unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Pós-Graduação em Engenharia Civil

DO



COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE OXIGÊNIO EM REATORES AERÓBIOS DE TUBOS CONCÊNTRICOS E LEITO FLUIDIZADO

Tibério Navarrete Hernandes

Ilha Solteira - SP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE OXIGÊNIO EM REATORES AERÓBIOS DE TUBOS CONCÊNTRICOS E LEITO FLUIDIZADO

Tibério Navarrete Hernandes

1210001283

Dissertação apresentada à FEIS - UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil - Ênfase em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais.

Orientador: **Prof. Dr. Milton Dall'Aglio Sobrinho**

Proc. 071/2002-NAD 043

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"
SERVIÇO TÉC. DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO

DATA DE CRE...	DATA DE TOMBO
06.05.02	30.05.02
REGISTRO	TOMBO
Oferta	Te. 1283
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
Doação Autor R$ 10,00	#557e

30701007
ANS 215372
ANS 56135

Ilha Solteira - SP
Janeiro de 2002

"Coeficiente de Transferência de Oxigênio em Reatores Aeróbios de Tubos Concêntricos e Leito Fluidizado"

Tibério Navarrete Hernandes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA – CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Milton Dall' Aglio Sobrinho – orientador/FEIS/UNESP

Prof. Dr. Edmilson Costa Teixeira – CT/UFES

Prof. Dr. Tsunao Matsumoto – FEIS/UNESP

Ilha Solteira/SP, janeiro de 2002

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo carinho e paciência.

Ao orientador Prof. Dr. Milton Dall'Aglio Sobrinho, por toda orientação dada neste trabalho e também pela confiança depositada na minha capacidade de realizá-lo.

À equipe de reatores aeróbios de leito fluidizado, Daniel Henrique Egas Milanese e Humberto Carlos Ruggeri Júnior, por toda ajuda dada na parte experimental desta dissertação e também demais colegas da pós-graduação por todo apoio incentivo.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil, pela ajuda dada na montagem e manutenção do experimento.

À comissão examinadora que bem aceitou contribuir na discussão e certamente no enriquecimento deste trabalho.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil.

RESUMO

O tratamento aeróbio utilizando leitos fluidizados por jatos de ar permite obter reatores eficientes e compactos, o que possibilitará tratar esgotos sanitários de forma distribuída, mais próxima aos pontos de geração, viabilizando a implantação do tratamento em situações em que as áreas disponíveis são escassas ou de custo elevado, compensando os maiores custos de operação inerentes a esse tipo de tratamento.

Os reatores contêm um meio trifásico, constituído de esgoto (fase líquida), ar (fase gasosa) e meio suporte (fase sólida). A injeção de ar induz a circulação do meio e controla a espessura do biofilme, além de proporcionar íntimo contato entre as fases, permitindo alta concentração de microorganismos aderidos ao meio suporte, resultando em alta eficiência.

O conhecimento dos coeficientes de transferência de oxigênio, Kla, é importante para a otimização do consumo de energia. O Kla está vinculado a área da interface ar-água e também ao tempo de contato entre as fases. Esses parâmetros, por sua vez, dependem de variáveis da hidrodinâmica do reator, cujos dados ainda são relativamente escassos, sendo a maioria obtida em modelos de pequena altura e em meios bifásicos, não existindo uma modelagem matemática confiável para prever seu valor na fase de projeto.

Em vista deste contexto, conduziu-se uma investigação experimental sobre o Kla em reatores aeróbios de leito fluidizado com circulação em tubos concêntricos e sua relação com as vazões de ar injetado e concentração de sólidos. Utilizou-se um reator com 6m de altura, diâmetro interno de 0,10m e externo de 0,20m. O Kla foi determinado pelo método não estacionário recomendado pela ASCE (1990), utilizando-se meio bifásico (água limpa e ar) e meio trifásico (água, ar e areia) com concentrações de areia de 50g/l, 100g/l e 150g/l.

Foram obtidas também variáveis que permitem caracterizar o funcionamento hidrodinâmico do leito. As frações volumétricas de ar foram determinadas ao longo do tubo interno e externo por meio de método manométrico. A velocidade de circulação do meio líquido e os tempos de



circulação e de mistura foram determinados com auxílio de um sistema de aquisição de dados de condutividade elétrica, usando NaCl como traçador.

O Kla mostrou uma relação acentuadamente linear com a vazão de ar nas condições ensaiadas. Os valores médios de Kla obtidos após 7 repetições em água limpa, situaram-se entre 0,0053s^{-1} e 0,017s^{-1}, para vazões de ar entre 800l/h e 2500l/h, respectivamente. O método adotado para determinação do Kla apresentou uma dispersão alta de resultados, com desvio padrão situando-se entre 9,7% e 18,3% do valor médio para cada vazão de ar.

A variação do Kla devido à presença de areia em concentrações de 50g/l a 150g/l não foi muito acentuada, com as diferentes curvas situando-se dentro da faixa de variabilidade dos resultados da água limpa. Portanto, do ponto de vista prático, não se justifica a realização de ensaios de Kla com a adição de areia em protótipos, em vista da maior dificuldade de realização e da pouca informação agregada, sendo preferível usar apenas água e ar, num ensaio de execução muito mais fácil e de resultados equivalentes.

PALAVRAS CHAVE

Coeficiente Kla, reatores, leito fluidizado, aeróbio, tratamento de esgoto.

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO 1
2- OBJETIVOS 4
3- REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA 5
3.1- Transferência de massa em reatores 5
3.1.1- Fundamentos 5
3.1.2- Sistemas de aeração 6
3.1.3- Transporte de massa em misturas binárias 7
3.2- Cinética da aeração 15
3.3- Determinação da capacidade de oxigenação 17
3.3.1- Método estacionário e não estacionário 18
3.3.2- Cálculo do consumo de ar necessário 20
3.4- Dados de Kla encontrados na literatura 23
4- MATERIAIS E MÉTODOS 34
4.1- Bancada experimental 34
4.2- Modelo do reator 35
4.3- Seqüência de ensaios 36
4.4- Determinação do coeficiente de aeração Kla 37
4.4.1- Metodologia de cálculo do Kla 38
4.5- Caracterização hidrodinâmica 41
4.5.1- Velocidade de circulação e tempo de mistura 42
4.5.2- Determinação da expansão do leito 44
5- RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO 46
5.1- Dados de Kla do modelo operando com água limpa 46
5.2- Dados de Kla do modelo operando com meio trifásico 50
5.3- Repetibilidade dos resultados de Kla 54
5.4- Efeito dos diâmetros do reator sobre o Kla 58
5.5- Confiabilidade do ensaio de Kla e do equipamento utilizado 62
5.6- Caracterização da hidrodinâmica do reator 64
5.7- Considerações finais 70
6- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 73
7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 77

ANEXOS

Anexo1: Dados brutos dos ensaios com areia 81
Anexo2: Dados brutos dos ensaios com água limpa 90
Anexo3: Gráficos com as regressões efetuadas 99

unesp

LISTA DE SÍMBOLOS

a	área interfacial por unidade de volume, m^2/m^3
C_{areia}	concentração de areia no reator, g/m^3
C	concentração de oxigênio em um tempo t qualquer, g/m^3
$\overline{C}$	concentração de oxigênio predominante no compartimento, g/m^3
CNTP	condições normais de temperatura e pressão
C_∞	valor máximo possível de C, g/m^3
C_S	concentração de saturação de oxigênio, g/m^3
C_0	concentração de oxigênio no tempo t =0, g/m^3
DQO	demanda química de oxigênio removida pelo tratamento, g/m^3
e	expansão do leito, cm
G	fluxo de massa de oxigênio fornecido pelo ar, kg/h
G / L / S	gás + liquido + sólido
$\tilde{G}$	fluxo de massa molar, kgmol/h
h	leitura do piezômetro, cm
H	distância entre a tomada de pressão e a superfície do reator, cm
H_A	constante da lei de Henry do constituinte A, determinada experimentalmente, N/m^2
$\tilde{I}_A$	fluxo do constituinte A com respeito a $\tilde{u}$, $kgmol/hm^2$
J_A	fluxo do constituinte A com respeito a u, kg/hm^2
J_B	fluxo do constituinte B com respeito a u, kg/hm^2
Kla	coeficiente global de transferência de oxigênio, s^{-1}
Kla_D	coeficiente global de transferência de oxigênio no tubo externo, s^{-1}
Kla_R	coeficiente global de transferência de oxigênio no tubo interno, s^{-1}
$K_{\tilde{x}}$	coeficiente global de transferência de massa aplicável à fase líquida, $kgmol/hm^2$
$K_{\tilde{y}}$	coeficiente global de transferência de massa aplicável à fase gasosa, $kgmol/hm^2$
k	razão entre os calores específicos à pressão e volume constantes
$k_{\tilde{x}}$	coeficiente local de transferência de massa aplicável à fase líquida, $kgmol/hm^2$
$k_{\tilde{y}}$	coeficiente local de transferência de massa aplicável à fase gasosa, $kgmol/hm^2$
k_ρ	coeficiente local de transporte convectivo, m/s

