

DEGRADAÇÃO DE CORANTE EM MEIO SALINO POR
OZONIZAÇÃO

Alessandra Cristina Silva

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA QUÍMICA.

Aprovada por:

Prof. Márcia Walquíria de Carvalho Dezotti, D.Sc.

Prof. Geraldo Lippel Sant'Anna Jr., Dr. Ing.

Prof. Lídia Yokoyama, D.Sc.

Prof. Patrício Peralta Zamora, D.Sc.

Prof. Daniele Maia Bila D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ — BRASIL

JULHO DE 2006

SILVA, ALESSANDRA CRISTINA

Degradação de Corante em Meio Salino por
Ozonização [Rio de Janeiro] 2006

XVIII, 181 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc.,
Engenharia Química, 2006)

Tese — Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Corante
2. Ozonização
3. Salinidade

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

*A Deus, meu esposo José Valentim, minha
querida família, dedico com muito amor este
trabalho.*

AGRADECIMENTOS

- Agradeço a Deus por mais esta conquista, que durante o período de realização deste trabalho não deixou que meus ânimos e as minhas esperanças se abalassem pelas dificuldades encontradas. Transformando este período em tempo de crescimento e amadurecimento pessoal.
- Aos meus pais pelo carinho, incentivo e confiança, motivando-me nas decisões tomadas em minha vida profissional e acadêmica. As minhas irmãs (Elcimary e Renata) e ao meu querido sobrinho Gustavo. Obrigada por suportarem minha ausência, pelo apoio constante e por acreditarem que eu chegaria ao fim dessa jornada.
- Ao meu esposo, pelo amor, carinho e incentivo, durante todos os momentos deste trabalho.
- A professora Márcia Walquíria de Carvalho Dezotti cujas discussões e incentivo foram muito importantes para a condução deste trabalho.
- Ao meu grande mestre professor Geraldo Lippel Sant'Anna Jr. Junior, que desde o primeiro momento depositou em mim um voto de confiança, incentivando-me, indicando caminhos e acreditando em minha capacidade. À sua amizade e dedicação com orientações sempre presentes, certas e incansáveis foram fundamentais na realização deste trabalho.
- Ao INSA/Toulouse/França que me acolheu no estágio de doutorado sanduíche e permitiu o uso da sua planta piloto para os estudos de ozonização.
- Aos professores Huber Debellefontaine e Jean Stéphane Pic, cujos esclarecimentos, orientações e paciência foram fundamentais.
- Ao professor Xavier Lefebvre, pela orientação nos testes de respirometria.
- A todos os técnicos, colegas e professores do INSA/Toulouse/França pela ajuda constante nos laboratórios e pelo apoio naquilo que foi necessário.
- Aos professores Geraldo Lippel Sant'Anna Jr., Lídia Yokoyama, Patrício Peralta Zamora e Daniele Maia Bila por terem aceitado fazer parte da banca de tese.
- À amiga Juacyara Carbonelli Campos, pelo apoio durante a tese.
- À grande amiga Michely Libos, cujo estímulo foi fundamental durante o desenvolvimento deste trabalho.
- A todos os professores, colegas e funcionários do Programa de Engenharia Química que contribuíram, direta ou indiretamente, para a minha formação e pelo incentivo.
- A todos os amigos, que embora não citados nominalmente, contribuíram de alguma forma na realização deste trabalho.
- A CAPES pelo apoio financeiro na concessão de bolsa.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

DEGRADAÇÃO DE CORANTE EM MEIO SALINO POR OZONIZAÇÃO

Alessandra Cristina Silva

Julho/2006

Orientador: Márcia Walquíria de Carvalho Dezotti

Programa: Engenharia Química

Este trabalho 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 gás e fase líquida. Foi também avaliada a presença de capturadores de radicais $^{\circ}\text{OH}$ (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 (Respirometria).

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D. Sc.)

DEGRADATION OF DYE IN SALINE MEDIUM BY OZONATION

Alessandra Cristina Silva

July/2006

Advisor: Márcia Walquíria de Carvalho Dezotti

Department: Chemical Engineering

The aim of this work was to evaluate the efficiency of ozonation to degrade azo dyes, Orange II and Acid Red 27, in saline medium and different value of pH.

The ozonation was performed in a bubble column. Color and total organic carbon (TOC) removal were evaluated. Kinetic parameters and mass transfer between gas and liquid phases were determined. It was also evaluated the presence of OH radicals scavenger (tert-butanol).

The results showed that pH, tert-butanol and NaCl have influenced significantly the ozonation of the solutions containing azo dyes. It was observed a smaller degradation of the Acid Red 27 compared to Orange II with ozonation. The ozonation was not capable to degrade extensively the byproducts formed during ozonation in different value of pH.

Biodegradability tests using respirometry of the dyes solutions were carried out before and after ozonation. The results confirmed the inhibition in the biological process caused by the byproducts.

ÍNDICE

I – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
II.1 – CORANTES TÊXTEIS	4
II.1.1 – Evolução Histórica.....	4
II.1.2 – Corantes	5
II.1.3 – Tipos de Corantes Conforme a Constituição do Cromóforo.....	6
II.1.4 - Modo de Fixação dos Principais Corantes.....	7
II.2 - CORANTES AZO E PRINCIPAIS APLICAÇÕES	11
II.2.1 – Tipos de Corantes Utilizados na Indústria Têxtil.....	13
II.3 - CORANTES TÊXTEIS	14
II.3.1 – Indústria de Corantes Têxteis.....	14
II.3.2 – Indústria Têxtil na Europa.....	14
II.3.3 – Indústria de Corantes Têxteis no Brasil.....	15
II.3.4 – A Indústria Têxtil no Brasil.....	16
II.4 – PROCESSAMENTO NA INDÚSTRIA TÊXTIL	16
II.4.1– Consumo de Água.....	18
II.4.2– Geração de Efluentes na Indústria Têxtil.....	19
II.4.3 – Caracterização dos efluentes.....	20
II.5 – POSSÍVEIS IMPACTOS NO MEIO AMBIENTE	21
II.5.1 – Efeitos dos Corantes na Saúde Humana.....	22
II.6 – TOXICIDADE	23
II.6.1 – Testes de Toxicidade.....	24
II.6.2 – Testes de Respirimetria.....	26
II.6.2.1 Taxa de Consumo de Oxigênio (TCO).....	27
II.7 – TÉCNICAS DE TRATAMENTO EMPREGADAS PARA A REMOÇÃO DE CORANTES	27
II.7.1 – Processos biológicos de tratamento.....	27
II.7.2 – Processos Físico/Químicos.....	29
II.7.3 – Adsorção.....	31
II.7.4 – Processos com membranas	32
II.7.5 – Reuso	33

II.8 – PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS APLICADOS AO TRATAMENTO DE EFLUENTES DA INDUSTRIA TÊXTIL.....	33
II.8.1 – Reativo de Fenton.....	34
II.8.2 – Foto-Fenton.....	35
II.8.3 – Fotocatálise.....	35
II.8.4 – Processo H ₂ O ₂ /UV.....	36
II.9 – OZÔNIO.....	36
II.9.1– Mecanismo de Ação do Ozônio em Solução Aquosa.....	37
II. 9.1.1. Reação do ozônio por via direta ou molecular.....	37
II. 9.1.1.1 Reação de ciclo adição de ozônio.....	37
II. 9.1.1.2 Reação eletrofílica do ozônio.....	38
II. 9.1.1.3 Reação nucleofílica do ozônio.....	39
II. 9.1.2. Reação do ozônio por via radicalar.....	39
II. 9.1.2.1 Iniciação radicalar.....	40
II. 9.1.2.2 Propagação.....	40
II. 9.1.2.3 Finalização.....	40
II. 9.1.3. Caso particular dos corantes.....	41
II. 9.1.3.1 Mecanismo de ação do ozônio.....	42
II. 9.1.3.2 Comparação dos compostos benzênicos e naftalênicos.....	43
II. 9.1.3.3 Papel dos substituintes presentes nos anéis aromáticos dos corantes.....	43
II. 9.1.3.3.1 Os efeitos eletrônicos.....	43
II. 9.1.3.4 Mineralização dos substituintes.....	44
II.9.2– O papel do t-butanol nos processos com ação dos radicais.....	44
II. 9.3 Ozônio e suas Propriedades.....	44
II. 9.4 Estrutura do Ozônio.....	45
II. 9.5 – Propriedades Físico-Químicas.....	45
II. 9.6 Ação do Ozônio nos Corantes Azóicos.....	47
II. 9.7 Reações com os compostos aromáticos e seus derivados.....	47

II. 9.7.1 – Reação com espécies benzênicas.....	47
II. 9.7.2 – Reação com espécies naftalênicas.....	48
II. 9.8 – Ozonização de Corantes.....	48
II. 10 - SOLUBILIDADE DO OZÔNIO EM ÁGUA.....	51
II. 10.1. Lei do equilíbrio entre fases.....	51
II. 10.2 Expressão dos resultados de solubilidade.....	52
II. 10.3 Fatores que afetam a solubilidade dos gases na fase aquosa.....	53
II. 10.3.1 Influência de outras moléculas.....	53
II. 10.3.2 Influência do pH.....	55
II. 10.3.3 Influência da Temperatura.....	56
II.11 - TRANSFERÊNCIA DE MASSA EM REATORES GÁS-LÍQUIDO.....	57
II.11.1 Absorção Física sem Reação Química.....	57
II.11.2 Modelo do filme.....	57
II.11.3 Absorção física com reação química.....	60
II.12 COMENTÁRIOS FINAIS.....	63
III - MATERIAIS E MÉTODOS.....	64
III.1.1 – Gerador de Ozônio.....	65
III.1.2 – Analisador de Ozônio na Fase Líquida.....	65
III.1.3 – Analisador de Ozônio na Fase Gasosa.....	66
III.1.4 - Coluna de Borbulhamento.....	66
III.1.5 - Dispositivos de Controle.....	66
III.1.6 - Ensaio de Ozonização.....	67
III.2 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS CINÉTICOS E DE TRANSFERÊNCIA.....	68
III.3 ESTUDO HIDRODINÂMICO NA COLUNA DE OZONIZAÇÃO.....	69
III.3.1 - Determinação dos parâmetros hidrodinâmicos.....	69
III.3.2 - Determinação do diâmetro de Sauter.....	69
III.3.3 - Determinação da retenção gasosa.....	69
III.3.4 - Determinação da área interfacial.....	70
III.4 - ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE MASSA NA COLUNA DE OZONIZAÇÃO.....	70
III.4.1 - Evolução da Concentração de Ozônio.....	71
III.4.2 - Equações Básicas e Parâmetros Relevantes.....	72

III.4.3 - Constante de Auto-Decomposição (k_c).....	72
III.4.4 - Coeficiente de Transferência de Massa Volumétrico (k_{La}).....	73
III.4.5 - Coeficiente de Divisão do Ozônio	74
III.5 - OZONIZAÇÃO DOS CORANTES.....	74
III.5.1 - Estrutura dos Corantes Azóicos.....	74
III.5.2 - Determinação das Concentrações de Diferentes Espécies.....	75
III.6 - METODOLOGIAS ANALÍTICAS.....	77
III.6.1 Cor.....	77
III.6.2 - Carbono Orgânico Total (COT)	77
III.6.3 – Espectrofotometria UV.....	78
III.6.4 – Demanda Química de Oxigênio (DQO).....	78
III.6.5 - Cloreto.....	78
III.7 – RESPIROMETRIA.....	78
III.7.1 – Ensaio de Respirimetria.....	79
IV. - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	82
IV.1 – TRANSFERÊNCIA DE OZÔNIO NA COLUNA.....	82
IV.2 – DESEMPENHO DO SISTEMA DE OZONIZAÇÃO: ENSAIOS COM O CORANTE ORANGE II	94
IV.2.1 – Ensaio na ausência de NaCl e diferentes valores de pH.....	94
IV.2.2 – Ensaio realizados com diferentes concentrações de NaCl e de pH.....	100
IV.3 – DESEMPENHO DO SISTEMA DE OZONIZAÇÃO: ENSAIOS COM O CORANTE ACID RED 27.....	106
IV.3.1 – Remoção do corante e teor de ozônio na corrente gasosa de saída.....	106
IV.3.2 - Remoção do corante, teor de carbono orgânico (COT) e formação de intermediários.....	107
IV.4 – ENSAIOS DE OZONIZAÇÃO COM ADIÇÃO DE TERC-BUTANOL.....	108
IV. 4.1- Perfis de concentração de ozônio nas fases líquida e gasosa.....	108
IV. 4.2- Perfis de variação de concentração de corante e COT.....	111
IV. 4.3 Perfis de variação dos produtos intermediários para o corante Orange II com adição de terc-butanol.....	113
IV. 5- TESTES DE RESPIROMETRIA.....	114
V - CONCLUSÕES.....	123

VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
VII-ANEXOS	136
VII.1 - Anexo I.....	136
VII.2 - Anexo II.....	152
VII.3 - Anexo III.....	154

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II.1 Importância do setor têxtil nos países europeus	15
Figura II.2 Descrição dos poluentes e resíduos gerados nas etapas do processamento de tecidos.....	17
Figura II.3 Esquema geral dos mecanismos de ação do ozônio.....	37
Figura II.4 Cicloadição do ozônio em compostos insaturados.....	38
Figura II.5 Substituição eletrofilica em um carbono aromático.....	39
Figura II.6 Esquema de ozonização de uma base de Schiff em solvente inerte.....	39
Figura II.7 Esquema das reações radicalares em meio aquoso na presença de matéria orgânica.....	41
Figura II.8 Mecanismo de ozonização de 2-naftaleno-sulfonado.....	42
Figura II.9 Estruturas ressonantes da molécula de ozônio.....	45
Figura II.10 Esquema de degradação da anilina.....	48
Figura II.11 Modelo clássico de duplo filme de Lewis e Whitman (1923).....	58
Figura III.1 Diagrama esquemático da planta experimental.....	65
Figura III.2 Perfis de variação da concentração de ozônio na fase gás (saída) e na fase líquida em um reator semi-batelada, num ensaio típico de ozonização.....	71
Figura III.3 Estrutura dos corantes a) Orange II e b) Acid Red 27.....	75
Figura III.4 Espectro UV-Vis para o corante Orange II.....	76
Figura III.5 Espectro UV-Vis para o corante Acid Red 27.....	76
Figura III.6 Modelo do respirômetro SAPROMAT.....	79
Figura III.7 Componentes do respirômetro SAPROMAT.....	79
Figura III.8 Componentes do Respirômetro.....	80
Figura IV.1 Variação das concentrações de ozônio nas fases líquida (L) e gasosa (entrada do reator – Ge; saída do reator – Gs) na ausência de NaCl e diferentes valores iniciais de pH.....	83

Figura IV.2 Variação das concentrações de ozônio nas fases líquida (L) e gasosa (entrada do reator – Ge; saída do reator – Gs) no ensaio em meio salino (1g.L^{-1} de NaCl) e em diferentes valores iniciais de pH.....	85
Figura IV.3 Variação das concentrações de ozônio nas fases líquida (L) e gasosa (entrada do reator– Ge; saída do reator – Gs) em meio salino (40 g.L^{-1} de NaCl) e diferentes valores iniciais de pH.....	86
Figura IV.4 Variação das concentrações de ozônio nas fases líquida (L) e gasosa (entrada do reator – Ge; saída do reator– Gs) no ensaio em meio salino (100 g.L^{-1} de NaCl) e em diferentes valores iniciais de pH.....	88
Figura IV.5 Concentração de saturação de ozônio na fase líquida nos ensaios conduzidos em diferentes valores iniciais de pH e diferentes concentrações de NaCl.....	89
Figura IV.6 Representação gráfica permitindo o cálculo da soma dos parâmetros k_{La} e k_c - ensaio típico, pH inicial = 5, concentração de NaCl = 1g.L^{-1}	89
Figura IV.7 Constantes de decomposição do ozônio obtidos nos ensaios conduzidos em diferentes valores iniciais de pH e diferentes concentrações de NaCl.....	90
Figura IV.8 Valores do coeficiente volumétrico de transferência de ozônio (k_{La}) obtidos nos ensaios conduzidos em diferentes valores iniciais de pH e diferentes concentrações de NaCl.....	91
Figura IV.9 Valores do coeficiente de partição (m) obtidos nos ensaios conduzidos em diferentes valores iniciais de pH e diferentes concentrações de NaCl.....	92
Figura IV.10 Estrutura do corante Orange II.....	94
Figura IV.11 Variação do teor de ozônio na fase gasosa (saída da coluna) e da concentração de corante Orange II, pH 5, ausência de NaCl.....	95
Figura IV.12 Variação das concentrações do corante Orange II, dos intermediários e de COT ao longo do tempo de ozonização: ensaio realizado em pH 5 e ausência de NaCl.....	95
Figura IV.13 Variação do teor de ozônio na fase gasosa (saída da coluna) e da concentração de corante Orange II, pH 7,5, ausência de NaCl.....	96
Figura IV.14 Variação do teor de ozônio na fase gasosa (saída da coluna) e da concentração de corante Orange II, pH 7,5, ausência de NaCl.....	97
Figura IV.15 Variação do teor de ozônio na fase gasosa (saída da coluna) e da concentração de corante Orange II, pH 9, ausência de NaCl.....	98
Figura IV.16 Variação das concentrações de corante, de intermediários e de COT ao longo do tempo de ozonização: ensaio realizado em pH 9, na ausência de NaCl.....	99

Figura IV.17 Variação do teor de ozônio na fase gasosa (saída da coluna) e do corante Orange II nos ensaios realizados nos valores de pH 5; 7,5 e 9 em meios com diferentes concentrações de NaCl.....	103
Figura IV.18 Variação do teor de ozônio na fase gasosa (saída da coluna) e COT nos ensaios realizados nos valores de pH 5; 7,5 e 9 em meios com diferentes concentrações de NaCl.....	104
Figura IV.19 Variação das concentrações de corante e de intermediários naftalênicos e benzênicos nos ensaios realizados nos valores de pH 5 ; 7,5 e 9 em meios com diferentes concentrações de NaCl (1 , 40 e 100 g.L ⁻¹) – C = concentração, Col = corante, P1 intermediários naftalênicos, P2 intermediários benzênicos.....	105
Figura IV.20 Estrutura do corante Acid Red 27.....	106
Figura IV.21 Variação do teor de ozônio na fase gasosa (saída da coluna) e da concentração de corante (Acid Red 27), pH 7,5, ausência de NaCl e presença de NaCl nas concentrações de 40 e 100 g.L ⁻¹	107
Figura IV.22 Variação das concentrações de corante, de intermediário e de COT ao longo do tempo de ozonização: ensaio realizado em pH 7,5, ausência de NaCl e presença de NaCl nas concentrações de 40 e 100 g.L ⁻¹	108
Figura IV.23 Variação das concentrações de ozônio nas fases líquida e gasosa (saída da coluna), nos ensaios realizados com o corante Orange II em meio ausente de NaCl.....	109
Figura IV.24 Variação das concentrações de ozônio nas fases líquida e gasosa (saída da coluna), nos ensaios realizados com o corante Orange II em meio salino (40 g.L ⁻¹ de NaCl).....	110
Figura IV.25 Variação da concentração de corante e de COT nos ensaios com e sem adição de terc-butanol, realizados com o corante Orange II, nos valores de pH 5 e 7,5....	111
Figura IV.26 Variação da concentração de corante e de COT nos ensaios com e sem adição de terc-butanol, realizados com o corante Acid Red 27, pH 7,5.....	113
Figura IV.27 Variação dos intermediários naftalênicos (P1) e benzênicos (P2) no processo de ozonização do corante Orange II, nos valores de pH 5 e 7,5, na ausência e presença de NaCl (40 g.L ⁻¹) com e sem adição do capturador de radicais terc-butanol.....	114
Figura IV.28 Variação dos teores de matéria orgânica avaliados pelos indicadores DBOu, DQO e COT nos ensaios de ozonização do corante Orange II.....	115
Figura IV.29 Perfis de variação de oxigênio dissolvido, expressos como DBO, para amostras de Orange II. a) Branco, b) T0 – antes da ozonização, c) T10 – após 10 min de ozonização, d) T20 - após 20 min de ozonização, e) T 30 - após 30 min de ozonização, f) T 40 – após 40 min de ozonização. Os valores de DQO das amostras também estão registrados para os ensaios b, c, d, e, f.....	117

Figura IV.30 Curvas de variação de DBO para amostras contendo corante Orange II antes da ozonização (a) e após 40 min de ozonização (b), com 50mg/L de acetato de sódio adicionado na amostras.....	118
Figura IV.31 Perfis de variação de oxigênio dissolvido, expressos como DBO, para amostras contendo Acid Red 27. a) Branco de referência, b) T0 – sem ozonização, c) T30 - após 30 min de ozonização, d) T 40 – após 40 min de ozonização.....	119
Figura IV.32 Variação dos teores de matéria orgânica avaliados pelos indicadores DBOu, DQO e COT nos ensaios de ozonização do corante Acid Red 27.....	120
Figura IV.33 Perfis de variação de oxigênio dissolvido, expressos como DBO, para amostras contendo acetato de sódio (50 mg.L ⁻¹) a) Branco de referência, contendo acetato e sem corante b) T0 – antes da ozonização c) T10 - após 10 min de ozonização, d) T 20 – após 20 min de ozonização e) T40 após 40 min de ozonização. T0, T10, T20 e T40 foram complementadas com acetato de sódio.....	121

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela II.1 Principais grupos de corantes e suas especificações.....	8
Tabela II.2 Diferentes dominações para os corantes Acid Red 27 e Orange II, encontrados na literatura.....	12
Tabela II.3 Classificação das Fibras e Corantes Associados.....	13
Tabela II.4 Produtos químicos empregados nas diferentes fases da produção de fibras têxteis.....	18
Tabela II.5 Resultados dos ensaios de coagulação aplicados à efluentes têxteis.....	30
Tabela II.6 Principais substituintes e efeitos sobre ativação dos nucleofílicos.....	43
Tabela II.7 Características Físico-Químicas do Ozônio.....	46
Tabela II.8 Potenciais dos principais agentes oxidantes.....	46
Tabela II.9 Ozonização de diferentes corantes utilizados na indústria têxtil.....	49
Tabela II.10 Coeficientes de solubilidade de ozônio.....	54
Tabela II.11 Contribuição de vários íons e gases segundo Danckwerts.....	55
Tabela II.12 Valores de m em função da temperatura (Foussard e Debellefontaine, 2000).....	57
Tabela II.13 Características dos diversos regimes de reação e transferência de massa.....	62
Tabela III.1 Características dos diversos regimes de reação e transferência de massa.....	66
Tabela III.2 Ilustra o conjunto de ensaios de ozonização realizados neste trabalho.....	68
Tabela III.3 Algumas características dos corantes azóicos.....	75
Tabela IV.1 Principais parâmetros obtidos nos ensaios de ozonização realizados em diferentes valores iniciais de pH e de concentração de NaCl.....	84
Tabela IV.2 Principais parâmetros e coeficientes calculados a partir dos dados experimentais obtidos nos ensaios de ozonização realizados em diferentes valores iniciais de pH e de concentrações de NaCl.....	90
Tabela IV.3 Dados da literatura para o coeficiente de divisão (m) na temperatura de 20 °C e ausência de sal.....	93

LISTA DE ABREVIATURAS

a	área interfacial, $\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$
[C]	concentração da espécie C, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$
C.I.	<i>Colour Index</i>
COT	Carbono Orgânico Total
d_b	diâmetro médio das bolhas, mm
Da	número de Damkohler, $k/k_L a$
D_A	difusividade do gás dissolvido no líquido, $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
D_B	difusividade do líquido, $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Di	coeficiente de difusão da espécie i , $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
E	fator de aumento ou de reação
$F_{O_3(T,P,y)}^G$	fugacidade de ozônio na fase gasosa (Pa)
$F_{O_3(T,P,x)}^L$	fugacidade de ozônio na fase líquida (Pa)
G	vazão de gás, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
h	coeficiente de salinidade, $\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$
h_G	contribuição do gás para o coeficiente de salinidade, $\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$
h_-	contribuição do ânion para o coeficiente de salinidade, $\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$
h_+	contribuição do cátion para o coeficiente de salinidade, $\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$
h_L	altura do líquido na coluna antes da introdução de gás, m
h_{L+G}	altura do líquido na coluna depois da introdução de gás na coluna, m
$H_{O_3, \text{água}}$	constante da lei de Henry, $\text{atm} \cdot \text{fração molar}$
$H'_{O_3, \text{água}}$	constante da lei de Henry aparente, $P_{O_3} = H'_{O_3, \text{água}} [O_3]$; $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$
Ha	número de Hatta
I	força iônica, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$
I_1	espécies naftalênicas
I_2	espécies benzenicas
k_d	constante da taxa de decomposição do ozônio
k_G	coeficiente de transferência de massa na fase gasosa, $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1}$
k_L	coeficiente de transferência de massa no filme líquido, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
$k_L a$	coeficiente global de transferência de massa, s^{-1}
K	constante de equilíbrio
m	coeficiente de compartilhamento para a solubilidade do ozônio
n_i	número de bolhas de diâmetro d_i
\bar{N}_{O_3}	fluxo molar de ozônio transferido, $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$
N_{O_3}	fluxo molar de ozônio transferido por unidade de volume do reator, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
$[O_3]_{G,e}$	concentração de ozônio do gás na entrada do reator, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$
$[O_3]_{G,s}$	concentração de ozônio do gás na saída do reator, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$
$[O_3]_L$	concentração de ozônio do gás dissolvido, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$
$[O_3]^i$	concentração de ozônio do gás na interface gás/líquido, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$
$[O_3]^*$	concentração de ozônio do gás no líquido em equilíbrio, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$
$[O_3]$	concentração de ozônio do gás na entrada do reator, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$
$[\bar{O}_3]$	concentração média logarítmica entre $[O_3]_{G,e}$ e $[O_3]_{G,s}$, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$
p	pressão parcial do gás na fase gasosa, atm
p_i	pressão parcial do gás na interface, atm
p^*	pressão parcial do ozônio em equilíbrio com o líquido
r	taxa de reação, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$

r_{O_3}	taxa de decomposição do ozônio
s	freqüência de renovação segundo Danckwerts, s^{-1}
S	área de troca gás/líquido m^2
t	tempo (s)
t-but	terc-butanol
UV	ultravioleta
V	volume do tanque, L
V_G	volume do gás, m^3
V_L	volume do líquido, m^3
X	concentração de sítios ou fração molar
X_0	concentração inicial de sítios
X^*	concentração de sítios ocupados pelas famílias
α	grau de ionização
β	retenção de líquido, cm^3
δ_L	espessura do filme, cm
φ	taxa média de transferência de gás por unidade de área, $mol \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$
θ	temperatura, °C ou fração de sítios cobertos ou tempo de residência, min
$\bar{\theta}$	tempo de residência médio, min
ρ	massa específica, $g \cdot cm^{-3}$
Φ	taxa média de absorção física, $mol \cdot cm^{-3} \cdot s^{-1}$
λ_{max}	comprimento de onda máximo de adsorbância

Capítulo I

I - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Nos dias atuais, há uma preocupação constante com a preservação do meio ambiente, pois os problemas ambientais têm se tornado cada vez mais críticos e frequentes, devido ao crescimento populacional e ao aumento da poluição, decorrente do aumento da atividade industrial.

Os efluentes industriais, quando não corretamente tratados, podem causar sérios problemas de contaminação ambiental, devido à presença de diversas substâncias utilizadas nos processos industriais que não são facilmente eliminadas. Dentre essas substâncias, encontram-se os corantes, que são utilizados em diferentes aplicações industriais.

Os corantes atualmente comercializados encontram-se sob a forma sintética e natural. Há atualmente uma maior e diversificada demanda por corantes sintéticos, o que é motivo de preocupação, pois muitos estudos indicam que essas substâncias são potencialmente tóxicas e carcinogênicas (Obón, *et al.*, 2005, Martins, *et al.*, 2006). A maior parte dos corantes sintéticos é empregada na indústria têxtil, mas as indústrias de papel, couro, alimentícias, cosméticos, farmacêuticas, gráfica e fotográfica também são importantes usuárias (Daneshvar, *et al.*, 2005).

Aproximadamente 10.000 diferentes tipos de corantes e pigmentos são usados industrialmente, atingindo um consumo anual de cerca de 7×10^5 ton no mundo e 26.500 ton somente no Brasil (Kunz, *et al.*, 2002; Daneshvar, *et al.*, 2004).

A crescente busca por novas estampas de tecidos, exigidas pelos padrões de consumo atuais, tem levado ao desenvolvimento e à utilização de uma maior variedade de tipos de corantes no mercado têxtil. Portanto, a poluição causada pelo descarte de efluentes, apresentando coloração acentuada, está se tornando potencialmente maior, visto que, os efluentes, derivados das atividades de tingimento, apresentam forte coloração e podem causar sérios danos ambientais.

De modo geral, o processamento industrial têxtil gera grande quantidade de efluentes líquidos de composição bastante variada. Os efluentes gerados nessas atividades possuem elevado potencial poluidor devido à alta toxicidade dos compostos químicos neles

presentes. Além disso, apresentam elevada DQO (Demanda Química de Oxigênio), cor intensa, presença de matéria orgânica recalcitrante, sólidos suspensos, metais pesados, hidrocarbonetos, compostos orgânicos halogenados e agentes tenso ativos (López *et al.*, 2004; Fan, 2005). O processo de tingimento é fundamental para o sucesso comercial dos produtos têxteis, no entanto, os efluentes gerados nesta etapa constituem um problema particular, que está relacionado ao tipo de corante utilizado e à sua solubilidade na água.

Estima-se que 2.000 tipos de corantes estão disponíveis para a indústria têxtil (Guaratini e Zanoni, 2000). Nesse setor, os corantes reativos são muito usados para tingir celulose e algodão, por apresentarem procedimento simples de tingimento (Kurbus, *et al.*, 2002). Entretanto, esses corantes são muito solúveis em água, sendo boa parte arrastada para o efluente (Fonseca, 2003).

Os corantes reativos apresentam uma estrutura química complexa e são resistentes à degradação biológica, o que dificulta a remoção de cor dos efluentes (Kudlich, *et al.*, 1999, Fonseca, 2003, Abraham, *et al.*, 2003). A presença, em sua estrutura, do grupamento azo, caracterizado pela dupla ligação (-N=N-), é responsável pela cor do corante, e para que haja descoloração é necessário o rompimento dessa ligação.

A crescente preocupação com a conservação ambiental tem restringido o uso de corantes sintéticos, levando a legislações mais rígidas quanto ao descarte desses efluentes, incentivando o desenvolvimento de tecnologias eficazes para o seu tratamento antes do seu lançamento nos corpos d'água (Padmavathy, *et al.*, 2003; Fonseca, 2003).

As tecnologias convencionais são pouco efetivas para descoloração de efluentes têxteis contendo corantes sintéticos, tornando-se necessário o emprego de métodos mais eficazes para o seu tratamento. Assim, a utilização de Processos Oxidativos Avançados (POA) pode se configurar como alternativa promissora, podendo transformar os corantes em substâncias biodegradáveis e remover a cor desses efluentes.

Recentemente, pesquisadores vêm investigando a aplicação de Processos Oxidativos Avançados como: O₃/H₂O₂, O₃/UV, H₂O₂/UV, Fenton, Foto-Fenton e Ozonização, no tratamento de efluentes industriais contendo matéria orgânica recalcitrante, difícil de ser tratada por processos convencionais (Pauloue e Langlais, 1999, Mascolo *et al.*, 2002, Alaton, 2004).

A ozonização é bem sucedida em tratamentos combinados (Ozônio/Biológico e Ozônio/Carvão Ativado) pois o ozônio é um poderoso agente oxidante comparado a outros agentes conhecidos, como o peróxido de hidrogênio ou o cloro.

Para melhor avaliar o desempenho da ozonização devem ser considerados os parâmetros cinéticos e os coeficientes de transferência de massa entre as fases gás-líquido. O conhecimento das taxas de reação é fundamental para o acompanhamento do processo de tratamento (Debellefontaine, *et al.* 2000, Lendormi, *et al.*, 2001).

Estudos recentes sobre a oxidação avançada de efluentes contendo corantes reativos (Alaton, 2003), têm mostrado que essas tecnologias podem ser consideradas como excelente alternativa para o tratamento de diversos tipos de efluentes, inclusive os mais complexos. Entretanto, a eficiência dessas tecnologias pode ser prejudicada pela interferência de alguns compostos químicos (sais, uréia etc.) que são comumente adicionados aos banhos de corantes, para melhorar sua fixação nas fibras. Segundo Carliell, *et al.*, (1998) altas concentrações de sais (40 a 100 g.L⁻¹) são normalmente utilizadas para otimizar a fixação do corante à fibra.

Face a esse contexto, o objetivo do presente trabalho foi investigar a degradação dos corantes Acid Red 27 e Orange II por ozonização e avaliar o desempenho desse processo em meio salino. Neste estudo, foram monitoradas a remoção de cor e de carbono orgânico total (COT), bem como, determinados os parâmetros cinéticos e de transferência de massa, durante o processo de ozonização. Dois tipos de corantes azóicos foram empregados, devido a grande demanda de utilização de corantes desse tipo no mercado têxtil, representando 50% do consumo comercial de corantes. A interferência da salidade e a biodegradabilidade também foram avaliadas na eficiência da ozonização. A estrutura dos corantes azóicos é considerada pouco biodegradável. Segundo dados da literatura, a reatividade desses corantes com o ozônio é bem elevada.

O texto está organizado da seguinte maneira: no Capítulo II será apresentada uma revisão bibliográfica sobre os corantes e seus diversos tipos de aplicação e sobre os processos de tratamento empregados para a remoção de cor. Também serão apresentadas as características principais do ozônio e suas reações e os processos oxidativos avançados, sobretudo, aqueles relacionados com a ozonização. A transferência de massa em reator gás-líquido também será abordada nesse capítulo. No Capítulo III serão apresentados os materiais e métodos utilizados neste trabalho. Os resultados experimentais serão relatados e discutidos no Capítulo IV. Enfim, o Capítulo V apresentará a conclusão deste trabalho.

Capítulo II

II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II.1 – CORANTES TÊXTEIS

II.1.1 – Evolução Histórica

Na história de nossa civilização, desde os primórdios, nossos ancestrais utilizavam pigmentos naturais nas suas formas de expressão. Os primeiros escritos utilizando tintas, datam de 2500 AC e foram encontrados na China, e tem sido observado que a história dos corantes caminha ao lado da história humana. A maioria dos tecidos encontrados em múmias, quer sejam egípcias ou sul-americanas, eram coloridos (Zanoni e Carneiro, 2001; Brito, 2004; www.qmcweb.org).

Os romanos foram pioneiros no completo manejo e utilização de corantes. Em 715 AC, já se dominava, em Roma, o processo para o tratamento de fios de lã com corantes naturais, como o púrpura, típico dos uniformes de guerreiros romanos, que era obtido a partir de um molusco marinho chamado Murex (Brito, 2004).

Os corantes utilizados até a metade do século XIV eram naturais, de origem vegetal ou animal, obtidos de folhas, ramos, raízes, frutos ou flores de várias plantas e de substâncias extraídas de animais (Karkmaz, *et al.*, 2004).

Os relatos históricos revelam que os corantes e pigmentos foram objeto de grande atividade comercial e considerados bens extremamente valiosos.

No Brasil, hectares de mata nativa foram devastados para obtenção do corante proveniente da árvore de Pau-Brasil, para atender à corte Portuguesa em 1501, e a partir de então, o ritmo exploratório se acelerou. Estima-se que cerca de 2 milhões de árvores foram derrubadas para obtenção de corante no primeiro século de colonização (Brito, 2004; www.qmcweb.org).

Em 1856, foi produzido o primeiro corante sintético por William Henry Perkin, revolucionando o mercado desses produtos. Ao fazer uma reação entre Anilina e Dicromato de Potássio, observou-se a formação de um precipitado estranho de coloração avermelhada. Mais tarde, após repetir a reação Perkin o denominou “Púrpura de Tiro” e, posteriormente, os franceses chamaram-no de *Mauve* em português *Malva*, nome que vem sendo adotado até hoje (Karkmaz, *et al.*, 2004, Brito, 2004, www.qmcweb.org).

Com o surgimento de novos corantes sintéticos, os naturais foram sendo substituídos desde o início do século XX, por não serem mais economicamente competitivos. Os corantes e pigmentos comerciais, disponíveis atualmente no mercado, são substâncias sintéticas, com exceção de alguns pigmentos inorgânicos importantes. Dados comprovados na *Colour Index*, revelam que mais de 10 mil compostos orgânicos sintéticos, associados à indústria têxtil, estão atualmente registrados (Zanonie e Carneiro, 2001, Daneshvar, *et al.*, 2004).

II.1.2 – Corantes

No passado, a forte coloração dos efluentes era considerada censurável, principalmente por razões estéticas. Mais recentemente, a preocupação principal está associada à recalcitrância e ao potencial tóxico das combinações de xenobióticos (Baptista, *et al.*, 2000). Embora alguns corantes considerados potencialmente tóxicos tenham sido retirados do mercado, e moléculas novas mais biodegradáveis tenham sido desenvolvidas, os corantes têxteis ainda são a fonte principal de poluição dos efluentes desse setor industrial.

Das 700.000 tonalidades de corantes produzidas mundialmente por ano, aproximadamente entre 10 a 50% de corantes não fixados são descartados nos efluentes de operações de tinturaria (Padmavath, *et al.*, 2003, Wang, *et al.*, 2003).

Os corantes comercialmente utilizados são classificados quanto ao *Colour Index* (C.I.) pela cor, estrutura e método de aplicação. A primeira edição do *Colour Index* foi lançada em 1924 e, desde então, passa por revisão pela *Society of Dyers and Colourists* e a *American Association of Textile Chemists and Colorists*. A edição mais atual do *Colour Index* lista o nome de 28.000 corantes comercialmente disponíveis que representam aproximadamente 10.500 tipos de corantes dos 45.000 atualmente produzidos. Cada tipo de corante tem o C.I., nome genérico determinado pelas aplicações características e a cor,

dentre as 15 diferentes classes de aplicação apresentadas nesse documento (Zee, 2002, <http://www.colour-index.org/newusr1.asp>).

Atualmente, os corantes reativos correspondem de 20 a 30% do mercado de tinturas e apresentam baixa taxa de fixação, conseqüentemente, a DQO dos efluentes das operações de tinturaria e lavagem é alta. Isso se dá, particularmente, com os corantes mono-reativos. Deve-se ressaltar que a etapa de tingimento pode utilizar um grande número de corantes.

A concentração de corantes nos banhos de tingimento pode variar de 10 a 10.000 mg.L⁻¹, dependendo do grau de fixação e do processo de tingimento utilizado.

II.1.3 – Tipos de Corantes Conforme a Constituição do Cromóforo

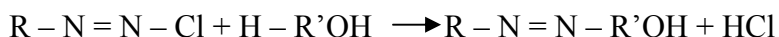
Corantes Azóicos

São corantes constituídos por um grupamento –N=N– e quando ligados a moléculas se distinguem como mono-azo, di-azo e poli-azo. A fabricação dos corantes azóicos é baseada nas reações de diazotização e condensação, que oferecem um grande leque de possibilidades de ligação das moléculas.

A reação de diazotização consiste na transformação, por ácido nitroso, de aminas aromáticas primárias em compostos diazóicos (diazos). Esta reação ocorre em meio aquoso e os produtos pouco estáveis, se decompõem sob ação da luz, calor e alcalinidade, como mostra a equação II.1.



A Equação II.2, refere-se reação de condensação que consiste na reação de um composto diazóico com fenol ou amina aromática e obtem-se então um corante azóico estável. Alguns difenóis ou ácidos amino-nafetol-sulfônicos podem se condensar com duas moléculas de diazos idênticas ou diferentes resultando em compostos di-azoicos.



II.2

Corantes Antraquinônicos

Depois dos corantes azóicos, os corantes de antraquinônias representam o segundo grupo mais importante. Esses corantes possuem um grupamento cromóforo carbonila $>C=O$ sobre o grupo quinônico. O arranjo completo dos átomos, a substituição do grupamento cromóforo e do grupo quinônico são responsáveis pela cor observada.

Corantes Indigóides

Estes corantes são baseados em anilina e o grupo cromóforo contém a dupla ligação $>C=C<$. Este grupo de corantes é produzido por duas reações, a primeira consiste na reação da anilina com ácido monocloracético, resultando na fenilglicina, tendo NaOH e $NaNH_2$ como intermediários na segunda reação, nomeada de condensação. O resultado da oxidação final é o corante Indigo Blue 1, muito utilizado na fabricação dos *blue jeans* e considerado como a categoria mais importante deste grupo.

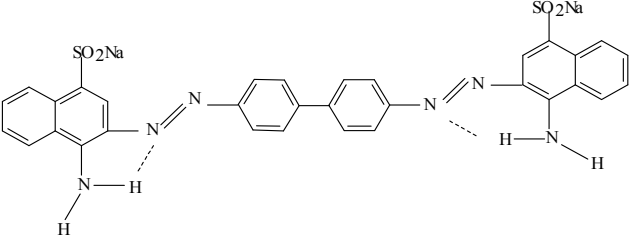
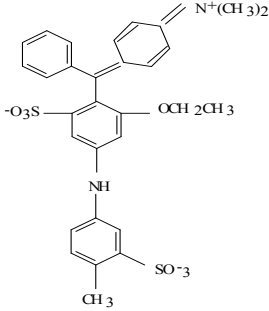
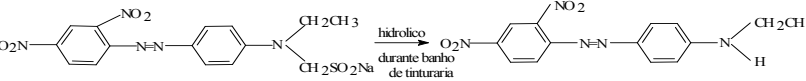
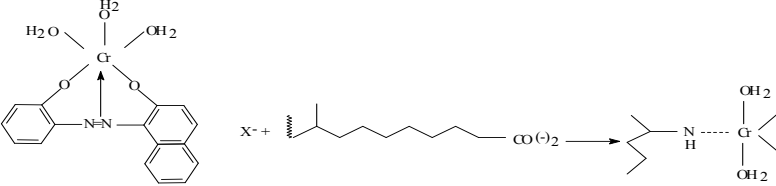
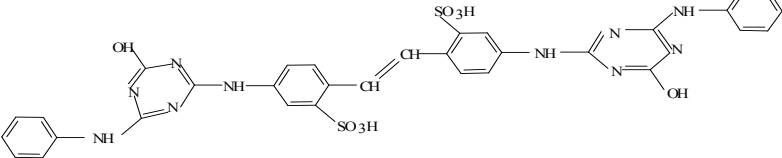
Outros Corantes

Outros tipos de corantes estão disponíveis como o difenilmetano e o trifenilmetano, ambos derivados dos fetalocianinos. Possuem estabilidade e durabilidade fraca e por isso são empregados em certas produções têxteis especiais. O principal emprego confere as aplicações que não exigem bom acabamento.

II.1.4 - Modo de Fixação dos Principais Corantes

Os corantes estão agrupados em diferentes classes, de acordo com o modo de fixação têxtil que os caracteriza, independente da estrutura cromófora responsável pela cor obtida. Na Tabela II.1, estão relacionados os principais grupos de corantes, classificados pelo modo de fixação.

Tabela II.1. Principais grupos de corantes e suas especificações.

Tipos de Corantes	Estrutura Química
Reativos	$R-SO_2-CH_2-CH_2-OSO_3Na \xrightarrow{OH^-} R-SO_2-CH=CH_2 + Na_2SO_4$ $R-SO_2-CH=CH_2 + O-celulose \xrightarrow{OH^-} R-SO_2-CH_2-CH_2-O-celulose$
Diretos	
Ácidos	
à Cuba	$O = O \underset{\text{corante}}{\overset{ }{\text{C}}} = \underset{\text{C}}{\overset{ }{\text{C}}} = O + S_2O_4^{2-} + 4OH^- \rightarrow \overset{ }{\text{O}} - \underset{\text{C}}{\overset{ }{\text{C}}} - \underset{\text{C}}{\overset{ }{\text{C}}} - \overset{ }{\text{O}}^-$ <p style="text-align: right;">forma leuco</p>
de Enxofre	$R-S-SO_3^- + S^{2-} \rightarrow R-S^- + S-SO_3^{2-}$ <p>corante</p> $R-S-SO_3^- + R-S^- \rightarrow R-S-S-R + SO_3^{2-}$
Dispersivos	 <p style="text-align: center;">hidrolítico durante banho de tinturaria</p>
Pré-Metalizados	
Branqueadores	

Fonte: Guaratini e Zanoni (2000).

Corantes Reativos

São corantes contendo um grupo eletrofílico (reativo) capaz de formar uma ligação covalente com grupos hidroxila das fibras celulósicas e apresenta baixo grau de fixação. Contêm a função azo e antraquinôna como grupos cromóforos e os grupos clorotriazinila e sulfatoetilsulfonila como grupos reativos. Este grupo de corantes apresenta a característica de alta solubilidade em água. Durante a utilização dos corantes reativos são adicionados ao processo grandes quantidades de sal e uréia (60 e 200 g.L⁻¹) a fim de elevar o grau de fixação. Este grupo de corantes reativos é considerado o principal responsável pelo problema de coloração dos efluentes, pois aproximadamente 80% dos corantes reativos são azo ou pré-metalizados (Zee, 2002).

Corantes Direto

Este grupo de corantes caracteriza-se por ser solúvel em água e capaz de tingir fibras de celulose (algodão, viscose, etc.). Esta classe de corantes é constituída principalmente por corantes contendo mais de um grupo azo (diazó, triazo etc.) ou pré-transformados em complexos metálicos. Estes corantes são preparados de forma simples com salmouras de NaCl ou Na₂SO₄. A grande vantagem desta classe de corantes é o alto grau de exaustão durante a aplicação e conseqüente diminuição do conteúdo de corantes nas águas residuárias. Segundo o *Colour Index*, a classe de corantes direto apresenta a segunda maior variedade de corantes. No entanto, dos 1.600 corantes direto listados, somente 30% são atualmente produzidos.

Corantes Pré-Metalizados

São utilizados principalmente para tintura de fibras proteicas e poliamida. Os corantes deste tipo são caracterizados pela presença de um grupo hidroxila ou carboxila na posição orto em relação ao cromóforo azo, permitindo a formação de complexos com íons metálicos. Os corantes pré-metalizados são usualmente compostos azo. Portanto, não aparecem listados em uma categoria própria no *Colour Index*, entretanto, um sexto de todos os corantes azo listados são pré-metalizados.

Corantes Básicos

São moléculas compostas de sais dos diversos compostos orgânicos dos grupamentos amino – NH₂ ou =NH. Estão apresentados nas classes dos corantes azóicos, difenilmetano e trifenilmetano. Esses corantes proporcionam coloração viva e variada, mas pouco durável. Os corantes básicos representam aproximadamente 5% de todos corantes listados no *Colour Index*.

Corantes Ácidos

O termo corante ácido corresponde a um grande grupo de corantes aniônicos portadores de um a três grupos sulfônicos –SO₃Na ou carboxilatos -COONa. Estes grupos tornam o corante solúvel em água. Estes corantes caracterizam-se por apresentar uma estrutura química baseada em compostos azo, antraquinona, triarilmetano, azina, xanteno, ketonimina, nitro e nitroso, que fornecem uma ampla faixa de coloração e graus de fixação. Segundo Zee (2002), dos 23.000 diferentes tipos de corantes ácidos listados no *Color Index*, somente 40 % são atualmente produzidos.

Corantes de Enxofre

Corantes desta classe são altamente insolúveis em água. Inicialmente, são reduzidos a uma forma solúvel, quando passam a ter afinidade com as fibras celulósicas. Após a aplicação, retornam à forma original, insolúvel, por oxidação. Entretanto, estes corantes usualmente apresentam resíduos altamente tóxicos.

Corantes à Cuba

Importante classe de corantes baseada nos índigos, tioindigóides e antraquinóides. Eles são praticamente insolúveis em água, porém, durante o processo de tinturaria são reduzidos a dititionito, em solução alcalina, transformando-se em um composto solúvel.

Corantes Dispersos

Constitui uma classe de corantes insolúveis em água aplicados em fibras de celulose e outras fibras sintéticas através de uma suspensão. A coloração das substâncias é formada diretamente sobre a fibra por reação de dois produtos solúveis na água. Os corantes dispersos são classificados como o terceiro grande grupo do *Colour Index*, com cerca de 1.400 diferentes compostos estão listados, dos quais 40% são produzidos atualmente.

Corantes Branqueadores

São empregados na oxidação das fibras como alvejantes químicos, ou utilizados como corantes brancos, também denominados branqueadores. Estes corantes apresentam grupos carboxílicos, azometino (-N=CH-) ou etilênicos (-CH=CH-) aliados a grupos benzênicos, naftalênicos, pirênicos e anéis aromáticos.

II.2 - CORANTES AZO E PRINCIPAIS APLICAÇÕES

Os corantes azo pertencem a uma ampla classe de corantes sintéticos e são caracterizados pela presença de um ou mais grupamentos azo (-N=N-) associados a um anel aromático, com a possibilidade de ter grupamentos sulfônicos. Atualmente representam 50% dos corantes comercializados.

Os compostos azóicos são formados a partir da reação do ácido nitroso com anilina Ar-NH_2 resultando no íon diazônio Ar-N=N^+ , que rapidamente reage com outras anilinas ou fenóis. O primeiro corante azóico utilizado comercialmente foi a crisoidina, em 1875. A partir deste corante, foi obtido um dos corantes marrons mais empregados: o marrom Bismark.

Tanto o corante Acid Red 27 como o Orange II são classificados como corantes azo reativos sulfonados e vem sendo estudados devido à intensa aplicação em diversos segmentos: na indústria têxtil, de papel e celulose, de cosméticos, farmacêutica e alimentícia (Fuh e Chia, 2002, Chen, *et al.*, 2004).

Na indústria alimentícia, os corantes têm sido usados para produzir alimentos mais atrativos e saborosos. Desde 1880 corantes sintéticos têm sido adicionados nos alimentos e

essa prática persiste até hoje, com maior controle por parte dos organismos responsáveis pela fiscalização do setor de alimentos. Por razões de segurança, visto que muitos dos corantes sintéticos são considerados tóxicos, o número de corantes utilizados tem reduzido nos últimos anos.

Atualmente, 9 corantes sintéticos, utilizados em alimentos, são permitidos na China, dentre eles o Amaranth (Chen, *et al.*, 1998).

O Acid Red 27, mais conhecido como Amaranth, é um dos corantes sintéticos que vem sendo muito estudado, devido aos seus possíveis efeitos tóxicos, e pelo fato de ser encontrado em alimentos comuns, bebidas, iogurtes, gelatinas, produtos de padaria e confeitaria etc (Nevado, *et al.*, 1995, Blanco, *et al.*, 1996, Ni e Gong, 1997, Pan, *et al.*, 2005).

A Tabela II.2 apresenta os diferentes nomes usados, tanto para o corante Acid Red 27, quanto para Orange II, encontrados na literatura.

Tabela II.2 Diferentes denominações para os corantes Acid Red 27 e Orange II, encontrados na literatura.

Acid Red 27 (AR27)	Ref.	Orange II (Or-II)	Ref.
<i>C.I. Food Red 9, AMA (Amaranth)</i>	Allman <i>et al.</i> , 1995	<i>C.I. 15510</i>	Bandara <i>et al.</i> , 1997
<i>C.I. 16185 Acid Red 27</i>	Nevado <i>et al.</i> , 1995	<i>Orange II</i>	Ong <i>et al.</i> , 2005
<i>Amaranth</i>	Blanco <i>et al.</i> , 1996	<i>Acid Orange 7(AO7)</i>	Rismayani <i>et al.</i> , 2004
<i>Amaranth 85.00%; Amarante C.I. 16185; Rouge Acide 27 C.I. 16185; Amaranth Standard Fluka; Amarante(C.I.16185)(REAG. USP) PA</i>	http://www.emarketlabo.com/product_list.php	<i>p-(2-hydroxy-1-naphthylazo) benzenesulfonic acid; 4-(2-hydroxy-1-naphthylazo) benzenesulfonate; Tropaeolin N°2</i>	http://www.chemexper.com/chemicals/supplier/cas/633-96-5.html
<i>2,7-Naphthalenedisulfonic Acid; 3-Hydroxy-4-((4-Sulfo-1-Naphthalenyl)Azo); Trisodium Salt; 2-Hydroxy-1; 1'-Azonaphthalene-3,6; 4'-Trisulfonic Acid Trisodium Salt</i>	http://www.reptox.csst.qc.ca/Produit.asp	<i>Orange G</i>	Chagas e Durrant, 2001
<i>Amaranth (E123)</i>	Allman <i>et al.</i> , 1995	<i>Acid Orange A</i>	Liakou <i>et al.</i> , 1997
<i>C.I. 16185 (Amaranth) CAS 915-67-3</i>	Ni e Gong, 1997		

Embora, os corantes azo possam representar um grave problema de poluição ambiental, por causa das suas diferentes aplicações, na indústria têxtil a sua utilização é mais preocupante.

A produção têxtil se encontra em constante evolução e quase toda água utilizada nessa atividade é descartada com intensa cor e um grande conteúdo de carga orgânica associada. Porém, o tratamento desses efluentes se tornou uma grande preocupação devido à cor, à recalcitrância e à potencial toxicidade aos seres vivos (Abraham, *et al.*, 2003).

II.2.1 – Tipos de Corantes Utilizados na Indústria Têxtil

Os corantes são empregados de acordo com o tipo de fibra têxtil que será processada. A indústria têxtil é responsável pela transformação de fibras em fios e fios em tecidos.

Tabela II.3 Classificação das Fibras e Corantes Associados.

Classificação Geral	Fibra	Fonte	Nome	Corante
Hidrofílico	Celulose	Natural	Algodão, linho, papel	Direto, enxôfre, à cuba, azóico, reativo, pré-metalizados
		regenerada	Viscose, rayon	
	Proteína (Poliamida Natural)	Natural	Lãs, seda, couro	Ácido reativo, mordante, pré-metalizados
Hidrofóbico	Poliamida	Sintética	Naylon	Ácido, mordante, Direto, disperso, reativo, pré-metalizados
	Poliéster	Sintética	Terilene	disperso, à cuba, azóico
	Poliacrilonitrila	Sintética	Acrílico,Orlon,Dacron	Básico, disperso
	Acetato de Celulose	Sintética		disperso, à cuba, azóico
	Triacetato de Celulose	Sintética		disperso, à cuba, azóico

Fonte: Buckley,1992

Os corantes azo podem ser usados em fibras naturais (algodão, seda, lã) e fibras sintéticas (poliésteres, poliacrílico, raiom, etc.), que são constituídas de longas cadeias poliméricas.

Estes grupos podem ser hidrofílicos ou hidrofóbicos, como classificados na Tabela II.3.

II.3 CORANTES TÊXTEIS

II.3.1 – Indústria de Corantes Têxteis

Embora a indústria de corantes têxteis tenha se originado na Europa, no século XVI, conforme mencionado, o primeiro corante sintético foi descoberto apenas em 1856 na Inglaterra. No processo de inovação tecnológica que ocorreu no início do século XX, a Alemanha manteve o monopólio sobre a produção de corantes sintéticos até a Segunda Guerra Mundial.

A maior parte dos corantes fabricados segue para a indústria têxtil; mas as indústrias de artefatos de couro ou de papel, indústrias alimentícias, de cosméticos, tintas e plásticos também são usuários importantes.

Atualmente, os Estados Unidos são o maior exportador de corantes, colocando no mercado, aproximadamente, 2.000 diferentes tipos de corantes sintéticos (Guaratini e Zanoni, 2000).

II.3.2 – Indústria Têxtil na Europa

De acordo com os dados coletados pelo Diretório de Empreendimentos da Comissão Européia, a indústria têxtil representa uma fonte importante de renda e emprego para muitos países. Em 1999, esse segmento contribuiu com 5,7 % do valor da produção industrial mundial, representando mais que 14% do emprego mundial.

A contribuição da Europa na produção de tecidos foi de 29 % em 1999, semelhante à dos Estados Unidos e menor do que a asiática (39 %). A indústria têxtil européia é caracterizada por um grande número de empreendimentos de pequeno e médio porte. No ano de 1999, 120.000 companhias empregaram mais de 2 milhões de pessoas.

Na Europa, toda a atividade têxtil está baseada na combinação de indicadores econômicos como: rotatividade, adição de valor e geração de empregos. A produção de roupas (vestuário) é de aproximadamente 40% e os 60% restantes referem-se à produção de tecidos acabados e não acabados, 12 e 48%, respectivamente. A Itália é considerado o mais importante país europeu no ramo da fabricação têxtil, como mostra a Figura II.1. As indústrias européias processam todo tipo de fibras, mas grande parte corresponde às fibras

artificiais (72% em 1998, em termos de volume) (Mettioli, *et al.*, 2002; http://www.finep.gov.br/PortalDPP/relatorio_setorial/ 2006).

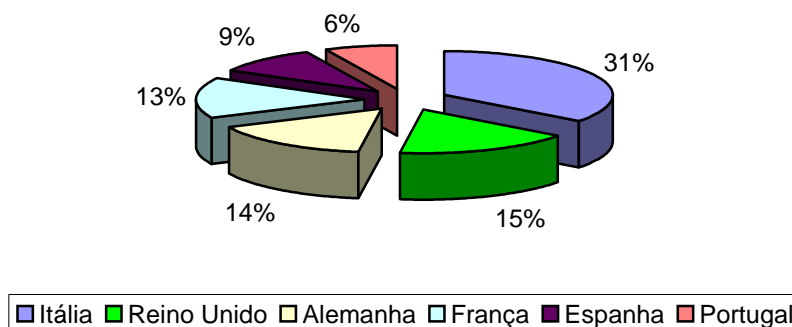


Figura II.1. Importância do setor têxtil nos países europeus.

De acordo com López (2004), a produção mundial de fibras têxteis foi estimada em 33 milhões de toneladas em 2002. A produção têxtil se concentra em duas grandes regiões, a asiática e a região norte americana. A região asiática produz 68% da produção mundial, e a China se destaca como principal país produtor, com produção de 9,2 milhões de toneladas em 2002, representando 41% da produção asiática e 28% da produção mundial. Índia, Paquistão, Coreia do Sul e Taiwan também se destacaram como importantes produtores de fibras têxteis.

Em 2002 a América do Norte produziu 4,3 milhões de toneladas de fibras têxteis, sendo 80 % correspondentes ao México e aos Estados Unidos, representando 13% do valor mundial.

II.3.3 – Indústria de Corantes Têxteis no Brasil

O Brasil tem sua história relacionada à produção de corantes, desde o seu descobrimento. A começar pelo nome do país, uma vez que este é proveniente da madeira “Pau-Brasil”, fonte natural de corante avermelhado. Até a metade do século XIX, o Brasil também foi fonte principal do índigo natural (extraído da *Indigofera tinctoria*), quando perdeu mercado para os corantes sintéticos. A produção industrial de corantes sintéticos no

país foi introduzida logo após a Primeira Guerra Mundial e atualmente supre 60% da sua demanda.

Dados estatísticos revelam que o Brasil tem 70% da sua indústria têxtil voltada para o algodão, que demanda o equivalente a 4% do consumo mundial de corantes reativos. Os outros corantes apresentam um consumo per capita de, aproximadamente, 110 gramas por ano.

As principais empresas produtoras de corantes sintéticos no Brasil, localizam-se no eixo Rio-São Paulo e a maioria importa produtos intermediários tais como: derivados de benzeno, naftaleno, tolueno etc. Nos últimos anos, a exportação de corantes tem crescido em torno de 40% ao ano (Guaratini e Zanoni, 2000).

II.3.4 – A Indústria Têxtil no Brasil

O Brasil exerce um papel importante no cenário mundial e está entre os principais produtores da indústria têxtil-vestuário, destacadamente, em tecidos de malha. É o segundo maior produtor mundial, atrás apenas dos Estados Unidos. Nos outros segmentos sua posição também não fica muito abaixo, sendo o sexto maior produtor de fios e filamentos, sétimo de tecidos e o quinto de produtos de confecção, de acordo com informações fornecidas pelos países membros da ITMF.

O consumo de fibra têxtil per capita no Brasil é estimado em 7,0 kg por ano por habitante, sendo ligeiramente maior do que a média mundial. Cerca de 75% das indústrias têxteis estão localizadas na região sul (Santa Catarina), sudeste (São Paulo e Minas Gerais) e nordeste (Pernambuco, Bahia e Ceará) (Guaratini e Zanoni, 2000).

II.4 – PROCESSAMENTO NA INDÚSTRIA TÊXTIL

Os tecidos antes de serem tingidos ou estampados recebem um tratamento prévio, também chamado de pré-tratamento, para extrair impurezas naturais ou substâncias químicas potencialmente capazes de interferir com os processos subseqüentes.

Os tecidos passam por várias operações utilizando grandes quantidades de água, desde as etapas de preparação, tinturaria e estampagem, até o acabamento especial. A Figura II.2 apresenta os processos básicos utilizados na preparação de tecidos, bem como os compostos descartados em cada uma delas (Paul, *et al.*, 1995, Mettioli, *et al.*, 2002).

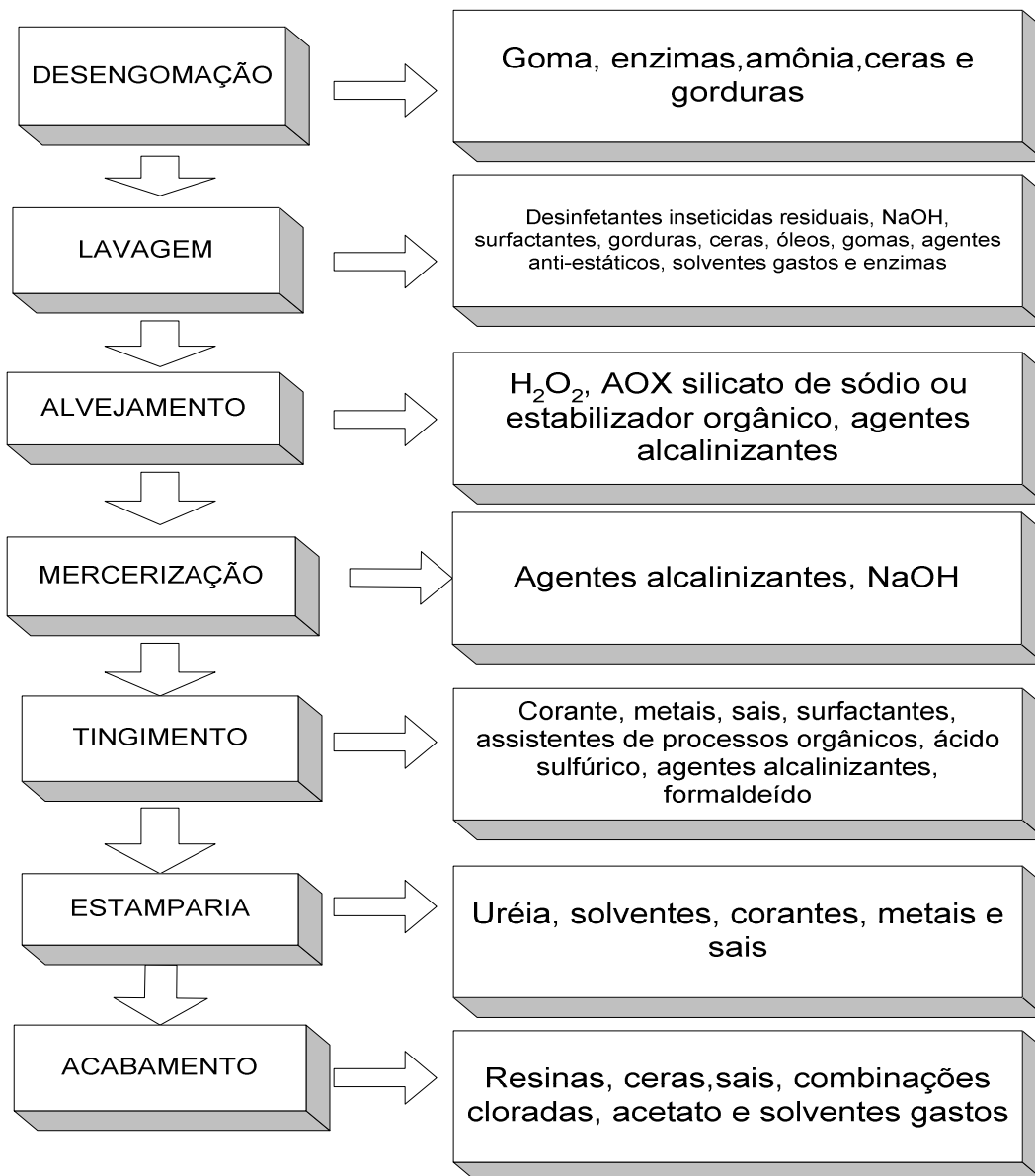


Figura II.2. Descrição dos poluentes e resíduos gerados nas etapas do processamento de tecidos.

Para que os corantes se fixem às fibras, uma grande quantidade de produtos químicos é adicionada a fim de promover afinidade entre o corante e a fibra.

De acordo com o tipo de fibra processada, o ciclo de operações é diferenciado. A Tabela II.4 apresenta, de forma detalhada, a variedade de produtos químicos empregados para a produção de diferentes fibras têxteis.

Tabela II.4: Produtos químicos empregados nas diferentes fases da produção de fibras têxteis.

Etapas de Produção das Fibras Têxtil					
Fibra	Desengomagem	Alvejamento	Tingimento	Acabamento	Diversos
Linha	Enzimas, detergentes		Corantes, pirofosfato, o-fenil-fenol, sulfatos, H ₂ SO ₄ e C ₂ H ₄ O ₂		Detergentes, amidos
Poliester	Óleos minerais de revestimento		Corantes, gonflantes, auxiliares, C ₂ H ₄ O ₂		NaOH, hidrosulfitos, detergentes
Algodão	Enzimas, detergentes	H ₂ O ₂ , Cloro	Corantes diretos, reativo, à cuba, enxôfre, cloretos, agentes alcalinos, fixadores, solidogêneses	Detergentes, anti-estáticos, amaciantes, lubrificantes (parafina), C ₂ H ₄ O ₂	
Linho	Enzimas, detergentes	H ₂ O ₂	Corantes reativos, cloretos, sulfatos, agentes alcalinos, fixadores		Detergentes
Seda	Sabão, amônia, auxiliares	H ₂ O ₂ , Hidrosulfeto, C ₂ H ₄ O ₂	Corantes ácidos e reativos, C ₂ H ₄ O ₂ , sais, agentes alcalinos, detergentes		Cloreto estânico, acrilamina
Viscose			Corantes diretos, reativos, sulfatos, agentes alcalinos, fixadores cloretos,		Carbonato de sódio, detergentes

Fonte: Buckley, 1992 e O'Neill, *et al.*, 1999.

Segundo López (2004), mais de 50% dos corantes são descartados nos efluentes gerados em tinturaria. Estudos constataram que o grau de fixação diminui com o aumento da intensidade da cor, em banhos de tinturaria, representando um inconveniente para os tecidos de cores vivas.

II.4.1 Consumo de Água

O elevado consumo de água é comum em processos têxteis, em média são gastos 100 L de água por kg de produto acabado. A indústria têxtil, por ser quimicamente

intensiva, acaba gerando efluentes que contém quantidades significativas de uma ampla gama de resíduos (Saia, *et al.*, 1999, Hassemer e Sens, 2002, Melo, 2005, Ueda, 2006).

O consumo deve-se a diversos fatores: porte da indústria, máquinas utilizadas e modalidades do ciclo de trabalho. Mas, o consumo de água depende principalmente à natureza das fibras. Segundo dados da literatura, o tipo de fibra que consome maior volume de água é a linha.

O consumo de água é variável no processo sendo mais alto, geralmente, no tingimento de fibras naturais. Já as fibras sintéticas requerem volumes menores de água por unidade de produto, principalmente devido à menor necessidade de limpeza. Entretanto, todo o volume de água usado é descartado, de forma que o volume de efluente gerado é cerca de 90-95% da água usada em todo o processo (Rozzi e Antonolli, 2000, Mettioli, *et al.*, 2002).

II.4.2 Geração de Efluentes na Indústria Têxtil

Os efluentes são provenientes dos processos de polimento, tinturaria, estampagem e acabamento, que geram a maior parte do efluente têxtil, pois cada etapa dessas requer lavagens sucessivas. Em média, de 60 a 90% do consumo de água total é gasto na lavagem. Devido à variedade de processos que envolvem essa atividade industrial, o efluente têxtil contém uma mistura complexa de substâncias químicas orgânicas e inorgânicas, que são liberadas durante as várias operações industriais (Paul, *et al.*, 1995, Muthukumar, *et al.*, 2001, Hassemer e Sens, 2002, Daneshvar, *et al.*, 2004, Peng e Fan, 2005).

O conteúdo de poluentes no efluente depende da natureza e da quantidade de impurezas presentes nas fibras e da intensidade do processo. Concentrações altas de sólidos suspensos totais (SST) e altos teores de matéria orgânica são comuns em efluentes de polimento de fibras naturais, devido à remoção de impurezas como: cera, sabão, detergente, solvente, além de praguicidas que podem estar presentes.

Fibras sintéticas normalmente requerem operações de polimento mais moderadas, que frequentemente são combinadas com desengomagem em um único processo.

No passo de alvejamento, os agentes mais comuns são: peróxido de hidrogênio, hipoclorito de sódio e dióxido de enxofre gasoso. O peróxido de hidrogênio é geralmente usado como agente alvejante para algodão e misturas de algodão. Dos alvejantes usados

em operações têxteis o peróxido de hidrogênio é o mais empregado, sendo dosados em soluções cáusticas (Leão *et al.*, 2002).

II.4.3 – Caracterização dos efluentes

Os efluentes têxteis apresentam características bastante peculiares que dependem do tipo de processamento e do tipo de fibra processada que, por sua vez, vai determinar os tipos de corantes e produtos químicos utilizados.

As atividades têxteis geram poluentes classificados da seguinte maneira:

Sólidos Sedimentáveis (SS)

Em geral, os valores encontram-se abaixo de 50 ml.L⁻¹ e a sua presença depende de fatores como: tipo de processo de beneficiamento aplicado, a de fibra, o de tecido e tipo do tratamento.

Metais Pesados

A concentração de metais pesados (cobre, cádmio, cromo, níquel, chumbo e zinco) em efluentes têxteis diminuiu na última década, principalmente devido à redução de metais nos corantes. As fontes de metais no efluente podem ser provenientes das fibras, dos corantes e de impurezas químicas. Os corantes podem conter metais como zinco, níquel, cromo e cobalto, como parte funcional de suas moléculas. As concentrações de metais pesados em efluentes de banho de tintura, encontram-se na ordem de 1 a 10 mg.L⁻¹ (Mettioli, *et al.*, 2002).

Matéria Orgânica Recalcitrante e Orgânicos Perigosos

A biodegradabilidade dos efluentes têxteis tem aumentado, graças à substituição dos produtos químicos usados no processo. No entanto, as moléculas de corantes não são biodegradáveis em condições aeróbias. Ademais, os efluentes contêm orgânicos persistentes, como surfactantes ou seus subprodutos e auxiliares de tingimento, como os agentes isolantes, os agentes dispersantes ou fixantes, entre outros.

O descarte de orgânicos perigosos também pode incluir alguns solventes usados em operações de polimento ou estamparia, enquanto que os orgânicos halogenados (AOX) podem derivar do hipoclorito, usado nas operações de alvejamento ou de resíduos líquidos do acabamento com cloro. Nos efluentes provenientes do alvejamento são encontradas concentrações de AOX de até 100 mg.L^{-1} , incluindo quantidades consideráveis de clorofórmio (Mettioli, *et al.*, 2002). Porém, atualmente, o processo de alvejamento está sendo feito com peróxido de hidrogênio.

Sais

Vários autores identificaram como um problema potencial a presença de sais em efluentes têxteis (Muthukumar, *et al.*, 2001; Muthukumar e Selvakumar, 2004). Muitos sais são usados como matérias-primas ou obtidos como subprodutos de neutralização ou de outras reações de processamento têxtil. Os sais metálicos são adicionados às fibras a fim de melhorar a fixação do corante ao tecido, pois os metais complexam em grupos polares das fibras, resultando em sítios mais reativos, com melhor interação com os corantes.

Concentrações salinas em efluentes gerados na tinturaria de algodão podem apresentar quantidades de 2.000 a 3.000 mg.L^{-1} de sais. As concentrações salinas, quando levadas em conta outras operações de tinturaria podem variar de 20 a 80% para mais das concentrações citadas anteriormente (Leão *et al.*, 2002, Mettioli, *et al.*, 2002).

II. 5 POSSÍVEIS IMPACTOS NO MEIO AMBIENTE

Efluentes derivados das industriais têxteis oferecem sérios riscos de impacto ambiental. Principalmente aqueles provenientes das etapas de processamento, que utilizam grande quantidade de água e a aplicação de substâncias químicas, que conseqüentemente, geram grandes volumes de efluentes contendo altas cargas de compostos orgânicos fortemente coloridos, que podem interferir nos processos fotossintéticos naturais, ocasionando prejuízos incalculáveis, a médio e longo prazo, para a biota aquática (Wang *et al.*, 2002).

Deste modo, o lançamento não controlado destes resíduos, em maior ou menor nível de concentração, interfere na absorção da luz pelos vegetais e animais do ambiente aquático. Também existe o potencial de bioacumulação, principalmente, os corantes

altamente solúveis em água têm contribuindo para a contaminação dos mananciais e da água distribuída à população (Guaratini e Zanoni, 2000).

Os corantes são facilmente detectáveis a olho nu, sendo visíveis em alguns casos mesmo em concentrações tão baixas quanto 1 mg.L^{-1} . No caso dos corantes reativos a concentração detectada é ainda menor, em torno de $5 \mu\text{g.L}^{-1}$. Uma pequena quantidade lançada em efluentes aquáticos pode causar acentuada mudança de coloração dos rios (Guaratini e Zanoni, 2000, Bertazzoli e Pelegini, 2002, Bell e Buckley, 2003).

