamento anaeróbio de esgoto sanitário utilizando ozônio, cloro e ozônio combinado com cloro. Verificou como os

desinfetantes atuam no processo de oxidação e determinou o grau de toxicidade, bem como o efeito do residual do ozônio e cloro empregando *Daphnia similis* e *Danio rerio* como organismos-teste e, ainda, analisou a eficiência do ozônio, cloro, ozônio/cloro na inativação de microrganismos. Concluiu-se que houve uma expressiva formação de aldeídos. Para os ensaios de cloração e ozonização/cloração foi observada a baixa formação de trihalometanos. Os testes de toxicidade, utilizando *Daphnia similis*, apresentaram toxicidade nos ensaios em que foi aplicado 8 mg O₃/L, assim como em todas as dosagens aplicadas nos ensaios de cloração e, também, para o ensaio de ozonização/cloração para dosagem aplicada de 5,0 mg O₃/L por 10 mg Cl₂/L. Com relação ao *Danio rerio*, foi detectada toxicidade aguda no ensaio em que foi aplicado 5 mg O₃/L e tempo de contato de 15 minutos.

Com o intuito de verificar o efeito da ozonização no tratamento de esgoto sanitário, Cheng *et al.* (2011) estudaram o processo de ozonização como pré-tratamento para as etapas de coagulação/floculação e filtração, obtendo eficiências de redução de turbidez, DQO, UV₂₅₄ e cor de, respectivamente, 79%, 46,5%, 56,6% e 69,2%. De acordo com os autores, o ozônio pode oxidar parte da matéria orgânica dissolvida, mas degrada somente compostos de elevado tamanho molecular para cadeias menores, não podendo mineralizar completamente.

Schoenell (2013) avaliou o uso de ozônio (O₃) e peróxido de hidrogênio (H₂O₂) como processo oxidativo avançado (POA), visando a redução de compostos recalcitrantes em lixiviados de aterros sanitários. Foram utilizados dois lixiviados provenientes do aterro sanitário de São Leopoldo/RS (bruto e tratado por lagoas), os quais foram tratados apenas por O₃ em concentração de 29 mg/L (gerados a partir de processo Corona) ou com adição de 1000 mg/L de H₂O₂ ao O₃. Os ensaios ocorreram em escala piloto, sendo tratados 460 L de lixiviados, em cada ensaio, durante 96 horas. O POA (operando com os oxidantes O₃ e O₃ + H₂O₂) mostrou-se mais eficiente no tratamento de lixiviados que tiveram as menores concentrações iniciais de DBO, DQO e COT, independente de ser lixiviado bruto ou tratado. Altas remoções de cor aparente, DQO e COT foram observadas, chegando a 99%, 88% e 66%. A maior redução de carbono inorgânico foi 23%, porém o grupo que iniciou com a maior concentração desse parâmetro, obteve as maiores remoções de todos os parâmetros analisados, porém não de forma significativa.

2.3.6 OZÔNIO NO TRATAMENTO DE EFLUENTE INDUSTRIAL

Existe grande quantidade de trabalhos na literatura focados na ozonização de efluente industrial dos

mais variados seguimentos. Tem aumentado muito a quantidade de trabalhos voltados exclusivamente para essa alternativa de oxidação de efluente industrial.

Beltran-Heredia *et al.* (2000) investigaram a degradação do efluente de indústria de processamento de azeitonas por ozonização e por tratamento biológico aeróbio. Na etapa de ozonização observou-se uma redução da DQO entre 42 – 55 %, com alta destruição dos compostos aromáticos (75%) e fenólicos (67%). Utilizando-se apenas o tratamento biológico obteve-se alta redução de DQO (83 – 86%) e baixa destruição dos compostos aromáticos (22,5%) e fenólicos (51%). A combinação do tratamento biológico aeróbio com a ozonização promoveu uma alta eficiência de redução de DQO (99%), dos compostos aromáticos (96 %) e fenólicos (98%).

No trabalho de Orhon *et al.* (2002), o efeito da ozonização em um efluente têxtil foi investigado, por meio da pré-ozonização e pós-ozonização do efluente na redução de DQO e cor. A ozonização, após o tratamento biológico, apresentou melhores resultados, com remoção praticamente total de cor e uma eficiência de remoção de 14% na DQO. O efeito de polimento da pós-ozonização também se mostrou mais atrativo economicamente, utilizando aproximadamente 50% do ozônio necessário no pré-tratamento, com o mesmo fluxo de ozônio e tempo de contato.

Balcioglu e Otker (2003) avaliaram a influência do pH na ozonização de três efluentes sintéticos contendo diferentes antibióticos, sendo que dois deles continham antibióticos de uso humano e o outro de uso veterinário. Para isso, foram feitas ozonizações em pH de 3, 7 e 11. A Tabela 4 apresenta os resultados de redução de DQO e aromaticidade para os diferentes fármacos nos diferentes valores de pH.

Tabela 4 – Porcentagem removida de diferentes fármacos em solução aquosa

	Antibiótico I	Antibiótico II	Uso Veterinário
DQO removida (%)			
pH = 3	53	24	65
pH = 7	74	69	88
pH = 11	82	71	79
UV₂₅₄ removida (%)			
pH = 3	75	70	82
pH = 7	93	29	96
pH = 11	90	25	95

Fonte: Adaptado de Balcioglu e Otker (2003).

O aumento do pH da solução, de 3 para 11, ocasionou num significativo aumento na redução de DQO em todos os experimentos. Entretanto, o pH exerceu uma tendência diferente para cada efluente. Os valores mais baixos da redução de DQO em pH igual a 11 (79%)

comparando com pH igual a 7 (88%), devem-se ao fato da formulação do efluente contendo o antibiótico veterinário conter alguns aditivos inorgânicos, que podem agir como capturadores de radicais OH.

Mvula e Von Sonntag (2003) estudaram a ozonização de fenol em solução aquosa em pH 3, 7 e 10. Observaram que os seguintes produtos puderam ser quantificados: catecol, hidroquinona, 1,4-benzoquinona, ácido cis,cis-muconico, H_2O_2 , 2,4-dihidroxibifenil e 4,4-dihidroxibifenil. Para medir a degradação de fenol em função da concentração de ozônio, foi utilizada uma concentração baixa de fenol ($2,5 \cdot 10^{-4}$ mol/L) e, sob estas circunstâncias e em pH igual a 7, somente 0,48 mol de fenol foram destruídos para cada mol de ozônio consumido.

A ozonização combinada com a presença de cálcio foi investigada por Hsu *et al.* (2004), a fim de melhorar a taxa da redução de DQO em uma solução de fenol. Os autores observaram que, com até 10 min de ozonização, a taxa da remoção de DQO foi similar para as soluções de fenol com e sem o Ca^{2+} , indicando que o Ca^{2+} não teve quase nenhum efeito na remoção de DQO no estágio inicial da ozonização. Neste estágio, a diminuição da DQO, para ambas as soluções, ocorreu principalmente devido a reatividade elevada do íon fenolato com o ozônio. Entretanto, após 10 min de ozonização, o efeito de Ca^{2+} na taxa de redução de DQO tornou-se significativo. Para a solução sem Ca^{2+} , a taxa da remoção de DQO foi retardada. Isto é devido ao fato de que o fenol foi decomposto em produtos intermediários menos reativos com ozônio, tais como ácidos orgânicos, tendo por resultado uma taxa mais baixa da redução de DQO. Para a solução com Ca^{2+} , a taxa da redução de DQO foi mais rápida do que para o caso anterior após 10 min de ozonização. Além disso, observou-se a formação de precipitados insolúveis, indicando que os produtos intermediários podem interagir com o Ca^{2+} . Aparentemente, a presença de Ca^{2+} pode encurtar o tempo de ozonização, diminuindo o custo do tratamento da ozonização.

Silva (2006) investigou a eficiência da ozonização na degradação dos corantes azos, Orange II e Acid Red 27, em meio salino e em diferentes valores de pH. A ozonização foi realizada em uma coluna de borbulhamento. Foram avaliadas a remoção de cor e de carbono orgânico total (COT). Determinou-se os parâmetros cinéticos e de transferência de massa entre a fase gasosa e líquida. Foi também avaliada a presença de capturadores de radicais $^{\circ}OH$ (t-butanol). Os resultados obtidos demonstraram que o pH, o terc-butanol e o NaCl influenciaram significativamente no processo de ozonização dos corantes azos. Observou-se que o corante

Acid Red 27 é de mais difícil degradação do que o corante Orange II por ozônio. A ozonização empregada como único processo de tratamento não foi capaz de degradar os produtos intermediários formados neste processo. Foram feitos testes de biodegradabilidade das soluções dos corantes antes e após a ozonização. Os resultados confirmaram o efeito inibitório dos produtos intermediários ao processo biológico.

O efeito da ozonização entre dois estágios de tratamento biológico foi avaliado por Aparicio *et al.* (2007), em um efluente proveniente de ETE de uma indústria de fabricação de resinas, rico em compostos recalcitrantes. Observaram que a combinação da pós-ozonização e o tratamento biológico levou a uma melhora na remoção dos compostos recalcitrantes e na mineralização total do efluente.

Souza (2009) avaliou a eficiência de redução de compostos fenólicos presentes em efluentes petroquímicos sintéticos, mediante o uso de processos combinados de oxidação, utilizando ozônio como agente oxidante e adsorção com carvão ativado. Verificou-se que, em pHs ácidos, o ozônio apresenta maior estabilidade. No processo de ozonização, a degradação de fenol foi mais rápida em meio alcalino (pH igual a 10) onde, em 15 minutos de contato entre o ozônio e o efluente, 99,7% do fenol foi consumido e a redução de DQO foi de 87,8% em 30 minutos. O maior percentual de adsorção de fenol ocorre num período de 4 horas, sendo o modelo cinético de pseudo 2ª ordem o qual melhor se ajustou aos dados experimentais. No tratamento sequencial, pôde-se concluir que a combinação que apresenta maior eficiência na degradação-redução do fenol e DQO foi o pré-tratamento com ozônio durante 3 minutos, seguido de adsorção por 3 horas.

Krause (2009) estudou o efeito da ozonização em efluentes de indústria farmacêutica, avaliando a eficiência da ozonização do sulfametaxazol em diferentes pH, de soluções contendo 50 µg/L, com o objetivo de avaliar a oxidação via ozônio molecular e via radical hidroxila. A redução em pH igual a 3 foi próxima de 100%, enquanto que em pH igual a 11 observou-se um residual de 10 µg/L, mostrando que a oxidação via ozônio molecular foi mais efetiva na redução do sulfametaxazol. A atividade antimicrobiana foi completamente removida quando a ozonização foi realizada em pH igual a 3.

Kern (2012) avaliou a eficiência de tratamento de efluente de lavanderia hospitalar por meio da aplicação de processos oxidativos avançados (O₃, UV/O₂, UV/O₃ e UV/O₃/Fe²⁺). As reduções de algumas variáveis que conferiam impacto ambiental foram alcançadas após a

aplicação dos métodos de ozonização fotocatalítica, especialmente através de metais catalisados nas duas diferentes concentrações estudadas (50 e 150 mg.L⁻¹ de Fe²⁺). O método baseado na concentração mais elevada do catalisador metálico, UV/O₃/Fe²⁺, 150 mg/L foi o qual apresentou maior eficiência de redução de DQO (59,07%), DBO (50,34%) e NTK (86,77%) após o período de três horas de tratamento. Além disso, foi registrada a maior velocidade de reação através da degradação de DQO ($k = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$), indicando maior potencialidade na produção de radicais hidroxilas e degradação de poluentes orgânicos presentes na matriz poluente.

Esta revisão bibliográfica mostra a elevada aceitação do ozônio no pré e pós-tratamento de efluente industrial.

2.3.7 OZONIZAÇÃO CATALÍTICA

O ozônio utilizado sozinho no tratamento de efluentes tem se mostrado limitado na mineralização de compostos orgânicos, no que diz respeito à remoção de micropoluentes no tratamento de água para consumo e na remoção da matéria orgânica refratária em efluentes industriais. As reduzidas taxas de remoção de carga orgânica obtidas constituem um verdadeiro empecilho para a popularização deste sistema. Como consequência deste fato, para promover uma melhoria da eficiência da ozonização nas várias aplicações, os Processos Oxidativos Avançados (POA) têm sido estudados como potenciais métodos para a degradação de compostos orgânicos (SOARES, 2006).

De acordo com o estudo de Azbar *et al.* (2004), os processos oxidativos avançados possuem princípios comuns em termos da participação dos radicais hidroxila no mecanismo de reação. Nestes processos as espécies ativas responsáveis pela destruição dos contaminantes, na maioria dos casos, acredita-se ser o radical hidroxila ($\bullet\text{OH}$).

Segundo dados de Alnaizy e Akgerman (2000), os radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$) possuem um potencial de redução de 2,8 V, superior ao de outras espécies oxidantes, tais como O₃ ($E^0 = 2,07 \text{ V}$), H₂O₂ ($E^0 = 1,8 \text{ V}$) e Cl₂ ($E^0 = 1,6 \text{ V}$), sendo capaz de mineralizar uma grande faixa de compostos orgânicos em efluentes.

Suty *et al.* (2004) mostraram o aumento no interesse pelos processos oxidativos avançados, em um cenário de 30 anos a partir de 1975 e, tanto esses autores quanto Dezotti *et al.* (2008), destacaram algumas das vantagens em se empregar os processos oxidativos avançados: alta

capacidade para a mineralização total de poluentes orgânicos e para a oxidação total de compostos inorgânicos a CO_2 e a espécies inorgânicas; decomposição dos reagentes usados como oxidantes em produtos menos ofensivos ao meio ambiente; podem ser combinados com outros processos, como o biológico por exemplo, diminuindo o custo total do tratamento; não há transferência de fase do poluente; podem ser realizados à pressão e temperatura ambiente; requer poucas exigências operacionais.

Por outro lado, Gernjak *et al.* (2003) e Torrades *et al.* (2003) apontaram algumas desvantagens dos POA, tendo apresentado a maior desvantagem pela limitação econômica, especialmente devido ao alto custo do agente oxidante.

Dentre os Processos Oxidativos Avançados estudados, a ozonização catalítica tem se mostrado promissora na despoluição de efluentes industriais (SOARES, 2006). Pode ser classificada em homogênea ou heterogênea, sendo diferenciadas pela forma de geração dos radicais hidroxila.

De acordo com Legube e Leitner (1999), a ozonização homogênea baseia-se na ativação do ozônio por íons metálicos presentes em solução, tais como Fe(II) , Mn(II) , Ni(II) , Co(II) , Cd(II) , Cu(II) , Ag(I) , Cr(III) e Zn(II) . A ozonização catalítica heterogênea ocorre na presença de óxidos metálicos, tais como TiO_2 , Fe_2O_3 , MnO_2 , CoO , V_2O_5 , CuO , Ni_2O_3 , Cr_2O_3 e MoO_3 , como catalisadores do processo de ozonização. Além dos catalisadores citados, zeólitas (silicatos mesoporosos) e carvão ativado também são descritos na literatura como potenciais catalisadores do processo de ozonização (FARIA *et al.* 2006).

Tanto a ozonização homogênea quanto a heterogênea são processos de oxidação avançada porque, na maioria dos casos, são geradas espécies radicalares com elevado poder oxidante, os radicais hidroxila (RIVAS, 2003).

2.3.8 OZONIZAÇÃO CATALISADA POR CARVÃO ATIVADO

Devido ao seu caráter hidrofóbico, o carvão ativado é particularmente utilizado na adsorção de substâncias orgânicas não polares, quer em fase gasosa quer em fase líquida. Como o carvão ativado apresenta uma elevada capacidade de adsorção é utilizado em diversas aplicações, tais como: tratamento de águas para abastecimento humano ou águas residuárias industriais que contenham compostos tóxicos nocivos para o meio receptor, tratamento de águas residuárias domésticas, tratamento de emissões gasosas, remoção de odores nas

estações de tratamento de efluentes, remoção de Compostos Orgânicos Voláteis (COV), descoloração de águas ou efluentes e remoção de solventes de processos industriais (CHANG *et al.*, 1981).

Estas aplicações do carvão ativado são do interesse da maioria dos setores econômicos, notadamente: indústrias alimentares, farmacêuticas, químicas, petrolíferas, metalúrgicas, nuclear e automóvel e no tratamento de águas, ar e gases (SOARES, 2006).

A literatura traz vários estudos envolvendo a aplicação de uma vasta gama de adsorventes na descoloração de efluentes, mas a adsorção por carvão ativado é uma das técnicas mais utilizadas (PEREIRA *et al.*, 2014; PEREIRA *et al.*, 2003; VÁLDES *et al.*, 2002; AL-DEGS *et al.*, 2000; MCKAY *et al.*, 1999; BOUSHER *et al.*, 1997). No entanto, a combinação de ozônio e carvão ativado começou a ser mais recentemente desenvolvida para o tratamento de efluentes tóxicos, constituindo uma opção atrativa para a destruição de compostos orgânicos tóxicos (SOARES, 2006).

Estudos têm demonstrado que as propriedades superficiais tanto do carvão ativado quanto de alguns óxidos, tal como a perovskita e o dióxido de titânio, favorecem a produção de espécies radicalares oxidantes a partir do ozônio molecular, as quais aumentam a eficiência da ozonização (BELTRÁN, 2002).

A presença do carvão ativado durante a ozonização reduz o consumo específico do ozônio para metade relativamente à ozonização na ausência do adsorvente e aumenta significativamente a seletividade do ozônio (ZAROR, 1997).

Processos baseados no uso simultâneo de ozônio e carvão ativado têm demonstrado alta eficiência de remoção de contaminantes com alta toxicidade e baixa biodegradabilidade (SANCHEZ-POLO *et al.*, 2005), por esta razão a interação do ozônio com o carvão tem sido descrita em vários trabalhos (PEREIRA *et al.*, 2014; FARIA *et al.*, 2006; ALVAREZ *et al.*, 2004; GUIZA *et al.*, 2004; BELTRÁN *et al.*, 2002; LIN e WANG, 2003; RIVERA-UTRILLA e SÁNCHEZ-POLO, 2002).

Os processos de ozonização e adsorção em carvão ativado, apesar de eficazes quando utilizados separadamente, possuem algumas desvantagens inerentes. A ozonização promove a decomposição de grandes moléculas de corantes em moléculas orgânicas menores. Por este motivo, a cor dos efluentes é eficientemente removida por este método, mas ocorre apenas

uma pequena alteração no valor de compostos orgânicos totais no efluente tratado. Em termos de remoção de compostos orgânicos, a adsorção em carvão ativado é um método mais eficiente que a ozonização. Contudo, o carvão ativado pode ficar rapidamente saturado durante o processo de adsorção, o que requer a sua regeneração ou a completa substituição. Por esta razão, o processo de adsorção em carvão ativado pode se tornar oneroso (SOARES, 2006).

A combinação dos processos de adsorção e ozonização em um único processo, além de remediar as desvantagens inerentes aos dois processos, tem sido sugerida na literatura como um método de regeneração do carvão ativado *in situ* (ALVAREZ *et al.*, 2004; LIN e WANG, 2003; LIN e LAI, 2000). Como o ozônio tem um elevado poder de oxidação, pode reagir com as espécies adsorvidas na superfície do carvão ativado, removendo-as da superfície. A reação pode ocorrer diretamente ou através de radicais livres originados pela decomposição do ozônio na superfície do carvão.

No entanto, de acordo com alguns trabalhos (VALDÉS *et al.*, 2002; ALVAREZ *et al.*, 2004), o ozônio pode modificar as propriedades superficiais do carvão ativado, tais como a área superficial específica, volume de poros e grupos químicos funcionais.

Beltrán *et al.* (2002) estudaram a decomposição do ozônio em água na presença de carvão ativado, tendo verificado que a presença de carvão ativado aumentava a velocidade de decomposição do ozônio especialmente a $\text{pH} > 6$ e que a ozonização catalítica homogênea e heterogênea ocorriam simultaneamente. Para os autores, a decomposição catalítica do ozônio depende em grande extensão do valor de pH.

Valdés *et al.* (2002) estudaram as modificações das propriedades superficiais de carvões ativados produzidas pela ozonização. Concluíram que a utilização conjunta do ozônio e carvão ativado conduz à modificação das propriedades químicas e texturais do carvão ativado e das características de adsorção. A exposição prolongada do carvão ativado ao ozônio gasoso altera a composição química da superfície do carvão e, devido a oxidação, os centros básicos são transformados em grupos ácidos.

Rivera-Utrilla e Sánchez-Polo (2002) estudaram a ozonização de um composto orgânico aromático, o ácido 1,3,6-naftalenotrisulfônico, na presença de diferentes tipos de carvão ativado, com diferentes propriedades superficiais físicas e químicas. Verificaram que o 1,3,6-

naftalenotrisulfônico foi degradado rapidamente pelo ozônio na presença de carvão ativado, evidenciando uma atividade catalítica.

Rivas *et al.* (2003) demonstraram que o emprego de carvão ativado como catalisador no processo de ozonização requer baixa quantidade de ozônio e é pouco afetado pela presença de compostos sequestrantes de radicais presentes no meio reacional. Os autores verificaram ainda que este processo é eficiente em condições ácidas, na qual não há formação de radicais hidroxila sem a presença de um catalisador. Este estudo sugeriu que não apenas a formação do radical hidroxila eleva a oxidação da matéria orgânica, uma vez que outras espécies ativas, tal como o oxigênio atômico gerado na superfície do catalisador podem também levar ao aumento da mineralização de espécies orgânicas via ozonização catalítica.

Faria *et al.* (2006) estudaram a decomposição do ozônio em água, a diferentes pH, na ausência ou na presença de carvão ativado com propriedades químicas superficiais e texturais diferentes. Concluíram que o carvão ativado atuava como catalisador na decomposição do ozônio em espécies radicalares, acelerando significativamente este processo e que, em geral, a cinética de decomposição homogênea e heterogênea do ozônio aumentava com o pH da solução. Observaram também que as propriedades texturais e a química superficial do carvão ativado apresentavam um papel importante na decomposição catalítica do ozônio, concluindo que, carvão ativado básico com elevada área superficial aumenta a decomposição heterogênea do ozônio. Estes autores concluíram também que, apesar da ozonização provocar uma ligeira oxidação, no carvão ativado não ocorria uma desativação forte, ocorrendo apenas uma perda limitada da atividade e que o carvão tendia a se comportar como carvão ativado ácido.

2.4 ARRASTE DE GASES

O arraste por injeção de gás, ou *gas stripping*, é uma tecnologia de remoção por aeração, que permite a transferência de contaminantes orgânicos da fase líquida para a fase gasosa, onde então o gás é coletado e tratado (DONAIRE, 2007).

Na bibliografia desta área de conhecimento há diversas conceituações do que seja “arraste com gás”, “arraste com ar” e “arraste por ar” (inglês, *air stripping*) (SOUTO, 2009). Lagrega *et al.* (2001) afirmam que arraste com ar (*air stripping*) é um processo de transferência de massa que acelera a volatilização de compostos de uma fase líquida (normalmente a água)

para uma fase gasosa (normalmente o ar), fazendo-se passar ativamente o ar através da água e enfatizam que esse gás não deve conter o composto a ser removido.

O *gas stripping* está fundamentado nos conceitos inerentes à transferência de massa, permitindo que compostos indesejáveis contidos nos efluentes líquidos, tais como amônia, ácido sulfídrico ou compostos orgânicos voláteis sejam removidos (FERRAZ, 2010).

Dentre as teorias que explicam o processo de transferência de massa gás-líquido, destaca-se a Teoria dos Dois Filmes, que postula a existência de um filme gasoso e um filme líquido (ambos estacionários, que trabalham como estruturas resistivas à passagem de moléculas), e uma interface gás-líquido. O transporte do gás será fundamentalmente produzido pela difusão molecular das moléculas do gás junto à interface gás-líquido (SOARES, 2007).

O borbulhamento com gás é empregado para transferir à fase gasosa um componente volátil presente, inicialmente, numa mistura líquida, podendo ser empregados para este fim, ar, nitrogênio, gás natural ou vapor. Tanto quanto os parâmetros físicos, a taxa de redução dos compostos voláteis da mistura líquida para a fase gasosa é governada pela temperatura e pelas propriedades químicas e físicas das fases e dos componentes a serem removidos. Vários recursos podem ser utilizados para aumentar a área de contato gás/líquido. As colunas recheadas têm sido amplamente aplicadas em indústrias petroquímicas e no tratamento de águas produzidas. Alguns grupos contaminantes alvos do arraste com ar são os COV e combustíveis derivados de petróleo (LIMA, 2010).

O tratamento utilizando *stripping* pode ser realizado em tanques ou em torres (colunas de borbulhamento). Os sistemas em tanques de arraste consistem no uso de reservatórios dotados de aeradores. O borbulhamento de ar difuso ou a ação de agitadores mecânicos aumentam a superfície de contato gás/líquido e, com isso, aumentam a transferência de massa por meio dessa interface. No caso do uso de torres de arraste, os sistemas possuem a fase gasosa contínua, as quais funcionam de forma que o líquido escorre na forma de um filme fino sobre a superfície de um material de recheio, ao mesmo tempo em que se faz passar uma corrente de ar através desse recheio, normalmente em sentido contrário ao do escoamento líquido (LAGREGA *et al.*, 2001).

Descrevendo de forma mais simples, a coluna de borbulhamento configura-se como um cilindro vertical, onde o gás é injetado na base da coluna por meio de um difusor ou distribuidor de gás. A fase líquida pode estar em batelada, contracorrente ou concorrente com a fase gasosa. Existem várias formas de geração de bolhas de gás para a aeração da água.

Pode ser citado, como exemplo, um simples tubo aberto através do qual o gás é injetado na coluna (TREYBAL, 2004). Pode-se também incluir tubos perfurados horizontalmente, objetivando a uniformidade da distribuição das bolhas. Caminhando no sentido de otimizar o processo de transferência de massa, procura-se gerar grande quantidade de bolhas pequenas, o que é conseguido com os difusores cerâmicos, plásticos ou de metais, os quais têm poros muito finos e são os mais utilizados.

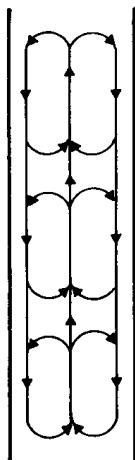
Entende-se que as bolhas ascensionais geradas por difusores porosos têm o gás transferido para o meio líquido por difusão predominantemente turbulenta, por meio da área interfacial das bolhas. De acordo com Salla (2006), a eficiência de transferência de massa gás/líquido depende da vazão de injeção do gás, do tempo de permanência das bolhas dentro da coluna e também do tamanho das bolhas ascensionais.

2.5 HIDRODINÂMICA EM COLUNA

As condições de operação das colunas de borbulhamento estão ligadas às formas que o fluxo das bolhas percorre a coluna. A velocidade do gás é um dos fatores mais importantes e, conjuntamente com coalescência de bolhas, determinam a área interfacial para a transferência de massa. As velocidades ascensionais de bolhas variam de 3 a 12 cm/s, no entanto pode se encontrar velocidades de até 1 m/s (DECKWER *et al.*, 1991).

Dentro do escoamento descontínuo ou em batelada, com o movimento do gás de baixo para cima no reator e pelo centro, o líquido tende a descer pelas laterais e subir novamente. A Figura 2 ilustra este comportamento.

Figura 2 - Comportamento da fase líquida em escoamento descontínuo

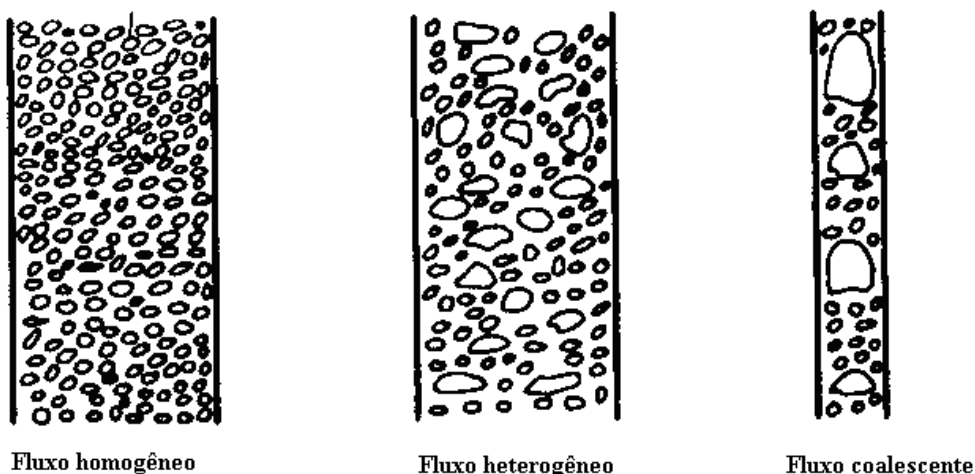


Fonte: Deckwer *et al.* (1991)

Para baixas vazões de gás, as bolhas ascendem uniformemente distribuídas no líquido. A distribuição das bolhas, neste caso, é bem definida e sobe uniformemente pela coluna. Este fluxo é o chamado fluxo homogêneo. Quando os gases têm vazões maiores e consequentemente velocidades maiores, as bolhas se agregam e bolhas maiores são formadas (coalescência) e estas sobem mais rapidamente que as bolhas menores. Este fluxo é chamado heterogêneo. A conversão do soluto da fase gasosa para a fase líquida, nos casos de fluxo heterogêneo é sempre menor que em fluxo homogêneo (DECKWER *et al.*, 1991).

Quando são usadas colunas de diâmetros reduzidos (estreitas), as bolhas maiores formadas na zona heterogênea são estabilizadas pelas paredes da coluna e sobem como se fossem um pistão. Essas bolhas alongadas preenchem toda a secção da coluna e coletam bolhas menores no seu caminho (DECKWER *et al.*, 1991). A Figura 3 mostra os três tipos de fluxo descritos anteriormente.

Figura 3 – Tipos de fluxo ascensional das bolhas



Fonte: Deckwer *et al.* (1991)

O tamanho com que as bolhas de gás entram e ascendem em uma coluna é função de vários parâmetros, como a vazão de gás que entra na coluna por meio do orifício ou difusor, o diâmetro do orifício, a turbulência existente na coluna, entre outros. De forma simples, resume-se que o tamanho é função da hidrodinâmica e das propriedades do líquido (TREYBAL, 2004; SALLA, 2006).

A velocidade ascensional das bolhas é um fator importante na transferência de massa. Segundo Treybal (2004), existe diferença entre o valor da velocidade de subida de uma bolha

individual e de muitas bolhas. No caso de muitas bolhas, a velocidade ascensional costuma ser menor devido a fatores como: o aglomerado de bolhas apresenta maior resistência ao deslocamento; o diâmetro das bolhas pode ser alterado em decorrência da turbulência que é gerada no líquido pela ação do aglomerado, podendo causar quebras e coalescência de bolhas.

A ocorrência de coalescência e separação de bolhas dependem das condições de operação, tais como vazão de aeração no difusor, nível líquido na coluna, além das propriedades dos líquidos, como viscosidade, densidade e tensão superficial (SALLA, 2002).

Dentre as várias configurações de câmaras de contato gás-líquido pode-se destacar: a difusão convencional de bolhas, a mistura por turbina, o injetor e o misturador estático, a coluna empacotada, a câmara vaporizada, o tubo em U e a turbina radial estática submersa (SOARES, 2007).