L / S	líquido + sólido
L	altura da coluna de bolhas, cm
m	constante em relação ao equilíbrio, m^2/N
M_A	peso molecular do constituinte A, kg/kgmol
M_B	peso molecular do constituinte B, kg/kgmol
N_A	fluxo do constituinte A com respeito aos eixos fixos, kg/hm^2
$\tilde{N}_A$	fluxo molar do constituinte A relativo a eixos fixos, $kgmol/hm^2$
OD	oxigênio dissolvido, g/m^3
p	pressão total, N/m^2
$\overline{p}_A$	pressão parcial do constituinte A, N/m^2
P_{atm}	pressão atmosférica, N/m^2
P_G	pressão do ar comprimido, N/m^2
Q	vazão de esgoto afluente, m^3/s
Q_G	vazão de ar na CNTP, m^3/min
r	taxa de consumo de oxigênio, g/m^3s
S	sólido
TTO_R	taxa necessária para oxidar a matéria orgânica no reator, g/s
TTO	taxa de transferência de oxigênio, g/s
t	tempo, s
t_1, t_2, t_3 e t_4	intervalos de tempo, s
u	velocidade média, m/s
$\tilde{u}$	velocidade molecular média, m/s
V_T	volume total do reator, m^3
V_R	volume no tubo interno do reator , m^3
V_D	volume no tubo externo do reator, m^3
x_A	fração mássica do constituinte A, kg/kg
$\tilde{x}_A$	fração molar do constituinte A, kgmol/kgmol
$\tilde{x}_{As}$	fração molar do soluto na interface da solução líquida, kgmol/kgmol
$\tilde{x}_A^*$	fração molar do soluto no líquido, em equilíbrio com o gás de composição $\tilde{y}_A$, kgmol/kgmol
W_G	potência consumida no processo de fornecimento do ar comprimido, Watts
$\tilde{y}_A$	fração molar do soluto na fase gasosa no bordo da camada limite, kgmol/kgmol
$\tilde{y}_{As}$	fração molar do soluto na fase gasosa, junto à interface, kgmol/kgmol



$\tilde{y}_A^*$	fração molar do soluto no gás, em equilíbrio com o líquido de composição $\tilde{x}_A$, kgmol/kgmol
ρ	massa específica, kg/m^3
$\tilde{\rho}$	concentração molar média, kgmol/m^3
ρ_A	concentração do constituinte A, kg/m^3
ρ_B	concentração do constituinte B, kg/m^3
ρ_{As}	concentração do constituinte A na superfície, kg/m^3
ρ_{Am}	concentração do constituinte A no meio fluido, kg/m^3
$\rho_{S,G}$	fração em massa de oxigênio no ar
γ	peso específico do ar na CNTP, 1,209 Kg/m^3
η	expansão relativa ao tamanho total da coluna aerada, cm/cm
$\eta_{\%}$	eficiência do processo de injeção de ar
z	cotas, m

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Esquema de um reator de leito fluidizado e tubos concêntricos adaptado de Heijnen et al. (1990). 2

Figura 3.1: Progressão da concentração de OD durante a aeração sem consumo de OD adaptado de Von Sperling (1996a). 19

Figura 3.2: Progressão da concentração de OD durante a aeração com consumo de OD adaptado de Von Sperling (1996a). 20

Figura 3.3: Gráfico com os resultados de Kla dos trabalhos citados na tabela 3.1 (Fonte: Bello et al., 1985). 23

Figura 3.4: Kla em função da potência injetada pelo ar por volume unitário. Dados obtidos por Bello et al. (1985), em modelos de circulação externa. 24

Figura 3.5: Kla em função da potência injetada pelo ar por volume unitário. Dados obtidos por Bello et al. (1985), em modelos de tubos concêntricos. 25

Figura 3.6: Kla em função da velocidade de circulação do líquido para diversas vazões de ar. Dados obtidos por Bello et al. (1985). 26

Figura 3.7: Kla em função da velocidade superficial do ar, obtido por Heijen et al. (1990). 27

Figura 3.8: Kla em função da velocidade superficial do ar e da pressão, obtido por Letzel e Stankiewicz (1999). 27

Figura 3.9: Kla em função da fração volumétrica do gás, obtido por Letzel e Stankiewicz (1999). 28

Figura 3.10: Dados de ln((CS -C)/(CS -C0)) em função do tempo e a reta ajustada para o reator de 12 m e vazão de ar de 400 l/h. (Fonte Gebara et al., 1999a). 29

Figura 3.11: Dados de ln((CS -C)/(CS -C0)) em função do tempo e a reta ajustada para o reator de 12m e vazão de ar de 600l/h.(Fonte Gebara et al., 1999a). 30

Figura 3.12: Coeficientes de transferência de O2, Kla, para o reator de 12m de altura, obtidos por Gebara et al. (1999a). 30

Figura 3.13: Coeficiente global de transferência de oxigênio (Kla) obtido por Gebara et al. (2001a), em reatores de 6m e 12m, com dois tipos de injetores. 31

Figura 3.14: Coeficiente de transferência de oxigênio em função da vazão de ar e da concentração de meio suporte, obtido por Dall'Aglio Sobrinho et al. (2001a). 32

Figura 4.1: Esquema da bancada experimental. 34

Figura 4.2: Exemplo da etapa de análise da seqüência de dados e seleção dos pontos para o ajuste com dados brutos de um ensaio. 39

Figura 4.3: Exemplo da fase de estimativa inicial dos parâmetros de ajuste por meio visual. 40

Figura 4.4: Exemplo da tela após a execução da fase final do programa. 41

Figura 4.5: Esquema da sonda para medição de condutividade elétrica com suas dimensões. (Fonte: Guardia Filho, 2001). 42

Figura 4.6: Diagrama de blocos do circuito condicionador de sinal implementado no condutivímetro. (Fonte: Guardia Filho, 2001). 43

Figura 4.7: Comportamento qualitativo das leituras do ensaio com traçadores. 44

Figura 4.8: Esquema para cálculo da retenção de gás (Fonte: Dall'Aglio Sobrinho et al., 2000). 45

Figura 5.1: Oxigênio dissolvido em função do tempo para vazão de ar de 2500l/h e curva ajustada. Exemplo de ensaio com dados de boa qualidade. 47

Figura 5.2: Oxigênio dissolvido em função do tempo para vazão de ar de 1100l/h e curva ajustada. Exemplo de ensaio com alterações nos dados, mas permitindo ajuste aceitável. 47

Figura 5.3: Oxigênio dissolvido em função do tempo para vazão de ar de 1500l/h. Exemplo de ensaio com dados anômalos, impossibilitando o ajuste. 48

Figura 5.4: Coeficiente de transferência de oxigênio em função da vazão de ar, para água limpa e duas condições de saída do tubo interno: livre e submersa. 49

Figura 5.5: Efeito da configuração de saída livre e submersa do tubo indutor sobre o Kla em reator com 50g/l de meio suporte. 50

Figura 5.6: Variação do coeficiente de transferência de oxigênio em função da vazão de ar e da saída do tubo indutor em concentração de 100g/l de meio suporte. 51

Figura 5.7: Coeficiente de transferência de oxigênio em função da vazão de ar e da concentração de areia, para saída submersa. 53

Figura 5.8: Variação do coeficiente de transferência de oxigênio em função da vazão de ar. 54

Figura 5.9: Kla médio para água limpa em função da vazão, com barras de erro de +/-1 desvio padrão. 55

Figura 5.10: Kla médio para água limpa em função da vazão, dados originais (média A) e excluindo-se o pior resultado de cada vazão (média B). Barras de erro de +/-1 desvio padrão. 57

Figura 5.11: Variação do coeficiente de transferência de oxigênio em função da vazão de ar. 58

Figura 5.12: Resultados de Kla em função da velocidade superficial de ar obtidos no reator piloto com várias concentrações de areia e com água limpa no modelo. 60