Do ponto de vista ambiental, a remoção do corante no processo de lavagem é um dos grandes problemas do setor têxtil. Estima-se que cerca de 15% da produção mundial de corantes é descartada para o meio-ambiente durante a síntese, processamento ou aplicação. Isso é alarmante, se for considerado que este valor representa o lançamento de cerca de 1,20 ton por dia desta classe de compostos para o meio-ambiente. A principal fonte desta perda corresponde à incompleta fixação dos corantes (10-50%), durante a etapa de tingimento das fibras têxteis. A associação internacional ETAD (Ecological and Toxicological Association of the Dyestuff Manufacturing Industry), criada em 1974 tem realizado um grande esforço para fiscalizar a fabricação mundial de corantes sintéticos, com o intuito de minimizar os possíveis danos ao homem e ao meio-ambiente. Esta entidade trabalha com a divulgação de artigos, identificando os riscos potenciais dos corantes (Guaratini e Zanoni, 2000).

Além do impacto ambiental direto do efluente, o grande consumo de água está ficando intolerável em países sujeitos à escassez de água (como os do sul da Europa). Uma política racional de administração de água alocaria as mais puras fontes de água fresca para uso potável e incentivaria alternativas, como o reúso de efluentes para reduzir o consumo de água industrial. Apesar do valor dessas substâncias químicas e da água, a recuperação de água, por reúso, na indústria de acabamento têxtil ainda é uma prática pouco comum (Mettioli, *et al.*, 2002).

II. 5.1 – Efeitos dos Corantes na Saúde Humana

A poluição química tem implicação na saúde humana, seja pelos poluentes químicos encontrados na água de abastecimento, seja pelo acúmulo de substâncias tóxicas em organismos usados para o consumo humano.

Muitos estudos indicam que os corantes sintéticos podem oferecer riscos toxicológicos ou carcinogênicos à saúde humana (Chagas, *et al.*, 2001, Fuh, *et al.*, 2002, Sasaki, *et al.*, 2002, Karmaz, *et al.*, 2004, Obón *et al.*, 2005).

O contato causado por certos corantes não incorporados totalmente à fibra, compromete principalmente os consumidores, pois mantêm grande proximidade entre o tecido tinto e as zonas da pele sujeitas à transpiração, resultando em problemas como dermatites. Uma manifestação clínica do estado de alergia respiratória ao corante comumente aparece por sintomas de asma e rinites alérgicas. Diversos exemplos desse tipo sensibilidade têm sido consequência da exposição a corantes do tipo reativo. Entretanto, de um modo geral, o nível de risco provocado à população parece ser pequeno, quando comparado à ingestão destes compostos.

Embora a alta solubilidade deste tipo de corante represente um meio de minimizar a sua absorção no organismo, é importante lembrar que estes corantes são configurados para reagirem eficientemente com substâncias portadoras de grupos amina e hidroxila, presentes nas fibras naturais, porém presentes também em todos os organismos vivos.

II. 6 – TOXICIDADE

Dentre os principais poluentes liberados para o ambiente, encontram-se efluentes de tingimento lançados pelas indústrias têxteis. Nesses efluentes, os corantes azo predominam e se constituem na maior classe de corantes, com maior variedades de cores (Abraham, *et al.*, 2003).

Os intermediários e subprodutos formados na degradação de muitos corantes podem apresentar um potencial altamente perigoso, como os dos corantes azo (aminas aromáticas), muito deles tóxicos e carcinogênicos (Pérez-Urquiza, *et al.*, 2000, Muthukumar *et al.*, 2001, Padmavathy, 2003, Martins, *et al.*, 2006). Esses compostos são difíceis de serem removidos da água devido à alta solubilidade e podem ser transportados pelo esgoto e permanecer nos corpos receptores.

A fim de avaliar o risco ambiental, o tempo de exposição de corantes azo e substâncias auxiliares de tingimento usados no acabamento em indústrias têxteis, os testes de toxicidade têm se mostrado um meio econômico e efetivo, que pode ser incluído na rotina de monitoramento desses efluentes (Wang, *et al.*, 2002).

Uma outra técnica que vem sendo empregada para avaliar a toxicidade de efluentes é a respirometria. Esta técnica consiste na medição da taxa de consumo de oxigênio (TCO), que representa a taxa respiração dos microrganismos. Variações dessa taxa indicam a presença de material potencialmente tóxico. Segundo Fernandes, *et al.*, (1998) os testes respirométricos também são denominados de toximetria.

II. 6.1 – Testes de Toxicidade

De acordo com Silva (2002), a necessidade de se obter informações não reveladas pela simples caracterização físico-química, da complexibilidade e variabilidade apresentada pelos compostos orgânicos e inorgânicos, tem estimulado a realização de testes de toxicidade, nos quais os efeitos são mensurados através da resposta dos organismos vivos.

O grau da toxicidade pode ser avaliado através do efeito agudo ou crônico que uma dose ou concentração de certa substância causará a um determinado organismo num dado intervalo de tempo.

É recomendável que esses efeitos sejam avaliados com mais de uma espécie representativa da biota aquática, atendendo a diferentes níveis tróficos, visto que, os organismos aquáticos apresentam sensibilidades diferentes às propriedades tóxicas das substâncias químicas.

Os testes de toxicidade devem ser considerados como uma análise indispensável no monitoramento dos efeitos causados pelos efluentes têxteis no meio ambiente aquático, a fim de avaliar a capacidade do agente tóxico em produzir efeitos deletérios aos organismos vivos.

Foram encontrados na literatura, alguns estudos ecotoxicológicos para algumas espécies de peixes, dentre elas, o peixe zebra, revelando variações na sensibilidade de acordo com a classe dos corantes. O efeito agudo foi verificado para alguns organismos (peixe, crustáceos, algas e bactérias) e relatada carência de dados de toxicidade crônica para a maioria dos corantes comerciais e derivados (DEPA, 1999).

Os compostos químicos encontrados nos efluentes têxteis, tais como: sais, anilinas, benzidinas etc., indicam potencial toxicidade para vários organismos aquáticos.

Dentre as 17 amostras analisadas por Wang, *et al.*, (2002) os resultados revelaram que uma foi muito tóxica, 7 moderadamente tóxicas e 9 com baixa toxicidade para a

bactéria luminescente *Vibrio fischeri*. Os autores atribuíram a toxicidade encontrada para algumas amostras, mais aos auxiliares químicos usados no processo de tingimento, como os sais, do que ao corante propriamente dito. A salinidade tem representado um grande problema, sendo mais tóxica aos organismos aquáticos.

Segundo Asselborn e Domitrovic (2000), as indústrias têxteis se encontram entre as principais indústrias poluidoras, pois sua atividade produz efluentes com características de alta alcalinidade, elevados valores de DBO, de cor e alta concentração de sólidos em suspensão. A toxicidade foi avaliada utilizando espécies de microalgas *Selenastrum capricornutum* e *Ankistrodesmus gracilis*. Os resultados revelaram elevadas porcentagens de inibição do crescimento para ambas espécies ensaiadas. A maior porcentagem de inibição de crescimento foi de 98%, após 96 horas de exposição, nas concentrações de 75% e 100% de efluente.

Baptista, *et al.* (2000) avaliaram a toxicidade aguda de efluentes não-tratados e tratados provenientes de uma indústria têxtil de Santa Catarina, utilizando como bioindicadores *Daphnia magna*, *Poecilia reticulata* e *Vibrio fischeri*. Foi verificada alta toxicidade para o efluente não-tratado, sendo que o teste com *V. fischeri* mostrou que esse organismo apresentou maior sensibilidade aos dois efluentes. Com base nos resultados obtidos, os autores relataram que a bactéria *Vibrio fischeri* foi o organismo mais adequado para a avaliação de toxicidade aguda dos efluentes têxteis analisados, sendo mais sensível aos componentes dos mesmos.

Estudos realizados por Domitrovic e Asselborn (2000) para o efluente de uma indústria têxtil, lançado no lago Brava, na Argentina, entre o período de (1997 e 1998), mostraram efeito inibitório nos ensaios de toxicidade. Foram utilizadas algas nativas em diferentes concentrações de amostras coletadas em três diferentes pontos: 50, 300 e 4.000 metros do descarte do efluente. Todas as concentrações ensaiadas apresentaram efeito inibitório significativo sobre o crescimento das microalgas, evidenciando a poluição ambiental causada pelo lançamento desse efluente.

A exposição constante de seres vivos a um número crescente de xenobióticos constitui atualmente umas das principais causas do estabelecimento de vários processos mutagênicos e carcinogênicos. Com base nisso, Ribeiro, *et al.*, (2000) estudaram o efeito do efluente final tratado de uma indústria de Santa Catarina (Damyller) no fígado de tilápia, avaliando o dano celular associado ao estresse oxidativo, quando o organismo foi exposto a diferentes classes de substâncias químicas. Os resultados indicaram que o tipo de

tratamento empregado não foi suficiente para eliminar o efeito tóxico desse efluente aos peixes.

II. 6.2 – Testes de Respirometria

A Respirometria é um método de ensaio biológico muito utilizado. Este teste consiste na utilização de um respirômetro automatizado, que mede a atividade celular através da respiração, a partir das reações biológicas, quando se inicia a degradação de substâncias orgânicas.

Os respirômetros, de um modo geral, contêm uma célula, na qual a substância em estudo é colocada em contato com um inóculo e o consumo de oxigênio pelos microrganismos é monitorado ao longo do tempo. A célula, imersa em água a temperatura controlada, é totalmente fechada, e dispõe de um manômetro altamente sensível (um tubo em "U", com um líquido manométrico). No início do ensaio, a altura do líquido manométrico é a mesma nas duas pernas do "U". Ao fim do ensaio, a diferença de altura indica a variação na pressão dentro da célula, tornando possível determinar o consumo de oxigênio (utilizado nas reações bioquímicas ocorridas).

A biodegradação pode ser monitorada pela da formação de CO₂ através do processo respirométrico. Nestes testes de respirometria pode ser monitorada a taxa de evolução de CO₂, cuja origem vem do processo de respiração dos microrganismos. O CO₂ acumulado permitirá avaliar a biodegradação.

Swaminathan e Sandhya (2005) verificaram um aumento da biodegradabilidade (através da medida da razão DBO₅/DQO) após a ozonização, para o corante H-acid utilizado na indústria têxtil. A biodegradabilidade do efluente sintético aumentou de 0,17 para 0,45, após 30 min de ozonização, para uma dosagem de 4,33 mgO₃.L⁻¹ em pH 11,5.

Segundo Gökçen e Özbelge (2005), a razão máxima DBO₅/DQO, encontrada na literatura, varia entre 0,27 e 0,56, para diferentes compostos aromáticos. Esses autores realizaram estudos de ozonização para o corante Acid Red 151 em pH neutro, e o maior valor obtido foi de 0,35 (DBO₅/DQO), indicando boa biodegradabilidade.

Shang, *et al.*, (2001), empregaram a ozonização com o objetivo de aumentar a biodegradabilidade de clorofenóis e verificam que os valores da relação DBO₅/DQO aumentaram após 6 minutos de ozonização. Foi verificado também que os resultados dos

testes de Microtox e TCO foram similares neste estudo. A elevada toxicidade e a alta porcentagem de inibição ocorreram após 1 minuto de ozonização.

II. 6. 2.1 Taxa de Consumo de Oxigênio (TCO)

Também conhecido como Taxa de Respiração, é determinada com o objetivo de medir a quantidade de oxigênio consumida pelos microrganismos. Através da determinação da TCO, pode-se também detectar a presença de substâncias tóxicas no efluente. A diminuição do valor da TCO, quando não há redução da carga orgânica aplicada, pode indicar a presença de substâncias tóxicas ou inibidoras no efluente (Fernandes, *et al.*, 2001, Andreottola, *et al.*, 2005).

De acordo com literatura, existem diferentes métodos para determinação de TCO. Pode-se estimar a TCO a partir de medições da concentração de oxigênio dissolvido, com intervalos relativamente longos ou com intervalos mais curtos (Catunda, *et al.*, 1998, Andreottola, *et al.*, 2005).

II. 7 – TÉCNICAS DE TRATAMENTO EMPREGADAS PARA A REMOÇÃO DE CORANTES

As principais técnicas disponíveis na literatura, para o tratamento de efluentes têxteis, envolvem principalmente processos de adsorção, precipitação, degradação química, eletroquímica e fotoquímica, biodegradação entre outras (Shu *and* Huang, 1995, Forgacs, *et al.*, 2004). Para cada processo, há vantagens e desvantagens específicas. Vale a pena ressaltar que a eficiência e a viabilidade de um determinado processo de tratamento dependem das características do efluente.

II.7.1 –Processos biológicos de tratamento

O tratamento convencional por lodos ativados é normalmente usado para efluentes têxteis misturados ou não ao doméstico. Este processo reduz consideravelmente a DQO do efluente. No entanto, é quase ineficaz para remover cor, pois ocorre pouca biodegradação dos corantes .

Entretanto, o tratamento biológico tem sido utilizado por apresentar grande eficiência na remoção de cor para alguns tipos de corantes (Kudlich, *et al.*, 1999, Lopes, *et al.*, 2005).

De acordo com a literatura, os corantes reativos não são facilmente degradados nos processos aeróbios convencionais (Kudlich, *et al.*, 1999, Wang, *et al.*, 2002, Forgacs, *et al.*, 2004).

O pré-tratamento anaeróbio permite a degradação parcial de corantes azo e outros corantes solúveis em água, enquanto que um subsequente tratamento aeróbio é necessário para se obter maior mineralização dos poluentes orgânicos. Mas, o tratamento combinado anaeróbio e aeróbio não tem sido aplicado por completo em escala real, embora o estudo em escala piloto tenha provado a sua eficiência. Experiências promissoras foram realizadas na África do Sul, que indicaram que é possível degradar efluente de lavagem de tinturaria em digestores anaeróbios.

As condições anaeróbias e aeróbias podem ser obtidas em um único passo, em tratamento com reatores com biofilme fixo sob condições operacionais específicas, que mantenham a penetração parcial de oxigênio no biofilme.

Bell e Buckley (2003) observaram remoções na faixa de 90% de DQO e 86% de cor, tratando efluente têxtil em reator anaeróbio, no qual a biomassa foi aclimatada ao corante, obtendo-se um lodo com alta atividade metanogênica.

Vale ressaltar que a maior parte dos efluentes da indústria têxtil é oriunda das etapas de tingimento e alguns autores verificaram que esses corantes, quando não são resistentes aos tratamentos biológicos, apresentam lenta cinética de degradação (Bertazzoli e Pelegrini, 2002).

No tratamento anaeróbio, pode ocorrer a degradação do grupamento azo, produzindo a descoloração do efluente, mas por outro lado, ocorre a produção de aminas aromáticas (Méndez-Paz *et al.*, 2003).

Segundo Guaratini e Zanoni (2000) processos biológicos combinados a uma outra técnica, podem ser muito promissores para o tratamento de efluentes. Entretanto, os corantes sintéticos são, em sua maioria, xenobióticos, ou seja, os microrganismos dos ambientes aquáticos não produzem enzimas específicas para a degradação desses compostos sob condições aeróbias e, sob condições anaeróbias, a degradação de corantes se processa muito lentamente. No entanto, cultura de microorganismo do gênero

Pseudomonas, após longo período de adaptação, mostrou-se capaz de mineralizar alguns tipos de corantes selecionados.

Estudos sobre a aplicação de tratamentos enzimáticos para remover compostos fenólicos em efluentes têm revelado resultados promissores. A enzima peroxidase, por exemplo, é capaz de catalisar a transformação de compostos fenólicos e aminas aromáticas em soluções aquosas e também promover a descoloração de efluentes têxteis (Fonseca, 2003).

O mesmo resultado não foi observado por Barroso (2000) (In: Fonseca, 2003) utilizando a enzima tirosinase para reduzir a cor e a concentração de matéria orgânica de corantes reativos, visto que esta enzima, em presença de oxigênio molecular, oxida fenóis e polifenóis.

II. 7.2 -Processos Físico/Químicos

Coagulação/Floculação

O processo de coagulação/floculação, usando sais férricos, policloreto de alumínio e polieletrólitos é largamente usado como pré-tratamento, pós-tratamento e até mesmo como tratamento principal dos efluentes têxteis finais e pode permitir, em alguns casos, o reúso do efluente (Mettioli, *et al.*, 2002). O sucesso da remoção de cor do efluente têxtil depende do tipo de corante a ser removido (Kudlich, *et al.*, 1999). O emprego desta técnica tem mostrado ser pouco eficiente na eliminação da matéria orgânica, sólidos em suspensão e cor para corantes solúveis, mas é muito eficaz para os corante insolúveis.

O desempenho desta técnica foi avaliada por Tuba (2001), empregando diferentes coagulantes a fim de eliminar a cor de três efluentes provenientes de diferentes processos de produção têxtil. Ficou evidenciado que o alumínio foi o coagulante que apresentou melhores resultados em termos de redução de DQO e eliminação de cor, como mostra a Tabela II.5.

Tabela II.5 Resultados dos ensaios de coagulação aplicados à efluentes têxteis.

Origem da Amostra	DQO (mg/L)	Coagulante	Dose (mg/L)	pH	Remoção de	
					DQO (%)	Remoção de cor (%)
Fibra de algodão	1633	Al ₂ (SO ₄) ₃	1250	6	68	45
		FeSO ₄	1250	8	55	41
		FeCl ₃	1250	6	69	43
Fibra de Poliéster	617	Al ₂ (SO ₄) ₃	200	5	48	67
		FeSO ₄	600	8	40	49
		FeCl ₃	600	5	53	54
Produção de Tecidos	770	Al ₂ (SO ₄) ₃	200	7	60	67
		FeSO ₄	500	8	67	77
		FeCl ₃	200	7	64	68

Possivelmente algumas desvantagens podem ser consideradas como: concentração de substância química adicional no efluente (a qual normalmente aumenta concentração de sais), alta produção de lodo, e incompleta remoção de corantes.

Testes de coagulação/floculação em escala de laboratório mostraram boa eficiência na remoção de corantes de enxofre, enquanto que os resultados obtidos com os corantes *ácido, diretos, reativos* e corantes *a Cuba* foram insatisfatórios (Mettioli, *et al.*, 2002).

Processo Eletrolítico

O processo eletrolítico também tem sido empregado como alternativa para remover corantes de efluentes. Neste sistema, a degradação da substância é realizada eletroquimicamente através do potencial ou corrente aplicada, ou através de reagentes secundários gerados eletroliticamente. O alto gasto com energia, além da produção de reações paralelas, tais como: geração de cloro, de radicais hidroxila e outros produtos indesejáveis, têm diminuído a potencialidade do método. Entretanto, alguns autores têm ressaltado a necessidade de mais estudos, visando reduzir a geração de metabólitos com características tóxicas e diminuir o custo do processo (Mollah, *et al.*, 2004).

Testes em escala piloto com soluções de corantes específicos em efluente têxtil real mostraram bons resultados. As principais vantagens deste processo são o pequeno consumo de substâncias químicas e nenhuma produção de lodo.

Portanto, este método pode ser simples e efetivo como pré-tratamento de efluente têxtil para remover cor e DQO (Mollah, *et al.*, 2004).

II.7.3 - Adsorção

Adsorção em carvão ativado, sílica gel, bauxita, resinas de troca iônica, derivados de celulose, entre outros, tem apresentado bons resultados na remoção de cor desses efluentes.

A alta afinidade dos corantes por materiais adsorventes, como carvão ativado e adsorventes de baixo custo, torna possível e eficiente a remoção de muitos corantes e a obtenção de efluente de alta qualidade. Carvão ativado é geralmente o mais efetivo para uma extensa gama de corantes. O desempenho do processo depende do tipo de carvão usado e das características do efluente. Ele pode ser usado como Carvão Ativado Granular (CAG) ou como Carvão Ativado Pulverizado (CAP). O CAG é de maior custo, enquanto o CAP pode ser aplicado diretamente dentro de um tanque de aeração biológico (lodo ativado).

A adsorção em Carvão Ativado Granular (CAG), em leito fixo ou fluidizado, não pode ser empregada sem um pré-tratamento do efluente, pois os materiais em suspensão colmatam rapidamente os leitos.

Estudos de tratamento de água de lavagem com corantes, por carvão ativado, permitiram a separação de corantes de combinações orgânicas. Um tratamento mais eficiente pode ser obtido pela combinação de adsorção química em CAG e biodegradação, conseguindo o crescimento da biomassa sobre os grânulos. Se uma etapa de ozonização for incluída como pré-tratamento do efluente, a concentração de oxigênio residual no efluente pode ser aproveitada, em um sistema de tratamento biológico subsequente com Carvão Ativado Biológico (CAB) (Mettioli, *et al.*, 2002).

II.7.4 – Processos com membranas

Os processos utilizando membranas não destroem os poluentes, só os separam em uma corrente mais diluída e uma mais concentrada. Através de filtração em membrana é possível clarificar, concentrar e separar um fluxo de corante diluído continuamente de um efluente, tornando possível a recuperação e reciclagem de alguns corantes.

Membranas de ultrafiltração são usadas para a recuperação de substâncias químicas, enquanto osmose inversa (RO) e nanofiltração (NF) normalmente são as únicas possíveis alternativas para remoção de sais para produção de água de alta qualidade para reuso.

Tecnologias de separação por membranas, especialmente as de nanofiltração e osmose inversa, têm propiciado boa remoção da cor (Lopes, *et al.*, 2005). Ambas as técnicas promovem a separação efetiva de moléculas de corantes, cujos tamanhos sejam suficientemente grandes para permitir a sua retirada do efluente. Essas técnicas permitem o tratamento de grandes volumes de modo rápido e satisfatório, porém o custo é alto e a limpeza das membranas é problemática (Guaratini e Zanoni, 2000).

Ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa foram aplicadas na África do Sul para o tratamento, em grande escala, de efluentes gerados nas etapas de polimento, alvejamento, engomagem e tinturaria, visando o reuso de água e o re-aproveitamento de substâncias químicas. Testes em escala de laboratório têm provado que a nanofiltração e a osmose inversa podem tratar efluentes contendo corantes reativos usados em algodão, corantes dispersos em poliéster e corantes reativos, dispersivos combinados na mistura de algodão-poliéster. O permeado produzido por nanofiltração pode ser reusado para enxágüe, enquanto a osmose inversa permite a produção de permeado satisfatório para todos os usos industriais (Mettioli, *et al.*, 2002, Lopes, *et al.*, 2005).

Outro processo, que combinado ao biológico e físico/químico, que pode ser usado para tratamento de efluente têxtil é o biorreator com membrana (MBR), que consiste em um processo de lodo ativado, no qual o clarificador foi substituído por membranas (Mettioli, *et al.*, 2002).

II.7.5 -Reúso

O reúso da água para fins não potáveis já é uma realidade em vários países, pois pode possibilitar a reciclagem de substâncias químicas e a redução no volume de água no processo industrial e, possivelmente, pode ou não requerer tratamento de intermediários. Reciclar (significa usar de novo água e substâncias químicas no mesmo processo que produziu o efluente), quando possível, é muito importante, pois não só pode economizar água e substâncias químicas, mas também energia (Mettioli, *et al.*, 2002).

O reúso de efluente em alguns processos diminui o custo, mas pode apresentar desvantagens quanto ao aumento de toxicidade aguda para a microflora nas unidades de tratamento de efluentes (Wang, *et al.*, 2002).

A aplicação dessa técnica pode ocasionar mudanças significativas na composição do efluente final (redução no volume e aumento na concentração de contaminantes). A recalcitrância e a biotoxicidade de muitos dos componentes presentes em efluentes têxteis, possivelmente, poderão ser aumentadas no efluente tratado, podendo afetar severamente o desempenho do tratamento de efluentes, já implantado e, então, influenciar ou até mesmo impor a exigência de nova planta de tratamento.

II. 8 – PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS APLICADOS AO TRATAMENTO DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA TÊXTIL

O aumento da complexidade e a dificuldade de tratamento de efluentes têxteis e industriais, de um modo geral, têm levado à busca constante de novas tecnologias para o tratamento destes rejeitos.

Como comentado, dispõe-se de vários métodos físicos, químicos e biológicos, e a escolha do método adequado seguramente deve ser feita levando-se em conta os objetivos a serem alcançados com o tratamento.

Para o tratamento de efluentes contendo corantes, a ozonização mostra-se um método adequado para eliminação dessas substâncias resistentes à degradação nos sistemas convencionais de tratamento.

A utilização dos processos oxidativos avançados tem despertado grande interesse em pesquisas científicas, por se tratar de técnicas com alto poder de oxidação para a degradação de uma variedade de contaminantes orgânicos.

Os processos oxidativos podem ser eficientes na transformação de compostos orgânicos complexos a moléculas simples, podendo levar à mineralização completa de poluentes em dióxido de carbono, água e inorgânicos ou à sua transformação em produtos menos complexos.

Esses processos têm como objetivo a geração de radicais $\bullet\text{OH}$, um poderoso agente oxidante, que apresenta alta reatividade e baixa seletividade, e reage com muitas moléculas orgânicas, apresentando constantes de reação da ordem de $10^6 - 10^9 \text{ mol.L}^{-1} .\text{s}^{-1}$ (Bila, 2003). Em geral, esses processos são utilizados de forma combinada a fim de se obter o melhor desempenho possível no tratamento.

A degradação de corantes reativos por esses processos tem se mostrado um método químico eficiente e adequado para o tratamento de efluentes têxteis, para os quais a descoloração é a preocupação principal. Entre os agentes oxidantes disponíveis, destaca-se o peróxido de hidrogênio (H_2O_2), ativado para formar os radicais hidroxila, capazes de descolorir uma gama vasta de corantes (Daneshvar, *et al.*, 2004).

Dentre os processos oxidativos avançados atualmente utilizados, serão descritos brevemente a seguir, os que têm sido empregados para a degradação de corantes, conforme reportado na literatura (Paulouë e Langlais, 1999, Kunz, *et al.*, 2002, Neamtu, *et al.*, 2004).

II. 8.1. Reativo de Fenton

A reação de Fenton é um método utilizado para ativar a formação dos radicais hidroxila. Nesse processo o peróxido de hidrogênio é acrescentado a uma solução ácida ($\text{pH} = 2-3$) contendo íons Fe^{+2} , para produção de radicais hidroxila livres. A reação de Fenton pode ser considerada como um pré-tratamento para efluentes complexos ou como técnica para a degradação de compostos recalcitrantes ao tratamento biológico. Em plantas-piloto de grande porte, a reação geralmente é realizada à temperatura ambiente, porém, são usadas excessivas quantidades de ferro, como também de peróxido de hidrogênio. As principais desvantagens desse método são: a adição significativa de ácido e álcali para alcançar o pH exigido; a necessidade de remover o ferro residual, e a conseqüente produção de grandes volumes de lodo.

Segundo Forgacs, *et al.*, (2004), a descoloração de soluções contendo Reativo Red 120, Blue 160 e Acid Blue 40, foi bem sucedida quando o processo Fenton foi aplicado. Essa mesma combinação foi eficiente para mineralizar o corante azo Orange II, não biodegradável.

II. 8.2. Foto-Fenton

A técnica de tratamento utilizando Foto-Fenton tem provado ser eficiente, levando a uma boa taxa de remoção dos poluentes em solução (Feng, *et al.*, 2005). O efeito de radiação UV-visível para aumentar a geração de radicais hidroxila incrementa as taxas de degradação de muitas combinações orgânicas em reatores fotoquímicos. Este processo apresenta vantagens quanto ao consumo de energia elétrica, comparado com o processo H_2O_2/UV , há um consumo de 3 a 10 vezes menor. Como desvantagem, elevada coloração.

Na investigação de Neamtu, *et al.*, (2004), o processo Foto Fenton foi o método mais apropriado de pré-tratamento para descoloração e destoxificação de efluentes têxteis. A remoção de cor foi de 85% e a de DQO foi maior que 90%, em 10 min de reação. Sulfato, nitrato, cloreto e oxalato foram formados e identificados como principais produtos das reações de oxidação.

II. 8.3. Fotocatálise

A Fotocatálise está baseada na utilização de um óxido de metal semicondutor como catalisador e oxigênio como receptor de elétrons. Este processo tem utilizado como catalisador o TiO_2 por apresentar elevada estabilidade, boa performance e baixo custo. Neste processo são gerados radicais hidroxila, caracterizados como fortes oxidantes por reagir rapidamente com a matéria orgânica adsorvida sobre o catalisador, formando intermediários oxidados, podendo ocorrer a mineralização total da matéria orgânica.

A degradação de compostos orgânicos através da ativação por luz UV é um modo alternativo para produzir os radicais hidroxila. Foi testada por Neamtu, *et al.* (2004) a degradação de moléculas de corantes através de luz UV em escala piloto, em combinação com H_2O_2 e TiO_2 , que evidenciou completa remoção de cor e da toxicidade (Daneshvar, *et al.*, 2005, Meriç, *et al.*, 2005).

O processo de oxidação fotocatalítica foi usado com sucesso para descoloração do Reativo Black 5 em efluente têxtil. A degradação de antraquinona, um corante sulfonado, foi facilitada na presença de TiO_2/UV e H_2O_2 no meio reacional.

O processo fotocatalítico na presença de TiO_2/UV também mostrou ser eficiente para o corante Amaranth e/ou Acid Red 27 (Karmaz, *et al.*, 2004, Daneshvar, *et al.*, 2004).

II. 8.4. Processo $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$

Esse processo consiste na irradiação UV da solução contendo peróxido de hidrogênio. Esse processo ocorre num comprimento de onda menor que 280 nm, causando a clivagem homolítica do H_2O_2 , gerando assim, radicais hidroxila.

Fonseca (2003) obteve bons resultados utilizando o processo combinado $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ no tratamento de corantes reativos. Nas condições estudadas foi possível obter redução de cor de até 99,3% e 95,5% para dois corantes utilizados, Vermelho Drimarene X-6BN 150 e Azul Marinho Drimarene X-GN 150, respectivamente. Foi verificado que existem algumas variáveis e interações que podem influenciar na eficiência de degradação dos corantes, como a concentração de H_2O_2 que foi considerada a principal variável que afetou o processo. Outra substância que também apresentou efeitos negativos no processo de oxidação foi o NaCl, pois valores elevados do teor desse sal dificultam a remoção de cor das soluções de corantes reativos.

A utilização de $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, para o tratamento de soluções contendo corantes com diferentes estruturas, mostrou-se efetivo para descoloração de corantes (ácidos, diretos, básico e reativo) e inadequado para os corantes a Cuba e dispersos (Forgacs, *et al.*, 2004).

II. 9 – OZÔNIO

A técnica de tratamento que promove a degradação química, usando ozônio, têm se mostrado mais efetiva do que aquelas que empregam cloro, que são insatisfatórias para alguns tipos de corantes (corantes dispersos e diretos). Além disso, a ozonização apresenta a vantagem adicional de não produzir íons inorgânicos, como na oxidação com cloro. O ozônio é considerado um forte oxidante e a sua utilização com irradiação UV ou com peróxido de hidrogênio permite a geração de radicais hidroxila, aumentando o potencial de oxidação. O ozônio pode reagir com compostos orgânicos direta ou indiretamente através

de radicais $\bullet\text{OH}$ gerados durante a sua decomposição. Deve-se ressaltar que essas reações são fortemente dependentes do pH da solução ou efluente.

II. 9.1 Mecanismo de Ação do Ozônio em Solução Aquosa

Os mecanismos de ação do ozônio na água são complexos, admite-se que a reação acontece em duas grandes vias, como mostra a Figura II.3.

- ✓ ação direta, mais seletiva;
- ✓ ação indireta do tipo radical, não seletiva.

Algumas condições contribuem para que um dado mecanismo ocorra (pH, natureza do substrato, presença de sais dissociados). A presença de substratos facilmente oxidados, em meio ácido, favorecem a via direta, já o ataque, em meio alcalino, de solutos dificilmente oxidados tem lugar principalmente por via do radical (López, 2004).

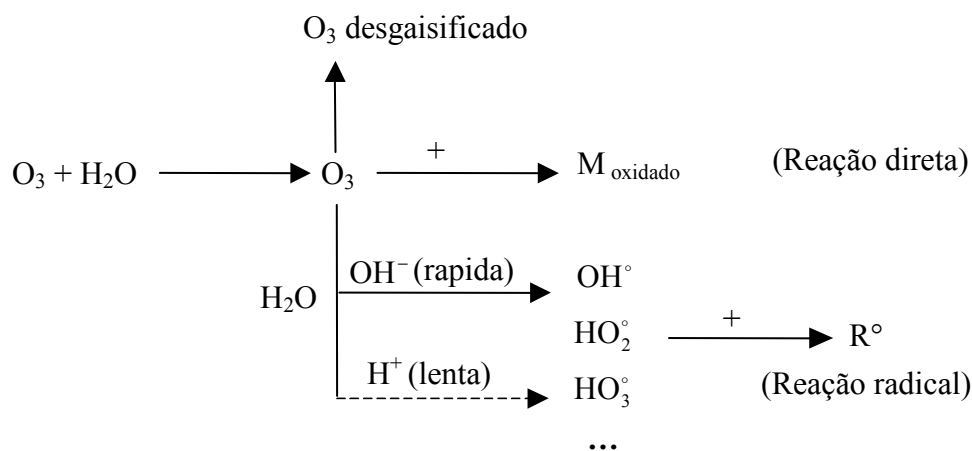


Figura II.3: Esquema geral dos mecanismos de ação do ozônio.

II. 9.1.1. Reação do ozônio por via direta ou molecular

Representa a ação direta da molécula de ozônio com outras moléculas orgânicas ou inorgânicas. O ozônio com suas estruturas de ressonância pode agir como um dipolo, sendo um agente eletrofílico ou um agente nucleofílico. Estas reações diretas são consideradas como muito seletivas (Von Gunten, 2000, Kunz, *et al.*, 2002).

II. 9.1.1.1 Reação de ciclo adição de ozônio

O ozônio pode reagir com as ligações insaturadas com a formação de ozonide primário, como mostra a Figura II.4. Na presença da água o ozônio se decompõe para formar os aldeídos, cetonas e peróxido de hidrogênio.

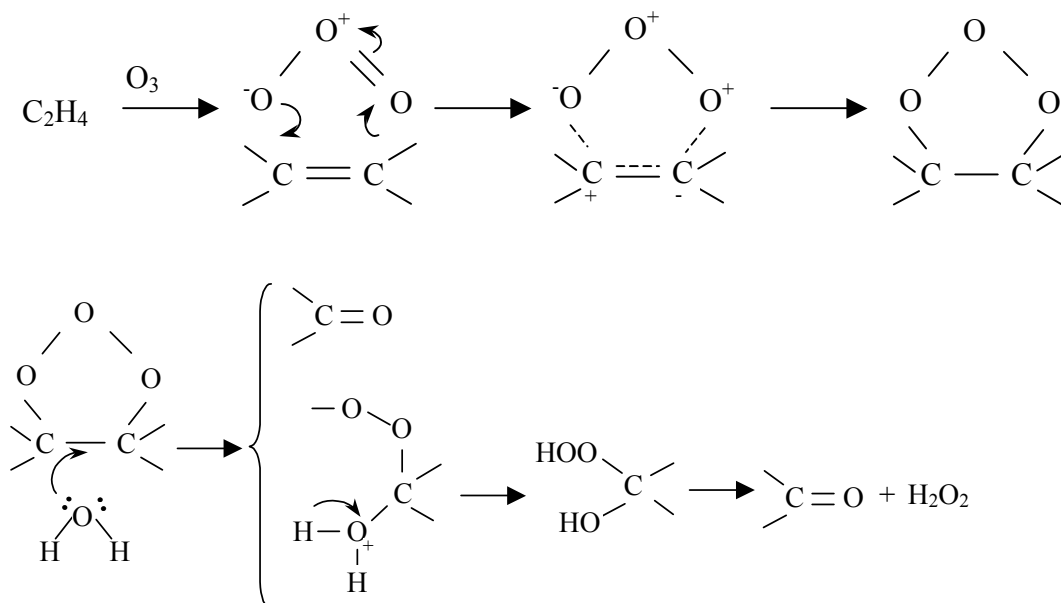


Figura II.4 Cicloadição do ozônio em compostos insaturados Doré, 1989 (In: López, 2004).

II. 9.1.1.2 Reação eletrofílica do ozônio

O ozônio ataca os sítios de alta densidade eletrônica, compostos aromáticos, aminas, compostos de enxofre, etc. No caso dos compostos aromáticos, o ataque eletrofílico é favorecido em compostos cujo anel aromático é ativado por grupamentos doadores de elétrons $-OH$, $-NH_2$, $-OCH_3$, etc. Isto porque os grupamentos induzem a uma densidade eletrônica elevada sobre o ciclo aromático, que facilita a substituição eletrofílica. A ação do ozônio molecular sobre os compostos aromáticos favorece a formação de compostos hidroxilados e quinônicos, pois a formação de compostos alifáticos é originada da ruptura do ciclo aromático, ilustrado na Figura II.5.

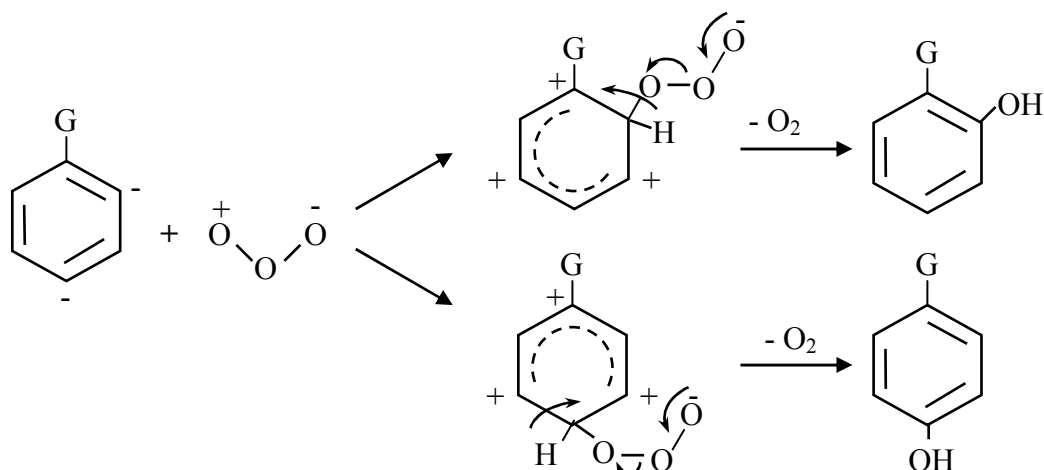


Figura II.5 Substituição eletrofílica em um carbono aromático Decoret, *et al.*, 1984 (In: López, 2004).

II. 9.1.1.3 Reação nucleofílica do ozônio

O ataque nucleofílico do ozônio se dá sobre os sítios que apresentam um déficit eletrônico, como mostra a Figura II.6.

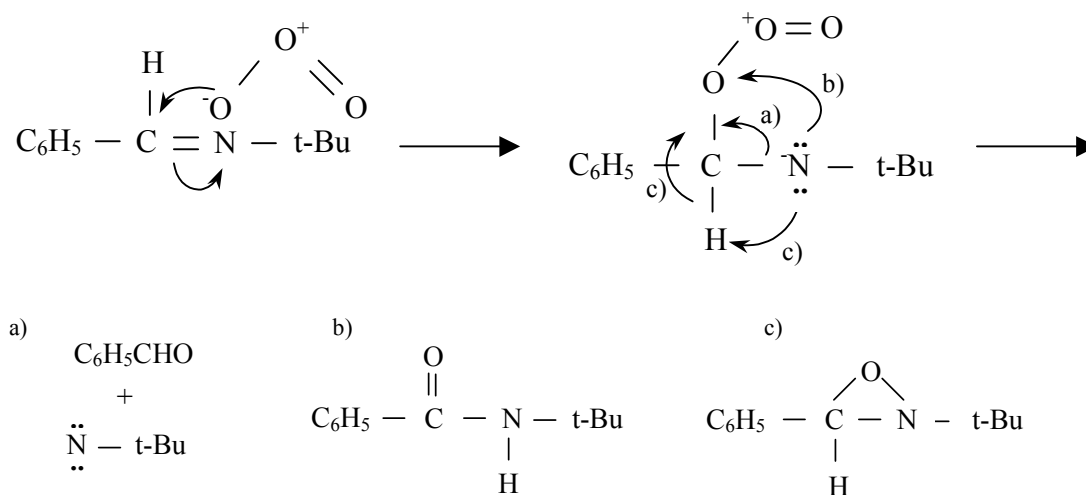


Figura II.6 Esquema de ozonização de uma base de Schiff em solvente inerte Bailey, 1982 (In: López, 2004).

II. 9.1.2. Reação do ozônio por via radicalar

Este mecanismo é favorecido em meio alcalino. O ozônio é uma molécula muito reativa, mas sua decomposição na água conduz a formação de espécies mais reativas, os radicais hidroxilas OH^\bullet . Esta decomposição é composta de três fases distintas: a iniciação radicalar, a propagação e a finalização por ruptura da corrente radicalar, ilustrada na Figura II.7 (Von Gunten, 2000, Kunz, *et al.*, 2002).

II. 9.1.2.1 Iniciação radicalar

A molécula de ozônio se decompõe para formar radicais livres, espécies extremamente reativas e pouco seletivas. Esta decomposição do ozônio depende de vários parâmetros como: pH, velocidade com a qual o ozônio molecular reage com o substrato e os solutos e a presença de substâncias que favorecem a formação do radical $^{\circ}\text{OH}$. Os iniciadores de radicais livres são os compostos capazes de induzir a formação do íon superoxidado $\text{O}_2^{\circ-}$ a partir de uma molécula de ozônio. Entre esses compostos, pode-se citar: OH^- , HO_2^- , diversos cátions metálicos, ácido fórmico, o peróxido hidrogênio e a luz ultravioleta que permite fornecer a energia necessária para a ruptura homolítica de uma ligação oxigênio-oxigênio (Von Gunten, 2000).

II. 9.1.2.2 Propagação

Na etapa de propagação os radicais reagem para gerar outros radicais. Esta etapa esta é diretamente influenciada pela presença de propagadores de radicais, isto é, os compostos capazes de regenerar o íon superóxido a partir de um radical hidroxila $^{\circ}\text{OH}$.

II. 9.1.2.3 Finalização

Neste caso os radicais reagem entre si ou com outras moléculas para formar uma molécula inerte. As reações finais produzem espécies não radicalares a partir de espécies radicalares.

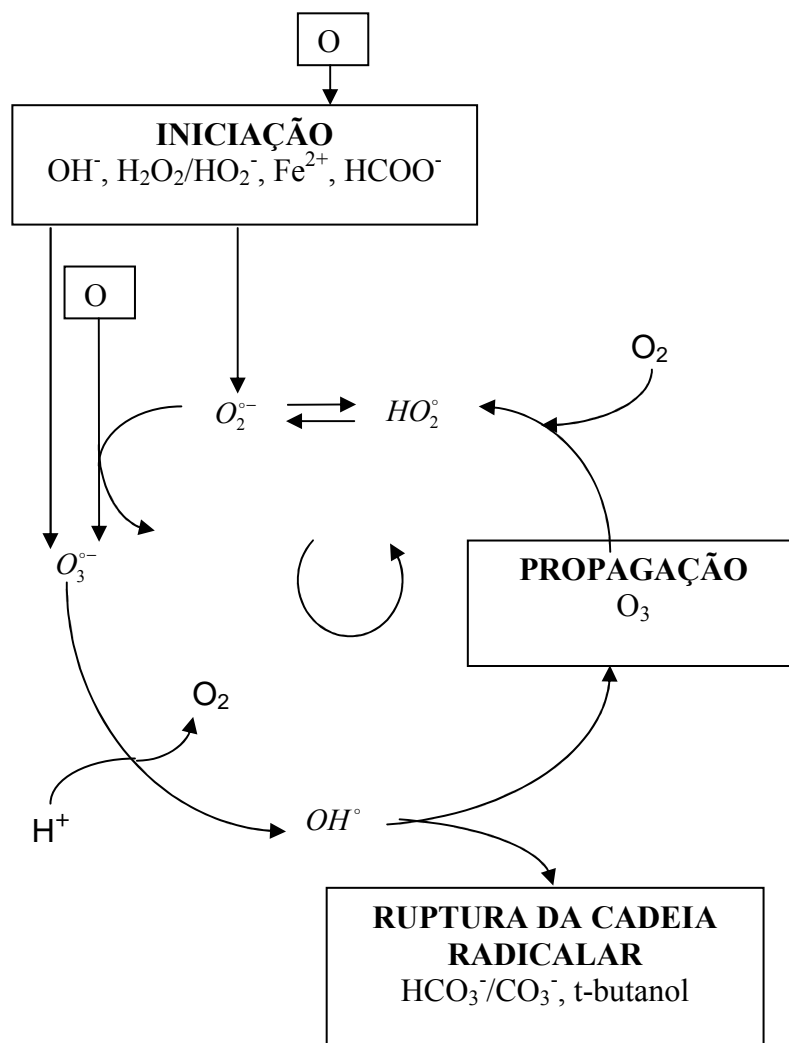


Figura II.7 Esquema das reações radicalares em meio aquoso na presença de matéria orgânica (Staelin e Hoigné, 1985 (In:López, 2004)).

II. 9.1.3. Caso particular dos corantes

Ledakowicz, *et al.* (2001) verificaram a adição de H_2O_2 em pH ácido e neutro não influenciou a velocidade de oxidação dos corantes. Por outro lado, em pH básico, a adição de H_2O_2 reduziu a eficiência de descoloração em comparação com a ozonização. Estes ensaios mostraram que a velocidade de descoloração é maior que a velocidade de decomposição do ozônio, significa que o ataque direto do ozônio é priorizado durante a descoloração. Estes autores mostram ainda que, quando o ensaio é realizado em reator semi-contínuo, as concentrações elevadas de H_2O_2 inibem a velocidade de descoloração. Portanto, não há razão para utilizar o peróxido de hidrogênio durante a oxidação de corantes por ozônio.

II. 9.1.3.1 Mecanismo de ação do ozônio

Chen, *et al.* (2002) esquematizaram o mecanismo de ação do ozônio, sobre o composto 2-naftaleno-sulfonado (2-NS), através da Figura II.8 verifica-se que o ozônio ataca preferencialmente o anel aromático:

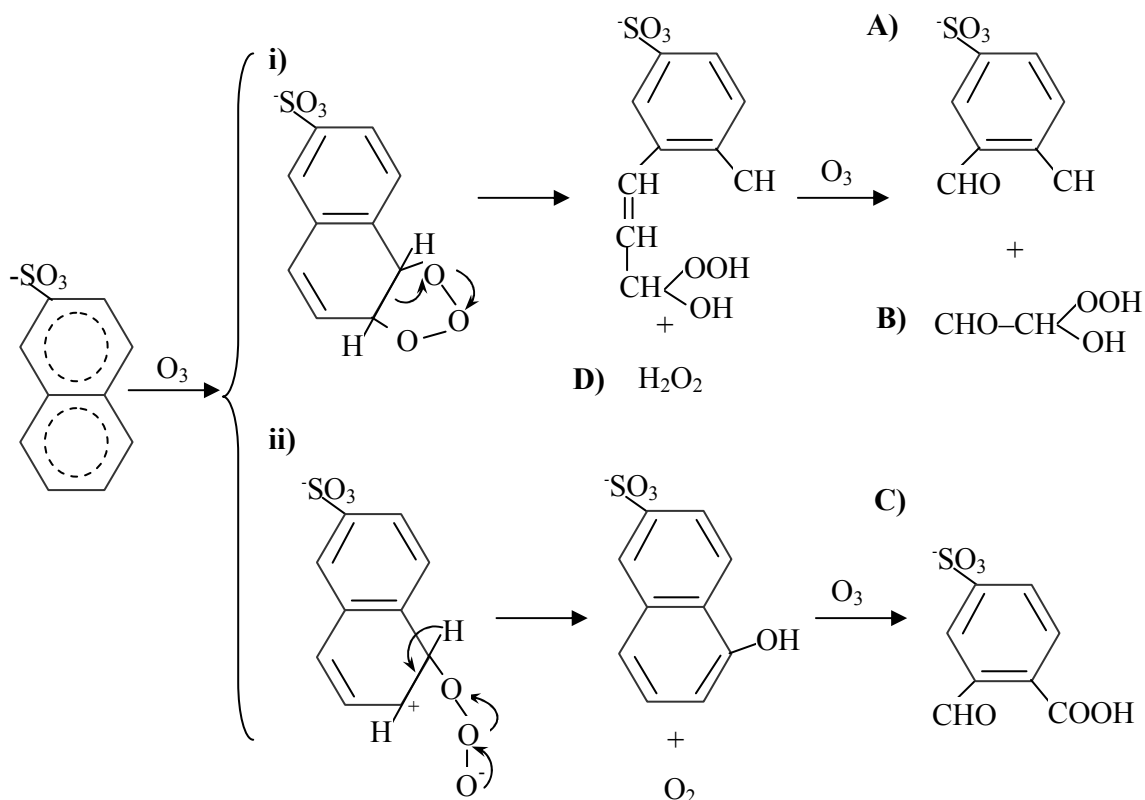


Figura II.8 Mecanismo de ozonização de 2-naftaleno-sulfonado (Chen *et al.* 2002).

- ✓ Por ciclo adição dipolar na ligação 1,2 – via (I) – conduzindo aos produtos intermediários 4-sulfo-o-ftalaldeído (A), o hidroperoxi-etanal (B) assim como peróxido de hidrogênio (D);
- ✓ Por substituição eletrofílica no carbono 1 – via (II) – conduzindo ao ácido 4-sulfo-o-ftalaldeídico (C).

Neste estudo, Chen, *et al.*, (2002) testaram também a combinação de ozônio/UV para produzir os radicais OH° . Eles concluíram que não houve uma melhora sensível na primeira etapa de degradação. Entretanto, a redução do COT no processo combinado, foi

melhor do que quando usou-se somente ozônio: isto significa que o ozônio é pouco ativo aos produtos (A), (B) e (C).

II. 9.1.3.2 Comparação dos compostos benzênicos e naftalênicos

Calderara *et al.* (2002) (In:López,2004) comparam a ozonização dos ácidos 1-naftaleno-sulfônico, 1,5- naftaleno-sulfônico e 3-nitrobenzeno-sulfônico. Eles verificaram que os compostos formados por ciclos naftalênicos são oxidados mais rápido que os compostos formados por ciclos benzênicos. O ácido oxálico foi o principal produto encontrado após a oxidação dos ácidos sulfônicos, mas por outro lado, a formação de sulfatos foi pequena.

II. 9.1.3.3 Papel dos substituintes presentes nos anéis aromáticos dos corantes

II. 9.1.3.3.1 Os efeitos eletrônicos

O substituinte presentes nos anéis aromáticos contidos nos corantes tem influência considerável sobre a velocidade de reação. A Tabela II.8 apresenta os principais substituintes encontrados e seus efeitos. As funções sulfonadas são freqüentemente implantadas sobre esses ciclos a fim de melhorar a solubilidade dos corantes na água (López, 2004).

Chen, *et al.*, (2002) relatam que o grupamento sulfônico apresenta efeito desativador para oxidação do corante. Na realidade, eles diminuem a densidade eletrônica sobre os ciclos benzênicos e naftalênicos. Para estrutura semelhantes, os corantes que contêm menos íons sulfônicos são mais reativos com ozônio.

Calderara, *et al.*, (2002) (In:López,2004) chegaram à mesma conclusão quando compararam o comportamento dos ácidos 1-naftaleno-sulfônico e 1,5-naftaleno-sulfônico frente a ozonização. O primeiro ácido que contém somente um grupo sulfônico é oxidado mais rapidamente que o segundo que contém dois grupos sulfônicos.

Tabela II.6 Principais substituintes e efeitos sobre ativação dos nucleofílicos.

Ativador	Efeito	Desativador
-NH ₂ , -NHR, -R ₂ , -OH, -O ⁻	forte	-NO ₂ , -NR ₃ ⁺
-OR, -NHCOR	intermediário	-SO ₃ ⁻ , -C≡N
-fenil, -R	fraco	-F, -Cl, -Br, -I

II. 9.1.3.4 Mineralização dos substituintes

De acordo com Chen, *et al.*, (2002), a velocidade de degradação do composto 2-naftaleno-sulfonado é maior que a velocidade de surgimento dos íons sulfatos. Isto confirma a hipótese segundo a qual o ozônio ataca de forma seletiva as duplas ligações N=N e C=C em seguida as ligações C-SO₃H e C-R situados entorno do composto cíclico.

Nayme (1997) apresentou resultados da ozonização de dois corantes diazóticos comerciais, C₂₉H₁₉N₉O₁₂S₃FCu e C₂₉H₁₉N₇O₁₃S₄ClF, e observou que os íons sulfato aparecem mais lentamente na solução do que o desaparecimento do corante. A reatividade das duplas ligações N=N e C=C é, portanto, maior em relação aquela dos grupamentos C-SO₃H e C-R ligado aos anéis aromáticos.

II. 9. 2 O papel do t-butanol nos processos com ação dos radicais

A fim de remover nas reações de oxidação os radicais hidroxilas, é comum adicionar ao meio reacional um composto capaz de capturar estes radicais. O t-butanol é um dos principais compostos utilizados como capturador de radicais. A concentração deste produto deve ser bem definida, pois o que garante a eficiência do processo é quando a oxidação da matéria orgânica pelos radicais hidroxilas é muito mais lenta que a oxidação do capturador de radicais.

Alguns autores admitem que a quantidade de capturador de radical necessária para bloquear a via radicalar deve ser maior quando a molécula a oxidar tem maior tamanho, pois neste caso o número de sítios oxidáveis é mais elevado (López, 2004).

II. 9.3 Ozônio e suas Propriedades

Alguns pesquisadores constataram um odor peculiar e irritante quando o oxigênio era submetido a descargas elétricas. Em 1840, o químico alemão Shönbein, nomeou o odor resultante de uma formação distinta, derivada do oxigênio, de “ozônio”. Este termo tem origem na palavra grega *ozein*, que significa odor. Anos mais tarde, em 1863, Soret estabeleceu a relação entre o oxigênio e o ozônio ao constatar que três volumes de oxigênio produzem dois volumes de ozônio (Azevedo, 2003).

Considerado como gás alotrópico do oxigênio, o ozônio teve como aplicação inicial a desinfecção de água para abastecimento, a fim de remover cor, sabor e odor.

II. 9.4 Estrutura do Ozônio

A estrutura da molécula de ozônio foi estabelecida entre 1840 e 1924. No seu estado fundamental, a molécula apresenta um ângulo obtuso de $116^{\circ}45'$ e duas ligações oxigênio-oxigênio com comprimento de ligação de $1,278 \pm 0,003 \text{ \AA}$. Possui um fraco momento dipolar, como mostra a Figura II.9. A estrutura da molécula pode ser considerada como híbrida de ressonância de quatro formas mesómeras. Elas são caracterizadas por conter um átomo de oxigênio com apenas seis elétrons na última camada (referência). Tal disposição explica a característica eletrofílica do ozônio, demonstrada na maioria das reações químicas.

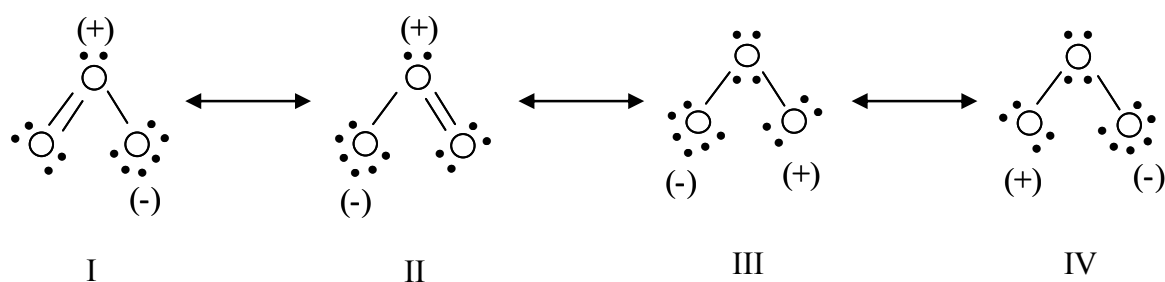


Figura II.9 Estruturas ressonantes da molécula de ozônio.

II. 9.5 – Propriedades Físico-Químicas

O ozônio é um gás azul instável de odor irritante que pode ser detectado em concentrações muito baixas, aproximadamente de 0,02 à 0,05 ppm, em volume. Em uma atmosfera que contém mais de $0,25 \text{ mg.L}^{-1}$, este gás é considerado perigoso e a contínua exposição a concentrações moderadas deste gás causa irritação no sistema respiratório e nas mucosas oculares. Em concentrações maiores e com aumento do tempo de exposição causa dores de cabeça e náuseas.

O ozônio puro pode ser obtido por liquefação fracionada de misturas $\text{O}_2\text{-O}_3$. Os líquidos apresentam sistemas bifásicos; uma fase estável com 25% de O_3 , de uma cor violeta intensa, e outra fase com 70% de O_3 explosivo. Pequenas quantidades de O_3 são

formadas na eletrólise de ácido sulfúrico diluído, em algumas reações químicas que produzem O₂ e pela ação da luz ultravioleta no O₂.

A solubilidade do ozônio na água, para uma pressão parcial igual a 1 atm na fase gasosa, é de 570 mg.L⁻¹ a 20°C, ou seja, 12 vezes menor do que a do cloro nas mesmas condições. Algumas características relevantes do ozônio estão apresentadas na Tabela II.7.

Tabela II.7: Características Físico-Químicas do Ozônio.

Propriedades Físico-Químicas	Valor
Massa molar	47,998 g.mol ⁻¹
Ponto de Fusão	- 192, 5°C
Ponto de Ebulição	- 111,9°C
Temperatura crítica	- 12,1°C
Pressão Crítica	5,46 MPa
Massa Volumétrica a 0°C e 1atm	2,15 g.L ⁻¹
Entalpia a partir de O ₂	142,12 kJ/mol O ₃
Comprimento de onda de máxima absorção	253,7 nm
Potencial de Oxidação a 25°C	2,076 V

Na água pura, o ozônio reage de acordo com as equações abaixo:



O radical hidroxila (OH[°]) reage com ozônio e favorece sua decomposição (Reação II.3). Tanto o ozônio molecular (O₃), como o radical hidroxila (OH[°]) são dois oxidantes poderosos.

A Tabela II.8 mostra que o ozônio tem um potencial oxi-redução elevado (2,07 V) em relação a outros agentes oxidantes.

Tabela II.8 Potenciais dos principais agentes oxidantes

Agente Oxidante	Potencial (Volts)
OH [°]	2,80
O ₃	2,07
H ₂ O ₂	1,78
Cl ₂	1,35

Fonte: López,2004

II. 9.6 Ação do Ozônio nos Corantes Azóicos

A oxidação de alguns corantes por ozônio tem revelado que a ligação olefínica quando degradada resulta em azobenzenos e em compostos carbonílicos. A ligação azóica – N=N– é menos reativa do que as duplas ligações >C=C<.

Muthukumar, *et al.*, (2001) relatam que a estrutura dos corantes azóicos exerce certa influência na cinética de reação com o ozônio. Eles observaram que os corantes que apresentam anéis naftalênicos são oxidados mais rapidamente quando comparados aos que possuem anéis benzênicos e estabeleceram que a reatividade do corante com o ozônio está relacionada com o tamanho do grupamento. Assim tem-se por ordem de reatividade a seguinte classificação: benzeno<naftaleno<fenantreno<pireno<antraceno.

II. 9.7 Reações com os compostos aromáticos e seus derivados

Na literatura podem ser encontrados inúmeros trabalhos relacionados com a degradação dos compostos aromáticos por ozônio (López, 2004). Os subprodutos identificados durante a ozonização dos corantes são decorrentes de várias etapas de degradação:

- o ataque inicial do ozônio ao carbono existente nos anéis benzênicos é do tipo eletrofílico. Os primeiros produtos são derivados polihidroxilados. A absorvância da solução a 254 nm indica que a aromaticidade não varia;
- esses derivados são, em seguida, degradados por oxidação do grupamento hidroxila, abrindo desse modo o anel aromático. Nesta etapa a absorvância a 254 nm diminui mais o teor de COT não varia;
- os compostos com policarbonílicos insaturados obtidos são, em seguida, oxidados por cicloadição dipolar de ozônio. O desaparecimento do ácido carbônico explica a diminuição do COT durante esta etapa;
- Os últimos compostos, relativamente estáveis na ozonização, sofrem pouca degradação. Em função disso a diminuição do COT é globalmente baixa no processo.

II. 9.7.1 – Reação com espécies benzênicas

Através do mecanismo de degradação da anilina, apresentado na Figura II.10, são verificadas as possibilidades de reações de condensação dos fragmentos oxidados na presença de átomos de nitrogênio (López, 2004).

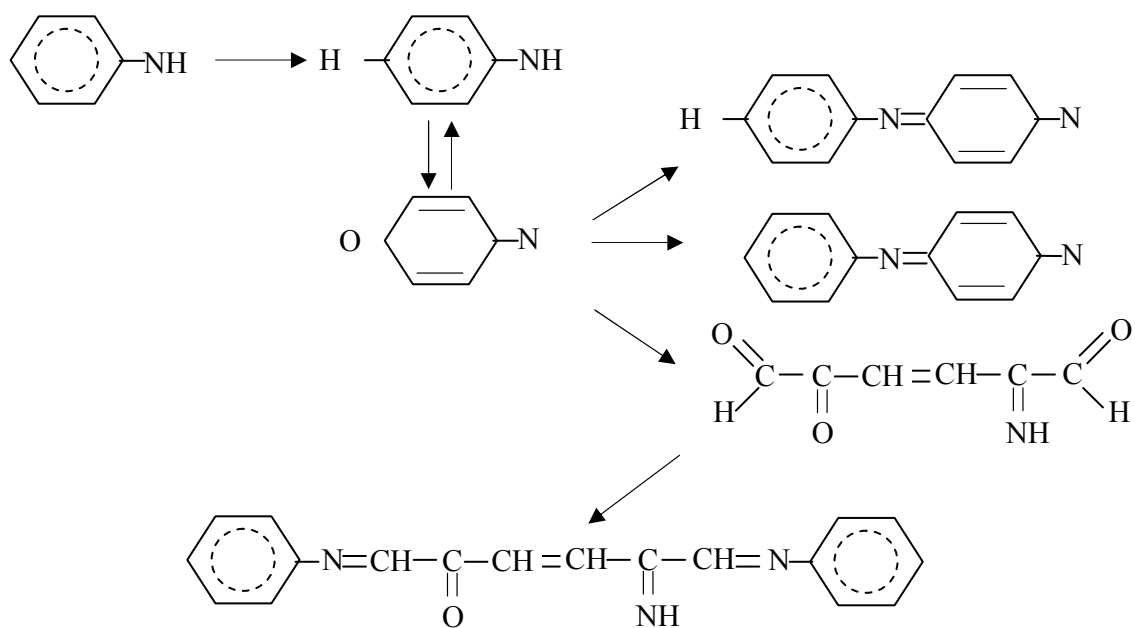


Figura II.10 Esquema de degradação da anilina.

No estudo realizado por Sarasa, *et al.*, (2002) foram identificados diferentes subprodutos da anilina e da p-cloro-anilina após 25 min de ozonização. Foi evidenciado que a ozonização não assegura a abertura total do anel benzênico, pois os subprodutos obtidos são derivados das espécies benzênicas. Isto deixa claro que os compostos benzênicos não são oxidados por ozônio molecular, mas sim por via radicalar.

II. 9.7.2 – Reação com espécies naftalênicas

Os ácidos naftalênicos-sulfônicos são importantes para a produção de corantes utilizados na indústria têxtil e, conseqüentemente, podem estar presentes nos rejeitos desse processo industrial. Estes ácidos são produtos cíclicos intermediários formados pela oxidação dos corantes. São responsáveis por grande parte do consumo de ozônio durante o tratamento.

II. 9.8 – Ozonização de Corantes

A ozonização tem sido muito aplicada em tratamento de água e efluentes. Especialmente para efluentes têxteis, a ozonização é um tratamento de descoloração muito efetivo e rápido, degrada fenóis e reduz a DQO (Koch, *et al.*, 2002, Mascolo, *et al.*, 2002, Peng e Fan, 2005). 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 dos corantes em intermediários mais facilmente biodegradáveis. A Tabela II.9 apresenta uma coletânea de dados encontrados na literatura, referentes ao estudo de ozonização para eliminação de cor e redução de DQO de efluentes têxteis.

Tabela II.9 Ozonização de diferentes corantes utilizados na indústria têxtil.

Tipo de Corante	Doze de ozônio	Redução de cor (%)	Redução de DQO(%)	Tipo de reator	Ref.
Azo	4-10mol/mol Col	100		Semi-contínuo	Sotelo <i>et al.</i> , 1989
Azo e outros	2,9 g.L ⁻¹ .h ⁻¹	100		Semi-contínuo	Carrière <i>et al.</i> , 1993
Azo				Semi-contínuo	Matsui <i>et al.</i> , 1993
Azo		100	60	Semi-contínuo	Liakou <i>et al.</i> , 1997
Azo	1mol/molCol	100		Fechado e Semi-contínuo	Nayme, 1997
Azo		43	25	Semi-contínuo	Sarasa <i>et al.</i> , 1998
Águas têxteis		81	29	Semi-contínuo	Perkowski <i>et al.</i> , 2000
Azo e outros		100			Chu <i>et al.</i> , 2000
Azo e outros	Água saturada com ozônio			Contínuo	Bin e Roustan, 2000
Águas têxteis	20-30 mg.L ⁻¹	99	65	Contínuo	Ciardelli <i>et al.</i> , 2001
Azo	1mol/molCol	100		Batelada	Ledakowicz <i>et al.</i> , 2001

Shu e Huang (1995) também mostraram que no processo de ozonização o pH das soluções decresce com a degradação de corantes azo. A principal desvantagem da ozonização está relacionada com a produção de subprodutos que podem ter propriedades carcinogênicas e tóxicas e, portanto, devem ser mais estudados (Mascolo, *et al.*, 2002). De acordo com a literatura, as aplicações da ozonização vêm crescendo nos últimos anos, principalmente como técnicas de tratamento final, para descolorir esses efluentes. Neste processo, o ozônio reduz a cor pelo ataque a dupla ligação $-N=N-$ ou outros grupos cromóforos que são responsáveis pela coloração. No entanto, durante a ozonização, os corantes são desdobrados em moléculas orgânicas menores e que não conferem cor, principalmente os anéis benzênicos e nafetalênicos.

O hipoclorito de sódio foi muito usado no passado como agente oxidante. Em efluente têxtil, ele pode iniciar e apressar a quebra da ligação azo, mas caiu em desuso por apresentar alguns efeitos negativos.

Saia e Daniel (2001) verificaram uma eficiência ligeiramente superior na remoção de cor em relação à remoção de DQO, com valores variando de 2 a 25% para DQO e de 4 a 30% para cor, tanto nos ensaios de oxidação com O_3 quanto com H_2O_2/O_3 , sendo que em ambos os ensaios a remoção foi crescente até o tempo de aplicação de ozônio de 10 minutos.

Forgacs, *et al.*, (2004) comentam que o processo de ozonização tem se mostrado uma técnica efetiva, quando aplicada na descoloração de corantes sintéticos como o Orange II.

Vários autores encontraram para o emprego de O_3 e H_2O_2/O_3 , resultados de remoção de cor ligeiramente melhores do que em relação à remoção DQO (Muthukumar, *et al.*, 2005). Segundo Gähr, *et al.*, (1994), os processos de oxidação removem a cor de efluentes industriais pela quebra das ligações dos compostos orgânicos policíclicos que alternam simples e duplas ligações. Deste modo, o processo de oxidação provavelmente não mineraliza as complexas moléculas corantes. Da parcela que foi oxidada, há formação de moléculas de menor massa molar que não são degradadas eficientemente pela contínua oxidação, portanto, essas moléculas orgânicas, constituem carbono orgânico residual e ainda apresentam demanda por oxigênio.

O tratamento de efluentes domésticos ou industriais por ozônio ou um oxidante similar é usualmente conduzido em colunas de borbulhamento ou reatores mecanicamente agitados. Assim, a eficiência no tratamento de efluentes por sistemas de ozônio depende da cinética da reação do ozônio com os compostos químicos e da taxa de transferência de massa da fase gás para a fase líquida. O conhecimento dos parâmetros cinéticos da reação entre ozônio e os corantes-azo em solução é essencial para o projeto do sistema de tratamento do efluente.

No estudo realizado por Alaton (2003), foi demonstrado que a ozonização de um corante reativo, realizada em pH neutro, foi efetiva, oxidando parcialmente e descolorindo completamente o efluente, mesmo com corante presente em concentrações relativamente altas.

Wang, *et al.*, (2003) verificaram que a ozonização foi um processo efetivo na degradação do corante azo Remazol Black 5, mostrando-se muito eficiente na remoção de cor e pouco eficiente na remoção de matéria orgânica, atingindo redução de DQO e COT de aproximadamente 40% e 25%, respectivamente.

Koch, *et al.*, (2002) investigaram a ozonização do Reativo Yellow 84, um corante azo utilizado no processamento têxtil, e verificaram que após a ozonização a redução do COT foi de aproximadamente 70%, a DQO foi reduzida de 50% do seu valor inicial, e a relação DBO₅/DQO aumentou de 0,01 para 0,8, indicando que houve um aumento significativo da biodegradabilidade do efluente.

Neamtu, *et al.*, (2004) verificaram que na ozonização do corante dispersivo Red 354 houve descoloração de 29,3% após 30 min para concentrações de ozônio de 8,2 mg.L⁻¹. As remoções de DQO e COT foram de 14,19% e 29,30%, respectivamente. Esses resultados revelaram que a ozonização foi pouco efetiva para esse tipo de corante.

Perkins, *et al.*, 1980 verificaram descoloração por ozonização para quatro diferentes classes de corantes: direto, reativo, ácido e disperso. A taxa de descoloração para os corantes ácido, direto e reativo foi muito rápida, para o corante disperso foi mais lenta. Foram realizados experimentos em três diferentes faixas de pH (4,0; 7,0 e 10,0) para o corante disperso e a taxa de decoloração foi alterada com a mudança de pH no sistema.

Os efluentes têxteis contêm uma quantidade considerável de substâncias com baixa biodegradabilidade, como os aditivos, detergentes, surfactantes e corantes (Alinsafi, *et al.*, 2006). Várias pesquisas com corantes azo mostraram que o processo de ozonização é uma técnica viável e promove aumento da biodegradabilidade do efluente.

II. 10 - SOLUBILIDADE DO OZÔNIO EM ÁGUA

II. 10.1. Lei do equilíbrio entre fases

Da termodinâmica sabe-se que duas fases de um sistema estão em equilíbrio quando cada componente apresenta a mesma fugacidade em ambas as fases. Na fase gasosa, a fugacidade do ozônio pode ser expressa segundo a Equação II.7., onde $\Phi_{O_3(T,P,y)}^G$ é o coeficiente de fugacidade.

De acordo com as condições empregadas, pressão moderada, temperatura superior à temperatura crítica, pode-se considerar que a fase gasosa se comporta como um gás perfeito, portanto, o coeficiente de fugacidade é igual a 1 (Foussard e Debellefontaine, 2000).

$$f_{O_3(T,P,y)}^G = y_{O_3} P \Phi_{O_3(T,P,y)}^G$$

II.7

$f_{O_3(T,P,y)}^G$: fugacidade do ozônio na fase gasosa (Pa)

y_{O_3} : fração molar do ozônio na fase gasosa

$\Phi_{O_3(T,P,y)}^G$: coeficiente de fugacidade do ozônio na fase gasosa

P: pressão total (Pa)

Na fase líquida, a fugacidade pode ser expressa de acordo com o estado de referência. Para gases dissolvidos em água, segundo a Equação II.8, onde $H_{O_3,água}$ é a constante de Henry e γ_{O_3} é o coeficiente de atividade do ozônio. Seu valor depende essencialmente da composição da fase líquida e $\gamma_{O_3}=1$ em água pura. A condição de equilíbrio do ozônio na água se expressa pela igualdade das fugacidades, em condições de temperatura e pressão referentes à água, a Equação II.10 traduz este equilíbrio.

$$f_{O_3(T,P,x)}^L = x_{O_3} \gamma_{O_3} H_{O_3,água} \quad \text{II.8}$$

onde:

$f_{O_3(T,P,x)}^L$: fugacidade do ozônio na fase líquida (Pa)

x_{O_3} : fração molar do ozônio na fase líquida

$H_{O_3,água}$: constante de Henry para solubilidade do ozônio na água (Pa)

$$y_{O_3} P = x_{O_3} \gamma_{O_3} H_{O_3,água} \quad \text{II.9}$$

II. 10.2 Expressão dos resultados de solubilidade

A solubilidade do ozônio na água pode ser expressa de várias maneiras, não só através da constante de Henry ($H_{O_3,água}$), como também através de outras diferentes grandezas :

O coeficiente de Busen (CB), corresponde ao volume de gás (à 0°C e 1 atm) dissolvido em volume d'água quando a pressão parcial do gás é igual a 1atm; A solubilidade S, expressa em $g.m^{-3}$, corresponde à concentração de saturação do ozônio dissolvido em água em equilíbrio com uma pressão parcial de 1 atm; O coeficiente de

divisão (m) – solubilidade proporcional– é igual à relação de equilíbrio, entre a concentração de ozônio dissolvido e a sua concentração na fase gasosa. Essas expressões de solubilidade são expressas na mesma unidade da pressão de trabalho e geralmente em mg.L^{-1} . A constante de Henry ($H'_{\text{O}_3,\text{água}}$) é expressa em $\text{Pa.m}^3.\text{mol}^{-1}$ – definida pela Equação $y_{\text{O}_3} P = [\text{O}_3,\text{água}] H'_{\text{O}_3,\text{água}}$ onde a concentração de ozônio dissolvido em equilíbrio substitui a fração molar.

Toda reação de decomposição de ozônio na fase aquosa, ajuda a aumentar a taxa de transferência de ozônio, mas não influencia na concentração de O_3 em equilíbrio. Segundo Foussard e Debellefontaine (2000), pode ser observada baixa concentração para alta taxa de decomposição em pH elevado, neste caso a concentração medida não é a de equilíbrio.

Foussard e Debellefontaine (2000) a fim de mostrar a relação entre os quatro parâmetros para exprimir a solubilidade, calcularam os valores através do coeficiente de Bunsen fornecido por Horvath, *et al.*, (1985), para o ozônio em água pura a diferentes temperaturas (0 a 60°C), como mostra a Tabela II.10.

Tabela II.10 Coeficientes de solubilidade de ozônio.