Mitani *et al.* (2005) determinaram o coeficiente volumétrico de transferência de massa, variando-se a vazão de gás e do líquido, bem como o tipo de difusor. Os autores concluíram que, na utilização de difusores microporosos, a vazão do líquido é mais importante que a do gás no processo de transferência de massa, contrário para difusores convencionais.

Hermann *et al.* (2001) estudaram a transferência de massa em colunas de ozonização e concluíram que, sistemas de ozonização operados em corrente, apresentam perfis de concentração de ozônio na fase líquida melhor distribuídos do que quando comparados com sistemas em contracorrente. Por outro lado, a transferência de ozônio da fase gasosa para a líquida em sistemas contracorrentes mostrou-se mais eficiente.

Para Salla (2002), na determinação do coeficiente de transferência de massa global, um dos principais parâmetros na especificação da intensidade dessa transferência é a área interfacial das bolhas em contato com o líquido. Quanto maior for a área interfacial das bolhas de gás com o meio líquido, maior será a transferência de massa de gás. Para um mesmo volume de ar, quanto menor for o diâmetro das bolhas, maior será a sua quantidade. Consequentemente, maior será a área interfacial de contato.

A transferência de massa fica prejudicada em águas com grandes quantidades de impurezas, as quais ficam aderidas nas superfícies das bolhas, diminuindo a área interfacial de troca de massa (MOTARJEMI e JAMESON, 1978; SOARES, 2007; SALLA *et al.*, 2011).

O nível líquido dentro da coluna é uma variável muito importante no estudo da transferência

de massa gás-líquido. Teoricamente, grandes alturas de água (ou esgoto) propiciam maior tempo de contato entre as bolhas e o meio líquido. Tangencialmente, quanto maior for o tamanho das bolhas, menor será o tempo de contato com o meio-líquido. Visto que, para uma mesma vazão, o tamanho das bolhas aumenta com o aumento da altura de água dentro da coluna de ozonização, necessita-se verificar qual a vantagem dos grandes níveis líquidos no estudo da eficiência de transferência de massa, uma vez que as bolhas têm seu tempo de contato diminuído (SALLA, 2006).

Esta avaliação de influência da hidrodinâmica de bolhas na transferência de massa ar-líquido foi muito importante na definição das configurações experimentais aqui adotadas.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE A EMPRESA

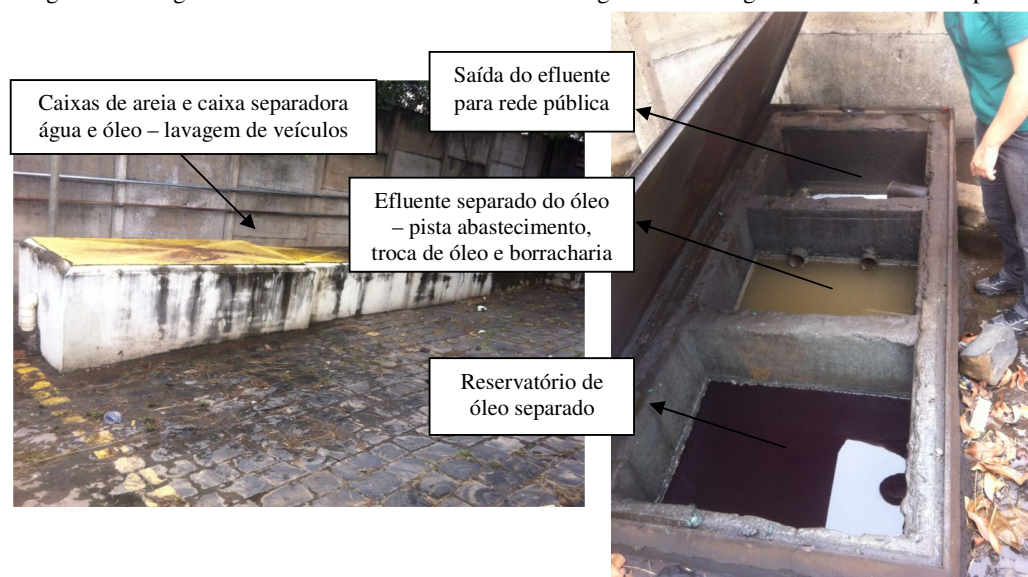
O efluente foi coletado em uma empresa que atua no setor de Transporte Rodoviário de Passageiros e está localizada na área urbana do município de Uberlândia (MG), na mesorregião do Triângulo Mineiro. Com uma população estimada de 604.013 habitantes, o município abrange uma área de aproximadamente 4.115,206 km², segundo o IBGE (2013). O município possui uma estrutura e posição geográfica privilegiadas, está localizada próxima aos grandes centros do país, tais como São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Goiânia e Brasília. Está inserido na bacia hidrográfica do rio Paraná, sub-bacia hidrográfica do rio Paranaíba e Unidades de Planejamento de Gestão de Recursos Hídricos – PN2 (rio Araguari) e PN3 (Rio Tijuco) (UBERLÂNDIA, 2013).

Na empresa onde foi coletado o efluente, as áreas de contribuição para a geração do efluente aqui estudado são constituídas pelos departamentos de lavagem de veículo, área de abastecimento, troca de óleo e borracharia. A água utilizada na empresa é proveniente de uma captação de água subterrânea por meio de poço tubular e da rede pública de abastecimento.

A lavagem dos veículos ocorre durante todo o dia, com uma média de 50 veículos por dia. Para cada veículo são gastos aproximadamente 0,45 m³ de água, dando um total aproximado de 22,5 m³ de água utilizados por dia. A lavagem externa é mecanizada do tipo *rollover* e manual, com produtos de base ácida e detergente alcalino desengraxante.

O tratamento dos efluentes líquidos oleosos gerados na lavagem dos veículos (ônibus) é constituído apenas por gradeamento (retenção de sólidos grosseiros), caixa de areia (deposição de sólidos suspensos) e separador água/óleo (retenção de óleos livres), conforme apresentado na Figura 4. Após o tratamento, o efluente é lançado na rede pública coletora.

Figura 4 – Imagem do sistema de tratamento do efluente gerado na lavagem de veículos da empresa



Fonte: Próprio autor (2014).

3.2 COLETA DE AMOSTRAS

As coletas se iniciaram no mês de março de 2013 e a última coleta ocorreu no mês de março de 2014. No total, foram realizadas 14 coletas, sendo uma coleta por mês, com exceção do mês de abril de 2013 em que ocorreram duas coletas. A Tabela 5 apresenta as datas das coletas realizadas e os respectivos ensaios realizados.

Tabela 5 – Datas das coletas e ensaios realizados

Datas das coletas	Ensaio realizado
19/03/2013 16/04/2013 29/04/2013 23/05/2013 20/06/2013	Ar comprimido
19/07/2013 23/08/2013 20/09/2013 28/10/2013	Oxigênio puro
06/11/2013 18/12/2013 17/01/2014 21/02/2014	Ozonização convencional
24/03/2014	Ozonização com adição de carvão ativado

As amostras foram coletadas no último compartimento do sistema de tratamento de efluente da empresa e acondicionadas em recipientes de polietileno de alta densidade (PEAD) com capacidade individual de 25 L, e o número variou entre dez a vinte recipientes em cada coleta, aproximadamente 400 L de efluente, a fim de se permitir a execução dos ensaios com segurança.

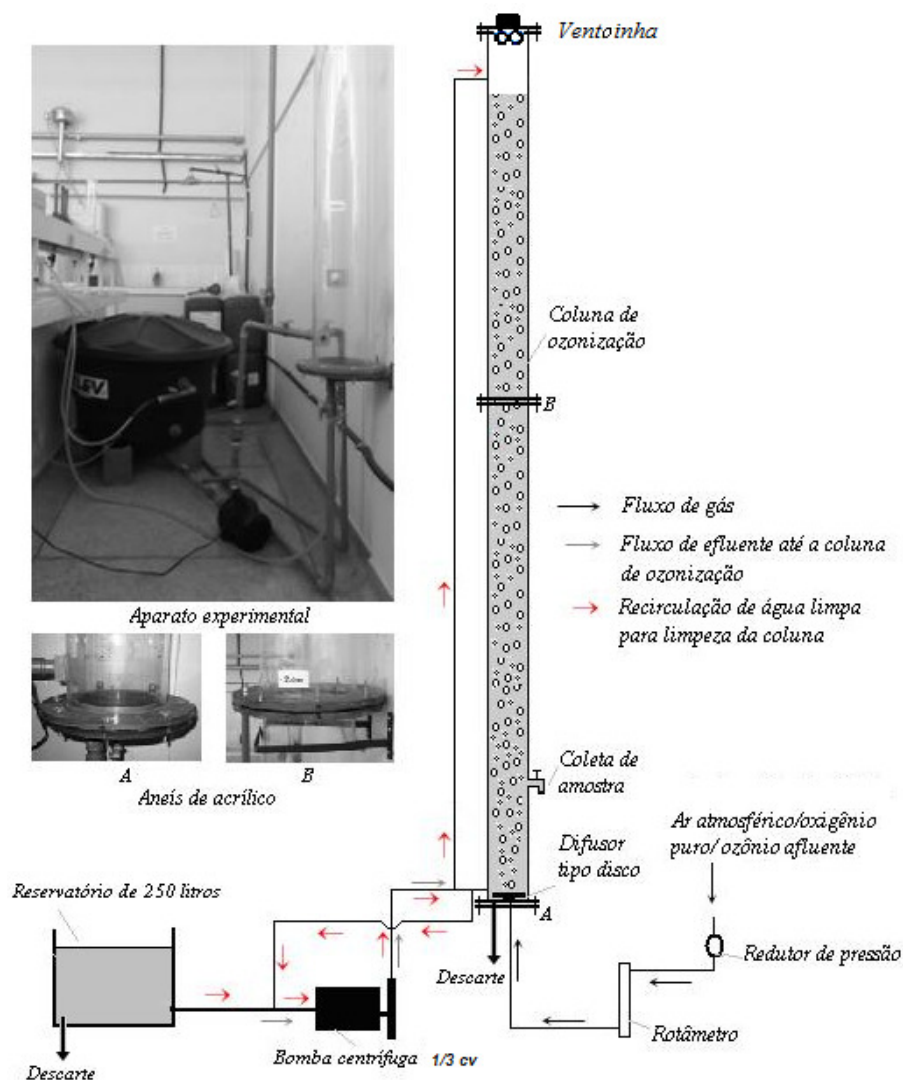
Os recipientes cheios foram transportados para o Laboratório de Saneamento, da Faculdade de Engenharia Civil, para execução dos ensaios. Todo o transporte foi cedido pela Universidade Federal de Uberlândia, através de agendamento prévio para solicitação de veículo com condutor.

3.3 COLUNA DE AERAÇÃO

A coluna é formada por uma tubulação de acrílico de 172 mm de diâmetro interno, com 5 mm de espessura de parede e 4 m de altura, utilizando braçadeiras específicas e uma estrutura em aço na base para sustentá-la. A tubulação em acrílico teve a finalidade de facilitar a visualização das bolhas ascensionais e do bom funcionamento do difusor microporoso.

A base da coluna é formada por uma placa circular de acrílico, diâmetro 190 mm e espessura 10 mm, fixada a um anel de acrílico com o mesmo diâmetro externo e espessura, vedada por meio de parafusos igualmente distanciados ao longo do perímetro do anel. Visto que cada tubulação de acrílico possui 2 m de comprimento, foi necessário unir as duas tubulações utilizando também anéis de acrílico. As instalações hidráulicas ilustradas na Figura 5 possibilitaram o enchimento da coluna, a recirculação do líquido contido na coluna e seu esvaziamento.

Figura 5 – Aparato experimental



Fonte: Adaptação de Salla *et al.* (2011)

O difusor de ar utilizado é de material microporoso de formato em disco, com diâmetro de 150 mm, de fabricação nacional e capaz de gerar bolhas finas (Figura 6). O conjunto motor bomba de 1/3 cv foi utilizado para promover a entrada do efluente na coluna e a recirculação de água limpa para limpeza da parede interna da mesma.

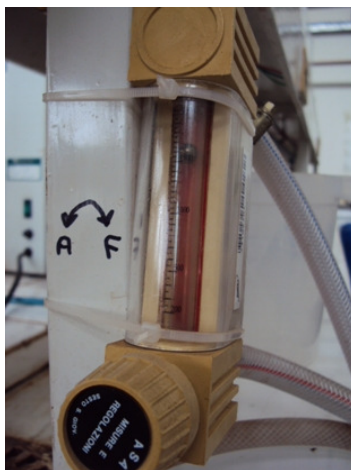
Figura 6 – Difusor de ar microporoso utilizado



Fonte: Próprio autor (2013).

A Figura 7 mostra o rotâmetro utilizado neste estudo, o qual possibilitou o ajuste fino da vazão do gás afluente à coluna, graduado de 200 até 2000 L/h. Para o controle adequado da pressão de gás na entrada do difusor, foi utilizado um redutor de pressão na rede, evitando, com isso, danos ao difusor microporoso.

Figura 7 – Rotâmetro utilizado



Fonte: Próprio autor (2013).

As coletas das amostras borbulhadas foram feitas por meio de uma estrutura de acrílico, dotada de registro, instalada na parede lateral da coluna, à aproximadamente 250 mm da base. As dimensões internas desta estrutura são de 120 mm de comprimento, 20 mm de largura e 20 mm de altura. Assim, os primeiros 50 mL de cada coleta foram descartados, para se desconsiderar o volume morto de efluente que se encontrava no interior desta estrutura, durante o processo de borbulhamento da massa líquida.

3.4 OZONIZADOR

O equipamento gerador de ozônio utilizado neste trabalho de mestrado foi emprestado pela Faculdade de Medicina Veterinária da Universidade Federal de Uberlândia. O equipamento possui as seguintes especificações técnicas: capacidade de produção de ozônio de 1,8 gO₃/h, concentração regulável manualmente com dosador pela frequência em 10 posições e regulador de fluxo de oxigênio adaptável no cilindro de oxigênio com 10 fluxos (0 até 1 L/min) (OZONE & LIFE, 2014). O ozônio foi produzido a partir de oxigênio puro. A Figura 8 ilustra o equipamento gerador de ozônio utilizado.

Figura 8 – Equipamento gerador de ozônio utilizado



Fonte: Próprio autor (2013).

3.5 CONFIGURAÇÕES DOS ENSAIOS

O efluente era lançado em um reservatório de 250 litros de capacidade e, posteriormente, bombeado até a coluna de acrílico para o início dos experimentos (ver Figura 6). No presente estudo trabalhou-se com escoamento descontínuo (batelada), impulsionado pela limitação quantitativa do efluente, consequência da grande distância geográfica entre a empresa fornecedora do efluente e o Laboratório de Saneamento da Faculdade de Engenharia Civil da UFU.

A fim de se reter sólidos e a pequena parcela de lodo carregado durante a coleta, o efluente era coado em tecido de malha grossa, mais comumente utilizado como pano de limpeza doméstica. Uma grade com tela servia de apoio para o tecido durante o processo. Esse processo foi realizado a fim de reter impurezas grosseiras, evitando danificar o difusor microporoso.

De acordo com o plano de trabalho inicial, nos estudos de arraste de gases, estava previsto a realização de ensaios para níveis líquidos de 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m e 2,0 m e vazões de aeração

de 500, 1000, 1500 e 2000 L/h, coletando amostras para tempos de contato de 5, 20 e 40 minutos. Entretanto, durante a execução dos primeiros ensaios, mesmo para os menores níveis líquidos e vazões de aeração, devido às acentuadas concentrações de detergentes nos efluentes estudados, houve excessiva formação de espuma, que acarretou o transbordamento junto ao topo da coluna, conforme ilustra a Figura 9.

Figura 9 – Excesso de espuma formado durante a execução dos experimento iniciais



Fonte: Próprio autor (2013).

Como solução a este problema, os ensaios foram limitados a 20 minutos, excluído o nível líquido de 2 m e o tempo de contato de 40 minutos, por serem configurações críticas na formação de espuma, sendo também instalada uma ventoinha junto ao topo da coluna (Figura 10). A instalação da ventoinha foi feita de forma a deixar um espaço para a eliminação de gases provenientes da aeração, com funcionamento da seguinte maneira: a espuma, ao se aproximar do topo da coluna, foi quebrada pela circulação de ar proveniente da ventoinha; os gases presentes no interior das bolhas foram liberados e o efluente carregado pela espuma retorna a coluna, evitando assim o seu transbordamento.

Figura 10 – Ventoinha instalada junto ao topo da coluna



Fonte: Próprio autor (2013).

Os trabalhos experimentais foram realizados em três etapas. Na primeira etapa estudou-se o arraste de matéria orgânica volátil por meio do borbulhamento de ar comprimido e oxigênio puro. Na segunda etapa estudou-se a capacidade oxidativa do ozônio em efluente advindo da atividade automotiva, em diferentes valores de pH. Na terceira etapa foi realizado o estudo da ozonização na presença de carvão ativado, como catalisador da reação.

Independente da etapa de estudo, a metodologia empregada para injeção do gás foi a mesma. Neste contexto, o gás a ser borbulhado na coluna, no trajeto desde o cilindro de armazenamento até a entrada do difusor microporoso, passava sequencialmente pelo redutor de pressão e pelo rotâmetro, conforme esquema ilustrado na Figura 5.

3.5.1 ARRASTE DE GASES

O início dos experimentos de arraste de matéria orgânica volátil ocorria com o bombeamento do efluente armazenado no reservatório de 250 L para a coluna até o nível líquido desejado, onde se optou sempre por começar pelo nível líquido de 0,5 m. Neste momento era coletada uma amostra de efluente (efluente bruto) para caracterização e avaliação de desempenho. Em seguida, iniciava-se o processo de aeração com a vazão de borbulhamento de 500 L/h. Juntamente com o início da aeração, os tempos de contato de 5 e 20 minutos eram cronometrados. Transcorrido o tempo de contato desejado entre as bolhas ascensionais e o meio líquido, o ensaio era finalizado, coletava-se 250 mL do efluente e, posteriormente, o efluente ensaiado contido na coluna era descartado. O processo recomeçava, mantendo o mesmo nível líquido e repetindo o experimento para vazões de 1000, 1500 e 2000 L/h. Depois de finalizadas todas as vazões, prosseguiu-se para o próximo nível líquido, reproduzindo a mesma sequência experimental. As configurações estudadas estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Configurações analisadas para o arraste de gases

Variáveis	Arraste de gás	
	Ar comprimido	O ₂
Nível líquido	0,5 a 1,5 m (intervalo de 0,5 m)	
Vazão de gás	500 a 2000 L/h (intervalo de 500 L/h)	
Tempo de contato	0, 5 e 20 min	
pH	<i>In natura</i>	

Fonte: Próprio autor (2014).

Os experimentos de arraste foram realizados por meio do borbulhamento de ar comprimido e oxigênio puro. A Figura 11 ilustra o borbulhamento de ar comprimido no efluente advindo da empresa do ramo de atividade automotiva e as amostras coletadas logo após o ensaio.

Figura 11 – Borbulhamento de ar comprimido no efluente e amostras coletadas após o ensaio



Fonte: Próprio autor (2013).

3.5.2 OZONIZAÇÃO CONVENCIONAL

Em função da limitada pressão gasosa na entrada do difusor microporoso e, consequentemente, para evitar a entrada de efluente líquido na tubulação de gás (o que também evidencia falhas no mecanismo de retenção líquida do difusor utilizado), nos estudos de ozonização convencional de efluente advindo de atividade automotiva fixou-se o nível líquido em 0,5 m. Foi utilizada a máxima capacidade de produção de ozônio permitida pelo equipamento utilizado, igual a 1,8 gO₃/h, fixando-se a vazão de ozônio injetada em 1,0 L/min e a concentração de ozônio em 30 mgO₃/L. De acordo com a Tabela 7, os experimentos de ozonização convencional foram realizados em três configurações diferentes de pH (*in natura*, 3 e 10) e, para cada experimento, as amostras foram coletadas nos tempos de contato de 0, 5, 20, 40, 60 e 90 minutos. Para a acidificação (em pH igual a 3) e alcalinização (em pH igual a 10) do efluente foram utilizados, respectivamente, ácido sulfúrico e hidróxido de sódio 20%.

Tabela 7 – Configurações analisadas para a ozonização convencional

Variáveis	Ozonização convencional
Nível líquido	0,5 m
Vazão de gás	60 L/h
Dose de O ₃	30 mg/L
Tempo de contato	0, 5, 20, 40, 60 e 90 min
pH	<i>In natura</i> /3,0/10,0

Fonte: Próprio autor (2014).

3.5.3 OZONIZAÇÃO CATALISADA POR CARVÃO ATIVADO

Experimentos com ozônio na presença de carvão ativado (CA) também foram realizados com o propósito de avaliar as contribuições catalíticas do carvão ativado para o processo de ozonização, cujas configurações experimentais estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Configurações analisadas para a ozonização catalisada por carvão ativado

Variáveis	Ozonização catalisada por carvão ativado
Nível líquido	0,5 m
Vazão de gás	60 L/h
Dose de O ₃	30 mg/L
Concentração de carvão ativado	nula, 1 g/L e 2g/L
Tempo de contato	0, 5, 20, 40, 60 e 90 min
pH	<i>In natura</i> /3,0

Fonte: Próprio autor (2014).

Para fins comparativos, foram realizadas as mesmas configurações experimentais utilizadas nos ensaios de ozonização convencional, com exceção das configurações de pH que, em função dos resultados obtidos nos experimentos de ozonização convencional, neste caso as análises ocorreram em pH *in natura* e pH 3,0.

Todos os ensaios foram realizados utilizando o efluente coletado no dia 24/03/2014, com intuito de minimizar o efeito das variações que podem ocorrer quando se realizam coletas em dias diferentes, uma vez que é um efluente com uma matriz complexa que por si só já ocorrem variações em sua composição.

Para efeito de comparação, no primeiro momento foram realizados os ensaios com ozônio

sem a adição de carvão ativado, em pH *in natura*, com as mesmas configurações experimentais apresentadas nos estudos de ozonização convencional de efluente.

Posteriormente foram realizados os ensaios de ozonização, em pH *in natura*, com a presença de carvão ativado na concentração de 1 g/L. No próximo ensaio, a ozonização ocorreu em pH 3, com a presença de carvão ativado na concentração de 1g/L. Repeti-se o mesmo procedimento variando a concentração de carvão ativado no meio para 2g/L, para pH *in natura* e posteriormente para pH 3.

3.5.4 PARÂMETROS ANALISADOS

Nos estudos de arraste de matéria orgânica volátil e de ozonização convencional e catalítica foram analisados cinco parâmetros de qualidade, sendo: pH, alcalinidade, DQO, turbidez e cor verdadeira. Para a ozonização em pH igual a 3, não foi considerada a alcalinidade, visto que o pH inicial da amostra já encontrava-se abaixo do pH de viragem do método para quantificação deste parâmetro.

A ozonização do efluente foi monitorada espectrofotometricamente, utilizando um espectrofotômetro na região do UV-Visível de 200 a 750 nm, para identificar as alterações das curvas de absorbâncias do efluente *in natura* frente ao afluente tratado com ozônio após os tempos de contato de 5, 20, 40, 60 e 90 minutos. O intuito foi observar os picos de absorção ao longo do espectro. Caso o pico mudasse de posição ao longo do comprimento de onda (eixo X) evidenciaria a presença de compostos diferentes e caso o pico de absorbância diminuísse (eixo Y) evidenciaria a redução de um dado composto. Este monitoramento espectrofotométrico foi escolhido, adicionalmente, em função das reduzidas eficiências de redução de DQO na ozonização convencional, na tentativa de constatar a redução de um composto orgânico pela diminuição do pico de absorbância e também foi realizada para a ozonização com adição de carvão ativado. Estas varreduras foram realizadas por um espectrofotômetro U-VIS.

Foram seguidas as recomendações estabelecidas pelo APHA – *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (2012). Todas as análises físico-químicas foram finalizadas em, no máximo, 48h após a execução dos ensaios. Na sequência são feitas algumas observações importantes desses parâmetros.

- **pH**: definido como potencial hidrogeniônico e representa a concentração de íons hidrogênio (H^+)

presentes na água, em escala antilogarítmica. A faixa de pH varia entre 0 a 14, indicando a condição de acidez ou neutralidade da água. Quando o pH é menor que 7, a água apresenta caráter ácido e maior potencial de corrosividade, o que em casos extremos pode levar à deterioração das tubulações e peças por onde essa água passa. Quando o pH é igual a 7, a água apresenta condição de neutralidade e não oferece riscos. E quando o pH é maior que 7, a água apresenta caráter alcalino, o que em casos extremos pode levar ao surgimento de incrustações nas tubulações do sistema de distribuição (VON SPERLING, 2005). Neste trabalho as medições de pH foram realizadas por meio de um equipamento digital;

– **Alcalinidade:** capacidade da água de resistir às mudanças de pH causadas por ácidos. Essa capacidade ocorre pela presença de ânions na água, que reagirão para neutralizar os cátions de hidrogênio (H^+) presente nos ácidos. A alcalinidade é medida em miligramas por litro de carbonato de cálcio (mg/L de $CaCO_3$) e seus principais responsáveis são os sólidos dissolvidos na forma de bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{2-}) e os hidróxidos (OH^-). É um parâmetro importante na caracterização da água, visto que está relacionada com a redução da dureza, prevenção de incrustações em tubulações e controle da taxa de crescimento de microorganismos (VON SPERLING, 2005);

- **DQO:** a Demanda Química de Oxigênio (DQO) indica a quantidade de oxigênio que é consumida por meio de reações químicas de oxidação de diversos compostos orgânicos presentes, em mg/L, indicando de maneira indireta a quantidade de matéria orgânica presente no líquido (VON SPERLING, 2005). Para as medidas de DQO, as amostras foram digeridas em tubos contendo o reativo adequado, utilizando-se de um digestor. Um espectrofotômetro UV/VIS, contendo programa para análise de DQO foi empregado.

- **turbidez:** representa o grau de interferência pela passagem da luz através da água, dando uma aparência turva à mesma, medida em Unidade Nefelométrica de Turbidez (UNT) ou Unidade de Turbidez (UT). É causada pela presença de materiais em suspensão, ou seja, de materiais que não estão dissolvidos no fluido. A turvação pode ser causada por uma enorme variedade de matérias em suspensão, de origem orgânica ou inorgânica, variando em dimensão desde partículas coloidais até sólidos de dimensões macroscópicas (VON SPERLING, 2005). O equipamento utilizado neste trabalho foi um turbidímetro digital;

- **cor verdadeira:** a cor da água é ocasionada pela presença de substâncias metálicas como ferro e manganês, matérias húmicas, algas, plantas aquáticas, protozoários e resíduos

orgânicos ou inorgânicos de despejos industriais. A cor verdadeira é aquela em que a turbidez foi eliminada por meio de centrifugação ou filtração, ou melhor, a que resulta apenas da presença de substâncias orgânicas no estado coloidal e em solução. A cor é determinada pela comparação visual da amostra com soluções conhecidas de platina cobalto ou com discos de vidro corados com a solução de platina cobalto. Uma unidade de cor corresponde aquela produzida por 1 mg/l de platina na forma de íon cloroplatinado. Neste trabalho foi utilizado o aparelho DR/2000 na determinação da cor verdadeira.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os estudos de arraste de matéria orgânica volátil, por meio do borbulhamento de ar comprimido e oxigênio puro, e da ozonização convencional e catalítica de efluente da atividade automotiva foram realizados em escoamento descontínuo (batelada), cujas configurações foram mencionadas anteriormente. Foram realizadas as coletas do efluente pré-tratado em sistema separador água e óleo durante os meses de março de 2013 até março de 2014, com vários experimentos para o mesmo efluente coletado.

O número acentuado de experimentos analisados, para características físicas e químicas variadas do efluente bruto, gerou uma ampla faixa de valores de eficiência de redução para os parâmetros turbidez, DQO, alcalinidade e cor verdadeira, com comportamentos temporais também variados. Ou seja, as curvas de eficiência de redução dos parâmetros *versus* o tempo de contato não mantinham o mesmo comportamento. Devido à esta complexidade, para cada parâmetro estudado, optou-se por analisar os resultados a partir da média de eficiência de redução dos experimentos em triplicata e quadruplicata.

Os itens 4.1 e 4.2 trazem os resultados das eficiências médias de redução dos experimentos em quadruplicata para arraste de gases utilizando, respectivamente, ar comprimido e oxigênio puro. Já o item 4.3 traz o resultado da eficiência média de redução dos experimentos em triplicata de ozonização convencional. O item 4.4 apresenta o resultado da eficiência média de redução obtidos para os ensaios de ozonização catalisada por carvão ativado (em pH *in natura*, pH 3 e comparativo com ozonização sem carvão ativado) e o item 4.5 traz os espectros de varredura, para a ozonização convencional e para a ozonização catalítica.

4.1 ARRASTE DE GASES – AR COMPRIMIDO

A Tabela 9 apresenta as características físico-químicas do efluente de lavagem automotiva estudado através dos valores médios e o desvio padrão dos parâmetros cor verdadeira, turbidez, DQO e alcalinidade obtidos para o efluente bruto antes da realização dos ensaios com borbulhamento de ar comprimido.

Tabela 9 – Características físico-químicas do efluente bruto, antes do borbulhamento de ar comprimido.

Parâmetros	Nível líquido (m)	Vazão 500 L/h		Vazão 1000 L/h		Vazão 1500 L/h		Vazão 2000 L/h	
		Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
Cor verdadeira (mgPt-Co/L)	0,5	72,9	17,2	89,4	11,0	79,8	14,7	84,2	14,2
	1,0	78,3	15,6	94,0	17,3	88,0	23,3	89,3	11,4
	1,5	68,50	8,51	82,58	7,03	81,50	10,98	78,25	10,88
Turbidez (NTU)	0,5	97,5	40,9	90,5	22,6	97,8	25,7	90,3	25,8
	1,0	90,8	11,8	91,7	10,3	91,5	12,1	86,7	19,0
	1,5	76,28	23,28	82,33	30,52	76,83	21,56	68,54	13,88
DQO (mgO₂/L)	0,5m	231,7	76,3	227,5	53,8	222,1	53,2	224,8	49,7
	1,0	222,9	47,7	224,2	50,9	224,8	37,6	226,7	41,0
	1,5	193,75	55,22	209,79	64,12	205,83	54,04	207,08	42,26
Alcalinidade (mgCaCO₃/L)	0,5	66,7	6,0	68,9	6,9	70,1	1,9	70,3	4,4
	1,0	107,3	66,0	115,0	87,1	111,9	76,9	116,8	80,1
	1,5	68,18	1,26	72,12	3,32	70,18	1,54	71,12	6,11

A Tabela 10 traz a eficiência de redução para os parâmetros cor verdadeira, turbidez, DQO e alcalinidade a partir do borbulhamento de ar comprimido, nas configurações descritas na Tabela 6.