Figura 5.13: Resultados de Kla_R em função da velocidade superficial de ar obtidos no reator piloto com várias concentrações de areia e com água limpa no modelo. 62

Figura 5.14: Kla obtido nos ensaios auxiliares realizados no tanque circular. 63

Figura 5.15: Fração volumétrica total em função da vazão de ar para cota z=1m. 65

Figura 5.16: Gráfico de uma curva típica do ensaio realizado com as sondas de condutividade elétrica para medir velocidades. Ensaio com vazão de 800l/h. 66

Figura 5.17: Gráfico com quatros picos de passagem para o calculo do tempo de mistura e do tempo de circulação para vazão de 2500l/h. 66

Figura 5.18: Gráfico com o ensaio do traçador e com as retas delimitadoras na faixa de 5% para a vazão de 800l/h. 67

Figura 5.19: Gráfico ampliado para determinar o instante em que a concentração passa a variar dentro da faixa de +/-5% da concentração final para vazão de 800l/h. 67

Figura 5.20: Gráfico da velocidade de circulação em função da vazão de ar. 68

Figura 5.21: Gráfico do tempo de circulação em função da vazão de ar. 69

Figura 5.22: Gráfico do tempo de mistura em função da vazão de ar. 69

Figura 5.23: Exemplo de curva provocada por mistura insuficiente do sulfito. Dados para 6000l/h de ar e 100g/l de areia no reator de 12m (Fonte: Gebara, 1999b). 70

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Dados de trabalhos com reatores de tubos concêntricos (Fonte: Bello et al, 1985). 24

Tabela 5.1: Valores de Kla em água limpa em função da vazão para as 7 repetições do ensaio. 55

Tabela 5.2: Avaliação qualitativa dos ensaios discriminando a vazão. 56

Tabela 5.3: Valores de Kla em água limpa em função da vazão, excluindo-se o pior ajuste. 57

Tabela 5.4: Kla obtido no reator piloto de 6m de altura (Fonte: Gebara, 1999b) 59

Tabela 5.5: Valores de Kla calculados no tanque circular. 63

Tabela 5.6: Resumo das leituras piezométricas efetuadas em função da vazão. 64

Tabela 5.7: Resumo das velocidades de circulação e tempos de circulação e mistura. 68

1- INTRODUÇÃO

A utilização de reatores aeróbios com leitos fluidizados por jatos de ar, como o BAS (Biological Air-lift Suspension), proposto por Heijnen et al. (1990), constitui-se numa tecnologia recente que permite tratar um grande volume de esgoto em reatores compactos de grande altura.

O desenvolvimento da tecnologia de reatores aeróbios de leito fluidizado possibilitará tratar esgotos sanitários de forma distribuída, mais próxima aos pontos de geração, viabilizando a implantação de tratamento em situações em que as áreas disponíveis são escassas ou de custo elevado, compensando os maiores custos de operação inerentes a esse tipo de tratamento.

Os reatores de leito fluidizado utilizam um leito trifásico, constituído de esgoto (fase líquida), ar (fase gasosa) e meio suporte (fase sólida). A agitação do leito provocada pela injeção de ar proporciona íntimo contato entre as fases envolvidas permitindo a manutenção de uma alta concentração de microorganismos aderidos ao meio suporte, responsáveis pela remoção dos nutrientes, resultando em alta eficiência.

A figura 1.1. apresenta um esquema do funcionamento dos reatores de leito fluidizado. Constituídos na maioria dos casos de tubos concêntricos, também chamados de *internal-loop* ou podem ser confeccionados em tubos paralelos, formando assim os reatores com circulação externa ou *external-loop*.

unesp

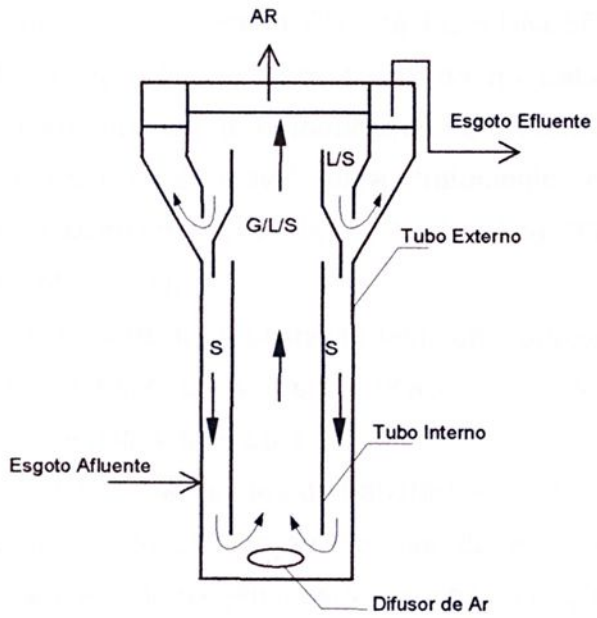


Figura 1.1: Esquema de um reator de leito fluidizado e tubos concêntricos adaptado de Heijnen et al. (1990).

A força motriz geradora da circulação é ocasionada pela diferença de densidades existente entre os dois tubos concêntricos. Esta diferença de densidades surge devido a aspersão de gás no tubo interno do reator ficando o fluido com uma densidade menor quando comparado ao fluido do tubo externo, promovendo desta forma, a circulação de suas fases (líquida, sólida, gasosa), tendo fluxo ascendente no tubo interno (região central entre os dois tubos) e fluxo descendente no tubo externo (região anular entre os dois tubos).

Com o aumento da velocidade de circulação as bolhas de ar começam a ser arrastadas para o tubo externo, aumentando seu conteúdo de ar, podendo chegar a uma situação em que o ar recircula pelo tubo interno. Vários autores tem observado a ocorrência desse efeito, definindo diferentes regimes de circulação de gás, Siegel et. al (1986, apud van Benthum, 1999b), Heijnen (1997), Dall'Aglio Sobrinho et al. (2001b), os quais influem na transferência de massa e são influenciados pela geometria da zona de separação gás-líquido e pela velocidade do líquido no tubo externo.

Devido às características positivas proporcionadas pelo tratamento com leitos fluidizados, grande número de trabalhos experimentais tem sido apresentados, como por exemplo Heijnen (1990), relatando a aplicação da técnica para pós tratamento de efluentes de tratamento anaeróbio.

unesp

O Departamento de Engenharia Civil da FEIS-UNESP vem estudando a aplicação de reatores aeróbios de leito fluidizado no tratamento de esgotos domésticos submetidos apenas a gradeamento. Os resultados da operação mostraram que a técnica é viável para tratamento nessas condições, apresentando uma remoção em termos de DQO solúvel de 87% e DBO solúvel de 92% (Dall'Aglio Sobrinho, 2000).

Com base nesse contexto, a pesquisa tem como problema a transferência de oxigênio ao meio líquido e os efeitos ocasionados pela geometria, pela concentração de areia e pela vazão de ar.

O conhecimento dos coeficientes de transferência de oxigênio é importante para balizar os esforços de otimização do uso da energia nos reatores. O coeficiente de transferência de oxigênio está vinculado à fração volumétrica do ar contido nos reatores e ao tamanho médio das bolhas, que condicionam a área da interface ar-água por onde se efetuam as trocas e também ao tempo de contato entre as fases. Esses parâmetros, por sua vez, dependem de variáveis da hidrodinâmica do reator, como as vazões de circulação de líquido e de ar e do regime de circulação de bolhas resultante, bem como da concentração de meio suporte.

Conforme se pode verificar com a revisão da bibliografia apresentada no item 3.4, os dados da literatura sobre a transferência de massa são relativamente escassos, sendo a maioria obtida em modelos de pequena altura e em meios bifásicos, não existindo uma modelagem matemática confiável para prever seu valor na fase de projeto. Com isso surge a necessidade de se obter dados com reatores de alturas comparáveis às utilizadas na prática, para evitar efeitos de escala ainda não completamente equacionados.

Por outro lado, as dificuldades operacionais vinculadas à realização dos ensaios para determinação do coeficiente de transferência de oxigênio em meios trifásicos (Dall'Aglio Sobrinho et al., 2001a) demonstram a necessidade de se investigar a influência da concentração do meio suporte sobre os resultados, com o objetivo de facilitar os ensaios futuros de caracterização dos reatores quanto à transferência de oxigênio.



2- OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é a determinação de coeficientes de transferência de oxigênio em reatores aeróbios com leito fluidizado em circulação, investigando o efeito das vazões de ar e concentrações de meio suporte. Especificamente podem ser listados os seguintes objetivos:

1 - determinar o coeficiente de aeração, Kla, num modelo de reator aeróbio com circulação e identificar os limites de erro esperados;

2 - verificar a influência da vazão de ar sobre o coeficiente de aeração;

3 - quantificar o efeito causado pelo aumento do meio suporte em concentrações de 50g/l a 150g/l;

4 - verificar o efeito da variação dos diâmetros do reator sobre o coeficiente de aeração;

5 - identificar o efeito da geometria da saída superior do reator (livre ou pressurizada) sobre o coeficiente de aeração.

unesp

3- REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

3.1- Transferência de massa em reatores

3.1.1- Fundamentos

Embora reatores com a configuração de leito fluidizado com circulação sejam utilizados em várias unidades de contato na engenharia química, com meios bifásicos e trifásicos, o interesse deste trabalho volta-se para o tratamento biológico de esgotos, em que a massa a ser transferida entre as fases é o oxigênio necessário à oxidação da matéria orgânica.

O papel do oxigênio no tratamento e sua importância para os organismos aeróbios é amplamente conhecido, citando-se aqui, por exemplo, um livro texto bastante acessível sobre tratamento de águas residuárias (Von Sperling, 1996b).

Todos os organismos aeróbios dependem do oxigênio para seus processos metabólicos. O oxigênio é um gás muito pouco solúvel em água, variando sua solubilidade entre 14,6mg/l a 0°C até 7,6mg/l a 30°C, dependendo da pressão e sais dissolvidos (Porto et al., 1991). Ao nível do mar, na temperatura de 20°C, a concentração de saturação é igual a 9,2mg/l (Von Sperling, 1996b).

O oxigênio do meio líquido é fornecido pela dissolução do oxigênio atmosférico e também pela ação dos organismos fotossintéticos presentes na água, podendo ainda ser introduzido artificialmente por diversos processos de aeração. Já durante a estabilização da matéria orgânica as bactérias utilizam o

unesp

oxigênio dissolvido na água, causando uma redução da sua concentração no meio e, dependendo da intensidade deste fenômeno, gerando condições anaeróbias.

Portanto, o oxigênio dissolvido é utilizado como parâmetro para controle da operação de estações de tratamento de esgotos e caracterização de corpos d'água.

Para a operação de uma ETE, segundo Von Sperling (1996b), é necessário um teor mínimo de oxigênio dissolvido de 1mg/l nos reatores de sistemas aeróbios. Em relação aos corpos d'água tem-se que valores de OD superiores à saturação são indicativos da presença de algas (fotossíntese); já valores de OD bem inferiores à saturação são indicativos de presença de matéria orgânica (provavelmente esgotos); com OD em torno de 4 e 5mg/l morrem os peixes mais exigentes; com OD igual a 2mg/l quase todos os peixes estão mortos; com OD igual a 0mg/l tem-se condições de anaerobiose, gerando maus odores.

3.1.2- Sistemas de aeração

Há duas formas principais para se produzir aeração artificial. A primeira é causando um grande turbilhonamento, expondo o líquido ao ar, na forma de gotículas, ocasionando a entrada do ar atmosférico no meio líquido (aeração mecânica). A segunda é introduzindo ar ou oxigênio no líquido (aeração por ar difuso).

O sistema de aeração por ar difuso é composto por difusores submersos no líquido, tubulações distribuidoras de ar, tubulações de transporte de ar, sopradores ou outras unidades por onde o ar passa. O ar é introduzido próximo ao fundo do tanque a ser aerado, e o oxigênio é transferido ao meio líquido à medida que as bolhas se elevam à superfície.

Os principais sistemas de aeração por ar difuso podem ser classificados segundo a porosidade do difusor, e segundo o tamanho das bolhas produzidas. O difusor poroso (disco, domo e tubo) resulta em bolhas finas e médias. O difusor não poroso (tubos perfurados ou com ranhuras) resulta em bolhas grossas.

Em geral, quanto menor o tamanho da bolha de ar, maior a área superficial disponível para transferência de gases, ou seja, maior a eficiência de oxigenação. Por essa razão, os sistemas de aeração com bolhas finas são os mais eficientes.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

A eficiência de transferência de oxigênio dos difusores porosos diminui com o uso, devido a colmatação interna e externa. A colmatação interna é devida a impurezas do ar, não retidas nos filtros. A colmatação externa é devida ao crescimento bacteriano na superfície, ou a precipitação de compostos inorgânicos.

3.1.3- Transporte de massa em misturas binárias

Lei de Fick

A relação empírica para a taxa de transporte difusivo de massa foi proposta pela primeira vez por Fick, em 1855, conforme registram Bennett e Myers (1978), nos quais está baseado o desenvolvimento a seguir apresentado. A notação deste item segue também a apresentada por Bennett e Myers, obra que se recomenda consultar para maiores detalhes.

A lei de Fick para a difusão molecular de um constituinte A em B na direção y é dado por:

$$\tilde{I}_A = -D_{AB} \cdot \tilde{\rho} \frac{d\tilde{x}_A}{dy} \qquad 3.1$$

em que:

$\tilde{I}_A$ = fluxo do constituinte A (kgmol/hm^2);

D_{AB} = difusividade para uma mistura binária de A e B (m^2/h);

$\tilde{\rho}$ = concentração molar média (kgmol/m^3);

$\tilde{x}_A$ = fração molar do constituinte A (kgmol/kgmol).

O fluxo molar $\tilde{I}_A$ é medido em relação a um referencial que se move com a velocidade molecular média da mistura $\tilde{u}$. A força motriz para a difusão é o gradiente da fração molar de A.

A forma da Lei de Fick da equação 3.1 é conveniente para utilização com gases. Para meios líquidos é utilizada a equação baseada no fluxo de massa J_A, em kg/hm^2 em relação ao centro de massa.

unesp

$$J_A = -D_{AB} \cdot \rho \frac{dx_A}{dy} \qquad 3.2$$

em que:

ρ = massa específica da mistura (kg/m^3);

x_A = fração mássica de A (kg/kg).

Para um sistema que se interdifunde, mantendo constante a massa específica, o centro de massa é estacionário. Por definição, tem-se:

$$J_A + J_B = 0 \qquad 3.3$$

As equações 3.1 e 3.2 são duas das muitas formas possíveis para a lei de Fick. Para sistemas com massa específica ρ constante, como é o caso de misturas diluídas, a equação 3.2 fica:

$$J_A = -D_{AB} \frac{d\rho_A}{dy} \qquad 3.4$$

em que ρ_A é a concentração de A em kg/m^3 e os demais termos já foram definidos na equação 3.2.

Por definição, tem-se ainda que:

$$\rho_A + \rho_B = \rho \qquad 3.5$$

$$x_A = \frac{\rho_A}{\rho} = \frac{\tilde{x}_A M_A}{\tilde{x}_A M_A + \tilde{x}_B M_B} \qquad 3.6$$

em que M_A e M_B são as massas moleculares dos constituintes A e B expressas em kg/kgmol.

Coeficientes convectivos de transporte de massa

De forma análoga ao transporte convectivo de calor, o transporte de massa pode ser tratado por uma equação da forma:

$$N_A = k_\rho (\rho_{As} - \rho_{Am}) \qquad 3.7$$

em que:

N_A = densidade de fluxo de massa A (kg/hm^2);

ρ_{As} = concentração do constituinte A no limite de uma fase (kg/m^3);

ρ_{Am} = concentração de A em algum ponto do meio (kg/m^3);

Sendo k_ρ o coeficiente local de transporte convectivo em m/s e seu valor uma função da geometria do sistema, da velocidade e propriedades do fluido.

Um sistema no qual um soluto está sendo transportado, em regime permanente, de uma fase gasosa para uma fase líquida pode ser descrito pelas equações:

$$\tilde{N}_A = k_{\tilde{y}} (\tilde{y}_A - \tilde{y}_{As}) \qquad 3.8$$

$$\tilde{N}_A = k_{\tilde{x}} (\tilde{x}_{As} - \tilde{x}_A) \qquad 3.9$$

em que:

$\tilde{N}_A$ = densidade de fluxo molar em relação a um sistema fixo de coordenadas (kgmol/hm^2);

$k_{\tilde{x}}$ = coeficiente local de transferência de massa aplicável à fase líquida (kgmol/hm^2);

$k_{\tilde{y}}$ = coeficiente local de transferência de massa aplicável à fase gasosa (kgmol/hm^2);

$\tilde{x}_A$ = fração molar do soluto no bordo da camada limite de concentração ou a fração molar média;

$\tilde{x}_{As}$ = fração molar do soluto na interface da solução líquida;

$\tilde{y}_{As}$ = fração molar do soluto na fase gasosa, junto à interface;

$\tilde{y}_A$ = fração molar do soluto na fase gasosa no bordo da camada limite ou a fração molar média.