Temperatura $^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60
CB ($\text{m}^3 \text{O}_3/\text{m}^3 \text{água}$)	0,526	0,408	0,321	0,258	0,210	0,172	0,143
$m = [\text{O}_3,\text{água}]/[\text{O}_3,\text{gas}]$	0,526	0,423	0,344	0,286	0,241	0,203	0,174
S (g.m^{-3}) para $P_{\text{O}_3} = 1\text{atm}$	1126	874	687	553	450	368	306
$H'_{\text{O}_3,\text{água}}(\text{Pa.m}^3.\text{mol}^{-1})$	4317	5567	7075	8802	10810	13200	15880
$H_{\text{O}_3,\text{água}}(\text{Pa}/\text{fração molar})$	$2,40 \cdot 10^8$	$3,09 \cdot 10^8$	$3,92 \cdot 10^8$	$4,87 \cdot 10^8$	$5,96 \cdot 10^8$	$7,31 \cdot 10^8$	$8,67 \cdot 10^8$

II. 10.3 Fatores que afetam a solubilidade dos gases na fase aquosa

II. 10.3.1 Influência de outras moléculas

A presença de outras moléculas no meio aquoso pode contribuir na modificação do estado de referência e pode ser expressa por um coeficiente de atividade γ_{O_3} diferente de 1. Quando superior a 1, significa diminuição da solubilidade do ozônio. A presença destas moléculas na solução, torna o ozônio menos solúvel. Portanto, quando existe a presença de outras moléculas em solução, o valor de γ_{O_3} vai depender da natureza dessas moléculas e

pode ser calculado utilizando a Equação II.10. Este tipo de equação foi proposto por Schumpe (1993) e Himmelblau (1960) que verificou a contribuição de diferentes gases e diversos íons. No caso do ozônio, calcula-se somente γ_{O_3} para as soluções com salinidade superior à 5 g.L^{-1} , para as quais os coeficientes de atividades são considerados diferentes de 1. Para águas que apresentam sais em baixa quantidade, como as águas minerais, o coeficiente de atividade não excede o valor de 1,02.

$$\log \gamma_{O_3} = \sum (h_i + h_g) C_i \quad \text{II.10}$$

h_i : contribuição dos íons de eletrólitos (L.mol^{-1})

h_g : contribuição do gás. Para o ozônio, $h_{O_3} = 0,029 \text{ L.mol}^{-1}$

C_i : concentração dos íons de eletrólitos (mol.L^{-1})

Para não eletrólitos, o aumento é dependente da massa molar da espécie e praticamente independe do tipo de gás e da temperatura. Quando existem eletrólitos presentes, o efeito do sal depende tanto da natureza do gás como do eletrólito, cada íon tem um efeito específico e esse efeito é maior em temperaturas mais baixas (Foussard e Debellefontaine, 2000, Rischbieter, *et al.*, 2000).

De acordo com Delgado (1999), o ozônio é muito solúvel em baixas temperaturas, favorecendo sua transferência em meio aquoso e a sua estabilidade diminui quando o pH aumenta. Os sais alcalinos diminuem a solubidade do ozônio na água e os sais neutros a aumentam. O efeito dos sais pode ser determinado utilizando a Equação II.11.

$$\log \gamma = h.I \quad \text{II.11}$$

$I = 0,5 \sum C_i \cdot z_i^2$, a força iônica do meio, C_i é a concentração (kmol.m^{-3}) do íon i de carga z_i .

$h = i_g + i^+ + i^-$, o termo h é a contribuição de três elementos (gás, cátion e ânion).

Os últimos dois termos podem ser considerados independentes da temperatura e a influência se dá pelo termo i_g . A Tabela II.11 mostra a contribuição de alguns íons e gases.

Tabela II.11 Contribuição de vários íons e gases segundo Danckwerts, 1970.

Íon i^+	Íon i^-	Gases I_g
H^+ 0,000	OH^-	O_2 (15°C) 0,034
Na^+ 0,091	Cl^-	O_2 (25°C) 0,022
Mg^{2+} 0,051	SO_4^{2-}	O_3 (20°C) 0,096
Ca^{2+} 0,053	CO_3^{2-}	

A dissociação do ozônio na água pode ser obtida pela lei de Henry (equação II.12). Portanto, a concentração a saturação de gás dissolvido, considerado ideal, é proporcional à pressão parcial do gás.

$$P = H \cdot x \quad \text{II.12}$$

II. 10.3.2 Influência do pH

A alcalinidade é um parâmetro determinante em reações químicas que envolvem ozônio. Portanto, é indispensável medir essa grandeza e avaliar seu impacto na solubilidade do ozônio. Roth e Sullivan (1981) sugeriram o modelo apresentado na Equação II.13 que relaciona a constante de Henry aparente com o pH e a temperatura. Este modelo prevê que a solubilidade do ozônio diminui quando o pH aumenta.

$$H_{\text{aparente}} = \gamma_{O_3} \cdot H_{O_3, \text{água}} = 3,89 \cdot 10^{12} \cdot [OH^-]^{0,035} \cdot \exp(-2428/T) \quad \text{II.13}$$

Estudos anteriores realizados por Augugliaro et Rizzuti (1978) (In:López,2004) asseguram que a solubilidade do ozônio em água independe do pH. Esses autores obtiveram um coeficiente de divisão (**m**) constante e igual 0,45, à 10°C, para uma faixa de pH entre 1,75 e 12.

Roth e Sullivan (1981) verificaram que a concentração de ozônio dissolvido no líquido em contato com um gás se estabelece no estado estacionário e não no estado de equilíbrio. No entanto, a decomposição do ozônio dissolvido é inevitável e tanto mais rápida maior o pH. Portanto, a concentração de ozônio medida é sistematicamente inferior à concentração de equilíbrio, sobretudo em pH elevado.

II. 10.3.3 Influência da Temperatura

De acordo com os resultados de vários trabalhos publicados na literatura, apresentados na Tabela II.12, existem diferentes valores para o coeficiente de divisão (**m**) para temperaturas compreendidas entre 0 e 30 °C. A decomposição do ozônio na água foi o fator responsável pela variação entre os resultados encontrados. Na realidade, o equilíbrio físico entre as fases gasosa e líquida não pode jamais ser atingido e a solubilidade só pode ser obtida por medidas indiretas e, portanto, o método experimental utilizado afeta o resultado medido.

Segundo Delgado (1999), o coeficiente de divisão depende somente da temperatura e pode ser obtido pela Equação II.14.

$$\ln(m) = 13,95 - 0,0528.T \quad \text{II.14}$$

Diante dos resultados apresentados na literatura, parece ser preferível efetuar determinações sistemáticas da solubilidade nas condições experimentais próximas daquelas que serão aplicadas num dado processo de oxidação (Clever, 1983).

Tabela II.12 Valores de m em função da temperatura (Foussard e Debellefontaine, 2000).

Temperatura (°C)	0	10	20	30
Perry e Chilton (1973)	0,641	0,520	0,354	0,23
Horvath <i>et al.</i> (1985)	0,526	0,423	0,344	0,286
Masschelein (1991)	0,64	0,39	0,24	0,15
Caprio <i>et al.</i> (1982)	0,54	0,37	0,25	0,18
Roth e Sullivan, pH=7	0,413	0,313	0,241	0,189

Sullivan e Roth (1979) encontraram muita discrepância entre os dados existentes na literatura em relação à ordem da cinética de decomposição do ozônio e das constantes de reação específicas. Vários autores concordam que as variáveis pH e temperatura afetam a taxa de decomposição.

II.11 - TRANSFERÊNCIA DE MASSA EM REATORES GÁS-LÍQUIDO

II.11.1 Absorção Física sem Reação Química

Quando em um sistema de reação, a fase gasosa rica em solução A e uma fase líquida, pobre em A, entram em contato, o composto A se difunde espontaneamente através da interface gás-líquido. O fluxo transferido pode ser modelado pela lei da difusão molecular de Fick. Considerando que um dos principais fatores que afeta a transferência de massa é a resistência que se situa na região próxima da interface, diversas teorias foram propostas para quantificar essa transferência. A teoria mais utilizada, por conta de sua simplicidade, foi desenvolvida por Lewis e Whitman em 1993. Sua formulação matemática é relativamente simples e as suas previsões são sempre próximas destas formadas por modelos mais sofisticados, como os de renovação de superfície (Sotelo, *et al.*, 1991, Roizard, *et al.*, 1997, Beltrán, 2004).

II.11.2 Modelo do filme

A teoria proposta por Lewis e Whitman de 1924 é baseada na existência de dois filmes, um para cada fase. Conforme ilustrado na Figura II.11, a concentração permaneceu uniforme no seio do líquido e do gás, sob agitação turbulenta. A espécie dissolvida é transportada na camada de espessura δ_L , e a concentração do gás dissolvido (ozônio), decresce de $[O_3]_L^i$ na interface até $[O_3]_L$ na borda do filme, ou ainda, no seio do líquido. Na fase gasosa, a pressão parcial da espécie, no filme de espessura δ_G , varia de P_{O_3} no seio do gás até $P_{O_3}^i$ na interface. Em fim, o equilíbrio termodinâmico na interface é representado pela lei de Henry ($P_{O_3}^i = H' \cdot [O_3]^i$). Os valores dos coeficientes de transferência nos filmes líquido e gasoso (k_L e k_G) dependem das condições hidrodinâmicas do sistema gás/líquido, incluindo geometria e propriedades físicas do meio (Beltrán, 2004).

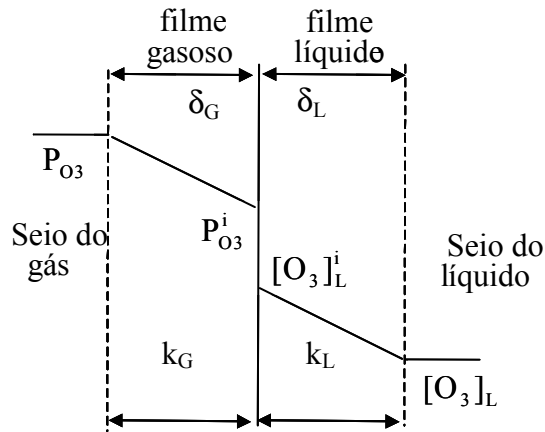


Figura II.11 : Modelo clássico de duplo filme de Lewis e Whitman (1923).

P_{O_3} : pressão parcial de ozônio na fase gasosa (Pa)

$[O_3]_L$: concentração de ozônio no seio da fase líquida (mol.m^{-3})

$P_{O_3}^i$: pressão parcial de ozônio na interface gás/líquido (Pa)

$[O_3]_L^i$: concentração de ozônio na interface gás/líquido (mol.m^{-3})

δ_G, δ_L : espessura dos filmes gasoso e líquido (m)

k_L, k_G : coeficiente de transferência do filme na lado líquido (m.s^{-1}) e gás ($\text{mol.m}^{-2}.\text{Pa}^{-1}.\text{s}^{-1}$)

Equações

Em regime permanente, a integração da lei de Fick entre os limites do filme, sob certas condições, expressa a taxa de ozônio transferido. Essa taxa está apresentada na Equação II.15, onde S representa a superfície de troca gás/líquido. Esta equação permite expressar o coeficiente do filme do lado líquido k_L , definido na Equação II.16. Para a fase gasosa, a representação da taxa de transferência é feita de modo análogo, pela Equação II.17. Nestas equações, $D_{O_3,G}$ e $D_{O_3,L}$ representam os coeficientes de difusão molecular de ozônio, tanto para fase gás como para fase líquida.

$$\overline{N_{O_3}} = \frac{D_{O_3,L}}{\delta_L} ([O_3]_L^i - [O_3]_L) S = k_L ([O_3]_L^i - [O_3]_L) S \quad \text{II.15}$$

$$k_L = \frac{D_{O_3,L}}{\delta_L} \quad \text{II.16}$$

$$\overline{N}_{O_3} = \frac{1}{RT} \frac{D_{O_3,G}}{\delta_G} (P_{O_3} - P_{O_3}^i) S = k_G (P_{O_3} - P_{O_3}^i) S \quad \text{II.17}$$

De modo geral, não é possível determinar experimentalmente as concentrações na interface. Em decorrência, definem-se os coeficientes de transferência global K_L e K_G em função das concentrações que podem ser medidas experimentalmente. Assim, as taxas de transferência são expressas pelas Equações II.18 e II.19.

$$\overline{N}_{O_3} = K_L ([O_3]_L^* - [O_3]_L) S \quad \text{II.18}$$

$$\overline{N}_{O_3} = K_G (P_{O_3} - P_{O_3}^*) S \quad \text{II.19}$$

K_L, K_G : coeficientes globais de transferência na fase líquida ($m \cdot s^{-1}$) e gasosa ($mol \cdot m^{-2} \cdot Pa^{-1} \cdot s^{-1}$)

$P_{O_3}^*$: pressão parcial de ozônio no gás em equilíbrio : $P_{O_3}^* = H' [O_3]_L$

$[O_3]_L^*$: concentração de ozônio no líquido em equilíbrio com o gás :

$$[O_3]_L^* = \frac{P_{O_3}}{H'} = m [O_3]_G$$

A combinação das equações de transferência anteriormente descritas, para a fase gás e para a fase líquida, permite expressar K_L e K_G , respectivamente, em função das três grandezas k_L, k_G e H' na equação (II.20)

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{H'}{k_L} \quad \text{e} \quad \frac{1}{K_L} = \frac{1}{k_L} + \frac{1}{H' k_G} \quad \text{II.20}$$

Com base nos valores da constante de Henry, ozônio, nitrogênio e oxigênio são considerados fracamente solúveis no líquido. Assim, a resistência à transferência está localizada no filme líquido, sendo a resistência à transferência no gás negligenciável. Na equação (II.20), o produto $H' k_G$ é muito maior do que à k_L , e portanto, $K_L \approx k_L$. Como consequência, a equação (II.18) pode ser reformulada na equação (II.21).

$$\overline{N}_{O_3} = k_L ([O_3]_L^* - [O_3]_L) S \quad \text{II.21}$$

A determinação da superfície específica de troca é difícil de ser feito, razão pela qual, geralmente, se introduz na equação de transferência a área interfacial por unidade de volume, definida por $a = \frac{S}{V}$. Obtendo-se assim, a expressão do fluxo de oxigênio transferido, segundo a equação (II.22).

$$\overline{N}_{O_3} = k_L a V ([O_3]_L^* - [O_3]_L) \quad \text{II.22}$$

A diferença entre resultados experimentais e os previstos pelo modelo de filme duplo (Lewis e Whitman) levou à proposta de outros modelos, hoje clássicos, como o da “teoria da penetração” de Higbie (1935) e o da “teoria da renovação de superfície”, de Danckwerts (1951). Higbie considera o tempo de contato entre as fases no seu modelo, considerando-o curto na maioria das aplicações. Danckwerts propôs uma distribuição de tempo de contato, função da taxa de renovação superficial.

Todos esses modelos evidenciam que K_L depende de uma propriedade material de transporte; a difusividade e das condições hidrodinâmicas que asseguram o contato entre as fases líquida e gasosa; tais como: espessura do filme (Lewis e Whitman), tempo de contato e taxa de renovação superficial (Danckwerts). Essas grandezas são de difícil determinação experimental, recorre-se então a relações empíricas específicas para o sistema em estudo.

II.11.3 Absorção física com reação química

Quando o ozônio gasoso transferido reage com os compostos orgânicos presentes na fase líquida, os perfis de concentração na interface podem ser modificados assim como as condições de transferência. Assim, a absorção seguida de reação química pode ocorrer aumento da transferência, que é, em geral, expresso por um fator de aceleração (enhancement factor), designado pela letra E.

O fator E é conceituado com o quociente entre as taxas de massa transferidas na ocorrência e na ausência de reação química. Pode-se re-escrever as equações II.20, na seguinte forma:

$$1/K_L = (1/Ek_L) + (1/H'k_G) \quad \text{II.23}$$

$$1/K_G = (1/k_G) + (H'/E.k_L) \quad \text{II.24}$$

Se um composto gasoso como o ozônio (A) for transferido para uma fase líquida, onde reage com um composto B, pode-se supor que a taxa de reação (consumo de A) seja expressa pela equação abaixo:

$$r_A = kC_A \cdot C_B \quad \text{II.25}$$

Sendo k a constante de reação e C_A e C_B as concentrações de A (dissolvido) e de B (na fase líquida), respectivamente.

Tendo-se em conta o modelo de duplo filme, a reação pode ocorrer i) no seio do líquido ii) parcialmente no seio do líquido e no interior do filme iii) no filme líquido (inteiramente) iv) na interface gás-líquido.

Um parâmetro adimensional, o número Hatta (Ha) fornece informação sobre a competição entre a taxa de reação e a taxa de transferência de massa no interior do filme e indica onde a reação química pode ocorrer.

Para a situação anteriormente descrita o número Hatta pode ser definido da seguinte maneira:

$$Ha = (kC_{BS}D_{AL})^{0.5}/k_L \quad \text{II.26}$$

Sendo C_{BS} a concentração de B no seio do líquido e D_{AL} o coeficiente de difusão de A na fase líquida.

No caso particular de reação de 1ª. ordem ou de pseudo-primeira ordem, quando ($C_B \gg C_A$), podem ser obtidas soluções que indiquem a predominância ou não da taxa de reação química sobre a taxa de transferência e o local de ocorrência da reação.

Nesses casos tem-se:

$$r_A = k_1 C_A \quad \text{II.27}$$

O número de Hatta fica expresso como:

$$Ha = (k_1 \cdot D_{AL})^{0.5}/k_L \quad \text{II.28}$$

Pode-se definir um outro parâmetro adimensional, que relaciona as concentrações de A no seio do líquido (C_A) e na interface (C_{Ai}):

$$f = C_A/C_{A_i}$$

II.29

Com base nas definições anteriores é possível se chegar a um outro parâmetro adimensional (M), conforme apresentado por Roustan (2003), de modo que:

$$M = M(Ha, f)$$

II.30

Assim, em função dos valores assumidos por Ha, E e M, pode-se obter as informações almejadas. Por exemplo, se $Ha < 0,3$ verifica-se que a reação química não acelera a transferência de massa ($E=1$). Com $M=1$ conclui-se que a reação ocorre inteiramente no seio do líquido. Para $0,3 < Ha < 3$ o efeito da reação começa a se pronunciar e uma parte da reação ocorre no interior do filme líquido. Para $Ha > 3$, o termo M se anula, o que significa que a reação ocorre inteiramente no interior do filme líquido e o valor de E torna-se igual ao valor de Hatta.

Para reações de segunda ordem encontra-se na literatura solução analítica aproximada do problema, proposta por Van Krevelen e Hoftijzer (1948), na forma de equação implícita ou de ábaco.

A Tabela (II.13) indica as características dos diversos regimes em sistemas com reação e transferência de massa simultâneas.

Tabela II.13 Características dos diversos regimes de reação e transferência de massa.

Ha	Características
$<0,3$	Reação muito lenta, ocorrendo inteiramente no seio do líquido.
$0,3 < Ha < 3$	Reação moderadamente rápida, que ocorre em parte no filme e em parte no seio líquido.
$Ha > 3$	Reação rápida que ocorre inteiramente no filme. $E > 1$.
$Ha \gg 3$	Reação instantânea, que ocorre num plano no interior do filme. Com aumento de Ha pode ocorrer na própria interface gás-líquido e, nesse caso a resistência à transferência se situa no filme gasoso.

Fonte: adaptado de Roustan (2003).

II.12 COMENTÁRIOS FINAIS

Do que foi visto da literatura depreende-se primeiro a relevância do setor têxtil e os impactos decorrentes de suas atividades industriais. Em especial, as operações de tingimento e outras associadas geram grandes volumes de efluentes contaminados com corantes em altas concentrações. Observou-se nesta revisão, que os corantes são substâncias que apresentam recalcitrância, sendo apenas parcialmente removidos nos processos convencionais de tratamento biológico de efluentes. Os corantes do grupo azo, em especial, apresentam um desafio adicional, pois, quando degradados geram produtos potencialmente tóxicos e carcinogênicos. Assim, novas técnicas de tratamento devem ser investigadas com o objetivo de remover, de modo seguro, tais poluentes.

A questão da salinidade dos efluentes têxteis merece atenção particular, em função das dificuldades que esta característica coloca para os processos de tratamento.

Capítulo III

III - Materiais e Métodos

Este capítulo descreve os procedimentos experimentais e os métodos analíticos que foram utilizados ao longo deste trabalho.

III.1 PLANTA PILOTO DE OZONIZAÇÃO

Os experimentos de ozonização foram realizados em uma planta piloto montada no G.P.E./INSA-Toulouse/França, como indicado na Figura III.1. Ela é composta de: gerador de ozônio, unidades de monitoramento das concentrações de ozônio na fase gás e na fase líquida, unidade de destruição de ozônio, coluna de borbulhamento e dispositivos de controle como regulador de pH e de temperatura. A fim de evitar qualquer problema de interferência devido à reação química do ozônio com o material que compõe as conexões, juntas, tubos e elementos em contato com ozônio são em aço inoxidável. Inclusive as diversas válvulas, que são do tipo membrana metálica.

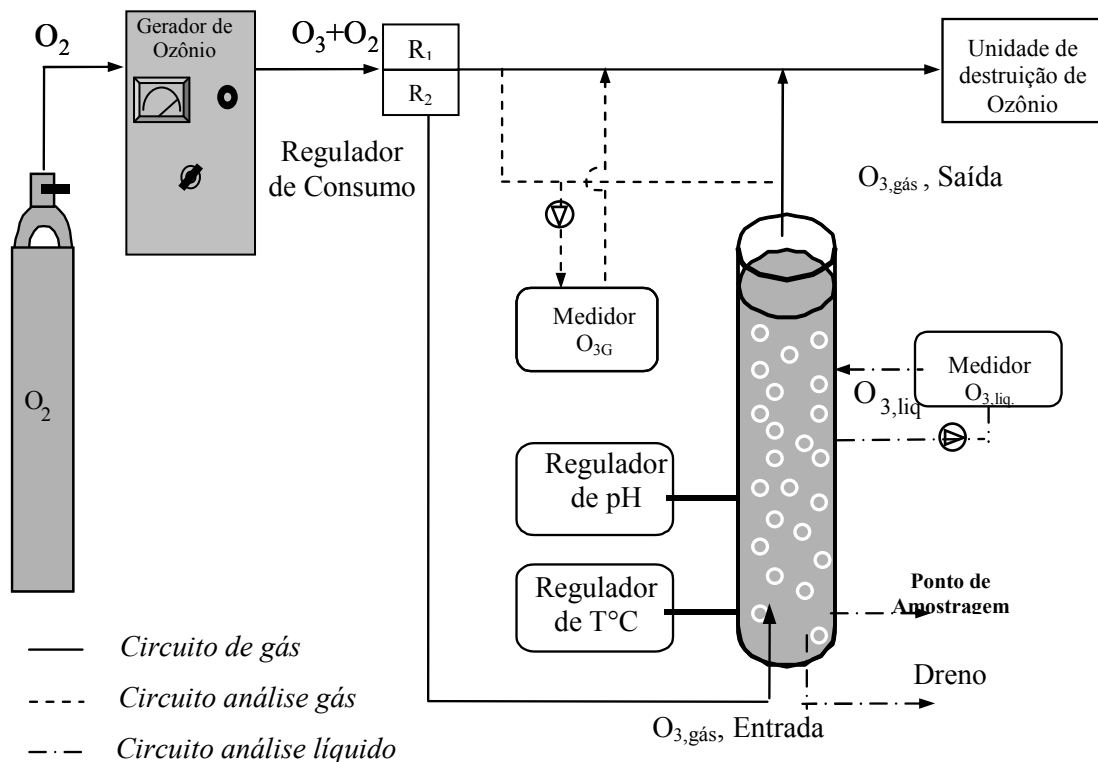


Figura III.1. Diagrama esquemático da planta experimental.

III.1.1 Gerador de Ozônio

O gerador de ozônio usado foi da marca Trailgaz Labo, modelo LOX-SP, alimentado com oxigênio puro. Este gerador de laboratório tem capacidade de produção de $16 \text{ g O}_3 \cdot \text{h}^{-1}$ para concentração de 5% (m/m), ou de $20 \text{ g O}_3 \cdot \text{h}^{-1}$ para concentração de 1% (m/m). A vazão nominal de alimentação pode variar de 5 à $20 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. Este gerador permite atingir concentração de ozônio de até $40 \text{ g O}_3 \cdot \text{m}^{-3}$.

III.1.2 Analisador de Ozônio na Fase Líquida

O analisador de ozônio da marca Orbisphere, modelo 3600/3xx, utiliza uma sonda polarográfica, modelo 31330.15.0, composta de uma membrana, modelo 2956A com espessura de $25 \mu\text{m}$.

Esta sonda tem um tempo de resposta de 30 segundos e a gama de valores medida pela sonda varia entre 0,01 e $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, com precisão de $\pm 1\%$. O líquido, acionado por

uma bomba, irriga a membrana com vazão 100 L.h^{-1} . O analisador Orbisphere permite também acompanhar a variação de temperatura ao longo de todo o experimento.

III.1.3 Analisador de Ozônio na Fase Gasosa

O dispositivo experimental comporta um analisador BMT 964, com lâmpada UV, que permite medir a concentração gasosa de ozônio na entrada e na saída da coluna. Este aparelho mede a concentração de ozônio de 2 a $400 \text{ g.N}^{-1} \text{ m}^{-3}$, com tempo de resposta quase imediato e variação de $\pm 0,1 \text{ mg.L}^{-1}$.

III.1.4 Coluna de Borbulhamento

O reator de ozonização utilizado neste estudo é uma coluna de borbulhamento de PVC transparente. O ozônio é distribuído por um disco poroso, com diâmetro ligeiramente menor do que o da coluna. Situado no fundo da coluna, o distribuidor gerava bolhas de 3 a 5 mm de diâmetro. As características geométricas e de funcionamento da coluna estão apresentadas na Tabela III.1.

Tabela III.1 : Principais características da coluna de ozonização

Parâmetros	Valor
Diâmetro (d_c)	0,15 m
Altura total (H)	0,57 m
Volume total (V_T)	10,0 L
Volume útil (V_U)	8,5 L
Vazão do gás (G)	0 à 400 L.h^{-1}
Ozônio na entrada ($[\text{O}_3]_{G,e}$)	0 à 35 mg.L^{-1}
Modo de operação	Descontínuo e Contínuo

III.1.5 Dispositivos de Controle

Um dispositivo regulador de pH modelo Hanna pH 500/mV série 600 é acoplado à coluna. Este regulador é composto de um pHmetro comandado por duas bombas

peristálticas que adicionam ácido ou base necessários durante a operação. Este dispositivo permite manter o pH constante ($\pm 0,1$ pH).

A coluna é igualmente munida de um sistema de regulação de temperatura, com um termostato de circulação associado à uma serpentina imersa na coluna, permitindo manter a temperatura constante ($\pm 0,2^{\circ}\text{C}$) ao longo de todo o ensaio.

III.1.6 Ensaio de Ozonização

A coluna foi sempre operada com um volume de líquido de 8,5 L. A concentração de corante, para todas as amostras ozonizadas, foi de 1.10^{-4} mol.L⁻¹. Quando t-butanol foi utilizado nos experimentos, como capturador de radicais hidroxila, a concentração molar dessa substância foi igual a dez vezes a do corante. Para investigar o efeito da salinidade do meio, quatro concentrações de NaCl foram testadas: 0, 1, 40 e 100 g.L⁻¹.

A vazão de gás foi fixada em 200 L.h⁻¹ e a concentração de ozônio no gás de alimentação variaram entre 12, 30 e 35 mg.L⁻¹, com base em trabalho anterior (López, 2004). Os ensaios foram realizados em pH= 5, 7,5 e 9. O pH foi ajustado e mantido durante os ensaios através da adição de soluções de H₂SO₄ (0,5 M) e KOH (1 M).

Durante um ensaio típico de ozonização, amostras eram coletadas periodicamente para medidas “off line” dos parâmetros de interesse. As concentrações de ozônio na fase gasosa e líquida eram monitoradas em linha. A Tabela III.2 apresenta o conjunto de ensaios realizados neste trabalho.

A **Tabela III.2** ilustra o conjunto de ensaios de ozonização realizados neste trabalho.

	Concentração de NaCl (g.L ⁻¹)			
	0	1	40	100
pH 5	<i>Orange II</i>	<i>Orange II</i>	<i>Orange II</i>	<i>Orange II</i>
	<i>t-butanol</i>	-	<i>t-butanol</i>	-
	<i>Acid Red 27</i>	<i>Acid Red 27</i>	<i>Acid Red 27</i>	<i>Acid Red 27</i>
pH 7,5	<i>Orange II</i>	<i>Orange II</i>	<i>Orange II</i>	<i>Orange II</i>
	<i>t-butanol</i>	-	<i>t-butanol</i>	-
pH 9	<i>Orange II</i>	<i>Orange II</i>	<i>Orange II</i>	<i>Orange II</i>

III.2 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS CINÉTICOS E DE TRANSFERÊNCIA

A caracterização do sistema de ozonização foi feita através da realização de diversos ensaios com água destilada, sem emprego dos corantes. As equações características do consumo e da transferência de ozônio em um reator semi-contínuo, isto é, aberto ao gás e fechado ao líquido, são interdependentes e serão apresentadas em detalhe no item III.4. Esses ensaios foram direcionados para se obter os parâmetros característicos do sistema de ozonização empregado neste trabalho, a saber: constante de auto-decomposição do ozônio (k_c), coeficiente de transferência de massa volumétrica (k_{La}) e coeficiente de divisão do ozônio (m). Os fundamentos que permitiram a determinação desses parâmetros também se encontram no item III.4.

III.3 – ESTUDO HIDRODINÂMICO NA COLUNA DE OZONIZAÇÃO

III.3.1 Determinação dos Parâmetros Hidrodinâmicos

Neste estudo, os parâmetros hidrodinâmicos, essencialmente o diâmetro de Sauter d_{32} , retenção gasosa ε_G e área interfacial a , foram utilizados dados existentes na literatura, para as mesmas condições experimentais (López, 2004). A velocidade relativa U_R de nuvem de bolhas relativo ao líquido, foi determinado através de equações matemáticas.

III.3.2 Determinação do diâmetro de Sauter

O estudo realizado para determinação do diâmetro de Sauter, usou um sistema de vídeo com aquisição de imagens das bolhas e um logencial de tratamento automatizado dessas imagens para obter os diâmetros d_i . O dispositivo utilizado para aquisição de imagens era constituído de uma câmara monocromada de dupla velocidade Leutron LV-95, uma carta PicPort Mono H4 e de um logencial Leutron Vision. Para o tratamento das imagens foi utilizado o logencial de tratamento de imagens Visiolog 5.2. Em cada condição experimental estudada, uma população de 150 bolhas foi tratada, permitindo assim, obter uma estimação estatisticamente correta do diâmetro de Sauter (d_{32}). Pode ser calculado a partir da Equação III.1.

$$d_{32} = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2} \quad \text{III.1}$$

d_i : diâmetro da bolha (m)

n_i : número de bolhas de diâmetro d_i

III.3.3 Determinação da retenção gasosa

A retenção gasosa ε_G é um dos parâmetros mais importantes para caracterização hidrodinâmica de uma coluna de borbulhamento. Ela representa o volume total de gás disperso sob forma de bolhas no interior da coluna e eleva a unidade volumétrica do reator.

A medida da retenção gasosa consiste na diferença entre as alturas do líquido no reator antes e após a introdução do gás, pode ser calculada através da Equação III.2. As determinações das alturas do líquido são efetuadas por imagens da zona de interface.

$$\varepsilon_G = \frac{V_G}{V_G + V_L} = 1 - \frac{h_L}{h_{L+G}} \quad \text{III.2}$$

h_L : altura de líquido antes da introdução de gás (m)

h_{L+G} : altura de líquido após da introdução de gás (m)

III.3.4. Determinação da área interfacial

A área interfacial é uma característica importante dos reatores gás-líquido pois representa a superfície de troca entre as duas fases em relação ao volume do reator. As vezes, este parâmetro leva em consideração também as características geométricas do reator, os parâmetros operatórios e as propriedades físico-químicas do líquido. Como a coluna funciona em regime homogêneo, a aproximação entre as bolhas esféricas de tamanho uniforme podem ser admitidas. Conhecendo a retenção gasosa ε_G e a dimensão média das bolhas, pode-se obter uma boa estimativa da área interfacial através da Equação III.3.

$$a = \frac{6 \varepsilon_g}{d_{32}(1 - \varepsilon_g)} \quad \text{III.3}$$

a : área interfacial (m^{-1})

ε : retenção gasosa volumétrica

d_{32} : diâmetro de Sauter (m)

III.4 ESTUDO DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA NA COLUNA DE OZONIZAÇÃO

Na interpretação dos resultados da ozonização de corantes, é indispensável considerar as características da coluna de ozonização do ponto de vista hidrodinâmico. Este estudo engloba a determinação do diâmetro das bolhas, da retenção volumétrica, da área interfacial, da velocidade relativa da nuvem de bolhas em relação ao líquido e do

coeficiente de transferência de massa volumétrico. Os parâmetros de auto decomposição (k_c) e coeficiente de divisão (m) foram determinados simultaneamente aos parâmetros de transferência.

III.4.1 Evolução da Concentração de Ozônio

As variações típicas nas concentrações de ozônio na fase líquida e na fase gasosa, medidas na saída do reator em função do tempo, em um sistema semi-contínuo, podem ser visualizadas na Figura II.10. Pode-se observar que os perfis de evolução das concentrações apresentam duas fases: o regime transitório, no qual as concentrações de ozônio aumentam no decorrer do tempo e o regime estacionário, no qual essas concentrações não variam mais, atingindo-se a estabilização. Nessa condição observa-se que:

$$[O_3]_L \approx [O_3]_L^\infty \text{ e } [O_3]_G \approx [O_3]_G^\infty :$$

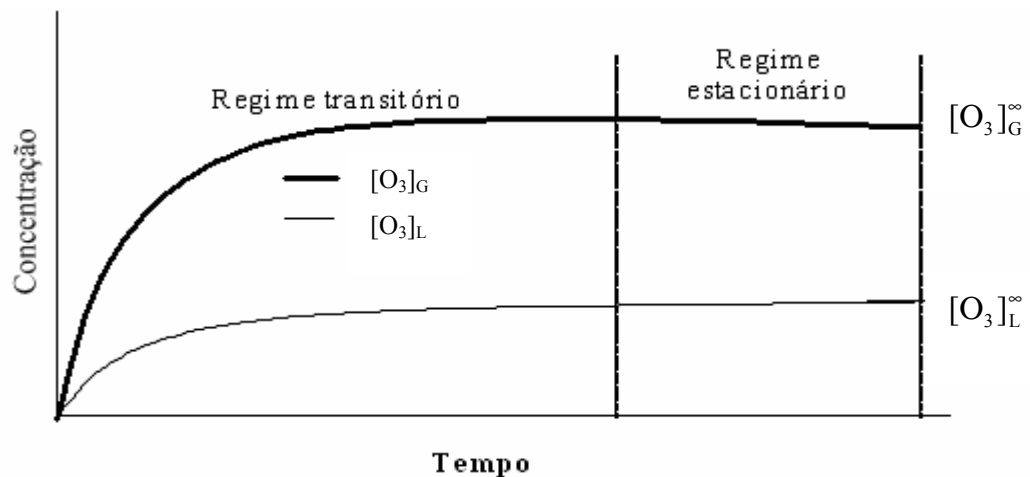


Figura III.2 : Perfis de variação da concentração de ozônio na fase gás (saída) e na fase líquida em um reator semi-batelada, num ensaio típico de ozonização.

III.4.2 Equações Básicas e Parâmetros Relevantes

O balanço de massa para o ozônio para a operação do reator semi-contínuo pode ser representados pelas Equações III.4 e III.5, para as fase gás e na fase líquida respectivamente. Algumas hipóteses foram feitas, a saber:

- a fase líquida é considerada perfeitamente misturada;
- a concentração de ozônio na fase gasosa é considerada única em todo o reator.
- a taxa de consumo de gás é considerada constante ao longo do reator;
- a retenção gasosa no reator é baixa, aproximadamente 1,5%. Nessa condição pode-se considerar o volume do líquido (V_L) como sendo o volume do reator (V).

O balanço de massa para ozônio pode ser escrito como:

$$G [O_3]_{G,e} = G [O_3]_{G,s} + k_L a V ([O_3]_L^* - [O_3]_L) + V_G \frac{d\overline{[O_3]}_G}{dt} \quad \text{III.4}$$

$$k_L a V ([O_3]_L^* - [O_3]_L) = k_c [O_3]_L V_L + V_L \frac{d[O_3]_L}{dt} \quad \text{III.5}$$

No equacionamento anterior, a variável $\overline{[O_3]}_G$ corresponde à concentração média de oxigênio na fase gás e pode ser obtida na Equação (III.6), considerada a média logarítmica entre as concentrações de ozônio na fase gás de entrada e de saída do reator.

$$\overline{[O_3]}_G = \frac{([O_3]_{G,e} - [O_3]_{G,s})}{\ln\left(\frac{[O_3]_{G,e}}{[O_3]_{G,s}}\right)} \quad \text{III.6}$$

III.4.3 Constante de Auto-Decomposição (k_c)

A constante k_c que aparece na Equação (III.5) pode ser determinada a partir de dados do estado estacionário. Neste regime, as concentrações de ozônio na saída do reator são independentes do tempo e iguais a $[O_3]_G^\infty$ e $[O_3]_L^\infty$. Como os últimos termos das

equações (III.4) e (III.5) são nulos nessas condições, das duas equações pode-se obter a Equação (III.7) se for considerada a hipótese de que $V=V_L$.

$$k_C = \frac{G([O_3]_{G,e} - [O_3]_G^\infty)}{[O_3]_L^\infty V_L} \quad \text{III.7}$$

III.4.4 Coeficiente de Transferência de Massa Volumétrico ($k_L a$)

O coeficiente $k_L a$ pode ser determinado em regime transitório e observando-se a elevação do teor de ozônio dissolvido no líquido ao longo do tempo. A Equação (III.5) pode ser reescrita e re-arranjada conforme indicado abaixo.

$$\frac{d[O_3]_L}{dt} = k_L a [O_3]_L^* - (k_L a + k_C) [O_3]_L \quad \text{III.8}$$

A integração da equação acima, tendo como condição inicial ($t = 0, [O_3]_L = 0$) resulta, após algumas manipulações algébricas, na Equação (III.9):

$$[O_3]_L = [O_3]_L^* \frac{k_L a}{(k_L a + k_C)} \{1 - \exp[-(k_L a + k_C)t]\} \quad \text{III.9}$$

Quando o regime estacionário for atingido, ou seja, para tempos elevados ($t \rightarrow \infty$) a Equação (III.10) pode ser escrita como:

$$[O_3]_L^\infty = [O_3]_L^* \frac{k_L a}{(k_L a + k_C)} \quad \text{III.10}$$

Combinando-se as equações (III.9) e (III.10) e re-arranjando resulta:

$$\frac{([O_3]_L - [O_3]_L^\infty)}{[O_3]_L^\infty} = \exp[-(k_L a + k_C)t] \quad \text{III.11}$$

Aplicando-se logaritmo, obtém-se a Equação (III.12):

$$\ln \left[\frac{([O_3]_L - [O_3]_L^\infty)}{[O_3]_L^\infty} \right] = -(k_L a + k_C)t \quad \text{III.12}$$

Representando-se os dados experimentais pertinentes num gráfico (escala monolog), obtém-se o coeficiente angular da reta de melhor ajuste, o valor de $(k_L a + k_c)$. Com o valor de k_c , anteriormente determinado, obtém-se o valor de $k_L a$.

III.4.5 Coeficiente de divisão do Ozônio

A determinação do coeficiente de divisão do ozônio (m) pode ser feita a partir da Equação (III.13). Assim, substituindo $[O_3]_L^\infty$ na Equação (III.10) obtida no regime estacionário, m pode ser escrito segundo as Equações (III.13 e 14).

$$m = \frac{[O_3]_L^*}{[O_3]_G} \quad \text{III.13}$$

$$m = \frac{(k_L a + k_c) [O_3]_L^\infty}{k_L a [O_3]_G^\infty} \quad \text{III.14}$$

Onde: $[O_3]_G^\infty$ é a concentração média de ozônio no gás na condição de estado estacionário.

III.5 OZONIZAÇÃO DOS CORANTES

Neste item estão descritos os corantes investigados e os procedimentos utilizados para a caracterização dos corantes e dos sub-produtos intermediários gerados durante a oxidação com o ozônio.

III.5.1. Estrutura dos Corantes Azóicos

As estruturas das duas moléculas estudadas estão apresentadas Figura III.3: a) Orange II e b) Acid Red 27. O corante Orange II possui um grupo azo $-N=N-$ ligado a um anel benzênico sulfonado e a um anel naftalênico. O corante Acid Red 27 possui um grupo

azo $-N=N-$ ligado a dois anéis naftalênicos sulfonados. Os íons sulfônicos têm a função de permitir a fixação do corante nos tecidos.

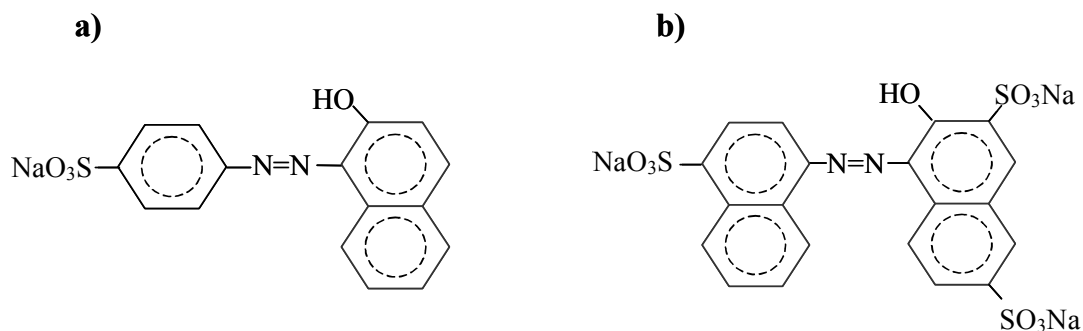


Figura III.3: Estrutura dos corantes a) Orange II e b) Acid Red 27.

As principais características desses corantes estão apresentadas na Tabela III.3.

Tabela III.3 : Algumas características dos corantes azóicos

Corante	M (g.mol ⁻¹)	λ_{\max} (nm)	C.I.	COT (g.mol ⁻¹)
Orange II	350,33	483	15 510	192
Acid Red 27	604,48	520	16 185	240

C.I. : Colour Index

Fonte : López (2004)

III.5.2 Determinação das Concentrações de Diferentes Espécies

O comprimento de onda e a máxima absorção dos corantes Orange II e Acid Red 27 foram verificados a partir dos espectros UV-Visível, para concentração de $1 \cdot 10^{-4}$ mol.L⁻¹ de corante. A Figura III.4 mostra que $\lambda_{\max} = 483$ nm para o corante Orange II e a Figura III.5 mostra que $\lambda_{\max} = 520$ nm para o corante Acid Red 27.

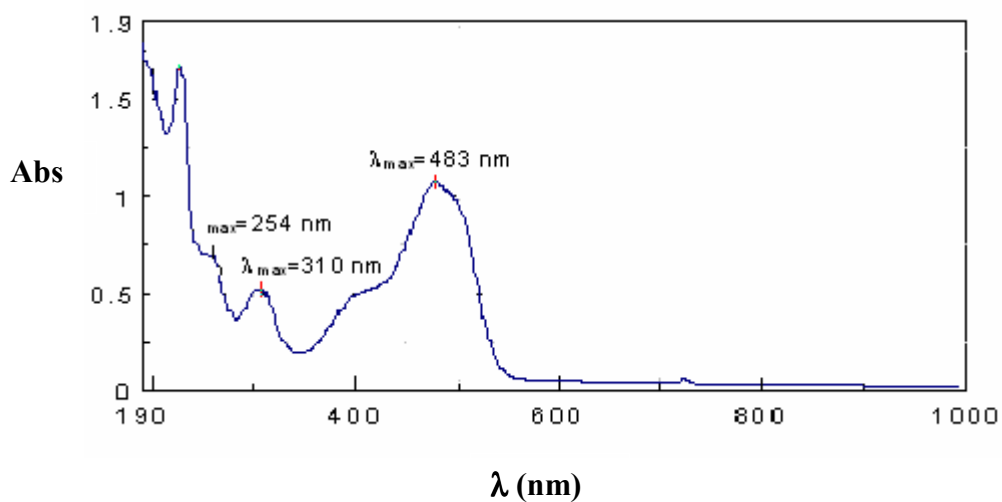


Figura III.4. Espectro UV-Vis para o corante Orange II .

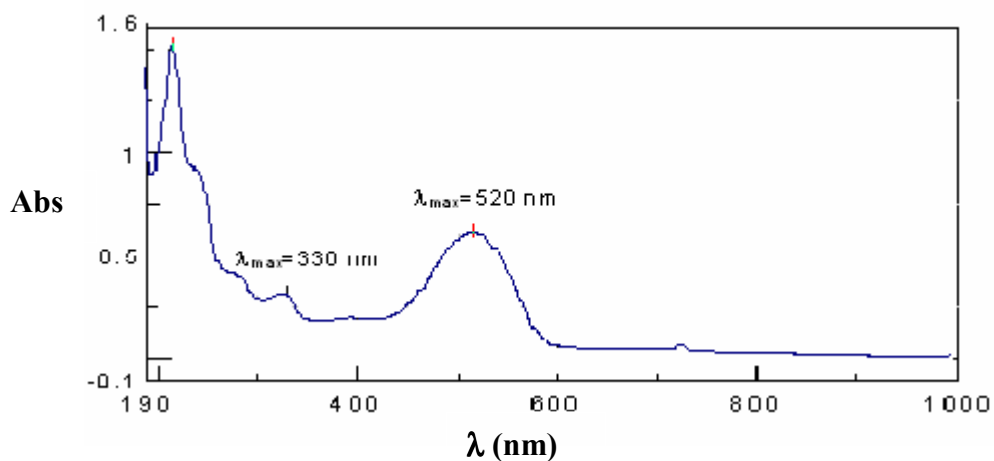


Figura III.5. Espectro UV-Vis para o corante Acid Red 27.

Os espectros apresentados nas Figuras III.4 e III.5 foram obtidos em espectrofotômetro UV-visível, JASCO, modelo V-530, que emprega cubeta de quartzo com comprimento ótico (ℓ) de 1 cm.

As concentrações de corante das amostras coletadas durante os ensaios de ozonização foram determinadas a partir da leitura da absorvância, do valor do comprimento ótico e dos coeficientes de extinção molecular para os dois corantes investigados ($\epsilon = 17570 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ para Orange II e $\epsilon = 23200 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ para Acid Red 27), empregando-se a lei de *Beer-Lambert*.

III.6. METODOLOGIAS ANALÍTICAS

III.6.1 Cor

A redução da cor ao longo do processo de ozonização foi monitorada a partir da medida da absorvância em espectrofotômetro UV-visível, JASCO, modelo V-530.

III.6.2 Carbono Orgânico Total (COT)

Os teores de Carbono Orgânico Total (COT) foram determinados por técnica instrumental, empregando-se um analisador de COT, Dohrmann, modelo DC-80.

O método é baseado na oxidação por persulfato, ativado por raios UV, com formação de CO_2 que é quantificado por um detector infravermelho não dispersivo.

Foram realizados dois modos de injeção:

- ✓ seringa, o volume utilizado foi de 50 μL .
- ✓ forno, o volume de 40 μL foi injetado em de vaso de platina contendo lâ de quartzo, e levado diretamente ao forno.

A injeção ao forno é recomendada para amostras contendo hidrocarbonetos halogenados e alto teor de íons cloretos.

As amostras contendo altas concentrações de NaCl, receberam tratamento prévio, no qual, todo o sal foi precipitado usando nitrato de prata, afim de evitar a interferência de cloretos na determinação de COT.

III.6.3 Espectrofotometria UV

A determinação da absorbância das amostras e a obtenção dos espectros de absorção dos corantes foram realizadas conforme descrito no item III.1.3.

III.6.4 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

As determinações da demanda química de oxigênio foram realizadas segundo o método da norma francesa NFT 90-101, 1988. O procedimento é similar ao do Standard Methods (APHA/AWWA/WEF, 1998).

III.6.5 Cloreto

O teor de cloreto foi determinado pelo método argentométrico 4500-Cl⁻ B. Os resultados foram expressos em teor de NaCl (APHA/AWWA/WEF, 1998).

III.7. RESPIROMETRIA

Os testes de respirometria foram conduzidos em um respirômetro automatizado, modelo SAPROMAT. Este aparelho permite acompanhar a biodegradação dos contaminantes, através da medida do oxigênio consumido durante a biodegradação. Os ensaios respirométricos foram realizados para os corantes Acid Red 27 e Orange II, somente para amostras isentas de NaCl, em pH neutro. As amostras foram incubadas à 20°C em períodos de 15 (Acid Red) e 30 dias (Orange II). As Figuras III.6 e III.7 ilustram o aparato utilizado nos ensaios de respirometria.

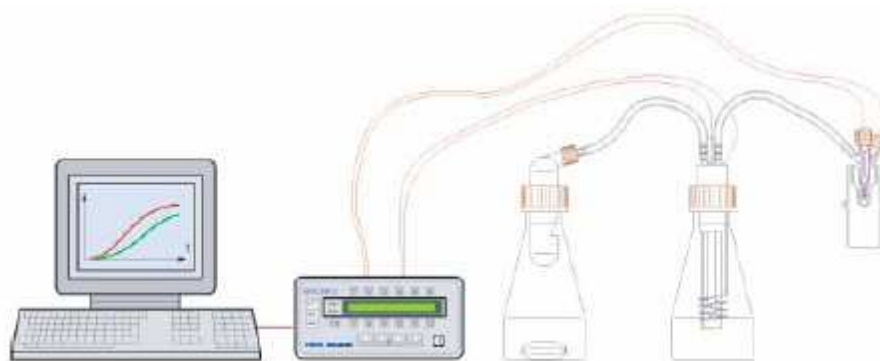


Sapromat (Voith®)



(1) banho-maria (2) frasco medidor de pressão (3) gerador de oxigênio (4) frasco de reação

Figura III.6: Modelo do respirômetro SAPROMAT.



(1) Computador; (2) Unidade de Controle; (3) Vaso de Reação; (4) Gerador de Oxigênio; (5) Medidor de Pressão.

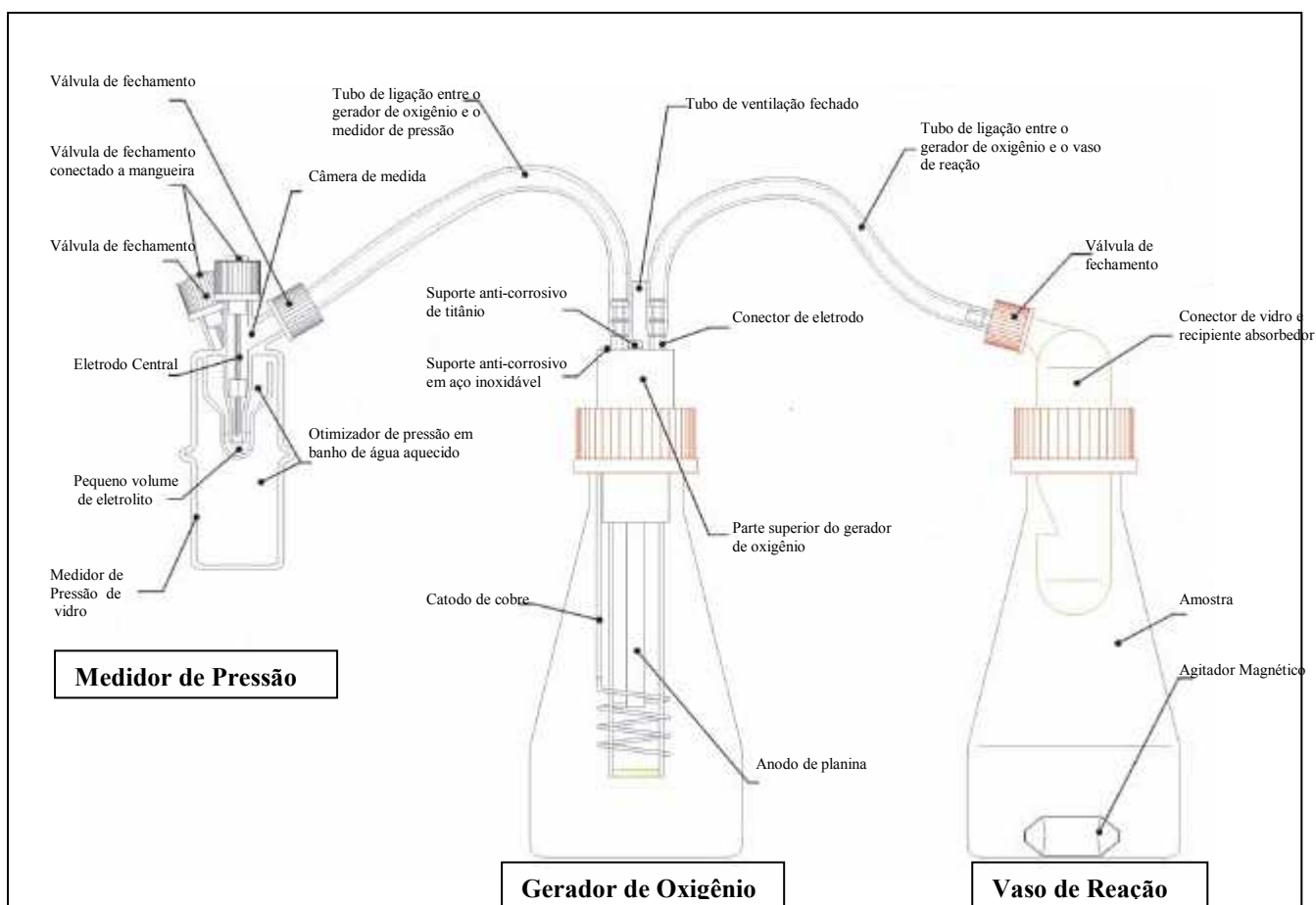
Figura III.7: Componentes do respirômetro SAPROMAT.

III.7.1 Ensaio de Respirometria

Os ensaios respirométricos foram realizados em um dispositivo automatizado, modelo SAPROMAT. Este aparelho é constituído com um vaso de reação, capacidade de 500 mL de amostra, encaixado em um banho maria com lugar disponível para 12 unidades, o aquecimento é mantido a temperatura constante (20°C). A medição é realizada através do vaso de reação, com a adsorção de CO₂ integrado ao acessório de vidro, um gerador de

oxigênio e um medidor de pressão. A homogeneização é garantida por um agitador magnético. Os componentes deste aparelho estão apresentados na Figura III.8.

Neste ensaio ocorre a reação biológica, onde os microrganismos vão consumir o oxigênio e produzir o CO_2 . O CO_2 é absorvido por uma sonda localizada no interior do vaso de reação, provocando a depressão e a elevação do líquido no frasco medidor de pressão, que entra em contato com os eletrodos de platina, iniciando uma ativação por eletrólise do CuSO_4 , produzindo oxigênio (esquema do tubo manométrico, no início do ensaio a altura do líquido é a mesma nas duas pernas do "U" e ao fim do ensaio, a diferença de altura indica a variação na pressão dentro da célula, tornando possível determinar o consumo de oxigênio).



Fonte: www.precitech.net/central/H+P/SAPROMAT.pdf

Figura III.8 Componentes do Respirômetro.

O software utilizado para aquisição de dados requer o sistema operacional Windows versão 3.1 ou superior. O software é capaz de controlar até 4 unidades

SAPROMAT (48 unidades medidoras) simultâneamente. Os dados adquiridos podem ser impressos no formato de gráficos ou tabela e também exportados como arquivo de texto.

O oxigênio dissolvido é obtido pela Equação III.22, através das informações obtida durante a reação e enviados para um computador, onde são elaborados os gráficos ao longo do tempo de ensaio.

$$OD \text{ (mgO}_2\text{.L}^{-1}\text{)} = (0,25 \times f_1 \times f_2 \times N)/V \quad \text{III.22}$$

Onde:

f_1 = fator de correção em função da velocidade máxima;

f_2 = fator de diluição;

N = número de detecções;

V = volume da amostra

Capítulo IV

IV - Resultados e Discussões

IV.1 TRANSFERÊNCIA DE OZÔNIO NA COLUNA

As determinações da constante de autodecomposição (K_c), do coeficiente de transferência volumétrico (K_{La}) e do coeficiente de divisão do ozônio (m), foram realizadas simultaneamente a partir das equações apresentadas no Capítulo III. Os experimentos foram realizados em diferentes valores iniciais de pH (5; 7,5 e 9) e concentrações de cloreto de sódio (NaCl). Todos os ensaios foram realizados na temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ utilizando água destilada.

A reação de decomposição do ozônio foi avaliada em diferentes valores de pH, a fim de verificar seu efeito durante a ozonização. Na ozonização o valor do pH é um fator que influencia a taxa de degradação, principalmente porque ocorrem mudanças no mecanismo de reação. O meio ácido favorece a oxidação direta, isto é, o ozônio molecular pode reagir diretamente com as substâncias orgânicas. Já em meio alcalino, a oxidação indireta é favorecida, uma vez que ocorre a formação do radical $^{\circ}\text{OH}$ (Clever, 1983, Ledakowicz, *et al.*, 2001, Neppolian, *et al.*, 2002, Ma, *et al.*, 2005).

A presença do sal (NaCl) exerce impacto significativo na taxa de dissolução do ozônio, o aumento da concentração de sal diminui o tamanho da bolha. A influência da força iônica tem sido evidenciada na literatura pelo decréscimo causado na absorção do gás (Sotelo, *et al.*, 1989, Tsuchiya, *et al.*, 1997).

Na Figura IV.1 é apresentada a evolução das concentrações de ozônio na fase gasosa na saída do reator e do ozônio dissolvido na água ao longo do tempo, para uma vazão de gás fixada em 200 L.h^{-1} para os experimentos conduzidos na ausência de sal e diferentes valores de pH.

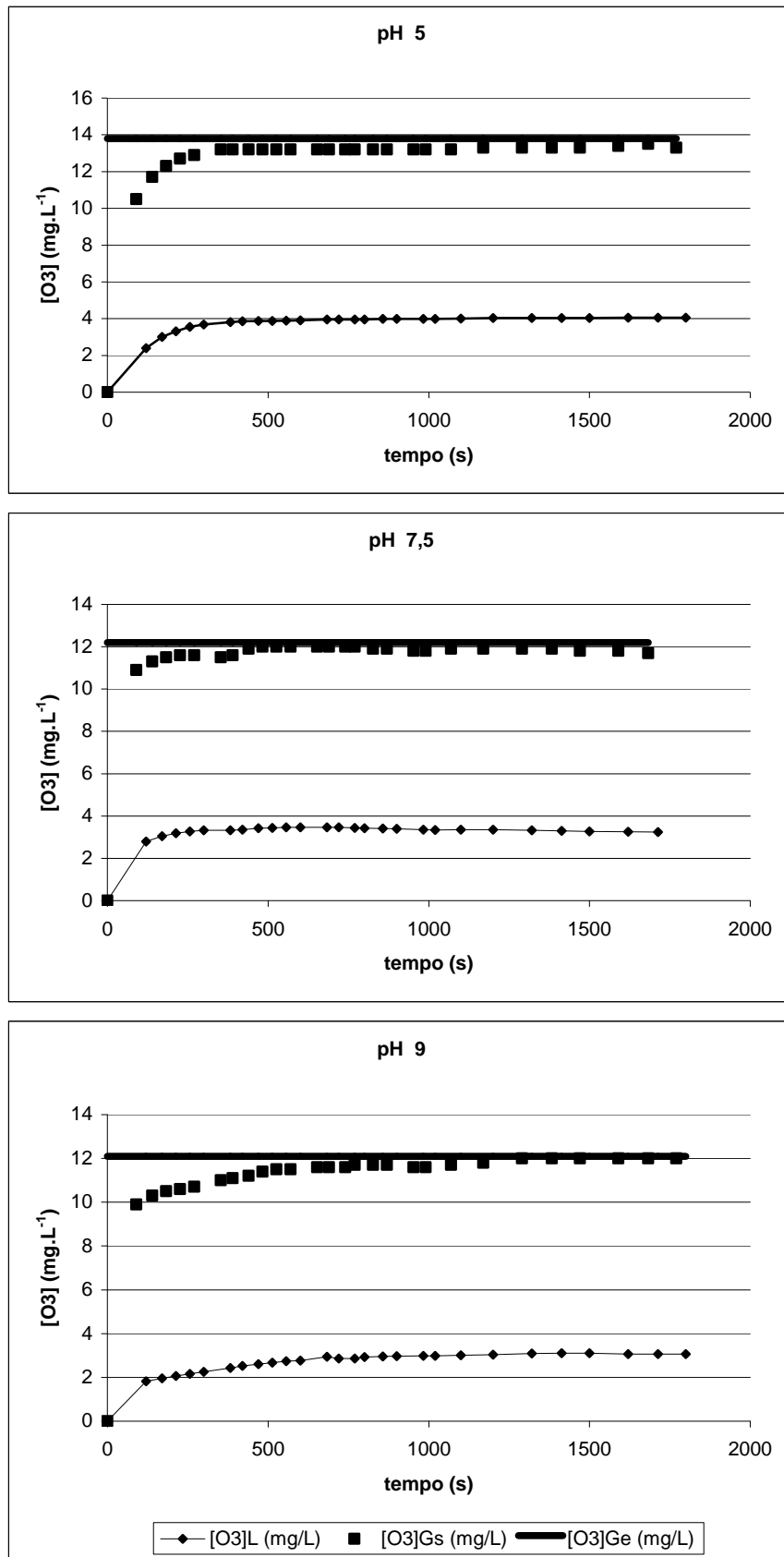


Figura IV.1 Variação das concentrações de ozônio nas fases líquida (L) e gasosa (entrada do reator – Ge; saída do reator – Gs) na ausência de NaCl e diferentes valores iniciais de pH.

Observa-se na Figura IV.1 que as curvas de variação das concentrações de ozônio apresentaram-se bastante similares nos diferentes valores de pH testados. A condição de regime permanente foi atingida em cerca de 600 s nos ensaios com valores iniciais de pH de 5 e 7,5. Considerou-se que a condição de regime permanente ou estacionário ocorreu quando os valores das concentrações de ozônio na saída do reator era estável. Para o experimento com pH inicial igual a 9, observou-se um atraso para se atingir essa condição (1350 s). A concentração de ozônio na fase aquosa, na condição de equilíbrio foi afetada pelo valor do pH. Assim, foi constatado decréscimo desse valor de saturação com o aumento do pH, conforme indicado na Tabela IV.1.

O aumento da concentração salina para 1g/L não alterou significativamente os perfis anteriormente observados na ausência de sal, como se pode comprovar da observação da Figura IV.2. Neste caso, o regime permanente também foi atingido em cerca de 500 s para os ensaios conduzidos em pH 5 e 7,5. Para o ensaio realizado em pH inicial igual a 9, a saturação só foi atingida ao final do experimento, após 3600 s.

Tabela IV.1 Principais parâmetros obtidos nos ensaios de ozonização realizados em diferentes valores iniciais de pH e de concentração de NaCl.

pH		NaCl (g.L ⁻¹)			
		0	1	40	100
5	T (°C)	23,2	23,6	23,0	24
	O _{3L} *	4,0	4,1	2,7	1,2
	O _{3Ge}	13,8	14,6	12,3	11,9
	O _{3Gs}	13,2	14,4	11,8	10,3
	t _s (s)	600	500	1300	3000
7,5	T (°C)	23,2	23,6	23,0	24
	O _{3L} *	3,5	3,6	2,0	1,24
	O _{3Ge}	12,2	13,6	12,0	12,0
	O _{3Gs}	12,0	12,9	10,1	10,4
	t _s (s)	600	470	2400	3500
9	T (°C)	23,2	23,6	23,0	24
	O _{3L} *	3,1	3,2	1,9	1,25
	O _{3Ge}	12,1	13,0	12,2	12,3
	O _{3Gs}	12,0	12,9	11,1	10,6
	t _s (s)	1320	3600	2400	3600

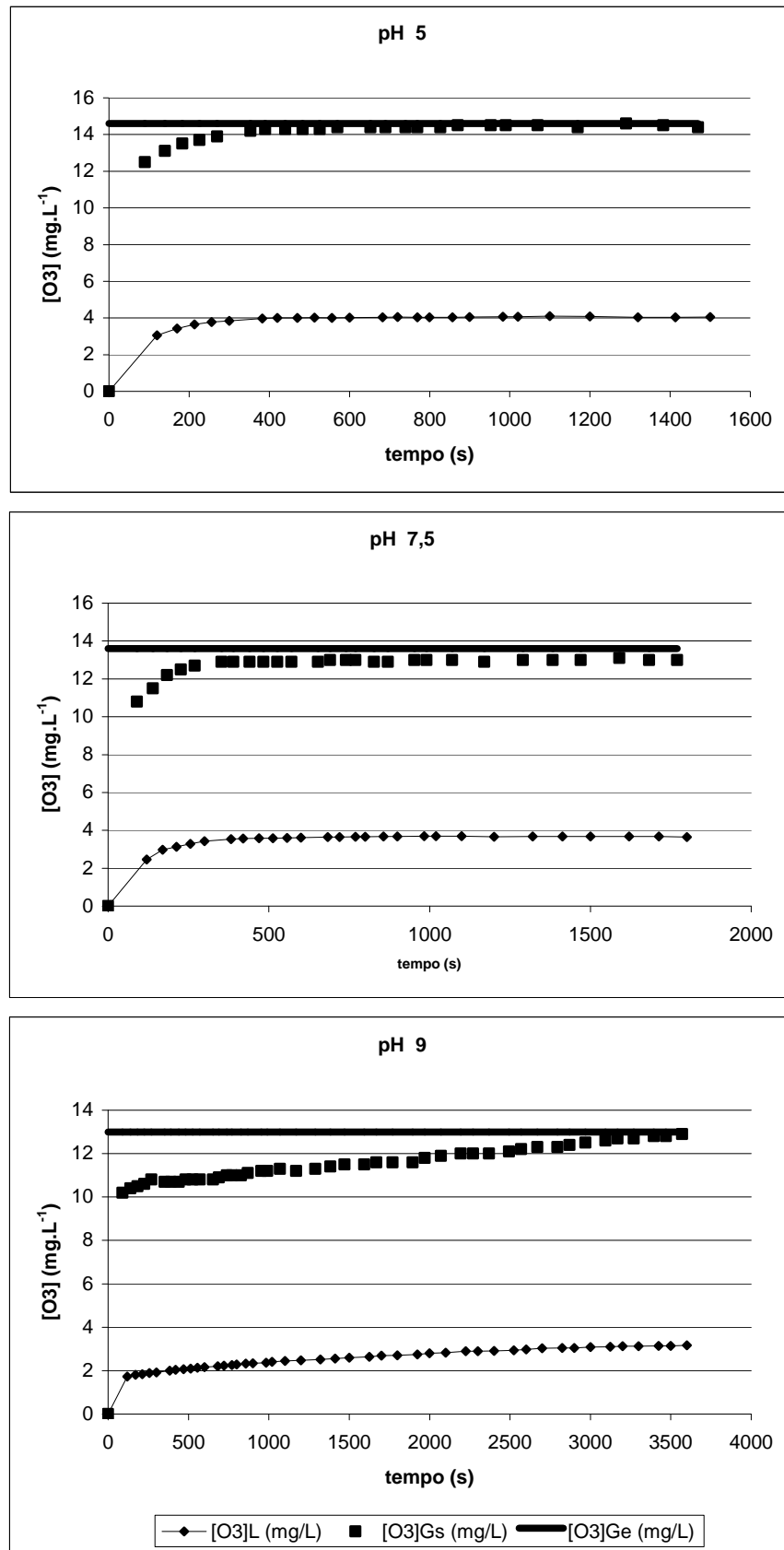


Figura IV.2 Variação das concentrações de ozônio nas fases líquida (L) e gasosa (entrada do reator – Ge; saída do reator – Gs) no ensaio em meio salino ($1g.L^{-1}$ de NaCl) e em diferentes valores iniciais de pH.

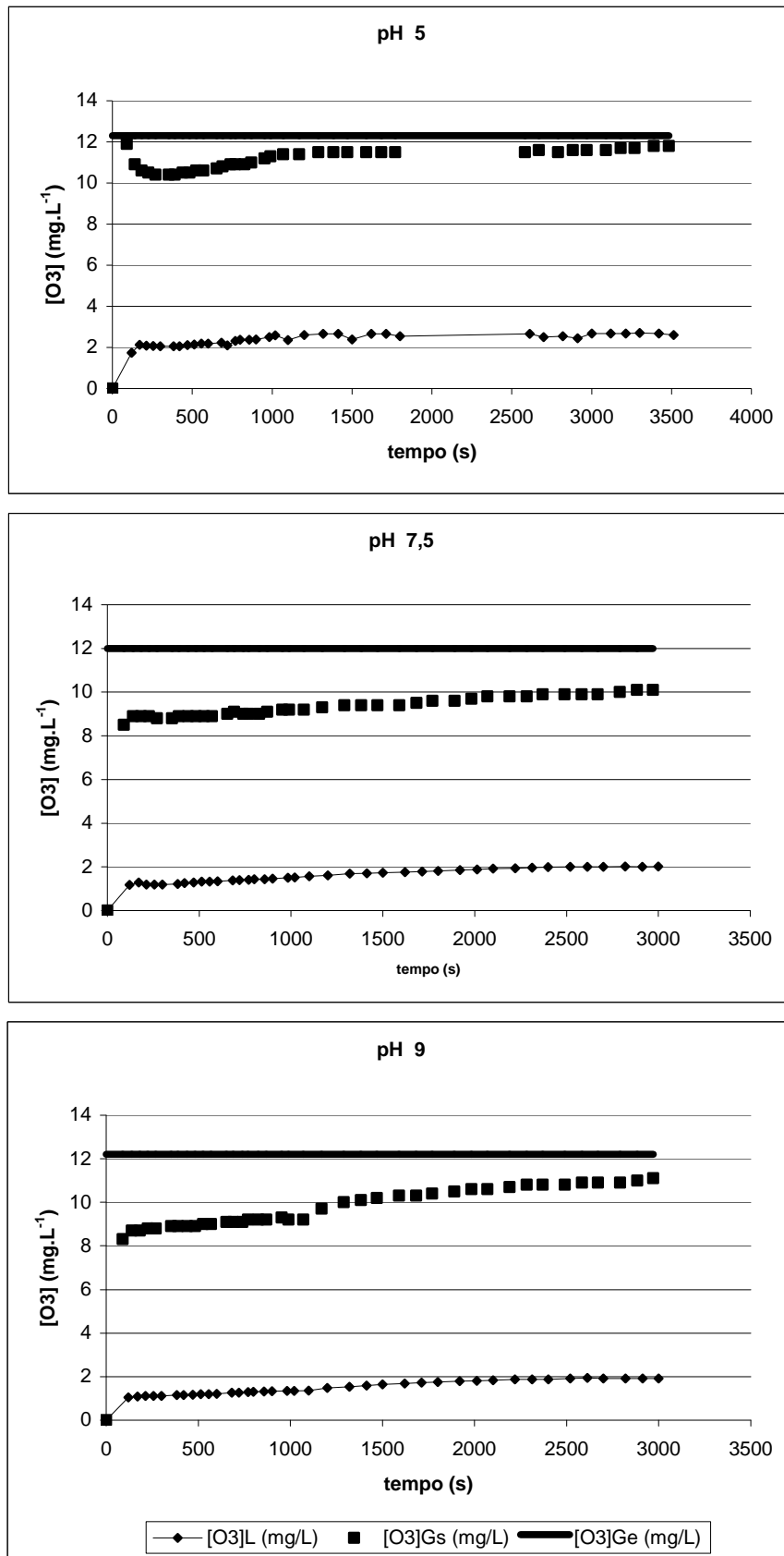


Figura IV.3 Variação das concentrações de ozônio nas fases líquida (L) e gasosa (entrada do reator- Ge; saída do reator - Gs) em meio salino ($40 g.L^{-1}$ de NaCl) e diferentes valores iniciais de pH.

A influência do sal na transferência de ozônio e em sua própria solubilidade na água se mostrou muito importante nos experimentos conduzidos com a concentração salina de 40 g.L^{-1} , como ilustrado na Figura IV.3 e na Tabela IV.1. Para o pH 5, a despeito de alguma imprecisão ocorrida nas medidas iniciais do teor de ozônio na saída do reator, a condição de regime permanente foi atingida em cerca de 1300 s. No entanto, a solubilidade do ozônio na fase líquida apresentou-se inferior a 3 mg.L^{-1} . Para os experimentos com pH 7,5 e 9 o regime permanente foi alcançado após 2400 s e a saturação do ozônio na fase líquida foi ainda menor (cerca de 2 mg.L^{-1}).

Nos experimentos realizados com 100 g.L^{-1} de NaCl o efeito desse sal na transferência de ozônio foi intensificado em relação aos experimentos anteriores (Figura IV.4 e Tabela IV. 1). Para o ensaio em pH 5 a variação da concentração de ozônio foi muito lenta, podendo-se considerar que o regime permanente foi atingido após 3000 s. A concentração de saturação do ozônio na fase líquida ficou em torno de $1,2 \text{ mg.L}^{-1}$. Para o ensaio em pH 7,5 foi observado resultado semelhante ao do experimento em pH 5. Para o experimento com maior valor de pH (pH=9) o comportamento das curvas de variação da concentração de ozônio não apresentou a mesma tendência dos anteriores. Observa-se que a evolução das concentrações de ozônio com o tempo também foi muito lenta, ou seja, a concentração de ozônio na fase líquida aumenta muito pouco com o tempo. No entanto, observou-se um aumento abrupto a partir de 3000 s, quando então foi atingido o valor de saturação. Não foi encontrada explicação para esse comportamento (Figura IV.4). Provavelmente houve um erro nessas medidas.

O pronunciado efeito da concentração de sal sobre a solubilidade do ozônio na fase aquosa está ilustrado na Figura IV.5. Embora tenha ocorrido uma pequena variação na concentração de ozônio no gás de entrada ($[\text{O}_{3\text{Ge}}]$), constata-se que para todas as concentrações de sal testadas, exceto 100 g.L^{-1} , houve diminuição da solubilidade do ozônio com o aumento do pH. É importante realçar a dificuldade experimental de se trabalhar com esta última concentração salina. Em decorrência, os parâmetros medidos para essa condição podem apresentar imprecisão.