Tabela 10 – Eficiência de redução para os parâmetros cor verdadeira, turbidez, DQO e alcalinidade, a partir do borbulhamento de ar comprimido

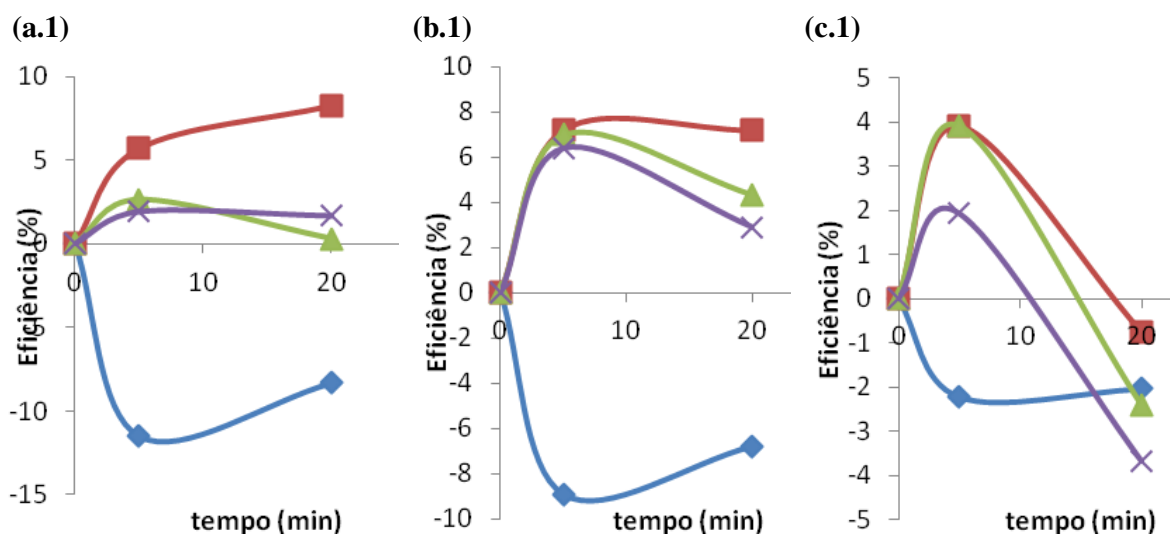
Parâmetro	Nível líquido (m)	Eficiência de redução (%)							
		Vazão 500 L/h		Vazão 1000 L/h		Vazão 1500 L/h		Vazão 2000 L/h	
		Tempo (min)		Tempo (min)		Tempo (min)		Tempo (min)	
		5	20	5	20	5	20	5	20
Cor verdadeira (mgPt-Co/L)	0,5	11,5	-8,3	5,7	8,3	2,7	0,3	1,9	1,6
	1,0	-8,9	-6,8	7,2	7,2	6,9	4,3	6,4	2,9
	1,5	-2,2	-2,0	3,9	-0,8	3,9	-2,4	1,9	-3,7
Turbidez (NTU)	0,5	0,3	10,5	3,9	14,8	5,2	14,3	11,7	10,8
	1,0	-0,9	3,5	-0,6	4,5	3,7	5,9	7,1	4,3
	1,5	-1,5	5,14	-6,5	3,2	4,9	10,1	4,1	10,1
DQO (mgO₂/L)	0,5	1,5	2,5	2,0	3,7	1,55	5,10	7,5	-1,64
	1,0	2,7	3,1	-1,2	2,9	2,7	4,6	2,1	5,3
	1,5	-2,3	1,5	1,7	4,7	1,7	3,5	5,4	2,9
Alcalinidade (mgCaCO₃/L)	0,5	-3,21	3,92	-1,18	-1,16	-4,12	-2,1	4,02	-3,28
	1,0	1,7	-1,6	-6,1	-4,9	1,7	1,9	1,3	2,2
	1,5	1,9	0,1	3,6	5,0	2,0	2,8	-4,8	-7,2

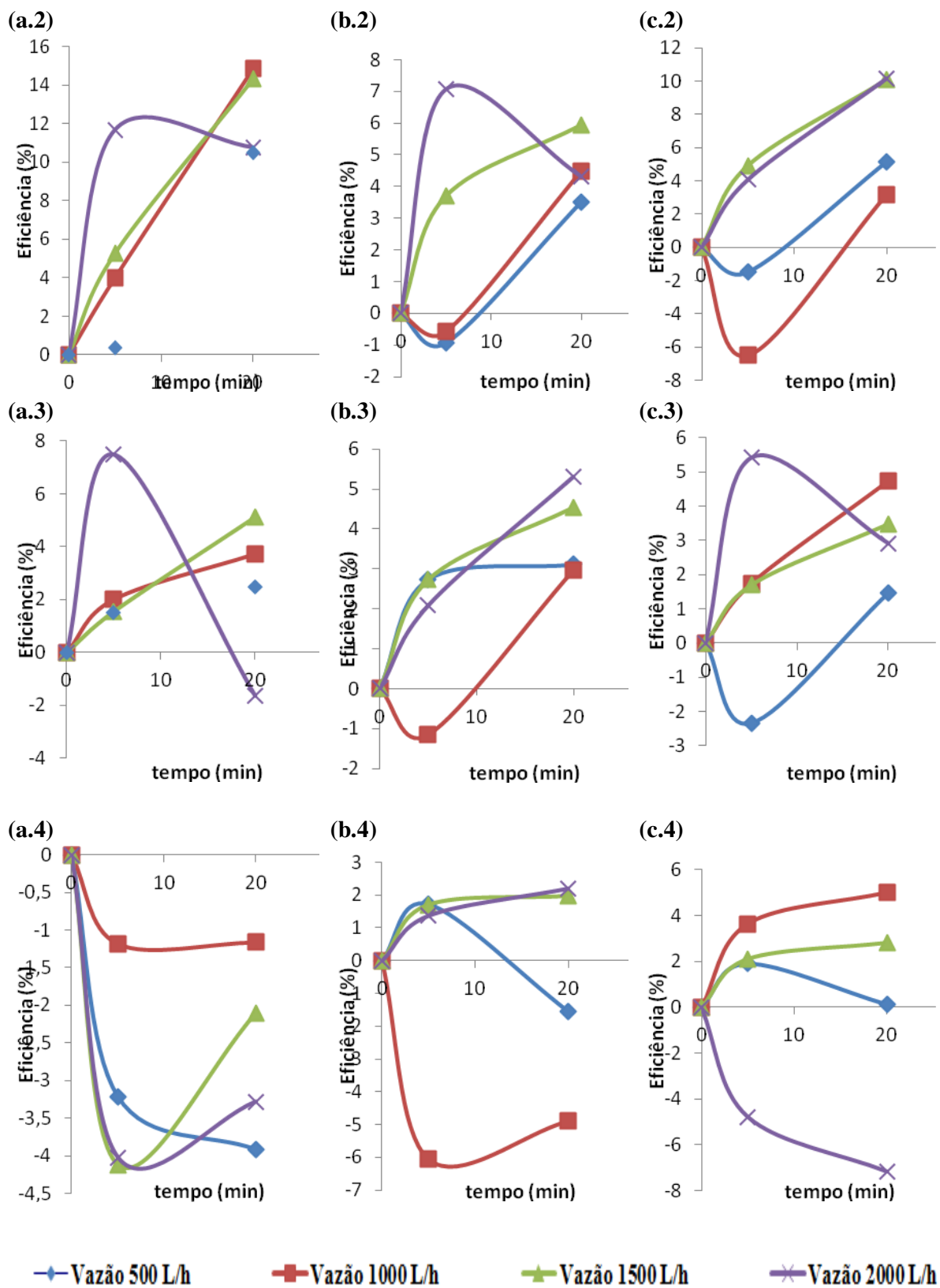
Conforme já mencionado anteriormente, o objetivo do estudo de borbulhamento de ar comprimido foi avaliar a existência ou não de arraste de matéria orgânica volátil do efluente

advindo de atividade automotiva. Paralelamente, por motivos hidrodinâmicos dentro da coluna, detectou uma pequena eficiência de redução dos outros parâmetros. Os valores em destaque na Tabela 10 (em negrito), indicam as maiores eficiências de redução para cada parâmetro, dentre todas as configurações estudadas. É possível observar que não existe uma tendência lógica que relaciona o nível líquido e a vazão injetada nos resultados. Para cada parâmetro, a maior eficiência de redução foi obtida em configurações experimentais distintas, a saber: nível líquido de 0,5 m, vazão de borbulhamento de 1000 L/h e tempo de contato de 20 minutos para os parâmetros cor verdadeira e turbidez; nível líquido de 0,5 m, vazão de borbulhamento de 2000 L/h e tempo de contato de 5 minutos para o parâmetro DQO; nível líquido de 1,5 m, vazão de borbulhamento de 1000 L/h e tempo de contato de 20 minutos para o parâmetro alcalinidade.

Os resultados ilustrados na Tabela 10 são melhores visualizados a partir de gráficos, conforme ilustra a Figura 12. Todos os dados experimentais obtidos, que resultaram nos gráficos mostrados na Figura 12 estão disponibilizados no Apêndice A.

Figura 12 – Eficiência de redução (em %) de: 1) Cor verdadeira, 2) Turbidez, 3) DQO e 4) Alcalinidade, para os níveis líquidos: a) 0,5 m, b) 1,0 m e c) 1,5 m, pelo borbulhamento de ar comprimido





De acordo com a Figura 12, nos experimentos em que houve aumento dos parâmetros cor verdadeira, turbidez, DQO e alcalinidade (ou porcentagem de redução negativa) nos primeiros 5 minutos de borbulhamento e, conseqüente porcentagem de redução positiva nos outros tempo de contato, observou-se que o efluente de atividade automotiva pré-tratado apresentava alta carga de material suspenso inorgânico juntamente com matéria orgânica adsorvida. Isso proporcionou uma sedimentação gradual do material suspenso após o enchimento da coluna, antes do início de cada experimento, que fez com que os parâmetros analisados no tempo zero apresentassem valores inferiores aos medidos no tempo de contato de 5 minutos, no qual existia o revolvimento de todo o material depositado no fundo por meio do processo de borbulhamento do gás injetado no difusor microporoso. Os experimentos que apresentaram variações positivas dos parâmetros (ou diminuição do valor de cada parâmetro), possuem relação direta com a baixa concentração de sólidos suspensos inorgânicos juntamente com a matéria orgânica adsorvida.

O ar comprimido borbulhado apresenta baixíssima capacidade oxidativa, podendo, para alguns tipos de efluentes, ocasionar a redução da matéria orgânica apenas pelo processo de arraste. Como consequência, possíveis alterações dos parâmetros turbidez, cor verdadeira e alcalinidade estão diretamente relacionadas aos aspectos hidrodinâmicos dentro da coluna de aeração.

Neste contexto, as eficiências negativas de redução da cor verdadeira (ou seja, aumento de seu valor ao longo do tempo) para a menor vazão (500 L/h), Figuras 12(a.1), 12(b.1) e 12(c.1), indicam que, independente das características do efluente estudado, esta vazão ocasionou apenas a mistura do efluente na coluna. Já nas vazões maiores, os maiores gradientes de redução observados no tempo de contato de 5 minutos estão relacionados à flotação do material orgânico e inorgânico adsorvido às bolhas ascensionais.

As variações na eficiência de redução de turbidez, de acordo com as Figuras 12(a.2), 12(b.2) e 12(c.2), ocorreram pelos mesmos motivos argumentados anteriormente para o parâmetro cor verdadeira. Adicionalmente, constatou-se uma relação direta entre a vazão de injeção do gás e a eficiência de redução da turbidez, para um mesmo tempo de contato. As maiores eficiências de redução de turbidez, para as vazões elevadas, estão associadas ao maior número de bolhas e, como consequência, à maior área interfacial de contato entre o material coloidal e suspenso com a superfície das bolhas. Por meio da trajetória ascensional das bolhas, o material inorgânico é adsorvido à superfície das mesmas, sendo transportado até a superfície líquida.

Neste local, dependendo do tempo de borbulhamento e da quantidade de espuma formada, o material inorgânico e o orgânico adsorvido mantêm-se junto às espumas e, portanto, fora da massa líquida, ou, devido ao acúmulo acentuado de espuma, podem retornar à massa líquida. Esta situação é que faz com que a eficiência de redução de turbidez tenha um comportamento oscilatório.

Com relação ao parâmetro DQO, as Figuras 12(a.3), 12(b.3) e 12(c.3) mostram que, para o efluente de atividade automotiva estudado e para as configurações experimentais escolhidas, o arraste de gases (ou arraste de matéria orgânica volátil) por meio do borbulhamento de ar comprimido ocorreu em baixas proporções. Esta constatação está embasada nas reduzidas variações de DQO (na faixa de 3% a 5%) após 20 minutos de tempo de contato entre as bolhas ascensionais e o efluente. Acredita-se que esta redução esteja relacionada ao gás amônia presente no efluente estudado.

O comportamento oscilatório do parâmetro alcalinidade, medido pela associação de hidróxidos, carbonatos e bicarbonatos, apresenta difícil interpretação para as configurações estudadas, uma vez que não foi quantificado os gases dissolvidos presentes no efluente, tais como CO_2 , H_2S e amônia.

4.2 ARRASTE DE GASES – OXIGÊNIO PURO

A Tabela 11 apresenta as características físico-químicas do efluente estudado através dos valores médios e desvio padrão dos parâmetros cor verdadeira, turbidez, DQO e alcalinidade obtidos para o efluente bruto antes da realização dos ensaios com borbulhamento de oxigênio puro.

Tabela 11 – Características físico-químicas do efluente bruto, antes do borbulhamento de oxigênio puro

Parâmetros	Nível líquido (m)	Vazão 500 L/h		Vazão 1000 L/h		Vazão 1500 L/h		Vazão 2000 L/h	
		Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
Cor verdadeira (mgPt-Co/L)	0,5	162,67	71,37	204,00	81,35	191,11	48,36	213,56	79,82
	1,0	178,67	83,84	237,00	93,46	226,44	66,91	231,78	87,11
	1,5	175,22	94,05	203,56	102,56	190,11	79,57	184,11	89,83
Turbidez (NTU)	0,5	140,78	25,33	151,78	5,60	164,44	14,17	166,89	30,33
	1,0	170,33	18,11	164,44	30,57	169,33	29,05	171,44	34,88
	1,5	153,89	41,83	141,22	30,87	139,28	31,47	133,22	29,81
DQO (mgO ₂ /L)	0,5	397,78	25,95	390,28	18,64	382,22	17,00	387,22	28,36
	1,0	375,56	10,91	375,56	11,41	379,44	8,75	376,94	6,71
	1,5	385,56	11,33	389,72	11,41	385,28	11,71	389,17	8,36
Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	0,5	90,53	71,80	92,30	77,79	89,75	71,78	96,47	73,72
	1,0	286,03	199,50	309,58	205,91	352,95	215,06	323,39	195,19
	1,5	293,61	225,28	300,15	183,49	323,11	190,36	339,07	172,89

A Tabela 12 traz a eficiência de redução para os parâmetros cor verdadeira, turbidez, DQO e alcalinidade a partir do borbulhamento de oxigênio puro, nas configurações descritas na Tabela 6.

Tabela 12 – Eficiência de redução para os parâmetros cor verdadeira, turbidez, DQO e alcalinidade, a partir do borbulhamento de oxigênio puro

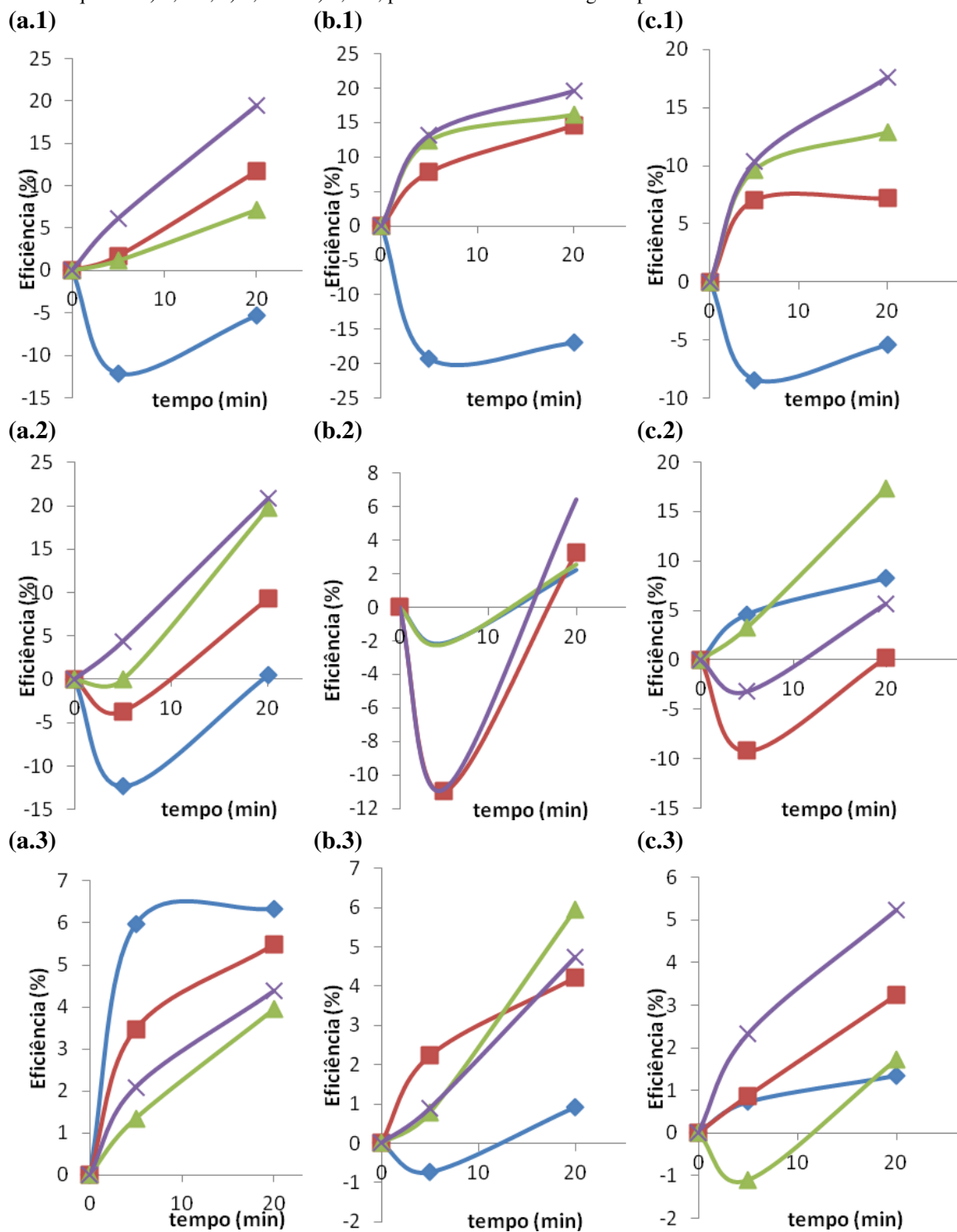
Parâmetros	Nível líquido (m)	Eficiência de redução (%)							
		Vazão 500 L/h		Vazão 1000 L/h		Vazão 1500 L/h		Vazão 2000 L/h	
		Tempo (min)		Tempo (min)		Tempo (min)		Tempo (min)	
		5	20	5	20	5	20	5	20
Cor verdadeira (mgPt-Co/L)	0,5	-12,1	-5,3	1,7	11,7	1,1	7,1	6,1	19,4
	1,0	-19,2	-16,9	7,9	14,6	12,4	16,2	13,2	19,7
	1,5	-8,4	-5,4	7,1	7,2	9,6	12,9	10,4	17,6
Turbidez (NTU)	0,5	-12,4	0,5	-3,7	9,3	-0,04	19,7	4,4	20,8
	1,0	-2,2	2,2	-11	3,3	-2,2	2,6	-10,9	6,4
	1,5	4,6	8,2	-9,2	0,2	3,2	17,3	-3,22	5,7
DQO (mgO ₂ /L)	0,5	5,9	6,3	3,5	5,5	1,3	3,5	2,1	4,4
	1,0	-0,7	0,9	2,2	4,2	0,8	5,6	0,9	4,7
	1,5	0,7	1,4	0,9	3,2	-1,1	1,7	2,3	5,2
Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	0,5	-6,1	-6,2	-5,8	-6,8	-7,8	-10,3	-3,5	-0,9
	1,0	-7,4	-10,6	-7,2	-7,2	-1,8	2,1	-7,75	-3,9
	1,5	-14,2	-8,9	-3,9	3,4	0,03	1,5	-0,3	-2,0

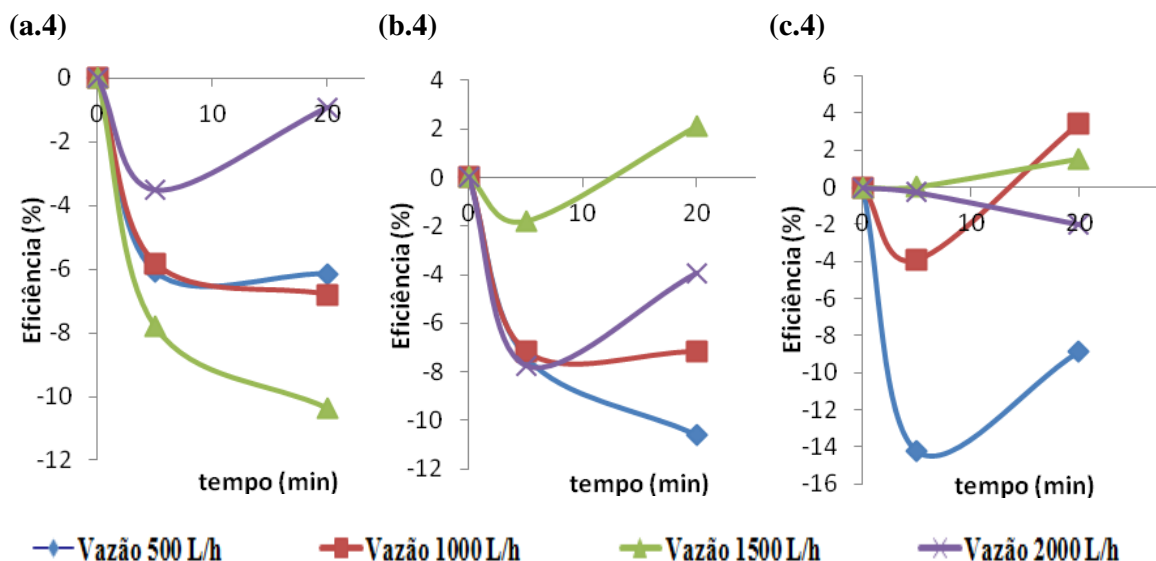
Os valores em destaque na Tabela 12 (em negrito), indicam as maiores eficiências de redução para cada parâmetro, dentre todas as configurações estudadas. Similar aos resultados de borbulhamento de ar comprimido, observa-se que não existe uma tendência lógica que relaciona o nível líquido e a vazão injetada nos resultados. Para cada parâmetro, a maior eficiência de redução foi obtida em configurações experimentais distintas, a saber: nível líquido de 1,0 m, vazão de borbulhamento de 2000 L/h e tempo de contato de 20 minutos para o parâmetro cor verdadeira; nível líquido de 0,5 m, vazão de borbulhamento de 2000 L/h e tempo de contato de 20 minutos para o parâmetro turbidez; nível líquido de 0,5 m, vazão de borbulhamento de 500 L/h e tempo de contato de 20 minutos para o parâmetro DQO; nível líquido de 1,5 m, vazão de borbulhamento de 1000 L/h e tempo de contato de 20 minutos para o parâmetro alcalinidade.

Os resultados ilustrados na Tabela 12 são melhores visualizados a partir de gráficos, conforme ilustra a Figura 13. Todos os dados experimentais obtidos que resultaram nos gráficos mostrados na Figura 13 estão disponibilizados no Apêndice B.

Similar aos resultados de borbulhamento de ar comprimido, as eficiências negativas de redução da cor verdadeira (ou seja, aumento de seu valor ao longo do tempo) para a menor vazão (500 L/h), Figuras 13(a.1), 13(b.1) e 13(c.1), indicam que, independente das características do efluente estudado, esta vazão ocasionou apenas a mistura do efluente na coluna. Já nas vazões maiores, os maiores gradientes de redução observados no tempo de contato de 5 minutos estão relacionados à flotação do material orgânico e inorgânico adsorvido às bolhas ascensionais. Ainda nas vazões maiores, para o mesmo tempo de contato, o aumento da eficiência de redução da cor verdadeira é diretamente proporcional ao aumento da vazão de injeção no difusor. Após 20 minutos de tempo de contato, as eficiências de redução para oxigênio puro foram superiores ao ar comprimido, alcançando 6 a 20%, 14 a 20% e 7 a 18%, respectivamente, para os níveis líquidos de 0,5 m, 1,0 m e 1,5 m.

Figura 13 – Eficiência de redução (em %) de: 1) Cor verdadeira, 2) Turbidez, 3) DQO e 4) Alcalinidade, para os níveis líquidos: a) 0,5 m, b) 1,0 m e c) 1,5 m, pelo borbulhamento oxigênio puro





O parâmetro turbidez não apresentou o mesmo comportamento apresentado pelo borbulhamento de ar comprimido. Aqui, não está clara a relação direta entre a vazão de injeção do gás e a eficiência de redução da turbidez, para um mesmo tempo de contato.

O oxigênio puro borbulhado apresenta certa capacidade oxidativa, podendo ocasionar a redução da matéria orgânica pelo processo de arraste de gases dissolvidos e oxidação da parte orgânica degradável. Todavia, os resultados da eficiência de redução de DQO pelo borbulhamento de oxigênio puro (Figuras 13(a.3), 13(b.3) e 13(c.3)), não apresentaram diferenças pelo borbulhamento de ar comprimido.

O comportamento oscilatório do parâmetro alcalinidade dificultou a interpretação para as configurações estudadas, uma vez que não foram quantificados os gases dissolvidos presentes no efluente, tais como CO₂, H₂S e amônia.

4.3 OZONIZAÇÃO CONVENCIONAL

Ao longo do período de realização dos experimentos, o efluente advindo de atividade automotiva estudado apresentou características distintas, tais como a cor do efluente e quantidade de sólidos. Este fato está relacionado com fatores que podem influenciar na sua qualidade, tais como: período do ano (chuvoso ou seco), quantidade de veículos lavados no dia, quantidade de produtos utilizados na lavagem dos veículos, entre outros. A Figura 14 apresenta amostras do efluente coletados em períodos distintos. Na Figura 14(b), em função

do aspecto turvo e escuro para o efluente, a visualização da redução de turbidez e cor verdadeira é facilitada.

Figura 14 – Amostras de efluente coletadas ao longo do tempo de contato



Fonte: Próprio autor (2013)

A Tabela 13 apresenta a caracterização do efluente estudado através dos valores médios e desvio padrão dos parâmetros cor verdadeira, turbidez, DQO e alcalinidade obtidos para o efluente bruto antes da realização dos ensaios de ozonização convencional.

Tabela 13 – Características físico-químicas do efluente bruto, antes do ensaio de ozonização convencional

Parâmetros	pH <i>in natura</i>		pH 10		pH 3	
	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
Cor verdadeira (mgPt-Co/L)	221,9	34,28	206,0	52,47	167,3	16,60
Turbidez (NTU)	145,0	18,26	200,6	30,79	167,8	49,18
DQO (mgO ₂ /L)	383,89	5,50	314,72	71,12	403,61	5,54
Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	93,06	10,85	446,08	89,94	Não realizado	

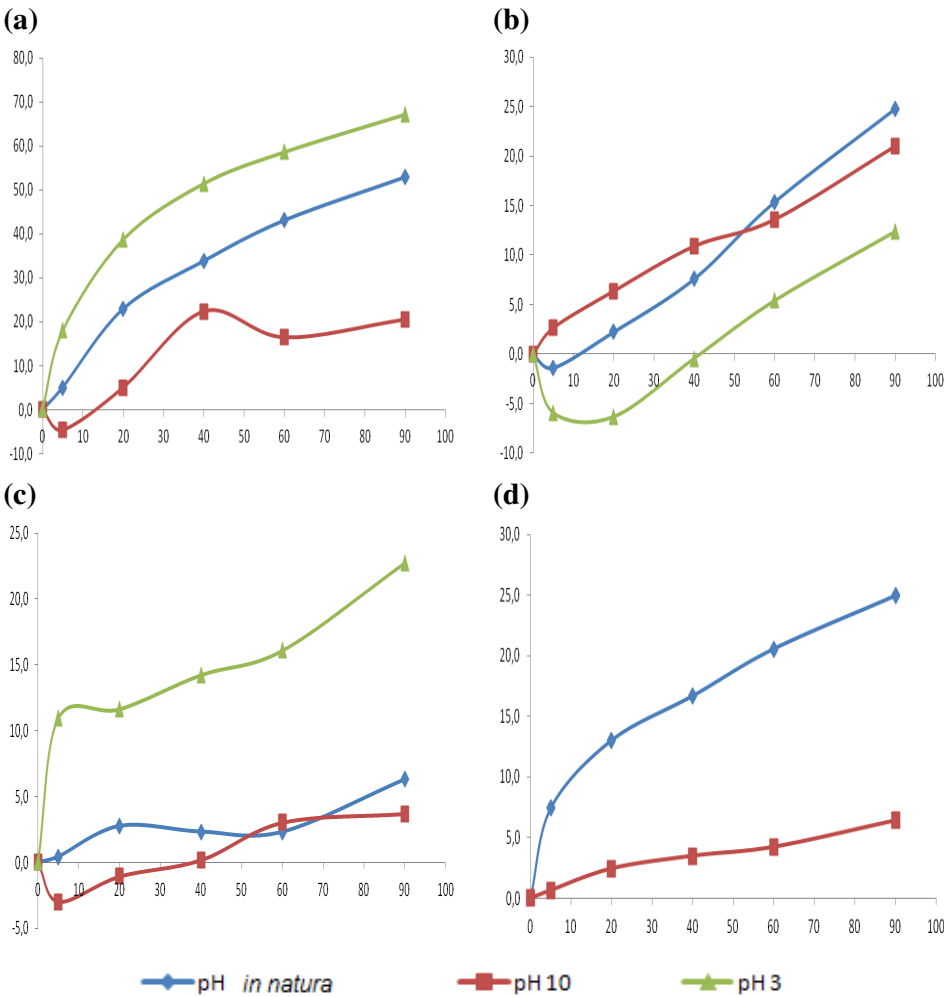
A Tabela 14 traz a eficiência de redução para os parâmetros cor verdadeira, turbidez, DQO e alcalinidade a partir da ozonização convencional, nas configurações descritas na Tabela 7. Os valores em destaque na Tabela 14 (em negrito), indicam as maiores eficiências de redução para cada parâmetro, dentre todas as configurações estudadas. Para cada parâmetro, a maior eficiência de redução foi de: 67,2% de redução para cor verdadeira (pH igual a 3); 24,8% de redução para turbidez (pH *in natura*); 22,7% de redução para DQO (pH igual a 3); 25,0% de redução para alcalinidade (pH *in natura*).

Tabela 14 – Eficiência de redução da cor verdadeira, turbidez, DQO e alcalinidade, a partir da ozonização convencional

Tempo (min)	Eficiência de Redução (%)											
	Cor Verdadeira			Turbidez			DQO			Alcalinidade		
	pH Eflu	pH 10	pH 3	pH Eflu	pH 10	pH 3	pH Eflu	pH 10	pH 3	pH Eflu	pH 10	pH 3
5	5,1	-4,5	18,0	-1,4	2,7	-6,0	0,4	-3,0	11,0	7,4	0,6	-
20	23,0	5,1	38,7	2,3	6,4	-6,4	2,8	-1,1	11,6	13,0	2,4	-
40	33,9	22,3	51,5	7,6	10,9	-0,5	2,3	0,2	14,2	16,7	3,5	-
60	43,1	16,4	58,7	15,4	13,6	5,4	2,3	3,0	16,1	20,6	4,2	-
90	53,0	20,5	67,2	24,8	21,0	12,4	6,3	3,7	22,7	25,0	6,4	-

Os resultados ilustrados na Tabela 14 são melhores visualizados a partir de gráficos, conforme ilustra a Figura 15 e todos os dados experimentais obtidos que resultaram nos gráficos mostrados estão disponibilizados no Apêndice C.