No caso da interface de contato entre os dois gases, $\tilde{N}_A$ é o número de moles do soluto A que deixa a interface, por unidade de tempo , por unidade de área da interface. O índice $\tilde{x}$ significa o que se aplica à fase líquida e deve ser usado conjuntamente com a força motora expressa em fração molar na fase líquida; O coeficiente $k_{\tilde{y}}$ tem as mesma unidades e significado de $k_{\tilde{x}}$ mas, como mostra o índice $\tilde{y}$, deve ser usado conjuntamente com a força motora descrita pelas frações molares de fase gasosa.

Coeficientes globais de transferência de massa

Para transporte entre fases geralmente é conveniente usar um coeficiente global de transporte de massa, que pode ser definido por uma das seguintes equações:

$$\tilde{N}_A = K_{\tilde{y}}\left(\tilde{y}_A - \tilde{y}_A^*\right) \qquad 3.10$$

$$\tilde{N}_A = K_{\tilde{x}}\left(\tilde{x}_A^* - \tilde{x}_A\right) \qquad 3.11$$

As quantidades $\tilde{y}_A^*$ e $\tilde{x}_A^*$ representam concentrações de equilíbrio:

$\tilde{y}_A^*$ = fração molar do soluto no gás em equilíbrio com o líquido de composição $\tilde{x}_A$;

$\tilde{x}_A^*$ = fração molar do soluto no líquido, em equilíbrio com o gás de composição $\tilde{y}_A$.

$K_{\tilde{x}}$ = coeficiente global de transferência de massa aplicável à fase líquida (kgmol/hm^2);

$K_{\tilde{y}}$ = coeficiente global de transferência de massa aplicável à fase gasosa (kgmol/hm^2);

Portanto, $\left(\tilde{y}_A - \tilde{y}_A^*\right)$ e $\left(\tilde{x}_A^* - \tilde{x}_A\right)$ são expressões que representam a força motriz global para o transporte de massa entre as duas fases fluidas.

unesp

Relação entre os coeficientes globais e os individuais

As equações 3.8 e 3.9 podem ser reescritas como segue:

$$\tilde{y}_A - \tilde{y}_{As} = \frac{\tilde{N}_A}{k_{\tilde{y}}} \qquad 3.12$$

$$\tilde{x}_{As} - \tilde{x}_A = \frac{\tilde{N}_A}{k_{\tilde{x}}} \qquad 3.13$$

O equilíbrio entre as fases segue, por hipótese, a lei de Henry:

$$\bar{p}_A = \tilde{x}_A H_A \qquad 3.14$$

onde:

$\bar{p}_A$ = pressão parcial de um constituinte numa solução líquida;

H_A = constante determinada experimentalmente.

Dividindo-se 3.14 pela pressão total p, obtém-se:

$$\tilde{y}_A = \frac{\tilde{x}_A . H_A}{p} = m . \tilde{x}_A \qquad 3.15$$

A quantidade H_A / p é chamada de m.

Na interface tem-se as frações molares $\tilde{y}_{As}$ e $\tilde{x}_{As}$ que podem ser relacionadas, usando a equação 3.15 e colocando-se o resultado em 3.13, obtendo-se:

$$\frac{\tilde{y}_{As}}{m} - \tilde{x}_A = \frac{\tilde{N}_A}{k_{\tilde{x}}} \qquad 3.16$$

Multiplicando 3.16 por m e somando o resultado a 3.12 tem-se:

$$\tilde{y}_{As} - m\tilde{x}_A = \frac{\tilde{N}_A m}{k_{\tilde{x}}} \qquad 3.17$$



$$\tilde{y}_A - m\tilde{x}_A = \frac{\tilde{N}_A}{k_{\tilde{y}}} + \frac{\tilde{N}_A m}{k_{\tilde{x}}} = \tilde{N}_A\left(\frac{1}{k_{\tilde{y}}} + \frac{m}{k_{\tilde{x}}}\right) \qquad 3.18$$

O termo $m\tilde{x}_A$ representa a fração molar do soluto, no gás em equilíbrio com um líquido de composição $\tilde{x}_A$. Portanto, pode-se reconhecer que $m\tilde{x}_A$ é idêntico a $\tilde{y}_A^*$. Assim:

$$\tilde{y}_A - \tilde{y}_A^* = \tilde{N}_A\left(\frac{1}{k_{\tilde{y}}} + \frac{m}{k_{\tilde{x}}}\right) \qquad 3.19$$

Comparando a equação 3.19 com a definição do coeficiente global $K_{\tilde{y}}$ expressa pela equação 3.10, verifica-se que:

$$K_{\tilde{y}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{k_{\tilde{y}}} + \frac{m}{k_{\tilde{x}}}\right)} \qquad 3.20$$

Analogamente pode-se obter para $K_{\tilde{x}}$

$$K_{\tilde{x}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{k_{\tilde{x}}} + \frac{m}{k_{\tilde{y}}}\right)} \qquad 3.21$$

Mesmo que os coeficientes individuais $k_{\tilde{x}}$ e $k_{\tilde{y}}$ sejam constantes ao longo do sistema, o coeficiente global poderá variar como resultado da variação de m. A quantidade m é função da temperatura, concentração e pressão total e é constante, em geral, apenas para soluções diluídas à temperatura constante e numa coluna em que a variação de pressão é constante.

Na dedução de 3.20 e 3.21 assumiu-se m constante. Bennett e Myers (op. cit.) discutem esta questão num exemplo com auxílio de um gráfico, sugerindo-se a consulta à referência para maiores detalhes. Notam, entretanto, que essas restrições ao uso do coeficiente global tornam-se irrelevantes se ele for aproximadamente igual a um dos coeficientes individuais.

unesp

Exemplificando, se $m/k_{\tilde{x}}$ é desprezível quando comparado a $1/k_{\tilde{y}}$, diz-se que a resistência gasosa é a controladora e $K_{\tilde{y}}$ é aproximadamente igual a $k_{\tilde{y}}$. Note-se que não basta que m seja pequeno ou $k_{\tilde{x}}$ grande, mas sim que a relação entre eles deve ser pequena quando comparada com $1/k_{\tilde{y}}$.

Essas considerações valem também para o caso em que a resistência na fase líquida é a controladora do processo e então $K_{\tilde{x}} = k_{\tilde{x}}$.

Bennett e Myers (1978) ressaltam que, embora não se deva usar um coeficiente global para sistemas em que a relação $m = \tilde{y}_A / \tilde{x}_A$ não seja constante, geralmente ele é o único coeficiente encontrado nas referências.

Isto ocorre porque quase sempre é impossível, em contatores de dois fluidos, medir $\tilde{x}_{As}$ e $\tilde{y}_{As}$ experimentalmente e calcular os coeficientes individuais a partir das velocidades de transporte de massa entre fases. Normalmente, apenas $\tilde{x}_A$ e $\tilde{y}_A$ podem ser medidos, e as resistências individuais precisam ser estimadas indiretamente.

Uma justificativa citada por Bennett e Myers para o uso, em desacordo com a teoria, de coeficientes globais é a falta de precisão da maioria dos dados de transporte de massa. "Desvios padrão de 20% a 30% não são raros, de modo que erros menores, introduzidos pelo uso dos coeficientes globais podem não ser significativos. Esta falta de precisão não é motivada por falta de cuidado, mas pela dificuldade em obter dados reprodutíveis de velocidades e composição numa torre de absorção empacotada".

Fluxo global em soluções diluídas

Para se obter o fluxo de massa transportada, a densidade de fluxo $\tilde{N}_A$ deve ser multiplicada pela área através da qual ocorre o transporte. Em vários sistemas de troca a área interfacial é difícil de medir ou calcular. Nos casos em que a área interfacial não é acessível, pode-se definir a quantidade "a", área de interface por unidade de volume do reator (m^2/m^3). Com isso, a partir da equação 3.11 pode-se escrever:

unesp

$$\frac{\tilde{G}}{V_T} = K_{\tilde{x}}a(\tilde{x}_{As} - \tilde{x}_A) \qquad 3.22$$

em que:

$\tilde{G}$ = fluxo de massa molar (kgmol/h);

V_T = volume total do reator (m^3).