Dos dados obtidos nas Figuras IV.1 a IV.4 pode-se determinar os parâmetros cinéticos e de transferência de interesse. Os dados do regime estacionário permitem determinar o valor da constante de autodecomposição (k_c) e o valor de m , através das equações III.7 e III.14, respectivamente. O valor de $K_{\text{L}}a$ pode ser obtido do tratamento dos dados experimentais, tal como descrito no Capítulo II e ilustrado na Figura IV. 6, para o

caso particular do ensaio em pH inicial 5 e concentração de sal de 1 g.L^{-1} . As figuras correspondentes aos demais ensaios encontram-se no Anexo I.

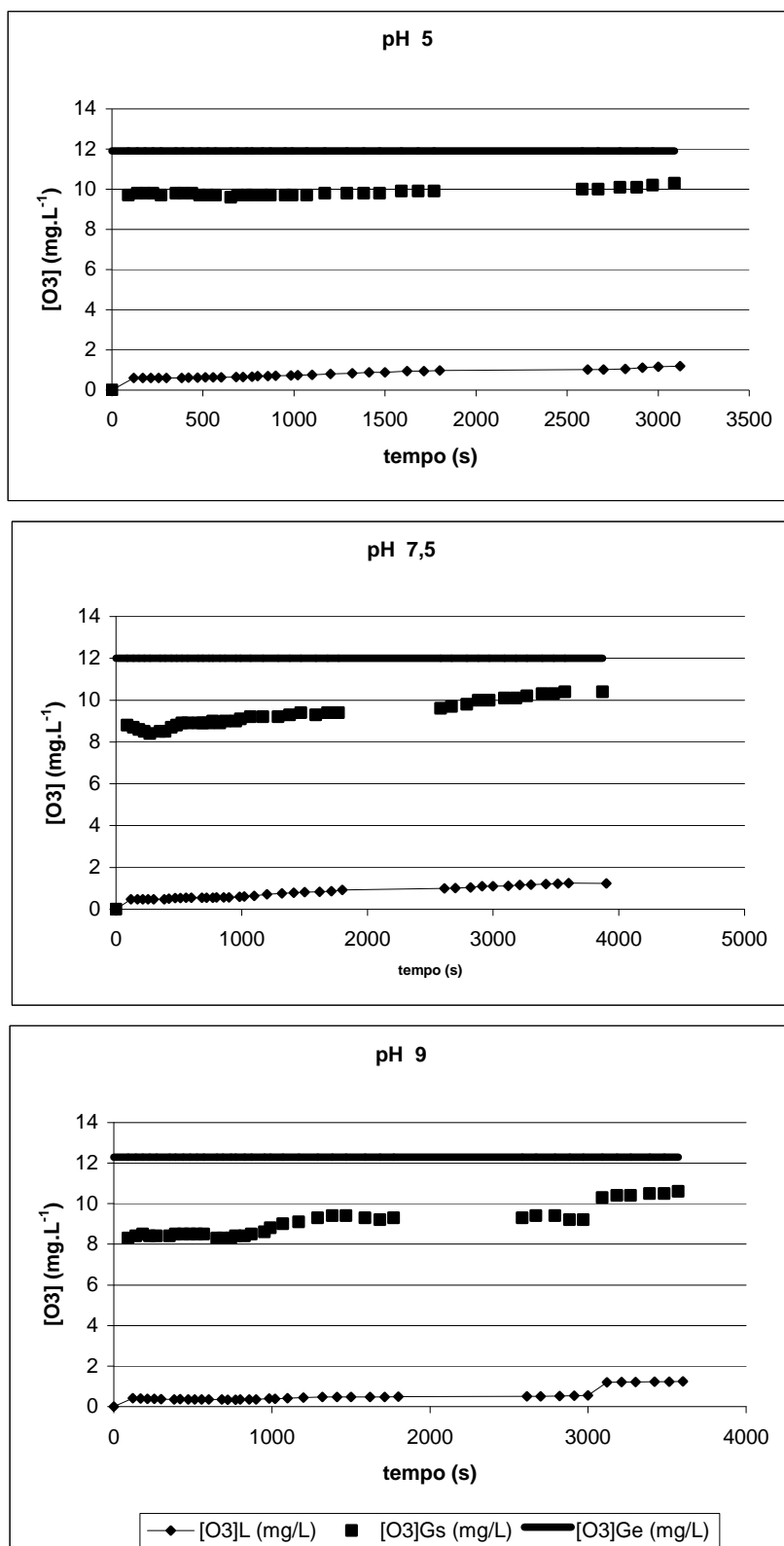


Figura IV.4 Variação das concentrações de ozônio nas fases líquida (L) e gasosa (entrada do reator – Ge; saída do reator– Gs) no ensaio em meio salino (100 g.L^{-1} de NaCl) e em diferentes valores iniciais de pH.

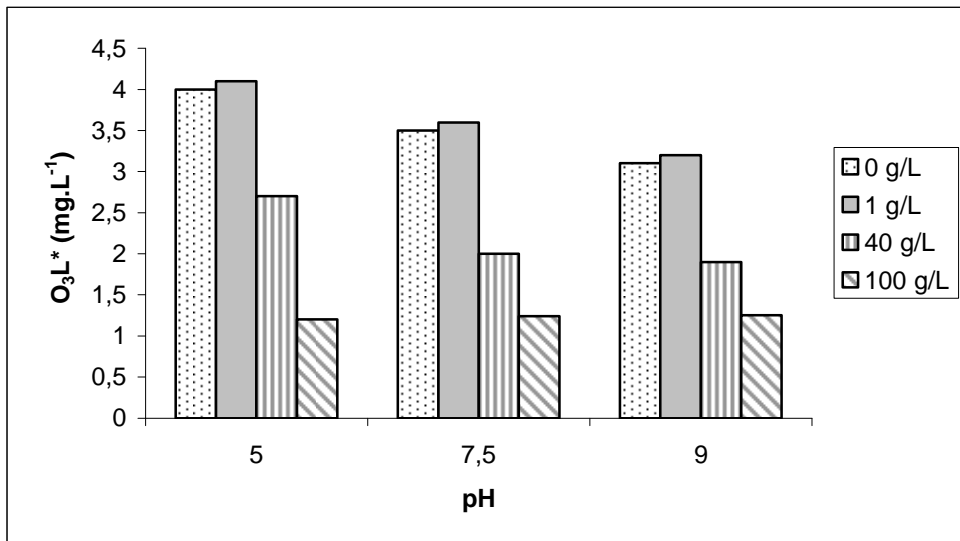


Figura IV.5 Concentração de saturação de ozônio na fase líquida nos ensaios conduzidos em diferentes valores iniciais de pH e diferentes concentrações de NaCl.

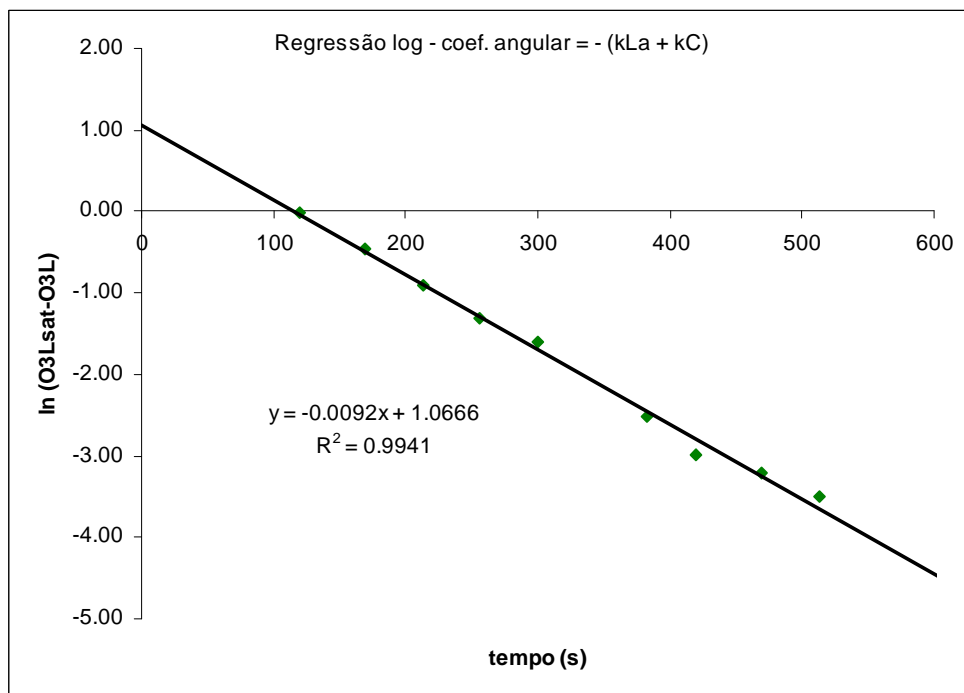


Figura IV.6 Representação gráfica permitindo o cálculo da soma dos parâmetros k_{La} e k_c - ensaio típico, pH inicial = 5, concentração de NaCl = $1g.L^{-1}$.

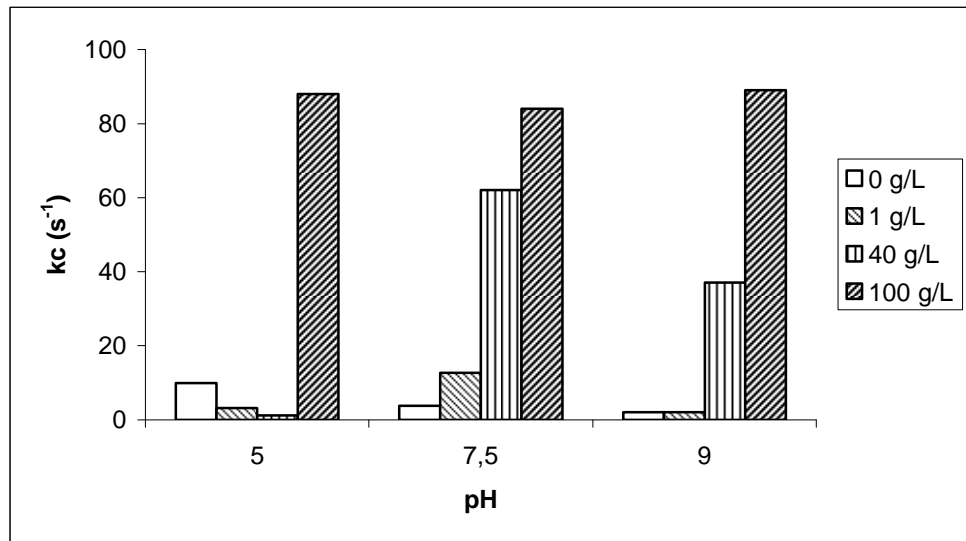


Figura IV.7 Constantes de decomposição do ozônio obtidos nos ensaios conduzidos em diferentes valores iniciais de pH e diferentes concentrações de NaCl.

Tabela IV.2: Principais parâmetros e coeficientes calculados a partir dos dados experimentais obtidos nos ensaios de ozonização realizados em diferentes valores iniciais de pH e de concentrações de NaCl.

		NaCl (g.L ⁻¹)			
		0	1	40	100
pH 5	k_c (s ⁻¹)	9,93E -04	3,23E -04	1,21E -04	8,79E -03
	k_{La} (s ⁻¹)	6,81E -03	8,98E -03	1,12E -02	n.c.
	M	0,34	0,29	0,25	0,11*
	T C	23,2	23,6	23,0	24
	O _{3Ge}	13,8	14,6	12,3	11,9
pH 7,5	k_c (s ⁻¹)	3,77E -04	1,27E -03	6,15E -03	8,43E -03
	k_{La} (s ⁻¹)	7,69E -03	9,72E -03	n.c.	2,56E -03
	M	0,30	0,31	0,18*	0,11*
	T C	23,2	23,6	23,0	24
	O _{3Ge}	12,0	12,9	10,1	10,4
pH 9	k_c (s ⁻¹)	2,12E -04	2,06E -04	3,745E -03	8,89E -03
	k_{La} (s ⁻¹)	2,80E -03	8,24E -04	n.c.	n.c.
	M	0,28	0,31	0,16*	0,11*
	T C	23,15	23,6	23,0	25 -23,1
	O _{3Ge}	12,1	13,0	12,2	12,3

n.c. valor não calculado por problemas experimentais

* valores calculados pela equação III. 13

Os resultados obtidos a partir do tratamento dos dados experimentais encontram-se na Tabela IV.2. No que tange ao parâmetro k_c , tal como ilustrado na Figura IV.7, maiores valores foram observados no ensaio em pH 7,5, para as concentrações de NaCl de 1 e 40 g.L⁻¹. Para os ensaios isentos de sal, houve uma tendência de queda de k_c com o aumento do pH. O fato mais marcante a ser observado é o valor extremamente elevado desse parâmetro para os experimentos com concentração de sal de 100 g.L⁻¹. Nesse caso, não houve significativa influência do pH no valor de k_c .

Para os ensaios com ausência de sal ou 1g.L⁻¹ de NaCl houve um leve aumento do valor de k_{La} do pH 5 para o pH 7,5 e, posterior decréscimo acentuado para o pH 9 (Figura IV.8). Nos ensaios conduzidos em pH 5 o aumento da concentração salina (na faixa de 0 a 40 g.L⁻¹) levou a um aumento do valor de k_{La} . Isto pode estar associado ao efeito de aumento da área interfacial provocada pelo aumento do teor de sal.

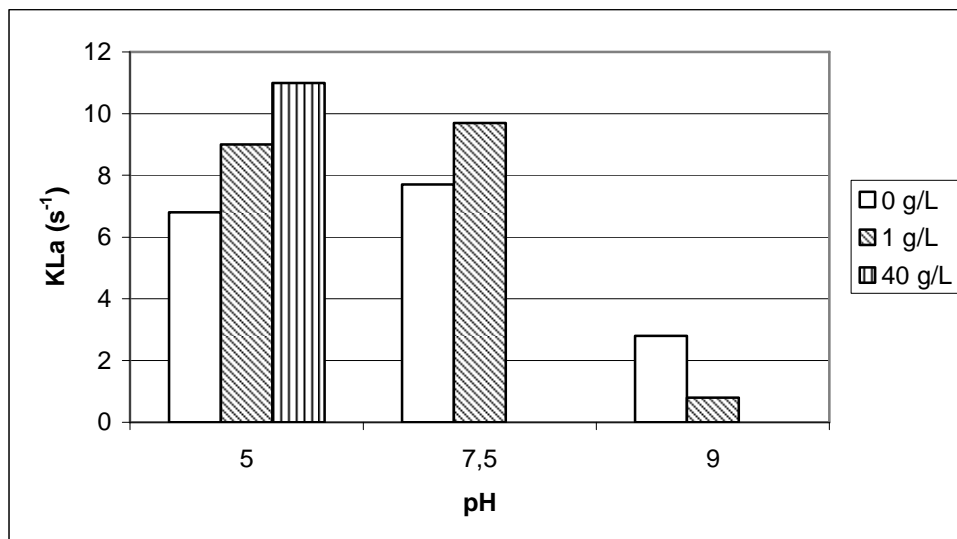


Figura IV.8 Valores do coeficiente volumétrico de transferência de ozônio (k_{La}) obtidos nos ensaios conduzidos em diferentes valores iniciais de pH e diferentes concentrações de NaCl.

Para o teor de sal mais elevado (100 g.L⁻¹), conforme já comentado, não foi possível obter dados experimentais confiáveis, pois os valores de saturação não foram convenientemente atingidos no curso dos experimentos e, ademais, o teor de ozônio dissolvido apresentou valores muito baixos, levando a valores calculados de k_{La} sem significado físico.

Houve um significativo efeito da concentração de sal no valor do parâmetro **m**, como indicam os dados da Tabela IV.2 e a Figura IV.9. O aumento da concentração de sal levou a uma apreciável diminuição do valor do parâmetro **m**. O efeito do pH apresentou menor efeito do que a concentração salina e tendência variável para cada concentração. Manteve-se praticamente constante, independentemente do valor de pH, para as concentrações de 1 e de 100 g.L⁻¹ e tendência de decréscimo com o aumento do pH para as concentrações de 0 e de 40 g.L⁻¹. É importante frisar que não foram encontrados na literatura valores de **m** para os níveis elevados de salinidade estudados neste trabalho.

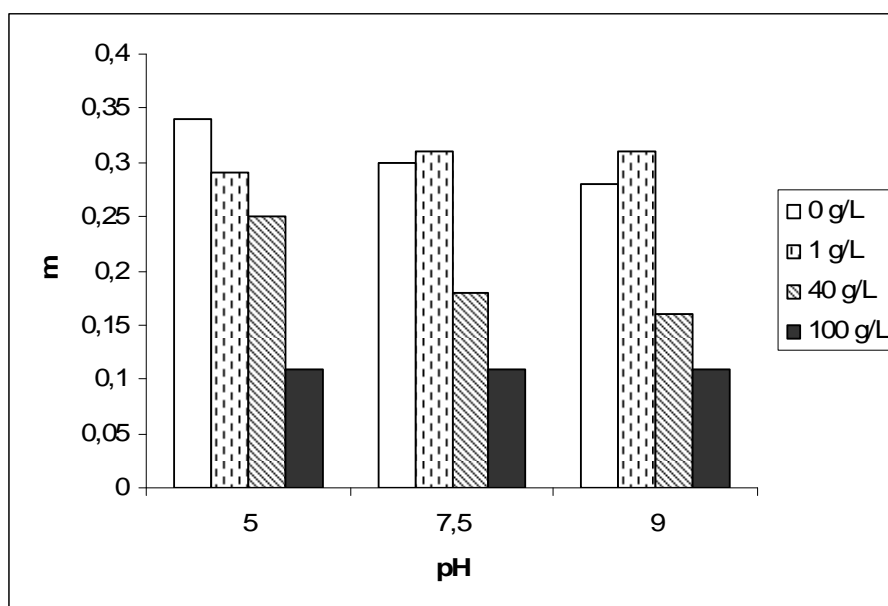


Figura IV.9 Valores do coeficiente de partição (**m**) obtidos nos ensaios conduzidos em diferentes valores iniciais de pH e diferentes concentrações de NaCl.

Cálculos da atividade (γ_{O_3}) podem ser feitos com base nos trabalhos de Foussard e Debellefontaine (2000), Schumpe (1993) e Beltran (2004) de modo a permitir a determinação da constante de Henry para o ozônio em sistema salino em função do valor dessa constante para a água. Os cálculos efetuados, detalhados no Anexo II, levam a valores de (γ_{O_3}) da ordem de 1,4 para concentração de NaCl de 40 g.L⁻¹ e de 2,3 para 100 g.L⁻¹. Para os ensaios em pH 7,5 a razão entre os valores de **m** em meio salino e em ausência de sal foram de 1,7 e 2,7 para 40 e 100 g.L⁻¹, respectivamente. Esses dados evidenciam o marcante efeito da salinidade, nos maiores níveis investigados sobre o coeficiente de divisão.

De um modo geral, fica difícil a comparação dos dados obtidos neste trabalho com os da literatura, visto que há poucos trabalhos que exploram o efeito de altas concentrações salinas na transferência de ozônio.

Para o sistema isento de sal há um razoável número de dados na literatura a respeito do valor do coeficiente de divisão (**m**). Alguns desses dados já foram apresentados na Tabela II. 10. Para a temperatura de 20 °C são apresentados dados adicionais na Tabela IV. 3. Vale a pena lembrar que os valores de **m** obtidos neste trabalho, na condição de ausência de sal, se situaram na faixa de 0,28 a 0,34, dependendo do valor de pH.

Tabela IV. 3 Dados da literatura para o coeficiente de divisão (**m**) na temperatura de 20 °C e ausência de sal em pH 7.

Autores	$m = \frac{[O_3]_L^*}{[O_3]_G}$
López (2004)	0,311
Perry e Chilton (1973)	0,354
Horvath <i>et al.</i> (1985)	0,344
Masschelein (1991)	0,240
Caprio <i>et al.</i> (1982)	0,250
Roth e Sullivan (1981)	0,241
Wang (1995)	0,240
Benbelkacem (2002)	0,340

IV. 2 DESEMPENHO DA OZONIZAÇÃO: ENSAIOS COM O CORANTE ORANGE II

IV. 2.1 Ensaios na ausência de NaCl e em diferentes valores de pH

Os resultados da ozonização do corante Orange II serão apresentados e discutidos para os ensaios conduzidos em diferentes valores de pH de modo seqüencial. A Figura IV.10 apresenta a estrutura química do corante Orange II. Com a ruptura da ligação N=N são formados intermediários com anéis benzênico e naftalênico.

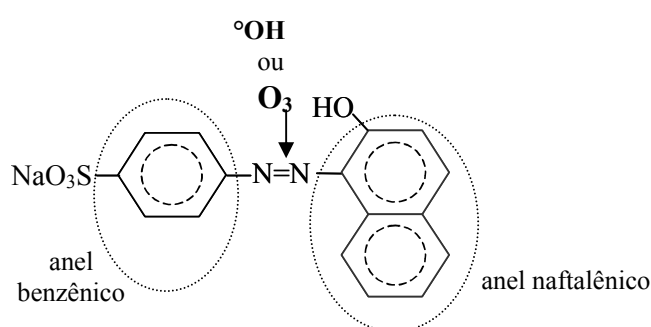


Figura IV. 10 Estrutura do corante Orange II.

pH 5

A Figura IV.11 ilustra a variação do teor de ozônio na corrente gasosa de saída da coluna e da concentração do corante Orange II ao longo do tempo. Nesse ensaio não foi possível acompanhar a variação do teor de ozônio na fase líquida por problemas com o analisador de ozônio. Observa-se que a maior parte do ozônio é consumida nos primeiros 10 min de operação, quando se observa a maior remoção de cor. O corante Orange II foi removido da fase aquosa em sua quase totalidade, visto que a partir de uma concentração inicial de 1.10^{-4} mol.L⁻¹ atingiu-se, após 40 min, uma concentração de 8.10^{-8} mol.L⁻¹ (Anexo III).

Os melhores resultados da descoloração em efluentes têxteis têm sido observados em pH baixo, pois o ozônio molecular é muito efetivo, no ataque à dupla ligação N=N associada à cor (Paul, *et al.*, 1995, Peng e Fan, 2005).

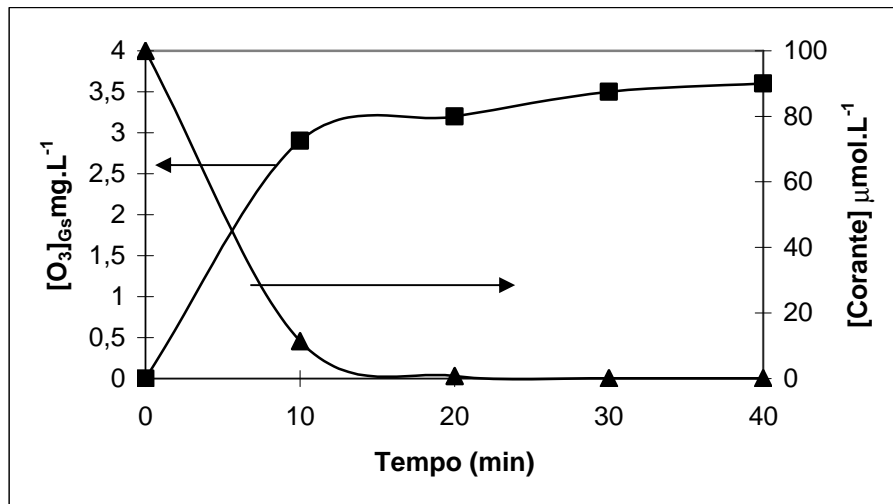


Figura IV. 11 Variação da concentração de ozônio na fase gasosa (saída da coluna) e da concentração de corante Orange II, pH 5, ausência de NaCl.

Embora o corante tenha sido removido em grande extensão, ele não sofreu completa mineralização, como atestam os resultados apresentados na Figura IV12. A remoção do teor de carbono orgânico (COT) foi gradual ao longo do ensaio e atingiu cerca de 35% após 40 min de ozonização. Na figura estão apresentadas duas classes de intermediários formados na degradação do corante Orange II pela ruptura da ligação N=N : [I1] - espécies naftalênicas e [I2] - espécies benzênicas. Observa-se que ambas apresentam perfis de evolução semelhantes ao longo do tempo, acumulando-se no meio nos primeiros 10 min e sendo a seguir parcialmente degradadas. As espécies naftalênicas apresentaram-se sempre em maior concentração do que as benzênicas.

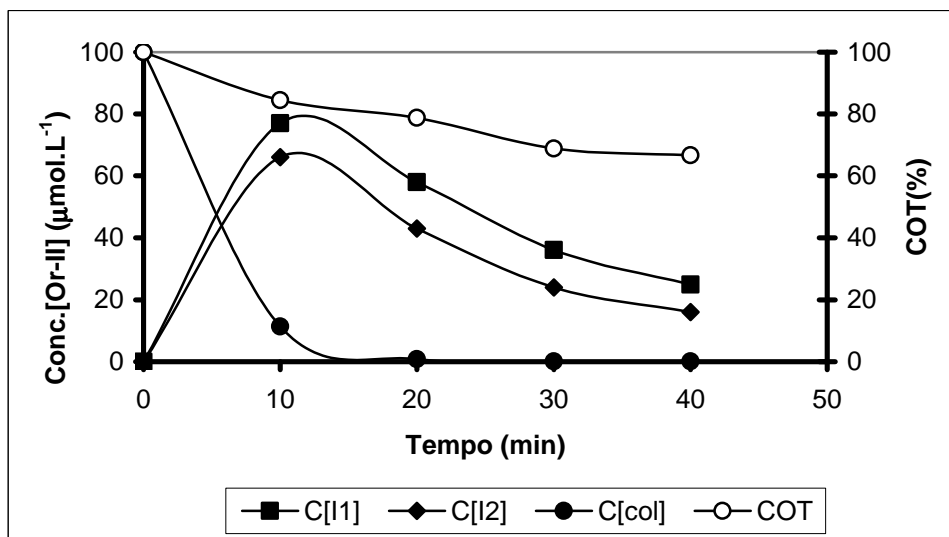


Figura IV.12 Variação das concentrações do corante Orange II, dos intermediários e de COT ao longo do tempo de ozonização: ensaio realizado em pH 5 e ausência de NaCl.

pH 7,5

No experimento conduzido em pH 7,5 houve rápida e extensiva remoção do corante, tal como observado para o ensaio em pH 5. No entanto, a saturação de ozônio na corrente de saída não foi atingida mesmo após 70 min de ozonização, tal como ilustrado na Figura IV. 13.

A concentração de ozônio dissolvido diminui com aumento do pH e em pH ácido prevalece a presença de radicais $^{\circ}OH$ (Sotelo, *et al.*, 1989).

Com relação a remoção de COT e formação de intermediários, o ensaio realizado neste pH apresentou resultados similares aos obtidos em pH 5. Houve, entretanto, maior remoção de COT (50%, 40 min) e maior presença relativa de intermediários naftalênicos, como indicado na Figura IV.14.

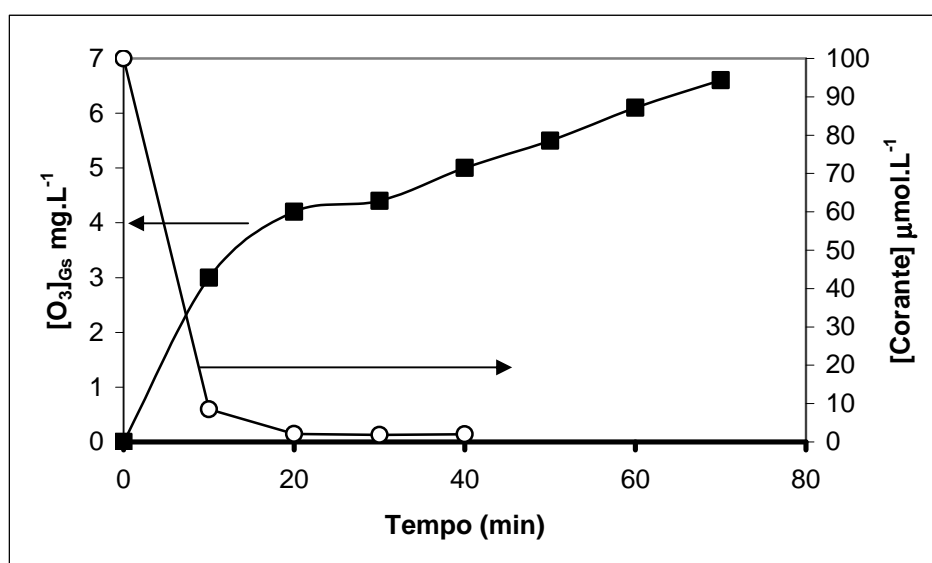


Figura IV.13 Variação do teor de ozônio na fase gasosa (saída da coluna) e da concentração de corante Orange II, pH 7,5, ausência de NaCl.

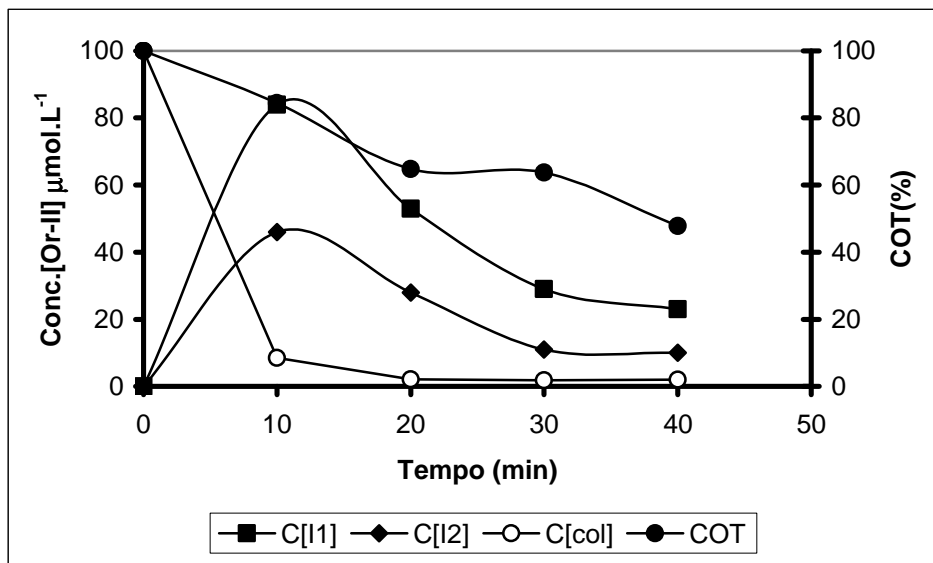


Figura IV.14 Variação do teor de ozônio na fase gasosa (saída da coluna) e da concentração de corante Orange II, pH 7,5, ausência de NaCl.

pH 9

Tal como observado nos ensaios realizados em pH 5 e pH 7,5, a remoção do corante se deu num período de tempo de 20 min, porém mais lentamente do que naqueles ensaios. A concentração de ozônio na fase gás à saída da coluna não atingiu o valor de *plateau* após 80 min de ozonização, tal como mostrado na Figura IV. 15.

O radical OH° tem um elevado potencial de oxidação 2,8V. O potencial de oxidação do ozônio decresce de 2,08 V em pH ácido para 1,4 V em soluções alcalinas. Isto indica que, assim com o aumento do pH a estabilidade do ozônio decresce resultando na geração de oxidantes secundários $^\circ\text{OH}$ (Muthukumar, *et al.*, 2001). Provavelmente o radical $^\circ\text{OH}$ pode estar atacando outras partes da molécula e não preferencialmente a ligação N=N, como acontece com a reação com O_3 molecular.

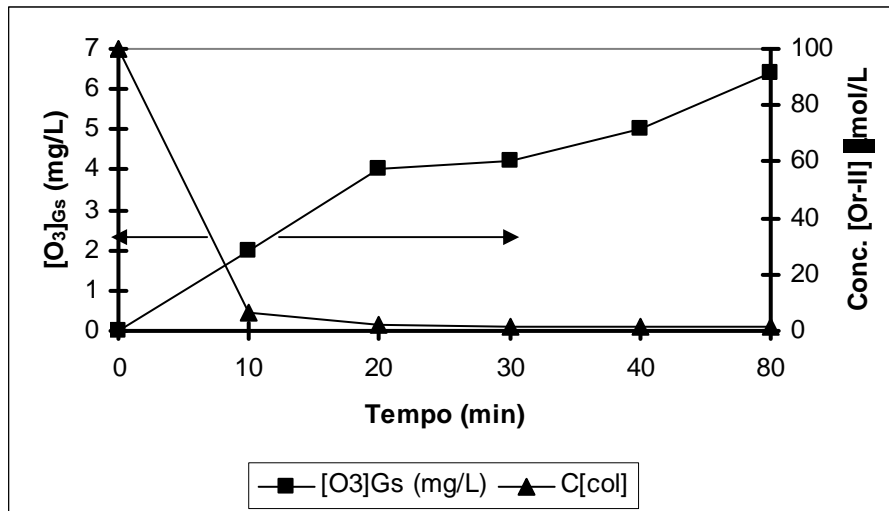


Figura IV.15 Variação do teor de ozônio na fase gasosa (saída da coluna) e da concentração de corante Orange II, pH 9, ausência de NaCl.

A remoção de COT no ensaio em pH 9 foi similar à obtida em outros valores de pH, no tempo de 40 min. Como este ensaio foi conduzido por um tempo maior, observa-se que a queda de COT é bastante lenta, alcançando uma remoção de 50% após 80 min de ozonização. Os perfis de variação dos intermediários seguiram a mesma tendência anteriormente observada. Nesse teste de maior duração, verificou-se que a degradação dos intermediários ocorreu também de forma lenta no intervalo de 40 a 80 min.

Foi observado, tanto para o pH 7,5 como para pH 9, que a concentração de ozônio na fase gás na saída da coluna foi menor, isto pode ter ocorrido devido a solubilidade do ozônio ser menor quanto mais elevado o pH. A concentração de ozônio dissolvido decresce com o aumento do pH (Sotelo, *et al.*, 1989, Muthukumar, *et al.*, 2001, Lin e Wu, 2006).

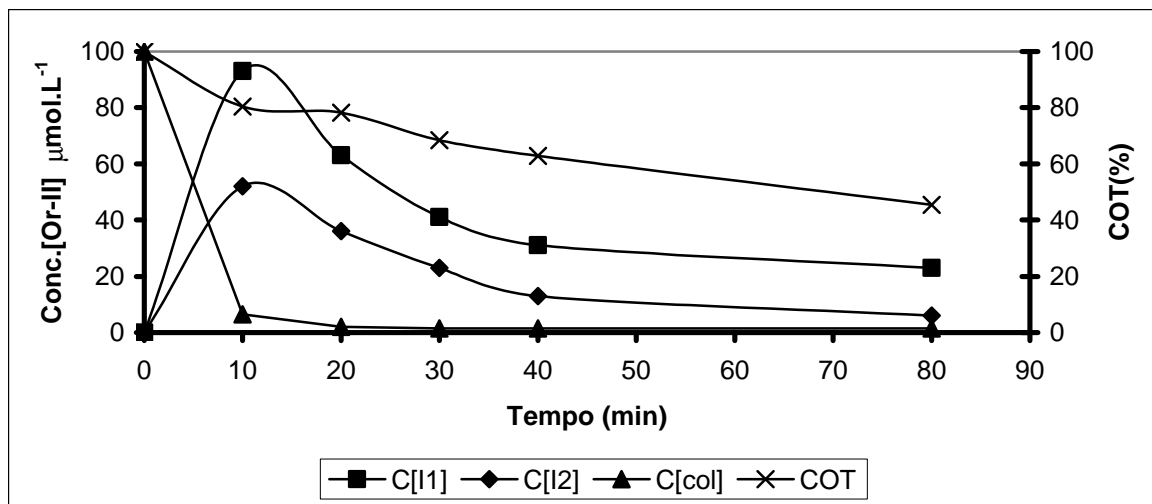


Figura IV.16 Variação das concentrações de corante, de intermediários e de COT ao longo do tempo de ozonização: ensaio realizado em pH 9, na ausência de NaCl.

IV. 2.2 Ensaio realizados com diferentes concentrações de NaCl e valores de pH

É importante que seja avaliado o efeito do sal no estudo da ozonização de corantes geralmente empregados na indústria têxtil, uma vez que é usado para melhorar a fixação do corante a fibra. O processo de tingimento requer altas concentrações, cerca de 100 g.L⁻¹ de cloreto de sódio (Tang e Chen, 2004).

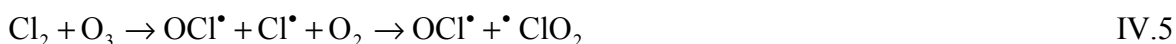
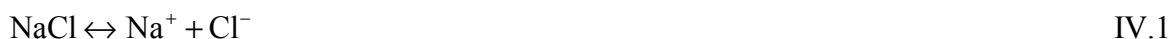
Em função do grande número de ensaios realizados e dados obtidos, os resultados relativos aos experimentos em meio salino serão apresentados para cada valor de pH e nas diferentes concentrações salinas.

Os perfis de variação da concentração de ozônio na fase gás, à saída da coluna e os de remoção do corante obtidos nos diversos ensaios estão apresentados na Figura IV.17, que evidenciam similaridade quanto à remoção de cor. Com relação à concentração de ozônio à saída da coluna, verifica-se que os valores de *plateau* não foram devidamente atingidos e foram inferiores aos valores terminais obtidos nos ensaios de transferência relatados no item IV.1, deste capítulo. Isto pode estar relacionado a algum problema de funcionamento do analisador de ozônio nesta fase do trabalho. Da figura, pode-se inferir que não houve efeito marcante do pH nem da concentração de NaCl na remoção do corante.

Embora o corante tenha sido removido de modo rápido e praticamente de modo completo da fase aquosa, o mesmo não ocorreu com o teor de carbono orgânico, tal como ilustrado na Figura IV.18. Tomando-se como tempo de referência 40 min, observou-se que

nos ensaios em pH 5 houve pouco efeito do teor de sal, visto que as remoções de COT no período foram da ordem de 30%. Para o pH próximo da neutralidade houve um significativo efeito prejudicial do NaCl, quando presente na maior concentração (100 g.L⁻¹). Efeito igualmente pronunciado foi verificado no ensaio realizado em pH 9. Entretanto, foi para este pH que o efeito deletério do sal ficou mais evidente, posto que as remoções de COT caíram de 60% (1 gNaCl.L⁻¹) para valores abaixo de 20% (100 gNaCl/L). A solubilidade do ozônio pode ser afetada pelo pH, temperatura, força iônica e na presença de radicais capturadores como terc-butanol (Muthukumar, *et al.*, 2001).

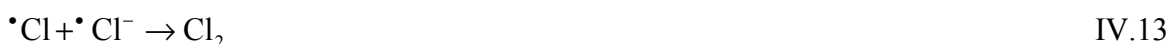
O efeito do cloreto de sódio, tanto em pH ácido como em pH alcalino, pode ser explicado através das seguintes reações apresentadas nas equações (IV.1) a (IV.9) (Muthukumar, *et al.*, 2004):



Através destas reações pode-se evidenciar que o NaCl na presença do ozônio molecular em pH ácido, pode consumir parte do ozônio.

O decréscimo da eficiência em pH alcalino pode ser atribuído a presença de íons cloreto, capturadores de radicais hidroxila que são formados em pH elevado por reações indiretas, onde a molécula de ozônio se decompõe para formar radicais $^{\circ}\text{OH}$ (Hamlin, *et al.*, 1999, Neppolian, *et al.*, 2002).

As reações (IV.10 a IV.13) mostram a oxidação do íon cloreto com os radicais $^{\circ}\text{OH}$ formados em pH alcalino.



Vários autores tem evidenciado que em meio alcalino o íon cloreto age como capturador do radical $^{\circ}\text{OH}$ (Neppolian, *et al.*, 2002, Maciel, *et al.*, 2004, Muthukumar, *et al.*, 2004). A capacidade do Cl_2 em oxidar os compostos orgânicos é menor do que dos radicais $^{\circ}\text{OH}$, portanto era de se esperar maior remoção de COT em pH ácido, já que nesse há a presença de ozônio molecular.

Entretanto, nesse estudo não foi observado para a maior concentração salina testada (100 g.L^{-1}). A remoção de COT em pH 5 foi de 30% e em pH 7,5 e 9,0 foi em torno de 20%. Para a concentração de NaCl de 100 g.L^{-1} nos diferentes pH a remoção de COT foi semelhante.

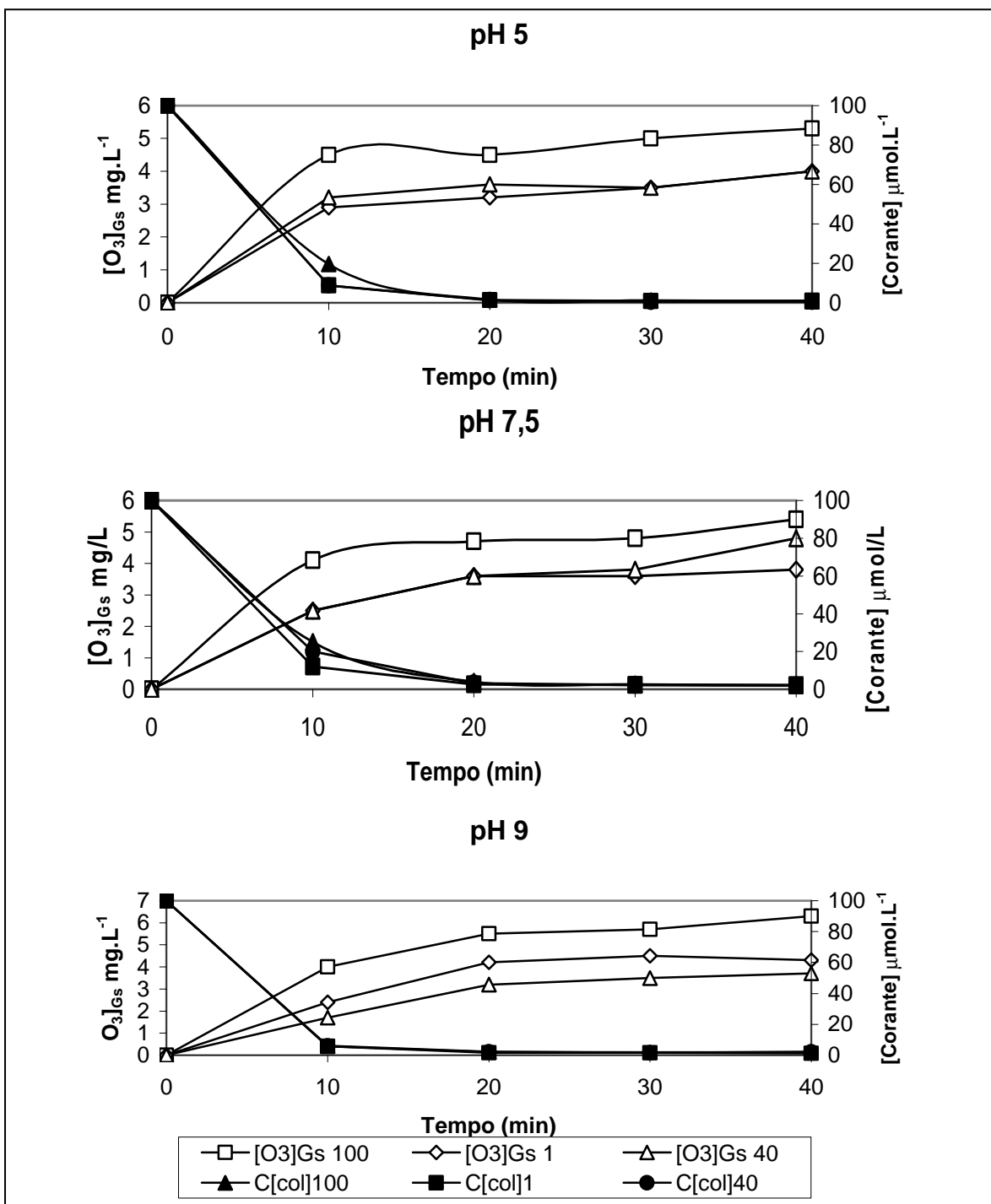
Nesse estudo os resultados das análises de cloreto das amostras antes e depois da ozonização, nos diferentes pH e salinidades, apresentaram os mesmos valores para o corante Orange II. Isso quer dizer que o cloreto não foi consumido na formação de Cl_2 . Portanto, a menor remoção de COT na presença de altas concentrações de cloreto, não é devida aos mecanismos propostos por Lu, *et al.*, 1997.

Quanto à formação de produtos intermediários, como ilustrado na Figura IV.19, verificou-se em todos os ensaios os seguintes comportamentos: o acúmulo de

intermediários ocorreu de modo acentuado nos primeiros 10 a 20 min de ozonização, com posterior decréscimo, que se deu a baixas taxas; maior acúmulo de espécies naftalênicas, sobretudo nas menores concentrações de NaCl e nos três valores de pH; maior acúmulo de espécies benzênicas para a concentração de 100 g.L^{-1} nos valores de pH de 5 e 7,5.

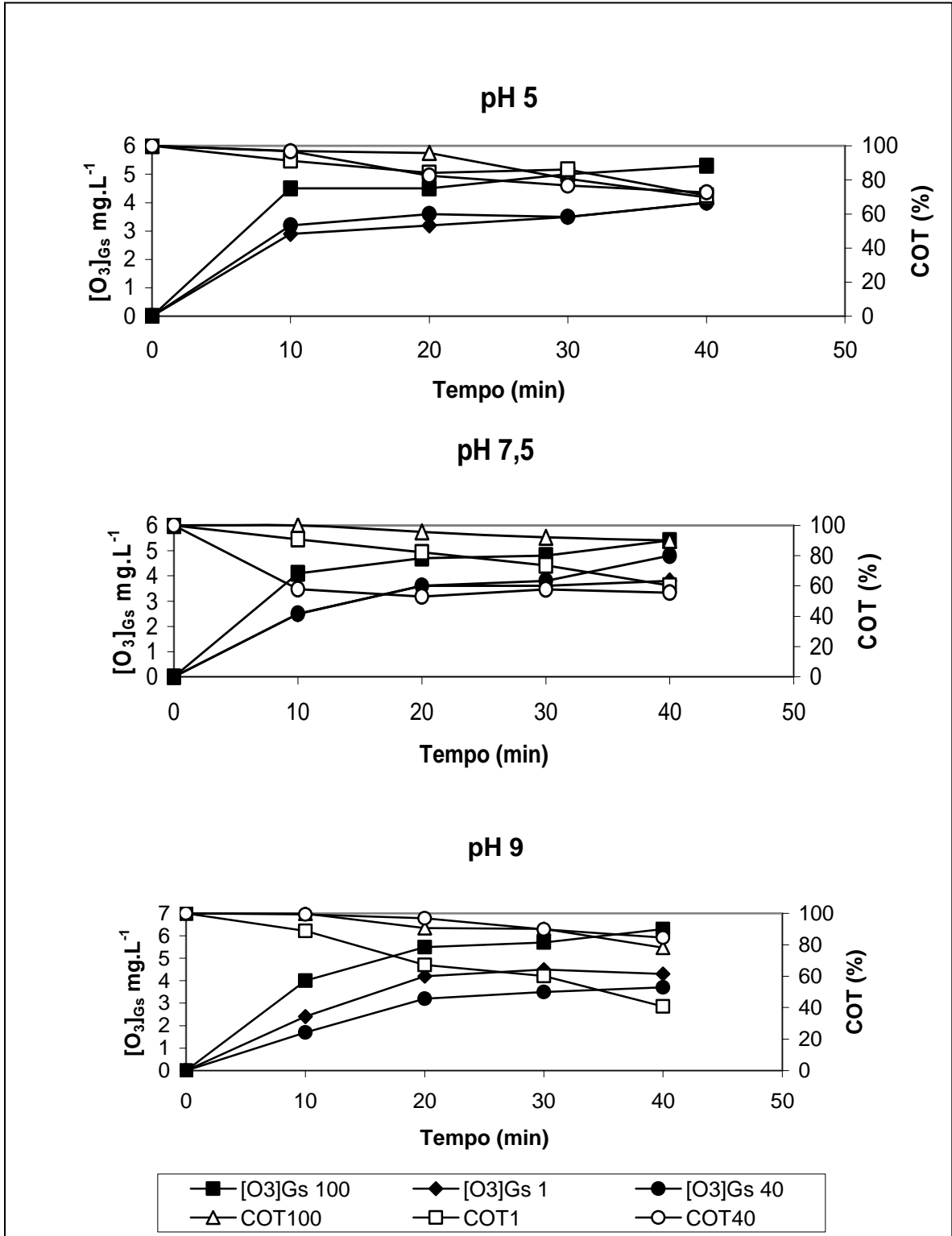
As espécies intermediárias não foram completamente mineralizadas no processo de ozonização, no entanto, as concentrações residuais, expressas em $\mu\text{mol.L}^{-1}$, foram baixas ($< 50 \mu\text{mol.L}^{-1}$).

Pode – se observar das Figuras IV.17 e IV.18 que na maior concentração de NaCl a concentração de ozônio na saída do reator foi sempre maior, portanto o consumo do ozônio foi menor. Esses dados concordam com a remoção de COT que foi menor na maior concentração de NaCl.



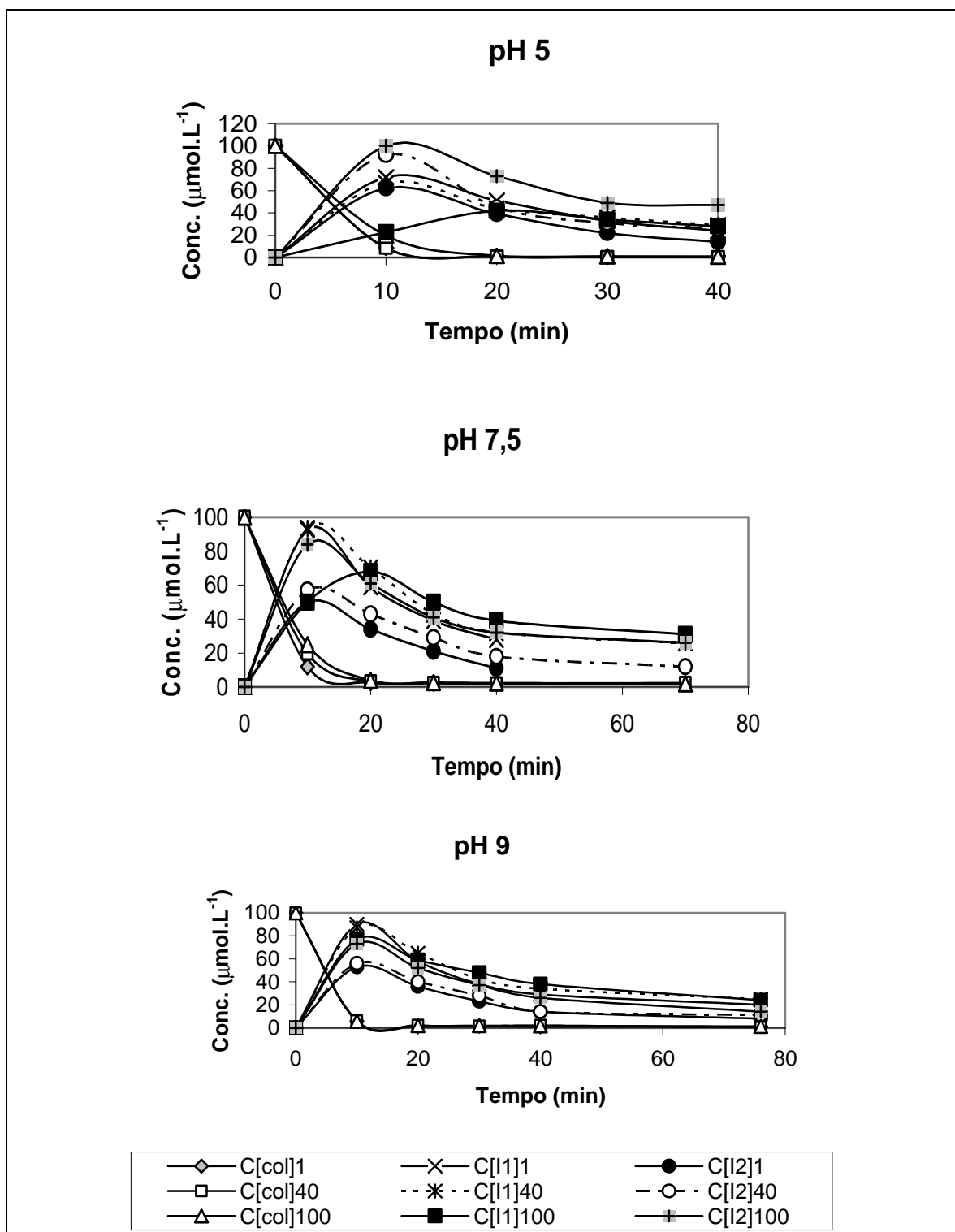
[O3]Gs 1: Concentração de ozônio no gás na saída do reator com [NaCl] = 1g.L⁻¹;
 [O3]Gs 40: Concentração de ozônio no gás na saída do reator com [NaCl] = 40g.L⁻¹;
 [O3]Gs 100: Concentração de ozônio no gás na saída do reator com [NaCl] = 100g.L⁻¹;
 C[col]1 Concentração de corante Orange II [NaCl] = 1g.L⁻¹;
 C[col]40 Concentração de corante Orange II [NaCl] = 40g.L⁻¹;
 C[col]100 Concentração de corante Orange II [NaCl] = 100g.L⁻¹.

Figura IV. 17 Variação do teor de ozônio na fase gasosa (saída da coluna) e do corante Orange II nos ensaios realizados nos valores de pH 5; 7,5 e 9 em meios com diferentes concentrações de NaCl.



[O3]Gs 1: Concentração de ozônio no gás na saída do reator com [NaCl] = 1g.L⁻¹;
 [O3]Gs 40: Concentração de ozônio no gás na saída do reator com [NaCl] = 40g.L⁻¹;
 [O3]Gs 100: Concentração de ozônio no gás na saída do reator com [NaCl] = 100g.L⁻¹;
 COT1 Remoção de COT com [NaCl] = 1g.L⁻¹;
 COT40 Remoção de COT com [NaCl] = 40g.L⁻¹;
 COT100 Remoção de COT com [NaCl] = 100g.L⁻¹.

Figura IV. 18 Variação do teor de ozônio na fase gasosa (saída da coluna) e COT nos ensaios realizados nos valores de pH 5; 7,5 e 9 em meios com diferentes concentrações de NaCl.



C[**col**]1 Concentração de corante Orange II [NaCl] = 1g.L⁻¹; C[**I1**]1 Conc. de Espécies Naftalênicas [NaCl] = 1g.L⁻¹; C[**I2**]1 Conc. de Espécies Benzênicas [NaCl] = 1g.L⁻¹;
 C[**col**]40 Concentração de corante Orange II [NaCl] = 40g.L⁻¹; C[**I1**]40 Conc. de Espécies Naftalênicas [NaCl] = 40g.L⁻¹; C[**I2**]40 Conc. de Espécies Benzênicas [NaCl] = 40g.L⁻¹;
 C[**col**]100 Concentração de corante Orange II [NaCl] = 100g.L⁻¹; C[**I1**]100 Conc. de Espécies Naftalênicas [NaCl] = 100g.L⁻¹; C[**I2**]100 Conc. de Espécies Benzênicas [NaCl] = 100g.L⁻¹.

Figura IV.19 Variação das concentrações de corante e de intermediários naftalênicos e benzênicos nos ensaios realizados nos valores de pH 5 ; 7,5 e 9 em meios com diferentes concentrações de NaCl (1 ; 40 e 100 g.L⁻¹) – C = concentração, Col = corante, P1 intermediários naftalênicos, P2 intermediários benzênicos.

IV. 3 DESEMPENHO DO SISTEMA DE OZONIZAÇÃO: ENSAIOS COM O CORANTE ACID RED 27

Como os ensaios de ozonização deste corante foram realizados apenas no valor de pH 7,5, os resultados serão apresentados globalmente para realçar os efeitos da concentração de NaCl no processo. A Figura IV.20 apresenta a estrutura química do corante Acid Red 27. Com a ruptura da ligação N=N são formados intermediários com anéis naftalênicos.

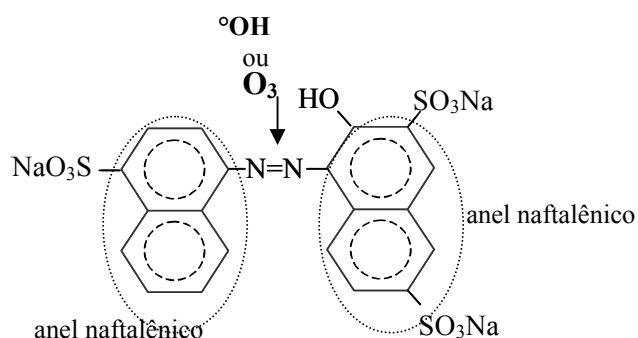
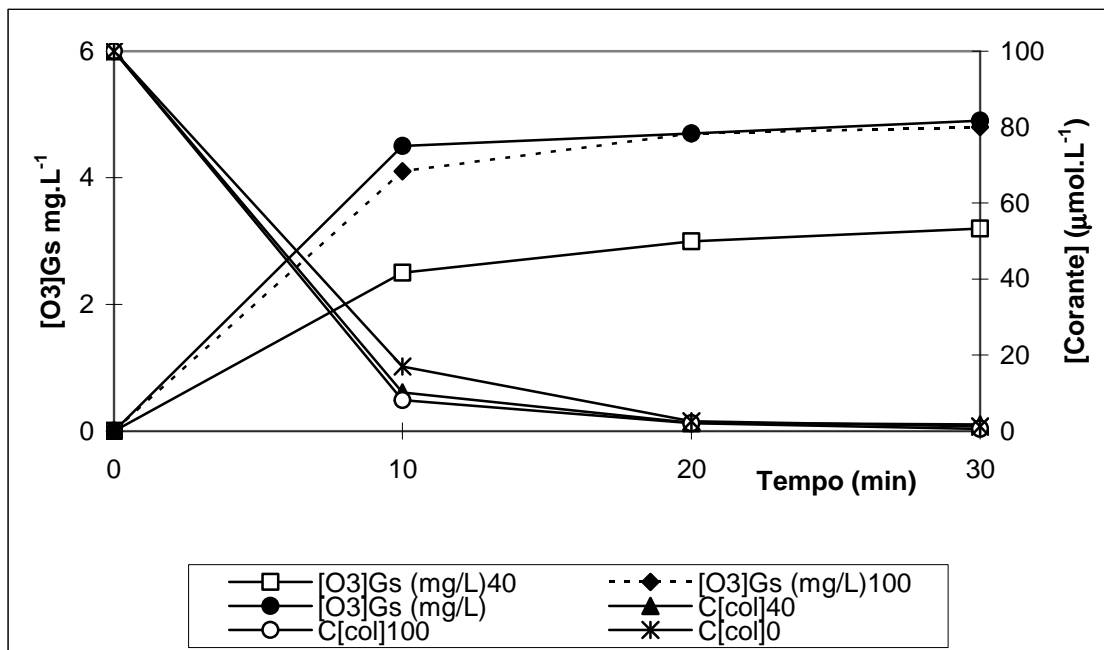


Figura IV. 20 Estrutura do corante Acid Red 27.

IV. 3. 1 Remoção do corante e teor de ozônio na corrente gasosa de saída

A remoção do corante Acid Red 27 ocorreu de forma rápida e extensiva na ausência de NaCl e na sua presença, mesmo em concentrações elevadas de sal (40 e 100 g.L⁻¹), como ilustrado na Figura IV.21. Verificou-se que a concentração de ozônio na saída ficou muito aquém do valor esperado, visto que na corrente de entrada essa concentração foi da ordem de 12 mg.L⁻¹. A medida de concentração de saída foi realizada durante 254 min, verificando-se apenas um incremento marginal no seu valor. Esses resultados reforçam a suspeita de mal funcionamento do analisador de ozônio.

Os resultados apresentados na Figura IV.21 indicam que não houve efeito significativo na remoção do corante com a adição de NaCl. Assim como evidenciado por vários autores (Muthukumar, *et al.*, 2001, Neppolian, *et al.*, 2002, Xia, *et al.*, 2003, Tang e Chen, 2004), o efeito foi insignificante na remoção de cor do corante com o aumento da concentração de NaCl.



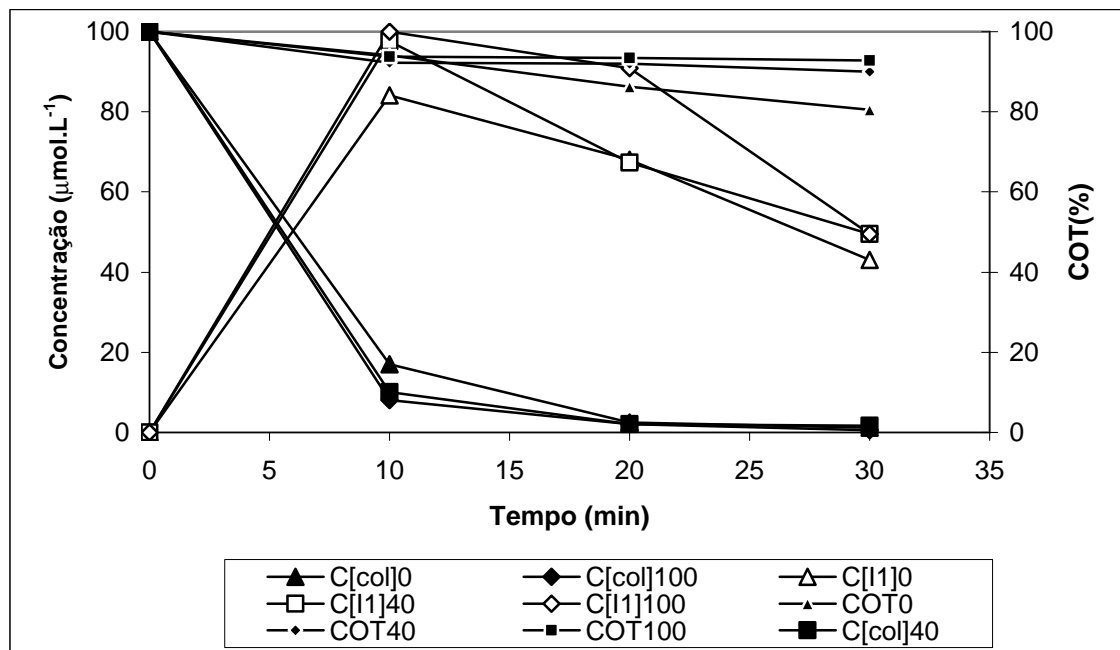
[O3]Gs 0: Concentração de ozônio no gás na saída do reator na ausência de NaCl;
 [O3]Gs 40: Concentração de ozônio no gás na saída do reator com [NaCl] = 40g.L⁻¹;
 [O3]Gs 100: Concentração de ozônio no gás na saída do reator com [NaCl] = 100g.L⁻¹;
 C[col]1 Concentração de corante Acid Red 27 na ausência de NaCl;
 C[col]40 Concentração de corante Acid Red 27 [NaCl] = 40g.L⁻¹;
 C[col]100 Concentração de corante Acid Red 27 [NaCl] = 100g.L⁻¹.

Figura IV. 21 Variação do teor de ozônio na fase gasosa (saída da coluna) e da concentração de corante (Acid Red 27), pH 7,5, ausência de NaCl e presença de NaCl nas concentrações de 40 e 100 g.L⁻¹.

IV. 3.2 Remoção do corante, do teor de carbono orgânico (COT) e formação de intermediários

Tal como ocorreu para o corante Orange II, a ozonização foi efetiva para remoção do corante, mas não promoveu acentuada remoção de carbono orgânico total (COT). Embora os resultados apresentados na Figura IV. 22 refiram-se a um período de 30 min, infere-se que a maior remoção de COT alcançada foi da ordem de 20%, na ausência de NaCl. Para as demais condições a remoção de COT foi de cerca de 10%, inferior aos valores atingidos nos ensaios com o corante Orange II. O prolongamento da ozonização por cerca de 4 h permitiu, para o ensaio na ausência de NaCl, alcançar remoção de COT de 80%.

Os perfis de formação do intermediário naftalênico também foram similares para todas as concentrações de NaCl investigadas, em particular, os perfis para 0 e 40 g.L⁻¹ foram praticamente idênticos.



C[co]0 Conc. de corante Acid Red 27 na ausência de NaCl; C[l1]0 Conc. de Espécies Naftalênicas na ausência de NaCl; COT0 Remoção de COT na ausência de NaCl

C[co]40 Concentração de corante Acid Red 27 [NaCl] = 40g.L⁻¹; C[l1]40 Conc. de Espécies Naftalênicas [NaCl] = 40g.L⁻¹; COT40 Remoção de COT com [NaCl] = 40g.L⁻¹;

C[co]100 Concentração de corante Acid Red 27 [NaCl] = 100g.L⁻¹; C[l1]100 Conc. de Espécies Naftalênicas [NaCl] = 100g.L⁻¹; COT100 Remoção de COT com [NaCl] = 100g.L⁻¹.

Figura IV. 22 Variação das concentrações de corante, de intermediário e de COT ao longo do tempo de ozonização: ensaio realizado em pH 7,5, ausência de NaCl e presença de NaCl nas concentrações de 40 e 100 g.L⁻¹.

IV. 4 ENSAIOS DE OZONIZAÇÃO COM ADIÇÃO DE TERC-BUTANOL

Para avaliar a ação dos radicais hidroxilas no processo de oxidação do corante, ensaios foram realizados adicionando-se ao meio uma substância que captura radicais livres, no caso o terc-butanol (López, *et al.*, 2004b).

IV. 4.1 Perfis de concentração de ozônio nas fases líquida e gasosa

Os ensaios foram realizados em dois valores de pH (5 e 7,5) e duas condições de salinidade (ausência de NaCl e presença de NaCl – 40g.L⁻¹) para o corante Orange II. No caso do corante Acid Red 27, apenas um valor de pH foi investigado (7,5) empregando-se as mesmas condições de salinidade anteriormente citadas.

A Figura IV. 23 mostra os perfis de concentração de ozônio obtidos nos ensaios realizados na ausência de NaCl para o corante Orange II.

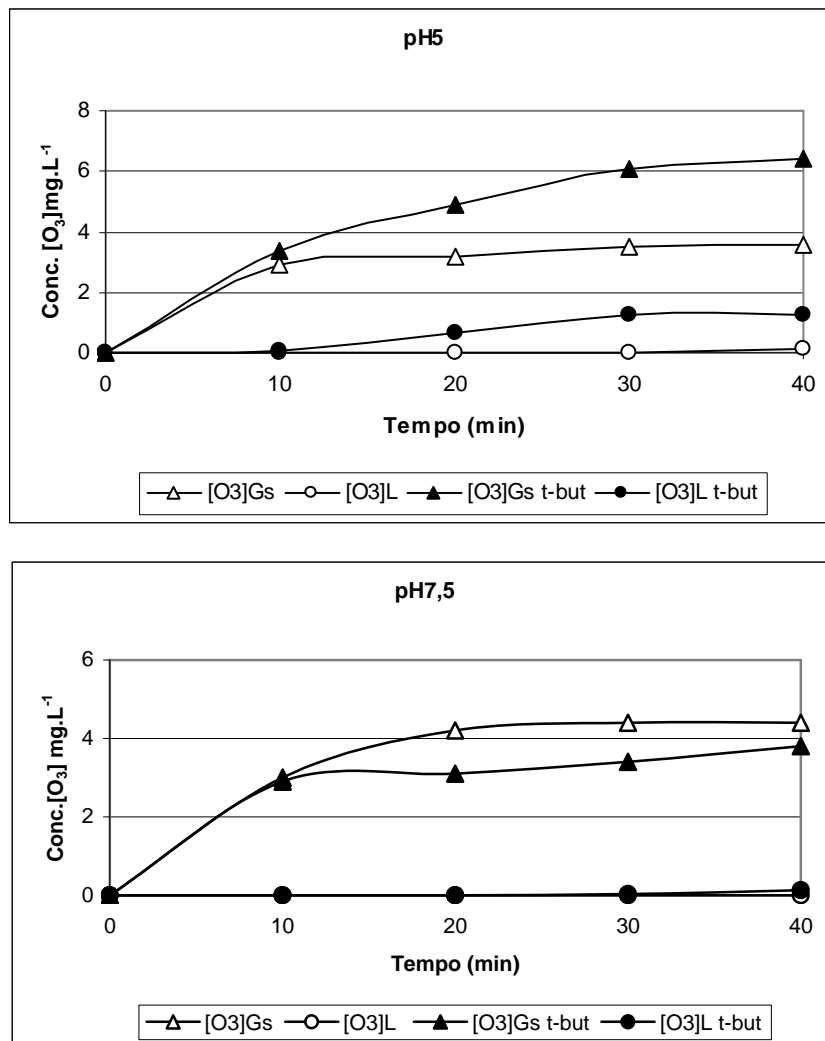


Figura IV. 23 Variação das concentrações de ozônio nas fases líquida e gasosa (saída da coluna), nos ensaios realizados com o corante Orange II em meio ausente de NaCl.

O efeito do terc-butanol foi diferente nos dois valores de pH testados. No caso de pH 5, foram detectadas maiores concentrações de ozônio nas fases líquida e gasosa quando esse capturador de radicais estava presente. Um efeito inverso foi observado para as concentrações de ozônio na fase gasosa em pH 7,5. Em pH mais alto há a formação de radicais $^{\circ}\text{OH}$, como em pH 7,5, e esses são capturados pelo terc-butanol que é um reconhecido capturador de radicais hidroxila, por isso não se observa O_3 dissolvido na fase aquosa (López, *et al.*,2004b, Muthukumar, *et al.*,2005). Nessa condição a concentração de ozônio na fase líquida manteve-se próxima de zero no período de 40 min. López (2004) observou concentrações praticamente nulas de ozônio na fase líquida em meio não salino e nos mesmos valores de pH investigados neste trabalho.

Os resultados obtidos no ensaio com 40 g.L^{-1} de NaCl estão apresentados na Figura IV. 24. Verifica-se que no ensaio realizado em pH 5, os resultados foram semelhantes aos apresentados na Figura IV. 23. Os perfis de concentração de ozônio na fase líquida foram similares na ausência e na presença de 40 g.L^{-1} de NaCl.

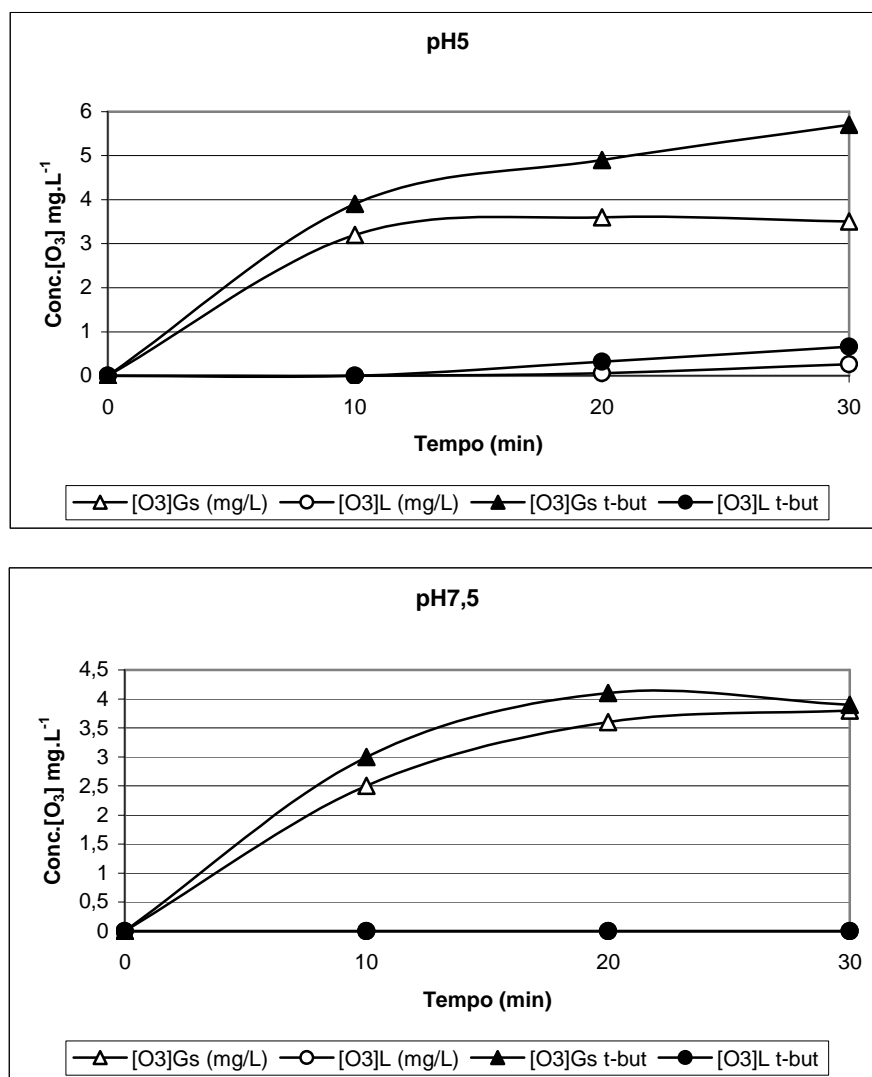


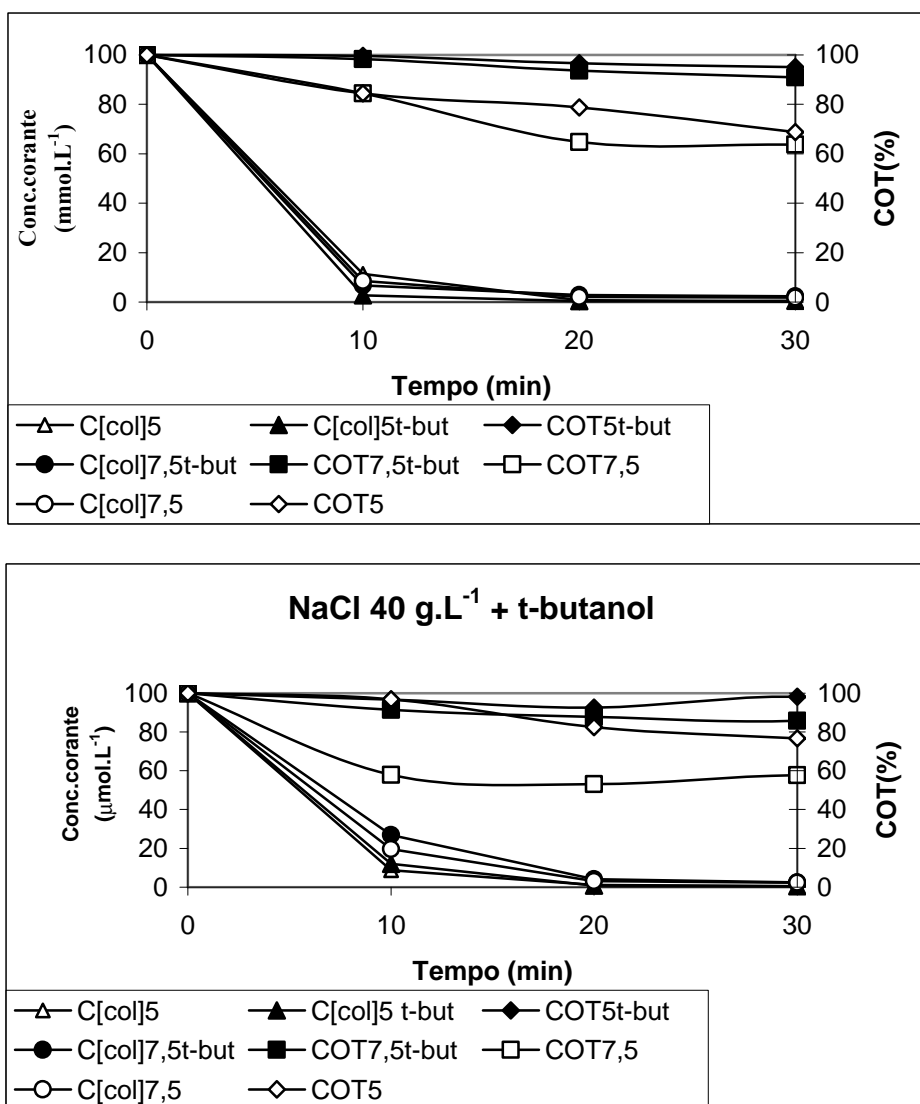
Figura IV. 24 Variação das concentrações de ozônio nas fases líquida e gasosa (saída da coluna), nos ensaios realizados com o corante Orange II em meio salino (40 g.L^{-1} de NaCl).