Figura 15 – Eficiência de redução (em %) de: (a) Cor verdadeira, (b) Turbidez, (c) DQO e (d) Alcalinidade, a partir da ozonização convencional



Apesar da elevada capacidade oxidativa do ozônio, as configurações experimentais estudadas não geraram considerável eficiência de redução de DQO, igual a 3,7% para meio alcalino e 22,7% para meio ácido (Figura 15c), cujos motivos estão relacionados aos seguintes fatores:

- limitações do equipamento gerador de ozônio utilizado quanto à capacidade de produção de 1,8 g O₃/h (vazão máxima de 1 L/min e concentração máxima de 30 mg/L);
- possibilidade de geração de subproduto da ozonização, de cadeia orgânica menos complexa mas ainda com lenta oxidação.

Segundo Gottschalk *et al.* (2009) e McMurry (2011), o processo de ozonização costuma ser mais eficiente na oxidação de compostos nucleofílicos insaturados com alta densidade eletrônica (por exemplo: alquenos, alquinos, anéis aromáticos, entre outros). No decorrer da interação destes compostos com o ozônio ocorre transferência eletrônica e a formação de subprodutos da oxidação incompleta, os quais geralmente possuem uma disponibilidade de elétrons menor e são mais recalcitrantes ao ataque do ozônio.

Observou-se que, para as amostras com pH igual a 3, houve maior redução da cor verdadeira em comparação ao pH *in natura* e ao pH igual a 10. De acordo com a Figura 15(a), após 90 minutos de tempo de contato entre o ozônio e o efluente de atividade automotiva, as reduções de cor verdadeira foram de 67,8%, 52,0% e 20,2%, respectivamente, para pH igual 3, *in natura* e 10. A descoloração é causada pela clivagem oxidativa dos grupos cromóforos, seja por via direta ou indireta. A clivagem destas ligações duplas conjugadas e de outros grupos funcionais faz com que as moléculas percam a habilidade de absorver luz na região visível do espectro eletromagnético. Conforme Cheng *et al.* (2011), a característica estrutural dos compostos orgânicos causadores de cor é o fato deles conterem cromóforos, tais como, C=C, C=O, C=N, N=N. Como o ozônio é um forte oxidante, pode reagir com estes compostos insaturados e reduzir a cor verdadeira do efluente pela destruição de ligações insaturadas.

Santos *et. al.* (2011), no estudo da descoloração e degradação do azocorante vermelho GELX-220 por ozonização, observaram que a cinética da descoloração e as análises da redução de DQO e COT em função do tempo de ozonização, efetuadas em soluções ácidas e alcalinas, revelam que a ozonização se constitui numa tecnologia eficiente para redução de cor e de matéria orgânica. Uma total descoloração foi obtida rapidamente em ambos os pHs, revelando assim que o mecanismo oxidativo direto (O₃) e indireto (OH·), são eficientes para a redução de cor para este tipo de corante. Além disso, verificaram que a ozonização, tanto em meio

ácido como alcalino promove um considerável aumento na viabilidade de oxidação da matéria orgânica solúvel.

A eficiência do ozônio na redução da cor tem sido comprovada em diversos trabalhos, mesmo quando os corantes estão presentes em matrizes complexas como, por exemplo, efluentes industriais têxteis. Shu *et al.* (1994) e Lin e Liu (1994) observaram uma excelente descoloração de efluentes têxteis em tempos reduzidos de ozonização. Por outro lado, a eficiência do ozônio não foi tão elevada com relação à diminuição da concentração do carbono orgânico total do efluente.

A ozonização do efluente em meio ácido (reação direta) removeu mais eficientemente a cor verdadeira e a DQO do efluente que em meio alcalino (reação indireta). De uma forma geral, houve elevada redução de cor verdadeira e limitada redução de matéria orgânica (expressa como DQO).

O efluente bruto estudado contém materiais coloidais e suspensos, responsáveis respectivamente pela presença da cor verdadeira e turbidez. Em relação ao parâmetro turbidez, foram observadas as reduções de 24,8%, 21,2% e 12,4%, respectivamente, para pH *in natura*, 10 e 3. A comparação de redução da turbidez para o nível líquido de 0,5 m, nos experimentos de arraste de gases por meio do borbulhamento de ar comprimido e oxigênio puro e da ozonização convencional, mostra que as eficiências de redução foram similares. Vale ressaltar que a vazão de injeção do ozônio (60 L/h) foi 8,3 vezes inferior à menor vazão de injeção nos experimentos de arraste de gás (500 L/h).

De acordo com a Figura 15(d), a maior redução da alcalinidade foi de 25%, para pH *in natura* do efluente. Ressalta-se que o ponto de viragem da titulação potenciométrica para o ensaio de alcalinidade é no pH 4,4 e, por isso, não foi realizado este ensaio para pH 3.

O aumento da remoção de alcalinidade na ozonização convencional pode estar associado ao consumo das espécies HCO_3^- e CO_3^{2-} como íons terminadores da decomposição do ozônio.

As reações de terminação da decomposição que evidenciam o consumo do CO_3^{2-} estão apresentadas nas Equações 7 e 8 (DEZOTTI *et al.*, 2008).



Nas quais: $\bullet OH$ é o radical hidroxila; CO_3^{2-} é o carbonato; OH^- é a hidroxila; $CO_3^{\bullet -}$ é o radical carbonato; O_3 é o ozônio molecular; O_2 é oxigênio molecular; CO_2 é o gás carbônico e $\bullet O_2^-$ é o radical hiperóxido.

Nesse processo o CO_2 formado pode sofrer *stripping*, sendo arrastado para o ar atmosférico. Como as espécies HCO_3^- e CO_3^{2-} estão presentes em equilíbrio no meio líquido, o consumo do carbonato acarreta no consumo do bicarbonato através do deslocamento do equilíbrio químico e, conseqüentemente, contribuem com a queda da alcalinidade total.

4.4 OZONIZAÇÃO CATALISADA POR CARVÃO ATIVADO

Os ensaios de ozonização convencional foram realizados com efluentes coletados em dias diferentes, podendo apresentar variações na sua composição já que é uma matriz real. Com intuito de minimizar essas possíveis alterações, todos os ensaios descritos a seguir foram realizados utilizando o efluente coletado no dia 24/03/2014.

No primeiro momento foram realizados os ensaios com ozônio sem a adição de carvão ativado, em pH *in natura*, com as mesmas configurações experimentais apresentadas nos estudos de ozonização convencional, para efeito de comparação.

A Tabela 15 apresenta as características físico-químicas do efluente estudado através dos parâmetros cor verdadeira, turbidez, DQO bruta, DQO filtrada e alcalinidade obtidos para o efluente bruto antes da realização dos ensaios de ozonização catalisada por carvão ativado.

Tabela 15 – Características físico-químicas do efluente bruto, antes da ozonização catalisada por carvão ativado

Parâmetros	pH <i>in natura</i> + CA 1g/L	pH 3 + CA 1 g/l	pH <i>in natura</i> + CA 2g/L	pH 3 + CA 2g/l	Sem adição de CA
Cor verdadeira (mgPt-Co/L)	42,7	64,0	33,7	24,7	81,0
Turbidez (NTU)	17,3	20,7	11,4	12,5	64,1
DQO bruta (mgO ₂ /L)	135,8	91,7	63,3	42,5	167,5
DQO filtrada (mgO ₂ /L)	115,0	62,5	71,7	40,8	134,2
Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	72,01	Não realizado	54,3	Não realizado	49,2

A Tabela 16 traz a eficiência de redução para os parâmetros cor verdadeira, turbidez, alcalinidade, DQO bruta e DQO Filtrada a partir da ozonização catalisada por carvão ativado (CA), nas configurações descritas na Tabela 7.

Os valores em destaque na Tabela 16 (em negrito), indicam as maiores eficiências de redução para cada parâmetro, dentre todas as configurações estudadas.

Tabela 16 – Eficiência de redução para os parâmetros cor verdadeira, turbidez, alcalinidade, DQO bruta e Filtrada, para ozonização com adição de CA 1g/L e 2g/L, em pH *in natura* e pH 3 e comparativo sem adição de CA

Cor Verdadeira (Eficiência de redução %)					
Tempo	pH <i>in natura</i> + CA 1g/L	pH 3 + CA 1g/L	pH <i>in natura</i> + CA 2g/L	pH 3 + CA 2g/L	Sem adição de CA pH <i>in natura</i>
0	-	-	-	-	-
5	7,8	29,7	14,9	78,6	-2,9
20	34,4	66,1	26,7	100,0	22,2
40	46,9	79,7	57,4	100,0	36,2
60	75,0	91,7	46,5	100,0	50,2
90	85,9	94,3	58,4	64,3	59,3
Turbidez (Eficiência de redução %)					
Tempo	pH <i>in natura</i> + CA 1g/L	pH 3 + CA 1g/L	pH <i>in natura</i> + CA 2g/L	pH 3 + CA 2g/L	Sem adição de CA pH <i>in natura</i>
0	-	-	-	-	-
5	-15,2	19,2	-46,6	2,4	-1,5
20	-33,5	39,7	-16,6	62,8	6,0
40	-20,2	59,4	14,5	84,1	7,9
60	52,8	78,8	24,3	88,0	15,8
90	87,2	89,0	36,1	92,3	23,7

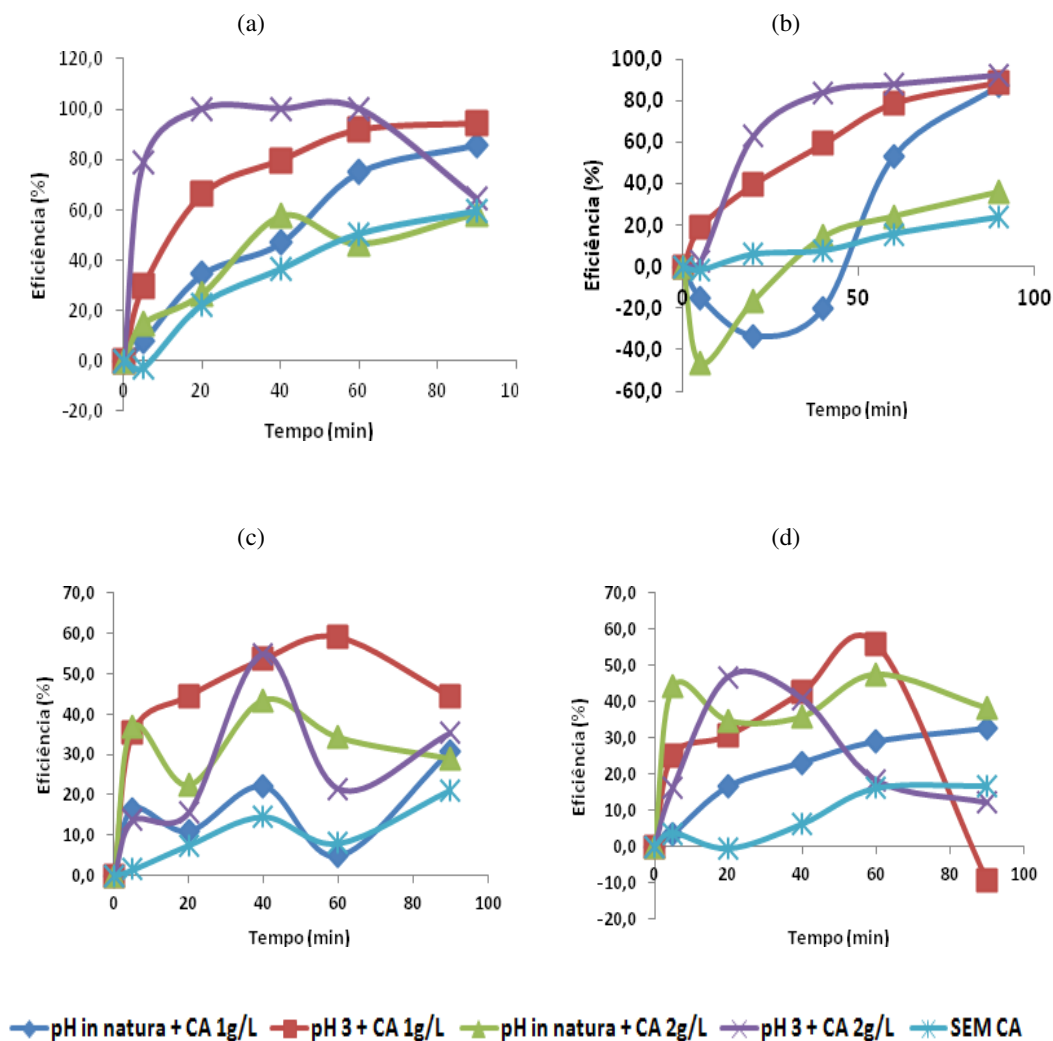
Tempo	Alcalinidade (Eficiência de redução %)				
	pH <i>in natura</i> + CA 1g/L	pH 3 + CA 1g/L	pH <i>in natura</i> + CA 2g/L	pH 3 + CA 2g/L	Sem adição de CA pH <i>in natura</i>
0	-	-	-	-	-
5	23,1	-	4,9	-	1,1
20	27,3	-	10,6	-	10,6
40	30,4	-	12,9	-	9,6
60	32,9	-	16,9	-	6,5
90	38,0	-	19,0	-	7,5
Tempo	DQO total (Eficiência de redução %)				
	pH <i>in natura</i> + CA 1g/L	pH 3 + CA 1g/L	pH <i>in natura</i> + CA 2g/L	pH 3 + CA 2g/L	Sem adição de CA pH <i>in natura</i>
0	-	-	-	-	-
5	16,6	35,5	36,8	13,7	1,5
20	11,0	44,5	22,4	15,7	7,5
40	22,1	53,6	43,4	54,9	14,4
60	4,9	59,1	34,2	21,6	8,0
90	30,7	44,5	28,9	35,3	20,9
Tempo	DQO filtrada (Eficiência de redução %)				
	pH <i>in natura</i> + CA 1g/L	pH 3 + CA 1g/L	pH <i>in natura</i> + CA 2g/L	pH 3 + CA 2g/L	Sem adição de CA pH <i>in natura</i>
0	-	-	-	-	-
5	3,6	25,3	44,2	16,3	3,7
20	16,7	30,7	34,9	46,9	-0,6
40	23,2	42,7	36,0	40,8	6,2
60	29,0	56,0	47,7	18,4	16,1
90	32,6	-9,3	38,4	12,2	16,8

Para cada parâmetro, a maior eficiência de redução foi de: cor verdadeira e turbidez os melhores resultados ocorreram em pH 3, com adição de CA 2g/L, sendo que 100 % de redução para cor verdadeira ocorreram nos tempos de 20 a 60 minutos e 92,3% de redução para turbidez para o tempo de 90 minutos; 38% de redução para alcalinidade em pH *in natura* com adição de CA 1g/L para o tempo de 90 minutos; os melhores resultados para DQO total e DQO Filtrada se deram em pH 3 com adição de CA 1g/L, no tempo de 60 minutos, sendo a primeira com 59% de redução e a segunda com 56% de redução.

Os resultados ilustrados na Tabela 16 são melhores visualizados a partir de gráficos, conforme ilustra as Figura 16, que apresenta os gráficos de cor verdadeira (a), turbidez (b), DQO total (c) e DQO filtrada (d).

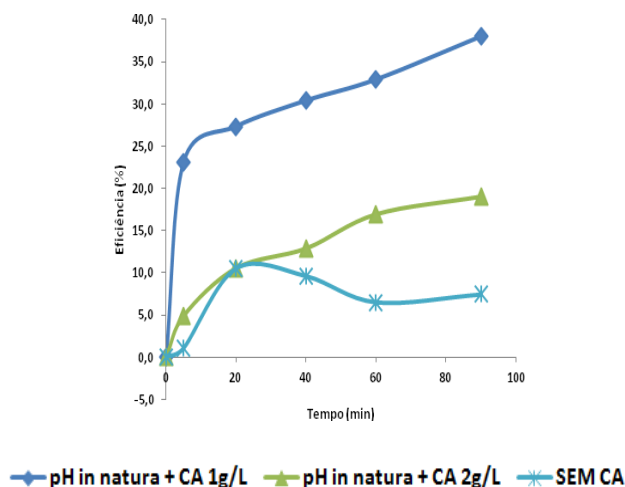
Todos os dados experimentais obtidos, que resultaram nos gráficos mostrados nas Figuras 16 e 17 estão disponibilizados no Apêndice D.

Figura 16 – Eficiência de redução (em %) de: (a) Cor verdadeira, (b) Turbidez, (c) DQO total e (d) DQO filtrada, para ozonização com adição de CA 1g/L e 2g/L, em pH *in natura*, pH 3 e comparativo sem adição de CA.



O gráfico com os resultados de alcalinidade está contemplado na Figura 18 e como pode ser observado não foi realizado este ensaio para pH 3 pelo fato de que o ponto de viragem da titulação potenciométrica para o ensaio de alcalinidade é no pH 4,4.

Figura 17 – Eficiência de redução (em %) de alcalinidade, para ozonização com adição de CA 1g/L e 2g/L, em pH *in natura* e comparativo sem adição de CA



A ozonização, em pH 3, com adição de 2g/L de carvão ativado foi capaz de remover completamente a cor (Figura 16a) em tempo razoável, apenas 20 minutos de ensaio. Comparando com os resultados obtidos no ensaio sem adição de carvão ativado e em pH *in natura*, observa-se que a melhor eficiência de redução foi de 59,3%, no tempo de 90 minutos. Nos resultados da ozonização convencional, apresentados no item 4.3, é possível verificar que o melhor resultado obtido na redução de cor, 67,2% de redução, também ocorreu em pH 3, no entanto o tempo de ensaio foi de 90 minutos, tempo consideravelmente maior do que na ozonização com adição de carvão ativado.

O melhor resultado obtido em relação à turbidez (Figura 16b), 92,3% de redução, na ozonização com adição de carvão ativado, se deu em meio ácido (pH 3) com adição de 2g/L de CA, em 90 minutos. Nos resultados obtidos no ensaio sem adição de carvão ativado e em pH *in natura*, a melhor eficiência de redução foi de 23,7%, no tempo de 90 minutos. Comparando com os resultados da ozonização convencional, conforme item 4.3, pode-se verificar que o melhor resultado foi 24,8% de eficiência de redução, em pH *in natura*, também para o tempo de 90 minutos. Pode-se destacar que em pH *in natura* e 90 minutos, configurações em que ocorreu o melhor resultado para ozonização convencional, com a adição de 1g/L de carvão ativado elevou a eficiência de redução de 24,8% para 87,2% (62,4% maior do que o ozônio sozinho).

Nos resultados obtidos no ensaio sem adição de carvão ativado e em pH *in natura*, a melhor eficiência de redução para a DQO bruta foi de 20,9%, no tempo de 90 minutos. Os resultados apresentados evidenciam que a presença de carvão ativado melhora a eficiência de redução da

demanda química de oxigênio (Figura 16c e 16d), quando comparado com a ozonização convencional, apresentada no item 4.3, em que o melhor resultado foi de 22,7% em meio ácido (pH 3), no tempo de 90 minutos, enquanto que com a adição de 1g/L de carvão ativado, também em pH 3, elevou a eficiência de redução de DQO bruta (Figura 16c) para 59,1%, em um tempo menor de ozonização (60 minutos). Com relação à DQO filtrada (Figura 16d), esta foi realizada a fim de eliminar partículas existentes no meio e minimizar possíveis interferências, no entanto, observou-se que os resultados são bastante parecidos com a DQO bruta, sendo a melhor eficiência de redução de 56%, nas mesmas condições em que ocorreu o melhor resultado para a DQO bruta (pH 3, 1g/L de carvão ativado em 60 minutos de ensaio).

Sem a adição de carvão ativado e em pH *in natura*, a melhor eficiência de redução para a alcalinidade foi de 10,6%, no tempo de 20 minutos (Figura 17). A maior redução obtida na ozonização convencional, item 4.3, foi de 25%, para pH *in natura*, em 90 minutos. Paralelamente, o melhor resultado obtido na ozonização com adição de carvão ativado, também ocorreu em pH *in natura* e com adição de 1g/L de carvão ativado, também em 90 minutos de ensaio, apresentando uma eficiência de redução de 38%. Portanto, houve um incremento de 13% na eficiência de redução.

Semelhante aos resultados encontrados neste trabalho, principalmente em relação à remoção de cor e compostos orgânicos, Soares (2006) em seu estudo da ozonização do corante ácido (C.I. Acid Blue 113) na presença de carvão ativado, verificou-se que tal como na oxidação somente com ozônio, apesar de se atingir uma descoloração elevada, não se atingiu total mineralização dos compostos orgânicos em solução. No entanto, verificou-se que a porcentagem de remoção de carbono orgânico total (COT) é mais elevada do que nos ensaios em que se utilizou apenas carvão ou apenas ozônio.

Paralelamente, Faria *et al.* (2005), no estudo da ozonização de um efluente têxtil real na presença de carvão ativado, observaram que com a ozonização convencional a remoção de COT foi de 8,9%, enquanto que com adição de uma pequena quantidade de carvão ativado durante o processo de ozonização aumentou consideravelmente a remoção de COT, para 20,7%, após 60 min de reação. Em relação à descoloração do efluente, observaram que após 15 min de ozonização na presença de carvão ativado a porcentagem de remoção de cor foi próxima a 100%.

Uma das propostas mais aceitáveis na comparação entre a ozonização convencional e

catalítica é que o carvão ativado é capaz de catalisar a decomposição do ozônio molecular em espécies altamente reativas na fase aquosa, bem como atuar como adsorvente no processo (JANS e HOIGNE, 1998; SOARES, 2006; BELTRÁN *et al.*, 2002).

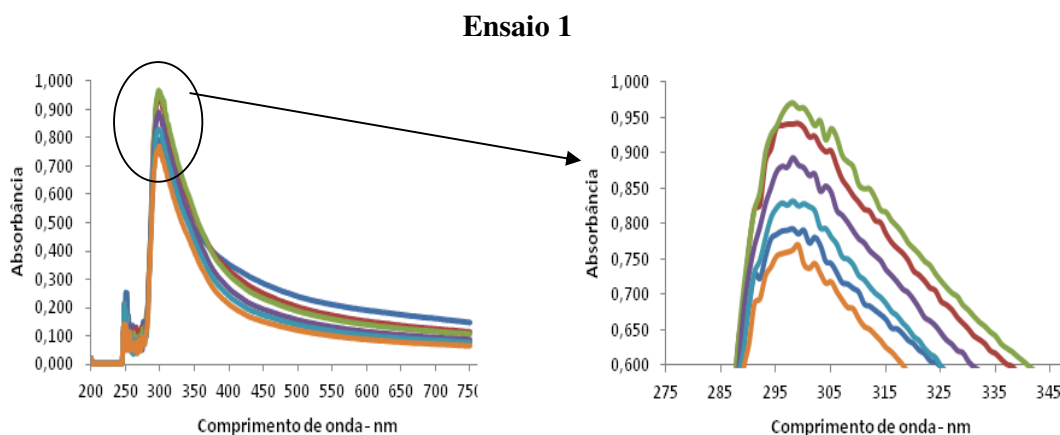
4.5 ESPECTRO DE VARREDURA UV-VIS

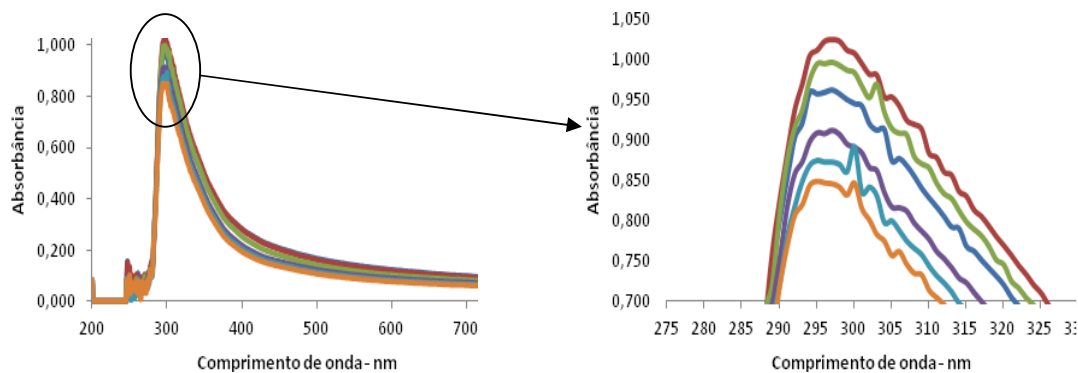
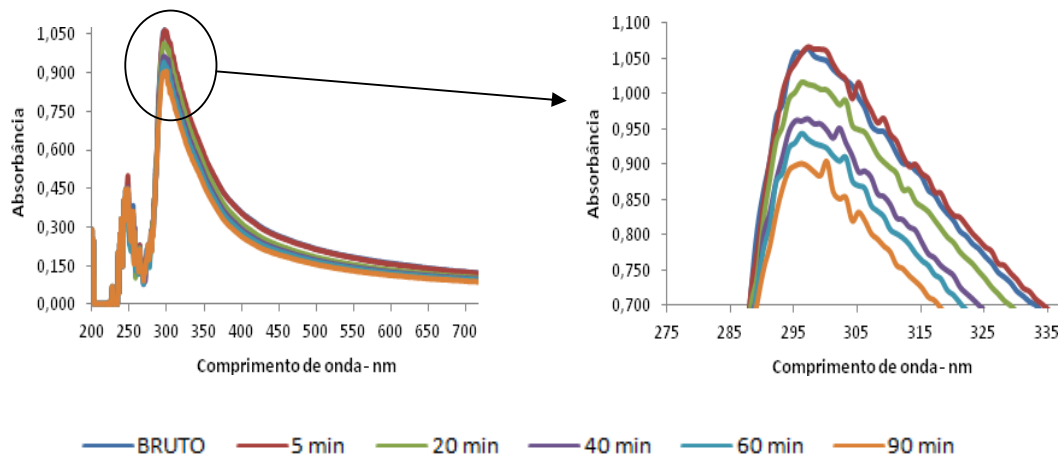
4.5.1 OZONIZAÇÃO CONVENCIONAL

As Figuras 18, 19 e 20 apresentam os gráficos de varredura, na região do UV/Visível de 200 a 750 nm, realizados para os estudos de ozonização convencional após os tempos de contato de 0, 5, 20, 40, 60 e 90 minutos. Pode ser observado a evolução das absorbâncias nos três pHs testados (pH *in natura*, pH 3 e pH 10). À direita de cada gráfico está apresentada uma aproximação nos maiores picos de absorbâncias, para melhor visualização. Foram realizados 3 ensaios para cada configuração de pH.

A figura 18 apresenta os espectros de varreduras para os ensaios de ozonização convencional em pH *in natura*.

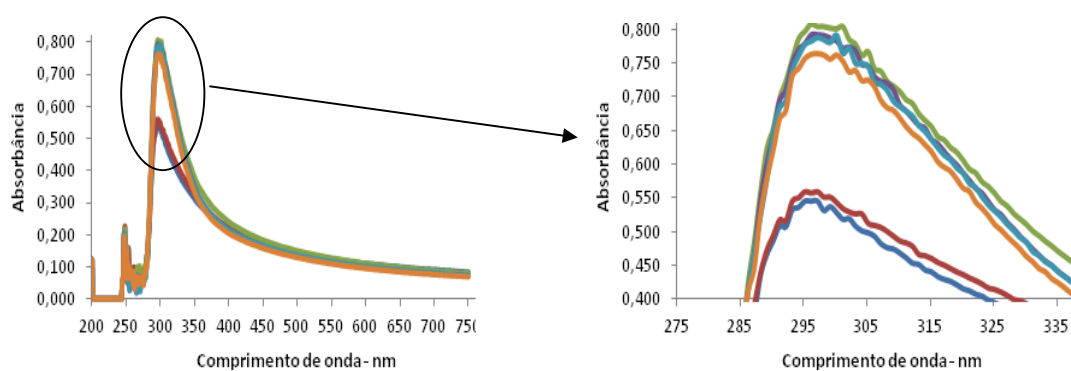
Figura 18 – Espectro de varredura (200 – 750 nm), - pH *in natura* – Ensaios 1, 2 e 3.

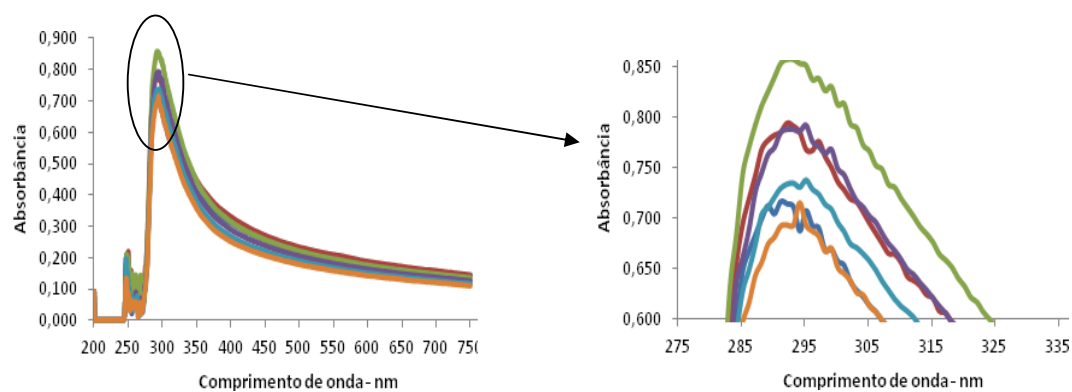
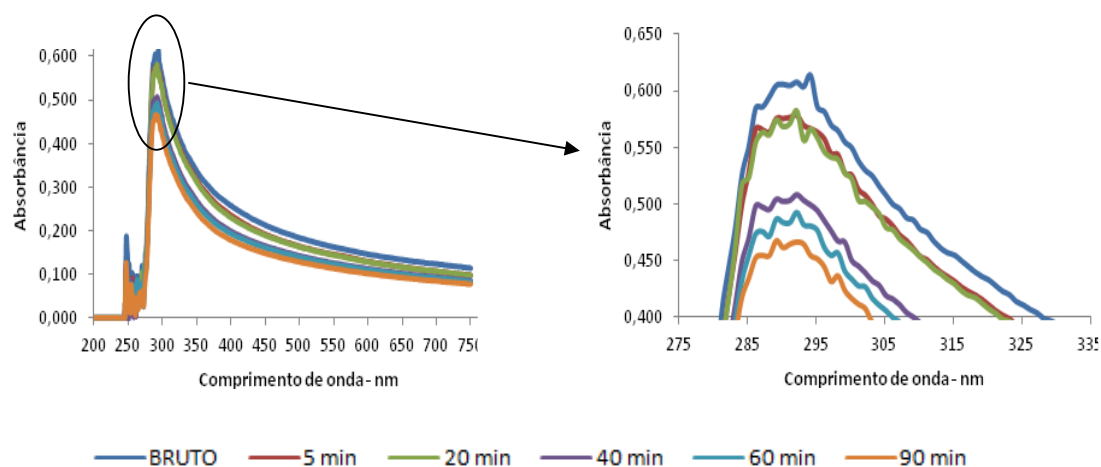


Ensaio 2**Ensaio 3**

A figura 19 apresenta os espectros de varreduras para os ensaios de ozonização convencional em pH 3.