Na equação 3.22, $K_{\tilde{x}}a$ é expresso em kgmol/hm^3. Expressando 3.22 com a força motriz em termos de concentrações molares, lembrando que $\tilde{x}_A = \tilde{\rho}_A/\tilde{\rho}$, tem-se:

$$\frac{\tilde{G}}{V_T} = \frac{K_{\tilde{x}}a}{\tilde{\rho}}(\tilde{\rho}_{As} - \tilde{\rho}_A) \qquad 3.23$$

com a constante de $K_{\tilde{x}}a/\tilde{\rho}$ em unidades de h^{-1} ou s^{-1}, representando o coeficiente global por unidade de volume do reator.

Para o fluxo de massa G em kg/h, lembrando que $G = \tilde{G}.M_A$ e também que a concentração em massa pode ser expressa a partir da concentração molar por $\rho_A = \tilde{\rho}_A . M_A$, tem-se que:

$$\frac{G}{V_T} = \frac{\tilde{G}}{V_T}M_A = \frac{K_{\tilde{x}}a}{\tilde{\rho}}M_A\left(\frac{\rho_{As}}{M_A} - \frac{\rho_A}{M_A}\right) \qquad 3.24$$

Portanto:

$$\frac{G}{V_T} = \frac{K_{\tilde{x}}a}{\tilde{\rho}}(\rho_{As} - \rho_A) \qquad 3.25$$

A equação 3.25 está na forma normalmente encontrada na literatura sobre reatores aeróbios, apenas com mudanças na nomenclatura, para o caso da transferência de oxigênio na água. Na maioria dos trabalhos da literatura a constante $K_{\tilde{x}}a/\tilde{\rho}$ é denotada por Kla, e chamada simplesmente de coeficiente global de transferência de massa.

unesp

3.2- Cinética da aeração

Na aeração de reatores tem-se a difusão do oxigênio do ar em meio líquido (água), um caso em que a capacidade de absorção da fase líquida é muito pequena em comparação com a capacidade do gás (ar). Assim, pode-se assumir que a concentração volumétrica de oxigênio no ar seja constante ao longo da coluna de aeração. Essas considerações, assim como a hipótese de mistura perfeita na fase líquida, estão presentes na maioria dos trabalhos que buscam modelar a transferência de massa em reatores do tipo abordado neste trabalho, podendo ser citados Havelka et al. (2000) e Camarasa et al. (2001).

Com as considerações acima e caso não haja consumo de oxigênio no meio líquido em aeração (água limpa), a taxa de alteração da concentração de oxigênio dissolvido pode ser expressa na forma de uma reação de primeira ordem, pela equação 3.26.

$$\frac{dC}{dt} = Kla(C_S - C) \qquad 3.26$$

onde :

dC/dt = taxa de mudança da concentração de oxigênio ($g/m^3.s$);

C = concentração de oxigênio em um tempo t qualquer (g/m^3);

Kla = coeficiente global de transferência de oxigênio (s^{-1});

C_S = concentração de saturação de oxigênio (g/m^3).

A integração da equação 3.26 nos limites de t=0 a t=t e C=0 a C=C, resulta na equação 3.27.

$$\frac{C_S - C}{C_S - C_0} = e^{-Kla\,(t - t_0)} \qquad 3.27$$

onde:

C_0 = concentração de oxigênio no tempo t=0 (g/m^3);

t = tempo (s).

unesp

Caso haja consumo de oxigênio no meio líquido em aeração (esgoto), o maior valor que pode ser atingido pela concentração de oxigênio C é inferior à concentração de saturação C_S, pois aparece na equação o termo correspondente ao consumo de massa, representado pela taxa de consumo de oxigênio por unidade de volume. Portanto, o valor máximo a ser atingido por C será designado como C_∞.

$$C_\infty = C_S - \frac{r}{Kla} \qquad 3.28$$

onde:

C_∞ = valor máximo possível de C (g/m^3);

r = taxa de consumo de oxigênio ($g/m^3.s$);

Neste caso, por analogia a equação 3.26, a taxa de alteração de concentração de oxigênio dissolvido pode ser expressa pela equação 3.29.

$$\frac{dC}{dt} = Kla(C_\infty - C) \qquad 3.29$$

A integração da equação 3.29 nos limites de t=0 a t=t e C=0 a C=C resulta na equação 3.30.

$$\frac{C_\infty - C}{C_\infty - C_0} = e^{-Kla\,(t-t_0)} \qquad 3.30$$

A taxa de transferência de oxigênio do equipamento de aeração é freqüentemente determinada em condições distintas daquelas nas quais ele operará. Nesses casos é importante identificar os fatores de influência na taxa de transferência de oxigênio, para possibilitar a estimativa da taxa de transferência nas condições de operação, com base nos resultados obtidos no teste realizado em condições padronizadas.

Os fatores de maior influência na taxa de transferência de oxigênio são: temperatura, concentração de oxigênio dissolvido e características do esgoto, do aerador e da geometria do reator (Von Sperling, 1996a).

unesp

A elevação da temperatura causa uma redução da concentração Cs, o que, por sua vez, implica na redução da taxa de transferência dC/dt. A elevação da temperatura pode causar também o aumento do coeficiente global Kla, o que implica no aumento da taxa de transferência dC/dt.

Através da equação 3.26, observa-se que quanto menor a concentração de oxigênio dissolvido C, ou maior o déficit (C_S - C), maior a taxa de transferência de oxigênio dC/dt.

A presença de sais, matéria particulada e agentes tensoativos no esgoto, altera a concentração de saturação do líquido no reator.

O coeficiente de transferência de oxigênio é influenciado pelas características dos esgotos, bem como pela geometria do reator e grau de mistura.

3.3- Determinação da capacidade de oxigenação

As informações que serão apresentadas ressaltam a importância do conhecimento da capacidade de oxigenação de estações de tratamento de esgotos, e da utilização destes conhecimentos no sentido de se obter maior transferência de oxigênio com menor consumo de energia.

Os sistemas de tratamento que utilizam sistemas de aeração são projetados tendo por base uma taxa desejada de transferência de oxigênio. Normalmente, essa taxa de transferência faz parte da especificação para aquisição do equipamento do sistema de aeração. Segundo Von Sperling (1997), "infelizmente não tem sido comum a realização de testes de aeração para verificar se o equipamento fornecido atende as demandas de oxigênio solicitada".

Nas estações de tratamento de esgoto existentes é fundamental o conhecimento da capacidade de oxigenação do equipamento implantado. Da mesma forma que na operação se faz um acompanhamento da qualidade do afluente com o intuito de estimar o consumo de oxigênio, pois é muito importante se ter o conhecimento da real capacidade de produção de oxigênio disponível no reator, nas condições de operação (Von Sperling, 1997).

Os testes de aeração podem ser realizados em água limpa ou em condições de operação.



O teste em água limpa pressupõe que o reator esteja vazio de que seja cheio com água limpa. Remove-se o oxigênio dissolvido do meio através da adição de sulfito de sódio no reator com aeradores desligados. A capacidade de aeração é calculada com base na taxa de acréscimo da concentração de OD após o religamento dos aeradores. Esse teste é caro devido a necessidade de grandes volumes de água tratada e de produtos químicos.

Já o teste em condições de operação é efetuado com reator nas condições operacionais, contendo o lodo ativo. O consumo de oxigênio é realizado nos processos de respiração da biomassa. Esse teste é mais barato por não exigir a adição de materiais externos, podendo ser efetuado com o reator em operação. Apesar dos resultados serem menos precisos que os da água limpa, os valores obtidos fornecem uma indicação direta da taxa de transferência de oxigênio realmente disponível no sistema.

O teste de aeração em água limpa pode ser analisado pelo método não estacionário, já o teste de aeração em condições de operação pode ser analisado pelo método não estacionário e pelo estacionário.

3.3.1- Método estacionário e não estacionário

O método estacionário é aquele no qual todas as condições no reator estão fixas, ou seja, não exibindo uma alteração no momento do teste. Nestas condições, o consumo de oxigênio é igual à sua produção. Desta forma, estima-se a capacidade de aeração através da determinação da taxa de consumo de oxigênio pela biomassa.

$$Kla = \frac{r}{C_s - \overline{C}} \qquad 3.31$$

em que:

$\overline{C}$ = concentração de oxigênio predominante no reator (g/m^3);

Já o método não estacionário, também conhecido como método da reaeração, utiliza dados obtidos após o acionamento dos aeradores, visando o

aumento da concentração de oxigênio dissolvido no meio. A taxa de transferência de oxigênio está associada à taxa medida de aumento da concentração de OD.