Para o corante Acid Red 27 o efeito do terc-butanol apresentou perfis de variação do teor de ozônio na fase gasosa à saída da coluna semelhante aos obtidos nos ensaios com o corante Orange II, no mesmo valor de pH.

IV. 4.2 Perfis de variação de concentração de corante e COT

A adição de terc-butanol não afetou de modo significativo a remoção do corante, que foi praticamente completa em 20 min, embora tenha ocorrido mais lentamente no ensaio com 40 g.L⁻¹ de NaCl (Figura IV. 25).

Como em pH 5 a espécie oxidante predominante é o O₃ molecular, era de se esperar que o terc-butanol não influencia-se negativamente na remoção de cor. O cloreto não apresentou efeito negativo em pH 5, provavelmente porque a taxa de reação do ozônio com o corante seja maior que a do ozônio com o cloreto.



C[col]5 Conc. de corante Acid Red 27 em pH 5; C[col]5 t-but Conc. de corante Acid Red 27 em pH 5;
 COT5 Remoção de COT em pH 5; COT5 t-but Remoção de COT em pH 5 com terc-butanol;
 C[col]7,5 Conc. de corante Acid Red 27 em pH 7,5; C[col]7,5 t-but Conc. de corante Acid Red 27 em pH 7,5;
 COT7,5 Remoção de COT em pH 7,5; COT7,5 t-but Remoção de COT em pH 7,5 com terc-butanol.

Figura IV. 25 Variação da concentração de corante e de COT nos ensaios com e sem adição de terc-butanol, realizados com o corante Orange II, nos valores de pH 5 e 7,5.

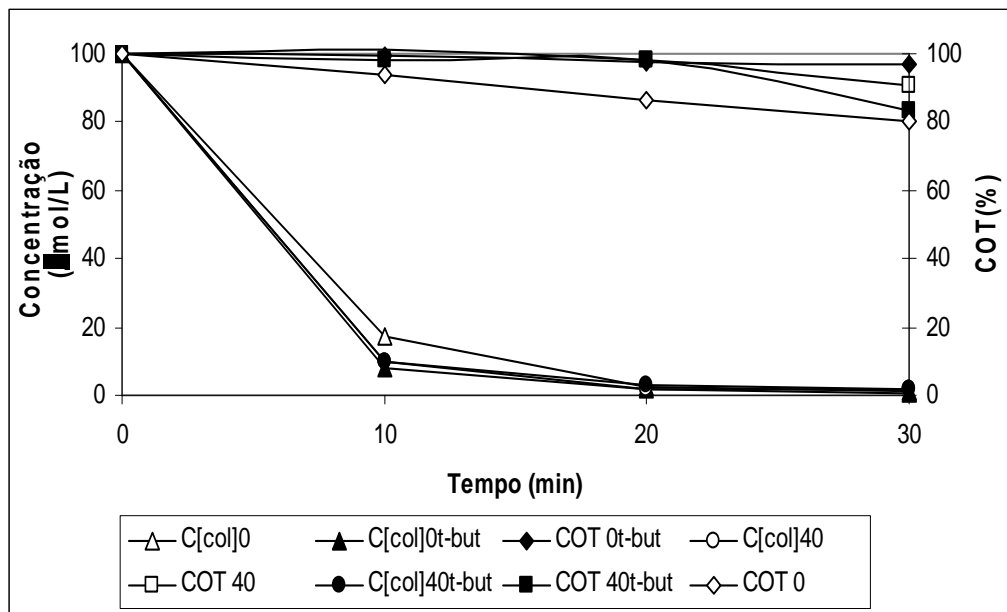
A adição de terc-butanol também afetou a remoção de COT, que ficou igual ou inferior a 10%, independentemente das condições testadas (salinidade e pH). López (2004), trabalhando com mesmo sistema isento de NaCl, obteve remoções da ordem de 5 a 10% do COT, para o mesmo corante, quando terc-butanol foi adicionado ao meio.

O efeito do terc-butanol na ozonização do corante Acid Red 27 foi similar ao observado para o corante Orange II, como ilustrado na Figura IV. 26.

É interessante notar que quando o terc-butanol não está presente, a concentração de COT diminui com a ozonização. Quando o terc-butanol está presente, tanto em pH 5 como em pH 7,5 a remoção de COT é menor. Isso era de se esperar em maior grau em pH 7,5, uma vez que há a captura do radical $^{\circ}\text{OH}$ pelo terc-butanol.

Para o corante Acid Red 27, na presença do terc-butanol (pH 7,5), foi observado que a remoção de cor aconteceu extensivamente, enquanto que a remoção de COT foi muito lenta. Isso evidencia o fato de que os intermediários formados são mais difíceis de serem degradados pelo O_3 do que pelo radical $^{\circ}\text{OH}$.

Ledakowicz, *et al.*, (2001) verificaram no estudo realizado com a ozonização do corante Acid Red 27 que a remoção de cor foi menor em pH ácido do que em pH 7, com adição do terc-butanol. Eles não puderam afirmar se o processo de descoloração ocorreu pela reação direta com O_3 ou com radical OH, isso porque a influência do terc-butanol na taxa de descoloração foi observada em solução ácida, onde o mecanismo radicalar não era esperado. A influência do terc-butanol na remoção de cor em pH ácido, foi atribuída aos diferentes compostos presentes na água após a ozonização.

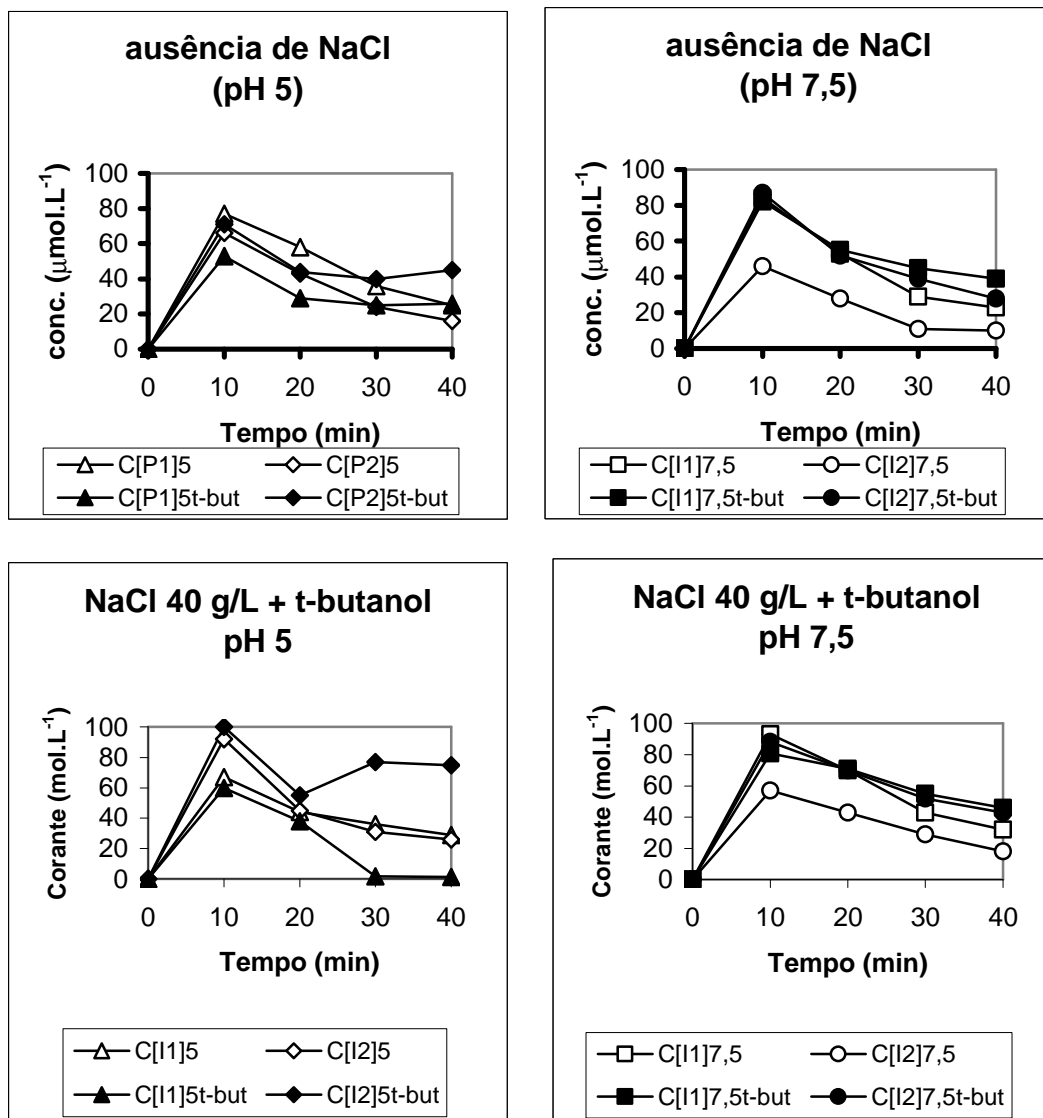


C[col]0 Conc. de corante Acid Red 27 na ausência de NaCl; COT0 Remoção de COT na ausência de NaCl;
 C[col]0 t-but Conc. de corante Acid Red 27 na ausência de NaCl e t-butanol; COT0 t-but Remoção de COT na ausência de NaCl e t-butanol;
 C[col]40 Concentração de corante Acid Red 27 [NaCl] = 40g.L⁻¹; COT40 Remoção de COT com [NaCl] = 40g.L⁻¹;
 C[col]40 t-but Conc. de corante Acid Red 27 [NaCl] = 40g.L⁻¹ e t-butanol; COT40 t-but Remoção de COT com [NaCl] = 40g.L⁻¹ e t-butanol;

Figura IV. 26 Variação da concentração de corante e de COT nos ensaios com e sem adição de terc-butanol, realizados com o corante Acid Red 27, pH 7,5.

IV. 4.3 Perfis de variação dos produtos intermediários para o corante Orange II com adição de terc-butanol

Embora os perfis de variação apresentem um comportamento relativamente complexo, verificou-se que a adição de terc-butanol ao meio com o corante Orange II provocou um pequeno aumento na concentração dos produtos intermediários. Isso fica mais claro ao se observar os valores dessas concentrações ao fim de 40 min (Figura IV. 27). Os valores residuais dos intermediários naftalênicos (I1) e benzênicos (I2) se mostraram, na maioria dos casos, menores nos ensaios sem adição de terc-butanol, tanto para os valores de pH 5 como 7,5, na ausência ou presença de NaCl. Essa tendência geral, entretanto não foi observada no experimento com pH 5 e 40 g.L⁻¹ NaCl (adição de terc-butanol), pois nesta condição o intermediário I1 foi removido a taxas expressivas a partir de 20 min, praticamente desaparecendo do meio após 30 min e o intermediário I2 apresentou comportamento oposto ao observado para o intermediário I1.



C[I1]5 Conc. de Espécies Naftalênicas em pH 5; C[I2]5 Conc. de Espécies Benzênicas em pH 5;
 C[I1]5 t-but Conc. de Espécies Naftalênicas em pH 5 com t-butanol; C[I2]5 t-but Conc. de Espécies Benzênicas em pH 5 com t-butanol;
 C[I1]7,5 Conc. de Espécies Naftalênicas em pH 7,5; C[I2]7,5 Conc. de Espécies Benzênicas em pH 7,5;
 C[I1]7,5 t-but Conc. de Espécies Naftalênicas em pH 7,5 com t-butanol; C[I2]7,5 t-but Conc. de Espécies Benzênicas em pH 7,5 com t-butanol;

Figura IV. 27 Variação dos intermediários naftalênicos (I1) e benzênicos (I2) no processo de ozonização do corante Orange II, nos valores de pH 5 e 7,5, na ausência e presença de NaCl (40 g.L⁻¹) com e sem adição do capturador de radicais terc-butanol.

IV. 5 TESTES DE RESPIROMETRIA

Para avaliar a degradação do corante e dos produtos intermediários em diferentes tempos de ozonização, experimentos de respirometria foram realizados de modo a permitir a obtenção das curvas de consumo de oxigênio ou ainda da demanda bioquímica de

oxigênio (DBO). Adicionalmente, foram feitas determinações de COT e DQO, outros dois indicadores do teor de matéria orgânica, nas amostras ozonizadas em diferentes tempos.

Os valores de DQO também apontam para a crescente remoção de matéria orgânica durante a ozonização, visto que a DQO apresentou tendência decrescente com a duração do experimento. Esta mesma tendência foi verificada par os resultados de COT. A Figura IV.28 ilustra a queda dos teores de matéria orgânica aferidos pelos três indicadores (DBO, DQO, COT) ao longo do ensaio de ozonização.

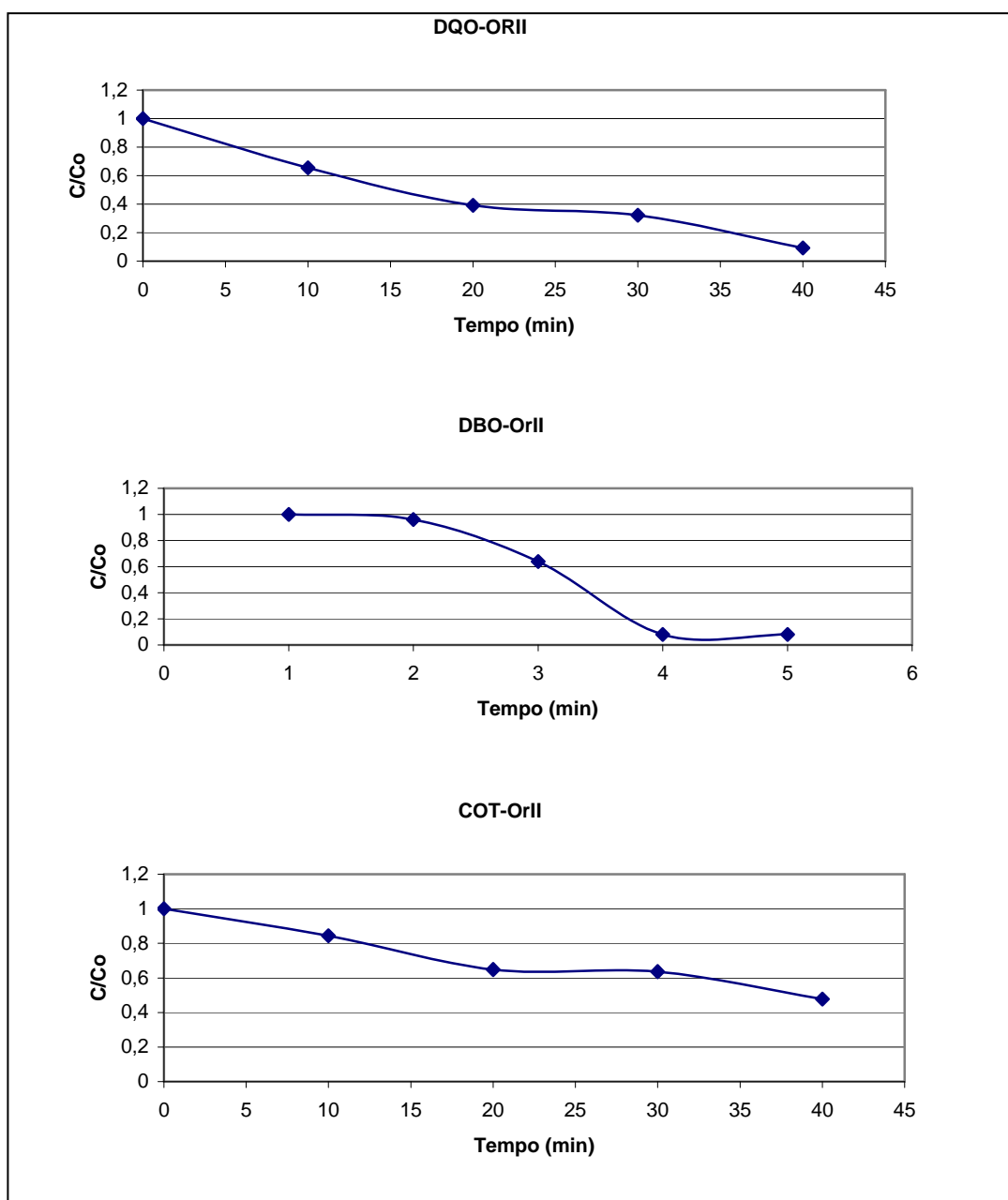


Figura IV. 28 Variação dos teores de matéria orgânica avaliados pelos indicadores DBO_u , DQO e COT nos ensaios de ozonização do corante Orange II.

A Figura IV.29 mostra os resultados referentes às curvas de DBO para amostras do corante Orange II ozonizadas por diferentes períodos de (0, 10, 20, 30 e 40 min). A denominada DBO última (DBOu), correspondente ao valor de *plateau* das referidas curvas, mostrou-se decrescente com o tempo de ozonização, atingindo os valores de 32, 31, 24, 9 e 9 mg.L⁻¹ para os tempos de ozonização de 0, 10, 20, 30 e 40 min, respectivamente. Os dados do teste em branco (ausência de corante) revelam um valor de DBO última de 7 mg.L⁻¹. Se os valores anteriormente citados forem corrigidos com o valor do teste em branco, obtêm-se valores de DBOu de 25, 24, 17, 2 e 2 mg.L⁻¹ para os respectivos tempos de ozonização. Verificou-se que a partir de 30 min de ozonização a maior parte da matéria orgânica biodegradável foi removida. No entanto, compostos intermediários, mesmo presentes em baixa concentração podem inibir a biodegradação, mascarando os resultados e impedindo de concluir que houve efetivamente remoção significativa da matéria orgânica biodegradável.

Para verificar se os produtos intermediários, acumulados durante a ozonização podiam afetar a biodegradação da matéria orgânica, foram realizados testes nos quais foi feita adição de 50 mg.L⁻¹ de acetato de sódio ao efluente não ozonizado (T0) e após a ozonização (T40). Levando-se em conta o resultado do teste em branco Figura 29a, do consumo de oxigênio (8 mg.L⁻¹) do corante (32 mg.L⁻¹ – Figura IV. 29b) e do acetato de sódio (34 mg/L), a curva de variação da DBO para o ensaio conduzido com a amostra denominada T0 deveria atingir um valor de DBOu em torno de 74 mg.L⁻¹. O resultado apresentado na Figura IV. 30a indica que esse valor de *plateau* foi praticamente atingido, no entanto, observa-se um período *lag* de adaptação dos microrganismos presentes no teste ao corante.

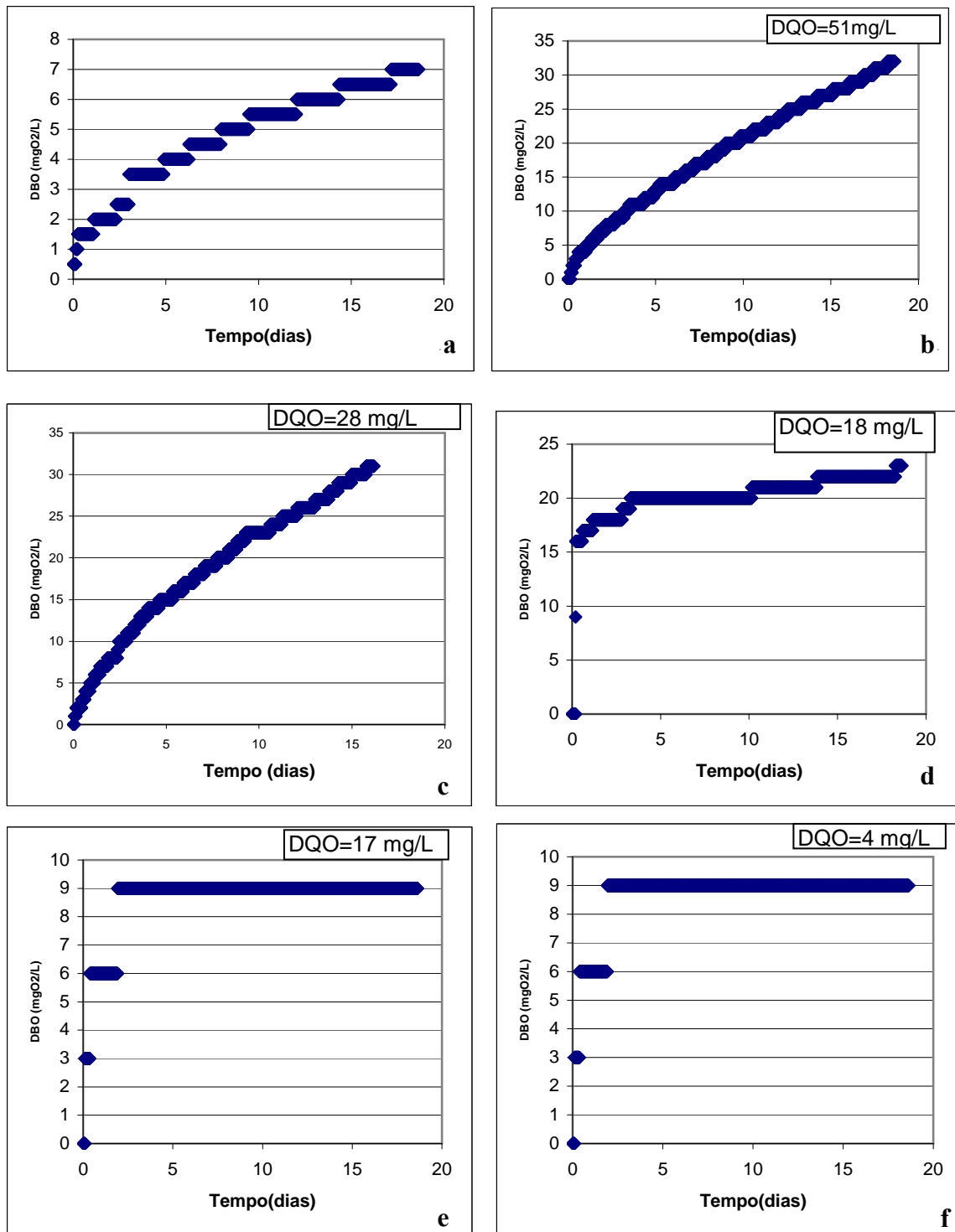


Figura IV. 29 Perfis de variação de oxigênio dissolvido, expressos como DBO, para amostras de Orange II. a) Branco, b) T0 – antes da ozonização, c) T10 – após 10 min de ozonização, d) T20 - após 20 min de ozonização, e) T 30 - após 30 min de ozonização, f) T 40 – após 40 min de ozonização. Os valores de DQO das amostras também estão registrados para os ensaios b, c, d, e, f.

Para a amostra ozonizada, no entanto, houve severa inibição da ação microbiana, visto que não foi atingido sequer o valor de *plateau* teórico correspondente ao acetato de sódio (34 mg.L^{-1}). Embora o gráfico da Figura IV. 30b apresente escala de tempo até 2 dias, o ensaio foi conduzido por 20 dias, mantendo-se esse valor terminal ($6,6 \text{ mg.L}^{-1}$). Observa-se também pronunciada fase *lag*, indicativa de alguma adaptação, que não foi suficiente para promover a biodegradação da matéria orgânica. Apenas uma parte muito pequena, ou até insignificante da matéria orgânica, se for considerado o resultado do ensaio em branco, foi degradada no teste.

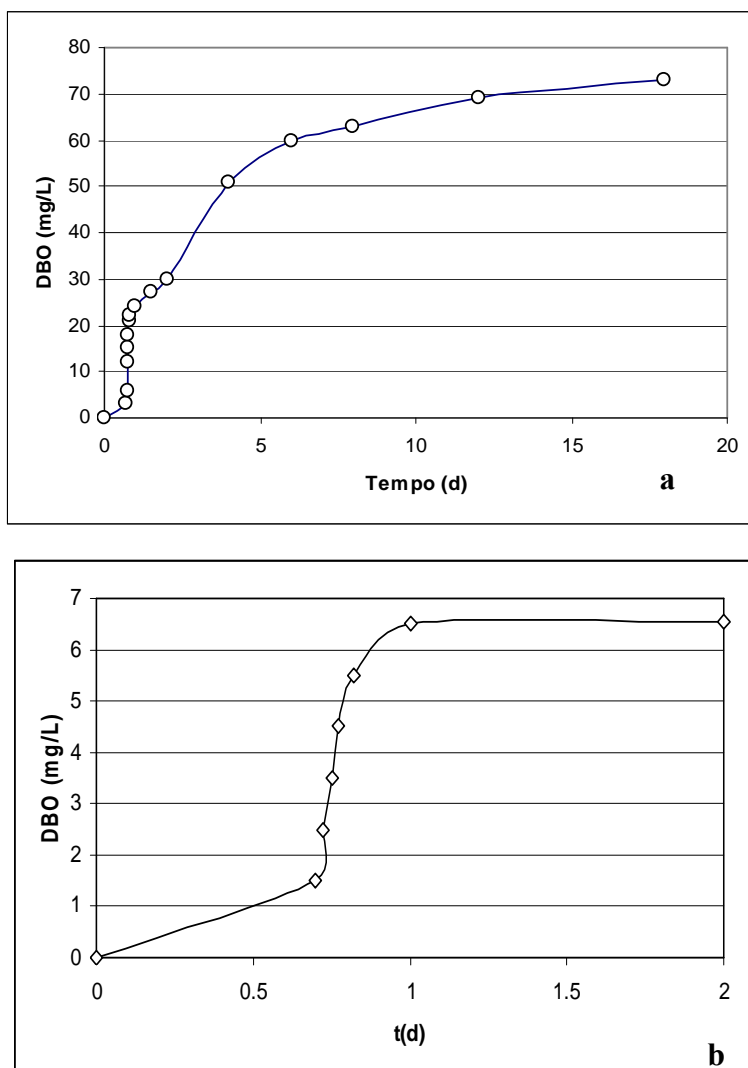


Figura IV.30 Curvas de variação de DBO para amostras contendo corante Orange II antes da ozonização (a) e após 40 min de ozonização (b), com 50 mg.L^{-1} de acetato de sódio adicionado na amostras.

Assim, a menor DBO da amostra ozonizada, tal como mostrada na Figura IV.31 pode ser atribuída a uma mudança nas características do efluente após a ozonização provocada pela presença de intermediários que inibem a biodegradação.

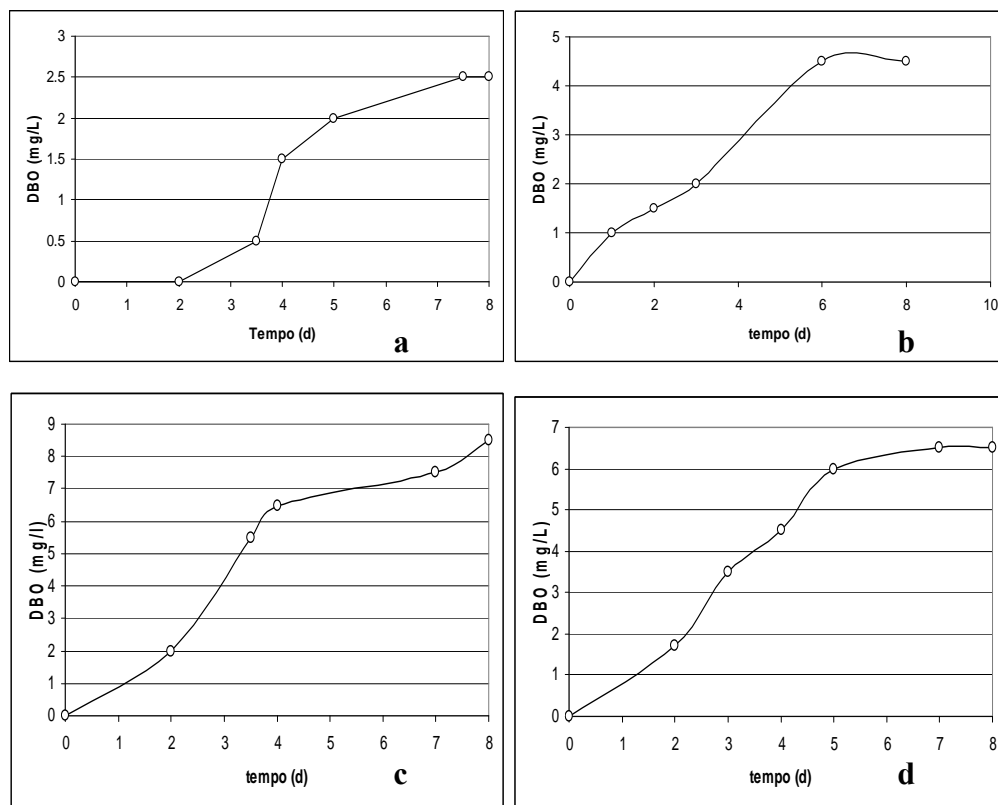


Figura IV. 31 Perfis de variação de oxigênio dissolvido, expressos como DBO, para amostras contendo Acid Red 27. a) Branco de referência, b) T0 – sem ozonização, c) T30 – após 30 min de ozonização, d) T40 – após 40 min de ozonização.

Com relação ao corante Acid Red 27, observou-se que ele apresentou baixa biodegradabilidade e, ademais, a ozonização não foi capaz de aumentar a biodegradabilidade do efluente. Os resultados mostrados na Figura IV.32 evidenciam que a DBO manteve-se praticamente constante e baixa após a ozonização, com leve tendência de aumento nos 10 min finais. Pode ter ocorrido degradação parcial da estrutura do corante, com geração de pequena quantidade de produtos passíveis de biodegradação. No decorrer da ozonização os valores de DQO e COT apresentaram tendência decrescente, o que indica que houve degradação da molécula de corante, com formação de produtos oxidados e provável mineralização (Figura IV.33).

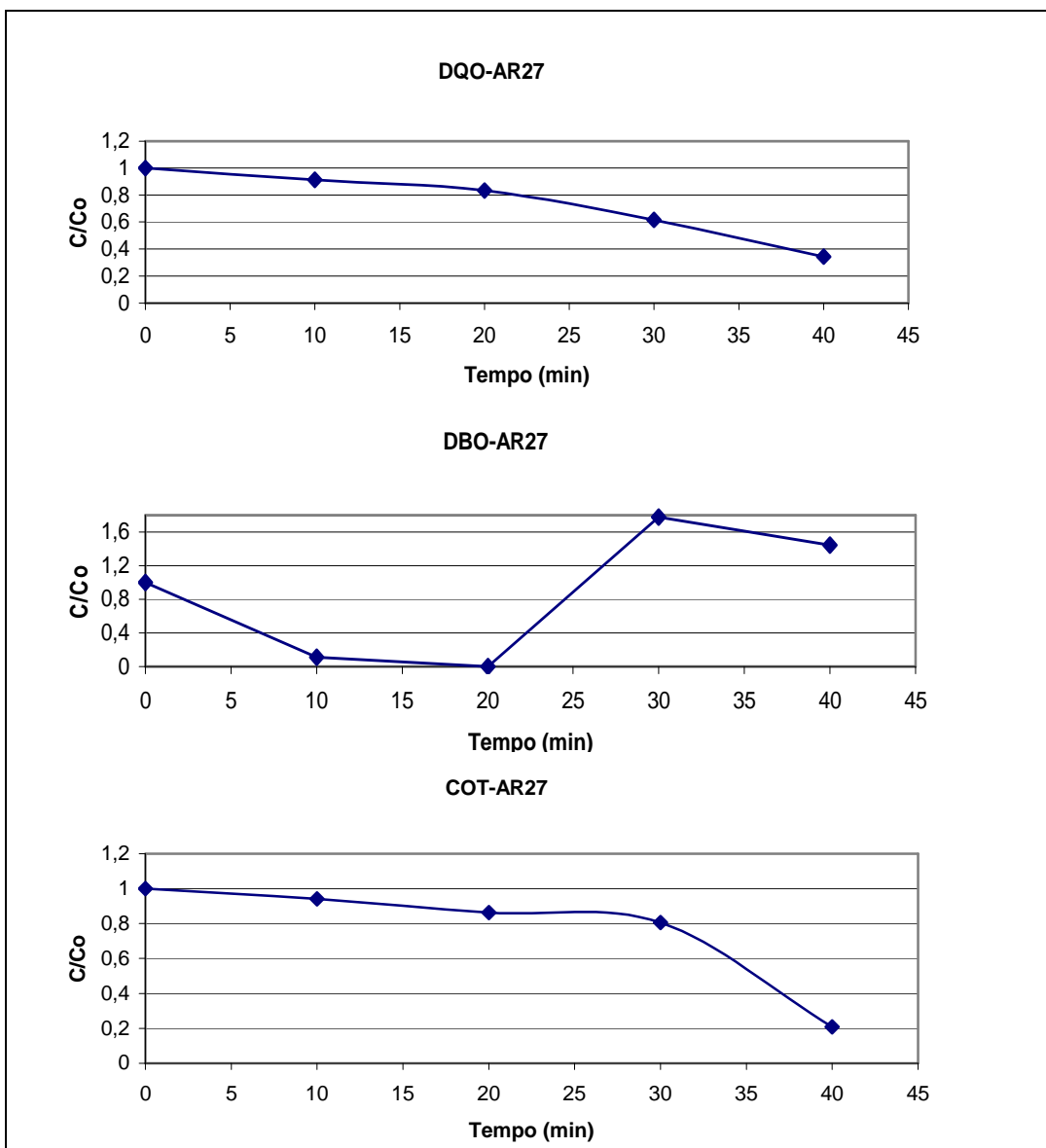


Figura IV. 32 Variação dos teores de matéria orgânica avaliados pelos indicadores DBOu, DQO e COT nos ensaios de ozonização do corante Acid Red 27.

Tal como feito para o corante Orange II, verificou-se para o corante Acid Red 27 a inibição dos organismos presentes no teste da DBO causada pelo próprio corante e/ou por seus produtos de degradação. Empregou-se acetato de sódio (50 mg.L^{-1}) adicionado às amostras coletadas antes e após a ozonização. Os resultados estão apresentados na Figura IV. 33.

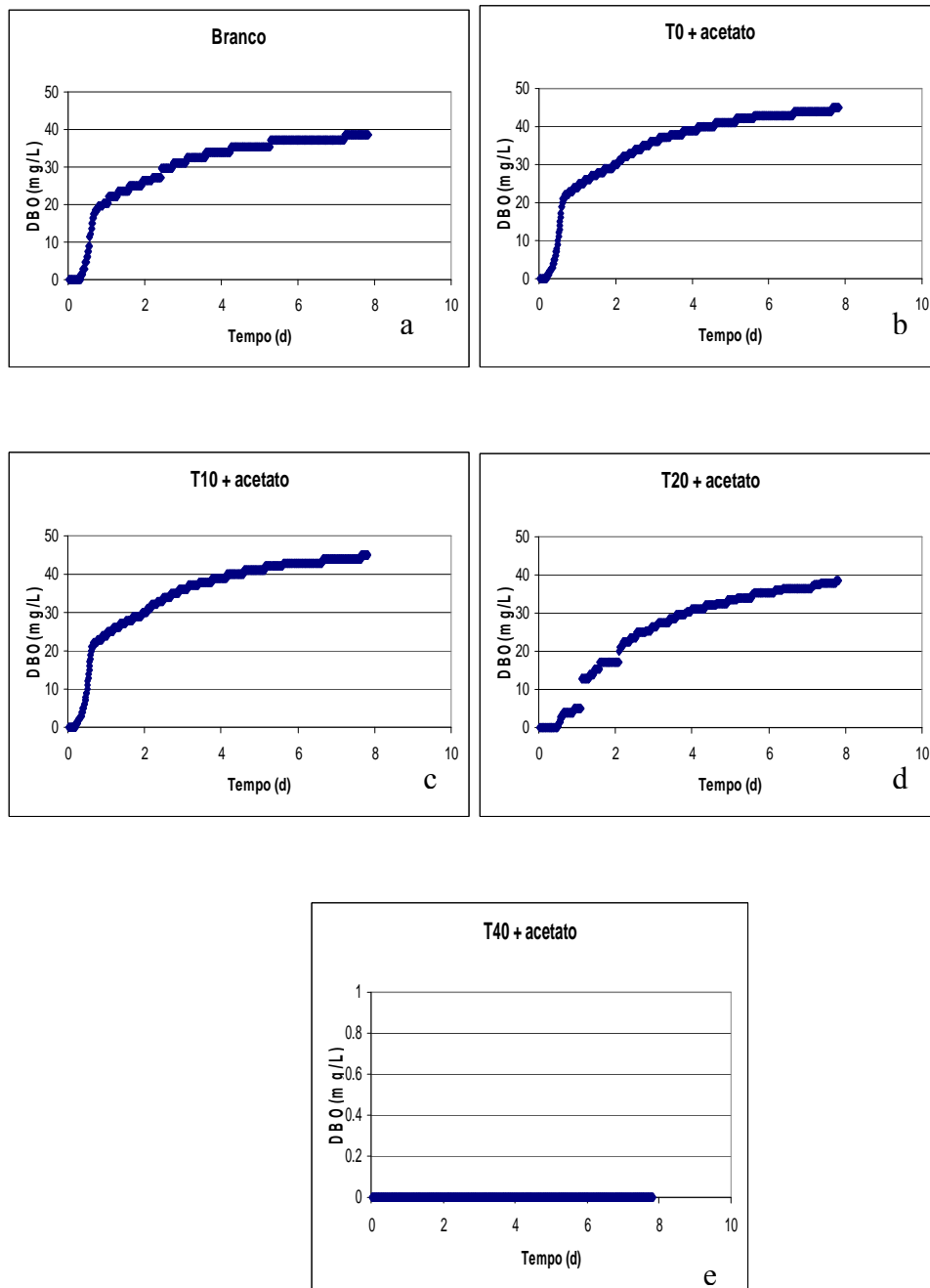


Figura IV. 33 Perfis de variação de oxigênio dissolvido, expressos como DBO, para amostras contendo acetato de sódio (50 mg.L^{-1}) a) Branco de referência, contendo acetato e sem corante b) T0 – antes da ozonização c) T10 - após 10 min de ozonização, d) T 20 – após 20 min de ozonização e) T40 após 40 min de ozonização. T0, T10, T20 e T40 foram complementadas com acetato de sódio.

Neste ensaio em branco, em particular, empregou-se apenas acetato, sem o corante. O valor da DBOu atingido foi de 39 mg.L^{-1} , que descontando-se o valor do ensaio controle (apenas água) resulta em $36,5 \text{ mg.L}^{-1}$. Este último valor está bastante próximo da DBO teórica, calculada a partir da estequiometria da reação de oxidação do acetato de sódio, na concentração empregada, o que dá validade ao ensaio.

Para a amostra sem ozonização (T0) o valor da DBOu, descontado o valor obtido no ensaio controle e o valor correspondente ao acetato, conduz a um valor de DBOu de apenas 4 mg.L^{-1} , baixo quando se considera a sensibilidade e precisão do método. Assim, a DBOu desse ensaio correspondeu praticamente ao consumo de oxigênio para oxidar o acetato de sódio. Comportamento semelhante foi observado para a amostra T10.

Verificou-se que após 20 min de ozonização já houve uma pequena inibição das bactérias presentes no ensaio de respirometria, visto que o acetato não foi completamente biodegradado, ficando a DBOu aquém do valor previsto.

Para o ensaio com a amostra ozonizada por 40 min confirmou-se o efeito inibitório dos produtos intermediários na microflora presente no ensaio de respirometria, posto que nesta condição a inibição foi completa.

Os resultados dos testes de respirometria revelaram que para ambos os corantes testados a ozonização produz intermediários que inibem os microrganismos degradadores presentes nos ensaios de determinação da DBO. Portanto, procede a preocupação com a qualidade ambiental dos efluentes ozonizados, que podem afetar seriamente a microbiota dos sistemas aquáticos.

Capítulo V

V - Conclusões

A remoção de cor foi muito efetiva pelo processo de ozonização nas diferentes condições de pH, e concentração de NaCl estudadas, entretanto, essas condições influenciaram significativamente no processo.

O pH, a presença de NaCl e terc-butanol alteram a solubilidade do ozônio na água. Portanto, a determinação do coeficiente de transferência de massa volumétrica (k_{La}), da constante de velocidade de auto-decomposição do ozônio (k_C) e do coeficiente de divisão do ozônio (m) foi afetada neste estudo, principalmente em elevadas concentrações de NaCl e em pH alcalino.

A remoção de cor foi mais efetiva em pH ácido para todas as concentrações de NaCl estudadas. Provavelmente ocorreu o ataque direto do ozônio molecular na dupla ligação N=N dos corantes azóicos. Assim, uma eliminação total e rápida da cor foi obtida, mas por outro lado a redução de COT foi pequena, atingindo cerca de 35% após 40 min de ozonização para todas as concentrações de NaCl investigadas. Portanto, no processo por via direta ocorreu somente oxidação parcial do corante, e a maior parte de matéria orgânica permaneceu em solução sob forma de produtos intermediários refratários a oxidação por O_3 molecular.

Em pH 7,5 observou-se que houve rápida remoção de cor para o corante Orange II, comportamento similar ao ensaio em pH 5. Nesta condição a redução de COT foi maior, atingindo cerca de 50 % após 40 min de ozonização para as menores concentrações de NaCl (0 e 1g.L^{-1}). Em meio altamente salino o efeito negativo do sal foi evidenciado, com menor remoção de matéria orgânica.

Para o Acid Red 27 a remoção do corante ocorreu de forma rápida e extensiva para as diferentes concentrações de NaCl. Observou-se também que a remoção de COT foi menor do que para o corante Orange II, da ordem de 20%. Na ausência de NaCl e em meio salino a remoção foi de 10%.

No meio alcalino (pH = 9) a oxidação do corante Orange II ocorreu por via radicalar. A remoção de cor foi mais lenta, mas a remoção de COT atingiu valores de 50% de redução. Isto indica que o radical $^{\circ}\text{OH}$ pode estar atacando outras partes da moléculas e não preferencialmente a ligação N=N. O efeito prejudicial do sal foi marcante, com o aumento da concentração de NaCl a remoção de COT foi reduzida para 20%.

Com a adição do terc-butanol, capturador de radicais $^{\circ}\text{OH}$, o mecanismo por via molecular deveria ter sido privilegiado. No entanto, neste estudo verificou-se resultados similares para remoção de cor nas diferentes condições de pH estudadas. Para os dois corantes (Orange II e Acid Red 27) a remoção total de cor não alterou-se. Em relação a remoção do teor de matéria orgânica o terc-butanol afetou-a negativamente nos pH 5,0 e 7,5, ou seja, as remoções de COT observadas foram menores do que aquelas obtidas sem adição do terc-butanol.

Nos ensaios de respirometria, verificou-se tanto para o corante Orange II, como para o Acid Red 27, que a presença de compostos intermediários, mesmo presentes em baixas concentrações, inibem a biodegradação. A fim de verificar se os produtos intermediários afetaram a biodegradação, foram realizados testes adicionando-se acetato de sódio (substrato com alta biodegradabilidade) ao efluente não ozonizado e após a ozonização. Observou-se que na presença dos intermediários nem mesmo o acetato de sódio foi biodegradado, o que confirma o efeito inibitório desses intermediários. Ficou evidenciado para ambos os corantes testados que os intermediários produzidos na ozonização promovem inibição microbiana.

Enfim pode-se concluir que o processo de ozonização foi efetivo para remoção de cor, agindo diretamente na dupla ligação do corante, mas os produtos intermediários formados durante o processo inibiram a remoção dos compostos orgânicos.

VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abraham, T.E., Senan, R.C., Shaffiqu, T.S., *et al.*, 2003, “Bioremediation of Textile Azo Dyes by an Aerobic bacterial Consortium Using a Rotating Biological Contactor”, *Biotechnol. Prog.*, v. 19, pp.1372-1376.

Allman, J., Ho, A.H.L., Ranson, C., Sugden, J.K., 1995, “Effect of food dyes on radicals in aqueous media”, *International Journal of Pharmaceutics*, v.115, pp.241-243.

Alaton, I.A., 2003, “The effect of pre-ozonation on the biocompatibility of reactive dye hydrolysates”, *Chemosphere*, v.51, pp.825-833.

Alaton, I.A., 2004, “Homogenous photocatalytic degradation of a disperse dye and its dye bath analogue by silicadodecatungstic acid”, *Dyes and Pigments*, v.60, pp.167-176.

Alinsafi, A., Motta, M., Bonté, S.L., *et al.*, 2006, “Effect of variability on the treatment of textile dyeing wastewater by activated sludge”, *Dyes and Pigments*, v. 69, pp.31-39.

Andreottola, G., Oliveira, E.L.O., Foladori, P., *et al.*, 2005, “Método respirométrico para o monitoramento de processos biológicos”, *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 10, n.1 (jan/mar), pp.1-18.

APHA/AWWA/WEF- A., 1998, *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 19 ed. New York, USA, APHA.

Asselborn, V.M. e Domitrovic, Y.Z., 2000, “Aplicación de Bioensayos Algaes Uniespecificos para Evaluar Los Efectos de un Efluente Textil y la Calidad del Agua de una Laguna Receptora (Corrientes, Argentina)”, In: *Ecotoxicologia: Perspectivas para o Século XXI*, São Carlos/SP.

Azevedo, E.B., 2003, *Identificação e Toxicidade de Intermediarios Formados na Degradação Fotocatalítica e na Ozonização de Fenol em Meio Salino*, Tese de D.Sc., PEQ/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Bhattacharyya, A., Kawi, S. and Ray, M.B., 2004, “Photocatalytic degradation of orange II by TiO₂ catalysts supported on absorbents”, *Catalysis Today*, v.98, pp.431-439.

Bandara, J., Nadtochenko, V., Kiwi, J. and Pulgarin, C., 1997, “Dynamics of oxidant addition as a parameter in the modelling of dye mineralization (orange II) via advanced oxidation technologies”, *Water Science and Technology*, v.35, n.4, 87-93.

Balcioglu, I.A. e Ötoker, M., 2003, “Treatment of pharmaceutical wastewater containing antibiotics by O₃ and O₃/H₂O₂ processes”, *Chemosphere*, v.50, 85-95.

Baptista, I.E., Soares, C.H.L., Matias, W.G. e Lopes, E.B., 2000, “Avaliação da Toxicidade Aguda de Efluentes de uma Indústria Têxtil Utilizando *Daphnia magna*, *Poecilia reticulata* e *Vibrio fischeri* como Bioindicadores”. In: *Ecotoxicologia: Perspectivas para o Século XXI*, São Carlos/SP, Set.

Bell, J. e Buckley, C.A., 2003, "Treatment of a textile dye in the anaerobic baffled reactor", *Water SA*, v.29, n.2, 129-134.

Beltrán, F.J., , 2004, *Ozone Reaction Kinetics for Water and Wastewater Systems*, 1 ed., Badajoz, Spain, Lewis Publishers.

Benbelkacem H., , 2002, *Modélisation du transfert de matière couplé ave réaction chimique en réacteur fermé. Application au procédé d'ozonation*, Ph.D. dissertation, INSA, Toulouse, France.

Bertazzoli, R. e Pelegrini, R., 2002, "Descoloração e Degradação de Poluentes Orgânicos em Soluções Aquosas Através do Processo Fotoeletroquímico", *Quimica Nova*, v. 25, n. 3, 477-482.

Bila, D.M., 2003, *Degradação do Estrogênio Natural 17 β -Estradiol, um Perturbador Endócrino, por Ozonização e Peroxidação*, Exame de Qualificação, PEQ/COPPE/UFRJ, e Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Biñ, A. e Roustan, M., 2000, "Mass transfer in ozone reactor". In: *International specialised Symposium IOA, Fundamental and Engineering Concepts for Ozone reactor Design*, pp. 99-123, Toulouse, France, march.

Blanco, C.C., Camaña, A.M., Barrero, F.A., 1996, "Derivative spectrophotometric resolution of mixtures of the food colourants Tartrazine, Amaranth and Curcumin in a micellar medium", *Talanta*, v.43,1019-1027.

Brito, H.G., 2004, *Estudo da Ozonização de Azo-Corantes Utilizados na Indústria Têxtil*, Dissertação de Mestrado, Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Buckley,C.A., 1992, "Membrane Technology for the treatment of dyehouse effluents", *Water Science and Technology*, v.25, n.10,203-209.

Caprio, V., Insola, A., Lignola, P.G., Volpicelli, G., 1982, "A new attempt for the evaluation of the absorption constant of ozone in water", *Chemical Engineering Science*, v.37, n.1, pp.122-123.

Carliell, C.M., Barclay, J.S., Shaw, C., Wheatley, A.D., Buckley, C.A., 1998, "The effect of salts used in textile dyeing on microbial decolourisation of a reactive azo dye", *Environmental Technology*, v.19, pp. 1133-1137.

Carriere J., Jones J.P., Broadbent A. D., 1993, "Decolorization of textile dye solutions", *Ozone science & Engineering*, v.15, pp.189-200.

Catunda, S.Y.C., Deep,G.S.,Van Haandel, A.C., Freire, R.C.S., 1998, "Métodos Alternativos para medição da Taxa de Consumo de Oxigênio em Sistemas de Lodo Ativado", *SBA Controle &Automação*, v.9, n.2, pp.57-64.

Ciardelli,G., Capenelli G., Bottino, A., 2001, "Ozone treatment of textile wastewaters for reuse", *Water Science & Technology*, v.44, n.5, pp.61-67.

Chagas, E.P. e Durrant, L.R., 2001, "Decolorization of azo dyes by *Phanerochaete chrysosporium* and *Pleurotus sajorcaju*", *Enzyme and Microbial Technology*, v.29, pp.473-477.

Chen, Q.-C., Mou, S.-F., Hou, X.-P., Riviello, J.M., Ni, Z.-M., 1998, "Determination of eight synthetic food colorants in drinks by high-performance ion chromatography", *Journal of Chromatography A*, v.827, pp.73-81.

Chen, Y.H., Chang, C.Y., Huang, S.F. *et al.*, 2002, "Decomposition of 2-naphthalene sulfanote in aqueous solution by ozonation with UV radiation", *Water Research*, v.36, pp. 4144-4154.

Chen, H., Wang, R.F. e Cerniglia, C.E., 2004, "Molecular cloning, overexpression, purification, and characterization of an aerobic FMN-dependent azoreductase from *Enterococcus faecalis*", *Protein Expression & Purification*, v.34, pp.302-310.

Chu, W. e Ma, C.W., 2000, "Quantitative prediction of direct and indirect dye ozonation kinetics", *Water Research*, v.34, n.12, pp.3153-3160.

Clever, H.L., 1983, "Sechenov Salt-Effect Parameter", *J. Chem. Eng.*, v. 28, pp.340-343.

Colour Index, <http://www.colour-index.org/newusr1.asp>, 25/04/2004.

Danckwerts, P.V., 1970, *Gas-Liquid Reactions*, Mc Graw-Hill Book Company, E.U.A.

Daneshvar, N., Rabbani, M., Modirshahla, N. e Behnajady, M. A., 2004, "Kinetic modeling of photocatalytic degradation of Acid Red 27 in UV/TiO₂ process", *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, v.168, n.1-2, pp.39-45.

Daneshvar, N., Rabbani, M., Modirshahla, N. e Behnajady, M. A., 2004, "Critical effect of hydrogen peroxide concentration in photochemical oxidative degradation of C.I. Acid Red 27 (AR27)", *Chemosphere*, v.56, n.10, pp.895-900.

Daneshvar, N., Rabbani, M., Modirshahla, N. e Behnajady, M. A., 2005, "Photooxidative degradation of Acid Red 27 in a tubular continuous-flow photoreactor: influence of operational parameters and mineralization products", *Journal of Hazardous Materials B*, v.118, pp.155-160.

Debellefontaine, H., Foussard, J.N., 2000, "Wet Air Oxidation for the treatment of industrial wastes. Chemical aspects, reactor design and industrial applications in Europe", *Waste Management*, v.20, pp.15-25.

Delgado, C., 1999, *Cinetique d'ozonation d'eaux residuaires colorees*, DEA Génie des Procédés, INSA, Toulouse-França.

DEPA – Danish Environmental Protection Agency, *Toxicity and Fate of Azo Dyes*, 1999, www.mst.dk/publications em Março-2004.

Domitrovic, Y.Z. e Asselborn, V.M., 2000, Analisis del Fitoplancton de una Laguna Impactada por la Descarga de un Efluente Textil (Corrientes, Argentina) Aplicación de Bioensayos de Toxicidad, In: *Ecotoxicologia: Perspectivas para o Século XXI*, São Carlos/SP.

Feng, J., Hu, X. e Yue, P.L., 2005, “Discoloration and mineralization of Orange II by using a bentonite clay-based Fe nanocomposite film as a heterogeneous photo-Fenton catalyst”, *Water Research*, v.39, n.1, pp.89-96.

Fernandes, J.G.S., Van Haandel, A., Cavalcanti, P.F.F., Coura, L.R., 2001, “Utilização da respirometria no Controle operacional de sistemas Aeróbios de tratamento de Águas Residuárias- A experiência da Cetrel”, *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v.6, n.3, jul/set e n.4 out/dez, pp.131-137.

Fonseca, F.V., 2003, “Estudo da Degradação de Corantes Reativos por Oxidação com H₂O₂ fotoativado com Radiação Ultravioleta”, Dissertação de Mestrado, Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Forgacs, E., Cserháti, T., Oros, G., 2004, “Removal of Synthetic Dyes from Wastewaters: a review”, *Environment Internacional*, v.30 ,pp. 953-971.

Foussard J. N., Debellefontaine H., 2000, Thermodynamic basis for the solubility and diffusivity of ozone in water, International specialised In: *Symposium IOA, Fundamental and Engineering Concepts for Ozone reactor Design*, pp.35-38, Toulouse/France, March.

Fuh, M-R e Chia, K-J., 2002, “Determination of sulphonated azo dyes in food by ion-pair liquid chromatography with photodiode array and electrospray mass spectrometry detection”, *Talanta*, v.56, pp.663-671.

Gäehr F., Hermanutz, F., Oppermann, W., 1994, “Ozonation an important technique to comply with new german laws for textile wastewater treatment”, *Water Science & Technology*, v.30, n.3, pp. 255-263.

Gökçen, F. e Ozbelge, T.A., 2005, “Enhancement of biodegradability by continuous ozonation in Acid Red-151 solutions and kinetic modeling”, *Chemical Engineering Journal*, v.114, pp.99-104.

Guaratini, C.C.I. e Zanoni, M.V.B., 2000, “Corantes Têxteis”, *Química Nova*, v. 23 n.1, pp.71-78.

Hamlin, J.D., Phillips, D.A.S., Whiting, A., 1999, “UV/Visible spectroscopic studies of the effects of common salt and urea upon reactive dye solutions”, *Dyes and Pigments*, v.41, pp.137-142.

Hassemer, M.E.N., e Sens, M.L., 2002, "Tratamento do Efluente de uma Industria Têxtil. Processo Físico-Químico com Ozônio e Coagulação/Floculação", *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 7, n.1, jan/mar e n.2, abr/jun, pp.30-36.

Himmelblau, D.M., 1960, "Solubilities of Inert Gases in Water", *Journal of Chemical and Engineering Data*, v.5, n.1, January.

Hoigné, J. and Bader, H., 1983, "Rate constant of the reaction of ozone with organic and inorganic compounds. I: non-dissociating organic compounds", *Water Research*, v.17, pp.173-183.

<http://www.chemicaland21.com/arokorhi/specialtychem/finechem>, 23/05/2005.

<http://www.chemexper.com/chemicals/supplier/cas/633-96-5.html>, 23/05/2005.

http://www.emarketlabo.com/product_list.php, 23/05/2005.

http://www.finep.gov.br/PortalDDP/relatorio_setorial, 27/04/06.

<http://www.reptox.csst.qc./Produit.asp>, 10/11/2005.

<http://www.qmc.ufsc.br/qmcweb/artigos/dye/corantes.html>, 18/03/2004.

Kakmaz, M., Puzenat, E., Guillard, C., Herrmann, J.M., 2004, "Photocatalytic degradation of the alimentary azo dye amaranth Mineralization of the azo group to nitrogen", *Applied Catalysis B: Environmental*, v.51, pp.183-194.

Koch, M., Yediler, A., Lienert, D. et al, 2002, "Ozonation of hydrolyzed dye reactive yellow 84 (CI)", *Chemosphere*, v.46, pp.109-113.

Kudlich, M., Hetheridge, M.J., Knackmuss, H.J., Stolz, A., 1999, "Autoxidation Reactions of different aromatic o-Aminohydroxynaphthalenes that are formed during the anaerobic reduction of sulfonated azo dyes", *Environ. Sci. Technol*, v.33, pp.896-901.

Kunz A., Freire, R.S., Rohwedder, J.R., Duran N., Mansilla H. e Rodriguez, J., 1999, "Construção e otimização de um sistema para redução e aplicação de ozônio em escala de laboratório", *Química Nova*, v.22, n.3, pp.425-428.

Kunz, A., Zamora, P.P., Moraes, S.G., Durán, N., 2002, "Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis", *Química Nova*, v.25, n.1, pp.78-82.

Kurbus, T., Slokar, Y.M., Le Marechal, A.M., 2002, "The study of the effects of the variables on H₂O₂/UV decoloration of vinylsulphone dye: part II", *Dyes and Pigments*, v.54, pp.67-78.

Leão, M.M.D., Carneiro, E.V., Schwabe, W.K., et al., 2002, "Controle Ambiental na Indústria Têxtil: Acabamento de malhas" Projeto Minas Ambiente, SEGRAC Editora Gráfica Ltda, Belo Horizonte, MG, Brasil, pp.356.

Ledakowicz S., Maciejewska J., Perkowski J., Biń, A., 2001, "Ozonation versus advanced oxidation of Acid Red 27", In: *International Ozone Association, proceedings of 15th World Congress*, London, UK.

Ledakowicz, S. and Solecka, M., 2001, "Influence of Ozone and Advance Oxidation Processes on Biological Treatment of Textile Wastewater", *Ozone Science & Engineering*, v.23, pp. 327-332.

Lendormi, T., Prevot, C., Doppenberg, F., Foussard, J.N., Debellefontaine, H., 2001, "Subcritical wet oxidation of municipal sewage sludge: comparison of batch and continuous experiments", *Water Science and Technology*, v.44, pp.161-169.

Liakou S. Pavlou S., Lyberatos G., 1997, "Ozonation of azo dyes", *Water Science and Technology*, v.35, n.4, pp.279-286.

Liakou S., Kornaros M., Lyberatos G., 1997, "Pretreatment of azo dyes using ozone", *Water Science and Technology*, v.35, n.2-3, pp.155-163.

Lin, S.H. e Lin, C.M., 1992, "Decolorization of textile waste effluents by ozonation", *Journal Environmental Systems*, v.21, n.2, pp.143-156.

Lin, Y-C. e Wu, S-C., 2006, "Effects of ozone exposure on inactivation of intra and extracellular enterovirus 71", *Antiviral Research*, v. 70, pp.147-153.

Lopes, C.N., Petrus, J.C.C., Riella, H.G., 2005, "Color and COD retention by nanofiltration membranas", *Desanilation*, v.172, pp.77-83.

López, A., 2004, "Etude du Transfert et de la reactive de l'ozone appliques au traitement des eaux residuaires de l'industrie textile". Ph.D. dissertation, INSA, Toulouse, France.

López, A., Pic, J.S., Bendelkacem, H. e Debellefontaine, H., 2004, "Azo-dyes ozonation in a bubble column reactor. A procedure for the determination of the kinetic parameters", In: *IOA – International Ozone Association, International Conference Barcelona, Espanha*.

López, A., Bendelkacem, H., Pic, J.S., and Debellefontaine, H., 2004, "Influence of t-butanol and of pH on hydrodynamic and mass transfer parameters in an ozone bubble column", In: *IOA – International Ozone Association, International Conference Barcelona, Espanha*.

Lu, M.C., Chen, J.N., Chang, C.P., 1997, "Effect of inorganic ions on the oxidation of dichlorvos insecticide with Fenton's reagent". *Chemosphere*, v.35, n.10, pp.2285-2293.

Ma, J., Sui, M., Zhang, T., Guan, C., 2005, "Effect of pH on MnO_x/GAC catalyzed ozonation for degradation of nitrobenzene", *Water Reseach*, v.39, pp.779-786.

- Maciel, R. Sant'Anna, G.L. Jr. Dezotti, M., 2004, "Phenol removal from high salinity effluents using Fenton's reagent and photo-Fenton reactions", *Chemosphere*, v.57, pp.711-719.
- Martins, A.O., Canalli, V.M., Azevedo, C.M.N., e Pires, M., 2006, "Degradation of pararosaniline (C.I. Basic Red 9 monohydrochloride) dye by ozonation and sonolysis", *Dyes and Pigments*, v. 68, n.2-3, pp. 227-234.
- Mascolo, G., Lopez, A., Bozzi, A. Tiravanti, G., 2001, "By-products formation during the ozonation of the reactive dye Uniblu-A", In: *International Ozone Association, proceedings of the 15th World Congress*, London, UK.
- Matsui, M., Kimura, T., Nambu, T. et al., 1984, "Reaction of Water-soluble dyes with ozone", *JSDC*, v.100, pp.125-127.
- Melo, A.R., 2005, "Otimização do Reuso de Água em Lavadores Contínuos da Indústria Têxtil", Engenharia Química/UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.
- Méndez-Paz, D.; Omil, F. e Lema, J.M., 2003, "Modeling of the Acid Orange 7 anaerobic biodegradation", *Water Science and Technology*, v. 48, n.6, pp.133-139.
- Meriç, S., Selcuk, H., Gallo, M., Belgiorno, V., 2005, "Decolourisation and detoxifying of Remazol Red and its mixture using Fenton's reagent", *Desalination*, v.173, pp. 239-248.
- Mettioli D., Malpei F., Bortone G., Rozzi A., 2002, "Water minimisation and reuse in the textile industry". In: *Water Recycling and resource recovery in industry*. Editors Lens P., Hulshoff Pol L., Wilderer P., Asano T. – IWA Publishing.
- Mollah, M.Y.A., Pathak, S.R., Patil, P.K., et al., 2004, "Treatment of orange II azo-dye by electrocoagulation (EC) technique in a continuous flow cell using sacrificial iron electrodes", *Journal of Hazardous Materials B*, v.109, pp.165-171.
- Muthukumar M., Selvakumar N., Venkata R.J., 2001, "Effect of dye structure on decolouration of anionic dyes by using ozone". In: *International Ozone Association, proceedings of the 15th World Congress*, London, UK.
- Muthukumar, M., Selvakumar, N., 2004, "Studies on the effect of inorganic salts on decolouration of acid dye effluents by ozonation", *Dyes and Pigments*, v.62, pp.221-228.
- Muthukumar, M. D. Sargunamani, M. Senthikumar, et al., 2004, "Optimisation of ozone treatment for colour and COD removal of acid dye effluent using central composite design experiment", *Dyes and Pigments*, v.63, pp.127-134.
- Muthukumar, M., D. Sargunamani, M. Senthikumar, et al., 2005, "Studies on decolouration, toxicity and the possibility for recycling of acid dye effluents using ozone treatment", *Dyes and Pigments*, v.64, pp.39-44.

Muthukumar, M., D. Sargunamani, M. Senthikumar, *et al.*, 2005, "Statistical analysis of the effect of aromatic, azo and sulphonic acid groups on decolouration of acid dye effluents using advanced oxidation processes", *Dyes and Pigments*, v.65, pp.151-158.

Nayme C., 1997, "Etude de la dégradation par ozonation de deux colorants utilisés en teinture", Ph.D. dissertation, Université de Rennes, France.

Neamtu, M., Yedile, A., Siminiceanu, I., *et al.*, 2004, "Decolorization of disperse red 354 azo dye in water by several oxidation processes-a comparative study", *Dyes and Pigments*, v.60, pp.61-68.

Neppolian, B., Choi, H.C., Sakthivel, S., *et al.*, 2002, "Solar light induced and TiO₂ assisted degradation of textile dye reactive blue 4", *Chemosphere*, v. 46, pp.1173-1181.

Nevado, J.J.B., Cabanillas, C.G. and Salcedo, A.M.C., 1995, "Simultaneous spectrophotometric determination of three food dyes by using the first derivative of ratio spectra", *Talanta*, v. 42, pp.2043-2051.

Ni, Y. e Gong, X., 1997, "Simultaneous spectrophotometric determination of mixtures of food colorants", *Analytical Chimica ACTA*, v.354, pp.163-171.

Obon, J.M., Castellar, M.R., Cascales, J.A. e Fernandes-Lopez, J.A., 2005, "Assessment of the TEAC method for determining the antioxidant capacity of synthetic red food colorants", *Food Research International*, v.38, pp.843-845.

O'Neill, C., Hawkes, F.R., Hawkes, D.L., *et al.*, 1999, "Review Colour in textile effluents - sources, measurement, discharge consents and simulation: a review", *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, v.74, pp.1009-1018.

Pan, X., Ushio, H., Ohshima, T., 2005, "Effects of molecular configurations of food colorants on their efficacies as photosensitizers in lipid oxidation", *Food Chemistry*, v. 92, pp.37-44.

Paul, R., Ramesh, K. e Ram K., 1995, "Effluent Treatment of Textile waste waters", *Textile Dyer & Printer*, v.22, pp.18-26.

Padmavathy, S., Sadhya, S., Swaminathan, K. *et al.*, 2003, "Aerobic Decolorization of Reactive Azo Dyes in Presence of Various Cosubstrates", *Chem. Biochem. Eng. Q.*, v. 17, n. 2, pp.147-151.

Peng, R.Y. e Fan, H.J., 2005, "Ozonolytic kinetic order of dye decoloration in aqueous solution", *Dyes and Pigments*, v.67, n.2, pp.153-159.

Perkins, W.S., Judkins Jr., J.F. e Perry, W.D., 1980, "Renovation of Dyebath water by chlorination or ozonation", *American Dyestuff Reporter*, v.12, n.8, August, pp.182/27-32/187.

Pérez-Urquiza, M. e Beltran, F., 2001, "Determination of the dissociation constants of sulfonated azo dyes by capillary zone electrophoresis and spectrophoresis and spectrophotometry methods", *Journal of chromatography A*, v.917, pp.331-336.

Perkowski J., Kos L., Ledakowicz S., 2000, "Advanced oxidation of textile wastewaters", *Ozone Science & Engineering*, v.22, pp.535-550.

Ribeiro, L., Tribess, T., Torres, M.A., et al., 2000, "Estresse Oxidativo em Tilápia (*Oreochromis niloticus*) Exposta ao Efluente de Indústria Têxtil", In: *Ecotoxicologia: Perspectivas para o Século XXI*, São Carlos/SP.

Rischbieter, E., Stein, H. e Schumpe, A., 2000, "Ozone Solubilities in Water and Aqueous Salt Solutions", *Journal Chem. Eng.*, v. 45, pp.338-340.

Rismayani, S.; Fukushima, M.; Ichikawa, H.; Tatsumi, K., 2004, "Decolorization of orange II by catalytic oxidation using iron (III) phthalocyanine-tetrasulfonic acid", *Journal of Hazardous Materials B*, v. 114, pp.175-181.

Roizard, C., Wild, G. e Charpentier, J-C., 1997, "Absorption avec réaction chimique", *Techniques de l'ingénieur, traité Génie des procédés J 1 079*, pp.1-19.

Roth, J. H. e Sullivan, D.E., 1981, "Solubility of ozone in water". *Industry Engineering Chemical Fundamentals*, v.20, n.2, pp.137-140.

Roustan, M., 2003, "Transfer gaz-liquide dans les procédés de traitement des eaux et des effluents gazeux". *Lavoisier Tec & Doc*, Paris, ISBN : 2-7430-0605-6.

Rozizi, A. e Antonilli, M., 2000, "L'eau et l'industrie textile. L'eau : ressources, usages et traitements", *Actes du colloque SITEF*, Toulouse, France, pp.77- 82.

Saia, F.T. e Daniel, L.A., 1999, "Aplicação do processo avançado de oxidação na remoção de cor e DQO de efluente têxtil", In: *Congresso ABES I-063, XXVII*, pp.1-8.

Sarasa J., Roche P., Ormad P., Gimeno E., Piug A., Ovelleiro J. L., 1998, "Treatment of a wastewater resulting from dyes manufacturing with ozone and chemical coagulation", *Water Research*, v.32, n.9, pp.2721-2727.

SAPROMAT www.precitech.net/central/H+P/Sapromat/SAPROMAT.pdf, 31/05/06.

Sasaki, Y.F., Kawaguchi, S., Kamaya, A., Ohshita, M., et al., 2002, "The comet assay with 8 mouse organs: results with 39 currently used food additives", *Mutation Research*, v.519, pp.103-119.

Sotelo J.L., Beltran F.J., Benitez, F.J. and Beltran-Heredia J., 1989, "Henry's law constant for the ozone-water system", *Water Research*, v.23, n.10, pp.1239-1246.

Sotelo J.L., Beltran F.J., Beltran-Heredia J. e Encinar, J.M., 1989, "Azo dye ozonation film theory utilization for kinetic studies", *Ozone Science & Engineering*, v.11, pp.391-409.

Schumpe, A., 1993, "The estimation of gas solubilities in salt solutions", *Chemical Engineering Science*, v.48, n.1, pp.153-158.

Silva, A.C., 2002, Tratamento do Percolado de Aterro Sanitário e Avaliação da Toxicidade do Efluente Bruto e Tratado, Dissertação de Mestrado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Shu, H.Y. e Huang, C.R., 1995, "Degradation of Commercial Azo Dyes in water using ozonation and UV enhanced ozonation process", *Chemosphere*, v.31, n.8, pp.3813-3825.

Sullivan, D.E. e Roth, J.A., 1979, "Kinetics of ozone self-decomposition in aqueous solution", *The American Inst. Of Chem. Eng.*, v.76, n.197, pp. 142-149.

Swaminathan, K.;Pachhade,K.;Sandhya,S., 2005, "Decomposition of a dye intermediate, (H-acid) 1 amino-8naphthol-3,6 disulfonic acid in aqueous solution by ozonation", *Desanilation*, v.186, pp.155-164.

Tang, C. e Chen,V., 2004, "The photocatalytic degradation of reactive black 5 using TiO₂/UV in an annular photoreactor", *Water Research*, v.38, pp.2775-2781.

Tuba, T. E., 2001, "Biological and physical-chemical treatment of textile dyeing wastewater for color and COD removal". *Ozone Science & Engineering*, v.22, pp.199-206.

Tsuchiya,K., Mikasa,H. e Saito Takayuki, 1997, "Absorption dynamics of CO₂ bubbles in a pressurized liquid flowing downward and its simulation in seawater", *Chemical Engineering Science*, v.52, pp.4119-4126.

Tzitzzi,M., Vayenas,D.V. e Lyberatos,G., 1994, "Pretreatment of textile industry wastewaters with ozone".*Water Science and Technology*, v.29, n.9, pp.151-160.

Ueda, A.C., 2006, "Aplicação de Micelas Reservas na Remoção de Corantes Têxteis Catiônicos", Dissertação de Mestrado, Engenharia Química/UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.

Von Gunten U., Laplanche A., 2000, "Oxidation and disinfection with ozone, an overview", In: *International specialised Symposium IOA- International Ozone Association*, Toulouse,FR.

Wang R.Y., Park H.S., *et al.*, 1997, "The Reaction Kinetics of Ozone Decomposition in Water by Ozone and Ozone/Hydrogen Peroxide Process", In: *International specialised Symposium IOA- International Ozone Association*, Japão, Voll.

Wang, C., Yediler, A., Lienert, D., Wang, Z., Kettrup, A., 2002, "Toxicity evaluation of reactive dyestuffs, auxiliaries and selected effluents in textile finishing industry to luminescent bacteria *Vibrio fischeri*", *Chemosphere*, v. 46, pp.339-344.

Wang, C., Yediler, A., Lienert, D., Wang, Z., Kettrup, A., 2003, "Ozonation of an azo dye C.I. Remazol Black 5 and toxicological assessment of its oxidation products", *Chemosphere*, v. 52, pp.1225-1232.

Xia, B., Zhang, G., Zhang, F., 2003, "Bilirubin removal by Cibacron Blue F3GA attached nylon-based hydrophilic affinity membrane", *Journal of Membrane Science*, v.226, pp.9-20.