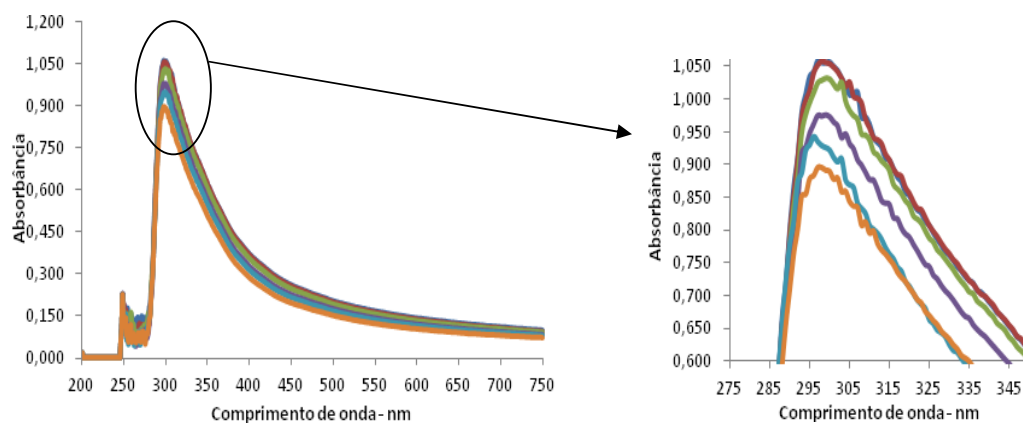
Figura 19 – Espectro de varredura (200 – 750 nm) - pH 3 – Ensaios 1, 2 e 3.

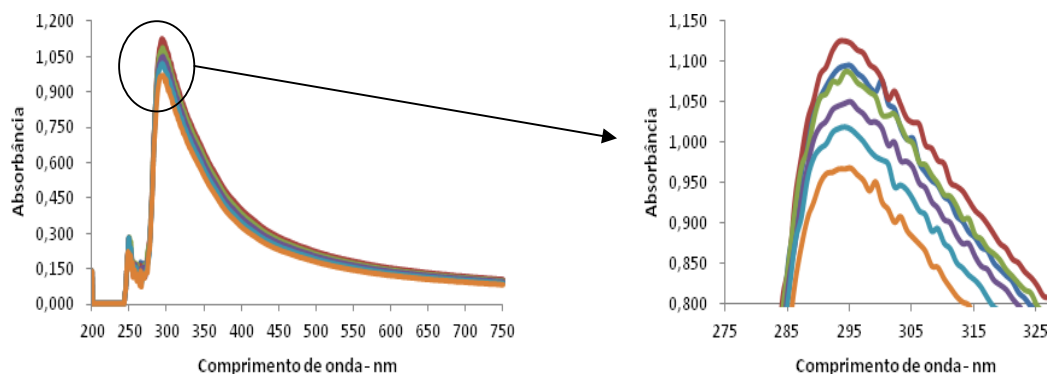
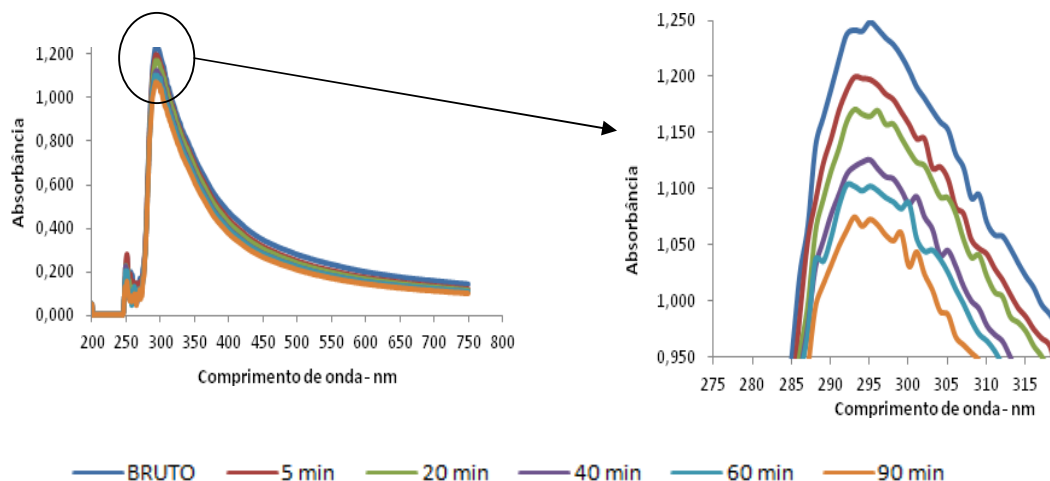
Ensaio 1

Ensaio 2**Ensaio 3**

A figura 20 apresenta os espectros de varreduras para os ensaios de ozonização convencional em pH 10.

Figura 20 – Espectro de varredura (200 – 750 nm) - pH 10 – Ensaios 1, 2 e 3.

Ensaio 1

Ensaio 2**Ensaio 3**

A região do visível, compreendida entre 400-800 nm, é responsável pela cor das substâncias (HASSEMER, 2006). Para Almeida *et al.* (2004), Oliveira (2006) e Hassemer (2006), os picos em 254 e 280 nm são característicos de compostos aromáticos. Moreira *et al.* (2014) afirmam que, a absorção entre 250-290 nm indica a existência de benzeno ou compostos heterocíclicos aromáticos.

Foi possível observar a diminuição da absorbância próximo ao comprimento de onda 290 nm (redução da aromaticidade), sendo que, na maioria dos casos, a menor absorbância foi observada no tempo de 90 minutos, o que indica que na ozonização do efluente ocorre uma fragmentação dos compostos aromáticos transformando-os em compostos menores.

Contudo, é importante destacar que as medidas espectrofotométricas do efluente estudado neste trabalho de mestrado foram realizadas utilizando-se cubeta de vidro. Sabe-se que, para espectroscopia apenas no visível (região de 400 a 800 nm), a cubeta de vidro pode ser usada, no entanto a espectroscopia no ultravioleta (200 a 400 nm) requer cubetas especiais feitas de um material que, ao contrário do vidro, não absorva luz UV, como por exemplo, o quartzo.

Paralelamente foi observada a diminuição da absorbância para a região dos comprimentos de onda 400 a 700 nm, representativa de cor, o que indica que depois das interações do efluente com o ozônio, as estruturas dos corantes (grupos cromóforos) se rompem, conforme também observado por Arslan *et al.* (2000).

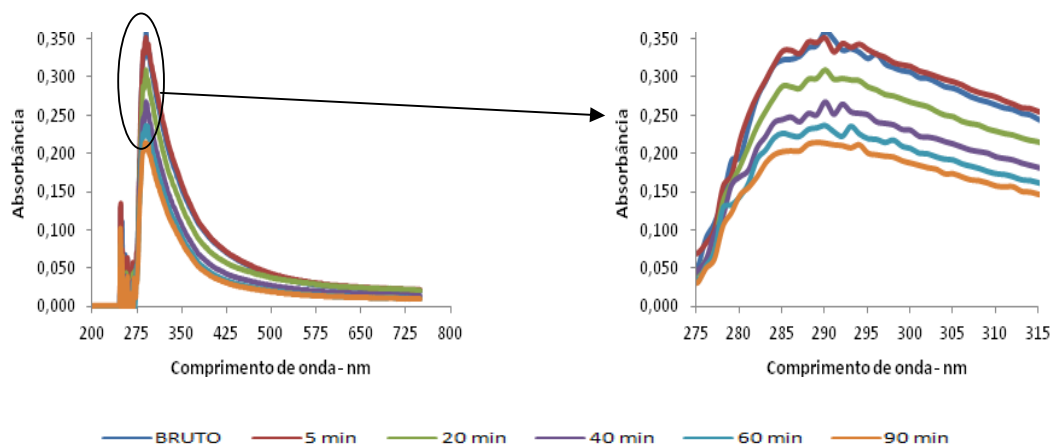
4.5.2 OZONIZAÇÃO CATALISADA POR CARVÃO ATIVADO

Como já descrito no item 3.5.3, para efeito de comparação, no primeiro momento foram realizados os ensaios com ozônio sem a adição de carvão ativado, em pH *in natura*, com as mesmas configurações experimentais apresentadas nos estudos de ozonização convencional de efluente. Os ensaios com a adição de CA, nas concentrações de 1g/L e 2g/L, ocorreram em pH *in natura* e pH 3,0, uma vez que os melhores resultados obtidos na ozonização convencional se deram em pH 3.

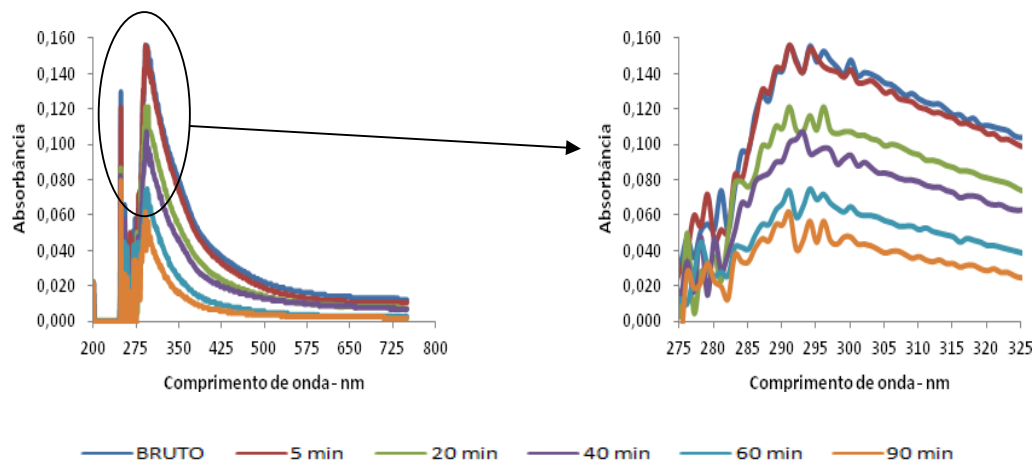
As Figuras 21 a 25 apresentam os gráficos de varredura, na região do UV/Visível de 200 a 750 nm, realizados para os estudos de ozonização com a adição de carvão ativado (CA), após os tempos de contato de 0, 5, 20, 40, 60 e 90 minutos.

À direita de cada gráfico está apresentada uma aproximação nos maiores picos de absorbâncias, para melhor visualização. Foi realizado 1 ensaio para cada configuração de pH.

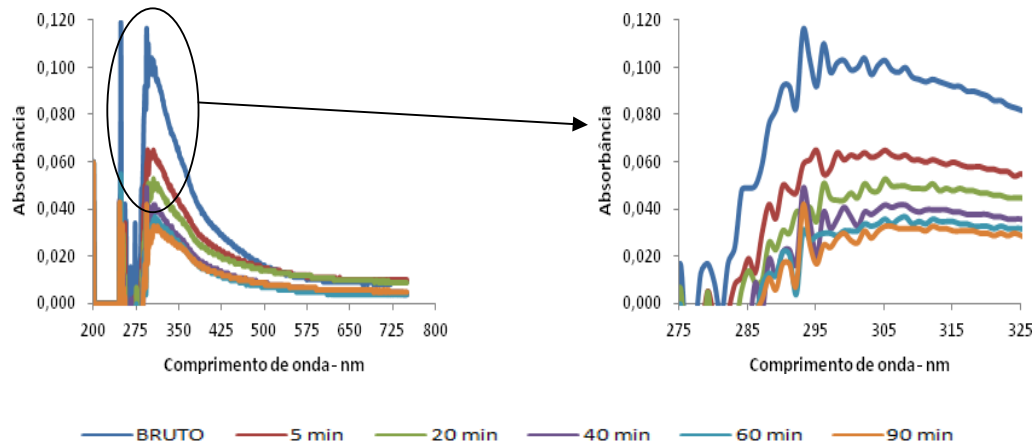
A Figura 21 apresenta o resultado da ozonização sem a adição do CA, para o pH *in natura*.

Figura 21 – Espectro de varredura (200 – 750 nm) – Ozônio sem CA - pH *in natura*

A Figura 22 apresenta o espectro de varredura para a ozonização na presença de carvão ativado 1g/L, em pH *in natura*.

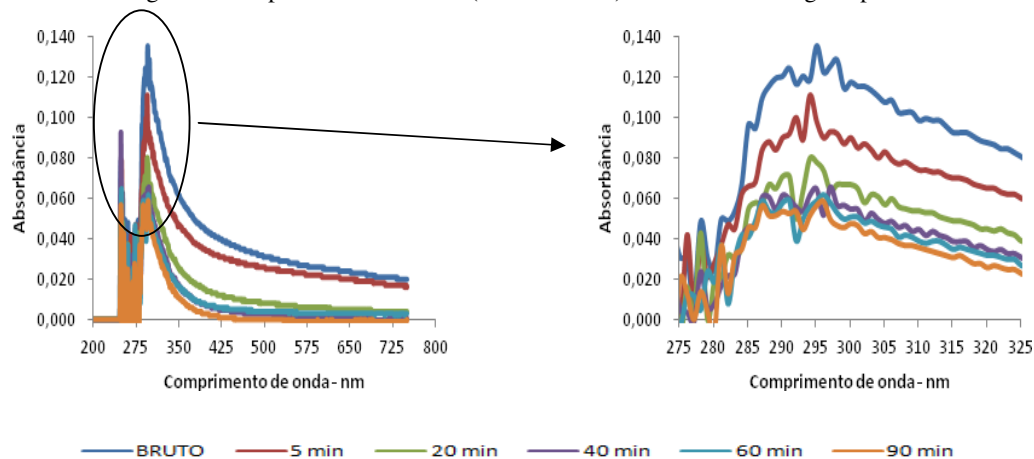
Figura 22 – Espectro de varredura (200 – 750 nm) – Ozônio + CA 1g/L - pH *in natura*.

O espectro de varredura para a ozonização na presença de carvão ativado 2g/L, em pH *in natura* está apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Espectro de varredura (200 – 750 nm) – Ozônio + CA 2g/L - pH *in natura*.

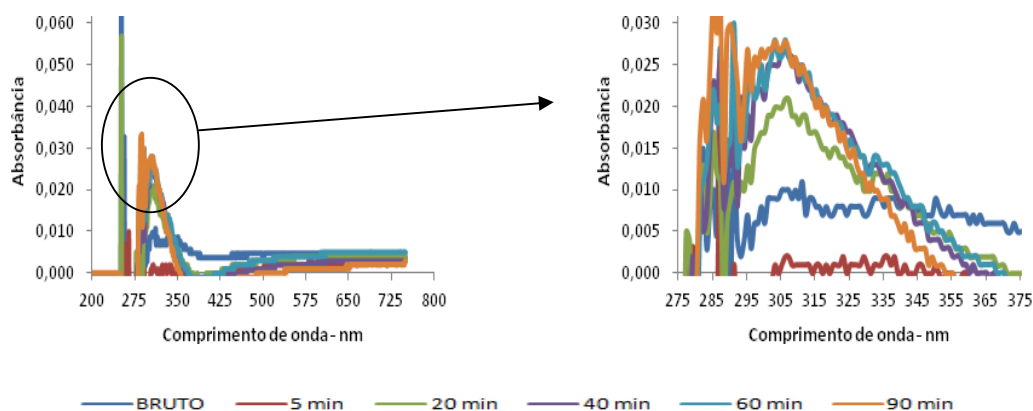
A Figura 24 apresenta o espectro de varredura para a ozonização na presença de carvão ativado 1g/L, em pH 3.

Figura 24 - Espectro de varredura (200 a 750 nm) - Ozônio + CA 1 g/L - pH 3



A Figura 25 apresenta o espectro de varredura para a ozonização na presença de carvão ativado 2g/L, em pH 3.

Figura 25 – Espectro de varredura (200 – 750 nm) – Ozônio + CA 2g/L - pH 3.



Comparando a Figura 21, que apresenta o resultado da ozonização sem a adição do CA, com as Figuras 22 a 25, que apresentam o espectro de varredura para a ozonização na presença de carvão ativado (1 e 2 g/L, em pH *in natura* e pH 3 respectivamente), foi possível constatar que o maior pico de absorvância para o ensaio sem carvão ativado foi de aproximadamente 0,35, enquanto que para os ensaios de ozonização na presença de carvão ativado o maior pico de absorvância não passou de 0,16.

Também foi possível verificar a diminuição da absorvância para a região dos comprimentos de onda 400 a 700 nm, representativa de cor, sendo que em alguns espectros, nesta região de comprimento de onda, a absorvância ficou próxima a zero, novamente evidenciando que depois das interações do efluente com o ozônio as estruturas dos corantes (grupos cromóforos) se rompem.

Ainda em relação ao espectro de varredura para a ozonização na presença de carvão ativado, observou-se que a absorvância diminuiu consideravelmente em todos os ensaios, próximo ao comprimento de onda de 290 nm, sendo a menor absorvância observada no tempo de 90 minutos, para todos os ensaios com exceção do ensaio de ozonização na presença de carvão ativado 2g/L, em pH 3 (Figura 25). A diminuição da absorvância pode estar relacionada com a fragmentação dos compostos aromáticos transformando-os em compostos menores.

Novamente é importante ressaltar que, para Almeida *et al.* (2004), Oliveira (2006) e Hassemer (2006), os picos em 254 e 280 nm são característicos de compostos aromáticos. Moreira *et al.* (2014) afirmam que, a absorção entre 250-290 nm indica a existência de benzeno ou compostos heterocíclicos aromáticos.

No entanto, como já relatado no item 4.5.1, importa ressaltar que as medidas espectrofotométricas do efluente estudado neste trabalho foram realizadas utilizando-se cubeta de vidro e que, para espectroscopia apenas no visível (região de 400 a 800 nm), a cubeta de vidro pode ser usada, contudo, a espectroscopia no ultravioleta (200 a 400 nm) requer cubetas especiais feitas de um material que, ao contrário do vidro, não absorva luz UV, como por exemplo, o quartzo.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

No efluente industrial de lavagem automotiva estudado, para as configurações experimentais escolhidas, o arraste de matéria orgânica volátil por meio do borbulhamento de ar comprimido e oxigênio dissolvido ocorreu em proporções mínimas. Esta constatação está embasada nas reduzidas variações de DQO (na faixa de 3% a 5%) após 20 minutos de tempo de contato entre as bolhas ascensionais e o efluente. Acredita-se que esta redução esteja relacionada ao gás amônia presente no efluente estudado.

É possível observar que não existe uma tendência lógica que relaciona o nível líquido e a vazão injetada nos resultados. O efluente de atividade automotiva pré-tratado apresenta alta carga de material suspenso inorgânico juntamente com matéria orgânica adsorvida, proporcionando, em vários ensaios, uma sedimentação gradual do material suspenso após o enchimento da coluna, antes do início de cada experimento, que fez com que os parâmetros analisados no tempo zero apresentassem valores inferiores aos medidos no tempo de contato de 5 minutos. No entanto, como foram feitas várias coletas em datas distintas, as concentrações de sólidos suspensos inorgânicos e matéria orgânica adsorvida em algumas ocasiões apresentavam baixas concentrações, resultando em variações positivas dos parâmetros (ou diminuição do valor de cada parâmetro).

A alcalinidade apresentou um comportamento oscilatório de difícil interpretação para as configurações estudadas, uma vez que não foi quantificado os gases dissolvidos presentes no efluente, tais como CO_2 , H_2S e amônia. Recomenda-se, em trabalhos futuros, identificar e quantificar estes gases.

De modo geral, o processo de ozonização convencional apresentou-se eficiente, principalmente, na descoloração do efluente.

A melhor redução de carga orgânica foi observada em pH ácido. A eficiência do processo de ozonização depende de diversos fatores, como pH (que determinará o oxidante predominante

O₃ ou radical hidroxila), tipo de contaminante, complexidade da matriz, entre outros fatores. Entretanto, por si só o ozônio não é capaz de prover um elevado grau de mineralização do efluente, o que é mostrado pelas pequenas taxas de redução de DQO apresentadas.

O comportamento oscilatório das curvas de eficiência de redução da DQO em função do tempo de contato, para os experimentos de ozonização convencional, pode estar relacionado ao reduzido potencial do equipamento gerador de ozônio utilizado e à geração de subprodutos da ozonização.

Com a adição de carvão ativado as eficiências de remoções aumentaram para todos os parâmetros analisados. A ozonização, em pH 3, com adição de 2g/L de carvão ativado foi capaz de remover completamente a cor em tempo razoável, apenas 20 minutos de ensaio.

O melhor resultado obtido em relação à turbidez, 92,3% de redução, na ozonização com adição de carvão ativado, se deu em meio ácido (pH 3) com adição de 2g/L de CA.

Os resultados apresentados evidenciam que a presença de carvão ativado melhora a eficiência de redução da demanda química de oxigênio, quando comparado com a ozonização convencional, em que o melhor resultado foi de 22,7% em meio ácido (pH 3), no tempo de 90 minutos, enquanto que com a adição de 1g/L de carvão ativado, também em pH 3, elevou a eficiência de redução de DQO Bruta para 59,1%, em um tempo menor de ozonização (60 minutos). Com relação à DQO Filtrada, observou-se que os resultados são bastante parecidos com a DQO Bruta, sendo a melhor eficiência de redução de 56%, nas mesmas condições em que ocorreu o melhor resultado para a DQO Bruta (pH 3, 1g/L de carvão ativado em 60 minutos de ensaio).

Em relação a alcalinidade, o melhor resultado obtido na ozonização com adição de carvão ativado ocorreu em pH *in natura* e com adição de 1g/L de carvão ativado, também em 90 minutos de ensaio, apresentando uma eficiência de redução de 38%.

Através dos resultados acredita-se que o carvão ativado é capaz de catalisar a decomposição do ozônio molecular em espécies mais reativas na fase aquosa, assim como atuar como adsorvente no processo.

Com relação aos espectros de varredura na região do UV visível verifica-se que a diminuição da absorbância na região do visível (400 a 800 nm), representativa da cor, evidencia que o ozônio é capaz de romper as estruturas dos corantes (grupos cromóforos) e acredita-se que a

diminuição do pico de absorbância próxima ao comprimento de onda de 290 nm represente a fragmentação dos compostos aromáticos transformando-os em compostos menores.

CAPÍTULO 6

RECOMENDAÇÕES

Para trabalhos futuros recomenda-se:

- Estudar o balanço do ozônio (entrada e saída);
- a realização de ensaios variando-se a concentração de ozônio e o tempo de contato com o carvão ativado e em seguida realizar a caracterização química e física deste, avaliando a influência do ozônio na regeneração do carvão;
- a aplicação da ozonização com adição do carvão ativado em uma escala piloto, otimizando o processo, para fins de reuso da água residuária das atividades de lavagem.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14605** - Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis — Sistema de drenagem oleosa - Parte 2: Projeto, metodologia de dimensionamento de vazão, instalação, operação e manutenção para posto revendedor. Rio de Janeiro, 2010.

AL-DEGS, Y. *et al.* Effect of carbon surface chemistry on the removal of reactive dyes from textile effluent. **Water Research**. v. 34, n. 3, p. 927-935, 2000.

ALMEIDA, E.; *et al.* Tratamento de efluentes industriais por processos oxidativos na presença de ozônio. **Química Nova**, v. 27, p. 818-824, 2004.

ALNAIZY, R.; AKGERMAN, A. Advanced oxidation of phenolic compounds. **Advances in Environmental Research**, v. 4, n. 3, p. 233-244, 2000. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com/S1093019100000241/1-s2.0-S1093019100000241-main.pdf?_tid=7a24c166-e8b6-11e3-b22b-00000aabb0f6b&acdnat=1401535798_07821776a43b42940c0e55ce21a0675e>. Acesso em: 20 fev. 2014.

ALTHER, G. R. Organically modified clay removes oil from water. **Waste Management**. v. 15, n. 8, p. 623-628, 1995. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0956053X96000232>>. Acesso em: 18 jan. 2013.

ALVAREZ, P. M.; *et al.* Comparison between thermal and ozone regenerations of spent activated carbon exhausted with phenol. **Water Research**. v. 38, n. 8, p. 2155-2165, 2004.

ANDREOZZI, R.; *et al.* Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery, **Catalysis Today**, v. 53, pp. 51-59, 1999. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586199001029>>. Acesso em: 10 jan. 2013.

ANNUNCIADO, T. R. **Estudo da Chorisia speciosa e outras fibras vegetais como sorvente para o setor do Petróleo**. 2005. 106p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2005. Disponível em: <<http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/dissertacao/081.pdf>>. Acesso em: 08 jul. 2013.

APARICIO, M. A.; *et al.* Combined post-ozonation and biological treatment of recalcitrant wastewater from a resin-producing factory. **Journal of hazardous materials**. v. 143, n. 1, p. 285-290, 2007.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AWWA - AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WEF - WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22 ed. Washington DC, 2012.

ARSLAN, I.; BALCIOGLU, I. A.; BAHNEMANN, D. W. Advanced chemical oxidation of reactive dyes in simulated dyehouse effluents by ferrioxalate-Fenton/UV-A and TiO_2 /UV-A processes. **Dyes and pigments**, v. 47, n. 3, p. 207-218, 2000. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com/S0143720800000826/1-s2.0-S0143720800000826-main.pdf?_tid=26f5e018-e926-11e3-b6e9-00000aabc361&acdnat=1401583762_dd490e702bdc0f9a3e60223145db03c8>. Acesso em 20 abr. 2014.

ASSALIN, M. R.; SILVA, P. L.; DURÁN, N. Comparação da eficiência do processo de ozonização e ozonização catalítica (Mn II e Cu II) na degradação de fenol. **Química Nova**. v. 29, n. 1, p. 24-27, 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422006000100006>. Acesso em: 18 jun. 2013.

AZBAR, N.; YONAR, T.; KESTIOGLU, K. Comparison of various advanced oxidation processes and chemical treatment methods for COD and color removal from a polyester and acetate fiber dyeing effluent. **Chemosphere**, v. 55, n. 1, p. 35-43, 2004. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com/S0045653503010609/1-s2.0-S0045653503010609-main.pdf?_tid=87b5cc04-e8b5-11e3-9b38-00000aabc0f27&acdnat=1401535391_05acf1dfeb08bd28238ce118f65a96b7>. Acesso em: 20 fev. 2014.

BALCIOGLU, I. A., OTKER, M. Treatment of Pharmaceutical Wastewater Containing Antibiotics by O_3 and $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ Processes. **Chemosphere**, v. 50, n. 1, p. 85-95. 2003.

BELTRÁN, D.; *et al.* Effect of different sanitizers on microbial and sensory quality of fresh-cut potato strips stored under modified atmosphere or vacuum packaging. **Postharvest biology and technology**, v. 37, n. 1, p. 37-46, 2005.

BELTRÁN, F. J. *et al.* Kinetics of heterogeneous catalytic ozone decomposition in water on an activated carbon. **Ozone: science & engineering**. v. 24, n. 4, p. 227-237, 2002.

BELTRAN-HEREDIA, J.; *et al.* Treatment of black-olive wastewaters by ozonation and aerobic biological degradation, **Water Research**, v. 34, n.14, p. 3515-3522, 2000.

BILA, D. M.; *et al.* Ozonation of a landfill leachate: evaluation of toxicity removal and biodegradability improvement. **Journal of Hazardous Materials**. v. 117, n. 2, p. 235-242, 2005.

BILOTTA, P. **Inativação de indicadores patogênicos em sistemas combinados de tratamento e pré-desinfecção de esgoto sanitário**. 2006. 151p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-07062006-162555/pt-br.php>>. Acesso em: 12 nov. 2013.

BOUSHER, A.; SHEN, X.; EDYVEAN, R. G. J. Removal of coloured organic matter by adsorption onto low-cost waste materials. **Water Research**. v. 31, n. 8, p. 2084-2092, 1997.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 273, de 29 de novembro de 2000. Estabelece diretrizes para o licenciamento ambiental de postos de combustíveis e serviços e dispõe sobre a prevenção e controle da poluição. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 01 jan. 2001. Seção 1, p.20-23. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=271>>. Acesso em: 18 de jun.2013.

_____. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Seção 1, p.58-63. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em: 30 maio. 2014.

_____. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 16 maio. 2011. Seção 1, p.89. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 30 maio. 2014.

BRASÍLIA . Lei Nº 3.812, de fevereiro de 2006. Dispõe sobre a obrigatoriedade do reaproveitamento da água utilizada nos postos de lavagem de veículos. **Diário Oficial do Distrito Federal**, Brasília, DF, 13 fev. 2006. Disponível em: <<http://legislacao.cl.df.gov.br/Legislacao/consultaTextoLeiParaNormaJuridicaNJUR-239!buscarTextoLeiParaNormaJuridicaNJUR.action>>. Acesso em: 05 de janeiro de 2014.

CARISSIMI, E. **Desenvolvimento do Reator Gerador de Flocos (RGF): aspectos teóricos e aplicações no tratamento e reuso de águas e efluentes**. 2007. 180p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2007. Disponível em: <<http://www.dominiopublico.gov.br/download/texto/cp102395.pdf>>. Acesso em: 08 abr. 2014.

CHANG, C. H.; SAVAGE, D. W.; LONGO, J. M. Carbon-sulfur surface compounds - novel regenerable adsorbents for the removal of aromatics from aqueous solutions. **Journal of Colloid and Interface Science**. v. 79, n. 1, p. 178-191, 1981.

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. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com/S1878029611002854/1-s2.0-S1878029611002854-main.pdf?_tid=3bf9b25c-e339-11e3-bdff-00000aab0f6b&acdnat=1400932251_dbcfa8f0dca7dc4c20d9697d35e17324>. Acesso em: 15 jan. 2014.

COSTA, H. S. **Estudo do comportamento do processo de ozonização como pós-tratamento de efluentes de sistema de tratamento anaeróbio de águas residuárias domiciliares**. 2003. 295 p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

DECKWER, W. D.; *et al.* Applicability of axial dispersion model to analyze mass transfer measurements in bubble columns. **AIChE Journal**, v. 29, n. 6, p. 915-922, 1991.

DENATRAN - DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Frota de Veículos 2014**. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/frota2013.htm>>. Acesso em: 20 de maio de 2014.

DEZOTTI, M.; *et al.* **Processos e técnicas para o controle ambiental de efluentes líquidos**. Rio de Janeiro: E-papers. 2008. 360p.: il. (Série Escola Piloto de Engenharia Química COPPE/UFRJ. v.5). ISBN 978-85-7650-173-2.

DONAIRE, P. P. R. **Tratamento de água subterrânea contaminada com BTEX utilizando fotocatalise heterogênea**. 2007. 101p. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2007. Disponível em: <<http://biq.iqm.unicamp.br/arquivos/teses/vtls000430542.pdf>>. Acesso em: 17 dez. 2013.

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY . Alternative disinfectants and oxidants. Guidance Manual. EPA 815-R-99-014. **Washington: Office of Wastewater Management**, 1999. Disponível em: <http://www.epa.gov/ogwdw/mdbp/alternative_disinfectants_guidance.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2013.