No teste em água limpa, a concentração de oxigênio C aumenta segundo uma taxa exponencial decrescente, dada pela equação 3.27. A concentração C tende assintoticamente até o valor da concentração de saturação de oxigênio C_S, conforme esquematizado na figura 3.1.

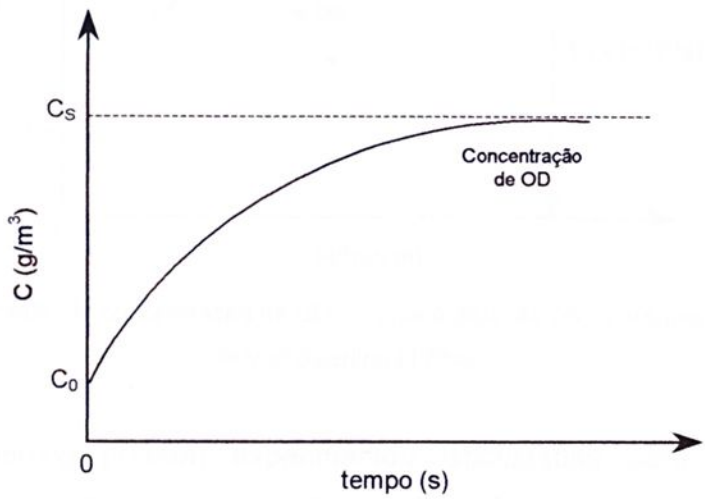


Figura 3.1: Progressão da concentração de OD durante a aeração sem consumo de OD adaptado de Von Sperling (1996a).

Os padrões da ASCE (1990), para realização de testes de aeração em água limpa sugerem que sejam determinados simultaneamente Kla, C_S e C_0 através de uma análise de regressão não linear, com os pares de valores de t e C obtidos em campo.

No teste em condições de operação, o maior valor que pode ser atingido pela concentração de oxigênio é inferior a concentração de saturação C_S, devido ao consumo contínuo de oxigênio. Designando-se a taxa de consumo de oxigênio por r ($g/m^3.s$) e o valor máximo a ser atingido por C como C_∞, sendo dado pela equação 3.28.

Portanto, a equação da trajetória de OD em condição de operação, esquematizada na figura 3.2, é dada pela equação 3.32:

$$C = C_S - (C_S - C_0)\, e^{-Kla(t-t_0)} \qquad 3.32$$

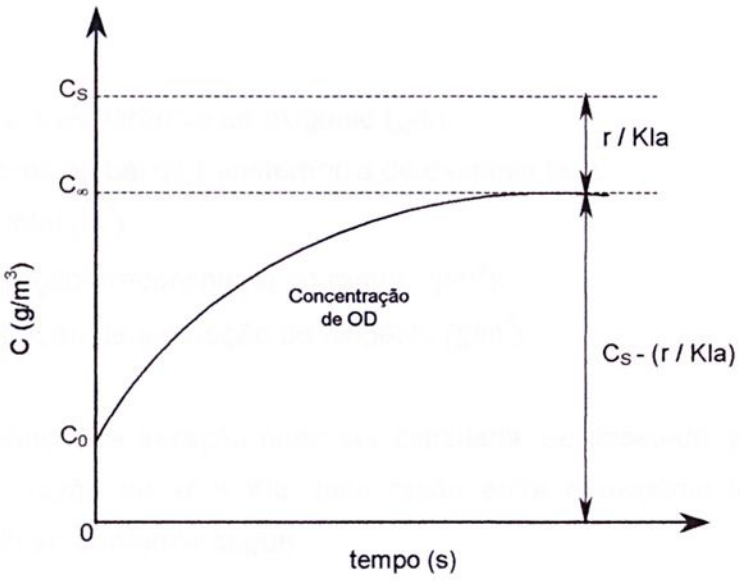


Figura 3.2: Progressão da concentração de OD durante a aeração com consumo de OD adaptado de Von Sperling (1996a).

Von Sperling (1996a) experimentou dificuldades para medição nas condições de operação, em que a reduzida elevação da concentração de OD no reator não criava condições suficientes para uma estimativa confiável de C_S.

Para Von Sperling (1996a) a concentração de saturação C_S pode ser mais facilmente determinada por meio de forte agitação de uma certa quantidade de água limpa em um recipiente, e medição da concentração de OD atingida. Indica ainda, como mais fácil, a adoção do valor inicial C_0 através de simples observação da série temporal de C, e decisão sobre o tempo t_0 a partir do qual os dados são confiáveis, seguindo uma trajetória exponencial. Assim, afigura-se como uma abordagem satisfatória e mais simples para determinação de Kla nas condições de operação a análise de regressão não linear, com a variável independente t, variável dependente C, e valores fixos r, C_S e C_0.

3.3.2- Cálculo do consumo de ar necessário

Com o conhecimento das variáveis da equação 3.27, pode ser calculada facilmente a capacidade de oxigenação nas condições de campo simplesmente dada pela equação 3.33, conforme segue:

$$TTO = Kla.V_T\left(C_S - \overline{C}\right) \qquad 3.33$$

em que:

TTO = taxa de transferência de oxigênio (g/s);

Kla = coeficiente global de transferência de oxigênio (s^{-1});

V_T = volume total (m^3);

$\overline{C}$ = concentração predominante no reator (g/m^3);

C_S = concentração de saturação de oxigênio (g/m^3).

A eficiência da aeração pode ser calculada, se desejado, para uma dada condição de vazão de ar e Kla, pela razão entre o oxigênio transferido e o fornecido pelo ar, conforme segue:

$$\eta_{\%} = \frac{TTO}{G} = \frac{TTO}{1440\,\gamma\,Q_G\,\rho_{S,G}} \qquad 3.34$$

A constante 1440 surge de conversão de unidades, sendo :

Q_G = fluxo de ar na CNTP (m^3/min);

G = fluxo de massa de oxigênio fornecido pelo ar (kg/min);

$\rho_{S,G}$ = fração em massa de oxigênio no ar;

$\eta_{\%}$ = eficiência do processo de injeção de ar;

γ = peso específico do ar na CNTP.

A potência consumida no processo de fornecimento do ar comprimido, W_G, pode ser calculada conhecendo-se a vazão de ar e a pressão de injeção, supondo uma transformação isoentrópica (Billerbeck et al., 1999):

$$W_G = P_{atm}\,Q_G\,\frac{k}{k-1}\left[\left(\frac{P_G}{P_{atm}}\right)^{(k-1)/k} - 1\right] \qquad 3.35$$

em que P_{atm} e P_G são respectivamente a pressão atmosférica e do ar comprimido e k a razão entre os calores específicos a pressão constante e a volume constante (Streeter, 1982).

unesp

O uso da equação 3.33 supõe conhecida a relação entre Kla e a vazão de ar injetada no reator, G. Por outro lado, para que haja eficiência na utilização do ar e para evitar os problemas decorrentes do excesso de oxigênio no processo biológico, é necessário que a TTO fornecida seja próxima a taxa necessária para oxidar a matéria orgânica no reator, TTO_R , em (g/s).

$$TTO_R = DQO.Q \qquad 3.36$$

com Q sendo a vazão de esgoto afluente (m^3/s), e DQO a demanda química de oxigênio removida pelo tratamento (g/m^3). Assim o fluxo de massa de ar requerido para transferir o oxigênio necessário é dado por:

$$G_R = \frac{TTO_R}{\eta_{\%}} \qquad 3.37$$

Com essa informação pode-se calcular o fluxo de ar excedente, dado pela diferença entre os fluxos, $G - G_R$.

O processo de otimização não pode igualar simplesmente as duas demandas para obter a vazão ótima de ar porque é necessário conseguir uma velocidade ascensional mínima para manter as partículas do meio suporte em suspensão. Por exemplo, Heijnen et al. (1997), utilizando areia com cerca de 0,2mm de diâmetro, recomenda uma velocidade superficial do gás de pelo menos 5cm/s. A velocidade superficial é dada pela divisão da vazão de ar pela área total da seção do tubo aerado do reator.