Zanoni, MVB; Carneiro, P., 2001, "Corantes têxteis e meio-ambiente", *Ciência Hoje*, v.29, n.174, pp. 61-64.

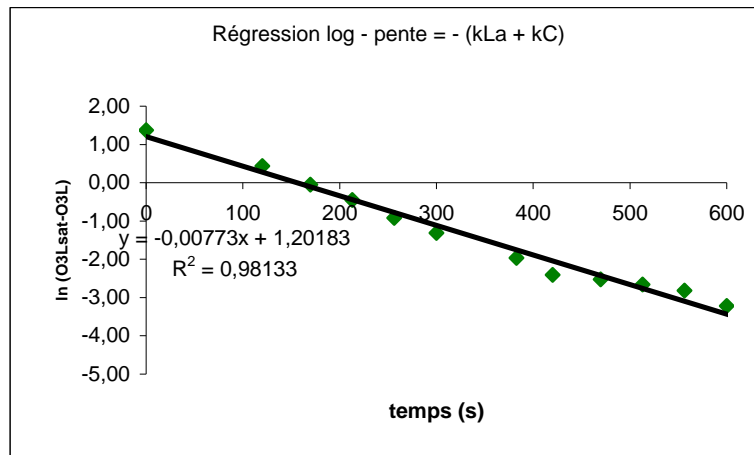
Zee, F.P. van der , 2002, "Anaerobic azo dye redutction", PhD Wageningen University, Wageningen, The Netherlands,.

VII. Anexos

VI Anexo I.1

Data 16/06/2005		Reg. Estacionário			Reg. transitório			
pH	5	T total ∞	673,8 s	- coef. Ang. (kLa + kc)	0,0078 s ⁻¹			
		O ₃ g s	13,2 mg/L	kLa	6,81E-03 s ⁻¹			
		O _{3Ge} ∞	13,8 mg/L	m	0,33532			
NaCl =	0	O _{3G} medio ∞	13,498 mg/L					
		G ∞	200 L/h					
[O ₃]Ge (mg/L)=	13,8	O _{3L} ∞	3,95 mg/L					
		V liq	8,5 L					
		kc	9,93E-04 s ⁻¹					

Tempo(min)	Tempo (s)	Tempo gás (s)	G (L/h)	[O ₃]Ge (mg/L)	[O ₃]Gs (mg/L)	[O ₃]L (mg/L)	(°C) T	ln(O ₃ Lsat-O ₃ L)
0,00	0,00	0,00	200,00	0,00	0,00	0,00		1,37
2,00	120,07	90,07	200,00	0,00	10,50	2,40	23,20	0,44
2,83	169,80	139,80	200,00	0,00	11,70	3,00		-0,05
3,55	213,00	183,00	200,00	0,00	12,30	3,31		-0,45
4,27	256,20	226,20	200,00	0,00	12,70	3,55		-0,92
5,00	300,00	270,00	200,00	0,00	12,90	3,68		-1,31
6,38	382,80	352,80	200,00	0,00	13,20	3,81		-1,97
7,00	420,06	390,06	200,00	0,00	13,20	3,86		-2,41
7,83	469,80	439,80	200,00	0,00	13,20	3,87	23,10	-2,53
8,55	513,00	483,00	200,00	0,00	13,20	3,88		-2,66
9,27	556,20	526,20	200,00	0,00	13,20	3,89		-2,81
10,00	600,00	570,00	200,00	0,00	13,20	3,91		-3,22
11,38	682,80	652,80	200,00	0,00	13,20	3,95		
12,00	720,06	690,06	200,00	0,00	13,20	3,95		
12,83	769,80	739,80	200,00	0,00	13,20	3,95		
13,33	799,80	769,80	200,00	0,00	13,20	3,96		
14,28	856,80	826,80	200,00	0,00	13,20	3,98		
15,00	900,00	870,00	200,00	0,00	13,20	3,99		
16,38	982,80	952,80	200,00	0,00	13,20	3,99	23,10	
17,00	1020,06	990,06	200,00	0,00	13,20	3,99		
18,33	1099,80	1069,80	200,00	0,00	13,20	4,00		
20,00	1200,00	1170,00	200,00	0,00	13,30	4,03		
22,00	1320,06	1290,06	200,00	0,00	13,30	4,04		
23,55	1413,00	1383,00	200,00	0,00	13,30	4,04		
25,00	1500,00	1470,00	200,00	0,00	13,30	4,04		
27,00	1620,06	1590,06	200,00	0,00	13,40	4,06		
28,55	1713,00	1683,00	200,00	0,00	13,50	4,06		
30,00	1800,00	1770,00	200,00	0,00	13,30	4,05		

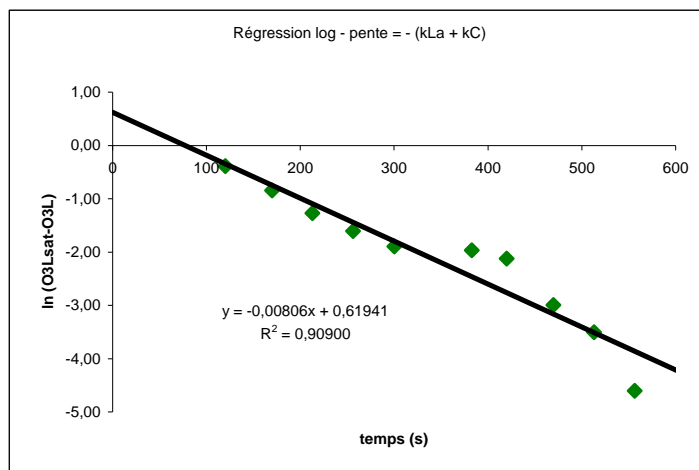


VI Anexo I.2

Data 16/06/2005		Reg. estacionário		Reg. transitório		
pH	7,5	T total	∞	600 s	- coef. Ang. (kLa + kc)	0,00807 s ⁻¹
		O ₃ g s		12 mg/L	kLa	7,69E-03 s ⁻¹
		O _{3Ge}	∞	12,2 mg/L	m	0,3008261
NaCl =	0	O _{3G medio}	∞	12,09972451 mg/L		
		G	∞	200 L/h		
[O ₃]Ge (mg/L)=	12,2	O _{3L}	∞	3,47 mg/L		
		V liq		8,5 L		
		kc		3,77E-04 s ⁻¹		

Tempo (min)	Tempo(s)	Tempo gás (s)	G (L/h)	[O ₃]Ge (mg/L)	[O ₃]Gs (mg/L)	[O ₃]L (mg/L)	(°C) T	ln(O ₃ Lsat-O ₃ L)
0,00	0,00	0,00	200,00	12,20	0,00	0,00		
2,00	120,07	90,07	200,00	12,20	10,90	2,79	23,00	-0,39
2,83	169,80	139,80	200,00	12,20	11,30	3,04		-0,84
3,55	213,00	183,00	200,00	12,20	11,50	3,19		-1,27
4,27	256,20	226,20	200,00	12,20	11,60	3,27		-1,61
5,00	300,00	270,00	200,00	12,20	11,60	3,32		-1,90
6,38	382,80	352,80	200,00	12,20	11,50	3,33		-1,97
7,00	420,06	390,06	200,00	12,20	11,60	3,35		-2,12
7,83	469,80	439,80	200,00	12,20	11,90	3,42	23,00	-3,00
8,55	513,00	483,00	200,00	12,20	12,00	3,44		-3,51
9,27	556,20	526,20	200,00	12,20	12,00	3,46		-4,61
10,00	600,00	570,00	200,00	12,20	12,00	3,47		
11,38	682,80	652,80	200,00	12,20	12,00	3,47		
12,00	720,06	690,06	200,00	12,20	12,00	3,46		
12,83	769,80	739,80	200,00	12,20	12,00	3,44		
13,33	799,80	769,80	200,00	12,20	12,00	3,43		
14,28	856,80	826,80	200,00	12,20	11,90	3,41		
15,00	900,00	870,00	200,00	12,20	11,90	3,39		
16,38	982,80	952,80	200,00	12,20	11,80	3,35	23,10	
17,00	1020,06	990,06	200,00	12,20	11,80	3,34		
18,33	1099,80	1069,80	200,00	12,20	11,90	3,35		
20,00	1200,00	1170,00	200,00	12,20	11,90	3,35		
22,00	1320,06	1290,06	200,00	12,20	11,90	3,32		
23,55	1413,00	1383,00	200,00	12,20	11,90	3,30		

25,00	1500,00	1470,00	200,00	12,20	11,80	3,27		
27,00	1620,06	1590,06	200,00	12,20	11,80	3,26		
28,55	1713,00	1683,00	200,00	12,20	11,70	3,24		

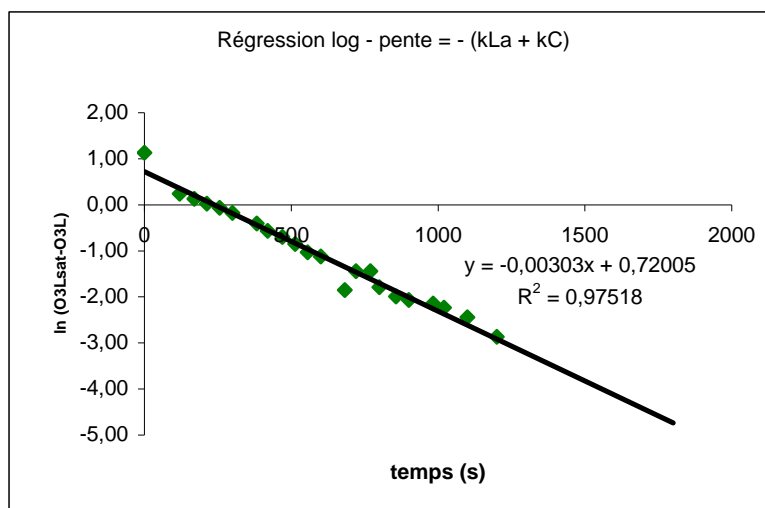


VI Anexo I.3

Data 16/06/2005	Reg. estacionário		Reg. transitório	
pH 9	T total ∞	1324,2 s	- coef. Ang. (kLa + kc)	0,00301 s ⁻¹
	O ₃ g s	12 mg/L	kLa	2,80E-03 s ⁻¹
	O _{3Ge} ∞	12,1 mg/L	m	0,2758151
NaCl = 0	O _{3G} medio ∞	12,049931 mg/L		
	G ∞	200 L/h		
[O ₃]Ge (mg/L)= 12,2	O _{3L} ∞	3,09 mg/L		
	V liq	8,5 L		
	kc	2,12E-04 s ⁻¹		

Tempo(min)	Tempo(s)	Tempo gás (s)	G (L/h)	[O ₃]Ge (mg/L)	[O ₃]Gs (mg/L)	[O ₃]L (mg/L)	(°C) T	ln(O ₃ Lsat-O ₃ L)
0,00	0,00	0,00	200,00	12,10	0,00	0,00		1,13
2,00	120,07	90,07	200,00	12,10	9,90	1,82	23,40	0,24
2,83	169,80	139,80	200,00	12,10	10,30	1,96		0,13
3,55	213,00	183,00	200,00	12,10	10,50	2,07		0,03
4,27	256,20	226,20	200,00	12,10	10,60	2,16		-0,07
5,00	300,00	270,00	200,00	12,10	10,70	2,26		-0,18
6,38	382,80	352,80	200,00	12,10	11,00	2,43	23,20	-0,40
7,00	420,06	390,06	200,00	12,10	11,10	2,53		-0,57
7,83	469,80	439,80	200,00	12,10	11,20	2,60		-0,70
8,55	513,00	483,00	200,00	12,10	11,40	2,67		-0,85
9,27	556,20	526,20	200,00	12,10	11,50	2,74		-1,03
10,00	600,00	570,00	200,00	12,10	11,50	2,77		-1,12
11,38	682,80	652,80	200,00	12,10	11,60	2,94		-1,85
12,00	720,06	690,06	200,00	12,10	11,60	2,86		-1,44
12,83	769,80	739,80	200,00	12,10	11,60	2,86		-1,44
13,33	799,80	769,80	200,00	12,10	11,70	2,93		-1,79
14,28	856,80	826,80	200,00	12,10	11,70	2,96		-1,99
15,00	900,00	870,00	200,00	12,10	11,70	2,97		-2,06
16,38	982,80	952,80	200,00	12,10	11,60	2,98		-2,15
17,00	1020,06	990,06	200,00	12,10	11,60	2,99		-2,23

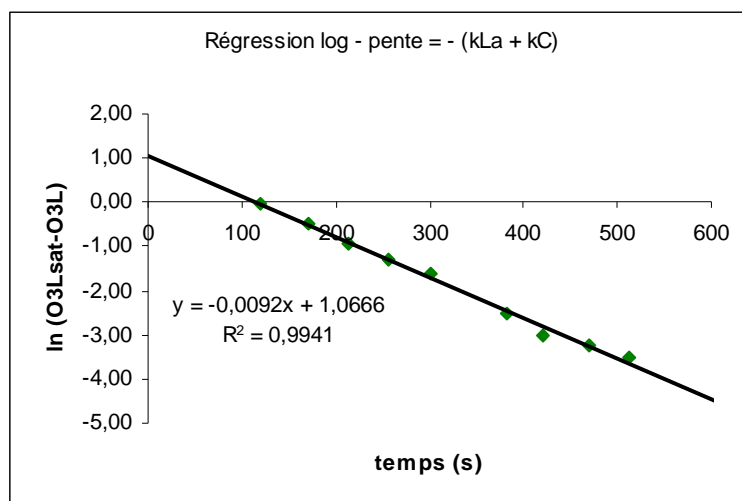
18,33	1099,80	1069,80	200,00	12,10	11,70	3,01		-2,44
20,00	1200,00	1170,00	200,00	12,10	11,80	3,04		-2,86
22,00	1320,06	1290,06	200,00	12,10	12,00	3,09		
23,55	1413,00	1383,00	200,00	12,10	12,00	3,11		
25,00	1500,00	1470,00	200,00	12,10	12,00	3,10		
27,00	1620,06	1590,06	200,00	12,10	12,00	3,06		
28,55	1713,00	1683,00	200,00	12,10	12,00	3,06		
30,00	1800,00	1770,00	200,00	12,10	12,00	3,06		



VI Anexo I.4

Data 17/06/2005		Reg. estacionário			Reg. transitório			
pH	5	T total ∞	673,8 s	- coef. Ang. (kLa + kc)	0,0093 s ⁻¹			
		O _{3g} g s	14,4 mg/L	kLa	8,98E-03 s ⁻¹			
		O _{3Ge} ∞	14,6 mg/L	m	0,2893571			
NaCl =	1	O _{3G} medio ∞	14,4997701mg/L					
		G ∞	200 L/h					
[O ₃]Ge (mg/L)=	14,6	O _{3L} ∞	4,05 mg/L					
		V liq	8,5 L					
		kc	3,23E-04 s ⁻¹					
Tempo total (min)	Tempo total (s)	Tempo gás (s)	G (L/h)	[O ₃]Ge (mg/L)	[O ₃]Gs (mg/L)	[O ₃]L (mg/L)	T (°C)	ln(O ₃ Lsat-O ₃ L)
0,00	0,00	0,00	200,00	14,60	0,00	0,00		
2,00	120,07	90,07	200,00	14,60	12,50	3,06	23,60	-0,01
2,83	169,80	139,80	200,00	14,60	13,10	3,42		-0,46
3,55	213,00	183,00	200,00	14,60	13,50	3,65		-0,92
4,27	256,20	226,20	200,00	14,60	13,70	3,78		-1,31
5,00	300,00	270,00	200,00	14,60	13,90	3,85		-1,61
6,38	382,80	352,80	200,00	14,60	14,20	3,97		-2,53
7,00	420,06	390,06	200,00	14,60	14,30	4,00		-3,00
7,83	469,80	439,80	200,00	14,60	14,30	4,01		-3,22
8,55	513,00	483,00	200,00	14,60	14,30	4,02		-3,51
9,27	556,20	526,20	200,00	14,60	14,30	4,01		
10,00	600,00	570,00	200,00	14,60	14,40	4,02		
11,38	682,80	652,80	200,00	14,60	14,40	4,04		
12,00	720,06	690,06	200,00	14,60	14,40	4,05		

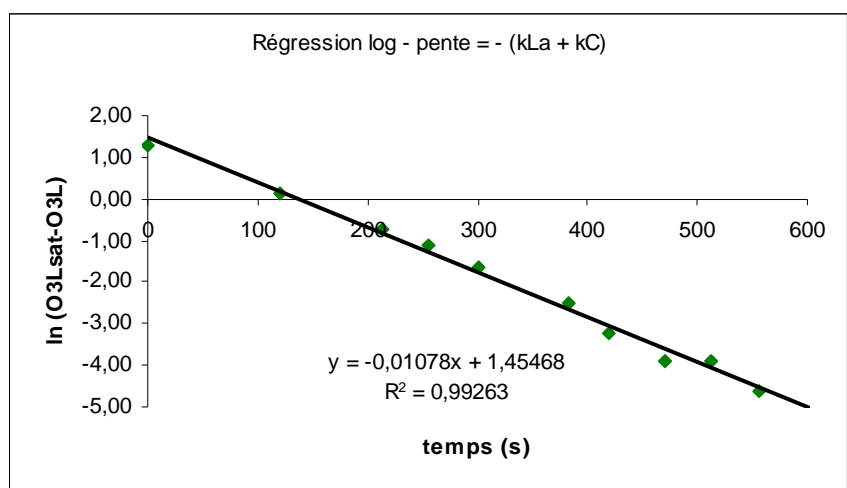
12,83	769,80	739,80	200,00	14,60	14,40	4,04		
13,33	799,80	769,80	200,00	14,60	14,40	4,04		
14,28	856,80	826,80	200,00	14,60	14,40	4,04		
15,00	900,00	870,00	200,00	14,60	14,50	4,05		
16,38	982,80	952,80	200,00	14,60	14,50	4,07		
17,00	1020,06	990,06	200,00	14,60	14,50	4,07		
18,33	1099,80	1069,80	200,00	14,60	14,50	4,10		
20,00	1200,00	1170,00	200,00	14,60	14,40	4,08		
22,00	1320,06	1290,06	200,00	14,60	14,60	4,04		
23,55	1413,00	1383,00	200,00	14,60	14,50	4,04		
25,00	1500,00	1470,00	200,00	14,60	14,40	4,05		



VI Anexo I.5

Data 21/06/2005		Reg. estacionário		Reg. transitório				
pH 7,5	T total ∞	600 s	- coef. Ang. (kLa + kc)	0,01099 s ⁻¹				
	O ₃ g s	12,9 mg/L	kLa	9,72E-03 s ⁻¹				
	O _{3Ge} ∞	13,6 mg/L	m	0,30803905				
NaCl =	O _{3G} medio ∞	13,2469177 mg/L						
	G ∞	200 L/h						
[O ₃]Ge (mg/L)= 13,6	O _{3L} ∞	3,61 mg/L						
	V liq	8,5 L						
	kc	1,27E-03						
Tempo total (min)	Tempo total (s)	Tempo gás (s)	G (L/h)	[O ₃]Ge (mg/L)	[O ₃]Gs (mg/L)	[O ₃]L (mg/L)	(°C) T	ln(O ₃ Lsat-O ₃ L)
0,00	0,00	0,00	200,00	13,60	0,00	0,00		1,28
2,00	120,07	90,07	200,00	13,60	10,80	2,46	23,20	0,14
2,83	169,80	139,80	200,00	13,60	11,50	2,98		
3,55	213,00	183,00	200,00	13,60	12,20	3,13		-0,73
4,27	256,20	226,20	200,00	13,60	12,50	3,29		-1,14
5,00	300,00	270,00	200,00	13,60	12,70	3,42		-1,66
6,38	382,80	352,80	200,00	13,60	12,90	3,53		-2,53
7,00	420,06	390,06	200,00	13,60	12,90	3,57		-3,22
7,83	469,80	439,80	200,00	13,60	12,90	3,59	23,00	-3,91

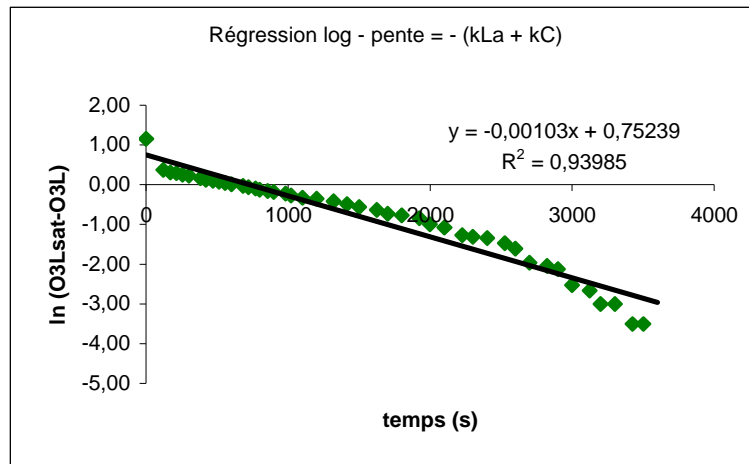
8,55	513,00	483,00	200,00	13,60	12,90	3,59		-3,91
9,27	556,20	526,20	200,00	13,60	12,90	3,60		-4,61
10,00	600,00	570,00	200,00	13,60	12,90	3,61		
11,38	682,80	652,80	200,00	13,60	12,90	3,64		
12,00	720,06	690,06	200,00	13,60	13,00	3,65		
12,83	769,80	739,80	200,00	13,60	13,00	3,66		
13,33	799,80	769,80	200,00	13,60	13,00	3,66		
14,28	856,80	826,80	200,00	13,60	12,90	3,67		
15,00	900,00	870,00	200,00	13,60	12,90	3,67		
16,38	982,80	952,80	200,00	13,60	13,00	3,69	23,20	
17,00	1020,06	990,06	200,00	13,60	13,00	3,69		
18,33	1099,80	1069,80	200,00	13,60	13,00	3,69		
20,00	1200,00	1170,00	200,00	13,60	12,90	3,66		
22,00	1320,06	1290,06	200,00	13,60	13,00	3,67		
23,55	1413,00	1383,00	200,00	13,60	13,00	3,68		
25,00	1500,00	1470,00	200,00	13,60	13,00	3,67		
27,00	1620,06	1590,06	200,00	13,60	13,10	3,68		
28,55	1713,00	1683,00	200,00	13,60	13,00	3,67		
30,00	1800,00	1770,00	200,00	13,60	13,00	3,65		



VI Anexo I.6

Data 21/06/2005	Reg. estacionário		Reg. transitório	
pH 7,5	T total ∞	1324,2 s	- coef. Ang. (kLa + kc)	0,00103 s ⁻¹
	O ₃ g s	12,9 mg/L	kLa	8,24E-04 s ⁻¹
	O _{3Ge} ∞	13 mg/L	m	0,306053422
NaCl = 0	O _{3G} medio ∞	12,9499356 mg/L		
	G ∞	200 L/h		
[O ₃]Ge (mg/L)= 13	O _{3L} ∞	3,17 mg/L		
	V liq	8,5 L		
	kc	2,06E-04 s ⁻¹		

Tempo total (min)	Tempo total (s)	Tempo gás (s)	G (L/h)	[O3]Ge (mg/L)	[O3]Gs (mg/L)	[O3]L (mg/L)	(°C) T	ln(O3Lsat-O3L)
0,00	0,00	0,00	200,00	13,00	0,00	0,00	24,40	1,15
2,00	120,07	90,07	200,00	13,00	10,20	1,73		0,36
2,83	169,80	139,80	200,00	13,00	10,40	1,81		0,31
3,55	213,00	183,00	200,00	13,00	10,50	1,84		0,29
4,27	256,20	226,20	200,00	13,00	10,60	1,89	23,70	0,25
5,00	300,00	270,00	200,00	13,00	10,80	1,92		0,22
6,38	382,80	352,80	200,00	13,00	10,70	2,00		0,16
7,00	420,06	390,06	200,00	13,00	10,70	2,04		0,12
7,83	469,80	439,80	200,00	13,00	10,70	2,07		0,10
8,55	513,00	483,00	200,00	13,00	10,80	2,10		0,07
9,27	556,20	526,20	200,00	13,00	10,80	2,13		0,04
10,00	600,00	570,00	200,00	13,00	10,80	2,16		0,01
11,38	682,80	652,80	200,00	13,00	10,80	2,20		-0,03
12,00	720,06	690,06	200,00	13,00	10,90	2,23		-0,06
12,83	769,80	739,80	200,00	13,00	11,00	2,26		-0,09
13,33	799,80	769,80	200,00	13,00	11,00	2,29		-0,13
14,28	856,80	826,80	200,00	13,00	11,00	2,32		-0,16
15,00	900,00	870,00	200,00	13,00	11,10	2,34	23,10	-0,19
16,38	982,80	952,80	200,00	13,00	11,20	2,37		-0,22
17,00	1020,06	990,06	200,00	13,00	11,20	2,41		-0,27
18,33	1099,80	1069,80	200,00	13,00	11,30	2,45	23,00	-0,33
20,00	1200,00	1170,00	200,00	13,00	11,20	2,47		-0,36
22,00	1320,06	1290,06	200,00	13,00	11,30	2,51		-0,42
23,55	1413,00	1383,00	200,00	13,00	11,40	2,56		-0,49
25,00	1500,00	1470,00	200,00	13,00	11,50	2,60		-0,56
27,07	1624,20	1594,20	200,00	13,00	11,50	2,64		-0,63
28,33	1699,80	1669,80	200,00	13,00	11,60	2,69		-0,73
30,00	1800,00	1770,00	200,00	13,00	11,60	2,71		-0,78
32,07	1924,20	1894,20	200,00	13,00	11,60	2,74		-0,84
33,33	1999,80	1969,80	200,00	13,00	11,80	2,80		-0,99
35,00	2100,00	2070,00	200,00	13,00	11,90	2,83		-1,08
37,07	2224,20	2194,20	200,00	13,00	12,00	2,89		-1,27
38,33	2299,80	2269,80	200,00	13,00	12,00	2,90		-1,31
40,00	2400,00	2370,00	200,00	13,00	12,00	2,91		-1,35
42,07	2524,20	2494,20	200,00	13,00	12,10	2,94		-1,47
43,33	2599,80	2569,80	200,00	13,00	12,20	2,97		-1,61
45,00	2700,00	2670,00	200,00	13,00	12,30	3,03		-1,97
47,07	2824,20	2794,20	200,00	13,00	12,30	3,04		-2,04
48,33	2899,80	2869,80	200,00	13,00	12,40	3,05		-2,12
50,00	3000,00	2970,00	200,00	13,00	12,50	3,09		-2,53
52,07	3124,20	3094,20	200,00	13,00	12,60	3,10		-2,66
53,33	3199,80	3169,80	200,00	13,00	12,70	3,12		-3,00
55,00	3300,00	3270,00	200,00	13,00	12,70	3,12		-3,00
57,07	3424,20	3394,20	200,00	13,00	12,80	3,14		-3,51
58,33	3499,80	3469,80	200,00	13,00	12,80	3,14		-3,51
60,00	3600,00	3570,00	200,00	13,00	12,90	3,17		

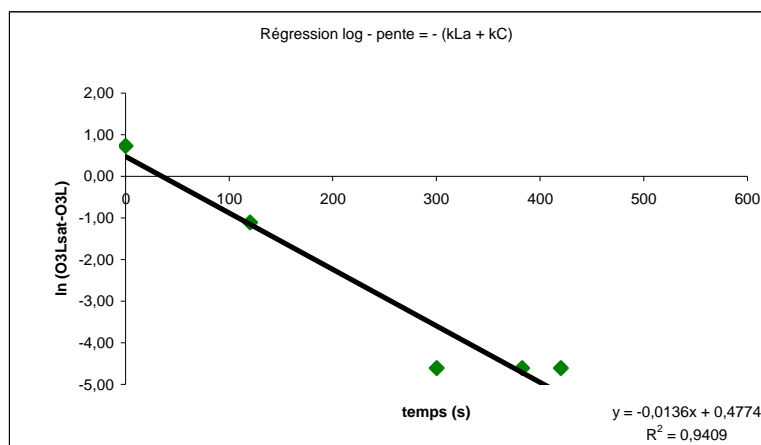


VI.1 Anexo I.7

Data 22/06/2005		Reg. estacionário		Reg. transitório	
pH	5	T total ∞	673,8 s	- coef. Ang. (kLa + kc)	0,0124
		O _{3g} g s	11,8 mg/L	kLa	1,12E-02
		O _{3Ge} ∞	12,3 mg/L	m	0,248338834
NaCl =	40	O _{3G} medio ∞	12,04827089 mg/L		
		G ∞	200 L/h		
[O ₃]Ge (mg/L)=	12,3	O _{3L} ∞	2,7 mg/L		
		V liq	8,5 L		
		kc	1,21E-03 s ⁻¹		

Tempo total (min)	Tempo total (s)	Tempo gaz (s)	G (L/h)	[O ₃]Ge (mg/L)	[O ₃]Gs (mg/L)	[O ₃]L (mg/L)	T (°C)	ln(O ₃ Lsat-O ₃ L)
0,00	0,00	0,00	200,00	12,30	0,00	0,00		0,73
2,00	120,07	90,07	200,00	12,30	11,90	1,74		-1,11
2,83	169,80	139,80	200,00	12,30	10,90	2,13		
3,55	213,00	183,00	200,00	12,30	10,60	2,09		
4,27	256,20	226,20	200,00	12,30	10,50	2,07	23,20	
5,00	300,00	270,00	200,00	12,30	10,40	2,06		-4,61
6,38	382,80	352,80	200,00	12,30	10,40	2,06	22,90	-4,61
7,00	420,06	390,06	200,00	12,30	10,40	2,06		-4,61
7,83	469,80	439,80	200,00	12,30	10,50	2,12	23,00	
8,55	513,00	483,00	200,00	12,30	10,50	2,14		
9,27	556,20	526,20	200,00	12,30	10,60	2,18		
10,00	600,00	570,00	200,00	12,30	10,60	2,18	22,70	
11,38	682,80	652,80	200,00	12,30	10,70	2,23		
12,00	720,06	690,06	200,00	12,30	10,80	2,10		
12,83	769,80	739,80	200,00	12,30	10,90	2,31		
13,33	799,80	769,80	200,00	12,30	10,90	2,37		
14,28	856,80	826,80	200,00	12,30	10,90	2,37		
15,00	900,00	870,00	200,00	12,30	11,00	2,39	22,70	
16,38	982,80	952,80	200,00	12,30	11,20	2,50		
17,00	1020,06	990,06	200,00	12,30	11,30	2,59		
18,33	1099,80	1069,80	200,00	12,30	11,40	2,36		
20,00	1200,00	1170,00	200,00	12,30	11,40	2,61		
22,00	1320,06	1290,06	200,00	12,30	11,50	2,66		
23,55	1413,00	1383,00	200,00	12,30	11,50	2,66		

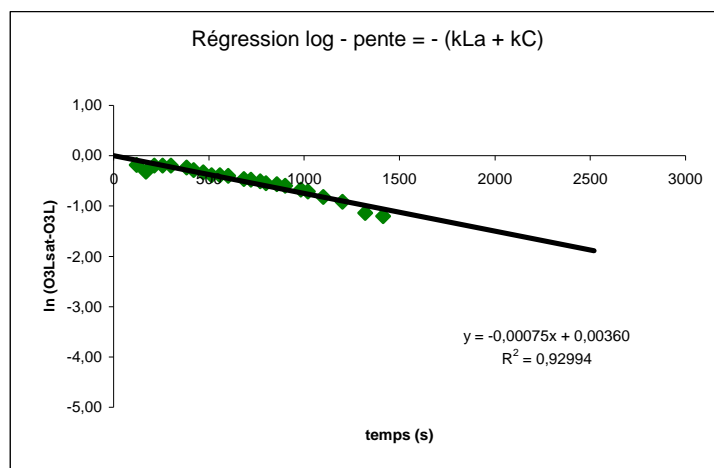
25,00	1500,00	1470,00	200,00	12,30	11,50	2,39		
27,00	1620,06	1590,06	200,00	12,30	11,50	2,66		
28,55	1713,00	1683,00	200,00	12,30	11,50	2,66		
30,00	1800,00	1770,00	200,00	12,30	11,50	2,54		
43,55	2613,00	2583,00	200,00	12,30	11,50	2,66		
45,00	2700,00	2670,00	200,00	12,30	11,60	2,51		
47,00	2820,06	2790,06	200,00	12,30	11,50	2,54		
48,55	2913,00	2883,00	200,00	12,30	11,60	2,44		
50,00	3000,00	2970,00	200,00	12,30	11,60	2,67		
52,00	3120,06	3090,06	200,00	12,30	11,60	2,67		
53,55	3213,00	3183,00	200,00	12,30	11,70	2,68		
55,00	3300,00	3270,00	200,00	12,30	11,70	2,70		
57,00	3420,06	3390,06	200,00	12,30	11,80	2,67		
58,55	3513,00	3483,00	200,00	12,30	11,80	2,60		



VI.1 Anexo I.8

Data 16/06/2005		Reg. estacionário		Reg. transitório			
pH	7,5	T total ∞ 600 s	- coef. Ang. (kLa + kc)	0,00075 s ⁻¹			
		O ₃ g s	10,1 mg/L	kLa	-5,40E-03 s ⁻¹		
		O _{3Ge} ∞	12 mg/L	m	-0,025463446		
NaCl =	40	O _{3G} medio ∞	11,02272139 mg/L				
		G ∞	200 L/h				
[O ₃]Ge (mg/L)=	12	O _{3L} ∞	2,02 mg/L				
		V liq	8,5 L				
		kc	6,15E-03 s ⁻¹				
Tempo total (min)	Tempo total (s)	Tempo gás (s)	G (L/h)	[O ₃]Ge (mg/L)	[O ₃]Gs (mg/L)	[O ₃]L (mg/L)	ln(O ₃ Lsat-O ₃ L)
0,00	0,00	0,00	200,00	12,00	0,00	0,00	
2,00	120,07	90,07	200,00	12,00	8,50	1,18	-0,19
2,83	169,80	139,80	200,00	12,00	8,90	1,28	-0,31
3,55	213,00	183,00	200,00	12,00	8,90	1,19	-0,20
4,27	256,20	226,20	200,00	12,00	8,90	1,19	-0,20
5,00	300,00	270,00	200,00	12,00	8,80	1,19	-0,20
6,38	382,80	352,80	200,00	12,00	8,80	1,22	-0,24
7,00	420,06	390,06	200,00	12,00	8,90	1,26	-0,29
7,83	469,80	439,80	200,00	12,00	8,90	1,29	-0,33

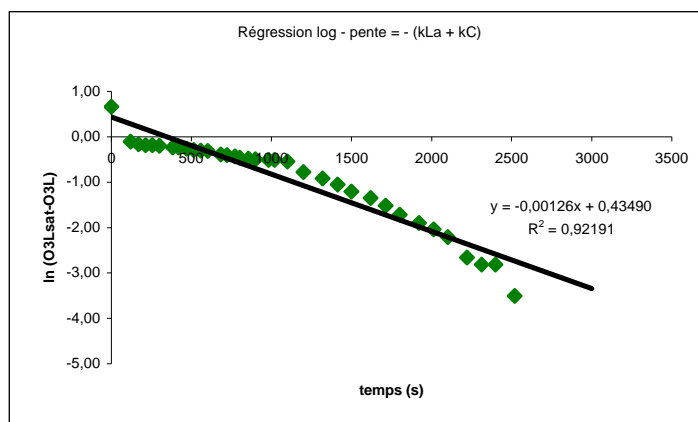
8,55	513,00	483,00	200,00	12,00	8,90	1,33	-0,39
9,27	556,20	526,20	200,00	12,00	8,90	1,33	-0,39
10,00	600,00	570,00	200,00	12,00	8,90	1,34	-0,40
11,38	682,80	652,80	200,00	12,00	9,00	1,38	-0,46
12,00	720,06	690,06	200,00	12,00	9,10	1,39	-0,48
12,83	769,80	739,80	200,00	12,00	9,00	1,41	-0,51
13,33	799,80	769,80	200,00	12,00	9,00	1,43	-0,54
14,28	856,80	826,80	200,00	12,00	9,00	1,44	-0,56
15,00	900,00	870,00	200,00	12,00	9,10	1,46	-0,60
16,38	982,80	952,80	200,00	12,00	9,20	1,50	-0,67
17,00	1020,06	990,06	200,00	12,00	9,20	1,52	-0,71
18,33	1099,80	1069,80	200,00	12,00	9,20	1,57	-0,82
20,00	1200,00	1170,00	200,00	12,00	9,30	1,61	-0,92
22,00	1320,06	1290,06	200,00	12,00	9,40	1,69	-1,14
23,55	1413,00	1383,00	200,00	12,00	9,40	1,71	-1,20
25,00	1500,00	1470,00	200,00	12,00	9,40	1,73	
27,00	1620,06	1590,06	200,00	12,00	9,40	1,76	
28,55	1713,00	1683,00	200,00	12,00	9,50	1,79	
30,00	1800,00	1770,00	200,00	12,00	9,60	1,82	
32,00	1920,06	1890,06	200,00	12,00	9,60	1,85	
33,55	2013,00	1983,00	200,00	12,00	9,70	1,88	
35,00	2100,00	2070,00	200,00	12,00	9,80	1,92	
37,00	2220,06	2190,06	200,00	12,00	9,80	1,94	
38,55	2313,00	2283,00	200,00	12,00	9,80	1,96	
40,00	2400,00	2370,00	200,00	12,00	9,90	1,99	
42,00	2520,06	2490,06	200,00	12,00	9,90	2,01	
43,55	2613,00	2583,00	200,00	12,00	9,90	2,01	
45,00	2700,00	2670,00	200,00	12,00	9,90	2,01	
47,00	2820,06	2790,06	200,00	12,00	10,00	2,02	
48,55	2913,00	2883,00	200,00	12,00	10,10	2,01	
50,00	3000,00	2970,00	200,00	12,00	10,10	2,02	



VI Anexo I.9

Data 25/06/2005		Reg. estacionário			Reg. transitório		
pH	9	T total ∞ } 1324,2 s	- coef. Ang. (kLa + kc)	0,00126 s ⁻¹			
		O ₃ g s	11,1 mg/L	kLa		-2,48E-03 s ⁻¹	
		O _{3Ge} ∞	12,2 mg/L	m		-0,083641244	
NaCl =	40	O _{3G} medio ∞	11,6413396 mg/L				
		G ∞	200 L/h				
[O ₃]Ge (mg/L)=	12,2	O _{3L} ∞	1,92 mg/L				
		V liq	8,5 L				
		kc	3,74E-03 s ⁻¹				
Tempo total (min)	Tempo total (s)	Tempo gás (s)	G (L/h)	[O ₃]Ge (mg/L)	[O ₃]Gs (mg/L)	[O ₃]L (mg/L)	ln(O ₃ Lsat-O ₃ L)
0,00	0,00	0,00	200,00	12,20	0,00	0,00	0,66
2,00	120,07	90,07	200,00	12,20	8,30	1,04	-0,11
2,83	169,80	139,80	200,00	12,20	8,70	1,09	-0,16
3,55	213,00	183,00	200,00	12,20	8,70	1,11	-0,19
4,27	256,20	226,20	200,00	12,20	8,80	1,11	-0,19
5,00	300,00	270,00	200,00	12,20	8,80	1,12	-0,20
6,38	382,80	352,80	200,00	12,20	8,90	1,15	-0,24
7,00	420,06	390,06	200,00	12,20	8,90	1,15	-0,24
7,83	469,80	439,80	200,00	12,20	8,90	1,17	-0,26
8,55	513,00	483,00	200,00	12,20	8,90	1,19	-0,29
9,27	556,20	526,20	200,00	12,20	9,00	1,20	-0,30
10,00	600,00	570,00	200,00	12,20	9,00	1,21	-0,31
11,38	682,80	652,80	200,00	12,20	9,10	1,26	-0,39
12,00	720,06	690,06	200,00	12,20	9,10	1,27	-0,40
12,83	769,80	739,80	200,00	12,20	9,10	1,29	-0,43
13,33	799,80	769,80	200,00	12,20	9,20	1,31	-0,46
14,28	856,80	826,80	200,00	12,20	9,20	1,32	-0,48
15,00	900,00	870,00	200,00	12,20	9,20	1,33	-0,49
16,38	982,80	952,80	200,00	12,20	9,30	1,34	-0,51
17,00	1020,06	990,06	200,00	12,20	9,20	1,34	-0,51
18,33	1099,80	1069,80	200,00	12,20	9,20	1,36	-0,54
20,00	1200,00	1170,00	200,00	12,20	9,70	1,48	-0,78
22,00	1320,06	1290,06	200,00	12,20	10,00	1,54	-0,92
23,55	1413,00	1383,00	200,00	12,20	10,10	1,59	-1,05
25,00	1500,00	1470,00	200,00	12,20	10,20	1,64	-1,20
27,00	1620,06	1590,06	200,00	12,20	10,30	1,68	-1,35
28,55	1713,00	1683,00	200,00	12,20	10,30	1,72	-1,51
30,00	1800,00	1770,00	200,00	12,20	10,40	1,76	-1,71
32,00	1920,06	1890,06	200,00	12,20	10,50	1,79	-1,90
33,55	2013,00	1983,00	200,00	12,20	10,60	1,81	-2,04
35,00	2100,00	2070,00	200,00	12,20	10,60	1,83	-2,21
37,00	2220,06	2190,06	200,00	12,20	10,70	1,87	-2,66
38,55	2313,00	2283,00	200,00	12,20	10,80	1,88	-2,81
40,00	2400,00	2370,00	200,00	12,20	10,80	1,88	-2,81
42,00	2520,06	2490,06	200,00	12,20	10,80	1,91	-3,51
43,55	2613,00	2583,00	200,00	12,20	10,90	1,94	
45,00	2700,00	2670,00	200,00	12,20	10,90	1,92	
47,00	2820,06	2790,06	200,00	12,20	10,90	1,92	

48,55	2913,00	2883,00	200,00	12,20	11,00	1,92
50,00	3000,00	2970,00	200,00	12,20	11,10	1,92

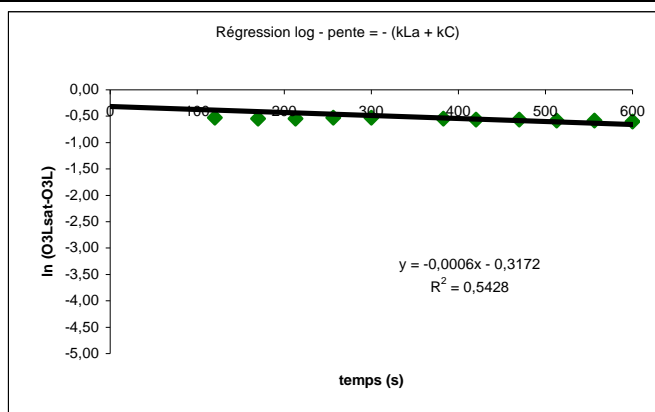


VI Anexo I.10

Data 25/06/2005	Reg. estacionário		Reg. transitório	
pH 5	T total ∞	2400 s	- coef. Ang. (kLa + kc)	0,0007 s ⁻¹
	O _{3g} g s	10,3 mg/L	kLa	-8,09E-03 s ⁻¹
	O _{3Ge} ∞	11,9 mg/L	m	-0,009295
NaCl = 100	O _{3G} medio ∞	11,08075409 mg/L		
	G ∞	200 L/h		
[O ₃]Ge (mg/L)= 11,9	O _{3L} ∞	1,19 mg/L		
	V liq	8,5 L		
	kc	8,79E-03 s ⁻¹		

Tempo total (min)	Tempo total (s)	Tempo gás (s)	G (L/h)	[O ₃]Ge (mg/L)	[O ₃]Gs (mg/L)	[O ₃]L (mg/L)	T (°C)	ln(O ₃ Lsat-O ₃ L)
0,00	0,00	0,00	200,00	11,90	0,00	0,00		
2,00	120,07	90,07	200,00	11,90	9,70	0,60	25,00	-0,53
2,83	169,80	139,80	200,00	11,90	9,80	0,61	24,00	-0,54
3,55	213,00	183,00	200,00	11,90	9,80	0,61	23,70	-0,54
4,27	256,20	226,20	200,00	11,90	9,80	0,60	23,60	-0,53
5,00	300,00	270,00	200,00	11,90	9,70	0,60	23,40	-0,53
6,38	382,80	352,80	200,00	11,90	9,80	0,61	23,40	-0,54
7,00	420,06	390,06	200,00	11,90	9,80	0,62	23,30	-0,56
7,83	469,80	439,80	200,00	11,90	9,80	0,62		-0,56
8,55	513,00	483,00	200,00	11,90	9,70	0,63		-0,58
9,27	556,20	526,20	200,00	11,90	9,70	0,63	23,20	-0,58
10,00	600,00	570,00	200,00	11,90	9,70	0,64		-0,60
11,38	682,80	652,80	200,00	11,90	9,60	0,65		-0,62
12,00	720,06	690,06	200,00	11,90	9,70	0,65		-0,62
12,83	769,80	739,80	200,00	11,90	9,70	0,67	23,10	-0,65
13,33	799,80	769,80	200,00	11,90	9,70	0,69		-0,69
14,28	856,80	826,80	200,00	11,90	9,70	0,69		-0,69
15,00	900,00	870,00	200,00	11,90	9,70	0,71	23,20	-0,73
16,38	982,80	952,80	200,00	11,90	9,70	0,73	23,20	-0,78
17,00	1020,06	990,06	200,00	11,90	9,70	0,75		-0,82
18,33	1099,80	1069,80	200,00	11,90	9,70	0,76	23,20	-0,84
20,00	1200,00	1170,00	200,00	11,90	9,80	0,80		-0,94

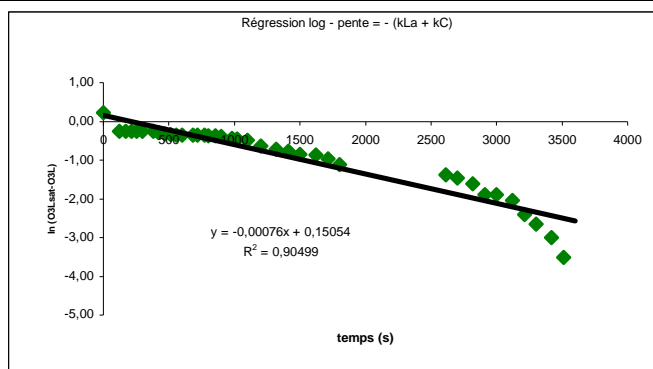
22,00	1320,06	1290,06	200,00	11,90	9,80	0,83		-1,02
23,55	1413,00	1383,00	200,00	11,90	9,80	0,88		-1,17
25,00	1500,00	1470,00	200,00	11,90	9,80	0,89		-1,20
27,00	1620,06	1590,06	200,00	11,90	9,90	0,94		-1,39
28,55	1713,00	1683,00	200,00	11,90	9,90	0,95		-1,43
30,00	1800,00	1770,00	200,00	11,90	9,90	0,97		-1,51
43,55	2613,00	2583,00	200,00	11,90	10,00	1,02		-1,77
45,00	2700,00	2670,00	200,00	11,90	10,00	1,02		-1,77
47,00	2820,06	2790,06	200,00	11,90	10,10	1,06		-2,04
48,55	2913,00	2883,00	200,00	11,90	10,10	1,12		-2,66
50,00	3000,00	2970,00	200,00	11,90	10,20	1,16	23,10	-3,51
52,00	3120,06	3090,06	200,00	11,90	10,30	1,19		#NOMBRE!



VI Anexo 11

Data 26/06/2005		Reg. estacionário			Reg. transitório			
pH	7,5	T total ∞	3000 s	- coef. Ang. (kLa + kc)	0,01099 s ⁻¹			
		O ₃ g s	10,4 mg/L	kLa	2,56E-03 s ⁻¹			
		O _{3Ge} ∞	12 mg/L	m	0,47675203			
NaCl =	100	O _{3G} medio ∞	11,1809264 mg/L					
		G ∞	200 L/h					
[O3]Ge (mg/L)=	12	O _{3L} ∞	1,24 mg/L					
		V liq	8,5 L					
		kc	8,43E-03 s ⁻¹					
Tempo total (min)	Tempo total (s)	Tempo gás (s)	G (L/h)	[O3]Ge (mg/L)	[O3]Gs (mg/L)	[O3]L (mg/L)	(°C) T	ln(O3Lsat-O3L)
0,00	0,00	0,00	200,00	12,00	0,00	0,00		0,22
2,00	120,07	90,07	200,00	12,00	8,80	0,48		-0,26
2,83	169,80	139,80	200,00	12,00	8,70	0,48		-0,26
3,55	213,00	183,00	200,00	12,00	8,60	0,47		-0,25
4,27	256,20	226,20	200,00	12,00	8,50	0,48		-0,26
5,00	300,00	270,00	200,00	12,00	8,40	0,47		-0,25
6,38	382,80	352,80	200,00	12,00	8,50	0,48		-0,26
7,00	420,06	390,06	200,00	12,00	8,50	0,50		-0,29
7,83	469,80	439,80	200,00	12,00	8,70	0,53		-0,33
8,55	513,00	483,00	200,00	12,00	8,80	0,54		-0,34
9,27	556,20	526,20	200,00	12,00	8,90	0,55	24,00	-0,36
10,00	600,00	570,00	200,00	12,00	8,90	0,55		-0,36
11,38	682,80	652,80	200,00	12,00	8,90	0,55	23,90	-0,36
12,00	720,06	690,06	200,00	12,00	8,90	0,55		-0,36

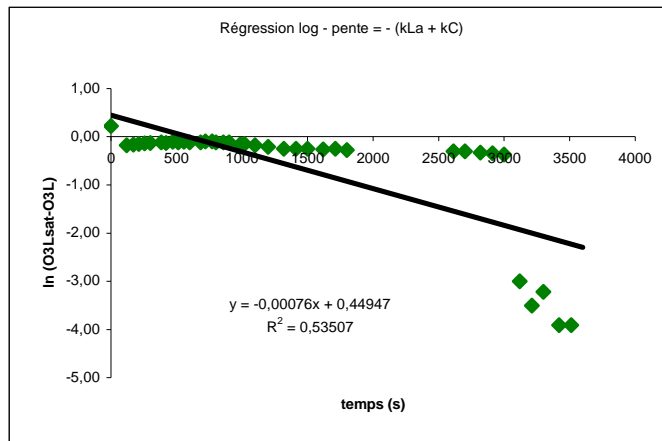
12,83	769,80	739,80	200,00	12,00	8,90	0,55		-0,36
13,33	799,80	769,80	200,00	12,00	9,00	0,56		-0,37
14,28	856,80	826,80	200,00	12,00	8,90	0,56		-0,37
15,00	900,00	870,00	200,00	12,00	9,00	0,57		-0,39
16,38	982,80	952,80	200,00	12,00	9,00	0,60		-0,43
17,00	1020,06	990,06	200,00	12,00	9,10	0,61		-0,45
18,33	1099,80	1069,80	200,00	12,00	9,20	0,64	23,70	-0,49
20,00	1200,00	1170,00	200,00	12,00	9,20	0,72		-0,63
22,00	1320,06	1290,06	200,00	12,00	9,20	0,76		-0,71
23,55	1413,00	1383,00	200,00	12,00	9,30	0,79		-0,78
25,00	1500,00	1470,00	200,00	12,00	9,40	0,82		-0,84
27,00	1620,06	1590,06	200,00	12,00	9,30	0,83		-0,87
28,55	1713,00	1683,00	200,00	12,00	9,40	0,87		-0,97
30,00	1800,00	1770,00	200,00	12,00	9,40	0,92		-1,11
43,55	2613,00	2583,00	200,00	12,00	9,60	1,00		-1,39
45,00	2700,00	2670,00	200,00	12,00	9,70	1,02		-1,47
47,00	2820,06	2790,06	200,00	12,00	9,80	1,05		-1,61
48,55	2913,00	2883,00	200,00	12,00	10,00	1,10		-1,90
50,00	3000,00	2970,00	200,00	12,00	10,00	1,10		-1,90
52,00	3120,06	3090,06	200,00	12,00	10,10	1,12		-2,04
53,55	3213,00	3183,00	200,00	12,00	10,10	1,16		-2,41
55,00	3300,00	3270,00	200,00	12,00	10,20	1,18	22,9	-2,66
57,00	3420,06	3390,06	200,00	12,00	10,30	1,20		-3,00
58,55	3513,00	3483,00	200,00	12,00	10,30	1,22		-3,51
60,00	3600,00	3570,00	200,00	12,00	10,40	1,25		
65,00	3900,00	3870,00	200,00	12,00	10,40	1,24		



VI Anexo I.12

Data 26/06/2005	Reg. estacionário		Reg. transitório	
pH 9	T total ∞	1324,2 s	- coef. Ang. (kLa + kc)	0,00103 s ⁻¹
	O ₃ g s	10,6 mg/L	kLa	-7,86E-03 s ⁻¹
	O _{3Ge} ∞	12,3 mg/L	m	-0,014334426
NaCl = 100	O _{3G} medio ∞	11,42893552 mg/L		
	G ∞	200 L/h		
[O ₃]Ge (mg/L)= 12,3	O _{3L} ∞	1,25 mg/L		
	V liq	8,5 L		
	kc	8,89E-03 s ⁻¹		

Tempo total (min)	Tempo total (s)	Tempo gás (s)	G (L/h)	[O3]Ge (mg/L)	[O3]Gs (mg/L)	[O3]L (mg/L)	(°C) T	ln(O3Lsat-O3L)
0,00	0,00	0,00	200,00	12,30		0,00		0,22
2,00	120,07	90,07	200,00	12,30	8,30	0,41	23,70	-0,17
2,83	169,80	139,80	200,00	12,30	8,40	0,40		-0,16
3,55	213,00	183,00	200,00	12,30	8,50	0,39		-0,15
4,27	256,20	226,20	200,00	12,30	8,40	0,38		-0,14
5,00	300,00	270,00	200,00	12,30	8,40	0,37		-0,13
6,38	382,80	352,80	200,00	12,30	8,40	0,36		-0,12
7,00	420,06	390,06	200,00	12,30	8,50	0,37		-0,13
7,83	469,80	439,80	200,00	12,30	8,50	0,35		-0,11
8,55	513,00	483,00	200,00	12,30	8,50	0,36		-0,12
9,27	556,20	526,20	200,00	12,30	8,50	0,35		-0,11
10,00	600,00	570,00	200,00	12,30	8,50	0,36		-0,12
11,38	682,80	652,80	200,00	12,30	8,30	0,36		-0,12
12,00	720,06	690,06	200,00	12,30	8,30	0,34		-0,09
12,83	769,80	739,80	200,00	12,30	8,30	0,34		-0,09
13,33	799,80	769,80	200,00	12,30	8,40	0,36		-0,12
14,28	856,80	826,80	200,00	12,30	8,40	0,36		-0,12
15,00	900,00	870,00	200,00	12,30	8,50	0,36		-0,12
16,38	982,80	952,80	200,00	12,30	8,60	0,40		-0,16
17,00	1020,06	990,06	200,00	12,30	8,80	0,39		-0,15
18,33	1099,80	1069,80	200,00	12,30	9,00	0,41		-0,17
20,00	1200,00	1170,00	200,00	12,30	9,10	0,44		-0,21
22,00	1320,06	1290,06	200,00	12,30	9,30	0,47		-0,25
23,55	1413,00	1383,00	200,00	12,30	9,40	0,47		-0,25
25,00	1500,00	1470,00	200,00	12,30	9,40	0,47		-0,25
27,00	1620,06	1590,06	200,00	12,30	9,30	0,48		-0,26
28,55	1713,00	1683,00	200,00	12,30	9,20	0,47		-0,25
30,00	1800,00	1770,00	200,00	12,30	9,30	0,49		-0,27
43,55	2613,00	2583,00	200,00	12,30	9,30	0,51		-0,30
45,00	2700,00	2670,00	200,00	12,30	9,40	0,51		-0,30
47,00	2820,06	2790,06	200,00	12,30	9,40	0,53		-0,33
48,55	2913,00	2883,00	200,00	12,30	9,20	0,54		-0,34
50,00	3000,00	2970,00	200,00	12,30	9,20	0,56		-0,37
52,00	3120,06	3090,06	200,00	12,30	10,30	1,20		-3,00
53,55	3213,00	3183,00	200,00	12,30	10,40	1,22		-3,51
55,00	3300,00	3270,00	200,00	12,30	10,40	1,21		-3,22
57,00	3420,06	3390,06	200,00	12,30	10,50	1,23		-3,91
58,55	3513,00	3483,00	200,00	12,30	10,50	1,23		-3,91
60,00	3600,00	3570,00	200,00	12,30	10,60	1,25		



VI Anexo II

Henry Pa

Influence de la composition de la phase aqueuse

$$I = 1/2 \sum C_i z_i^2$$

$$I = 1/2 (\sum C_{Na^+} x (+1)^2 + \sum C_{Cl^-} x (-1)^2)$$

$$I = 1/2 (C_s + C_s)$$

$$I = C_s (C_{NaCl})$$

$$\log g_{O3} = (h_{Na} + h_G) [Na^+] + (h_{Cl} + h_G) [Cl^-]$$

$$g_{O3} = (H/H_{eau})$$

$$g_{O3} = \exp(0,392 * I)$$

Table 1 Ion

Authors	h_{Na}	h_{Cl}	Year	h_G
Schumpe	0,1171	0,0334	1993	0,0290
Danckwerts	0,0910	0,0210	1970	0,0960
Foussard	0,0910	0,0210	2000	0,0960
Azevedo	-0,0183	0,3416	2003	
Beltran	0,1143	0,0318	2004	0,0340

TC	$10^{-8} H_{O3-W}(Pa)$
20	3,92
25	4,40
30	4,87

Table 2 H_{sp} 20°C(Schumpe)

g/L	mol/L	mol/L	mol/L	mol/L	Schumpe		Experimental			
C _{NaCl} = l	C _{NaCl} = l	C _{Na}	C _{Cl}	l	logγO3	γ _{O3}	Happ	H eau	γ _{O3}	logγO3
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0						
1	0,01709	0,01709	0,01709	0,01709	0,00356	1,00824	4,91012E+08	3,92000E+08	1,2526	0,09781
40	0,68376	0,68376	0,68376	0,68376	0,14256	1,38856	6,76187E+08	3,92000E+08	1,7250	0,23678
100	1,70940	1,70940	1,70940	1,70940	0,35641	2,27201	1,10630E+09	3,92000E+08	2,8222	0,45059

Table 2 H_{sp} 20°C(Foussard)

g/L	mol/L	mol/L	mol/L	mol/L			Experimental			
C _{NaCl} = l	C _{NaCl} = l	C _{Na}	C _{Cl}	l	logγO3	γ _{O3}	Happ	H eau	γ _{O3}	logγO3
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000					
1	0,01709	0,01709	0,01709	0,01709	0,00356	1,00822	4,91012E+08	3,92000E+08	1,2526	0,09781
40	0,68376	0,68376	0,68376	0,68376	0,14222	1,38747	6,76187E+08	3,92000E+08	1,7250	0,23678
100	1,70940	1,70940	1,70940	1,70940	0,35556	2,26754	1,10630E+09	3,92000E+08	2,8222	0,45059

Table 2 H_{sp} 20°C(Azevedo)

g/L	mol/L	mol/L	mol/L	mol/L			Experimental			g/L	mol/L	mol/L
C _{NaCl} = l	C _{NaCl} = l	C _{Na}	C _{Cl}	γ _{O3}	logγO3	γ _{O3}						
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0							
1	0,01709	0,00672	0,01037	1,00672	0,00553	1,01281						
40	0,68376	0,26883	0,41493	1,30739	0,22106	1,66364						
100	1,70940	0,67207	1,03733	1,95440	0,55265	3,56985						

Table 2 H_{sp} 20°C(Beltran)

g/L	mol/L	mol/L	mol/L	mol/L	Beltran		Experimental			
C _{NaCl} = l	C _{NaCl} = l	C _{Na}	C _{Cl}	l	logγO3	γ _{O3}	Happ	H eau	γ _{O3}	logγO3
0	0,0	0,0	0,0	0,0						
1	0,01709	0,01709	0,01709	0,01709	0,00366	1,00846	4,91012E+08	3,92000E+08	1,2526	0,09781
40	0,68376	0,68376	0,68376	0,68376	0,14639	1,40085	6,76187E+08	3,92000E+08	1,7250	0,23678
100	1,70940	1,70940	1,70940	1,70940	0,36598	2,32265	1,10630E+09	3,92000E+08	2,8222	0,45059

VI Anexo III

Data: 30/11 / 05

corante = Orange II

pH = 5

C[col] = $1 \cdot 10^{-4}$ mol/L

vazão de gás = 250 L/h

Volume = 8,5 L

[O₃]Ge

(mg/L) = 12,3

m = 0,31

$U_G = G \cdot H / V$ H = 0,48

Tempo(min)	Tempo(s)	G (L/h)	[O ₃] _{es} (mg/L)	[O ₃] _L (mg/L)	U _G (m/s)	kLa (s-1)	O _{3e} /	[O ₃] _L '	N'[O ₃] _{es}	N[O ₃] _{es}	E _{Global}	E _{Integral}
0,00	0		0,00	0,00								
1,00	60	240,00	3,60	0,00	0,0038	0,012875294	7,08	2,20	245,65	0,068	2,4066	2,4066
1,50	90	241,00	3,00	0,00	0,0038	0,012928941	6,59	2,05	263,68	0,073	2,7637	2,7637
2,00	120	243,00	2,60	0,00	0,0038	0,013036235	6,24	1,94	277,31	0,077	3,0440	3,0440
2,50	150	244,00	2,50	0,00	0,0038	0,013089882	6,15	1,91	281,32	0,078	3,1208	3,1208
3,00	180	245,00	2,50	0,00	0,0038	0,013143529	6,15	1,91	282,47	0,078	3,1208	3,1208
3,50	210	246,00	2,50	0,00	0,0039	0,013197176	6,15	1,91	283,62	0,079	3,1208	3,1208
4,00	240	247,00	2,60	0,00	0,0039	0,013250824	6,24	1,94	281,87	0,078	3,0440	3,0440
4,50	270	247,00	2,70	0,00	0,0039	0,013250824	6,33	1,97	278,96	0,077	2,9701	2,9701
5,00	300	248,00	2,70	0,00	0,0039	0,013304471	6,33	1,97	280,09	0,078	2,9701	2,9701
5,50	330	248,00	2,70	0,00	0,0039	0,013304471	6,33	1,97	280,09	0,078	2,9701	2,9701
6,00	360	248,00	2,70	0,00	0,0039	0,013304471	6,33	1,97	280,09	0,078	2,9701	2,9701
6,50	390	249,00	2,70	0,00	0,0039	0,013358118	6,33	1,97	281,22	0,078	2,9701	2,9701
7,00	420	249,00	2,80	0,00	0,0039	0,013358118	6,42	2,00	278,29	0,077	2,8989	2,8989
7,50	450	249,00	2,80	0,00	0,0039	0,013358118	6,42	2,00	278,29	0,077	2,8989	2,8989
8,00	480	250,00	2,80	0,00	0,0039	0,013411765	6,42	2,00	279,41	0,078	2,8989	2,8989
8,50	510	250,00	2,80	0,00	0,0039	0,013411765	6,42	2,00	279,41	0,078	2,8989	2,8989
9,00	540	251,00	2,90	0,00	0,0039	0,013465412	6,51	2,02	277,58	0,077	2,8301	2,8301
10,00	600	251,00	2,90	0,00	0,0039	0,013465412	6,51	2,02	277,58	0,077	2,8301	2,8301
11,00	660	252,00	3,00	0,00	0,0040	0,013519059	6,59	2,05	275,72	0,077	2,7637	2,7637
12,00	720	252,00	3,00	0,00	0,0040	0,013519059	6,59	2,05	275,72	0,077	2,7637	2,7637
13,00	780	253,00	3,10	0,00	0,0040	0,013572706	6,68	2,08	273,84	0,076	2,6995	2,6995
14,00	840	253,00	3,20	0,00	0,0040	0,013572706	6,76	2,10	270,86	0,075	2,6373	2,6373
15,00	900	253,00	3,20	0,00	0,0040	0,013572706	6,76	2,10	270,86	0,075	2,6373	2,6373
16,00	960	253,00	3,10	0,00	0,0040	0,013572706	6,68	2,08	273,84	0,076	2,6995	2,6995
17,00	1020	254,00	3,10	0,00	0,0040	0,013626353	6,68	2,08	274,92	0,076	2,6995	2,6995
18,00	1080	254,00	3,10	0,00	0,0040	0,013626353	6,68	2,08	274,92	0,076	2,6995	2,6995
19,00	1140	255,00	3,20	0,00	0,0040	0,01368	6,76	2,10	273,00	0,076	2,6373	2,6373
20,00	1200	255,00	3,20	0,00	0,0040	0,01368	6,76	2,10	273,00	0,076	2,6373	2,6373
22,00	1320	255,00	3,20	0,00	0,0040	0,01368	6,76	2,10	273,00	0,076	2,6373	2,6373
24,00	1440	255,00	3,20	0,00	0,0040	0,01368	6,76	2,10	273,00	0,076	2,6373	2,6373
26,00	1560	255,00	3,20	0,00	0,0040	0,01368	6,76	2,10	273,00	0,076	2,6373	2,6373
28,00	1680	255,00	3,30	0,00	0,0040	0,01368	6,84	2,13	270,00	0,075	2,5770	2,5770
30,00	1800	255,00	3,50	0,02	0,0040	0,01368	7,00	2,18	264,00	0,073	2,4846	2,4618
32,00	1920	255,00	3,50	0,03	0,0040	0,01368	7,00	2,18	264,00	0,073	2,4962	2,4618
34,00	2040	255,00	3,50	0,05	0,0040	0,01368	7,00	2,18	264,00	0,073	2,5196	2,4618
36,00	2160	255,00	3,60	0,09	0,0040	0,01368	7,08	2,20	261,00	0,073	2,5092	2,4066

38,00	2280	255,00	3,60	0,12	0,0040	0,01368	7,08	2,20	261,00	0,073	2,5453	2,4066
40,00	2400	255,00	3,60	0,16	0,0040	0,01368	7,08	2,20	261,00	0,073	2,5952	2,4066

pH =5

C[col] = $1 \cdot 10^{-4}$ mol/L

vazão de gás = 237 L/h

Volume = 8,5 L

[O₃]Ge

(mg/L)= 12,3

C[NaCl] = 1g/L

m = 0,311

$U_G = G \cdot H / V$ H= 0,57

Tempo(min)	Tempo(s)	G (L/h)	[O ₃] _{Gs} (mg/L)	[O ₃] _L (mg/L)	U _G (m/s)	kLa (s-1)	O ₃ /	[O ₃] _L	N[O ₃] _{Gs}	N[O ₃] _{Gs}	E _{global}	E _{integral}
0,00	0											
1,00	60	237,00	3,50	0,01	0,0044147	0,015098294	7,00	2,18	315,07	0,068	2,0827	2,0731
1,50	90	239,00	3,00	0,01	0,0044520	0,015225706	6,59	2,05	303,67	0,073	2,3388	2,3273
2,00	120	240,00	2,60	0,00	0,0044706	0,015289412	6,24	1,94	290,82	0,076	2,5634	2,5634
2,50	150	241,00	2,50	0,00	0,0044892	0,015353118	6,15	1,91	277,86	0,077	2,6281	2,6281
3,00	180	243,00	2,50	0,00	0,0045265	0,015480529	6,15	1,91	265,87	0,078	2,6281	2,6281
3,50	210	244,00	2,50	0,00	0,0045451	0,015544235	6,15	1,91	252,61	0,078	2,6281	2,6281
4,00	240	245,00	2,40	0,00	0,0045637	0,015607941	6,06	1,88	239,24	0,079	2,6954	2,6954
4,50	270	247,00	2,50	0,00	0,0046010	0,015735353	6,15	1,91	226,66	0,079	2,6281	2,6281
5,00	300	248,00	2,60	0,00	0,0046196	0,015799059	6,24	1,94	212,99	0,079	2,5634	2,5634
5,50	330	248,00	2,60	0,00	0,0046196	0,015799059	6,24	1,94	198,40	0,079	2,5634	2,5634
6,00	360	249,00	2,60	0,00	0,0046382	0,015862765	6,24	1,94	184,55	0,079	2,5634	2,5634
6,50	390	249,00	2,60	0,00	0,0046382	0,015862765	6,24	1,94	169,91	0,079	2,5634	2,5634
7,00	420	250,00	2,60	0,00	0,0046569	0,015926471	6,24	1,94	155,88	0,079	2,5634	2,5634
7,50	450	250,00	2,70	0,00	0,0046569	0,015926471	6,33	1,97	141,18	0,078	2,5011	2,5011
8,00	480	250,00	2,80	0,00	0,0046569	0,015926471	6,42	2,00	126,47	0,078	2,4411	2,4411
8,50	510	251,00	2,80	0,00	0,0046755	0,015990176	6,42	2,00	112,21	0,078	2,4411	2,4411
9,00	540	251,00	2,90	0,00	0,0046755	0,015990176	6,51	2,02	97,45	0,077	2,3833	2,3833
10,00	600	252,00	2,90	0,00	0,0046941	0,016053882	6,51	2,02	68,19	0,077	2,3833	2,3833
11,00	660	253,00	3,00	0,00	0,0047127	0,016117588	6,59	2,05	38,69	0,077	2,3273	2,3273
12,00	720	253,00	3,10	0,00	0,0047127	0,016117588	6,68	2,08	8,93	0,076	2,2733	2,2733
13,00	780	253,00	3,10	0,00	0,0047127	0,016117588	6,68	2,08	-20,84	0,076	2,2733	2,2733
14,00	840	254,00	3,20	0,00	0,0047314	0,016181294	6,76	2,10	-50,80	0,076	2,2209	2,2209
15,00	900	254,00	3,10	0,00	0,0047314	0,016181294	6,68	2,08	-80,68	0,076	2,2733	2,2733
16,00	960	254,00	3,10	0,00	0,0047314	0,016181294	6,68	2,08	-110,56	0,076	2,2733	2,2733
17,00	1020	254,00	3,10	0,00	0,0047314	0,016181294	6,68	2,08	-140,45	0,076	2,2733	2,2733
18,00	1080	255,00	3,10	0,00	0,0047500	0,01624500	6,68	2,08	-171,00	0,077	2,2733	2,2733
19,00	1140	255,00	3,20	0,00	0,0047500	0,01624500	6,76	2,10	-201,00	0,076	2,2209	2,2209
20,00	1200	256,00	3,20	0,00	0,0047686	0,016308706	6,76	2,10	-231,91	0,076	2,2209	2,2209
22,00	1320	256,00	3,30	0,00	0,0047686	0,016308706	6,84	2,13	-292,14	0,075	2,1701	2,1701
24,00	1440	256,00	3,30	0,00	0,0047686	0,016308706	6,84	2,13	-352,38	0,075	2,1701	2,1701
26,00	1560	256,00	3,50	0,01	0,0047686	0,016308706	7,00	2,18	-412,61	0,074	2,0827	2,0731
28,00	1680	256,00	3,50	0,02	0,0047686	0,016308706	7,00	2,18	-472,85	0,074	2,0923	2,0731
30,00	1800	256,00	3,50	0,05	0,0047686	0,016308706	7,00	2,18	-533,08	0,074	2,1218	2,0731
32,00	1920	256,00	3,50	0,10	0,0047686	0,016308706	7,00	2,18	-593,32	0,074	2,1729	2,0731
34,00	2040	256,00	3,70	0,14	0,0047686	0,016308706	7,16	2,23	-653,55	0,072	2,1144	1,9814

36,00	2160	256,00	3,90	0,23	0,0047686	0,016308706	7,31	2,27	-713,79	0,070	2,1077	1,8946
38,00	2280	256,00	3,90	0,27	0,0047686	0,016308706	7,31	2,27	-774,02	0,070	2,1498	1,8946
40,00	2400	256,00	4,00	0,34	0,0047686	0,016308706	7,39	2,30	-834,26	0,069	2,1746	1,8528