ESPÍRITO SANTO. Lei Nº 9.439 de maio de 2010. Dispõe sobre a obrigatoriedade dos postos de combustíveis, lava-jatos e empresas de ônibus instalarem equipamentos de tratamento e reutilização da água usada na lavagem de veículos. **Diário Oficial do Espírito Santo**, Espírito Santo, ES, 04 maio 2010. Disponível em: <<http://www.inteligenciaambiental.com.br/sila/pdf/eleileges9439-09.pdf>>. Acesso em: 05 de janeiro de 2014.

ETCHEPARE, R. G. **Integração de processos no tratamento de efluentes de lavagem de veículos para reciclagem de água**. 2012. 152p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2012. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/60673/000863145.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 15 abr. 2014.

FARIA, P. C. C; ÓRFÃO, J. J. M; PEREIRA, M. F. R. Ozone decomposition in water catalyzed by activated carbon: influence of chemical and textural properties. **Industrial & engineering chemistry research**. v. 45, n. 8, p. 2715-2721, 2006. Disponível em: <<http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ie060056n>>. Acesso em: 08 fev. 2014.

_____. Mineralisation of coloured aqueous solutions by ozonation in the presence of activated carbon. **Water research**, v. 39, n. 8, p. 1461-1470, 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135405000400>>. Acesso em: 24 abr. 2014.

FERRAZ, F. M. **Recuperação da amônia liberada no processo de “air stripping” aplicado ao tratamento do lixiviado de aterros sanitários**. 2010. 129p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo. São Carlos. 2010. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-19052010-103139/pt-br.php>>. Acesso em: 22 fev. 2013.

GEHR, R.; *et al.* Disinfection Efficiency of Peracetic Acid, UV and ozone after enhanced primary treatment of municipal wastewater. **Water Research**, v.37, pp.4573-4586. 2003.

GERNJAK, W.; *et al.* Photo-Fenton treatment of water containing natural phenolic pollutants. **Chemosphere**, v. 50, n. 1, p. 71-78, 2003. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com/S0045653502004034/1-s2.0-S0045653502004034-main.pdf?_tid=2be4183c-e8be-11e3-a92d-00000aab0f6c&acdnat=1401539102_f65af09fc3acec90c51a9e301b0fc85f>. Acesso em: 30 mar. 2014.

GONÇALVES, R. F.; *et al.* **Desinfecção de efluentes sanitários**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES. 2003. v. 1. 438p.: il. Projeto PROSAB. ISBN 85-86552-72-0. Disponível em: <<http://www.finep.gov.br/prosab/livros/ProsabRicardo.pdf>>. Acesso em: 03 ago. 2013.

GOTTSCHALK, C.; LIBRA, J. A.; SAUPE, A. **Ozonation of water and waste water: A practical guide to understanding ozone and its applications**. 2 ed. Wiley Internation Edition. 378p. 2009. ISBN 9783527319626.

GUIZA, M.; OUEDERNI, A.; RATEL, A. Decomposition of dissolved ozone in the presence of activated carbon: an experimental study. **Ozone: Science and Engineering**. v. 26, n. 3, p. 299-307, 2004.

HAMADA, T.; MIYAZAKI, Y. Reuse of carwash water with a cellulose acetate ultrafiltration membrane aided by flocculation and activated carbon treatments. **Desalination**. v. 169, n. 3, p. 257-267, 2004.

HASSEMER, M. E. N. **Oxidação fotoquímica-UV/H₂O₂-para degradação de poluentes em efluentes da indústria têxtil**. 2006. 175p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2006. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/88994>>. Acesso em: 20 abr. 2014.

HERMANN, J. M.; VAUTIER, M; GUILLARD, C. Photocatalytic degradation of dyes in water: case study of indigo and of indigo carmine. **Journal of Catalysis**, v.201, p.46.59, 2001.

HSU, Y. C.; YANG, H. C.; CHEN, J. H. The enhancement of the biodegradability of phenolic solution using preozonation based on high ozone utilization. **Chemosphere**, v. 56, p. 149-158, 2004.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/painel/painel.php?codmun=317020>>. Acesso em: 10 dez. 2013.

JARDIM, W. F.; CANELA, M. C. **Fundamentos da oxidação química no tratamento de efluentes e remediação de solos**. Caderno temático, n. 01. Campinas: Unicamp, 2004. Disponível em: <<http://lqa.iqm.unicamp.br/cadernos/caderno1.pdf>>. Acesso em: 06 jul. 2013.

JANS, U.; HOIGNE, J. Activated carbon and carbon black catalyzed transformation of aqueous ozone into OH-radicals. **Ozone: science & engineering**. v. 20, n.1, p. 67-90, 1998.

JONSSON, C.; JONSSON, A. The influence of degreasing agents used at car washes on the performance of ultrafiltration membranes. **Desalination**, v. 100, n. 1, p. 115-123, 1995.

KERN, D. I. **Avaliação da eficiência da ozonização fotocatalítica no tratamento de efluentes de lavanderia hospitalar, por meio de ensaios ecotoxicológicos e genotóxicos**. 2012. 142p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2012.

KRAUSE, L. G. T. **Degradação do Antibiótico Sulfametoxazol por Ozonização e Avaliação da Atividade Antibacteriana**. 2009. 92p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

KOCH, M.; *et al.* Ozonation of hydrolyzed azo dye reactive yellow 84 (CI). **Chemosphere**, v. 46, n. 1, p. 109-113, 2002.

KUNZ, A.; *et al.* Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química Nova**, v.25,p.78, 2002. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v25n1/10428.pdf>>. Acesso em: 18 fev. 2013.

LAGREGA, M. D.; BUCKINGHAM, P. L.; EVANS, J.C. **Hazardous waste management**. 2 ed. International edition. Singapore: MCGRAW-HILL, 2001.1202p. (McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering).

LANGLAIS, B.; RECKHOW, D. A.; BRINK, D. R. **Ozone in Water Treatment: Application and Engineering**. Lewis Publishers, Chelsea, Mich. Americium Water Works Association. Research Foundation. 569p. 1991.

LEGUBE, B.; LEITNER, N. K. V. Catalytic ozonation: a promising advanced oxidation technology for water treatment. **Catalysis Today**, v. 53, n. 1, p. 61-72, 1999.

LIDE, D. R. **CRC Handbook of Chemistry and Physics**. 95 ed. 2014. Hardcover, Edition Published by CRC Press. ISBN 0849304881. Disponível em: <<http://www.hbcnetbase.com>> . Acesso em: 06 fev. 2014.

LIMA, L. M. O. **Utilização de uma coluna de flotação para remoção de compostos orgânicos da água de produção**. 2010. 176p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

LIN, S. H.; LAI, C. L. Kinetic characteristics of textile wastewater ozonation in fluidized and fixed activated carbon beds. **Water Research**, v. 34, n. 3, p. 763-772, 2000. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com/S0043135499002146/1-s2.0-S0043135499002146-main.pdf?_tid=0edeba98-e347-11e3-b75a-00000aab0f6c&acdnat=1400938188_8739852cd67cc407511873ff531529f9>. Acesso em: 10 mar. 2014.

LIN, S. H.; LIU, W. Y. Treatment of textile wastewater by ozonation in a packed-bed reactor. **Environmental technology**, v. 15, p. 299, 1994.

LIN, S. H.; WANG, C. H. Industrial wastewater treatment in a new gas-induced ozone reactor. **Journal of hazardous materials**. v. 98, n. 1, p. 295-309, 2003. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com/S0304389403000037/1-s2.0-S0304389403000037-main.pdf?_tid=e2fd7ce0-e33a-11e3-b4dc-00000aab0f6c&acdnat=1400932960_18bc7ed016833450b96a666cf869a705>. Acesso em: 05 fev. 2014.

MAGALHÃES, A. F. R. **Proposição, implantação, partida e ajustes de reatores biológicos e físico-químicos para tratamento e reciclagem de efluentes de lavadores de veículos em escala real**. 2005. 136p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2005. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000358663&fd=y>>. Acesso em: 05 abr. 2014.

MASCOLO, G.; *et al.* By-products formation during the ozonation of the reactive dye Uniblu-A. **Ozone: science & engineering**, v. 24, n. 6, p. 439-446, 2002.

MCKAY, G.; PORTER, J. F.; PRASAD, G. R. The removal of dye colours from aqueous solutions by adsorption on low-cost materials. **Water, Air, and Soil Pollution**. v. 114, n. 3-4, p. 423-438, 1999.

MCMURRY, J. **Química Orgânica**. Combo - Tradução da 7ª Norte – Americana. 1280p, 2011. ISBN 9788522110087.

MINAS GERAIS. Deliberação Normativa COPAM nº 50, de 28 de novembro de 2001. Estabelece os procedimentos para o licenciamento ambiental de postos revendedores, postos de abastecimento, instalações de sistemas retalhistas e postos flutuantes de combustíveis e dá outras providências. **Diário do Executivo**, Belo Horizonte, MG, 15 dez. 2001. Disponível em:

<<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=133>>. Acesso em: 21 de jun.2012.

_____. Deliberação Normativa COPAM nº 108, de 24 de maio de 2007. Altera a Deliberação Normativa Copam 50/01, que estabelece os procedimentos para o licenciamento ambiental de postos revendedores, postos de abastecimento, instalações de sistemas retalhistas e postos flutuantes de combustíveis e dá outras providências. **Diário do Executivo**, Belo Horizonte, MG, 26 maio. 2007. Disponível em:

<<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=6850>>. Acesso em: 20 de jun.2012.

_____. Conselho Estadual de Política Ambiental. Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Minas Gerais. Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 1, de 05 de Maio de 2008. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. 2008. **Diário do Executivo**, Belo Horizonte, MG, 20 maio. 2008. Disponível em:<<http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/MINAS%20GERAIS%20Delibera%C3%A7%C3%A3o%20Normativa%20COPAM.pdf>>. Acesso em: 14 jan. 2014.

MITANI, M.M.; *et al.* Mass Transfer of Ozone using a microporous diffuser reactor system. **Ozone Science and Engineering**, v. 27, p. 45-51, 2005.

MOISA, R. E. **Avaliação Qualitativa de Passivos Ambientais em Postos de Serviço Através do Método de Análise Hierárquica de Processo**. 2005. 157p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2005. Disponível em: <<http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/dissertacao/084.pdf>>. Acesso em: 12 jun. 2014.

MORAES, S. G., FREIRE, R. S.; DURÁN, N. Degradation and toxicity reduction of textile zeffluent by combined photocatalytic and ozonation processes. **Chemosphere**, v. 40, n. 4, p. 369-373, 2000.

MOREIRA, I.; *et al.* Efeito do solvente na extração de ácidos clorogênicos, cafeína e trigonelina em *Coffea arábica*. **Química Nova**, v. 27, n.1, p. 39-43, 2014.

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.

MOUCHET, P.; BONNELYE, V. Solving algae problems: French expertise and world-wide applications. **Aqua**, v. 47, p. 125-141, 1998.

MVULA, E.; VON SONNTAG, C. Ozonolysis of phenols in aqueous solution. **Organic & Biomolecular Chemistry**, v. 1, n. 10, p. 1749-1756, 2003.

NOVAIS, V. L. D. **Ozônio: aliado e inimigo**. Editora Scipione, Série Ponto de Apoio. 102p. 1998. ISBN 8526267884.

OLIVEIRA, J. L. **Fotodegradação de corantes têxteis e aplicação da quitosana como tratamento terciário destes efluentes**. 2006. 70p. Dissertação (Mestrado em Química), Universidade Estadual de Maringá, Maringá. 2006.

ORHON, D.; *et al.* Ozonation application in activated sludge systems for a textile mill effluent. **Water Science & Technology**, v. 45, n. 12, p. 305-313, 2002.

PEIXOTO, A. L. C. **Ozonização catalítica do chorume proveniente do antigo aterro controlado da cidade de Guaratinguetá-SP utilizando os íons Fe²⁺, Fe³⁺, Zn²⁺, Mn²⁺, Ni²⁺ e Cr³⁺**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade de São Paulo, Lorena, 2008. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/97/97136/tde-26092012-142104/pt-br.php>>. Acesso em: 13 abr. 2013.

PENG, R.Y.; FAN, H. J. Ozonalytic kinetic order of dye decoloration in aqueous Solution. **Dyes and Pigments**. v.67, n.2, p.153-159. 2005.

PEREIRA, M. F. R.; *et al.* Adsorption of dyes on activated carbons: influence of surface chemical groups. **Carbon**. v. 41, n. 4, p. 811-821, 2003.

PEREIRA, M. F. R.; GONÇALVES, A. G.; ÓRFÃO, J. J. M. Carbon materials as catalysts for the ozonation of organic pollutants in water. **Digital.CSIC**. v. 31, p. 18-24, 2014. Disponível em: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/95690/1/Pereira_Carbon%20materials.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2014.

PEREIRA, J. T. **Métodos de desinfecção em água contendo *Cryptosporidium parvum* (Apicomplexa: Cryptosporidade) e sua detecção por técnica de biologia molecular**. 2007. 104p. Dissertação (Mestrado em Microbiologia, Parasitologia e Patologia). Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2007. Disponível em: <<http://www.dominiopublico.gov.br/download/texto/cp046382.pdf>> Acesso em: 02 jun. 2013.

RAJALA-MUSTONEN, R. L.; HEINONEN-TANSKI, H.. Effect of advanced oxidation processes on inactivation of coliphages. **Water Science and Technology**, v. 31, n. 5, p. 131-134, 1995. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/027312239500253J>>. Acesso em: 18 jun. 2013.

RIVAS, F. J.; *et al.* Homogeneous Catalyzed Ozone Decomposition in the Presence of Co (II). **Ozone Science & Engineering**, v. 25, n. 4, p. 261-271. 2003.

RIVERA-UTRILLA, J.; SÁNCHEZ-POLO, M. Ozonation of 1, 3, 6-naphthalenetrisulphonic acid catalysed by activated carbon in aqueous phase. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 39, n. 4, p. 319-329, 2002.

ROBINSON, T.; *et al.* Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. **Bioresource Technology**, v. 77, p. 247-255, 2001.

RODRIGUES, F. S. F. **Aplicação da ozonização e do reativo de Fenton como pré-tratamento de chorume com os objetivos de redução da toxicidade e do impacto no processo biológico**. 2004. 92p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

ROSA, L. G. *et al.* Caracterização de águas residuárias oriundas de empresas de lavagem de veículos e impactos ambientais. **Revista Ambiente & Água**, v. 6, p. 179-199, 2011.

RUBIO, J.; ZANETI, R. N. Treatment of washrack wastewater with water recycling by advanced flocculation-column flotation. **Desalination and Water Treatment**, v. 8, n. 1-3, p. 146-153, 2009.

SALLA, M. R. **Bases hidrodinâmicas para processos de transferência de gases em colunas com difusores**. 2002. 132p. 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. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-25012007-184737/pt-br.php>>. Acesso em: 05 jan. 2014.

SALLA, M. R.; *et al.* Interferência de partículas sólidas na transferência de massa ar-água em coluna de aeração. **Ciência & Engenharia**, v. 20, n. 2, p. 1-10, 2011. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/cieng/article/view/14037/8339>>. Acesso em: 03 jan. 2014.

SANCHEZ-POLO, M.; LEYVA-RAMOS, R.; RIVERA-UTRILLA, J. Kinetics of 1, 3, 6-naphthalenetrisulphonic acid ozonation in presence of activated carbon. **Carbon**, v. 43, n. 5, p. 962-969, 2005.

SANO, N.; *et al.* Degradation of aqueous phenol by simultaneous use of ozone with silica-gel and zeolite. **Chemical Engineering and Processing**, v. 46, p. 513–519, 2007.

SANTOS, P. K.; *et al.* Descoloração e degradação do azo corante vermelho GRLX-220 por ozonização. **Química Nova**, v. 34, n. 8, p. 1315-1322, 2011.

SAWAMURA, M.Y.; MORITA, D.M. Mecanismos de desemulsificação de águas residuárias de indústrias de refino de óleo lubrificante pelo processo ácido- argila com cloreto férrico. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.4, p.76-83, 1999.

SCHNEIDER, E. E. **Avaliação de um reator de leito móvel com biofilme para tratamento de efluente da indústria do petróleo, com posterior ozonização acoplada a carvão ativado granular com biofilme**. 2010. 191p. Tese (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2010.

SCHOENELL, E. K. **Aplicação de ozônio o ozônio + peróxido de hidrogênio para remoção de compostos recalcitrantes em lixiviados de aterros sanitários**. 2013. 104p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo. 2013.

SECRON, M. B.; GIORDANO, G.; FILHO, O. B. **Controle da poluição hídrica gerada pelas atividades automotivas**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 74p. 2010. (Série Gestão e Planejamento Ambiental, 12). Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/publicacao/series_sgpa/sgpa-12.pdf>. Acesso em: 25 jun.2012.

SHU, H.; HUANG, C.; CHANG, M. Decolorization of mono-azo dyes in wastewater by advanced oxidation process: a case study of acid red 1 and acid yellow 23. **Chemosphere**, v. 29, n. 12, p. 2597-2607, 1994.

SILVA, A. A. R. **Avaliação das técnicas de eletrocoagulação e eletroflotação na recuperação de efluentes de lavagem de veículos**. 2009. 101p. Dissertação (Mestrado em Química dos Recursos Naturais - Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2009.

SILVA, A. C. **Degradação de corante em meio salino por ozonização**. 2006. 199p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2006.

SILVA, C. S. G.. **Considerações acerca do licenciamento ambiental de postos de revenda de combustíveis**. Disponível em: <<http://jus.com.br/revista/texto/21932>>. Acesso em: 23 dez. 2012.

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. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos. 2008. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-18112008-152643/pt-br.php>>. Acesso em: 05 dez. 2013.

SOARES, L. V. **Ozonização de esgoto sanitário: estudo da hidrodinâmica, transferência de massa e inativação de microorganismos indicadores.** 2007. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos. 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-19112007-101315/es.php>>. Acesso em: 20 dez. 2013.

SOARES, O.S.G.P. **Tratamento em contínuo de efluentes corados por ozonização catalítica.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Universidade do Porto, Porto. 2006. Disponível em: <<http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/59254/2/Texto%20integral.pdf>>. Acesso em: 11. Abr. 2014.

SOUTO, G. A. B. **Lixiviado de aterros sanitários brasileiros: estudo de remoção do nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar ("stripping").** 2009. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. Disponível em <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-19022009-121756/pt-br.php>>. Acesso em: 22 nov. 2013.

SOUZA, F. B. **Remoção de Compostos Fenólicos de Efluentes Petroquímicos com Tratamentos Sequenciais e Simultâneos de Ozonização e Adsorção.** 2009. 132p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2009.

SOUZA, J. B.; DANIEL, L. A. Inativação dos microorganismos indicadores *Escherichia coli*, *colifagos* e *Clostridium perfringens* empregando ozônio. **Âmbiência – Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 4, n. 2, 2008.

SUTY, H.; TRAVERSAY, C.; COST, M. Applications of advanced oxidation processes: present and future. **Water Science & Technology**, v. 49, n. 4, p. 227-233, 2004.

TEIXEIRA, P.C. **Emprego da flotação por ar dissolvido no tratamento de efluentes de lavagem de veículos visando a reciclagem da água.** 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000318368>>. Acesso em: 03 jun. 2013.

TIZAOUI, C.; *et al.* Landfill leachate treatment with ozone and ozone/hydrogen peroxide systems. **Journal of Hazardous materials**, v. 140, p. 316-324, 2007.

TORRADES, F.; *et al.* Experimental design of Fenton and photo-Fenton reactions for the treatment of cellulose bleaching effluents. **Chemosphere**, v. 53, n. 10, p. 1211-1220, 2003. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com/S0045653503005794/1-s2.0-S0045653503005794main.pdf?_tid=8b2257c8-e8be11e380480000aabb0f01&acdnat=1401539262_aee426706919c348085a87b6f5fb678a>. Acesso em 22 mar. 2014.

TREYBAL, R.E. **Mass Transfer Operations**. Third Edition, McGraw-Hill Book Company, London. 2004.

UBERLÂNDIA. Lei Complementar nº 524, de 08 de abril de 2011. Institui o Código Municipal de Obras do município de Uberlândia e de seus distritos. **Diário Oficial do município de Uberlândia**, Uberlândia, MG, 09 abr. 2011. Disponível em: <http://www.uberlandia.mg.gov.br/uploads/cms_b_arquivos/120.pdf>. Acesso em: 20 de jun.2012.

VALDÉS, H.; *et al.* Effect of ozone treatment on surface properties of activated carbon. **Langmuir**, v. 18, n. 6, p. 2111-2116. 2002. Disponível em: <http://hera.ugr.es/doi/14996923.pdf?origin=publication_detail>. Acesso em: 10 abr. 2014.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3 ed. Belo Horizonte: DESA-UFMG. 452p. 2005. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 1). ISBN 85-7041-114-6.

ZAROR, C. A. Enhanced oxidation of toxic effluents using simultaneous ozonation and activated carbon treatment. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**. v. 70, n. 1, p. 21-28, 1997.

APÊNDICE A

Dados experimentais obtidos utilizando-se ar atmosférico como gás de arraste

Onde: BR Amostra bruta
 5' tempo de contato de 5 minutos
 20' tempo de contato de 20 minutos
 Abs absorvância

ENSAIOS COM AR COMPRIMIDO																			
ALTURA = 0,5 m																			
Vazão L/h	Amostra	ALCALINIDADE (mg/L CaCO3)					pH	COR (mg Pt-Co/L)				TURBIDEZ (UNT)				DQO (mg O2/L)			
		V1(mL)	V2(mL)	V3(mL)	Vmedio	Média		1	2	3	Média	1	2	3	Média	Abs 1	Abs 2	Abs 3	Média
1º ENSAIO 25/04/2013																			
500	BRUTO	3,00	2,98	3,50	3,16	63,82	6,88	80,0	77,0	78,0	78,3	86,7	89,9	80,0	85,5	0,109	0,119	0,114	285,00
	5 MIN	3,51	3,52	3,56	3,53	71,29	7,31	87,0	91,0	89,0	89,0	88,7	88,3	88,7	88,6	0,109	0,118	0,112	282,50
	20 MIN	3,64	3,60	3,58	3,61	72,84	7,47	86,0	86,0	86,0	86,0	85,0	79,0	79,6	81,2	0,130	0,097	0,100	272,50
100	BRUTO	2,66	3,50	3,54	3,52	71,09	6,79	88,0	90,0	92,0	90,0	86,6	88,6	88,0	87,7	0,116	0,105	0,114	279,17
	5 MIN	3,52	3,47	3,56	3,52	71,02	7,18	82,0	87,0	85,0	84,7	87,2	88,3	88,6	88,0	0,120	0,104	0,105	274,17
	20 MIN	3,54	3,52	3,48	3,51	70,96	7,37	86,0	87,0	84,0	85,7	88,0	88,0	75,0	83,7	0,115	0,104	0,115	278,33
1500	BRUTO	3,54	3,63	3,60	3,59	72,50	6,66	86,0	90,0	92,0	89,3	87,8	88,1	89,0	88,3	0,120	0,116	0,112	290,00
	5 MIN	3,52	3,54	3,50	3,52	71,09	7,45	88,0	91,0	89,0	89,3	87,0	85,6	86,7	86,4	0,108	0,130	0,100	281,67
	20 MIN	3,46	3,54	3,58	3,53	71,22	7,70	92,0	90,0	85,0	89,0	72,2	72,3	72,8	72,4	0,130	0,100	0,140	308,33
2000	BRUTO	3,40	3,26	3,42	3,36	67,86	6,73	74,0	70,0	75,0	73,0	74,9	73,6	75,1	74,5	0,090	0,100	0,094	236,67
	5 MIN	3,38	3,38	3,38	3,38	68,26	7,43	72,0	73,0	71,0	72,0	65,5	65,7	65,2	65,5	0,100	0,100	0,080	233,33
	20 MIN	3,36	3,36	3,36	3,36	67,86	7,69	72,0	73,0	72,0	72,3	49,7	50,5	50,6	50,3	0,150	0,100	0,080	275,00
2º ENSAIO 24/05/2013																			
500	BRUTO	2,44	2,86	2,92	2,89	58,78	6,86	51,0	53,0	52,0	52,0	75,2	75,9	77,8	76,3	0,046	0,048	0,051	120,83
	5 MIN	2,90	2,96	2,98	2,95	59,93	7,15	65,0	67,0	68,0	66,7	72,3	77,0	73,2	74,2	0,058	0,047	0,044	124,17
	20 MIN	2,86	2,84	2,82	2,84	57,76	7,25	63,0	63,0	63,0	63,0	64,0	65,0	80,0	69,7	0,046	0,067	0,052	137,50
100	BRUTO	2,58	2,80	2,84	2,82	57,35	7,09	83,0	70,2	82,0	78,4	78,1	78,9	79,5	78,8	0,057	0,063	0,058	148,33
	5 MIN	2,80	2,82	2,84	2,82	57,35	7,59	78,0	75,0	77,0	76,7	74,8	76,2	76,7	75,9	0,055	0,055	0,063	144,17
	20 MIN	2,90	2,86	2,84	2,87	58,30	7,69	69,0	80,0	66,0	71,7	77,0	62,0	77,0	72,0	0,060	0,053	0,062	145,83
1500	BRUTO	3,10	3,50	3,35	3,32	67,46	7,09	57,0	54,0	57,0	56,0	79,9	80,4	79,3	79,9	0,055	0,060	0,054	140,83
	5 MIN	3,40	3,42	3,42	3,41	69,42	7,42	56,0	56,0	54,0	55,3	67,6	77,0	70,0	71,5	0,047	0,048	0,035	118,75
	20 MIN	3,30	3,27	3,30	3,29	66,91	7,50	56,0	55,0	58,0	56,3	69,0	85,0	81,0	78,3	0,050	0,034	0,060	137,50
2000	BRUTO	3,40	3,40	3,43	3,41	69,35	7,59	67,0	70,0	73,0	70,0	78,9	79,3	79,7	79,3	0,063	0,054	0,057	145,00
	5 MIN	3,50	3,48	3,45	3,48	70,71	7,81	75,0	72,0	72,0	73,0	80,0	75,0	75,0	76,7	0,043	0,046	0,050	115,83
	20 MIN	3,45	3,45	3,42	3,44	69,96	7,83	64,0	73,0	66,0	67,7	75,0	75,0	69,0	73,0	0,070	0,040	0,033	119,17
3º ENSAIO 24/06/2013																			
500	BRUTO	3,45	3,43	3,45	3,44	69,50	6,75	99,0	97,0	98,0	98,0	166,0	167,0	167,0	166,7	0,128	0,127	0,126	317,50
	5 MIN	3,45	3,50	3,50	3,48	70,30	6,89	104,0	104,0	106,0	104,7	161,0	164,0	162,0	162,3	0,130	0,106	0,115	292,50
	20 MIN	3,60	3,60	3,58	3,59	72,52	6,93	105,0	91,0	91,0	95,7	180,0	150,0	125,0	151,7	0,119	0,122	0,115	296,67
100	BRUTO	3,75	3,74	3,73	3,74	75,48	7,07	105,0	108,0	108,0	107,0	128,0	127,0	128,0	127,7	0,108	0,112	0,110	275,00
	5 MIN	3,78	3,79	3,78	3,78	76,36	7,27	103,0	103,0	103,0	103,0	123,0	123,0	124,0	123,3	0,109	0,105	0,118	276,67
	20 MIN	3,75	3,75	3,75	3,75	75,68	7,39	89,0	99,0	99,0	95,7	98,0	115,0	115,0	109,3	0,115	0,092	0,119	271,67
1500	BRUTO	3,45	3,40	3,47	3,44	69,43	6,83	95,0	94,0	94,0	94,3	142,0	142,0	142,0	142,0	0,092	0,091	0,092	229,17
	5 MIN	3,65	3,68	3,70	3,68	74,20	7,06	95,0	96,0	96,0	95,7	122,0	150,0	148,0	140,0	0,105	0,108	0,104	264,17
	20 MIN	3,58	3,55	3,51	3,55	71,58	7,11	85,0	91,0	97,0	91,0	112,0	120,0	139,0	123,7	0,071	0,068	0,071	175,00
2000	BRUTO	3,25	3,27	3,31	3,28	66,13	7,03	105,0	106,0	106,0	105,7	133,0	135,0	136,0	134,7	0,110	0,114	0,114	281,67
	5 MIN	3,60	3,55	3,50	3,55	71,65	7,06	98,0	99,0	97,0	98,0	120,0	114,0	114,0	116,0	0,100	0,118	0,100	265,00
	20 MIN	3,48	3,50	3,50	3,49	70,50	7,10	106,0	107,0	107,0	106,7	145,0	149,0	150,0	148,0	0,122	0,119	0,121	301,67
4º ENSAIO 08/07/2013																			
500	BRUTO	3,70	3,72	3,70	3,71	74,81	7,05	62,0	64,0	64,0	63,3	61,9	60,8	61,6	61,4	0,079	0,075	0,090	203,33
	5 MIN	3,65	3,65	3,60	3,63	73,33	7,31	60,0	63,0	62,0	61,7	60,6	62,7	61,8	61,7	0,080	0,088	0,076	203,33
	20 MIN	3,70	3,65	3,65	3,67	74,00	7,44	66,0	66,0	67,0	66,3	48,5	50,9	49,3	49,6	0,095	0,059	0,059	177,50
100	BRUTO	3,60	3,53	3,50	3,54	71,51	6,68	81,0	82,0	83,0	82,0	66,1	68,2	68,8	67,7	0,095	0,088	0,066	207,50
	5 MIN	3,68	3,67	3,67	3,67	74,14	7,00	74,0	72,0	73,0	73,0	60,1	62,5	61,9	61,5	0,079	0,070	0,090	199,17
	20 MIN	3,65	3,65	3,64	3,65	73,60	7,12	76,0	75,0	75,0	75,3	45,6	46,2	46,9	46,2	0,080	0,089	0,051	183,33
1500	BRUTO	3,50	3,53	3,51	3,51	70,91	4,04	79,0	80,0	80,0	79,7	82,1	80,3	81,0	81,1	0,080	0,096	0,098	228,33
	5 MIN	3,80	3,80	3,85	3,82	77,03	6,97	70,0	71,0	72,0	71,0	75,3	75,4	75,5	75,4	0,089	0,092	0,085	221,67
	20 MIN	3,79	3,78	3,80	3,79	76,49	7,10	80,0	81,0	83,0	81,3	60,9	61,2	61,7	61,3	0,098	0,099	0,075	226,67
2000	BRUTO	3,85	3,85	3,85	3,85	77,70	6,58	86,0	89,0	89,0	88,0	71,6	73,2	72,8	72,5	0,100	0,094	0,089	235,83
	5 MIN	4,05	4,05	4,05	4,05	81,74	7,06	85,0	85,0	85,0	85,0	58,8	60,3	60,7	59,9	0,130	0,074	0,072	230,00
	20 MIN	4,08	4,07	4,05	4,07	82,08	7,23	85,0	85,0	85,0	85,0	62,9	63,1	64,4	63,5	0,085	0,086	0,115	238,33