Data:30/11/ 05

corante = Orange II

pH =5

C[col] = $1 \cdot 10^{-4}$ mol/L

vazão de gás = 236 L/h

Volume = 8,5 L

C[NaCl] = 40 g/L

[O₃]Ge

(mg/L)= 12,2

m = 0,311

$U_G = G \cdot H/V$

H= 0,57

Tempo(min)	Tempo(s)	G (L/h)	[O ₃] _{GS} (mg/L)	[O ₃] _L (mg/L)	U _G (m/s)	kLa (s-1)	O _{3G} /	[O ₃] _L *	N'[O ₃] _{GS}	N[O ₃] _{GS}	E _{Globaj}	E _{Integral}
0,00	0											
1,00	60	236,00	5,00	0,01	0,0044	0,015034588	8,07	2,51	310,96	0,056	1,4772	1,4713
1,50	90	238,00	4,40	0,01	0,0044	0,015162	7,65	2,38	299,60	0,061	1,6893	1,6822
2,00	120	240,00	4,30	0,01	0,0045	0,015289412	7,58	2,36	288,00	0,062	1,7274	1,7201
2,50	150	242,00	4,20	0,01	0,0045	0,015416824	7,50	2,33	276,16	0,063	1,7665	1,7589
3,00	180	244,00	4,10	0,01	0,0045	0,015544235	7,43	2,31	264,09	0,065	1,8065	1,7986
3,50	210	246,00	4,10	0,01	0,0046	0,015671647	7,43	2,31	251,79	0,065	1,8065	1,7986
4,00	240	248,00	4,00	0,00	0,0046	0,015799059	7,35	2,29	239,25	0,066	1,8394	1,8394
4,50	270	249,00	4,10	0,00	0,0046	0,015862765	7,43	2,31	225,56	0,066	1,7986	1,7986
5,00	300	250,00	4,00	0,00	0,0047	0,015926471	7,35	2,29	211,76	0,067	1,8394	1,8394
5,50	330	250,00	4,00	0,00	0,0047	0,015926471	7,35	2,29	197,06	0,067	1,8394	1,8394
6,00	360	251,00	3,90	0,00	0,0047	0,015990176	7,28	2,26	183,08	0,068	1,8811	1,8811
6,50	390	251,00	3,70	0,00	0,0047	0,015990176	7,12	2,22	168,32	0,070	1,9680	1,9680
7,00	420	252,00	3,60	0,00	0,0047	0,016053882	7,05	2,19	154,16	0,071	2,0132	2,0132
7,50	450	252,00	3,50	0,00	0,0047	0,016053882	6,97	2,17	139,34	0,072	2,0596	2,0596
8,00	480	253,00	3,40	0,00	0,0047	0,016117588	6,89	2,14	125,01	0,073	2,1074	2,1074
8,50	510	253,00	3,30	0,00	0,0047	0,016117588	6,81	2,12	110,13	0,074	2,1567	2,1567
9,00	540	253,00	3,20	0,00	0,0047	0,016117588	6,73	2,09	95,25	0,074	2,2074	2,2074
10,00	600	254,00	3,20	0,00	0,0047	0,016181294	6,73	2,09	65,74	0,075	2,2074	2,2074
11,00	660	254,00	3,30	0,00	0,0047	0,016181294	6,81	2,12	35,86	0,074	2,1567	2,1567
12,00	720	254,00	3,30	0,00	0,0047	0,016181294	6,81	2,12	5,98	0,074	2,1567	2,1567
13,00	780	255,00	3,40	0,00	0,0048	0,016245	6,89	2,14	-24,00	0,073	2,1074	2,1074
14,00	840	255,00	3,30	0,00	0,0048	0,016245	6,81	2,12	-54,00	0,074	2,1567	2,1567
15,00	900	256,00	3,30	0,00	0,0048	0,016308706	6,81	2,12	-84,33	0,074	2,1567	2,1567
16,00	960	257,00	3,40	0,00	0,0048	0,016372412	6,89	2,14	-114,89	0,074	2,1074	2,1074
17,00	1020	257,00	3,40	0,00	0,0048	0,016372412	6,89	2,14	-145,13	0,074	2,1074	2,1074
18,00	1080	258,00	3,50	0,01	0,0048	0,016436118	6,97	2,17	-176,05	0,073	2,0692	2,0596
19,00	1140	258,00	3,70	0,04	0,0048	0,016436118	7,12	2,22	-206,40	0,072	2,0041	1,9680
20,00	1200	258,00	3,60	0,06	0,0048	0,016436118	7,05	2,19	-236,75	0,073	2,0698	2,0132
22,00	1320	259,00	3,70	0,12	0,0048	0,016499824	7,12	2,22	-298,61	0,072	2,0806	1,9680
24,00	1440	259,00	3,80	0,17	0,0048	0,016499824	7,20	2,24	-359,55	0,071	2,0820	1,9240
26,00	1560	260,00	3,50	0,17	0,0048	0,016563529	6,97	2,17	-422,12	0,074	2,2350	2,0596
28,00	1680	262,00	3,40	0,17	0,0049	0,016690941	6,89	2,14	-487,01	0,075	2,2891	2,1074

30,00	1800	263,00	3,50	0,26	0,0049	0,016754647	6,97	2,17	-550,75	0,075	2,3405	2,0596
32,00	1920	263,00	3,60	0,27	0,0049	0,016754647	7,05	2,19	-612,64	0,074	2,2960	2,0132
34,00	2040	264,00	3,80	0,30	0,0049	0,016818353	7,20	2,24	-677,08	0,072	2,2215	1,9240
36,00	2160	264,00	3,90	0,39	0,0049	0,016818353	7,28	2,26	-739,20	0,072	2,2727	1,8811
38,00	2280	264,00	4,00	0,41	0,0049	0,016818353	7,35	2,29	-801,32	0,071	2,2412	1,8394
40,00	2400	264,00	4,00	0,49	0,0049	0,016818353	7,35	2,29	-863,44	0,071	2,3410	1,8394

Data:01/12/ 05

corante = Orange II

pH =5

C[NaCl] = 100 g/L

C[col] = $1 \cdot 10^{-4}$ mol/L

vazão de gás = 220 L/h

Volume = 8,5 L

m = 0,311

[O₃]Ge

(mg/L)= 12,1

$U_G = G \cdot H / V$

H= 0,57

Tempo(min)	Tempo(s)	G (L/h)	[O ₃] _{GS} (mg/L)	[O ₃] _L (mg/L)	U _G (m/s)	kLa (s-1)	O _{3G} /	[O ₃] _L *	N'[O ₃] _{GS}	N[O ₃] _{GS}	E _{Global}	E _{Integral}
0,00	0	0,00										
1,00	60	220	4,90	0,01	0,0041	0,014015294	7,96	2,48	186,35	-1,259	1,4971	1,4911
1,50	90	223	4,60	0,01	0,0042	0,014206412	7,75	2,41	196,76	-2,048	1,6019	1,5953
2,00	120	224	4,60	0,01	0,0042	0,014270118	7,75	2,41	197,65	-2,743	1,6019	1,5953
2,50	150	224	4,60	0,01	0,0042	0,014270118	7,75	2,41	197,65	-3,429	1,6019	1,5953
3,00	180	225	4,70	0,01	0,0042	0,014333824	7,83	2,43	195,88	-4,041	1,5662	1,5598
3,50	210	226	4,70	0,01	0,0042	0,014397529	7,83	2,43	196,75	-4,735	1,5662	1,5598
4,00	240	227	4,70	0,01	0,0042	0,014461235	7,83	2,43	197,62	-5,436	1,5662	1,5598
4,50	270	227	4,70	0,01	0,0042	0,014461235	7,83	2,43	197,62	-6,115	1,5662	1,5598
5,00	300	228	4,70	0,01	0,0042	0,014524941	7,83	2,43	198,49	-6,825	1,5662	1,5598
5,50	330	228	4,70	0,00	0,0042	0,014524941	7,83	2,43	198,49	-7,476	1,5598	1,5598
6,00	360	229	4,70	0,00	0,0043	0,014588647	7,83	2,43	199,36	-8,192	1,5598	1,5598
6,50	390	230	4,60	0,00	0,0043	0,014652353	7,75	2,41	202,94	-9,116	1,5953	1,5953
7,00	420	230	4,60	0,00	0,0043	0,014652353	7,75	2,41	202,94	-9,817	1,5953	1,5953
7,50	450	231	4,60	0,00	0,0043	0,014716059	7,75	2,41	203,82	-10,564	1,5953	1,5953
8,00	480	231	4,60	0,00	0,0043	0,014716059	7,75	2,41	203,82	-11,268	1,5953	1,5953
8,50	510	232	4,60	0,00	0,0043	0,014779765	7,75	2,41	204,71	-12,025	1,5953	1,5953
9,00	540	232	4,50	0,00	0,0043	0,014779765	7,68	2,39	207,44	-13,021	1,6315	1,6315
10,00	600	232	4,50	0,00	0,0043	0,014779765	7,68	2,39	207,44	-14,468	1,6315	1,6315
11,00	660	233	4,50	0,00	0,0043	0,014843471	7,68	2,39	208,33	-15,983	1,6315	1,6315
12,00	720	233	4,50	0,00	0,0043	0,014843471	7,68	2,39	208,33	-17,436	1,6315	1,6315
13,00	780	234	4,40	0,00	0,0044	0,014907176	7,61	2,37	211,98	-19,402	1,6686	1,6686
14,00	840	235	4,30	0,00	0,0044	0,014970882	7,54	2,34	215,65	-21,460	1,7065	1,7065
15,00	900	235	4,10	0,00	0,0044	0,014970882	7,39	2,30	221,18	-24,052	1,7851	1,7851
16,00	960	235	4,10	0,00	0,0044	0,014970882	7,39	2,30	221,18	-25,655	1,7851	1,7851
17,00	1020	236	4,20	0,00	0,0044	0,015034588	7,47	2,32	219,34	-26,765	1,7453	1,7453
18,00	1080	236	4,20	0,00	0,0044	0,015034588	7,47	2,32	219,34	-28,339	1,7453	1,7453
19,00	1140	236	4,20	0,01	0,0044	0,015034588	7,47	2,32	219,34	-30,043	1,7529	1,7453
20,00	1200	237	4,50	0,06	0,0044	0,015098294	7,68	2,39	211,91	-30,320	1,6735	1,6315
22,00	1320	237	4,60	0,12	0,0044	0,015098294	7,75	2,41	209,12	-33,455	1,6788	1,5953

24,00	1440	237	4,70	0,21	0,0044	0,015098294	7,83	2,43	206,33	-37,109	1,7071	1,5598
26,00	1560	238	4,80	0,24	0,0044	0,015162	7,90	2,46	204,40	-39,973	1,6903	1,5251
28,00	1680	238	4,90	0,32	0,0044	0,015162	7,96	2,48	201,60	-43,606	1,7122	1,4911
30,00	1800	238	5,00	0,33	0,0044	0,015162	8,03	2,50	198,80	-45,830	1,6796	1,4577
32,00	1920	240	5,00	0,36	0,0045	0,015289412	8,03	2,50	200,47	-49,987	1,7031	1,4577
34,00	2040	240	5,10	0,38	0,0045	0,015289412	8,10	2,52	197,65	-52,332	1,6781	1,4251
36,00	2160	240	5,20	0,37	0,0045	0,015289412	8,17	2,54	194,82	-53,837	1,6305	1,3930
38,00	2280	240	5,20	0,40	0,0045	0,015289412	8,17	2,54	194,82	-57,624	1,6533	1,3930
40,00	2400	241	5,30	0,40	0,0045	0,015353118	8,24	2,56	192,80	-59,445	1,6136	1,3616

Data:01/12/ 05

corante = Orange II

pH =5

C[col] = $1 \cdot 10^{-4}$ mol/L

C[NaCl] = 0 + t-but

vazão de gás = 230 L/h

Volume = 8,5 L

m = 0,311

[O₃]Ge

(mg/L)= 12

$U_G = G \cdot H/V$

H= 0,57

Tempo(min)	Tempo(s)	G (L/h)	[O ₂] _{GS} (mg/L)	[O ₂] _L (mg/L)	U _G (m/s)	kLa (s ⁻¹)	O _{2G} /	[O ₂] _L	N ^o [O ₂] _{GS}	N ^o [O ₂] _{GS}	E _{Global}	E _{Integral}
0,00	0											
1,00	60	219,00	3,10	0,01	0,0041	0,018357353	6,58	2,04	229,31	-1,878	1,7051	1,6967
1,50	90	220,00	3,00	0,01	0,0041	0,018441176	6,49	2,02	232,94	-2,898	1,7465	1,7378
2,00	120	222,00	2,90	0,00	0,0041	0,018608824	6,41	1,99	237,67	-3,976	1,7803	1,7803
2,50	150	223,00	2,90	0,00	0,0042	0,018692647	6,41	1,99	238,74	-4,992	1,7803	1,7803
3,00	180	224,00	2,90	0,00	0,0042	0,018776471	6,41	1,99	239,81	-6,017	1,7803	1,7803
3,50	210	225,00	2,90	0,00	0,0042	0,018860294	6,41	1,99	240,88	-7,051	1,7803	1,7803
4,00	240	226,00	2,80	0,00	0,0042	0,018944118	6,32	1,97	244,61	-8,294	1,8243	1,8243
4,50	270	226,00	2,80	0,00	0,0042	0,018944118	6,32	1,97	244,61	-9,331	1,8243	1,8243
5,00	300	227,00	2,80	0,00	0,0042	0,019027941	6,32	1,97	245,69	-10,414	1,8243	1,8243
5,50	330	227,00	2,80	0,00	0,0042	0,019027941	6,32	1,97	245,69	-11,455	1,8243	1,8243
6,00	360	228,00	2,90	0,00	0,0042	0,019111765	6,41	1,99	244,09	-12,249	1,7803	1,7803
6,50	390	228,00	2,90	0,00	0,0042	0,019111765	6,41	1,99	244,09	-13,270	1,7803	1,7803
7,00	420	229,00	3,00	0,00	0,0043	0,019195588	6,49	2,02	242,47	-14,011	1,7378	1,7378
7,50	450	229,00	3,10	0,00	0,0043	0,019195588	6,58	2,04	239,78	-14,656	1,6967	1,6967
8,00	480	229,00	3,10	0,00	0,0043	0,019195588	6,58	2,04	239,78	-15,633	1,6967	1,6967
8,50	510	230,00	3,10	0,00	0,0043	0,019279412	6,58	2,04	240,82	-16,683	1,6967	1,6967
9,00	540	230,00	3,20	0,01	0,0043	0,019279412	6,66	2,07	238,12	-17,333	1,6650	1,6569
10,00	600	231,00	3,40	0,04	0,0043	0,019363235	6,82	2,12	233,72	-18,719	1,6113	1,5809
11,00	660	232,00	3,50	0,14	0,0043	0,019447059	6,90	2,15	232,00	-21,204	1,6524	1,5446
12,00	720	232,00	3,80	0,24	0,0043	0,019447059	7,13	2,22	223,81	-22,625	1,6164	1,4415
13,00	780	232,00	4,00	0,34	0,0043	0,019447059	7,28	2,26	218,35	-24,570	1,6205	1,3772
14,00	840	233,00	4,30	0,45	0,0043	0,019530882	7,50	2,33	211,07	-26,136	1,5939	1,2865
15,00	900	233,00	4,50	0,55	0,0043	0,019530882	7,65	2,38	205,59	-28,098	1,5995	1,2295
16,00	960	233,00	4,60	0,56	0,0043	0,019530882	7,72	2,40	202,85	-29,378	1,5678	1,2020
17,00	1020	234,00	4,60	0,62	0,0044	0,019614706	7,72	2,40	203,72	-32,404	1,6206	1,2020
18,00	1080	234,00	4,80	0,68	0,0044	0,019614706	7,86	2,44	198,21	-33,693	1,5915	1,1486

19,00	1140	234,00	4,90	0,73	0,0044	0,019614706	7,93	2,47	195,46	-35,645	1,5951	1,1228
20,00	1200	235,00	4,90	0,68	0,0044	0,019698529	7,93	2,47	196,29	-36,629	1,5505	1,1228
22,00	1320	235,00	5,10	0,85	0,0044	0,019698529	8,06	2,51	190,76	-42,164	1,6226	1,0726
24,00	1440	235,00	5,40	1,00	0,0044	0,019698529	8,27	2,57	182,47	-46,441	1,6383	1,0010
26,00	1560	235,00	5,60	1,11	0,0044	0,019698529	8,40	2,61	176,94	-51,026	1,6617	0,9554
28,00	1680	235,00	5,90	1,20	0,0044	0,019698529	8,59	2,67	168,65	-53,423	1,6154	0,8900
30,00	1800	235,00	6,10	1,28	0,0044	0,019698529	8,72	2,71	163,12	-56,919	1,6064	0,8482
32,00	1920	236,00	6,20	1,33	0,0044	0,019782353	8,78	2,73	161,04	-61,236	1,6134	0,8278
34,00	2040	236,00	6,30	1,36	0,0044	0,019782353	8,85	2,75	158,26	-64,423	1,5974	0,8078
36,00	2160	236,00	6,50	1,34	0,0044	0,019782353	8,97	2,79	152,71	-63,154	1,4789	0,7686
38,00	2280	236,00	6,50	1,30	0,0044	0,019782353	8,97	2,79	152,71	-64,876	1,4392	0,7686
40,00	2400	236,00	6,40	1,26	0,0044	0,019782353	8,91	2,77	155,48	-68,584	1,4453	0,7880

pH =5

C[col] = 1 10⁻⁴ mol/L

vazão de gás = 177 L/h

Volume = 8,5 L

m = 0,311

[O₃]_{Ge}

(mg/L)= 12,5

U_G=G*H/V

H= 0,57

Tempo(min)	Tempo(s)	G (L/h)	[O ₃] _{Gs} (mg/L)	[O ₃] _L (mg/L)	U _G (m/s)	kLa (s ⁻¹)	O ₃ /	[O ₃] _L	N[O ₃] _{Gs}	N[O ₃] _{Gs}	E _{Global}	E _{Integral}
0,00	0											
1,00	60	177,00	3,80	0,01	0,0033	0,014836765	7,31	2,27	181,16	-1,334	1,4993	1,4927
1,50	90	178,00	4,50	0,01	0,0033	0,014920588	7,83	2,44	167,53	-1,727	1,2860	1,2807
2,00	120	180,00	4,80	0,01	0,0034	0,015088235	8,05	2,50	163,06	-2,181	1,2046	1,1998
2,50	150	181,00	4,80	0,01	0,0034	0,015172059	8,05	2,50	163,96	-2,741	1,2046	1,1998
3,00	180	182,00	4,90	0,01	0,0034	0,015255882	8,12	2,52	162,73	-3,236	1,1786	1,1740
3,50	210	183,00	4,90	0,01	0,0034	0,015339706	8,12	2,52	163,62	-3,797	1,1786	1,1740
4,00	240	184,00	4,90	0,01	0,0034	0,015423529	8,12	2,52	164,52	-4,363	1,1786	1,1740
4,50	270	184,00	4,90	0,00	0,0034	0,015423529	8,12	2,52	164,52	-4,889	1,1740	1,1740
5,00	300	185,00	4,90	0,00	0,0034	0,015507353	8,12	2,52	165,41	-5,462	1,1740	1,1740
5,50	330	186,00	4,90	0,00	0,0035	0,015591176	8,12	2,52	166,31	-6,040	1,1740	1,1740
6,00	360	186,00	4,80	0,00	0,0035	0,015591176	8,05	2,50	168,49	-6,734	1,1998	1,1998
6,50	390	187,00	4,70	0,00	0,0035	0,015675	7,97	2,48	171,60	-7,496	1,2262	1,2262
7,00	420	188,00	4,70	0,00	0,0035	0,015758824	7,97	2,48	172,52	-8,116	1,2262	1,2262
7,50	450	189,00	4,60	0,00	0,0035	0,015842647	7,90	2,46	175,66	-8,934	1,2532	1,2532
8,00	480	189,00	4,40	0,00	0,0035	0,015842647	7,76	2,41	180,11	-9,953	1,3089	1,3089
8,50	510	190,00	4,30	0,00	0,0035	0,015926471	7,68	2,39	183,29	-10,866	1,3377	1,3377
9,00	540	190,00	4,10	0,00	0,0035	0,015926471	7,54	2,34	187,76	-12,018	1,3974	1,3974
10,00	600	191,00	3,90	0,00	0,0036	0,016010294	7,38	2,30	193,25	-14,026	1,4601	1,4601
11,00	660	192,00	3,90	0,00	0,0036	0,016094118	7,38	2,30	194,26	-15,509	1,4601	1,4601
12,00	720	192,00	3,90	0,00	0,0036	0,016094118	7,38	2,30	194,26	-16,919	1,4601	1,4601
13,00	780	193,00	4,10	0,00	0,0036	0,016177941	7,54	2,34	190,73	-17,634	1,3974	1,3974
14,00	840	193,00	4,20	0,00	0,0036	0,016177941	7,61	2,37	188,46	-18,580	1,3672	1,3672
15,00	900	194,00	4,30	0,01	0,0036	0,016261765	7,68	2,39	187,15	-19,660	1,3433	1,3377
16,00	960	194,00	4,40	0,09	0,0036	0,016261765	7,76	2,41	184,87	-21,223	1,3596	1,3089
17,00	1020	195,00	4,60	0,15	0,0036	0,016345588	7,90	2,46	181,24	-22,248	1,3346	1,2532
18,00	1080	195,00	4,80	0,20	0,0036	0,016345588	8,05	2,50	176,65	-23,017	1,3041	1,1998
19,00	1140	196,00	4,90	0,30	0,0037	0,016429412	8,12	2,52	175,25	-24,947	1,3323	1,1740
20,00	1200	196,00	4,90	0,32	0,0037	0,016429412	8,12	2,52	175,25	-26,499	1,3444	1,1740

22,00	1320	197,00	5,20	0,44	0,0037	0,016513235	8,32	2,59	169,19	-28,864	1,3246	1,0995
24,00	1440	197,00	5,30	0,50	0,0037	0,016513235	8,39	2,61	166,87	-31,627	1,3305	1,0756
26,00	1560	198,00	5,60	0,59	0,0037	0,016597059	8,59	2,67	160,73	-33,433	1,2918	1,0066
28,00	1680	198,00	5,70	0,69	0,0037	0,016597059	8,66	2,69	158,40	-36,887	1,3235	0,9844
30,00	1800	199,00	5,70	0,66	0,0037	0,016680882	8,66	2,69	159,20	-39,137	1,3039	0,9844
32,00	1920	199,00	5,90	0,75	0,0037	0,016680882	8,79	2,73	154,52	-41,521	1,2969	0,9412
34,00	2040	199,00	5,90	0,80	0,0037	0,016680882	8,79	2,73	154,52	-45,257	1,3305	0,9412
36,00	2160	200,00	6,00	0,89	0,0037	0,016764706	8,86	2,75	152,94	-49,204	1,3594	0,9201
38,00	2280	200,00	6,20	0,93	0,0037	0,016764706	8,98	2,79	148,24	-50,338	1,3175	0,8790
40,00	2400	201	6,20	0,96	0,0037	0,016848529	8,98	2,79	148,98	-54,123	1,3390	0,8790

Data:06/12/ 05

pH =7,5

corante = Orange II

C[col] = $1 \cdot 10^{-4}$ mol/L

C[NaCl] = 0

vazão de gás = 210 L/h

Volume = 8,5 L

m = 0,31

[O₃]Ge

(mg/L)= 12,7

U_G=G*H/V H= 0,48

Tempo(min)	Tempo(s)	G (L/h)	[O ₃] _{gs} (mg/L)	[O ₃] _L (mg/L)	U _G (m/s)	kLa (s-1)	O ₃ /	[O ₃] _L	N[O ₃] _{gs}	N[O ₃] _{gs}	E _{Global}	E _{Integral}
0,00	0											
1,00	60	210,00	2,50	0,00	0,0033	0,01126588	6,28	1,95	252,00	0,070	3,1835	3,1835
1,50	90	210,00	2,40	0,00	0,0032941	0,01126588	6,18	1,92	254,47	0,071	3,2635	3,2635
2,00	120	211,00	2,40	0,00	0,0033098	0,01131953	6,18	1,92	255,68	0,071	3,2635	3,2635
2,50	150	211,00	2,50	0,00	0,0033098	0,01131953	6,28	1,95	253,20	0,070	3,1835	3,1835
3,00	180	212,00	2,40	0,00	0,0033255	0,01137318	6,18	1,92	256,89	0,071	3,2635	3,2635
3,50	210	213,00	2,40	0,00	0,0033412	0,01142682	6,18	1,92	258,11	0,072	3,2635	3,2635
4,00	240	214,00	2,50	0,00	0,0033569	0,01148047	6,28	1,95	256,80	0,071	3,1835	3,1835
4,50	270	215,00	2,50	0,00	0,0033725	0,01153412	6,28	1,95	258,00	0,072	3,1835	3,1835
5,00	300	216,00	2,50	0,00	0,0033882	0,01158776	6,28	1,95	259,20	0,072	3,1835	3,1835
5,50	330	216,00	2,50	0,00	0,0033882	0,01158776	6,28	1,95	259,20	0,072	3,1835	3,1835
6,00	360	217,00	2,60	0,00	0,0034039	0,01164141	6,37	1,98	257,85	0,072	3,1067	3,1067
6,50	390	217,00	2,60	0,00	0,0034039	0,01164141	6,37	1,98	257,85	0,072	3,1067	3,1067
7,00	420	218,00	2,70	0,00	0,0034196	0,01169506	6,46	2,01	256,47	0,071	3,0328	3,0328
7,50	450	218,00	2,80	0,00	0,0034196	0,01169506	6,55	2,04	253,91	0,071	2,9615	2,9615
8,00	480	219,00	2,80	0,00	0,0034353	0,01174871	6,55	2,04	255,07	0,071	2,9615	2,9615
8,50	510	219,00	2,90	0,00	0,0034353	0,01174871	6,64	2,06	252,49	0,070	2,8928	2,8928
9,00	540	219,00	2,90	0,00	0,0034353	0,01174871	6,64	2,06	252,49	0,070	2,8928	2,8928
10,00	600	220,00	3,00	0,00	0,0034510	0,01180235	6,72	2,09	251,06	0,070	2,8264	2,8264
11,00	660	220,00	3,20	0,00	0,0034510	0,01180235	6,89	2,14	245,88	0,068	2,7000	2,7000
12,00	720	220,00	3,30	0,00	0,0034510	0,01180235	6,97	2,17	243,29	0,068	2,6397	2,6397
13,00	780	221,00	3,50	0,00	0,0034667	0,011856	7,14	2,22	239,20	0,066	2,5245	2,5245
14,00	840	222,00	3,70	0,00	0,0034824	0,01190965	7,30	2,27	235,06	0,065	2,4156	2,4156
15,00	900	222,00	3,90	0,00	0,0034824	0,01190965	7,45	2,32	229,84	0,064	2,3125	2,3125
16,00	960	223,00	4,00	0,00	0,0034980	0,01196329	7,53	2,34	228,25	0,063	2,2629	2,2629
17,00	1020	223,00	4,00	0,00	0,0034980	0,01196329	7,53	2,34	228,25	0,063	2,2629	2,2629

18,00	1080	223,00	4,10	0,00	0,0034980	0,01196329	7,61	2,37	225,62	0,063	2,2146	2,2146
19,00	1140	223,00	4,10	0,00	0,0034980	0,01196329	7,61	2,37	225,62	0,063	2,2146	2,2146
20,00	1200	224,00	4,20	0,00	0,0035137	0,01201694	7,68	2,39	224,00	0,062	2,1674	2,1674
22,00	1320	224,00	4,30	0,00	0,0035137	0,01201694	7,76	2,41	221,36	0,061	2,1213	2,1213
24,00	1440	224,00	4,30	0,00	0,0035137	0,01201694	7,76	2,41	221,36	0,061	2,1213	2,1213
26,00	1560	224,00	4,30	0,00	0,0035137	0,01201694	7,76	2,41	221,36	0,061	2,1213	2,1213
28,00	1680	225,00	4,40	0,00	0,0035294	0,01207059	7,83	2,44	219,71	0,061	2,0762	2,0762
30,00	1800	225,00	4,40	0,00	0,0035294	0,01207059	7,83	2,44	219,71	0,061	2,0762	2,0762
32,00	1920	225,00	4,40	0,00	0,0035294	0,01207059	7,83	2,44	219,71	0,061	2,0762	2,0762
34,00	2040	225,00	4,50	0,00	0,0035294	0,01207059	7,90	2,46	217,06	0,060	2,0322	2,0322
36,00	2160	226,00	4,50	0,00	0,0035451	0,01212424	7,90	2,46	218,02	0,061	2,0322	2,0322
38,00	2280	226,00	4,60	0,00	0,0035451	0,01212424	7,98	2,48	215,36	0,060	1,9892	1,9892
40,00	2400	226,00	4,40	0,00	0,0035451	0,01212424	7,83	2,44	220,68	0,061	2,0762	2,0762
42,00	2520	226,00	4,60	0,00	0,0035451	0,01212424	7,98	2,48	215,36	0,060	1,9892	1,9892
44,00	2640	226,00	4,80	0,02	0,0035451	0,01212424	8,12	2,53	210,05	0,058	1,9210	1,9058
46,00	2760	226,00	4,90	0,07	0,0035451	0,01212424	8,19	2,55	207,39	0,058	1,9181	1,8654
48,00	2880	226,00	5,10	0,16	0,0035451	0,01212424	8,33	2,59	202,07	0,056	1,9047	1,7871
50,00	3000	226,00	5,5	0,43	0,0035451	0,01212424	8,60	2,68	191,44	0,053	1,9530	1,6392
52,00	3120	226,00	5,60	0,61	0,0035451	0,01212424	8,67	2,70	188,78	0,052	2,0727	1,6039
54,00	3240	226,00	5,80	0,74	0,0035451	0,01212424	8,80	2,74	183,46	0,051	2,1037	1,5351
56,00	3360	226,00	5,90	0,87	0,0035451	0,01212424	8,87	2,76	180,80	0,050	2,1934	1,5017
58,00	3480	226,00	6,00	0,98	0,0035451	0,01212424	8,94	2,78	178,14	0,049	2,2689	1,4687
60,00	3600	226,00	6,10	1,03	0,0035451	0,01212424	9,00	2,80	175,48	0,049	2,2726	1,4364
62,00	3720	226,00	6,20	1,05	0,0035451	0,01212424	9,06	2,82	172,82	0,048	2,2381	1,4045
64,00	3840	226,00	6,50	1,10	0,0035451	0,01212424	9,26	2,88	164,85	0,046	2,1233	1,3120
66,00	3960	226,00	6,60	1,13	0,0035451	0,01212424	9,32	2,90	162,19	0,045	2,1013	1,2820
68,00	4080	226,00	6,60	1,14	0,0035451	0,01212424	9,32	2,90	162,19	0,045	2,1132	1,2820
70,00	4200	226,00	6,60	1,13	0,0035451	0,01212424	9,32	2,90	162,19	0,045	2,1013	1,2820
72,00	4320	226,00	6,70	1,10	0,0035451	0,01212424	9,38	2,92	159,53	0,044	2,0105	1,2526

Data:06/12/ 05

pH =7,4

corante = Orange II

C[col] = $1 \cdot 10^{-4}$ mol/L

vazão de gás = 229 L/h

Volume = 8,5 L

C[NaCl] = 1g/L

m = 0,311

[O₃]Ge

(mg/L)= 12,7

$U_G = G \cdot H / V$ H= 0,57

Tempo(min)	Tempo(s)	G (L/h)	[O ₃] _{gs} (mg/L)	[O ₃] _L (mg/L)	U _G (m/s)	kLa (s ⁻¹)	O ₃ g/	[O ₃] _L	N[O ₃] _{gs}	N[O ₃] _{gs}	E _{Globai}	E _{Integral}
0,00	0	0,00										
1,00	60	229,00	3,30	0,00	0,0042657	0,014588647	6,97	2,17	253,25	0,070	2,2229	2,2229
1,50	90	229,00	2,50	0,01	0,0042657	0,014588647	6,28	1,95	274,80	0,076	2,6947	2,6809
2,00	120	230,00	1,90	0,01	0,0042843	0,014652353	5,68	1,77	292,24	0,081	3,1514	3,1335
2,50	150	230,00	1,70	0,01	0,0042843	0,014652353	5,47	1,70	297,65	0,083	3,3366	3,3170
3,00	180	231,00	1,70	0,01	0,0043029	0,014716059	5,47	1,70	298,94	0,083	3,3366	3,3170
3,50	210	231,00	1,70	0,01	0,0043029	0,014716059	5,47	1,70	298,94	0,083	3,3366	3,3170

4,00	240	232,00	1,70	0,01	0,0043216	0,014779765	5,47	1,70	300,24	0,083	3,3366	3,3170
4,50	270	232,00	1,80	0,01	0,0043216	0,014779765	5,58	1,74	297,51	0,083	3,2414	3,2227
5,00	300	232,00	1,80	0,01	0,0043216	0,014779765	5,58	1,74	297,51	0,083	3,2414	3,2227
5,50	330	232,00	1,90	0,01	0,0043216	0,014779765	5,68	1,77	294,78	0,082	3,1514	3,1335
6,00	360	233,00	1,90	0,01	0,0043402	0,014843471	5,68	1,77	296,05	0,082	3,1514	3,1335
6,50	390	233,00	1,90	0,01	0,0043402	0,014843471	5,68	1,77	296,05	0,082	3,1514	3,1335
7,00	420	234,00	2,00	0,01	0,0043588	0,014907176	5,79	1,80	294,56	0,082	3,0660	3,0489
7,50	450	234,00	2,00	0,01	0,0043588	0,014907176	5,79	1,80	294,56	0,082	3,0660	3,0489
8,00	480	235,00	2,10	0,01	0,0043775	0,014970882	5,89	1,83	293,06	0,081	2,9847	2,9685
8,50	510	235,00	2,20	0,01	0,0043775	0,014970882	5,99	1,86	290,29	0,081	2,9073	2,8917
9,00	540	236,00	2,30	0,01	0,0043961	0,015034588	6,09	1,89	288,75	0,080	2,8334	2,8184
10,00	600	236,00	2,50	0,01	0,0043961	0,015034588	6,28	1,95	283,20	0,079	2,6947	2,6809
11,00	660	237,00	2,70	0,01	0,0044147	0,015098294	6,46	2,01	278,82	0,077	2,5667	2,5539
12,00	720	237,00	3,10	0,01	0,0044147	0,015098294	6,81	2,12	267,67	0,074	2,3371	2,3261
13,00	780	237,00	3,00	0,00	0,0044147	0,015098294	6,72	2,09	270,46	0,075	2,3801	2,3801
14,00	840	238,00	3,10	0,00	0,0044333	0,015162	6,81	2,12	268,80	0,075	2,3261	2,3261
15,00	900	238,00	3,20	0,00	0,0044333	0,015162	6,89	2,14	266,00	0,074	2,2737	2,2737
16,00	960	238,00	3,30	0,00	0,0044333	0,015162	6,97	2,17	263,20	0,073	2,2229	2,2229
17,00	1020	238,00	3,40	0,00	0,0044333	0,015162	7,06	2,19	260,40	0,072	2,1737	2,1737
18,00	1080	239,00	3,50	0,00	0,0044520	0,015225706	7,14	2,22	258,68	0,072	2,1259	2,1259
19,00	1140	239,00	3,70	0,00	0,0044520	0,015225706	7,30	2,27	253,06	0,070	2,0342	2,0342
20,00	1200	239,00	3,60	0,00	0,0044520	0,015225706	7,22	2,24	255,87	0,071	2,0794	2,0794
22,00	1320	239,00	3,60	0,00	0,0044520	0,015225706	7,22	2,24	255,87	0,071	2,0794	2,0794
24,00	1440	239,00	3,60	0,00	0,0044520	0,015225706	7,22	2,24	255,87	0,071	2,0794	2,0794
26,00	1560	240,00	3,60	0,00	0,0044706	0,015289412	7,22	2,24	256,94	0,071	2,0794	2,0794
28,00	1680	240,00	3,70	0,00	0,0044706	0,015289412	7,30	2,27	254,12	0,071	2,0342	2,0342
30,00	1800	240,00	3,60	0,00	0,0044706	0,015289412	7,22	2,24	256,94	0,071	2,0794	2,0794
32,00	1920	240,00	3,60	0,00	0,0044706	0,015289412	7,22	2,24	256,94	0,071	2,0794	2,0794
34,00	2040	240,00	3,70	0,00	0,0044706	0,015289412	7,30	2,27	254,12	0,071	2,0342	2,0342
36,00	2160	240,00	3,60	0,00	0,0044706	0,015289412	7,22	2,24	256,94	0,071	2,0794	2,0794
38,00	2280	240,00	3,6	0,00	0,0044706	0,015289412	7,22	2,24	256,94	0,071	2,0794	2,0794
40,00	2400	241,00	3,80	0,00	0,0044892	0,015353118	7,38	2,29	252,34	0,070	1,9902	1,9902
42,00	2520	241,00	3,60	0,00	0,0044892	0,015353118	7,22	2,24	258,01	0,072	2,0794	2,0794
44,00	2640	241,00	3,60	0,00	0,0044892	0,015353118	7,22	2,24	258,01	0,072	2,0794	2,0794
46,00	2760	241,00	3,70	0,00	0,0044892	0,015353118	7,30	2,27	255,18	0,071	2,0342	2,0342
48,00	2880	241,00	3,80	0,01	0,0044892	0,015353118	7,38	2,29	252,34	0,070	1,9989	1,9902
50,00	3000	241,00	4,00	0,08	0,0044892	0,015353118	7,53	2,34	246,67	0,069	1,9730	1,9056
52,00	3120	241,00	4,00	0,19	0,0044892	0,015353118	7,53	2,34	246,67	0,069	2,0739	1,9056
54,00	3240	242,00	4,30	0,36	0,0045078	0,015416824	7,76	2,41	239,15	0,066	2,0997	1,7863
56,00	3360	242,00	4,40	0,47	0,0045078	0,015416824	7,83	2,44	236,31	0,066	2,1666	1,7484
58,00	3480	242,00	5,10	0,68	0,0045078	0,015416824	8,33	2,59	216,38	0,060	2,0405	1,5049
60,00	3600	242,00	5,20	0,76	0,0045078	0,015416824	8,40	2,61	213,53	0,059	2,0772	1,4729
62,00	3720	242,00	5,30	0,82	0,0045078	0,015416824	8,47	2,63	210,68	0,059	2,0932	1,4414
64,00	3840	242,00	5,10	0,83	0,0045078	0,015416824	8,33	2,59	216,38	0,060	2,2143	1,5049
66,00	3960	243,00	4,90	0,80	0,0045265	0,015480529	8,19	2,55	222,99	0,062	2,2902	1,5709
68,00	4080	243,00	4,90	0,81	0,0045265	0,015480529	8,19	2,55	222,99	0,062	2,3034	1,5709
70,00	4200	243,00	5,00	0,82	0,0045265	0,015480529	8,26	2,57	220,13	0,061	2,2584	1,5376

Data:07/12/ 05
pH =7,4
corante = Orange II

$C[\text{col}] = 1 \cdot 10^{-4} \text{ mol/L}$
 vazão de gás = 190 L/h
 Volume = 8,5 L
 $C[\text{NaCl}] = 40\text{g/L}$
 $m = 0,311$
 $[\text{O}_3]\text{Ge}$
 $(\text{mg/L}) = 12,6$
 $U_G = G \cdot H/V$ $H = 0,57$

Tempo(min)	Tempo(s)	G (L/h)	$[\text{O}_3]_{\text{Gs}}$ (mg/L)	$[\text{O}_3]_{\text{L}}$ (mg/L)	U_G (m/s)	kLa (s-1)	$\text{O}_{2\text{G}}/$	$[\text{O}_3]_{\text{L}}'$	$N'[\text{O}_3]_{\text{Gs}}$	$N[\text{O}_3]_{\text{Gs}}$	E_{Global}	E_{Integral}
0,00	0		0,00									
1,00	60	190,00	3,50	0,00	0,0035392	0,012104118	7,10	2,21	203,41	0,057	2,1128	2,1128
1,50	90	190,00	3,20	0,01	0,0035392	0,012104118	6,86	2,13	210,12	0,058	2,2713	2,2606
2,00	120	190,00	3,10	0,01	0,0035392	0,012104118	6,77	2,11	212,35	0,059	2,3240	2,3130
2,50	150	191,00	3,00	0,01	0,0035578	0,012167824	6,69	2,08	215,72	0,060	2,3785	2,3671
3,00	180	191,00	3,10	0,02	0,0035578	0,012167824	6,77	2,11	213,47	0,059	2,3352	2,3130
3,50	210	191,00	3,00	0,01	0,0035578	0,012167824	6,69	2,08	215,72	0,060	2,3785	2,3671
4,00	240	191,00	2,90	0,01	0,0035578	0,012167824	6,60	2,05	217,96	0,061	2,4349	2,4230
4,50	270	191,00	2,70	0,01	0,0035578	0,012167824	6,43	2,00	222,46	0,062	2,5537	2,5409
5,00	300	192,00	2,60	0,01	0,0035765	0,012231529	6,34	1,97	225,88	0,063	2,6164	2,6031
5,50	330	192,00	2,50	0,01	0,0035765	0,012231529	6,24	1,94	228,14	0,063	2,6816	2,6678
6,00	360	192,00	2,40	0,01	0,0035765	0,012231529	6,15	1,91	230,40	0,064	2,7495	2,7352
6,50	390	192,00	2,40	0,01	0,0035765	0,012231529	6,15	1,91	230,40	0,064	2,7495	2,7352
7,00	420	192,00	2,30	0,01	0,0035765	0,012231529	6,06	1,88	232,66	0,065	2,8203	2,8054
7,50	450	192,00	2,30	0,01	0,0035765	0,012231529	6,06	1,88	232,66	0,065	2,8203	2,8054
8,00	480	193,00	2,30	0,01	0,0035951	0,012295235	6,06	1,88	233,87	0,065	2,8203	2,8054
8,50	510	193,00	2,30	0,01	0,0035951	0,012295235	6,06	1,88	233,87	0,065	2,8203	2,8054
9,00	540	194,00	2,30	0,01	0,0036137	0,012358941	6,06	1,88	235,08	0,065	2,8203	2,8054
10,00	600	194,00	2,50	0,00	0,0036137	0,012358941	6,24	1,94	230,52	0,064	2,6678	2,6678
11,00	660	194,00	2,50	0,00	0,0036137	0,012358941	6,24	1,94	230,52	0,064	2,6678	2,6678
12,00	720	195,00	2,70	0,01	0,0036324	0,012422647	6,43	2,00	227,12	0,063	2,5537	2,5409
13,00	780	195,00	2,70	0,01	0,0036324	0,012422647	6,43	2,00	227,12	0,063	2,5537	2,5409
14,00	840	195,00	2,90	0,01	0,0036324	0,012422647	6,60	2,05	222,53	0,062	2,4349	2,4230
15,00	900	195,00	3,00	0,00	0,0036324	0,012422647	6,69	2,08	220,24	0,061	2,3671	2,3671
16,00	960	196,00	3,30	0,00	0,0036510	0,012486353	6,94	2,16	214,45	0,060	2,2099	2,2099
17,00	1020	196,00	3,40	0,00	0,0036510	0,012486353	7,02	2,18	212,14	0,059	2,1606	2,1606
18,00	1080	196,00	3,50	0,00	0,0036510	0,012486353	7,10	2,21	209,84	0,058	2,1128	2,1128
19,00	1140	196,00	3,50	0,00	0,0036510	0,012486353	7,10	2,21	209,84	0,058	2,1128	2,1128
20,00	1200	197,00	3,60	0,00	0,0036696	0,012550059	7,18	2,23	208,59	0,058	2,0664	2,0664
22,00	1320	197,00	3,60	0,00	0,0036696	0,012550059	7,18	2,23	208,59	0,058	2,0664	2,0664
24,00	1440	197,00	3,70	0,01	0,0036696	0,012550059	7,26	2,26	206,27	0,057	2,0302	2,0212
26,00	1560	197,00	3,80	0,00	0,0036696	0,012550059	7,34	2,28	203,95	0,057	1,9772	1,9772
28,00	1680	197,00	3,70	0,00	0,0036696	0,012550059	7,26	2,26	206,27	0,057	2,0212	2,0212
30,00	1800	198,00	3,80	0,00	0,0036882	0,012613765	7,34	2,28	204,99	0,057	1,9772	1,9772
32,00	1920	198,00	4,10	0,00	0,0036882	0,012613765	7,57	2,35	198,00	0,055	1,8519	1,8519
34,00	2040	198,00	4,20	0,00	0,0036882	0,012613765	7,65	2,38	195,67	0,054	1,8121	1,8121
36,00	2160	199,00	4,10	0,00	0,0037069	0,012677471	7,57	2,35	199,00	0,055	1,8519	1,8519
38,00	2280	199,00	4,20	0,00	0,0037069	0,012677471	7,65	2,38	196,66	0,055	1,8121	1,8121
40,00	2400	199,00	4,80	0,00	0,0037069	0,012677471	8,08	2,51	182,61	0,051	1,5919	1,5919
42,00	2520	199,00	4,80	0,10	0,0037069	0,012677471	8,08	2,51	182,61	0,051	1,6578	1,5919
44,00	2640	199,00	5,20	0,23	0,0037069	0,012677471	8,36	2,60	173,25	0,048	1,6015	1,4598

46,00	2760	199,00	5,70	0,43	0,0037069	0,012677471	8,70	2,71	161,54	0,045	1,5557	1,3084
48,00	2880	199,00	5,90	0,55	0,0037069	0,012677471	8,83	2,75	156,86	0,044	1,5649	1,2515
50,00	3000	199,00	6,20	0,62	0,0037069	0,012677471	9,02	2,81	149,84	0,042	1,5013	1,1697
52,00	3120	199,00	6,30	0,64	0,0037069	0,012677471	9,09	2,83	147,49	0,041	1,4779	1,1433
54,00	3240	199,00	6,30	0,68	0,0037069	0,012677471	9,09	2,83	147,49	0,041	1,5055	1,1433
56,00	3360	199,00	6,30	0,70	0,0037069	0,012677471	9,09	2,83	147,49	0,041	1,5196	1,1433
58,00	3480	200	6,30	0,75	0,0037255	0,012741176	9,09	2,83	148,24	0,041	1,5562	1,1433
60,00	3600	200	6,30	0,75	0,0037255	0,012741176	9,09	2,83	148,24	0,041	1,5562	1,1433
62,00	3720	200	6,40	0,77	0,0037255	0,012741176	9,15	2,85	145,88	0,041	1,5317	1,1173
64,00	3840	200	6,40	0,80	0,0037255	0,012741176	9,15	2,85	145,88	0,041	1,5541	1,1173
66,00	3960	200	6,40	0,83	0,0037255	0,012741176	9,15	2,85	145,88	0,041	1,5772	1,1173
68,00	4080	200	6,60	0,83	0,0037255	0,012741176	9,28	2,89	141,18	0,039	1,4972	1,0666
70,00	4200	201	6,70	0,84	0,0037441	0,012804882	9,34	2,91	139,52	0,039	1,4655	1,0418

Data:07/12/ 05

pH =7,5

corante = Orange II

C[col] = $1 \cdot 10^{-4}$ mol/L

vazão de gás = 190 L/h

Volume = 8,5 L

C[NaCl] = 100g/L

m = 0,31

[O₃]Ge

(mg/L)= 12

$U_G = G \cdot H / V$ H= 0,57

Temps(min)	Temps(s)	G (L/h)	[O ₃] _{GS} (mg/L)	[O ₃] _L (mg/L)	U _G (m/s)	kLa (s-1)	O _{3G} /	[O ₃] _L	N[O ₃] _{GS}	N[O ₃] _{GS}	E _{global}	E _{integral}
0,00	0											
1,00	60	190,00	4,90	0,00	0,0035392	0,012104118	7,93	2,47	158,71	0,044	1,4774	1,4774
1,50	90	191,00	4,70	0,01	0,0035578	0,012167824	7,79	2,42	164,04	0,046	1,5525	1,5461
2,00	120	192,00	4,40	0,01	0,0035765	0,012231529	7,57	2,36	171,67	0,048	1,6619	1,6549
2,50	150	193,00	4,20	0,01	0,0035951	0,012295235	7,43	2,31	177,11	0,049	1,7392	1,7316
3,00	180	194,00	4,10	0,01	0,0036137	0,012358941	7,36	2,29	180,31	0,050	1,7792	1,7714
3,50	210	195,00	4,10	0,01	0,0036324	0,012422647	7,36	2,29	181,24	0,050	1,7792	1,7714
4,00	240	196,00	4,10	0,01	0,0036510	0,012486353	7,36	2,29	182,16	0,051	1,7792	1,7714
4,50	270	197,00	4,10	0,01	0,0036696	0,012550059	7,36	2,29	183,09	0,051	1,7792	1,7714
5,00	300	197,00	4,10	0,01	0,0036696	0,012550059	7,36	2,29	183,09	0,051	1,7792	1,7714
5,50	330	197,00	4,10	0,01	0,0036696	0,012550059	7,36	2,29	183,09	0,051	1,7792	1,7714
6,00	360	198,00	4,10	0,01	0,0036882	0,012613765	7,36	2,29	184,02	0,051	1,7792	1,7714
6,50	390	198,00	4,10	0,01	0,0036882	0,012613765	7,36	2,29	184,02	0,051	1,7792	1,7714
7,00	420	199,00	4,10	0,01	0,0037069	0,012677471	7,36	2,29	184,95	0,051	1,7792	1,7714
7,50	450	199,00	4,10	0,01	0,0037069	0,012677471	7,36	2,29	184,95	0,051	1,7792	1,7714
8,00	480	199,00	4,20	0,01	0,0037069	0,012677471	7,43	2,31	182,61	0,051	1,7392	1,7316
8,50	510	200,00	4,20	0,01	0,0037255	0,012741176	7,43	2,31	183,53	0,051	1,7392	1,7316
9,00	540	200,00	4,10	0,01	0,0037255	0,012741176	7,36	2,29	185,88	0,052	1,7792	1,7714
10,00	600	200,00	4,10	0,01	0,0037255	0,012741176	7,36	2,29	185,88	0,052	1,7792	1,7714
11,00	660	200,00	4,10	0,01	0,0037255	0,012741176	7,36	2,29	185,88	0,052	1,7792	1,7714
12,00	720	200,00	4,10	0,01	0,0037255	0,012741176	7,36	2,29	185,88	0,052	1,7792	1,7714
13,00	780	201,00	4,30	0,01	0,0037441	0,012804882	7,50	2,33	182,08	0,051	1,7001	1,6928
14,00	840	201,00	4,40	0,01	0,0037441	0,012804882	7,57	2,36	179,72	0,050	1,6619	1,6549

15,00	900	202,00	4,50	0,01	0,0037627	0,012868588	7,65	2,38	178,24	0,050	1,6247	1,6178
16,00	960	202,00	4,60	0,01	0,0037627	0,012868588	7,72	2,40	175,86	0,049	1,5882	1,5816
17,00	1020	202,00	4,60	0,01	0,0037627	0,012868588	7,72	2,40	175,86	0,049	1,5882	1,5816
18,00	1080	203,00	4,70	0,01	0,0037814	0,012932294	7,79	2,42	174,34	0,048	1,5525	1,5461
19,00	1140	203,00	4,70	0,01	0,0037814	0,012932294	7,79	2,42	174,34	0,048	1,5525	1,5461
20,00	1200	203,00	4,70	0,01	0,0037814	0,012932294	7,79	2,42	174,34	0,048	1,5525	1,5461
22,00	1320	203,00	4,70	0,01	0,0037814	0,012932294	7,79	2,42	174,34	0,048	1,5525	1,5461
24,00	1440	203,00	4,70	0,01	0,0037814	0,012932294	7,79	2,42	174,34	0,048	1,5525	1,5461
26,00	1560	203,00	4,60	0,01	0,0037814	0,012932294	7,72	2,40	176,73	0,049	1,5882	1,5816
28,00	1680	204,00	4,70	0,01	0,0038000	0,012996	7,79	2,42	175,20	0,049	1,5525	1,5461
30,00	1800	204,00	4,80	0,01	0,0038000	0,012996	7,86	2,44	172,80	0,048	1,5176	1,5114
32,00	1920	204,00	5,00	0,01	0,0038000	0,012996	8,00	2,49	168,00	0,047	1,4499	1,4440
34,00	2040	204,00	5,00	0,01	0,0038000	0,012996	8,00	2,49	168,00	0,047	1,4499	1,4440
36,00	2160	204,00	5,00	0,01	0,0038000	0,012996	8,00	2,49	168,00	0,047	1,4499	1,4440
38,00	2280	204,00	5,20	0,01	0,0038000	0,012996	8,13	2,53	163,20	0,045	1,3848	1,3793
40,00	2400	204,00	5,40	0,05	0,0038000	0,012996	8,27	2,57	158,40	0,044	1,3432	1,3171
42,00	2520	204,00	5,60	0,13	0,0038000	0,012996	8,40	2,61	153,60	0,043	1,3230	1,2571
44,00	2640	204,00	5,60	0,19	0,0038000	0,012996	8,40	2,61	153,60	0,043	1,3557	1,2571
46,00	2760	204,00	5,70	0,24	0,0038000	0,012996	8,46	2,63	151,20	0,042	1,3511	1,2279
48,00	2880	204,00	5,8	0,26	0,0038000	0,012996	8,53	2,65	148,80	0,041	1,3296	1,1992
50,00	3000	204,00	6,00	0,29	0,0038000	0,012996	8,66	2,69	144,00	0,040	1,2813	1,1433
52,00	3120	204,00	6,10	0,29	0,0038000	0,012996	8,72	2,71	141,60	0,039	1,2497	1,1160
54,00	3240	204,00	6,10	0,28	0,0038000	0,012996	8,72	2,71	141,60	0,039	1,2445	1,1160
56,00	3360	204,00	6,10	0,29	0,0038000	0,012996	8,72	2,71	141,60	0,039	1,2497	1,1160
58,00	3480	204,00	6,20	0,31	0,0038000	0,012996	8,78	2,73	139,20	0,039	1,2287	1,0892
60,00	3600	204,00	6,30	0,31	0,0038000	0,012996	8,85	2,75	136,80	0,038	1,1978	1,0628
62,00	3720	204,00	6,30	0,31	0,0038000	0,012996	8,85	2,75	136,80	0,038	1,1978	1,0628
64,00	3840	204,00	6,20	0,3	0,0038000	0,012996	8,78	2,73	139,20	0,039	1,2236	1,0892

Data:07/12/ 05

pH =7,5

corante = Orange II

C[col] = $1 \cdot 10^{-4}$ mol/L

C[NaCl] = 0 + t-but

vazão de gás = 206 L/h

Volume = 8,5 L

m = 0,311

[O₃]Ge
(mg/L)= 12,7

$U_G = G \cdot H / V$ H= 0,57

Tempo(min)	Tempo(s)	G (L/h)	[O ₃] _{gs} (mg/L)	[O ₃] _L (mg/L)	U _G (m/s)	kLa (s-1)	O _{3g} /	[O ₃] _L *	N[O ₃] _{gs}	N[O ₃] _{gs}	E _{global}	E _{integral}
0,00	0											
1,00	60	206,00	4,30	0,00	0,0038373	0,017267647	7,76	2,41	203,58	0,057	1,3576	1,3576
1,50	90	207,00	3,60	0,00	0,0038559	0,017351471	7,22	2,24	221,61	0,062	1,5803	1,5803
2,00	120	207,00	2,90	0,00	0,0038559	0,017351471	6,64	2,06	238,66	0,066	1,8514	1,8514
2,50	150	208,00	2,40	0,00	0,0038745	0,017435294	6,18	1,92	252,05	0,070	2,0886	2,0886
3,00	180	209,00	2,30	0,00	0,0038931	0,017519118	6,09	1,89	255,72	0,071	2,1420	2,1420
3,50	210	210,00	2,20	0,00	0,0039118	0,017602941	5,99	1,86	259,41	0,072	2,1977	2,1977
4,00	240	210,00	2,20	0,00	0,0039118	0,017602941	5,99	1,86	259,41	0,072	2,1977	2,1977

4,50	270	210,00	2,20	0,00	0,0039118	0,017602941	5,99	1,86	259,41	0,072	2,1977	2,1977
5,00	300	211,00	2,30	0,00	0,0039304	0,017686765	6,09	1,89	258,16	0,072	2,1420	2,1420
5,50	330	211,00	2,30	0,00	0,0039304	0,017686765	6,09	1,89	258,16	0,072	2,1420	2,1420
6,00	360	211,00	2,30	0,00	0,0039304	0,017686765	6,09	1,89	258,16	0,072	2,1420	2,1420
6,50	390	212,00	2,30	0,00	0,0039490	0,017770588	6,09	1,89	259,39	0,072	2,1420	2,1420
7,00	420	212,00	2,40	0,00	0,0039490	0,017770588	6,18	1,92	256,89	0,071	2,0886	2,0886
7,50	450	213,00	2,40	0,00	0,0039676	0,017854412	6,18	1,92	258,11	0,072	2,0886	2,0886
8,00	480	213,00	2,50	0,00	0,0039676	0,017854412	6,28	1,95	255,60	0,071	2,0375	2,0375
8,50	510	214,00	2,60	0,00	0,0039863	0,017938235	6,37	1,98	254,28	0,071	1,9883	1,9883
9,00	540	214,00	2,80	0,00	0,0039863	0,017938235	6,55	2,04	249,25	0,069	1,8954	1,8954
10,00	600	215,00	2,90	0,00	0,0040049	0,018022059	6,64	2,06	247,88	0,069	1,8514	1,8514
11,00	660	215,00	3,00	0,00	0,0040049	0,018022059	6,72	2,09	245,35	0,068	1,8089	1,8089
12,00	720	216,00	3,10	0,00	0,0040235	0,018105882	6,81	2,12	243,95	0,068	1,7678	1,7678
13,00	780	216,00	3,10	0,00	0,0040235	0,018105882	6,81	2,12	243,95	0,068	1,7678	1,7678
14,00	840	217,00	3,20	0,00	0,0040422	0,018189706	6,89	2,14	242,53	0,067	1,7280	1,7280
15,00	900	217,00	3,00	0,00	0,0040422	0,018189706	6,72	2,09	247,64	0,069	1,8089	1,8089
16,00	960	217,00	3,10	0,00	0,0040422	0,018189706	6,81	2,12	245,08	0,068	1,7678	1,7678
17,00	1020	218,00	3,10	0,00	0,0040608	0,018273529	6,81	2,12	246,21	0,068	1,7678	1,7678
18,00	1080	218,00	3,20	0,00	0,0040608	0,018273529	6,89	2,14	243,65	0,068	1,7280	1,7280
19,00	1140	218,00	3,10	0,00	0,0040608	0,018273529	6,81	2,12	246,21	0,068	1,7678	1,7678
20,00	1200	218,00	3,10	0,00	0,0040608	0,018273529	6,81	2,12	246,21	0,068	1,7678	1,7678
22,00	1320	219,00	3,20	0,01	0,0040794	0,018357353	6,89	2,14	244,76	0,068	1,7361	1,7280
24,00	1440	219,00	3,30	0,01	0,0040794	0,018357353	6,97	2,17	242,19	0,067	1,6972	1,6894
26,00	1560	219,00	3,40	0,01	0,0040794	0,018357353	7,06	2,19	239,61	0,067	1,6596	1,6520
28,00	1680	220,00	3,30	0,03	0,0040980	0,018441176	6,97	2,17	243,29	0,068	1,7131	1,6894
30,00	1800	220,00	3,40	0,03	0,0040980	0,018441176	7,06	2,19	240,71	0,067	1,6749	1,6520
32,00	1920	220,00	3,40	0,02	0,0040980	0,018441176	7,06	2,19	240,71	0,067	1,6672	1,6520
34,00	2040	220,00	3,50	0,04	0,0040980	0,018441176	7,14	2,22	238,12	0,066	1,6453	1,6157
36,00	2160	220,00	3,50	0,06	0,0040980	0,018441176	7,14	2,22	238,12	0,066	1,6605	1,6157
38,00	2280	220,00	3,50	0,06	0,0040980	0,018441176	7,14	2,22	238,12	0,066	1,6605	1,6157
40,00	2400	220,00	3,80	0,13	0,0040980	0,018441176	7,38	2,29	230,35	0,064	1,6034	1,5126
42,00	2520	220,00	3,80	0,12	0,0040980	0,018441176	7,38	2,29	230,35	0,064	1,5961	1,5126
44,00	2640	220,00	3,80	0,08	0,0040980	0,018441176	7,38	2,29	230,35	0,064	1,5672	1,5126
46,00	2760	220,00	3,90	0,18	0,0040980	0,018441176	7,45	2,32	227,76	0,063	1,6046	1,4800
48,00	2880	220,00	3,80	0,12	0,0040980	0,018441176	7,38	2,29	230,35	0,064	1,5961	1,5126

Data:08/12/ 05

pH =7,5

corante = Orange II

$C[\text{col}] = 1 \cdot 10^{-4}$ mol/L

vazão de gás = 176 L/h

Volume = 8,5 L

$C[\text{NaCl}] = 40\text{g/L} + \text{t-but}$

$m = 0,31$

$[\text{O}_3]\text{Ge}$

(mg/L)= 12

$U_G = G \cdot H / V$ $H = 0,48$

Tempo(min)	Tempo(s)	G (L/h)	[O ₃] _{gs} (mg/L)	[O ₃]L (mg/L)	U _G (m/s)	kLa (s ⁻¹)	O _{3g} /	[O ₃]L [*]	N[O ₃] _{gs}	N[O ₃] _{gs}	E _{Global}	E _{Integral}
0,00	0											
1,00	60	176,00	4,40	0,00	0,0027608	0,012423529	7,57	2,36	157,36	0,044	1,4935	1,4935
1,50	90	177,00	4,00	0,00	0,0027765	0,012494118	7,28	2,26	166,59	0,046	1,6354	1,6354
2,00	120	178,00	3,60	0,00	0,0027922	0,012564706	6,98	2,17	175,91	0,049	1,7923	1,7923
2,50	150	178,00	3,60	0,00	0,0027922	0,012564706	6,98	2,17	175,91	0,049	1,7923	1,7923
3,00	180	179,00	3,60	0,00	0,0028078	0,012635294	6,98	2,17	176,89	0,049	1,7923	1,7923
3,50	210	179,00	3,50	0,00	0,0028078	0,012635294	6,90	2,15	179,00	0,050	1,8342	1,8342
4,00	240	180,00	3,50	0,00	0,0028235	0,012705882	6,90	2,15	180,00	0,050	1,8342	1,8342
4,50	270	180,00	3,50	0,00	0,0028235	0,012705882	6,90	2,15	180,00	0,050	1,8342	1,8342
5,00	300	180,00	3,50	0,00	0,0028235	0,012705882	6,90	2,15	180,00	0,050	1,8342	1,8342
5,50	330	180,00	3,50	0,00	0,0028235	0,012705882	6,90	2,15	180,00	0,050	1,8342	1,8342
6,00	360	181,00	3,30	0,00	0,0028392	0,012776471	6,74	2,10	185,26	0,051	1,9218	1,9218
6,50	390	181,00	3,30	0,00	0,0028392	0,012776471	6,74	2,10	185,26	0,051	1,9218	1,9218
7,00	420	181,00	3,20	0,00	0,0028392	0,012776471	6,66	2,07	187,39	0,052	1,9676	1,9676
7,50	450	181,00	3,10	0,00	0,0028392	0,012776471	6,58	2,04	189,52	0,053	2,0149	2,0149
8,00	480	182,00	3,00	0,00	0,0028549	0,012847059	6,49	2,02	192,71	0,054	2,0637	2,0637
8,50	510	182,00	2,90	0,00	0,0028549	0,012847059	6,41	1,99	194,85	0,054	2,1141	2,1141
9,00	540	182,00	2,90	0,00	0,0028549	0,012847059	6,41	1,99	194,85	0,054	2,1141	2,1141
10,00	600	182,00	3,00	0,00	0,0028549	0,012847059	6,49	2,02	192,71	0,054	2,0637	2,0637
11,00	660	183,00	3,20	0,00	0,0028706	0,012917647	6,66	2,07	189,46	0,053	1,9676	1,9676
12,00	720	183,00	3,30	0,00	0,0028706	0,012917647	6,74	2,10	187,31	0,052	1,9218	1,9218
13,00	780	183,00	3,50	0,00	0,0028706	0,012917647	6,90	2,15	183,00	0,051	1,8342	1,8342
14,00	840	183,00	3,60	0,00	0,0028706	0,012917647	6,98	2,17	180,85	0,050	1,7923	1,7923
15,00	900	183,00	3,80	0,00	0,0028706	0,012917647	7,13	2,22	176,54	0,049	1,7118	1,7118
16,00	960	183,00	3,90	0,00	0,0028706	0,012917647	7,21	2,24	174,39	0,048	1,6731	1,6731
17,00	1020	183,00	4,00	0,00	0,0028706	0,012917647	7,28	2,26	172,24	0,048	1,6354	1,6354
18,00	1080	183,00	4,00	0,00	0,0028706	0,012917647	7,28	2,26	172,24	0,048	1,6354	1,6354
19,00	1140	184,00	4,00	0,00	0,0028863	0,012988235	7,28	2,26	173,18	0,048	1,6354	1,6354
20,00	1200	184,00	4,10	0,00	0,0028863	0,012988235	7,36	2,29	171,01	0,048	1,5987	1,5987
22,00	1320	184,00	4,20	0,00	0,0028863	0,012988235	7,43	2,31	168,85	0,047	1,5628	1,5628
24,00	1440	184,00	4,30	0,00	0,0028863	0,012988235	7,50	2,33	166,68	0,046	1,5278	1,5278
26,00	1560	185,00	4,20	0,00	0,0029020	0,013058824	7,43	2,31	169,76	0,047	1,5628	1,5628
28,00	1680	185,00	4,00	0,00	0,0029020	0,013058824	7,28	2,26	174,12	0,048	1,6354	1,6354
30,00	1800	185,00	3,90	0,00	0,0029020	0,013058824	7,21	2,24	176,29	0,049	1,6731	1,6731
32,00	1920	185,00	3,70	0,00	0,0029020	0,013058824	7,05	2,19	180,65	0,050	1,7515	1,7515
34,00	2040	186,00	3,90	0,00	0,0029176	0,013129412	7,21	2,24	177,25	0,049	1,6731	1,6731
36,00	2160	186,00	4,00	0,02	0,0029176	0,013129412	7,28	2,26	175,06	0,049	1,6500	1,6354
38,00	2280	186,00	3,70	0,02	0,0029176	0,013129412	7,05	2,19	181,62	0,050	1,7676	1,7515
40,00	2400	186,00	3,50	0,03	0,0029176	0,013129412	6,90	2,15	186,00	0,052	1,8602	1,8342
42,00	2520	186,00	3,00	0,02	0,0029176	0,013129412	6,49	2,02	196,94	0,055	2,0843	2,0637
44,00	2640	186,00	2,80	0,04	0,0029176	0,013129412	6,32	1,97	201,32	0,056	2,2114	2,1664
46,00	2760	187,00	2,60	0,04	0,0029333	0,0132	6,15	1,91	206,80	0,057	2,3254	2,2767
48,00	2880	187,00	2,20	0,04	0,0029333	0,0132	5,78	1,80	215,60	0,060	2,5829	2,5254
50,00	3000	187,00	1,60	0,03	0,0029333	0,0132	5,16	1,61	228,80	0,064	3,0566	2,9994
52,00	3120	187,00	1,70	0,03	0,0029333	0,0132	5,27	1,64	226,60	0,063	2,9634	2,9092
54,00	3240	187,00	2,1	0,05	0,0029333	0,0132	5,68	1,77	217,80	0,061	2,6702	2,5946
56,00	3360	188,00	1,90	0,05	0,0029490	0,013270588	5,48	1,70	223,39	0,062	2,8265	2,7436
58,00	3480	188,00	1,80	0,06	0,0029490	0,013270588	5,38	1,67	225,60	0,063	2,9292	2,8241
60,00	3600	188,00	1,70	0,05	0,0029490	0,013270588	5,27	1,64	227,81	0,063	3,0007	2,9092
62,00	3720	188,00	2,60	0,10	0,0029490	0,013270588	6,15	1,91	207,91	0,058	2,4024	2,2767

64,00	3840	188,00	3,50	0,18	0,0029490	0,013270588	6,90	2,15	188,00	0,052	2,0022	1,8342
66,00	3960	188,00	3,70	0,23	0,0029490	0,013270588	7,05	2,19	183,58	0,051	1,9566	1,7515
68,00	4080	188,00	3,10	0,18	0,0029490	0,013270588	6,58	2,04	196,85	0,055	2,2093	2,0149

Data:09/12/ 05

pH =9

corante = Orange II

C[col] = $1 \cdot 10^{-4}$ mol/L

vazão de gás = 181 L/h

Volume = 8,5 L

m = 0,311

[O₃]Ge

(mg/L)= 12,1

$U_G = G \cdot H / V$

H=

0,57

Tempo(min)	Tempo(s)	G (L/h)	[O ₃] _{GS} (mg/L)	[O ₃] _L (mg/L)	U _G (m/s)	kLa (s-1)	O _{3C} /	[O ₃] _L ¹	N[O ₃] _{GS}	N[O ₃] _{GS}	E _{Global}	E _{Integral}
0,00	0											
1,00	60	181,00	1,20	0,00	0,0034	0,01153076	4,72	1,47	232,11	0,064	3,8117	3,8117
1,50	90	182,00	0,90	0,00	0,0033902	0,01159447	4,31	1,34	239,81	0,067	4,2862	4,2862
2,00	120	183,00	0,90	0,00	0,0034088	0,01165818	4,31	1,34	241,13	0,067	4,2862	4,2862
2,50	150	184,00	0,80	0,00	0,0034275	0,01172188	4,16	1,29	244,61	0,068	4,4805	4,4805
3,00	180	185,00	0,70	0,00	0,0034461	0,01178559	4,00	1,24	248,12	0,069	4,7007	4,7007
3,50	210	186,00	0,70	0,00	0,0034647	0,01184929	4,00	1,24	249,46	0,069	4,7007	4,7007
4,00	240	186,00	0,70	0,00	0,0034647	0,01184929	4,00	1,24	249,46	0,069	4,7007	4,7007
4,50	270	187,00	0,80	0,00	0,0034833	0,011913	4,16	1,29	248,60	0,069	4,4805	4,4805
5,00	300	187,00	0,80	0,00	0,0034833	0,011913	4,16	1,29	248,60	0,069	4,4805	4,4805
5,50	330	188,00	0,90	0,00	0,0035020	0,01197671	4,31	1,34	247,72	0,069	4,2862	4,2862
6,00	360	188,00	1,00	0,00	0,0035020	0,01197671	4,45	1,38	245,51	0,068	4,1124	4,1124
6,50	390	188,00	1,10	0,00	0,0035020	0,01197671	4,59	1,43	243,29	0,068	3,9552	3,9552
7,00	420	189,00	1,20	0,00	0,0035206	0,01204041	4,72	1,47	242,36	0,067	3,8117	3,8117
7,50	450	189,00	1,30	0,00	0,0035206	0,01204041	4,84	1,51	240,14	0,067	3,6797	3,6797
8,00	480	189,00	1,50	0,00	0,0035206	0,01204041	5,08	1,58	235,69	0,065	3,4436	3,4436
8,50	510	189,00	1,60	0,00	0,0035206	0,01204041	5,19	1,61	233,47	0,065	3,3372	3,3372
9,00	540	190,00	1,70	0,00	0,0035392	0,01210412	5,30	1,65	232,47	0,065	3,2372	3,2372
10,00	600	190,00	2,00	0,00	0,0035392	0,01210412	5,61	1,74	225,76	0,063	2,9691	2,9691
11,00	660	191,00	2,20	0,00	0,0035578	0,01216782	5,81	1,81	222,46	0,062	2,8119	2,8119
12,00	720	191,00	2,70	0,00	0,0035578	0,01216782	6,27	1,95	211,22	0,059	2,4741	2,4741
13,00	780	191,00	2,80	0,00	0,0035578	0,01216782	6,35	1,98	208,98	0,058	2,4141	2,4141
14,00	840	192,00	3,00	0,00	0,0035765	0,01223153	6,53	2,03	205,55	0,057	2,3003	2,3003
15,00	900	192,00	3,20	0,00	0,0035765	0,01223153	6,69	2,08	201,04	0,056	2,1939	2,1939
16,00	960	192,00	3,30	0,00	0,0035765	0,01223153	6,77	2,11	198,78	0,055	2,1431	2,1431
17,00	1020	193,00	3,50	0,00	0,0035951	0,01229524	6,93	2,16	195,27	0,054	2,0460	2,0460
18,00	1080	193,00	3,70	0,00	0,0035951	0,01229524	7,09	2,20	190,73	0,053	1,9544	1,9544
19,00	1140	193,00	3,70	0,00	0,0035951	0,01229524	7,09	2,20	190,73	0,053	1,9544	1,9544
20,00	1200	193,00	4,00	0,00	0,0035951	0,01229524	7,32	2,28	183,92	0,051	1,8258	1,8258
22,00	1320	194,00	4,10	0,00	0,0036137	0,01235894	7,39	2,30	182,59	0,051	1,7851	1,7851
24,00	1440	194,00	4,20	0,00	0,0036137	0,01235894	7,47	2,32	180,31	0,050	1,7453	1,7453
26,00	1560	194,00	4,20	0,00	0,0036137	0,01235894	7,47	2,32	180,31	0,050	1,7453	1,7453
28,00	1680	194,00	4,20	0,00	0,0036137	0,01235894	7,47	2,32	180,31	0,050	1,7453	1,7453
30,00	1800	195,00	4,20	0,00	0,0036324	0,01242265	7,47	2,32	181,24	0,050	1,7453	1,7453

32,00	1920	195,00	4,20	0,00	0,0036324	0,01242265	7,47	2,32	181,24	0,050	1,7453	1,7453
34,00	2040	195,00	4,20	0,00	0,0036324	0,01242265	7,47	2,32	181,24	0,050	1,7453	1,7453
36,00	2160	195,00	4,30	0,00	0,0036324	0,01242265	7,54	2,34	178,94	0,050	1,7065	1,7065
38,00	2280	195,00	4,50	0,00	0,0036324	0,01242265	7,68	2,39	174,35	0,048	1,6315	1,6315
40,00	2400	196,00	4,50	0,00	0,0036510	0,01248635	7,68	2,39	175,25	0,049	1,6315	1,6315
42,00	2520	196,00	4,70	0,00	0,0036510	0,01248635	7,83	2,43	170,64	0,047	1,5598	1,5598
44,00	2640	196,00	4,90	0,00	0,0036510	0,01248635	7,96	2,48	166,02	0,046	1,4911	1,4911
46,00	2760	196,00	4,90	0,00	0,0036510	0,01248635	7,96	2,48	166,02	0,046	1,4911	1,4911
48,00	2880	196,00	5,00	0,01	0,0036510	0,01248635	8,03	2,50	163,72	0,045	1,4636	1,4577
50,00	3000	196,00	5,10	0,06	0,0036510	0,01248635	8,10	2,52	161,41	0,045	1,4598	1,4251
52,00	3120	196,00	5,20	0,11	0,0036510	0,01248635	8,17	2,54	159,11	0,044	1,4561	1,3930
54,00	3240	196,00	5,30	0,19	0,0036510	0,01248635	8,24	2,56	156,80	0,044	1,4707	1,3616
56,00	3360	196,00	5,50	0,24	0,0036510	0,01248635	8,37	2,60	152,19	0,042	1,4326	1,3005
58,00	3480	196,00	5,70	0,32	0,0036510	0,01248635	8,50	2,64	147,58	0,041	1,4125	1,2416
60,00	3600	196,00	5,80	0,38	0,0036510	0,01248635	8,57	2,66	145,27	0,040	1,4147	1,2129
62,00	3720	196,00	5,80	0,27	0,0036510	0,01248635	8,57	2,66	145,27	0,040	1,3497	1,2129
64,00	3840	196,00	6,00	0,32	0,0036510	0,01248635	8,70	2,70	140,66	0,039	1,3123	1,1570
66,00	3960	196,00	6,30	0,37	0,0036510	0,01248635	8,89	2,76	133,74	0,037	1,2429	1,0765
68,00	4080	196,00	6,10	0,41	0,0036510	0,01248635	8,76	2,72	138,35	0,038	1,3299	1,1297
70,00	4200	196,00	6,10	0,44	0,0036510	0,01248635	8,76	2,72	138,35	0,038	1,3473	1,1297
72,00	4320	196,00	6,20	0,45	0,0036510	0,01248635	8,82	2,74	136,05	0,038	1,3193	1,1029
74,00	4440	196,00	6,40	0,51	0,0036510	0,01248635	8,95	2,78	131,44	0,037	1,2862	1,0505
76,00	4560	196,00	6,40	0,55	0,0036510	0,01248635	8,95	2,78	131,44	0,037	1,3093	1,0505
78,00	4680	196,00	6,40	0,56	0,0036510	0,01248635	8,95	2,78	131,44	0,037	1,3152	1,0505
80,00	4800	196,00	6,40	0,59	0,0036510	0,01248635	8,95	2,78	131,44	0,037	1,3331	1,0505

Data:09/12/ 05

pH =9

corante = Orange II

$C[\text{col}] = 1 \cdot 10^{-4} \text{ mol/L}$

vazão de gás = 178 L/h

Volume = 8,5 L

$C[\text{NaCl}] = 1\text{g/L}$

$m = 0,311$

$[\text{O}_3]_{\text{Ge}}$

(mg/L)= 11,7

$U_G = G \cdot H/V$

$H = 0,57$

Tempo(min)	Tempo(s)	G (L/h)	$[\text{O}_3]_{\text{Gs}}$ (mg/L)	$[\text{O}_3]_{\text{L}}$ (mg/L)	U_G (m/s)	kLa (s-1)	O_{3G}	$[\text{O}_3]_{\text{L}}$	$N[\text{O}_3]_{\text{Gs}}$	$N[\text{O}_3]_{\text{Gs}}$	E_{Global}	E_{Integral}
0,00	0		0,00	0,00								
1,00	60	178,00	1,50	0,00	0,0033157	0,011134	4,97	1,54	213,60	0,059	3,3882	3,3882
1,50	90	179,00	1,10	0,00	0,0033343	0,011403	4,48	1,39	223,22	0,062	3,8998	3,8998
2,00	120	179,00	0,90	0,00	0,0033343	0,011403	4,21	1,31	227,44	0,063	4,2308	4,2308
2,50	150	180,00	0,90	0,00	0,0033529	0,011467	4,21	1,31	228,71	0,064	4,2308	4,2308
3,00	180	180,00	1,00	0,00	0,0033529	0,011467	4,35	1,35	226,59	0,063	4,0570	4,0570
3,50	210	181,00	0,90	0,01	0,0033716	0,011531	4,21	1,31	229,98	0,064	4,2633	4,2308
4,00	240	181,00	1,00	0,01	0,0033716	0,011531	4,35	1,35	227,85	0,063	4,0872	4,0570
4,50	270	181,00	1,00	0,01	0,0033716	0,011531	4,35	1,35	227,85	0,063	4,0872	4,0570
5,00	300	181,00	1,10	0,01	0,0033716	0,011531	4,48	1,39	225,72	0,063	3,9279	3,8998
5,50	330	182,00	1,20	0,01	0,0033902	0,011594	4,61	1,43	224,82	0,062	3,7826	3,7562

6,00	360	182,00	1,30	0,01	0,0033902	0,011594	4,73	1,47	222,68	0,062	3,6490	3,6242
6,50	390	182,00	1,50	0,01	0,0033902	0,011594	4,97	1,54	218,40	0,061	3,4103	3,3882
7,00	420	182,00	1,60	0,01	0,0033902	0,011594	5,08	1,58	216,26	0,060	3,3026	3,2817
7,50	450	182,00	1,70	0,01	0,0033902	0,011594	5,18	1,61	214,12	0,059	3,2016	3,1817
8,00	480	183,00	1,90	0,01	0,0034088	0,011658	5,39	1,68	210,99	0,059	3,0162	2,9983
8,50	510	183,00	2,00	0,01	0,0034088	0,011658	5,49	1,71	208,84	0,058	2,9308	2,9137
9,00	540	183,00	2,10	0,01	0,0034088	0,011658	5,59	1,74	206,68	0,057	2,8496	2,8332
10,00	600	183,00	2,40	0,00	0,0034088	0,011658	5,87	1,83	200,22	0,056	2,6129	2,6129
11,00	660	184,00	2,70	0,00	0,0034275	0,011722	6,14	1,91	194,82	0,054	2,4186	2,4186
12,00	720	184,00	2,90	0,00	0,0034275	0,011722	6,31	1,96	190,49	0,053	2,3008	2,3008
13,00	780	184,00	3,10	0,00	0,0034275	0,011722	6,47	2,01	186,16	0,052	2,1908	2,1908
14,00	840	184,00	3,30	0,00	0,0034275	0,011722	6,64	2,06	181,84	0,051	2,0877	2,0877
15,00	900	184,00	3,50	0,00	0,0034275	0,011722	6,79	2,11	177,51	0,049	1,9906	1,9906
16,00	960	184,00	3,70	0,00	0,0034275	0,011722	6,95	2,16	173,18	0,048	1,8989	1,8989
17,00	1020	185,00	3,90	0,00	0,0034461	0,011786	7,10	2,21	169,76	0,047	1,8121	1,8121
18,00	1080	185,00	3,90	0,00	0,0034461	0,011786	7,10	2,21	169,76	0,047	1,8121	1,8121
19,00	1140	185,00	4,10	0,00	0,0034461	0,011786	7,25	2,25	165,41	0,046	1,7296	1,7296
20,00	1200	185,00	4,20	0,00	0,0034461	0,011786	7,32	2,28	163,24	0,045	1,6899	1,6899
22,00	1320	185,00	4,40	0,00	0,0034461	0,011786	7,46	2,32	158,88	0,044	1,6131	1,6131
24,00	1440	185,00	4,40	0,00	0,0034461	0,011786	7,46	2,32	158,88	0,044	1,6131	1,6131
26,00	1560	185,00	4,40	0,00	0,0034461	0,011786	7,46	2,32	158,88	0,044	1,6131	1,6131
28,00	1680	185,00	4,40	0,00	0,0034461	0,011786	7,46	2,32	158,88	0,044	1,6131	1,6131
30,00	1800	185,00	4,50	0,00	0,0034461	0,011786	7,54	2,34	156,71	0,044	1,5761	1,5761
32,00	1920	185,00	4,50	0,00	0,0034461	0,011786	7,54	2,34	156,71	0,044	1,5761	1,5761
34,00	2040	185,00	4,50	0,00	0,0034461	0,011786	7,54	2,34	156,71	0,044	1,5761	1,5761
36,00	2160	185,00	4,50	0,00	0,0034461	0,011786	7,54	2,34	156,71	0,044	1,5761	1,5761
38,00	2280	185,00	4,40	0,00	0,0034461	0,011786	7,46	2,32	158,88	0,044	1,6131	1,6131
40,00	2400	185,00	4,30	0,00	0,0034461	0,011786	7,39	2,30	161,06	0,045	1,6511	1,6511
42,00	2520	185,00	4,60	0,00	0,0034461	0,011786	7,61	2,37	154,53	0,043	1,5398	1,5398
44,00	2640	186,00	4,50	0,00	0,0034647	0,011849	7,54	2,34	157,55	0,044	1,5761	1,5761
46,00	2760	186,00	4,60	0,02	0,0034647	0,011849	7,61	2,37	155,36	0,043	1,5529	1,5398
48,00	2880	187,00	4,90	0,05	0,0034833	0,011913	7,81	2,43	149,60	0,042	1,4658	1,4356
50,00	3000	188,00	5,20	0,11	0,0035020	0,011977	8,02	2,49	143,76	0,040	1,3993	1,3376
52,00	3120	188,00	5,40	0,19	0,0035020	0,011977	8,15	2,53	139,34	0,039	1,3787	1,2753
54,00	3240	188,00	5,60	0,26	0,0035020	0,011977	8,28	2,57	134,92	0,037	1,3519	1,2154
56,00	3360	188,00	5,70	0,35	0,0035020	0,011977	8,34	2,59	132,71	0,037	1,3711	1,1862
58,00	3480	188,00	5,80	0,43	0,0035020	0,011977	8,41	2,61	130,49	0,036	1,3853	1,1575
60,00	3600	188,00	5,90	0,47	0,0035020	0,011977	8,47	2,63	128,28	0,036	1,3745	1,1293
62,00	3720	189,00	5,90	0,54	0,0035206	0,01204	8,47	2,63	128,96	0,036	1,4204	1,1293
64,00	3840	189,00	6,00	0,58	0,0035206	0,01204	8,54	2,65	126,74	0,035	1,4095	1,1015
66,00	3960	189,00	6,10	0,62	0,0035206	0,01204	8,60	2,67	124,52	0,035	1,3986	1,0743
68,00	4080	190,00	6,20	0,64	0,0035392	0,012104	8,66	2,69	122,94	0,034	1,3739	1,0475
70,00	4200	190,00	6,30	0,67	0,0035392	0,012104	8,72	2,71	120,71	0,034	1,3559	1,0211
72,00	4320	190,00	6,30	0,69	0,0035392	0,012104	8,72	2,71	120,71	0,034	1,3694	1,0211
74,00	4440	190,00	6,40	0,69	0,0035392	0,012104	8,79	2,73	118,47	0,033	1,3313	0,9951
76,00	4560	190,00	6,60	0,68	0,0035392	0,012104	8,91	2,77	114,00	0,032	1,2515	0,9443

Data:09/12/ 05
pH =9
corante = Orange II
C[col] = 1 10⁻⁴ mol/L

vazão de gás = 168 L/h

Volume = 8,5 L

C[NaCl] = 40g/L

m = 0,3

[O₃]Ge

(mg/L)= 12,2

U_G=G*H/V H= 0,57

Tempo(min)	Tempo(s)	G (L/h)	[O ₃] _{gs} (mg/L)	[O ₃] _L (mg/L)	U _G (m/s)	kLa (s-1)	O _{3g} /	[O ₃] _L	N[O ₃] _{gs}	N[O ₃] _{gs}	E _{Global}	E _{Integral}
0,00	0											
1,00	60	168,00	1,10	0,01	0,0031294	0,010703	4,61	1,38	219,39	0,061	4,1442	4,1143
1,50	90	170,00	0,80	0,01	0,0031667	0,01083	4,18	1,26	228,00	0,063	4,6962	4,6588
2,00	120	172,00	0,70	0,01	0,0032039	0,010957	4,02	1,21	232,71	0,065	4,9280	4,8872
2,50	150	174,00	0,60	0,01	0,0032412	0,011085	3,85	1,16	237,46	0,066	5,1957	5,1507
3,00	180	175,00	0,50	0,01	0,0032598	0,011149	3,66	1,10	240,88	0,067	5,5127	5,4625
3,50	210	176,00	0,40	0,01	0,0032784	0,011212	3,45	1,04	244,33	0,068	5,9010	5,8441
4,00	240	177,00	0,50	0,01	0,0032971	0,011276	3,66	1,10	243,64	0,068	5,5127	5,4625
4,50	270	178,00	0,50	0,01	0,0033157	0,01134	3,66	1,10	245,01	0,068	5,5127	5,4625
5,00	300	179,00	0,60	0,01	0,0033343	0,011403	3,85	1,16	244,28	0,068	5,1957	5,1507
5,50	330	179,00	0,70	0,01	0,0033343	0,011403	4,02	1,21	242,18	0,067	4,9280	4,8872
6,00	360	179,00	0,70	0,01	0,0033343	0,011403	4,02	1,21	242,18	0,067	4,9280	4,8872
6,50	390	179,00	1,00	0,01	0,0033343	0,011403	4,48	1,34	235,86	0,066	4,3094	4,2773
7,00	420	180,00	1,10	0,01	0,0033529	0,011467	4,61	1,38	235,06	0,065	4,1442	4,1143
7,50	450	180,00	1,30	0,01	0,0033529	0,011467	4,87	1,46	230,82	0,064	3,8550	3,8287
8,00	480	180,00	1,30	0,01	0,0033529	0,011467	4,87	1,46	230,82	0,064	3,8550	3,8287
8,50	510	180,00	1,40	0,01	0,0033529	0,011467	4,99	1,50	228,71	0,064	3,7268	3,7019
9,00	540	181,00	1,60	0,01	0,0033716	0,011531	5,22	1,57	225,72	0,063	3,4959	3,4736
10,00	600	181,00	1,70	0,01	0,0033716	0,011531	5,33	1,60	223,59	0,062	3,3912	3,3699
11,00	660	181,00	1,90	0,01	0,0033716	0,011531	5,54	1,66	219,33	0,061	3,1990	3,1798
12,00	720	182,00	2,10	0,01	0,0033902	0,011594	5,74	1,72	216,26	0,060	3,0262	3,0086
13,00	780	182,00	2,30	0,01	0,0033902	0,011594	5,93	1,78	211,98	0,059	2,8692	2,8531
14,00	840	182,00	2,60	0,00	0,0033902	0,011594	6,21	1,86	205,55	0,057	2,6434	2,6434
15,00	900	183,00	2,70	0,00	0,0034088	0,011658	6,30	1,89	204,53	0,057	2,5789	2,5789
16,00	960	183,00	2,90	0,00	0,0034088	0,011658	6,47	1,94	200,22	0,056	2,4567	2,4567
17,00	1020	184,00	3,00	0,00	0,0034275	0,011722	6,56	1,97	199,15	0,055	2,3987	2,3987
18,00	1080	184,00	2,90	0,00	0,0034275	0,011722	6,47	1,94	201,32	0,056	2,4567	2,4567
19,00	1140	184,00	2,80	0,00	0,0034275	0,011722	6,39	1,92	203,48	0,057	2,5167	2,5167
20,00	1200	184,00	3,20	0,00	0,0034275	0,011722	6,73	2,02	194,82	0,054	2,2884	2,2884
22,00	1320	184,00	3,50	0,00	0,0034275	0,011722	6,97	2,09	188,33	0,052	2,1351	2,1351
24,00	1440	184,00	3,50	0,00	0,0034275	0,011722	6,97	2,09	188,33	0,052	2,1351	2,1351
26,00	1560	185,00	3,30	0,00	0,0034461	0,011786	6,81	2,04	193,71	0,054	2,2358	2,2358
28,00	1680	185,00	3,40	0,00	0,0034461	0,011786	6,89	2,07	191,53	0,053	2,1847	2,1847
30,00	1800	186,00	3,50	0,00	0,0034647	0,011849	6,97	2,09	190,38	0,053	2,1351	2,1351
32,00	1920	186,00	3,70	0,00	0,0034647	0,011849	7,12	2,14	186,00	0,052	2,0401	2,0401
34,00	2040	186,00	3,30	0,00	0,0034647	0,011849	6,81	2,04	194,75	0,054	2,2358	2,2358
36,00	2160	186,00	3,40	0,00	0,0034647	0,011849	6,89	2,07	192,56	0,053	2,1847	2,1847
38,00	2280	186,00	3,40	0,00	0,0034647	0,011849	6,89	2,07	192,56	0,053	2,1847	2,1847
40,00	2400	186,00	3,70	0,00	0,0034647	0,011849	7,12	2,14	186,00	0,052	2,0401	2,0401
42,00	2520	186,00	3,70	0,00	0,0034647	0,011849	7,35	2,21	179,44	0,052	1,9766	2,0401
44,00	2640	186,00	4,00	0,00	0,0034647	0,011849	7,43	2,23	177,25	0,050	1,8876	1,9068
46,00	2760	186,00	4,10	0,02	0,0034647	0,011849	7,43	2,23	177,25	0,049	1,8815	1,8646

48,00	2880	186,00	4,40	0,10	0,0034647	0,011849	7,65	2,29	170,68	0,047	1,8233	1,7438
50,00	3000	186,00	4,40	0,19	0,0034647	0,011849	7,65	2,29	170,68	0,047	1,9013	1,7438
52,00	3120	186,00	4,90	0,30	0,0034647	0,011849	8,00	2,40	159,74	0,044	1,7825	1,5598
54,00	3240	187	5,10	0,40	0,0034647	0,011849	8,14	2,44	155,36	0,043	1,7931	1,4914
56,00	3360	187	5,30	0,50	0,0034833	0,011913	8,28	2,48	151,80	0,042	1,7851	1,4256
58,00	3480	187	5,20	0,45	0,0034833	0,011913	8,21	2,46	154,00	0,043	1,7842	1,4582
60,00	3600	187	5,30	0,47	0,0034833	0,011913	8,28	2,48	151,80	0,042	1,7585	1,4256

Data:09/12/ 05

pH =9

corante = Orange II

C[col] = $1 \cdot 10^{-4}$ mol/L

vazão de gás = 166 L/h

Volume = 8,5 L

C[NaCl] = 100 g/L

m = 0,3

[O₃]Ge

(mg/L)= 12,7

$U_G = G \cdot H / V$ H= 0,57

Tempo(min)	Tempo(s)	G (L/h)	[O ₃] _{Gs} (mg/L)	[O ₃]L (mg/L)	U _G (m/s)	kLa (s-1)	O _{3G} /	[O ₃]L	N'[O ₃] _{Gs}	N[O ₃] _{Gs}	E _{Global}	E _{Integral}
0,00	0											
1,00	60	166,00	2,70	0,01	0,0030922	0,010575176	6,46	1,94	195,29	0,054	2,6613	2,6476
1,50	90	167,00	2,80	0,01	0,0031108	0,010638882	6,55	1,96	194,51	0,054	2,5986	2,5854
2,00	120	168,00	2,70	0,01	0,0031294	0,010702588	6,46	1,94	197,65	0,055	2,6613	2,6476
2,50	150	168,00	2,70	0,01	0,0031294	0,010702588	6,46	1,94	197,65	0,055	2,6613	2,6476
3,00	180	168,00	2,70	0,01	0,0031294	0,010702588	6,46	1,94	197,65	0,055	2,6613	2,6476
3,50	210	168,00	2,50	0,01	0,0031294	0,010702588	6,28	1,88	201,60	0,056	2,7940	2,7792
4,00	240	168,00	2,50	0,01	0,0031294	0,010702588	6,28	1,88	201,60	0,056	2,7940	2,7792
4,50	270	168,00	2,50	0,01	0,0031294	0,010702588	6,28	1,88	201,60	0,056	2,7940	2,7792
5,00	300	168,00	2,50	0,01	0,0031294	0,010702588	6,28	1,88	201,60	0,056	2,7940	2,7792
5,50	330	168,00	2,60	0,01	0,0031294	0,010702588	6,37	1,91	199,62	0,055	2,7264	2,7121
6,00	360	168,00	2,70	0,01	0,0031294	0,010702588	6,46	1,94	197,65	0,055	2,6613	2,6476
6,50	390	168,00	2,80	0,01	0,0031294	0,010702588	6,55	1,96	195,67	0,054	2,5986	2,5854
7,00	420	168,00	3,00	0,01	0,0031294	0,010702588	6,72	2,02	191,72	0,053	2,4797	2,4674
7,50	450	168,00	3,40	0,01	0,0031294	0,010702588	7,06	2,12	183,81	0,051	2,2641	2,2534
8,00	480	168,00	3,60	0,01	0,0031294	0,010702588	7,22	2,17	179,86	0,050	2,1657	2,1557
8,50	510	168,00	3,70	0,01	0,0031294	0,010702588	7,30	2,19	177,88	0,049	2,1185	2,1088
9,00	540	169,00	3,80	0,01	0,0031480	0,010766294	7,38	2,21	176,95	0,049	2,0726	2,0632
10,00	600	169,00	4,00	0,01	0,0031480	0,010766294	7,53	2,26	172,98	0,048	1,9843	1,9755
11,00	660	169,00	4,30	0,01	0,0031480	0,010766294	7,76	2,33	167,01	0,046	1,8598	1,8518
12,00	720	169,00	4,60	0,00	0,0031480	0,010766294	7,98	2,39	161,05	0,045	1,7365	1,7365
13,00	780	169,00	4,70	0,00	0,0031480	0,010766294	8,05	2,41	159,06	0,044	1,6997	1,6997
14,00	840	169,00	5,00	0,00	0,0031480	0,010766294	8,26	2,48	153,09	0,043	1,5939	1,5939
15,00	900	169,00	5,20	0,00	0,0031480	0,010766294	8,40	2,52	149,12	0,041	1,5269	1,5269
16,00	960	169,00	5,30	0,00	0,0031480	0,010766294	8,47	2,54	147,13	0,041	1,4943	1,4943
17,00	1020	169,00	5,50	0,00	0,0031480	0,010766294	8,60	2,58	143,15	0,040	1,4310	1,4310
18,00	1080	169,00	5,50	0,00	0,0031480	0,010766294	8,60	2,58	143,15	0,040	1,4310	1,4310
19,00	1140	169,00	5,50	0,00	0,0031480	0,010766294	8,60	2,58	143,15	0,040	1,4310	1,4310
20,00	1200	169,00	5,50	0,00	0,0031480	0,010766294	8,60	2,58	143,15	0,040	1,4310	1,4310

22,00	1320	170,00	5,50	0,00	0,0031667	0,01083	8,60	2,58	144,00	0,040	1,4310	1,4310
24,00	1440	170,00	5,60	0,00	0,0031667	0,01083	8,67	2,60	142,00	0,039	1,4001	1,4001
26,00	1560	170,00	5,60	0,00	0,0031667	0,01083	8,67	2,60	142,00	0,039	1,4001	1,4001
28,00	1680	170,00	5,70	0,00	0,0031667	0,01083	8,74	2,62	140,00	0,039	1,3699	1,3699
30,00	1800	170,00	5,70	0,00	0,0031667	0,01083	8,74	2,62	140,00	0,039	1,3699	1,3699
32,00	1920	170,00	5,60	0,00	0,0031667	0,01083	8,67	2,60	142,00	0,039	1,4001	1,4001
34,00	2040	170,00	5,60	0,00	0,0031667	0,01083	8,67	2,60	142,00	0,039	1,4001	1,4001
36,00	2160	170,00	5,60	0,00	0,0031667	0,01083	8,67	2,60	142,00	0,039	1,4001	1,4001
38,00	2280	170,00	6,10	0,00	0,0031667	0,01083	9,00	2,70	132,00	0,037	1,2539	1,2539
40,00	2400	170,00	6,30	0,00	0,0031667	0,01083	9,13	2,74	128,00	0,036	1,1987	1,1987
42,00	2520	170,00	6,50	0,00	0,0031667	0,01083	9,26	2,78	124,00	0,034	1,1453	1,1453
44,00	2640	170,00	6,60	0,00	0,0031667	0,01083	9,32	2,80	122,00	0,034	1,1192	1,1192
46,00	2760	171,00	6,80	0,01	0,0031853	0,010893706	9,44	2,83	118,69	0,033	1,0719	1,0682
48,00	2880	171,00	7,00	0,07	0,0031853	0,010893706	9,57	2,87	114,67	0,032	1,0440	1,0186
50,00	3000	171,00	6,90	0,10	0,0031853	0,010893706	9,51	2,85	116,68	0,032	1,0811	1,0432
52,00	3120	171,00	7,30	0,17	0,0031853	0,010893706	9,75	2,93	108,64	0,030	1,0052	0,9468
54,00	3240	171,00	7,50	0,25	0,0031853	0,010893706	9,87	2,96	104,61	0,029	0,9836	0,9006
56,00	3360	171,00	7,80	0,30	0,0031853	0,010893706	10,05	3,02	98,58	0,027	0,9256	0,8336
58,00	3480	171,00	7,6	0,35	0,0031853	0,010893706	9,93	2,98	102,60	0,029	0,9948	0,8780
60,00	3600	171,00	7,50	0,37	0,0031853	0,010893706	9,87	2,96	104,61	0,029	1,0292	0,9006
62,00	3720	171,00	7,60	0,40	0,0031853	0,010893706	9,93	2,98	102,60	0,029	1,0141	0,8780
64,00	3840	171,00	7,3	0,43	0,0031853	0,010893706	9,75	2,93	108,64	0,030	1,1100	0,9468
66,00	3960	171,00	7,6	0,47	0,0031853	0,010893706	9,93	2,98	102,60	0,029	1,0424	0,8780
68,00	4080	171,00	7,8	0,46	0,0031853	0,010893706	10,05	3,02	98,58	0,027	0,9836	0,8336
70,00	4200	171,00	7,7	0,46	0,0031853	0,010893706	9,99	3,00	100,59	0,028	1,0107	0,8556

Data: 19/12/ 05

pH = 7,5

corante = Orange II

C[col] = $1 \cdot 10^{-4}$ mol/L

vazão de gás = 172 L/h

Volume = 8,5 L

m = 0,311

[O₃]Ge

(mg/L) = 12,7

U_G = G * H / V H = 0,57

Tempo (min)	Tempo (s)	G (L/h)	[O ₃] _{GS} (mg/L)	[O ₃] _L (mg/L)	U _G (m/s)	kLa (s ⁻¹)	O ₃ /	[O ₃] _L	N[O ₃] _{GS}	N[O ₃] _{GS}	E _{Global}	E _{Integral}
0,00	0											
1,00	60	172,00	4,50	0,01	0,0032	0,010957412	7,90	2,46	165,93	0,046	1,7183	1,7113
1,50	90	173,00	4,60	0,01	0,0032225	0,011021118	7,98	2,48	164,86	0,046	1,6819	1,6751
2,00	120	174,00	4,50	0,01	0,0032412	0,011084824	7,90	2,46	167,86	0,047	1,7183	1,7113
2,50	150	175,00	4,40	0,01	0,0032598	0,011148529	7,83	2,44	170,88	0,047	1,7556	1,7484
3,00	180	175,00	4,40	0,01	0,0032598	0,011148529	7,83	2,44	170,88	0,047	1,7556	1,7484
3,50	210	175,00	4,40	0,01	0,0032598	0,011148529	7,83	2,44	170,88	0,047	1,7556	1,7484
4,00	240	175,00	4,50	0,01	0,0032598	0,011148529	7,90	2,46	168,82	0,047	1,7183	1,7113
4,50	270	175,00	4,50	0,01	0,0032598	0,011148529	7,90	2,46	168,82	0,047	1,7183	1,7113
5,00	300	176,00	4,50	0,01	0,0032784	0,011212235	7,90	2,46	169,79	0,047	1,7183	1,7113
5,50	330	176,00	4,50	0,01	0,0032784	0,011212235	7,90	2,46	169,79	0,047	1,7183	1,7113
6,00	360	176,00	4,60	0,01	0,0032784	0,011212235	7,98	2,48	167,72	0,047	1,6819	1,6751

6,50	390	176,00	4,70	0,01	0,0032784	0,011212235	8,05	2,50	165,65	0,046	1,6462	1,6396
7,00	420	177,00	4,70	0,01	0,0032971	0,011275941	8,05	2,50	166,59	0,046	1,6462	1,6396
7,50	450	177,00	4,70	0,01	0,0032971	0,011275941	8,05	2,50	166,59	0,046	1,6462	1,6396
8,00	480	177,00	4,60	0,01	0,0032971	0,011275941	7,98	2,48	168,67	0,047	1,6819	1,6751
8,50	510	177,00	4,50	0,01	0,0032971	0,011275941	7,90	2,46	170,75	0,047	1,7183	1,7113
9,00	540	177,00	4,50	0,01	0,0032971	0,011275941	7,90	2,46	170,75	0,047	1,7183	1,7113
10,00	600	177,00	4,50	0,01	0,0032971	0,011275941	7,90	2,46	170,75	0,047	1,7183	1,7113
11,00	660	178,00	4,60	0,01	0,0033157	0,011339647	7,98	2,48	169,62	0,047	1,6819	1,6751
12,00	720	178,00	4,70	0,01	0,0033157	0,011339647	8,05	2,50	167,53	0,047	1,6462	1,6396
13,00	780	178,00	4,80	0,01	0,0033157	0,011339647	8,12	2,53	165,44	0,046	1,6113	1,6049
14,00	840	178,00	4,80	0,01	0,0033157	0,011339647	8,12	2,53	165,44	0,046	1,6113	1,6049
15,00	900	178,00	4,60	0,01	0,0033157	0,011339647	7,98	2,48	169,62	0,047	1,6819	1,6751
16,00	960	178,00	4,60	0,01	0,0033157	0,011339647	7,98	2,48	169,62	0,047	1,6819	1,6751
17,00	1020	179,00	4,50	0,01	0,0033343	0,011403353	7,90	2,46	172,68	0,048	1,7183	1,7113
18,00	1080	179,00	4,60	0,01	0,0033343	0,011403353	7,98	2,48	170,58	0,047	1,6819	1,6751
19,00	1140	179,00	4,60	0,01	0,0033343	0,011403353	7,98	2,48	170,58	0,047	1,6819	1,6751
20,00	1200	179,00	4,70	0,01	0,0033343	0,011403353	8,05	2,50	168,47	0,047	1,6462	1,6396
22,00	1320	179,00	4,80	0,01	0,0033343	0,011403353	8,12	2,53	166,36	0,046	1,6113	1,6049
24,00	1440	179,00	4,90	0,01	0,0033343	0,011403353	8,19	2,55	164,26	0,046	1,5771	1,5709
26,00	1560	179,00	4,90	0,01	0,0033343	0,011403353	8,19	2,55	164,26	0,046	1,5771	1,5709
28,00	1680	179,00	4,90	0,01	0,0033343	0,011403353	8,19	2,55	164,26	0,046	1,5771	1,5709
30,00	1800	179,00	4,90	0,01	0,0033343	0,011403353	8,19	2,55	164,26	0,046	1,5771	1,5709
32,00	1920	179,00	4,90	0,01	0,0033343	0,011403353	8,19	2,55	164,26	0,046	1,5771	1,5709
34,00	2040	179,00	4,90	0,01	0,0033343	0,011403353	8,19	2,55	164,26	0,046	1,5771	1,5709
36,00	2160	179,00	5,00	0,01	0,0033343	0,011403353	8,26	2,57	162,15	0,045	1,5436	1,5376
38,00	2280	180,00	4,80	0,01	0,0033529	0,011467059	8,12	2,53	167,29	0,046	1,6113	1,6049
40,00	2400	180,00	4,90	0,01	0,0033529	0,011467059	8,19	2,55	165,18	0,046	1,5771	1,5709
42,00	2520	180,00	4,90	0,01	0,0033529	0,011467059	8,19	2,55	165,18	0,046	1,5771	1,5709
44,00	2640	180,00	4,90	0,01	0,0033529	0,011467059	8,19	2,55	165,18	0,046	1,5771	1,5709
46,00	2760	180,00	4,90	0,01	0,0033529	0,011467059	8,19	2,55	165,18	0,046	1,5771	1,5709
48,00	2880	180,00	5,00	0,01	0,0033529	0,011467059	8,26	2,57	163,06	0,045	1,5436	1,5376
50,00	3000	180,00	5,10	0,02	0,0033529	0,011467059	8,33	2,59	160,94	0,045	1,5166	1,5049
52,00	3120	180,00	5,20	0,06	0,0033529	0,011467059	8,40	2,61	158,82	0,044	1,5075	1,4729
54,00	3240	180,00	5,40	0,10	0,0033529	0,011467059	8,54	2,65	154,59	0,043	1,4658	1,4106
56,00	3360	180,00	5,60	0,18	0,0033529	0,011467059	8,67	2,70	150,35	0,042	1,4472	1,3506
58,00	3480	180,00	5,70	0,28	0,0033529	0,011467059	8,74	2,72	148,24	0,041	1,4732	1,3214
60,00	3600	180,00	6,20	0,44	0,0033529	0,011467059	9,06	2,82	137,65	0,038	1,4015	1,1827
62,00	3720	180,00	6,20	0,61	0,0033529	0,011467059	9,06	2,82	137,65	0,038	1,5093	1,1827
64,00	3840	180,00	6,40	0,81	0,0033529	0,011467059	9,19	2,86	133,41	0,037	1,5772	1,1304
66,00	3960	180,00	7,30	0,91	0,0033529	0,011467059	9,75	3,03	114,35	0,032	1,3049	0,9133
68,00	4080	180,00	7,60	0,91	0,0033529	0,011467059	9,93	3,09	108,00	0,030	1,2006	0,8469
70,00	4200	180,00	7,80	0,85	0,0033529	0,011467059	10,05	3,13	103,76	0,029	1,1043	0,8041
72,00	4320	180,00	7,90	0,78	0,0033529	0,011467059	10,11	3,14	101,65	0,028	1,0414	0,7831
74,00	4440	180,00	8,00	0,70	0,0033529	0,011467059	10,17	3,16	99,53	0,028	0,9790	0,7623
76,00	4560	180,00	8,00	0,63	0,0033529	0,011467059	10,17	3,16	99,53	0,028	0,9519	0,7623
78,00	4680	180,00	8,10	0,56	0,0033529	0,011467059	10,23	3,18	97,41	0,027	0,9003	0,7418
80,00	4800	180,00	8,10	0,50	0,0033529	0,011467059	10,23	3,18	97,41	0,027	0,8802	0,7418
82,00	4920	180,00	8,30	0,44	0,0033529	0,011467059	10,34	3,22	93,18	0,026	0,8127	0,7016
84,00	5040	179,00	8,30	0,39	0,0033343	0,011403353	10,34	3,22	92,66	0,026	0,7984	0,7016
86,00	5160	179,00	8,30	0,35	0,0033343	0,011403353	10,34	3,22	92,66	0,026	0,7872	0,7016
88,00	5280	179,00	8,20	0,31	0,0033343	0,011403353	10,29	3,20	94,76	0,026	0,7990	0,7216
90,00	5400	179,00	8,30	0,28	0,0033343	0,011403353	10,34	3,22	92,66	0,026	0,7685	0,7016

92,00	5520	179,00	8,00	0,25	0,0033343	0,011403353	10,17	3,16	98,98	0,027	0,8277	0,7623
94,00	5640	179,00	7,90	0,23	0,0033343	0,011403353	10,11	3,14	101,08	0,028	0,8449	0,7831
96,00	5760	179,00	8,00	0,21	0,0033343	0,011403353	10,17	3,16	98,98	0,027	0,8165	0,7623
98,00	5880	179,00	8,00	0,19	0,0033343	0,011403353	10,17	3,16	98,98	0,027	0,8110	0,7623
100,00	6000	179,00	8,00	0,18	0,0033343	0,011403353	10,17	3,16	98,98	0,027	0,8083	0,7623
102,00	6120	179,00	7,90	0,16	0,0033343	0,011403353	10,11	3,14	101,08	0,028	0,8250	0,7831
104,00	6240	179,00	8,00	0,15	0,0033343	0,011403353	10,17	3,16	98,98	0,027	0,8003	0,7623
106,00	6360	179,00	8,20	0,14	0,0033343	0,011403353	10,29	3,20	94,76	0,026	0,7546	0,7216
108,00	6480	179,00	8,00	0,13	0,0033343	0,011403353	10,17	3,16	98,98	0,027	0,7950	0,7623
110,00	6600	179,00	7,90	0,12	0,0033343	0,011403353	10,11	3,14	101,08	0,028	0,8141	0,7831
112,00	6720	179,00	7,80	0,12	0,0033343	0,011403353	10,05	3,13	103,19	0,029	0,8362	0,8041
114,00	6840	179,00	8,10	0,11	0,0033343	0,011403353	10,23	3,18	96,87	0,027	0,7684	0,7418
116,00	6960	179,00	8,00	0,11	0,0033343	0,011403353	10,17	3,16	98,98	0,027	0,7898	0,7623
118,00	7080	179,00	7,90	0,10	0,0033343	0,011403353	10,11	3,14	101,08	0,028	0,8088	0,7831
120,00	7200	179,00	7,90	0,10	0,0033343	0,011403353	10,11	3,14	101,08	0,028	0,8088	0,7831
122	7320	179,00	8,10	0,09	0,0033343	0,011403353	10,23	3,18	96,87	0,027	0,7634	0,7418
124	7440	179,00	8,00	0,09	0,0033343	0,011403353	10,17	3,16	98,98	0,027	0,7846	0,7623
126	7560	179,00	8,10	0,09	0,0033343	0,011403353	10,23	3,18	96,87	0,027	0,7634	0,7418
128	7680	179,00	8,50	0,08	0,0033343	0,011403353	10,46	3,25	88,45	0,025	0,6790	0,6623
130	7800	179,00	8,80	0,08	0,0033343	0,011403353	10,63	3,31	82,13	0,023	0,6201	0,6051
132	7920	179,00	9,00	0,07	0,0033343	0,011403353	10,74	3,34	77,92	0,022	0,5802	0,5680
134	8040	179,00	9,1	0,07	0,0033343	0,011403353	10,80	3,36	75,81	0,021	0,5615	0,5498
136	8160	179,00	9,4	0,07	0,0033343	0,011403353	10,97	3,41	69,49	0,019	0,5067	0,4963
138	8280	179,00	9,4	0,07	0,0033343	0,011403353	10,97	3,41	69,49	0,019	0,5067	0,4963
140	8400	179,00	9,3	0,06	0,0033343	0,011403353	10,91	3,39	71,60	0,020	0,5232	0,5139
142	8520	179,00	9,2	0,06	0,0033343	0,011403353	10,86	3,38	73,71	0,020	0,5414	0,5318
144	8640	179,00	9,1	0,06	0,0033343	0,011403353	10,80	3,36	75,81	0,021	0,5598	0,5498
146	8760	179,00	9	0,06	0,0033343	0,011403353	10,74	3,34	77,92	0,022	0,5784	0,5680
148	8880	179,00	9,3	0,06	0,0033343	0,011403353	10,91	3,39	71,60	0,020	0,5232	0,5139
150	9000	179,00	9,4	0,06	0,0033343	0,011403353	10,97	3,41	69,49	0,019	0,5052	0,4963
152	9120	179,00	9,6	0,05	0,0033343	0,011403353	11,08	3,45	65,28	0,018	0,4684	0,4616
154	9240	179,00	9,7	0,05	0,0033343	0,011403353	11,13	3,46	63,18	0,018	0,4510	0,4445
156	9360	179,00	9,8	0,05	0,0033343	0,011403353	11,19	3,48	61,07	0,017	0,4338	0,4276
158	9480	179,00	9,7	0,05	0,0033343	0,011403353	11,13	3,46	63,18	0,018	0,4510	0,4445
160	9600	178,00	9,7	0,05	0,0033157	0,011339647	11,13	3,46	62,82	0,017	0,4510	0,4445
162	9720	178,00	9,6	0,05	0,0033157	0,011339647	11,08	3,45	64,92	0,018	0,4684	0,4616
164	9840	179,00	9,6	0,06	0,0033343	0,011403353	11,08	3,45	65,28	0,018	0,4698	0,4616
166	9960	179,00	9,4	0,06	0,0033343	0,011403353	10,97	3,41	69,49	0,019	0,5052	0,4963
168	10080	179,00	9,4	0,06	0,0033343	0,011403353	10,97	3,41	69,49	0,019	0,5052	0,4963
170	10200	179,00	9,4	0,06	0,0033343	0,011403353	10,97	3,41	69,49	0,019	0,5052	0,4963
172	10320	179,00	9,4	0,06	0,0033343	0,011403353	10,97	3,41	69,49	0,019	0,5052	0,4963
174	10440	179,00	9,4	0,07	0,0033343	0,011403353	10,97	3,41	69,49	0,019	0,5067	0,4963
176	10560	179,00	9,4	0,07	0,0033343	0,011403353	10,97	3,41	69,49	0,019	0,5067	0,4963
178	10680	179,00	9,4	0,07	0,0033343	0,011403353	10,97	3,41	69,49	0,019	0,5067	0,4963
180	10800	179,00	9,2	0,08	0,0033343	0,011403353	10,86	3,38	73,71	0,020	0,5447	0,5318
182	10920	179,00	9,2	0,08	0,0033343	0,011403353	10,86	3,38	73,71	0,020	0,5447	0,5318
184	11040	179,00	9,1	0,08	0,0033343	0,011403353	10,80	3,36	75,81	0,021	0,5632	0,5498
186	11160	179,00	9,3	0,08	0,0033343	0,011403353	10,91	3,39	71,60	0,020	0,5264	0,5139
188	11280	178,00	9,2	0,08	0,0033157	0,011339647	10,86	3,38	73,29	0,020	0,5447	0,5318
190	11400	178,00	9,3	0,09	0,0033157	0,011339647	10,91	3,39	71,20	0,020	0,5279	0,5139
192	11520	178,00	9,5	0,09	0,0033157	0,011339647	11,02	3,43	67,01	0,019	0,4918	0,4789
194	11640	178,00	9,5	0,09	0,0033157	0,011339647	11,02	3,43	67,01	0,019	0,4918	0,4789

196	11760	178,00	9,4	0,09	0,0033157	0,011339647	10,97	3,41	69,11	0,019	0,5098	0,4963
198	11880	178,00	9,4	0,09	0,0033157	0,011339647	10,97	3,41	69,11	0,019	0,5098	0,4963
200	12000	178,00	9,6	0,10	0,0033157	0,011339647	11,08	3,45	64,92	0,018	0,4754	0,4616
202	12120	178,00	9,7	0,10	0,0033157	0,011339647	11,13	3,46	62,82	0,017	0,4577	0,4445
204	12240	178,00	9,8	0,10	0,0033157	0,011339647	11,19	3,48	60,73	0,017	0,4402	0,4276
206	12360	178,00	9,8	0,10	0,0033157	0,011339647	11,19	3,48	60,73	0,017	0,4402	0,4276
208	12480	178,00	9,8	0,10	0,0033157	0,011339647	11,19	3,48	60,73	0,017	0,4402	0,4276
210	12600	179,00	9,6	0,10	0,0033343	0,011403353	11,08	3,45	65,28	0,018	0,4754	0,4616
216	12960	179,00	9,5	0,11	0,0033343	0,011403353	11,02	3,43	67,39	0,019	0,4947	0,4789
246	14760	188,00	8,4	0,12	0,0035020	0,011976706	10,40	3,24	95,11	0,026	0,7081	0,6818

Data:19/12/ 05

pH =7,4

corante = Orange II

C[col] = $1 \cdot 10^{-4}$ mol/L

vazão de gás = 224 L/h

Volume = 8,5 L

C[NaCl] = 40g/L

m = 0,311

[O₃]Ge

(mg/L)= 12,3

$U_G = G \cdot H / V$

H= 0,57

Tempo(min)	Tempo(s)	G (L/h)	[O ₂] _{GS} (mg/L)	[O ₃] _L (mg/L)	U _G (m/s)	kLa (s-1)	O ₂ G/	[O ₃] _L	N[O ₂] _{GS}	N[O ₃] _{GS}	E _{Global}	E _{Integral}
0,00	0											
1,00	60	224,00	2,60	0,06	0,0042	0,014270118	6,24	1,94	255,62	0,071	2,6451	2,5634
1,50	90	225,00	2,50	0,06	0,0041912	0,014333824	6,15	1,91	259,41	0,072	2,7132	2,6281
2,00	120	225,00	2,20	0,06	0,0041912	0,014333824	5,87	1,83	267,35	0,074	2,9354	2,8389
2,50	150	226,00	2,10	0,06	0,0042098	0,014397529	5,77	1,79	271,20	0,075	3,0165	2,9157
3,00	180	226,00	2,20	0,06	0,0042098	0,014397529	5,87	1,83	268,54	0,075	2,9354	2,8389
3,50	210	226,00	2,10	0,06	0,0042098	0,014397529	5,77	1,79	271,20	0,075	3,0165	2,9157
4,00	240	226,00	2,20	0,06	0,0042098	0,014397529	5,87	1,83	268,54	0,075	2,9354	2,8389
4,50	270	226,00	2,10	0,05	0,0042098	0,014397529	5,77	1,79	271,20	0,075	2,9992	2,9157
5,00	300	227,00	2,20	0,05	0,0042284	0,014461235	5,87	1,83	269,73	0,075	2,9189	2,8389
5,50	330	227,00	2,20	0,05	0,0042284	0,014461235	5,87	1,83	269,73	0,075	2,9189	2,8389
6,00	360	227,00	2,20	0,05	0,0042284	0,014461235	5,87	1,83	269,73	0,075	2,9189	2,8389
6,50	390	228,00	2,20	0,05	0,0042471	0,014524941	5,87	1,83	270,92	0,075	2,9189	2,8389
7,00	420	228,00	2,20	0,05	0,0042471	0,014524941	5,87	1,83	270,92	0,075	2,9189	2,8389
7,50	450	228,00	2,20	0,05	0,0042471	0,014524941	5,87	1,83	270,92	0,075	2,9189	2,8389
8,00	480	228,00	2,30	0,05	0,0042471	0,014524941	5,96	1,85	268,24	0,075	2,8422	2,7656
8,50	510	228,00	2,40	0,05	0,0042471	0,014524941	6,06	1,88	265,55	0,074	2,7689	2,6954
9,00	540	228,00	2,40	0,05	0,0042471	0,014524941	6,06	1,88	265,55	0,074	2,7689	2,6954
10,00	600	229,00	2,50	0,05	0,0042657	0,014588647	6,15	1,91	264,02	0,073	2,6986	2,6281
11,00	660	229,00	2,50	0,05	0,0042657	0,014588647	6,15	1,91	264,02	0,073	2,6986	2,6281
12,00	720	229,00	2,60	0,05	0,0042657	0,014588647	6,24	1,94	261,33	0,073	2,6312	2,5634
13,00	780	229,00	2,60	0,05	0,0042657	0,014588647	6,24	1,94	261,33	0,073	2,6312	2,5634
14,00	840	229,00	2,70	0,05	0,0042657	0,014588647	6,33	1,97	258,64	0,072	2,5663	2,5011
15,00	900	229,00	2,70	0,05	0,0042657	0,014588647	6,33	1,97	258,64	0,072	2,5663	2,5011
16,00	960	229,00	2,80	0,05	0,0042657	0,014588647	6,42	2,00	255,94	0,071	2,5039	2,4411
17,00	1020	230,00	2,90	0,05	0,0042843	0,014652353	6,51	2,02	254,35	0,071	2,4437	2,3833

18,00	1080	230,00	2,90	0,05	0,0042843	0,014652353	6,51	2,02	254,35	0,071	2,4437	2,3833
19,00	1140	230,00	2,90	0,05	0,0042843	0,014652353	6,51	2,02	254,35	0,071	2,4437	2,3833
20,00	1200	230,00	3,00	0,05	0,0042843	0,014652353	6,59	2,05	251,65	0,070	2,3855	2,3273
22,00	1320	230,00	2,90	0,05	0,0042843	0,014652353	6,51	2,02	254,35	0,071	2,4437	2,3833
24,00	1440	230,00	3,80	0,05	0,0042843	0,014652353	7,24	2,25	230,00	0,064	1,9815	1,9374
26,00	1560	230,00	3,10	0,05	0,0042843	0,014652353	6,68	2,08	248,94	0,069	2,3294	2,2733
28,00	1680	230,00	3,20	0,05	0,0042843	0,014652353	6,76	2,10	246,24	0,068	2,2750	2,2209
30,00	1800	231,00	3,20	0,05	0,0043029	0,014716059	6,76	2,10	247,31	0,069	2,2750	2,2209
32,00	1920	231,00	3,20	0,04	0,0043029	0,014716059	6,76	2,10	247,31	0,069	2,2640	2,2209
34,00	2040	231,00	3,30	0,04	0,0043029	0,014716059	6,84	2,13	244,59	0,068	2,2117	2,1701
36,00	2160	231,00	3,30	0,04	0,0043029	0,014716059	6,84	2,13	244,59	0,068	2,2117	2,1701
38,00	2280	231,00	3,30	0,04	0,0043029	0,014716059	6,84	2,13	244,59	0,068	2,2117	2,1701
40,00	2400	231,00	2,90	0,04	0,0043029	0,014716059	6,51	2,02	255,46	0,071	2,4313	2,3833
40,00	2400	231,00	2,90	0,04	0,0043029	0,014716059	6,51	2,02	255,46	0,071	2,4313	2,3833
42,00	2520	231,00	2,90	0,04	0,0043029	0,014716059	6,51	2,02	255,46	0,071	2,4313	2,3833
44,00	2640	231,00	3,00	0,05	0,0043029	0,014716059	6,59	2,05	252,74	0,070	2,3855	2,3273
46,00	2760	231,00	3,40	0,08	0,0043029	0,014716059	6,92	2,15	241,87	0,067	2,2028	2,1209
48,00	2880	231,00	3,40	0,10	0,0043029	0,014716059	6,92	2,15	241,87	0,067	2,2242	2,1209
50,00	3000	231,00	3,60	0,13	0,0043029	0,014716059	7,08	2,20	236,44	0,066	2,1538	2,0266
52,00	3120	231,00	4,20	0,18	0,0043029	0,014716059	7,54	2,34	220,13	0,061	1,9198	1,7724
54,00	3240	231,00	4,40	0,20	0,0043029	0,014716059	7,68	2,39	214,69	0,060	1,8505	1,6956
56,00	3360	231,00	4,50	0,20	0,0043029	0,014716059	7,76	2,41	211,98	0,059	1,8085	1,6586
58,00	3480	231,00	4,60	0,19	0,0043029	0,014716059	7,83	2,43	209,26	0,058	1,7596	1,6223
60,00	3600	231,00	4,70	0,17	0,0043029	0,014716059	7,90	2,46	206,54	0,057	1,7048	1,5868
62,00	3720	231,00	4,90	0,16	0,0043029	0,014716059	8,04	2,50	201,11	0,056	1,6219	1,5181
64,00	3840	231,00	5,00	0,15	0,0043029	0,014716059	8,11	2,52	198,39	0,055	1,5787	1,4848
66,00	3960	231,00	5,10	0,14	0,0043029	0,014716059	8,18	2,54	195,67	0,054	1,5367	1,4521
68,00	4080	231,00	5,20	0,13	0,0043029	0,014716059	8,25	2,56	192,95	0,054	1,4959	1,4201
70,00	4200	231,00	5,00	0,12	0,0043029	0,014716059	8,11	2,52	198,39	0,055	1,5589	1,4848
72,00	4320	231,00	4,90	0,12	0,0043029	0,014716059	8,04	2,50	201,11	0,056	1,5946	1,5181
74,00	4440	231,00	5,10	0,11	0,0043029	0,014716059	8,18	2,54	195,67	0,054	1,5177	1,4521
76,00	4560	231,00	5,00	0,11	0,0043029	0,014716059	8,11	2,52	198,39	0,055	1,5525	1,4848
78,00	4680	231,00	4,90	0,10	0,0043029	0,014716059	8,04	2,50	201,11	0,056	1,5813	1,5181
80,00	4800	231,00	5,10	0,10	0,0043029	0,014716059	8,18	2,54	195,67	0,054	1,5115	1,4521

Data:19/12/ 05

pH =7,4

corante = Orange II

$C[\text{col}] = 1 \cdot 10^{-4} \text{ mol/L}$

vazão de gás = 162 L/h

Volume = 8,5 L

$C[\text{NaCl}] = 100\text{g/L}$

$m = 0,311$

$[\text{O}_3]\text{Ge}$

(mg/L)= 12,7

$U_G = G \cdot H / V$ $H = 0,57$

Tempo(min)	Tempo(s)	G (L/h)	$[\text{O}_3]_{\text{Gs}}$ (mg/L)	$[\text{O}_3]_{\text{L}}$ (mg/L)	U_G (m/s)	kLa (s ⁻¹)	$\text{O}_{3\text{G}}/$	$[\text{O}_3]_{\text{L}}$	$N[\text{O}_3]_{\text{Gs}}$	$N[\text{O}_3]_{\text{Gs}}$	E_{Global}	E_{Integral}
0,00	0											
1,00	60	162,00	3,90	0,02	0,0030176	0,010320353	7,45	2,32	167,72	0,047	1,9643	1,9474

1,50	90	163,00	4,00	0,03	0,0030363	0,010384059	7,53	2,34	166,84	0,046	1,9303	1,9056
2,00	120	163,00	3,80	0,03	0,0030363	0,010384059	7,38	2,29	170,67	0,047	2,0166	1,9902
2,50	150	164,00	3,80	0,03	0,0030549	0,010447765	7,38	2,29	171,72	0,048	2,0166	1,9902
3,00	180	165,00	3,80	0,03	0,0030735	0,010511471	7,38	2,29	172,76	0,048	2,0166	1,9902
3,50	210	165,00	3,90	0,02	0,0030735	0,010511471	7,45	2,32	170,82	0,047	1,9643	1,9474
4,00	240	166,00	3,70	0,02	0,0030922	0,010575176	7,30	2,27	175,76	0,049	2,0523	2,0342
4,50	270	167,00	3,70	0,02	0,0031108	0,010638882	7,30	2,27	176,82	0,049	2,0523	2,0342
5,00	300	167,00	3,60	0,02	0,0031108	0,010638882	7,22	2,24	178,79	0,050	2,0981	2,0794
5,50	330	167,00	3,70	0,02	0,0031108	0,010638882	7,30	2,27	176,82	0,049	2,0523	2,0342
6,00	360	168,00	3,70	0,02	0,0031294	0,010702588	7,30	2,27	177,88	0,049	2,0523	2,0342
6,50	390	168,00	3,70	0,02	0,0031294	0,010702588	7,30	2,27	177,88	0,049	2,0523	2,0342
7,00	420	168,00	3,80	0,02	0,0031294	0,010702588	7,38	2,29	175,91	0,049	2,0077	1,9902
7,50	450	168,00	3,80	0,02	0,0031294	0,010702588	7,38	2,29	175,91	0,049	2,0077	1,9902
8,00	480	169,00	4,00	0,02	0,0031480	0,010766294	7,53	2,34	172,98	0,048	1,9220	1,9056
8,50	510	169,00	4,00	0,02	0,0031480	0,010766294	7,53	2,34	172,98	0,048	1,9220	1,9056
9,00	540	169,00	4,00	0,02	0,0031480	0,010766294	7,53	2,34	172,98	0,048	1,9220	1,9056
10,00	600	170,00	4,10	0,02	0,0031667	0,01083000	7,61	2,37	172,00	0,048	1,8808	1,8649
11,00	660	170,00	4,10	0,02	0,0031667	0,01083000	7,61	2,37	172,00	0,048	1,8808	1,8649
12,00	720	170,00	4,20	0,02	0,0031667	0,01083000	7,68	2,39	170,00	0,047	1,8406	1,8251
13,00	780	171,00	4,20	0,02	0,0031853	0,010893706	7,68	2,39	171,00	0,048	1,8406	1,8251
14,00	840	171,00	4,30	0,02	0,0031853	0,010893706	7,76	2,41	168,99	0,047	1,8013	1,7863
15,00	900	171,00	4,40	0,02	0,0031853	0,010893706	7,83	2,44	166,98	0,046	1,7629	1,7484
16,00	960	171,00	4,40	0,02	0,0031853	0,010893706	7,83	2,44	166,98	0,046	1,7629	1,7484
17,00	1020	171,00	4,50	0,02	0,0031853	0,010893706	7,90	2,46	164,96	0,046	1,7254	1,7113
18,00	1080	171,00	4,60	0,02	0,0031853	0,010893706	7,98	2,48	162,95	0,045	1,6887	1,6751
19,00	1140	171,00	4,70	0,02	0,0031853	0,010893706	8,05	2,50	160,94	0,045	1,6528	1,6396
20,00	1200	172	4,70	0,02	0,0032039	0,010957412	8,05	2,50	161,88	0,045	1,6528	1,6396
22,00	1320	172	4,80	0,02	0,0032039	0,010957412	8,12	2,53	159,86	0,044	1,6177	1,6049
24,00	1440	172	4,70	0,02	0,0032039	0,010957412	8,05	2,50	161,88	0,045	1,6528	1,6396
26,00	1560	172	4,80	0,02	0,0032039	0,010957412	8,12	2,53	159,86	0,044	1,6177	1,6049
28,00	1680	172	4,80	0,02	0,0032039	0,010957412	8,12	2,53	159,86	0,044	1,6177	1,6049
30,00	1800	173	4,80	0,02	0,0032225	0,011021118	8,12	2,53	160,79	0,045	1,6177	1,6049
32,00	1920	173	4,80	0,02	0,0032225	0,011021118	8,12	2,53	160,79	0,045	1,6177	1,6049
34,00	2040	174	4,90	0,03	0,0032412	0,011084824	8,19	2,55	159,67	0,044	1,5896	1,5709
36,00	2160	174	5,00	0,04	0,0032412	0,011084824	8,26	2,57	157,62	0,044	1,5619	1,5376
38,00	2280	174	5,20	0,09	0,0032412	0,011084824	8,40	2,61	153,53	0,043	1,5254	1,4729
40,00	2400	174	5,30	0,17	0,0032412	0,011084824	8,47	2,63	151,48	0,042	1,5409	1,4414
42,00	2520	175	5,40	0,26	0,0032598	0,011148529	8,54	2,65	150,29	0,042	1,5638	1,4106
44,00	2640	175	5,60	0,34	0,0032598	0,011148529	8,67	2,70	146,18	0,041	1,5455	1,3506
46,00	2760	175	6,00	0,41	0,0032598	0,011148529	8,94	2,78	137,94	0,038	1,4509	1,2368
48,00	2880	175	6,00	0,46	0,0032598	0,011148529	8,94	2,78	137,94	0,038	1,4822	1,2368
50,00	3000	175	6,10	0,50	0,0032598	0,011148529	9,00	2,80	135,88	0,038	1,4726	1,2096
52,00	3120	175	6,30	0,51	0,0032598	0,011148529	9,13	2,84	131,76	0,037	1,4095	1,1563
54,00	3240	175	6,30	0,49	0,0032598	0,011148529	9,13	2,84	131,76	0,037	1,3975	1,1563
56,00	3360	175	6,30	0,47	0,0032598	0,011148529	9,13	2,84	131,76	0,037	1,3857	1,1563
58,00	3480	175	6,50	0,45	0,0032598	0,011148529	9,26	2,88	127,65	0,035	1,3095	1,1048
60,00	3600	175	6,40	0,42	0,0032598	0,011148529	9,19	2,86	129,71	0,036	1,3250	1,1304
62,00	3720	175	6,60	0,39	0,0032598	0,011148529	9,32	2,90	125,59	0,035	1,2475	1,0796
64,00	3840	175	6,60	0,37	0,0032598	0,011148529	9,32	2,90	125,59	0,035	1,2376	1,0796
66,00	3960	174	6,60	0,34	0,0032412	0,011084824	9,32	2,90	124,87	0,035	1,2231	1,0796
68,00	4080	174	6,80	0,32	0,0032412	0,011084824	9,44	2,94	120,78	0,034	1,1564	1,0304
70,00	4200	174	6,70	0,29	0,0032412	0,011084824	9,38	2,92	122,82	0,034	1,1712	1,0548

Data:19/12/ 05

pH =7,4

corante = Orange II

C[col] = $1 \cdot 10^{-4}$ mol/L

C[NaCl] = 0 + t-but

vazão de gás = 179 L/h

Volume = 8,5 L

m = 0,31

[O₃]Ge

(mg/L)= 12,2

$U_G = G \cdot H/V$

H= 0,57

Tempo(min)	Tempo(s)	G (L/h)	[O ₃] _{gs} (mg/L)	[O ₃] _L (mg/L)	U _G (m/s)	kLa (s ⁻¹)	O _{3G} /	[O ₃] _L	N[O ₃] _{GS}	N[O ₃] _{LS}	E _{Global}	E _{Integral}
0,00	0											
1,00	60	179,00	2,80	0,08	0,0033	0,015004412	6,39	1,99	197,95	0,055	1,9225	0,3756
1,50	90	180,00	2,60	0,08	0,0034	0,015088235	6,21	1,93	203,29	0,056	2,0217	0,3945
2,00	120	181,00	2,60	0,08	0,0034	0,015172059	6,21	1,93	204,42	0,057	2,0217	0,3945
2,50	150	181,00	2,50	0,08	0,0034	0,015172059	6,12	1,90	206,55	0,057	2,0743	0,4045
3,00	180	182,00	2,40	0,08	0,0034	0,015255882	6,03	1,87	209,84	0,058	2,1292	0,4149
3,50	210	182,00	2,50	0,08	0,0034	0,015255882	6,12	1,90	207,69	0,058	2,0743	0,4045
4,00	240	183,00	2,30	0,08	0,0034	0,015339706	5,93	1,85	213,14	0,059	2,1864	0,4258
4,50	270	183,00	2,20	0,08	0,0034	0,015339706	5,84	1,82	215,29	0,060	2,2463	0,4371
5,00	300	183,00	2,30	0,08	0,0034	0,015339706	5,93	1,85	213,14	0,059	2,1864	0,4258
5,50	330	184,00	2,40	0,08	0,0034	0,015423529	6,03	1,87	212,14	0,059	2,1292	0,4149
6,00	360	184,00	2,50	0,08	0,0034	0,015423529	6,12	1,90	209,98	0,058	2,0743	0,4045
6,50	390	184,00	2,40	0,08	0,0034	0,015423529	6,03	1,87	212,14	0,059	2,1292	0,4149
7,00	420	185,00	2,20	0,08	0,0034	0,015507353	5,84	1,82	217,65	0,060	2,2463	0,4371
7,50	450	185,00	2,30	0,08	0,0034	0,015507353	5,93	1,85	215,47	0,060	2,1864	0,4258
8,00	480	185,00	2,30	0,08	0,0034	0,015507353	5,93	1,85	215,47	0,060	2,1864	0,4258
8,50	510	185,00	2,40	0,08	0,0034	0,015507353	6,03	1,87	213,29	0,059	2,1292	0,4149
9,00	540	186,00	2,50	0,08	0,0035	0,015591176	6,12	1,90	212,26	0,059	2,0743	0,4045
10,00	600	187,00	2,40	0,07	0,0035	0,015675	6,03	1,87	215,60	0,060	2,1174	0,4149
11,00	660	187,00	2,30	0,07	0,0035	0,015675	5,93	1,85	217,80	0,061	2,1741	0,4258
12,00	720	187,00	2,50	0,07	0,0035	0,015675	6,12	1,90	213,40	0,059	2,0630	0,4045
13,00	780	187,00	2,60	0,07	0,0035	0,015675	6,21	1,93	211,20	0,059	2,0108	0,3945
14,00	840	187,00	2,70	0,07	0,0035	0,015675	6,30	1,96	209,00	0,058	1,9607	0,3849
15,00	900	188,00	2,80	0,07	0,0035	0,015758824	6,39	1,99	207,91	0,058	1,9124	0,3756
16,00	960	188,00	3,00	0,07	0,0035	0,015758824	6,56	2,04	203,48	0,057	1,8211	0,3580
17,00	1020	188,00	3,00	0,08	0,0035	0,015758824	6,56	2,04	203,48	0,057	1,8303	0,3580
18,00	1080	188,00	3,00	0,08	0,0035	0,015758824	6,56	2,04	203,48	0,057	1,8303	0,3580
19,00	1140	188,00	3,00	0,08	0,0035	0,015758824	6,56	2,04	203,48	0,057	1,8303	0,3580
20,00	1200	188,00	3,00	0,09	0,0035	0,015758824	6,56	2,04	203,48	0,057	1,8397	0,3580
22,00	1320	188,00	3,10	0,09	0,0035	0,015758824	6,64	2,07	201,27	0,056	1,7957	0,3496
24,00	1440	189,00	3,30	0,11	0,0035	0,015842647	6,81	2,12	197,89	0,055	1,7289	0,3337
26,00	1560	189,00	3,50	0,12	0,0035	0,015842647	6,97	2,17	193,45	0,054	1,6571	0,3187
28,00	1680	189,00	3,60	0,14	0,0035	0,015842647	7,05	2,19	191,22	0,053	1,6344	0,3115
30,00	1800	189,00	3,60	0,14	0,0035	0,015842647	7,05	2,19	191,22	0,053	1,6344	0,3115
32,00	1920	189,00	3,90	0,15	0,0035	0,015842647	7,28	2,26	184,55	0,051	1,5311	0,2910
34,00	2040	189,00	4,10	0,16	0,0035	0,015842647	7,43	2,31	180,11	0,050	1,4687	0,2783
36,00	2160	189,00	4,40	0,16	0,0035	0,015842647	7,65	2,38	173,44	0,048	1,3706	0,2603

38,00	2280	190,00	4,40	0,16	0,0035	0,015926471	7,65	2,38	174,35	0,048	1,3706	0,2603
40,00	2400	190,00	4,60	0,16	0,0035	0,015926471	7,79	2,42	169,88	0,047	1,3092	0,2489
42,00	2520	190,00	4,60	0,16	0,0035	0,015926471	7,79	2,42	169,88	0,047	1,3092	0,2489
44,00	2640	190,00	4,60	0,15	0,0035	0,015926471	7,79	2,42	169,88	0,047	1,3034	0,2489
46,00	2760	190,00	4,70	0,15	0,0035	0,015926471	7,86	2,45	167,65	0,047	1,2739	0,2434
48,00	2880	191,00	4,80	0,14	0,0036	0,016010294	7,93	2,47	166,28	0,046	1,2397	0,2380
50,00	3000	191,00	4,80	0,14	0,0036	0,016010294	7,93	2,47	166,28	0,046	1,2397	0,2380
52,00	3120	191,00	4,90	0,13	0,0036	0,016010294	8,00	2,49	164,04	0,046	1,2065	0,2328
54,00	3240	191,00	5,00	0,13	0,0036	0,016010294	8,07	2,51	161,79	0,045	1,1793	0,2276
56,00	3360	191,00	4,80	0,12	0,0036	0,016010294	7,93	2,47	166,28	0,046	1,2291	0,2380
58,00	3480	191,00	4,80	0,12	0,0036	0,016010294	7,93	2,47	166,28	0,046	1,2291	0,2380
60,00	3600	191,00	5,00	0,12	0,0036	0,016010294	8,07	2,51	161,79	0,045	1,1743	0,2276
62,00	3720	191,00	5,00	0,12	0,0036	0,016010294	8,07	2,51	161,79	0,045	1,1743	0,2276
64,00	3840	191,00	4,80	0,11	0,0036	0,016010294	7,93	2,47	166,28	0,046	1,2239	0,2380
66,00	3960	191,00	4,80	0,11	0,0036	0,016010294	7,93	2,47	166,28	0,046	1,2239	0,2380

Data:21/12/ 05

pH =7,4

corante = Orange II

$C[\text{col}] = 1 \cdot 10^{-4}$ mol/L

vazão de gás = 158 L/h

Volume = 8,5 L

$C[\text{NaCl}] = 40\text{g/L} + \text{t-but}$

$m = 0,311$

$[\text{O}_3]\text{Ge}$

(mg/L)= 12,7

$U_G = G \cdot H/V$ $H = 0,57$

Tempo(min)	Tempo(s)	G (L/h)	$[\text{O}_3]_{\text{Gs}}$ (mg/L)	$[\text{O}_3]_{\text{L}}$ (mg/L)	U_G (m/s)	kLa (s-1)	$\text{O}_{3\text{G}}$	$[\text{O}_3]_{\text{L}}$	$N[\text{O}_3]_{\text{Gs}}$	$N[\text{O}_3]_{\text{Gs}}$	E_{Global}	E_{Integral}
0,00	0											
1,00	60	158,00	3,70	0,01	0,0029	0,013244118	7,30	2,27	167,29	0,046	1,5528	1,5460
1,50	90	159,00	3,70	0,01	0,0029618	0,013327941	7,30	2,27	168,35	0,047	1,5528	1,5460
2,00	120	160,00	3,70	0,01	0,0029804	0,013411765	7,30	2,27	169,41	0,047	1,5528	1,5460
2,50	150	160,00	3,70	0,01	0,0029804	0,013411765	7,30	2,27	169,41	0,047	1,5528	1,5460
3,00	180	161,00	3,80	0,01	0,0029990	0,013495588	7,38	2,29	168,58	0,047	1,5192	1,5126
3,50	210	162,00	3,80	0,01	0,0030176	0,013579412	7,38	2,29	169,62	0,047	1,5192	1,5126
4,00	240	162,00	3,90	0,01	0,0030176	0,013579412	7,45	2,32	167,72	0,047	1,4864	1,4800
4,50	270	163,00	3,90	0,01	0,0030363	0,013663235	7,45	2,32	168,75	0,047	1,4864	1,4800
5,00	300	163,00	3,70	0,01	0,0030363	0,013663235	7,30	2,27	172,59	0,048	1,5528	1,5460
5,50	330	164,00	3,70	0,01	0,0030549	0,013747059	7,30	2,27	173,65	0,048	1,5528	1,5460
6,00	360	164,00	3,70	0,01	0,0030549	0,013747059	7,30	2,27	173,65	0,048	1,5528	1,5460
6,50	390	164,00	3,80	0,01	0,0030549	0,013747059	7,38	2,29	171,72	0,048	1,5192	1,5126
7,00	420	165,00	3,80	0,01	0,0030735	0,013830882	7,38	2,29	172,76	0,048	1,5192	1,5126
7,50	450	165,00	3,80	0,01	0,0030735	0,013830882	7,38	2,29	172,76	0,048	1,5192	1,5126
8,00	480	165,00	3,80	0,01	0,0030735	0,013830882	7,38	2,29	172,76	0,048	1,5192	1,5126
8,50	510	166,00	3,70	0,01	0,0030922	0,013914706	7,30	2,27	175,76	0,049	1,5528	1,5460
9,00	540	167,00	3,70	0,01	0,0031108	0,013998529	7,30	2,27	176,82	0,049	1,5528	1,5460
10,00	600	168,00	3,80	0,01	0,0031294	0,014082353	7,38	2,29	175,91	0,049	1,5192	1,5126
11,00	660	168,00	3,80	0,01	0,0031294	0,014082353	7,38	2,29	175,91	0,049	1,5192	1,5126
12,00	720	168,00	3,80	0,01	0,0031294	0,014082353	7,38	2,29	175,91	0,049	1,5192	1,5126
13,00	780	168,00	3,90	0,01	0,0031294	0,014082353	7,45	2,32	173,93	0,048	1,4864	1,4800

14,00	840	169,00	4,00	0,01	0,0031480	0,014166176	7,53	2,34	172,98	0,048	1,4545	1,4483
15,00	900	169,00	4,10	0,01	0,0031480	0,014166176	7,61	2,37	170,99	0,047	1,4233	1,4173
16,00	960	169,00	3,80	0,01	0,0031480	0,014166176	7,38	2,29	176,95	0,049	1,5192	1,5126
17,00	1020	169,00	3,90	0,01	0,0031480	0,014166176	7,45	2,32	174,96	0,049	1,4864	1,4800
18,00	1080	170,00	3,70	0,01	0,0031667	0,01425	7,30	2,27	180,00	0,050	1,5528	1,5460
19,00	1140	170,00	3,70	0,01	0,0031667	0,01425	7,30	2,27	180,00	0,050	1,5528	1,5460
20,00	1200	171,00	3,80	0,01	0,0031853	0,014333824	7,38	2,29	179,05	0,050	1,5192	1,5126
22,00	1320	171,00	3,90	0,01	0,0031853	0,014333824	7,45	2,32	177,04	0,049	1,4864	1,4800
24,00	1440	171,00	4,10	0,01	0,0031853	0,014333824	7,61	2,37	173,01	0,048	1,4233	1,4173
26,00	1560	172,00	4,30	0,01	0,0032039	0,014417647	7,76	2,41	169,98	0,047	1,3633	1,3576
28,00	1680	172,00	4,20	0,01	0,0032039	0,014417647	7,68	2,39	172,00	0,048	1,3929	1,3871
30,00	1800	172,00	4,40	0,01	0,0032039	0,014417647	7,83	2,44	167,95	0,047	1,3343	1,3288
32,00	1920	173,00	4,30	0,01	0,0032225	0,014501471	7,76	2,41	170,96	0,047	1,3633	1,3576
34,00	2040	173,00	4,40	0,01	0,0032225	0,014501471	7,83	2,44	168,93	0,047	1,3343	1,3288
36,00	2160	173,00	4,40	0,01	0,0032225	0,014501471	7,83	2,44	168,93	0,047	1,3343	1,3288
38,00	2280	173,00	4,40	0,01	0,0032225	0,014501471	7,83	2,44	168,93	0,047	1,3343	1,3288
40,00	2400	173,00	4,40	0,01	0,0032225	0,014501471	7,83	2,44	168,93	0,047	1,3343	1,3288
42,00	2520	174,00	4,60	0,01	0,0032412	0,014585294	7,98	2,48	165,81	0,046	1,2782	1,2731
44,00	2640	174,00	4,50	0,01	0,0032412	0,014585294	7,90	2,46	167,86	0,047	1,3059	1,3006
46,00	2760	174,00	4,50	0,01	0,0032412	0,014585294	7,90	2,46	167,86	0,047	1,3059	1,3006
48,00	2880	174,00	4,50	0,01	0,0032412	0,014585294	7,90	2,46	167,86	0,047	1,3059	1,3006
50,00	3000	174,00	4,50	0,01	0,0032412	0,014585294	7,90	2,46	167,86	0,047	1,3059	1,3006
52,00	3120	174,00	4,70	0,01	0,0032412	0,014585294	8,05	2,50	163,76	0,045	1,2511	1,2461
54,00	3240	174,00	4,70	0,02	0,0032412	0,014585294	8,05	2,50	163,76	0,045	1,2561	1,2461
56,00	3360	174,00	4,70	0,03	0,0032412	0,014585294	8,05	2,50	163,76	0,045	1,2612	1,2461
58,00	3480	174,00	4,70	0,05	0,0032412	0,014585294	8,05	2,50	163,76	0,045	1,2715	1,2461
60,00	3600	174,00	4,80	0,09	0,0032412	0,014585294	8,12	2,53	161,72	0,045	1,2648	1,2197
62,00	3720	174,00	5,00	0,13	0,0032412	0,014585294	8,26	2,57	157,62	0,044	1,2308	1,1685
64,00	3840	174,00	5,30	0,21	0,0032412	0,014585294	8,47	2,63	151,48	0,042	1,1904	1,0955
66,00	3960	174,00	5,50	0,33	0,0032412	0,014585294	8,60	2,68	147,39	0,041	1,1966	1,0491
68,00	4080	174,00	5,70	0,43	0,0032412	0,014585294	8,74	2,72	143,29	0,040	1,1931	1,0043
70,00	4200	174,00	5,90	0,50	0,0032412	0,014585294	8,87	2,76	139,20	0,039	1,1738	0,9611
72,00	4320	174,00	6,10	0,53	0,0032412	0,014585294	9,00	2,80	135,11	0,038	1,1340	0,9193
74,00	4440	174,00	6,20	0,52	0,0032412	0,014585294	9,06	2,82	133,06	0,037	1,1022	0,8989
76,00	4560	174,00	6,20	0,49	0,0032412	0,014585294	9,06	2,82	133,06	0,037	1,0880	0,8989
78,00	4680	174,00	6,30	0,45	0,0032412	0,014585294	9,13	2,84	131,01	0,036	1,0444	0,8788
80,00	4800	174,00	6,50	0,41	0,0032412	0,014585294	9,26	2,88	126,92	0,035	0,9791	0,8396