ENSAIOS COM AR COMPRIMIDO																			
ALTURA = 1,0 m																			
Vazão L/h	Amostra	ALCALINIDADE (mg/L CaCO3)					pH	COR (mg Pt-Co/L)				TURBIDEZ (UNT)				DQO (mg O2/L)			
		V1(mL)	V2(mL)	V3(mL)	Vmedio	Média		1	2	3	Média	1	2	3	Média	Abs 1	Abs 2	Abs 3	Média
1º ENSAIO 29/04/2013																			
500	BRUTO	3,62	3,52	3,30	3,48	70,28	7,11	73,00	73,00	73,00	73,0	107,0	108,0	107,0	107,3	0,110	0,109	0,109	273,33
	5 MIN	3,12	3,04	3,08	3,08	62,20	7,41	78,00	81,00	81,00	80,0	106,0	109,0	109,0	108,0	0,109	0,109	0,104	268,33
	20 MIN	3,28	3,42	3,38	3,36	67,86	7,50	87,00	85,00	88,00	86,7	101,0	110,0	104,0	105,0	0,122	0,100	0,110	276,67
100	BRUTO	3,00	2,46	2,34	2,60	52,51	6,76	87,00	90,00	90,00	89,0	103,0	102,0	104,0	103,0	0,105	0,105	0,105	262,50
	5 MIN	2,90	3,36	3,32	3,19	64,49	7,20	90,00	90,00	91,00	90,3	107,0	108,0	107,0	107,3	0,103	0,105	0,103	259,17
	20 MIN	3,26	3,24	3,20	3,23	65,30	7,22	88,00	87,00	87,00	87,3	97,4	105,0	98,5	100,3	0,102	0,115	0,092	257,50
1500	BRUTO	3,38	3,34	3,28	3,33	67,32	6,89	102,0	105,0	103,0	103,3	99,9	101,0	101,0	100,6	0,105	0,109	0,103	264,17
	5 MIN	3,20	3,24	3,20	3,21	64,90	7,33	92,0	93,0	94,0	93,0	103,0	104,0	104,0	103,7	0,109	0,104	0,103	263,33
	20 MIN	3,22	3,16	3,14	3,17	64,09	7,59	86,0	88,0	88,0	87,3	98,9	102,0	101,0	100,6	0,105	0,100	0,109	261,67
2000	BRUTO	3,60	3,56	3,38	3,51	70,96	7,00	88,0	91,0	89,0	89,3	73,7	69,0	75,8	72,8	0,102	0,098	0,104	253,33
	5 MIN	3,02	3,02	3,02	3,02	60,99	7,79	82,0	85,0	83,0	83,3	73,2	74,2	75,4	74,3	0,099	0,095	0,103	247,50
	20 MIN	3,00	2,98	2,98	2,99	60,32	7,90	93,0	93,0	94,0	93,3	65,6	75,0	75,0	71,9	0,091	0,099	0,109	249,17
2º ENSAIO 28/05/2013																			
500	BRUTO	3,25	3,30	3,40	3,32	67,46	6,79	60,0	61,0	63,0	61,3	76,8	77,7	79,2	77,9	0,059	0,061	0,054	145,00
	5 MIN	3,45	3,45	3,40	3,43	69,83	7,12	76,0	74,0	74,0	74,7	77,6	78,7	78,5	78,3	0,056	0,055	0,053	136,67
	20 MIN	3,48	3,45	3,48	3,47	70,57	7,35	77,0	75,0	75,0	75,7	78,4	79,3	79,5	79,1	0,047	0,061	0,051	132,50
100	BRUTO	3,50	3,50	3,45	3,48	70,85	7,49	77,0	77,0	79,0	77,7	79,2	84,3	82,1	81,9	0,056	0,052	0,056	136,67
	5 MIN	3,45	3,45	3,42	3,44	69,96	7,96	71,0	75,0	75,0	73,7	81,1	81,9	82,1	81,7	0,051	0,054	0,054	132,50
	20 MIN	3,42	3,43	3,40	3,42	69,49	7,84	78,0	82,0	79,0	79,7	81,9	82,5	81,7	82,0	0,060	0,047	0,049	130,00
1500	BRUTO	3,13	3,20	3,22	3,18	64,74	6,74	58,0	61,0	64,0	61,0	88,5	89,0	88,1	88,5	0,064	0,073	0,076	177,50
	5 MIN	3,18	3,23	3,29	3,23	65,76	7,18	64,0	67,0	65,0	65,3	77,6	83,0	76,9	79,2	0,070	0,071	0,130	176,25
	20 MIN	3,27	3,30	3,29	3,29	66,85	7,46	66,0	72,0	69,0	69,0	77,0	77,0	72,0	75,3	0,070	0,065	0,072	172,50
2000	BRUTO	3,39	3,38	3,37	3,38	68,74	7,15	72,0	74,0	75,0	73,7	83,6	84,5	85,4	84,5	0,064	0,066	0,080	162,50
	5 MIN	3,32	3,30	3,27	3,30	67,05	7,66	69,0	73,0	71,0	71,0	80,0	73,5	78,0	77,2	0,056	0,070	0,072	177,50
	20 MIN	3,30	3,30	3,30	3,30	67,12	7,76	69,0	72,0	72,0	71,0	79,0	75,0	84,5	79,5	0,062	0,066	0,069	164,17
3º ENSAIO 26/06/2013																			
500	BRUTO	3,40	3,50	3,50	3,47	69,97	6,78	102,0	104,0	105,0	103,7	95,8	97,4	96,4	96,5	0,091	0,103	0,099	244,17
	5 MIN	3,60	3,58	3,53	3,57	72,05	6,87	102,0	105,0	104,0	103,7	94,5	95,8	94,5	94,9	0,103	0,093	0,094	241,67
	20 MIN	3,55	3,53	3,45	3,51	70,84	7,04	92,0	93,0	95,0	93,3	99,0	92,0	95,0	95,3	0,090	0,099	0,102	242,50
100	BRUTO	3,50	3,60	3,52	3,54	71,45	6,97	120,0	124,0	125,0	123,0	99,9	101,0	102,0	101,0	0,097	0,105	0,099	250,83
	5 MIN	3,70	3,68	3,65	3,68	74,20	7,33	108,0	107,0	108,0	107,7	95,1	94,9	95,9	95,3	0,127	0,120	0,092	282,50
	20 MIN	3,65	3,60	3,55	3,60	72,66	7,43	110,0	112,0	110,0	110,7	90,0	108,0	95,0	97,7	0,099	0,100	0,099	248,33
1500	BRUTO	3,47	3,47	3,55	3,50	70,57	6,87	118,0	118,0	117,0	117,7	104,0	104,0	103,0	103,7	0,100	0,105	0,106	259,17
	5 MIN	3,45	3,50	3,55	3,50	70,64	7,07	96,0	96,0	96,0	96,0	103,0	98,0	99,0	100,0	0,094	0,109	0,098	250,83
	20 MIN	3,50	3,50	3,48	3,49	70,50	7,20	96,0	98,0	96,0	96,7	99,0	99,8	100,1	99,6	0,104	0,101	0,099	253,33
2000	BRUTO	3,55	3,53	3,60	3,56	71,85	6,66	103,0	107,0	108,0	106,0	118,0	118,0	119,0	118,3	0,107	0,109	0,108	270,00
	5 MIN	3,72	3,80	3,75	3,76	75,82	7,01	99,0	99,0	99,0	99,0	115,0	97,7	100,0	104,2	0,099	0,115	0,143	267,50
	20 MIN	3,65	3,62	3,65	3,64	73,46	7,05	100,0	105,0	102,0	102,3	100,0	115,0	115,0	110,0	0,095	0,101	0,115	259,17
4º ENSAIO 02/07/2013																			
500	BRUTO	3,12	3,20	3,15	3,16	221,60	6,80	75,0	76,0	75,0	75,3	81,1	81,9	81,5	81,5	0,089	0,095	0,091	229,17
	5 MIN	3,10	3,07	3,12	3,10	217,39	6,95	78,0	79,0	79,0	78,7	84,1	85,3	85,6	85,0	0,090	0,089	0,096	223,75
	20 MIN	3,21	3,32	3,30	3,28	230,02	7,02	70,0	72,0	73,0	71,7	71,6	71,9	71,4	71,6	0,078	0,084	0,101	219,17
100	BRUTO	3,80	3,79	3,75	3,78	265,36	7,27	87,0	87,0	85,0	86,3	80,4	80,8	81,9	81,0	0,097	0,100	0,099	246,67
	5 MIN	3,75	3,75	3,70	3,73	262,08	7,27	75,0	76,0	75,0	75,3	82,9	84,6	85,2	84,2	0,095	0,090	0,100	237,50
	20 MIN	3,60	3,62	3,60	3,61	253,19	7,45	69,0	73,0	73,0	71,7	71,1	71,0	71,4	71,2	0,105	0,091	0,088	236,67
1500	BRUTO	3,48	3,52	3,47	3,49	245,00	7,15	70,0	68,0	72,0	70,0	72,6	73,3	73,0	73,0	0,070	0,088	0,080	198,33
	5 MIN	3,35	3,32	3,29	3,32	233,06	7,33	64,0	66,0	66,0	65,3	71,0	69,5	70,3	70,3	0,072	0,075	0,075	185,00
	20 MIN	3,26	3,21	3,35	3,27	229,79	7,39	71,0	72,0	73,0	72,0	72,0	69,0	67,0	69,3	0,062	0,068	0,079	174,17
2000	BRUTO	3,65	3,62	3,65	3,64	255,53	7,07	88,0	89,0	88,0	88,3	70,7	71,5	71,2	71,1	0,089	0,088	0,088	220,83
	5 MIN	3,80	3,86	3,86	3,84	269,57	7,16	80,0	80,0	82,0	80,7	60,4	70,0	62,3	64,2	0,074	0,079	0,074	189,17
	20 MIN	3,86	3,89	3,86	3,87	271,67	7,18	79,0	81,0	81,0	80,3	70,0	69,0	68,0	69,0	0,069	0,072	0,080	184,17

ENSAIOS COM AR COMPRIMIDO																			
ALTURA = 1,5 m																			
Vazão (L/h)	Amostra	ALCALINIDADE (mg/L CaCO3)					pH	COR (mg Pt-Co/L)				TURBIDEZ (UNT)				DQO (mg O2/L)			
		V1(mL)	V2(mL)	V3(mL)	Vmedio	Média		1	2	3	Média	1	2	3	Média	Abs 1	Abs 2	Abs 3	Média
1º ENSAIO 01/05/2013																			
500	BRUTO	3,38	3,30	3,58	3,42	69,07	6,78	81,0	79,0	80,0	80,0	83,4	83,6	84,8	83,9	0,095	0,108	0,099	251,67
	5 MIN	3,72	3,72	3,70	3,71	74,99	7,11	76,0	78,0	79,0	77,7	86,4	87,0	86,8	86,7	0,102	0,108	0,105	262,50
	20 MIN	3,70	3,74	3,82	3,75	75,80	7,31	75,0	76,0	77,0	76,0	82,7	84,0	83,7	83,5	0,097	0,104	0,108	257,50
100	BRUTO	3,88	3,76	3,74	3,79	76,61	7,01	90,0	93,0	93,0	92,0	83,2	84,1	85,0	84,1	0,103	0,099	0,106	256,67
	5 MIN	3,76	3,74	3,70	3,73	75,40	7,39	84,0	84,0	84,0	84,0	84,9	86,4	87,1	86,1	0,101	0,104	0,101	255,00
	20 MIN	3,70	3,72	3,74	3,72	75,13	7,69	84,0	87,0	88,0	86,3	83,2	85,1	84,1	84,1	0,096	0,101	0,096	244,17
1500	BRUTO	3,60	3,52	3,58	3,57	72,03	6,79	92,0	90,0	91,0	91,0	94,4	92,6	92,5	93,2	0,107	0,111	0,109	272,50
	5 MIN	3,46	3,50	3,46	3,47	70,15	7,03	72,0	74,0	73,0	73,0	89,3	90,4	90,6	90,1	0,102	0,116	0,102	266,67
	20 MIN	3,46	3,44	3,44	3,45	69,61	7,28	81,0	84,0	83,0	82,7	90,1	91,0	91,2	90,8	0,099	0,111	0,105	262,50
2000	BRUTO	4,00	3,92	3,90	3,94	79,57	7,46	92,0	95,0	93,0	93,3	71,0	71,0	71,0	71,0	0,095	0,098	0,105	248,33
	5 MIN	3,90	4,00	3,88	3,93	79,30	8,08	85,0	87,0	85,0	85,7	75,1	76,4	75,5	75,7	0,099	0,102	0,091	243,33
	20 MIN	4,00	4,32	4,40	4,24	85,63	8,34	90,0	89,0	90,0	89,7	69,9	70,4	70,7	70,3	0,091	0,099	0,099	240,83
2º ENSAIO 03/06/2013																			
500	BRUTO	3,40	3,49	3,40	3,43	69,76	7,31	61,0	63,0	64,0	62,7	56,5	57,0	57,2	56,9	0,056	0,054	0,049	132,50
	5 MIN	3,40	3,43	3,47	3,43	69,83	7,43	61,0	60,0	60,0	60,3	56,4	57,8	58,1	57,4	0,052	0,058	0,051	134,17
	20 MIN	3,52	3,50	3,50	3,51	71,32	7,62	69,0	68,0	68,0	68,3	54,3	55,5	55,0	54,9	0,055	0,046	0,060	134,17
100	BRUTO	3,65	3,60	3,55	3,60	73,22	7,36	82,0	85,0	86,0	84,3	64,5	66,2	65,5	65,4	0,063	0,065	0,061	157,50
	5 MIN	3,50	3,50	3,50	3,50	71,18	7,61	78,0	81,0	79,0	79,3	66,8	65,8	65,4	66,0	0,061	0,062	0,065	156,67
	20 MIN	3,40	3,43	3,41	3,41	69,42	7,53	84,0	83,0	85,0	84,0	60,6	62,3	61,1	61,3	0,061	0,061	0,061	152,50
1500	BRUTO	3,40	3,41	3,45	3,42	69,56	7,58	89,0	89,0	90,0	89,3	61,8	61,7	61,7	61,7	0,064	0,065	0,063	160,00
	5 MIN	3,57	3,60	3,55	3,57	72,68	7,91	89,0	93,0	93,0	91,7	62,3	62,8	61,2	62,1	0,061	0,065	0,068	161,67
	20 MIN	3,57	3,60	3,57	3,58	72,81	8,02	92,0	93,0	90,0	91,7	57,8	59,7	58,5	58,7	0,060	0,060	0,069	157,50
2000	BRUTO	3,50	3,52	3,52	3,51	70,96	7,45	65,0	64,0	65,0	64,7	61,0	61,8	61,3	61,4	0,072	0,074	0,072	181,67
	5 MIN	3,49	3,53	3,50	3,51	70,82	7,52	68,0	67,0	67,0	67,3	61,0	60,5	61,2	60,9	0,070	0,072	0,063	170,83
	20 MIN	3,55	3,56	3,56	3,56	71,83	7,68	72,0	72,0	73,0	72,3	57,1	57,8	57,8	57,6	0,062	0,079	0,080	184,17
3º ENSAIO 10/06/2013																			
500	BRUTO	3,30	3,30	3,25	3,28	66,78	7,21	60,0	57,0	58,0	58,3	52,8	53,6	53,5	53,3	0,056	0,059	0,059	145,00
	5 MIN	2,91	2,80	2,79	2,83	57,63	7,27	64,0	63,0	64,0	63,7	54,4	54,8	55,2	54,8	0,059	0,055	0,069	152,50
	20 MIN	3,00	3,08	3,10	3,06	62,24	7,44	63,0	63,0	65,0	63,7	51,5	51,3	52,2	51,7	0,056	0,051	0,056	135,83
100	BRUTO	3,35	3,35	3,25	3,32	67,46	7,32	72,0	72,0	73,0	72,3	48,4	49,8	49,3	49,2	0,051	0,056	0,057	136,67
	5 MIN	3,01	2,90	2,95	2,95	60,07	7,51	74,0	73,0	74,0	73,7	50,2	50,1	50,4	50,2	0,053	0,054	0,057	136,67
	20 MIN	2,95	2,94	2,94	2,94	59,86	7,75	75,0	76,0	75,0	75,3	49,1	48,7	49,0	48,9	0,055	0,052	0,051	131,67
1500	BRUTO	3,37	3,34	3,32	3,34	68,00	7,09	63,0	63,0	64,0	63,3	49,8	50,2	50,3	50,1	0,057	0,061	0,057	145,83
	5 MIN	3,24	3,24	3,24	3,24	65,90	7,36	68,0	69,0	69,0	68,7	45,5	46,3	46,5	46,1	0,056	0,060	0,073	145,00
	20 MIN	3,20	3,22	3,19	3,20	65,15	7,48	74,0	77,0	76,0	75,7	44,0	44,1	44,6	44,2	0,057	0,052	0,061	141,67
2000	BRUTO	3,05	3,05	3,09	3,06	62,30	7,44	70,0	73,0	73,0	72,0	51,9	52,2	52,4	52,2	0,062	0,059	0,060	150,83
	5 MIN	3,30	3,35	3,32	3,32	67,59	7,76	76,0	76,0	76,0	76,0	45,9	46,0	45,7	45,9	0,060	0,067	0,053	150,00
	20 MIN	3,36	3,35	3,33	3,35	68,07	7,92	80,0	78,0	78,0	78,7	45,4	46,1	46,6	46,0	0,059	0,059	0,054	143,33
4º ENSAIO 28/06/2013																			
500	BRUTO	3,30	3,30	3,30	3,30	67,12	6,77	73,0	72,0	74,0	73,0	111,0	111,0	111,0	111,0	0,100	0,097	0,098	245,83
	5 MIN	3,25	3,20	3,19	3,21	65,35	7,01	77,0	78,0	78,0	77,7	108,0	110,0	111,0	109,7	0,093	0,093	0,105	242,50
	20 MIN	3,12	3,12	3,10	3,11	63,32	7,17	70,0	69,0	69,0	69,3	94,9	97,0	96,2	96,0	0,100	0,090	0,096	238,33
100	BRUTO	3,50	3,50	3,50	3,50	71,18	6,70	79,0	84,0	82,0	81,7	130,0	131,0	131,0	130,7	0,102	0,114	0,130	288,33
	5 MIN	3,55	3,53	3,50	3,53	71,73	7,04	77,0	81,0	80,0	79,3	156,0	159,0	157,0	157,3	0,112	0,110	0,104	271,67
	20 MIN	3,45	3,43	3,45	3,44	70,03	7,17	86,0	86,0	86,0	86,0	121,0	125,0	122,0	122,7	0,097	0,112	0,112	267,50
1500	BRUTO	3,50	3,54	3,45	3,50	71,12	6,95	81,0	83,0	83,0	82,3	102,0	103,0	102,0	102,3	0,099	0,098	0,097	245,00
	5 MIN	3,25	3,25	3,24	3,25	66,03	7,16	76,0	77,0	77,0	76,7	92,0	94,3	92,9	93,1	0,089	0,099	0,091	232,50
	20 MIN	3,22	3,20	3,20	3,21	65,22	7,25	77,0	82,0	80,0	79,7	79,4	79,6	82,7	80,6	0,099	0,099	0,079	230,83
2000	BRUTO	3,50	3,50	3,57	3,52	71,66	7,16	83,0	84,0	82,0	83,0	89,9	89,1	89,9	89,6	0,102	0,096	0,099	247,50
	5 MIN	3,90	3,90	3,95	3,92	79,66	7,46	73,0	76,0	77,0	75,3	79,8	81,6	80,5	80,6	0,089	0,081	0,088	215,00
	20 MIN	3,90	3,90	3,89	3,90	79,25	7,53	80,0	81,0	82,0	81,0	70,0	70,5	69,7	70,1	0,099	0,105	0,078	235,00

APÊNDICE B

Dados experimentais obtidos utilizando-se oxigênio puro como gás de arraste

Onde: BR Amostra bruta
 5' tempo de contato de 5 minutos
 20' tempo de contato de 20 minutos
 Abs absorbância

ENSAIOS COM OXIGENIO																			
ALTURA = 0.5 m																			
Vazão L/h	Amostra	ALCALINIDADE (mg/L CaCO3)					pH	COR (mg Pt-Co/L)				TURBIDEZ (UNT)				DQO (mg O2/L)			
		V1(mL)	V2(mL)	V3(mL)	Vmedio	Média		1	2	3	Média	1	2	3	Média	Abs 1	Abs 2	Abs 3	Média
1º ENSAIO 13/09/2013																			
500	BRUTO	8,43	8,45	8,50	8,46	170,75	7,50	235,0	235,0	236,0	235,3	151,0	150,0	151,0	150,7	0,155	0,143	0,150	373,33
	5 MIN	8,52	8,52	8,50	8,51	171,82	7,69	224,0	224,0	224,0	224,0	146,0	147,0	147,0	146,7	0,143	0,145	0,143	359,17
	20 MIN	8,78	8,75	8,75	8,76	176,80	7,77	223,0	223,0	223,0	223,0	140,0	142,0	142,0	141,3	0,141	0,146	0,153	358,75
100	BRUTO	8,90	8,90	8,99	8,93	180,23	7,55	289,0	288,0	291,0	289,3	145,0	147,0	145,0	145,7	0,159	0,149	0,145	377,50
	5 MIN	9,00	9,05	9,05	9,03	182,32	7,72	256,0	259,0	257,0	257,3	143,0	143,0	143,0	143,0	0,144	0,145	0,155	361,25
	20 MIN	8,95	9,00	9,05	9,00	181,64	7,76	257,0	256,0	257,0	256,7	127,0	126,0	126,0	126,3	0,142	0,139	0,141	351,67
1500	BRUTO	8,45	8,35	8,50	8,43	170,21	7,56	221,0	221,0	222,0	221,3	147,0	148,0	150,0	148,3	0,147	0,140	0,154	367,50
	5 MIN	8,75	8,75	8,85	8,78	177,27	7,76	234,0	234,0	234,0	234,0	158,0	157,0	157,0	157,3	0,145	0,151	0,147	369,17
	20 MIN	8,90	8,90	8,80	8,87	178,95	7,88	235,0	236,0	236,0	235,7	115,0	113,0	114,0	114,0	0,139	0,140	0,141	350,00
2000	BRUTO	8,85	8,85	8,89	8,86	178,89	7,59	291,0	289,0	291,0	290,3	141,0	142,0	143,0	142,0	0,145	0,143	0,150	365,00
	5 MIN	8,89	9,05	9,10	9,01	181,91	7,93	251,0	252,0	250,0	251,0	128,0	129,0	128,0	128,3	0,142	0,141	0,151	361,67
	20 MIN	9,05	9,10	9,08	9,08	183,19	8,01	216,0	218,0	217,0	217,0	102,0	100,0	101,0	101,0	0,145	0,143	0,143	359,17
2º ENSAIO 14/10/2013																			
500	BRUTO	3,39	3,40	3,40	3,40	68,55	5,85	93,0	93,0	92,0	92,7	112,0	112,0	112,0	112,0	0,170	0,152	0,152	395,00
	5 MIN	3,55	3,55	3,57	3,56	71,78	6,06	107,0	109,0	110,0	108,7	143,0	146,0	149,0	146,0	0,152	0,148	0,149	374,17
	20 MIN	3,60	3,56	3,55	3,57	72,05	6,15	99,0	95,0	96,0	96,7	118,0	120,0	118,0	118,7	0,147	0,150	0,150	372,50
100	BRUTO	3,20	3,20	3,15	3,18	64,25	5,52	131,0	128,0	123,0	127,3	151,0	154,0	154,0	153,0	0,152	0,153	0,153	381,67
	5 MIN	3,50	3,50	3,55	3,52	70,98	6,05	131,0	131,0	135,0	132,3	161,0	163,0	161,0	161,7	0,150	0,155	0,150	379,17
	20 MIN	3,50	3,52	3,55	3,52	71,11	6,07	107,0	107,0	107,0	107,0	135,0	139,0	137,0	137,0	0,143	0,147	0,149	365,83
1500	BRUTO	3,30	3,32	3,30	3,31	66,74	5,51	135,0	136,0	135,0	135,3	171,0	176,0	178,0	175,0	0,158	0,147	0,149	378,33
	5 MIN	3,62	3,65	3,67	3,65	73,60	6,05	131,0	131,0	127,0	129,7	179,0	179,0	179,0	179,0	0,151	0,147	0,147	370,83
	20 MIN	3,75	3,75	3,75	3,75	75,68	6,08	116,0	118,0	120,0	118,0	138,0	139,0	141,0	139,3	0,147	0,153	0,145	365,00
2000	BRUTO	3,63	3,65	3,68	3,65	73,73	5,56	133,0	130,0	130,0	131,0	200,0	200,0	202,0	200,7	0,155	0,151	0,147	377,50
	5 MIN	3,85	3,88	3,88	3,87	78,11	6,07	131,0	131,0	132,0	131,3	186,0	186,0	186,0	186,0	0,154	0,154	0,155	385,83
	20 MIN	3,90	3,90	3,90	3,90	78,71	6,07	112,0	115,0	110,0	112,3	153,0	161,0	158,0	157,3	0,146	0,144	0,151	362,50
3º ENSAIO 28/10/2013																			
500	BRUTO	1,60	1,60	1,60	1,60	32,29	6,05	160,0	161,0	159,0	160,0	159,0	161,0	159,0	159,7	0,170	0,170	0,170	425,00
	5 MIN	1,82	1,80	1,80	1,81	36,46	5,95	200,0	195,0	200,0	198,3	174,0	175,0	175,0	174,7	0,145	0,161	0,159	387,50
	20 MIN	1,75	1,77	1,75	1,76	35,45	5,81	187,0	187,0	187,0	187,0	154,0	160,0	159,0	157,7	0,153	0,153	0,156	385,00
100	BRUTO	1,63	1,60	1,59	1,61	32,43	5,35	196,0	195,0	195,0	195,3	154,0	158,0	158,0	156,7	0,170	0,161	0,163	411,67
	5 MIN	1,70	1,70	1,70	1,70	34,31	5,57	199,0	200,0	199,0	199,3	168,0	168,0	168,0	168,0	0,155	0,156	0,156	389,17
	20 MIN	1,75	1,75	1,75	1,75	35,32	5,56	180,0	180,0	180,0	180,0	148,0	151,0	152,0	150,3	0,153	0,153	0,161	389,17
1500	BRUTO	1,60	1,60	1,60	1,60	32,29	5,23	216,0	217,0	217,0	216,7	170,0	170,0	170,0	170,0	0,166	0,158	0,157	400,83
	5 MIN	1,75	1,75	1,73	1,74	35,19	5,45	208,0	206,0	204,0	206,0	156,0	156,0	156,0	156,0	0,155	0,156	0,158	390,83
	20 MIN	1,80	1,80	1,80	1,80	36,33	5,48	183,0	186,0	184,0	184,3	143,0	143,0	144,0	143,3	0,154	0,155	0,155	386,67
2000	BRUTO	1,85	1,80	1,82	1,82	36,80	5,32	218,0	220,0	220,0	219,3	158,0	158,0	158,0	158,0	0,177	0,166	0,160	419,17
	5 MIN	1,90	1,85	1,88	1,88	37,88	5,45	208,0	208,0	209,0	208,3	164,0	164,0	164,0	164,0	0,153	0,156	0,156	387,50
	20 MIN	1,72	1,70	1,70	1,71	34,45	5,43	179,0	178,0	178,0	178,3	139,0	139,0	139,0	139,0	0,156	0,153	0,156	387,50

ENSAIOS COM OXIGÊNIO																			
ALTURA = 1,0 m																			
Vazão L/h	Amostra	ALCALINIDADE (mg/L CaCO3)					pH	COR (mg Pt-Co/L)				TURBIDEZ (UNT)				DQO (mg O2/L)			
		V1(mL)	V2(mL)	V3(mL)	Vmedio	Média		1	2	3	Média	1	2	3	Média	Abs 1	Abs 2	Abs 3	Média
1º ENSAIO 18/09/2013																			
500	BRUTO	8,15	8,05	8,05	8,08	567,45	7,27	288,0	290,0	292,0	290,0	160,0	149,0	150,0	153,0	0,142	0,144	0,148	361,67
	5 MIN	8,85	8,85	8,85	8,85	621,27	7,44	236,0	237,0	238,0	237,0	178,0	179,0	179,0	178,7	0,147	0,147	0,145	365,83
	20 MIN	8,90	8,85	9,00	8,92	625,95	7,49	256,0	257,0	258,0	257,0	149,0	150,0	150,0	149,7	0,143	0,146	0,149	365,00
100	BRUTO	8,50	8,45	8,60	8,52	597,87	7,52	363,0	364,0	366,0	364,3	134,0	133,0	133,0	133,3	0,148	0,147	0,147	368,33
	5 MIN	9,10	9,10	9,15	9,12	639,99	7,69	270,0	268,0	269,0	269,0	167,0	171,0	170,0	169,3	0,136	0,139	0,144	349,17
	20 MIN	9,35	9,25	9,25	9,28	651,69	7,73	275,0	275,0	275,0	275,0	131,0	132,0	125,0	129,3	0,133	0,137	0,138	340,00
1500	BRUTO	9,20	9,20	9,30	9,23	648,18	7,71	318,0	320,0	318,0	318,7	138,0	139,0	139,0	138,7	0,146	0,152	0,148	371,67
	5 MIN	9,28	9,35	9,30	9,31	653,56	8,03	253,0	253,0	253,0	253,0	147,0	150,0	150,0	149,0	0,140	0,148	0,148	363,33
	20 MIN	9,25	9,28	9,25	9,26	650,05	7,96	265,0	264,0	267,0	265,3	130,0	130,0	139,0	133,0	0,136	0,140	0,139	345,83
2000	BRUTO	8,45	8,40	8,45	8,43	592,02	7,48	354,0	354,0	354,0	354,0	139,0	140,0	140,0	139,7	0,149	0,158	0,150	380,83
	5 MIN	9,00	9,00	9,05	9,02	632,97	7,70	260,0	263,0	261,0	261,3	157,0	156,0	159,0	157,3	0,147	0,147	0,147	367,50
	20 MIN	8,85	8,95	8,90	8,90	624,78	7,76	270,0	265,0	262,0	265,7	119,0	125,0	123,0	122,3	0,139	0,133	0,136	340,00
2º ENSAIO 16/10/2013																			
500	BRUTO	2,15	2,40	2,40	2,32	162,63	5,33	87,0	87,0	89,0	87,7	158,0	164,0	166,0	162,7	0,152	0,149	0,151	376,67
	5 MIN	2,36	2,40	2,40	2,39	167,54	5,49	133,0	127,0	129,0	129,7	134,0	134,0	133,0	133,7	0,152	0,144	0,152	373,33
	20 MIN	2,68	2,72	2,75	2,72	190,71	5,63	136,0	136,0	135,0	135,7	151,0	165,0	166,0	160,7	0,152	0,143	0,150	370,83
100	BRUTO	2,86	2,83	2,90	2,86	201,01	5,36	141,0	145,0	142,0	142,7	159,0	153,0	150,0	154,0	0,146	0,147	0,147	366,67
	5 MIN	3,00	3,04	3,05	3,03	212,71	5,62	151,0	151,0	152,0	151,3	156,0	153,0	155,0	154,7	0,154	0,146	0,148	367,50
	20 MIN	3,05	3,10	3,10	3,08	216,45	5,68	124,0	127,0	127,0	126,0	140,0	158,0	140,0	146,0	0,144	0,146	0,144	361,67
1500	BRUTO	3,85	3,80	3,83	3,83	268,63	5,36	159,0	166,0	161,0	162,0	159,0	158,0	166,0	161,0	0,151	0,149	0,144	375,00
	5 MIN	3,80	3,75	3,74	3,76	264,19	5,67	141,0	141,0	141,0	141,0	144,0	145,0	145,0	144,7	0,151	0,152	0,144	378,75
	20 MIN	3,55	3,55	3,55	3,55	249,21	5,68	120,0	119,0	120,0	119,7	160,0	158,0	160,0	159,3	0,152	0,142	0,138	350,00
2000	BRUTO	3,50	3,45	3,48	3,48	244,06	5,50	156,0	161,0	155,0	157,3	152,0	158,0	154,0	154,7	0,153	0,142	0,146	367,50
	5 MIN	3,48	3,40	3,45	3,44	241,72	5,81	139,0	138,0	137,0	138,0	170,0	173,0	171,0	171,3	0,149	0,147	0,144	366,67
	20 MIN	3,45	3,42	3,45	3,44	241,49	5,83	122,0	123,0	123,0	122,7	149,0	153,0	147,0	148,0	0,147	0,152	0,140	358,75
3º ENSAIO 31/10/2013																			
500	BRUTO	1,79	1,83	1,85	1,82	128,00	5,85	159,0	157,0	159,0	158,3	193,0	198,0	195,0	195,3	0,153	0,158	0,155	388,33
	5 MIN	2,00	2,00	2,00	2,00	140,40	6,10	202,0	204,0	202,0	202,7	211,0	209,0	210,0	210,0	0,159	0,159	0,157	395,83
	20 MIN	1,90	1,90	1,90	1,90	133,38	6,10	170,0	169,0	171,0	170,0	191,0	190,0	186,0	189,0	0,150	0,153	0,153	380,00
100	BRUTO	1,85	1,85	1,85	1,85	129,87	5,97	200,0	206,0	206,0	204,0	206,0	206,0	206,0	206,0	0,156	0,157	0,157	391,67
	5 MIN	2,00	2,03	2,00	2,01	141,10	6,15	199,0	195,0	197,0	197,0	216,0	218,0	218,0	217,3	0,155	0,152	0,155	385,00
	20 MIN	1,92	1,95	1,95	1,94	136,19	6,18	189,0	188,0	188,0	188,3	200,0	201,0	207,0	202,7	0,154	0,149	0,150	377,50
1500	BRUTO	2,05	2,02	2,00	2,02	142,04	5,96	198,0	199,0	199,0	198,7	206,0	209,0	210,0	208,3	0,161	0,156	0,153	391,67
	5 MIN	2,18	2,12	2,15	2,15	150,93	6,22	189,0	195,0	190,0	191,3	225,0	230,0	228,0	227,7	0,157	0,154	0,154	387,50
	20 MIN	2,05	2,02	2,04	2,04	142,97	6,24	189,0	185,0	188,0	187,3	205,0	205,0	199,0	203,0	0,150	0,150	0,150	375,00
2000	BRUTO	1,93	1,90	1,90	1,91	134,08	5,91	184,0	184,0	184,0	184,0	218,0	222,0	220,0	220,0	0,153	0,153	0,153	382,50
	5 MIN	2,25	2,22	2,25	2,24	157,25	6,19	184,0	181,0	180,0	181,7	239,0	242,0	240,0	240,3	0,155	0,155	0,154	386,67
	20 MIN	2,05	2,05	2,05	2,05	143,91	6,25	163,0	158,0	165,0	162,0	200,0	215,0	228,0	214,3	0,151	0,151	0,152	378,33

ENSAIOS COM OXIGÊNIO																			
ALTURA = 1,5 m																			
Vazão (L/h)	Amostra	ALCALINIDADE (mg/L CaCO3)					pH	COR (mg Pt-Co/L)				TURBIDEZ (UNT)				DQO (mg O2/L)			
		V1(mL)	V2(mL)	V3(mL)	Vmedio	Média		1	2	3	Média	1	2	3	Média	Abs 1	Abs 2	Abs 3	Média
1º ENSAIO 20/09/2013																			
500	BRUTO	10,30	10,40	10,50	10,40	612,21	7,60	302,0	303,0	304,0	303,0	137,0	135,0	136,0	136,0	0,150	0,145	0,149	370,00
	5 MIN	10,65	10,70	10,75	10,70	629,87	7,77	293,0	294,0	297,0	294,7	165,0	166,0	169,0	166,7	0,146	0,148	0,145	365,83
	20 MIN	10,75	10,73	10,75	10,74	632,42	7,87	280,0	274,0	274,0	276,0	169,0	170,0	170,0	169,7	0,145	0,149	0,147	367,50
100	BRUTO	9,50	9,50	9,52	9,51	559,63	7,53	343,0	342,0	342,0	342,3	142,0	148,0	145,0	145,0	0,149	0,152	0,156	380,83
	5 MIN	10,25	10,25	10,30	10,27	604,36	7,71	254,0	254,0	254,0	254,0	178,0	179,0	181,0	179,3	0,148	0,153	0,152	377,50
	20 MIN	10,20	10,25	10,25	10,23	602,40	7,76	263,0	267,0	263,0	264,3	162,0	167,0	162,0	163,7	0,142	0,149	0,139	358,33
1500	BRUTO	9,95	9,95	10,20	10,03	590,63	7,49	299,0	303,0	300,0	300,7	109,0	108,0	107,0	108,0	0,151	0,148	0,151	375,00
	5 MIN	10,00	10,00	9,95	9,98	587,69	7,72	218,0	215,0	215,0	216,0	112,0	113,0	113,0	112,7	0,147	0,152	0,145	370,00
	20 MIN	9,65	9,75	9,80	9,73	572,97	7,83	223,0	226,0	222,0	223,7	102,0	104,0	104,0	103,3	0,150	0,147	0,144	367,50
2000	BRUTO	9,80	9,85	9,87	9,84	579,25	7,55	311,0	311,0	311,0	311,0	113,0	114,0	115,0	114,0	0,154	0,148	0,151	377,50
	5 MIN	9,95	9,93	9,95	9,94	585,33	7,75	252,0	253,0	252,0	252,3	109,0	110,0	110,0	109,7	0,143	0,142	0,144	357,50
	20 MIN	10,10	10,07	10,05	10,07	592,98	7,89	264,0	264,0	265,0	264,3	99,1	97,8	97,4	98,1	0,139	0,139	0,140	348,33
2º ENSAIO 15/10/2013																			
500	BRUTO	2,30	2,25	2,27	2,27	133,82	5,41	78,0	79,0	81,0	79,3	114,0	115,0	113,0	114,0	0,159	0,157	0,152	390,00
	5 MIN	2,95	3,20	3,20	3,12	183,47	5,76	89,0	92,0	90,0	90,3	91,3	90,7	90,9	91,0	0,152	0,155	0,157	386,67
	20 MIN	2,70	2,70	2,72	2,71	159,33	5,91	86,0	89,0	87,0	87,3	81,2	78,7	81,8	80,6	0,156	0,153	0,150	382,50
100	BRUTO	2,95	2,94	2,95	2,95	173,46	5,59	99,0	96,0	98,0	97,7	101,0	102,0	102,0	101,7	0,153	0,153	0,153	382,50
	5 MIN	3,35	3,30	3,10	3,25	191,32	5,83	106,0	106,0	106,0	106,0	98,0	96,0	99,4	97,8	0,153	0,149	0,159	377,50
	20 MIN	3,20	3,09	3,16	3,15	185,43	5,92	105,0	106,0	105,0	105,3	88,1	88,9	87,3	88,1	0,151	0,149	0,151	375,83
1500	BRUTO	2,75	2,77	2,80	2,77	163,26	5,57	117,0	115,0	118,0	116,7	127,0	128,0	122,0	127,5	0,145	0,151	0,159	379,17
	5 MIN	2,90	2,95	2,98	2,94	173,26	5,90	120,0	117,0	122,0	119,7	113,0	117,0	112,0	114,0	0,150	0,153	0,158	385,00
	20 MIN	3,05	3,08	3,10	3,08	181,11	6,01	112,0	113,0	111,0	112,0	93,6	95,0	94,5	94,4	0,149	0,152	0,148	374,17
2000	BRUTO	3,02	3,05	3,07	3,05	179,35	5,60	115,0	115,0	116,0	115,3	111,0	109,0	111,0	110,3	0,162	0,152	0,162	396,67
	5 MIN	2,98	3,00	3,03	3,00	176,80	5,90	118,0	119,0	120,0	119,0	91,1	92,6	93,7	92,5	0,160	0,153	0,152	387,50
	20 MIN	3,00	3,00	3,05	3,02	177,58	5,94	117,0	119,0	117,0	117,7	80,2	82,1	80,1	80,8	0,149	0,150	0,150	374,17
3º ENSAIO 01/11/2013																			
500	BRUTO	2,27	2,30	2,30	2,29	134,80	5,33	142,0	144,0	144,0	143,3	214,0	211,0	210,0	211,7	0,157	0,160	0,159	396,67
	5 MIN	2,35	2,35	2,35	2,35	138,34	5,54	163,0	166,0	162,0	163,7	175,0	178,0	180,0	177,7	0,155	0,160	0,160	395,83
	20 MIN	2,40	2,36	2,40	2,39	140,50	5,78	164,0	165,0	166,0	165,0	169,0	169,0	169,0	169,0	0,156	0,155	0,158	390,83
100	BRUTO	2,85	2,83	2,85	2,84	167,38	5,42	174,0	170,0	168,0	170,7	175,0	178,0	178,0	177,0	0,166	0,161	0,160	405,83
	5 MIN	2,65	2,65	2,67	2,66	156,39	5,66	163,0	163,0	166,0	164,0	192,0	190,0	190,0	190,7	0,166	0,158	0,161	404,17
	20 MIN	2,15	2,15	2,12	2,14	125,97	5,83	159,0	161,0	158,0	159,3	177,0	177,0	177,0	177,0	0,157	0,160	0,160	397,50
1500	BRUTO	3,65	3,66	3,67	3,66	215,45	5,68	154,0	152,0	153,0	153,0	182,0	183,0	182,0	182,3	0,161	0,160	0,161	401,67
	5 MIN	3,45	3,45	3,45	3,45	203,09	5,93	147,0	149,0	148,0	148,0	176,0	176,0	176,0	176,0	0,168	0,164	0,165	414,17
	20 MIN	3,20	3,20	3,20	3,20	188,37	6,14	141,0	140,0	137,0	139,3	143,0	143,0	143,0	143,0	0,157	0,157	0,159	394,17
2000	BRUTO	4,40	4,40	4,38	4,39	258,62	6,80	128,0	125,0	125,0	126,0	174,0	175,0	177,0	175,3	0,158	0,156	0,158	393,33
	5 MIN	4,45	4,45	4,43	4,44	261,56	6,27	106,0	107,0	107,0	106,7	230,0	226,0	226,0	227,3	0,159	0,158	0,158	395,83
	20 MIN	4,60	4,58	4,60	4,59	270,39	6,48	75,0	76,0	76,0	75,7	216,0	216,0	218,0	216,7	0,159	0,151	0,151	384,17

APÊNDICE C

Dados experimentais obtidos na ozonização convencional

Onde:

Abs absorbância

ENSAIOS COM OZÔNIO - pH <i>in natura</i>																		
ALTURA = 0,5 m / DOSE 35 mg/L - VAZÃO 60 L/h																		
AMOSTRA	ALCALINIDADE (mg/L CaCO3)				pH	COR (mg Pt-Co/L)				TURBIDEZ (UNT)				DQO (mg O2/L)				
	V1(mL)	V2(mL)	V3(mL)	Vmedio		Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média	Abs 1	Abs 2	Abs 3	Média
1º ENSAIO 07/11/2013																		
BRUTO	3,75	3,77	3,75	3,76	82,87	7,19	255,0	255,0	255,0	255,0	164,0	166,0	164,0	164,7	0,150	0,152	0,154	380,00
5 MIN	3,35	3,34	3,35	3,35	73,82	7,40	222,0	225,0	223,0	223,3	177,0	176,0	176,0	176,3	0,154	0,154	0,149	380,83
20 MIN	2,95	2,95	2,98	2,96	65,29	7,82	148,0	152,0	152,0	150,7	167,0	168,0	168,0	167,7	0,147	0,146	0,147	366,67
40 MIN	2,90	2,90	2,90	2,90	63,97	8,01	127,0	132,0	128,0	129,0	156,0	159,0	155,0	156,7	0,147	0,151	0,149	372,50
60 MIN	2,70	2,70	2,70	2,70	59,56	8,10	92,0	90,0	91,0	91,0	135,0	136,0	135,0	135,3	0,148	0,148	0,148	370,00
90 MIN	2,50	2,45	2,45	2,47	54,41	8,04	88,0	90,0	89,0	89,0	113,0	112,0	112,0	112,3	0,143	0,143	0,144	358,33
3º ENSAIO 13/11/2013																		
BRUTO	4,00	4,00	4,00	4,00	88,24	5,66	176,0	174,0	174,0	174,7	120,0	120,0	122,0	120,7	0,155	0,156	0,159	391,67
5 MIN	3,80	3,70	3,75	3,75	82,72	5,70	173,0	174,0	174,0	173,7	115,0	115,0	117,0	115,7	0,155	0,158	0,159	393,33
20 MIN	3,66	3,65	3,65	3,65	80,59	5,84	143,0	140,0	143,0	142,0	113,0	113,0	113,0	113,0	0,152	0,157	0,155	386,67
40 MIN	3,40	3,40	3,40	3,40	75,00	5,98	114,0	116,0	115,0	115,0	104,0	104,0	106,0	104,7	0,154	0,153	0,156	385,83
60 MIN	3,20	3,22	3,20	3,21	70,74	5,98	104,0	106,0	106,0	105,3	96,5	97,2	97,4	97,0	0,154	0,154	0,154	385,00
90 MIN	3,10	3,10	3,10	3,10	68,38	6,02	92,0	93,0	93,0	92,7	86,8	87,1	88,9	87,6	0,148	0,149	0,149	371,67
4º ENSAIO 21/11/2013																		
BRUTO	4,90	4,90	4,90	4,90	108,09	6,41	235,0	238,0	235,0	236,0	149,0	150,0	150,0	149,7	0,151	0,152	0,153	380,00
5 MIN	4,65	4,65	4,65	4,65	102,57	6,42	229,0	232,0	231,0	230,7	150,0	152,0	152,0	151,3	0,149	0,149	0,149	372,50
20 MIN	4,45	4,45	4,45	4,45	98,16	6,58	215,0	214,0	213,0	214,0	146,0	147,0	146,0	146,3	0,146	0,146	0,148	366,67
40 MIN	4,30	4,30	4,30	4,30	94,85	6,63	194,0	194,0	192,0	193,3	142,0	143,0	143,0	142,7	0,147	0,146	0,147	366,67
60 MIN	4,25	4,20	4,23	4,23	93,24	6,66	176,0	176,0	176,0	176,0	136,0	137,0	137,0	136,7	0,148	0,148	0,148	370,00
90 MIN	4,00	4,00	4,05	4,02	88,60	6,71	126,0	124,0	125,0	125,0	127,0	127,0	127,0	127,0	0,140	0,139	0,140	349,17

ENSAIOS COM OZÔNIO - pH 10																		
ALTURA = 0,5 m / DOSE 35 mg/L - VAZÃO 60 L/h																		
AMOSTRA	ALCALINIDADE (mg/L CaCO3)					pH	COR (mg Pt-Co/L)				TURBIDEZ (UNT)				DQO (mg O2/L)			
	V1(mL)	V2(mL)	V3(mL)	Vmedio	Média			1	2	3	Média	1	2	3	Média	Abs 1	Abs 2	Abs 3
1º ENSAIO 22/11/2013																		
BRUTO	14,50	14,50	14,40	14,47	319,12	9,97	229,0	231,0	228,0	229,3	159,0	160,0	159,0	159,3	0,144	0,149	0,147	366,67
5 MIN	14,20	14,20	14,10	14,17	312,50	9,98	233,0	235,0	233,0	233,7	153,0	153,0	153,0	153,0	0,151	0,151	0,149	375,83
20 MIN	13,50	13,50	13,60	13,53	298,53	9,92	228,0	228,0	227,0	227,7	151,0	152,0	151,0	151,3	0,145	0,149	0,144	365,00
40 MIN	13,50	13,40	13,40	13,43	296,32	9,86	202,0	201,0	202,0	201,7	144,0	146,0	144,0	144,7	0,151	0,152	0,151	378,33
60 MIN	13,30	13,30	13,30	13,30	293,38	9,80	178,0	178,0	178,0	178,0	138,0	139,0	139,0	138,7	0,136	0,146	0,147	357,50
90 MIN	12,90	12,90	12,90	12,90	284,56	9,75	146,0	146,0	146,0	146,0	126,0	129,0	128,0	127,7	0,138	0,139	0,139	346,67
2º ENSAIO 27/11/2013																		
BRUTO	23,40	23,40	23,40	23,40	516,18	9,86	132,0	134,0	134,0	133,3	209,0	207,0	211,0	209,0	0,084	0,080	0,093	214,17
5 MIN	23,50	23,60	23,50	23,53	519,12	9,97	144,0	144,0	143,0	143,7	196,0	200,0	197,0	197,7	0,088	0,090	0,088	221,67
20 MIN	23,60	23,50	23,50	23,53	519,12	10,00	120,0	122,0	121,0	121,0	194,0	198,0	196,0	196,0	0,088	0,091	0,088	222,50
40 MIN	23,10	23,10	23,10	23,10	509,56	9,97	72,0	77,0	76,0	75,0	189,0	190,0	191,0	190,0	0,082	0,082	0,087	209,17
60 MIN	23,00	23,00	23,00	23,00	507,35	9,96	116,0	118,0	118,0	117,3	180,0	180,0	180,0	180,0	0,080	0,085	0,085	208,33
90 MIN	22,80	22,60	22,60	22,67	500,00	9,93	140,0	143,0	141,0	141,3	165,0	165,0	165,0	165,0	0,080	0,082	0,084	205,00
3º ENSAIO 29/11/2013																		
BRUTO	22,80	22,80	22,80	22,80	502,94	9,74	254,0	256,0	256,0	255,3	230,0	234,0	236,0	233,3	0,144	0,145	0,147	363,33
5 MIN	22,60	22,90	22,60	22,70	500,74	9,77	264,0	266,0	266,0	265,3	238,0	236,0	236,0	236,7	0,152	0,150	0,147	374,17
20 MIN	22,40	22,50	22,50	22,47	495,59	9,82	240,0	245,0	241,0	242,0	215,0	214,0	216,0	215,0	0,141	0,146	0,148	362,50
40 MIN	22,40	22,30	22,30	22,33	492,65	9,79	227,0	229,0	225,0	227,0	196,0	200,0	203,0	199,7	0,144	0,145	0,141	358,33
60 MIN	22,20	22,10	22,10	22,13	488,24	9,79	227,0	210,0	215,0	217,3	202,0	198,0	202,0	200,7	0,138	0,142	0,139	349,17
90 MIN	21,60	21,60	21,60	21,60	476,47	9,76	174,0	179,0	175,0	176,0	177,0	184,0	184,0	181,7	0,139	0,145	0,146	358,33

ENSAIOS COM OZÔNIO - pH 3																		
ALTURA = 0,5 m / DOSE 35 mg/L - VAZÃO 60 L/h																		
AMOSTRA	ALCALINIDADE (mg/L CaCO3)					pH	COR (mg Pt-Co/L)				TURBIDEZ (UNT)				DQO (mg O2/L)			
	V1(mL)	V2(mL)	V3(mL)	Vmedio	Média		1	2	3	Média	1	2	3	Média	Abs 1	Abs 2	Abs 3	Média
1º ENSAIO 28/11/2013																		
BRUTO	O ponto de viragem da titulação potenciométrica para o ensaio de alcalinidade é no pH 4,4 e como o pH do efluente, neste caso, era aproximadamente 3,00 não foi realizado este ensaio.					3,33	174,0	175,0	175,0	174,7	106,0	106,0	106,0	106,0	0,155	0,160	0,160	395,83
5 MIN						3,35	131,0	133,0	130,0	131,3	113,0	115,0	113,0	113,7	0,144	0,148	0,148	366,67
20 MIN						3,31	105,0	107,0	107,0	106,3	130,0	129,0	129,0	129,3	0,154	0,153	0,148	379,17
40 MIN						3,28	89,0	91,0	91,0	90,3	126,0	127,0	125,0	126,0	0,150	0,148	0,150	373,33
60 MIN						3,28	88,0	86,0	88,0	87,3	118,0	119,0	118,0	118,3	0,144	0,145	0,146	362,50
90 MIN						3,32	76,0	76,0	77,0	76,3	110,0	111,0	110,0	110,3	0,123	0,123	0,135	317,50
2º ENSAIO 18/12/2013																		
BRUTO	O ponto de viragem da titulação potenciométrica para o ensaio de alcalinidade é no pH 4,4 e como o pH do efluente, neste caso, era aproximadamente 3,00 não foi realizado este ensaio.					3,15	181,0	176,0	180,0	179,0	222,0	227,0	230,0	226,3	0,166	0,168	0,154	406,67
5 MIN						3,16	155,0	160,0	155,0	156,7	244,0	244,0	242,0	243,3	0,152	0,154	0,151	380,83
20 MIN						3,13	108,0	104,0	103,0	105,0	224,0	230,0	225,0	226,3	0,141	0,150	0,147	365,00
40 MIN						3,12	77,0	78,0	79,0	78,0	210,0	213,0	214,0	212,3	0,139	0,143	0,142	353,33
60 MIN						3,10	62,0	61,0	61,0	61,3	202,0	197,0	197,0	198,7	0,139	0,141	0,137	347,50
90 MIN						3,12	51,0	50,0	51,0	50,7	182,0	183,0	186,0	183,7	0,130	0,128	0,126	320,00
3º ENSAIO 19/12/2013																		
BRUTO	O ponto de viragem da titulação potenciométrica para o ensaio de alcalinidade é no pH 4,4 e como o pH do efluente, neste caso, era aproximadamente 3,00 não foi realizado este ensaio.					2,97	149,0	148,0	148,0	148,3	171,0	171,0	171,0	171,0	0,168	0,159	0,163	408,33
5 MIN						2,93	122,0	124,0	125,0	123,7	176,0	176,0	177,0	176,3	0,135	0,131	0,130	330,00
20 MIN						2,93	97,0	96,0	93,0	95,3	165,0	168,0	165,0	166,0	0,133	0,127	0,130	325,00
40 MIN						2,94	77,0	74,0	73,0	74,7	150,0	153,0	152,0	151,7	0,123	0,126	0,124	310,83
60 MIN						2,98	57,0	59,0	61,0	59,0	143,0	144,0	146,0	144,3	0,123	0,120	0,123	305,00
90 MIN						2,99	40,0	38,0	39,0	39,0	134,0	131,0	133,0	132,7	0,117	0,120	0,120	297,50

APÊNDICE D

Dados experimentais obtidos na ozonização com adição de carvão ativado

Onde:

Abs absorvância

ENSAIOS COM EFLUENTE COLETADO DIA 24/03/2014																								
ALTURA = 0,5 m																								
PARÂMETROS	ALCALINIDADE (mg/L CaCO3)				pH	COR (mg Pt-Co/L)				TURBIDEZ (UNT)				DQO BRUTA (mg O2/L)				DQO FILTRADA (mg O2/L)						
	V1(mL)	V2(mL)	V3(mL)	Vmedio		Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média	Abs 1	Abs 2	Abs 3	Média	Abs 1	Abs 2	Abs 3	Média		
ENSAIO 1 (pH <i>in natura</i>) - OZÔNIO (35 mg/L) + CARVÃO ATIVADO (1g/L)																								
BRUTO	3,60	3,60	3,60	3,60	72,01	6,96	44,0	43,0	41,0	42,7	17,4	17,0	17,5	17,3	0,053	0,051	0,059	135,83	135,83	0,047	0,045	0,046	115,00	115,00
5 MIN	2,80	2,75	2,75	2,77	55,34	6,87	38,0	42,0	38,0	39,3	19,7	20,2	19,9	19,9	0,049	0,042	0,045	113,33	113,33	0,044	0,045	0,044	110,83	110,83
20 MIN	2,60	2,65	2,60	2,62	52,34	6,89	27,0	27,0	30,0	28,0	22,9	23,5	22,9	23,1	0,045	0,049	0,051	120,83	120,83	0,039	0,037	0,039	95,83	95,83
40 MIN	2,50	2,50	2,52	2,51	50,14	7,01	22,0	22,0	24,0	22,7	20,9	20,6	20,9	20,8	0,042	0,044	0,041	105,83	105,83	0,033	0,037	0,036	88,33	88,33
60 MIN	2,40	2,40	2,45	2,42	48,34	7,08	11,0	11,0	10,0	10,7	8,0	8,1	8,4	8,2	0,060	0,050	0,045	129,17	129,17	0,031	0,032	0,035	81,67	81,67
90 MIN	2,20	2,25	2,25	2,23	44,67	7,26	6,0	6,0	6,0	6,0	2,2	2,2	2,2	2,2	0,033	0,045	0,035	94,17	94,17	0,029	0,033	0,031	77,50	77,50
ENSAIO 2 (pH ácido ≅ 3,00) - OZÔNIO (35 mg/L) + CARVÃO ATIVADO (1g/L)																								
BRUTO	O ponto de viragem da titulação potenciométrica para o ensaio de alcalinidade é no pH 4,4 e como o pH do efluente, neste caso, era aproximadamente 3,00 não foi realizado este ensaio.					2,82	64,0	63,0	65,0	64,0	20,1	21,0	20,9	20,7	0,035	0,037	0,038	91,67	91,67	0,024	0,023	0,028	62,50	62,50
5 MIN						2,80	45,0	45,0	45,0	45,0	16,3	16,8	17,0	16,7	0,027	0,024	0,020	59,17	59,17	0,020	0,019	0,017	46,67	46,67
20 MIN						2,80	22,0	21,0	22,0	21,7	12,2	12,7	12,5	12,5	0,018	0,020	0,023	50,83	50,83	0,017	0,016	0,019	43,33	43,33
40 MIN						2,88	13,0	13,0	13,0	13,0	8,3	8,2	8,7	8,4	0,017	0,017	0,017	42,50	42,50	0,015	0,013	0,015	35,83	35,83
60 MIN						2,86	5,0	6,0	5,0	5,3	4,4	4,5	4,3	4,4	0,012	0,015	0,018	37,50	37,50	0,013	0,009	0,011	27,50	27,50
90 MIN						2,89	4,0	4,0	3,0	3,7	2,2	2,2	2,4	2,3	0,019	0,020	0,022	50,83	50,83	0,030	0,025	0,027	68,33	68,33
ENSAIO 3 (pH <i>in natura</i>) - OZÔNIO (35 mg/L) + CARVÃO ATIVADO (2g/L)																								
BRUTO	2,70	2,75	2,70	2,72	54,34	7,04	31,0	35,0	35,0	33,7	11,3	11,6	11,4	11,4	0,023	0,028	0,025	63,33	63,33	0,031	0,027	0,028	71,67	71,67
5 MIN	2,55	2,60	2,60	2,58	51,67	6,99	29,0	29,0	28,0	28,7	16,9	16,7	16,7	16,8	0,017	0,016	0,015	40,00	40,00	0,017	0,016	0,015	40,00	40,00
20 MIN	2,45	2,44	2,40	2,43	48,61	7,14	24,0	25,0	25,0	24,7	13,3	13,5	13,2	13,3	0,019	0,022	0,018	49,17	49,17	0,013	0,020	0,023	46,67	46,67
40 MIN	2,40	2,35	2,35	2,37	47,34	7,20	16,0	14,0	13,0	14,3	9,8	9,8	9,7	9,8	0,014	0,018	0,011	35,83	35,83	0,022	0,020	0,013	45,83	45,83
60 MIN	2,25	2,27	2,25	2,26	45,14	7,25	18,0	18,0	18,0	18,0	8,5	8,9	8,6	8,7	0,017	0,018	0,015	41,67	41,67	0,016	0,013	0,016	37,50	37,50
90 MIN	2,20	2,20	2,20	2,20	44,00	7,22	14,0	14,0	14,0	14,0	7,3	7,3	7,3	7,3	0,020	0,020	0,014	45,00	45,00	0,015	0,020	0,018	44,17	44,17
ENSAIO 4 (pH ácido ≅ 3,00) - OZÔNIO (35 mg/L) + CARVÃO ATIVADO (2g/L)																								
BRUTO	O ponto de viragem da titulação potenciométrica para o ensaio de alcalinidade é no pH 4,4 e como o pH do efluente, neste caso, era aproximadamente 3,00 não foi realizado este ensaio.					2,80	25,0	24,0	25,0	24,7	12,2	12,4	12,9	12,5	0,020	0,016	0,015	42,50	42,50	0,018	0,016	0,015	40,83	40,83
5 MIN						2,84	5,0	5,0	5,8	5,3	12,0	12,2	12,4	12,2	0,014	0,016	0,014	36,67	36,67	0,011	0,016	0,014	34,17	34,17
20 MIN						2,87	0,0	0,0	0,0	0,0	4,7	4,7	4,6	4,6	0,015	0,013	0,015	35,83	35,83	0,010	0,008	0,008	21,67	21,67
40 MIN						2,88	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	1,9	2,0	2,0	0,009	0,005	0,009	19,17	19,17	0,009	0,010	0,010	24,17	24,17
60 MIN						2,91	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	1,5	1,5	1,5	0,013	0,015	0,012	33,33	33,33	0,013	0,014	0,013	33,33	33,33
90 MIN						2,95	9,0	9,0	8,4	8,8	1,0	1,0	0,9	1,0	0,013	0,009	0,011	27,50	27,50	0,013	0,009	0,011	27,50	27,50
ENSAIO 5 - OZÔNIO SEM ADIÇÃO DE CARVÃO ATIVADO (pH do efluente)																								
BRUTO	2,45	2,48	2,45	2,46	49,21	6,66	81,0	81,0	81,0	81,0	63,5	64,8	63,9	64,1	0,063	0,072	0,066	167,50	167,50	0,052	0,055	0,054	134,17	134,17
5 MIN	2,40	2,45	2,45	2,43	48,67	6,60	84,0	83,0	83,0	83,3	65,6	64,9	64,5	65,0	0,062	0,072	0,064	165,00	165,00	0,050	0,051	0,054	129,17	129,17
20 MIN	2,20	2,20	2,20	2,20	44,00	6,72	62,0	63,0	64,0	63,0	59,6	60,7	60,3	60,2	0,061	0,064	0,061	155,00	155,00	0,051	0,055	0,056	135,00	135,00
40 MIN	2,20	2,25	2,22	2,22	44,47	6,82	49,0	54,0	52,0	51,7	56,3	62,5	58,3	59,0	0,058	0,056	0,058	143,33	143,33	0,048	0,050	0,053	125,83	125,83
60 MIN	2,30	2,30	2,30	2,30	46,01	6,87	41,0	40,0	40,0	40,3	52,6	54,3	55,0	54,0	0,065	0,058	0,062	154,17	154,17	0,042	0,044	0,049	112,50	112,50
90 MIN	2,25	2,28	2,30	2,28	45,54	6,98	33,0	33,0	33,0	33,0	48,2	49,5	48,9	48,9	0,051	0,053	0,055	132,50	132,50	0,045	0,045	0,044	111,67	111,67