A situação que geralmente ocorre nos reatores aeróbios com circulação é uma TTO maior que a TTO_R, uma vez que a vazão de ar utilizada normalmente é determinada pela necessidade de suspensão das partículas suporte. Assim, uma alternativa para melhorar a eficiência é a redução do tempo de detenção hidráulico, aumentando a vazão afluente ao reator. Essa alternativa deve considerar, entretanto, que a eficiência do tratamento tende a diminuir com a diminuição do tempo de detenção (Gebara et al., 2000).

unesp

3.4- Dados de Kla encontrados na literatura

Bello et al. (1985) investigaram a hidrodinâmica e a transferência de massa de reatores de leito fluidizado em tubos concêntricos e paralelos. Apresentaram também uma revisão com vários resultados de Kla obtidos experimentalmente por outros autores. Pelo interesse direto no presente trabalho, serão apresentados aqui parte dos valores compilados pelos autores, referentes aos reatores de tubos concêntricos, assim como os obtidos por Bello et al. (op. cit.).

A figura 3.3 apresenta os valores de Kla obtidos experimentalmente pelos trabalhos citados na tabela 3.1. O gráfico traz como identificação de cada curva os números que identificam os respectivos trabalhos na tabela 3.1. A abcissa do gráfico apresenta a potência de injeção de ar por unidade de volume dos reatores. Esta grandeza foi escolhida para normalizar os resultados obtidos com diferentes vazões de ar e diferentes geometrias de reatores.

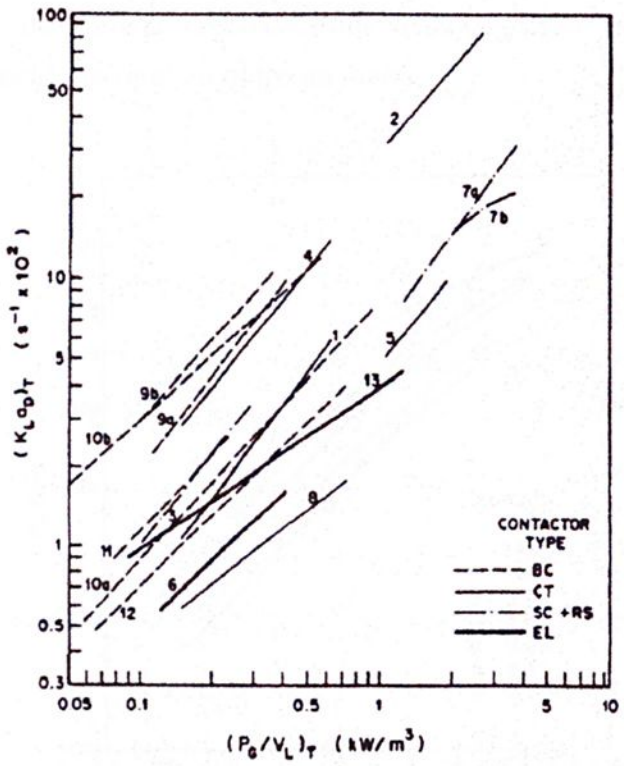


Figura 3.3: Gráfico com os resultados de Kla dos trabalhos citados na tabela 3.1 (Fonte: Bello et al., 1985).

Tabela 3.1: Dados de trabalhos com reatores de tubos concêntricos (Fonte: Bello et al, 1985).

nº	Autor, ano	A_d/A_r	D_T ou D_r (m)	$H_D(H_0)$ (m)	Liquido	Tipo do injetor
1	El-Gabbani, 1977	0,29	0,095	1,65 (1,47)	água	*Ring sparger*
2	Fukuda et al., 1978	0,38 -1,67	0,20	1,82 (1,00)	Na_2SO_3	*Perforated plates*
4	Botton et al., 1980	1,14	0,19	1,30	Na_2SO_3	*Concentric-ring*
		0,09	0,48	1,50	Na_2SO_3	*3 Concentric rings*
5	Hatch, 1973	1,12	0,30	2,80 (2,60)	*Fermentation Medium*	*Ring*
8	Sinclair and Ryder, 1975	3,00	0,15	0,23 (0,18)	água	*Concentric-ring*

A figura 3.4 apresenta os resultados obtidos por Bello (op. cit.) em modelos de recirculação por tubo externo com 1,80m de altura total e com 4 relações diferentes entre as áreas de descida e subida, variando entre 0,11 e 0,69. A quinta curva, com relação nula entre as áreas, refere-se a uma coluna de bolhas tradicional ou seja, sem recirculação. Observe que a coluna de bolhas apresentou os maiores valores de Kla e, à medida que cresce a área do tubo de descida em relação ao tubo de subida o coeficiente diminui. Esse padrão deve-se à diminuição da velocidade relativa entre as fases.

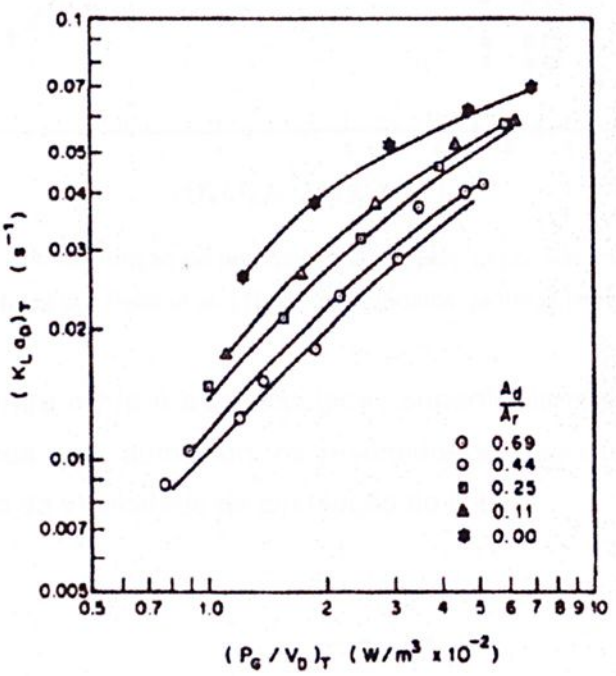


Figura 3.4: Kla em função da potência injetada pelo ar por volume unitário. Dados obtidos por Bello et al. (1985), em modelos de circulação externa.

A figura 3.5 apresenta as relações obtidas para os reatores com circulação interna, ou seja, tubos concêntricos, também com 1,80m de altura. Observa-se o mesmo comportamento com relação à diminuição do Kla quando aumenta a relação entre as áreas de descida e subida.

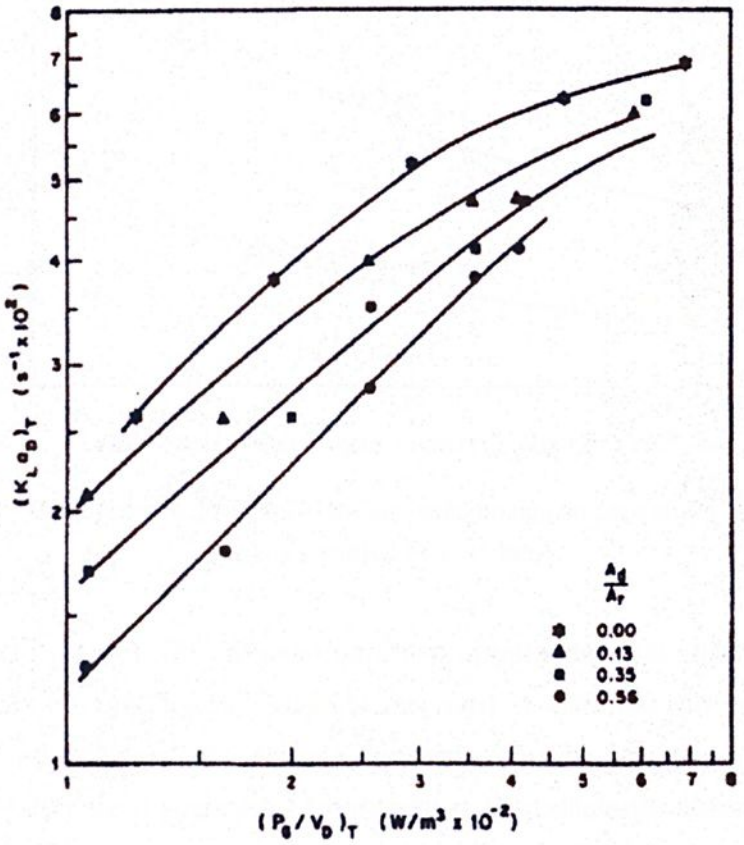


Figura 3.5: Kla em função da potência injetada pelo ar por volume unitário.
Dados obtidos por Bello et al. (1985), em modelos de tubos concêntricos.

A relação entre o Kla e as velocidades superficiais relativas do líquido e gás foi demonstrada pelo autor com os resultados apresentados na figura 3.6, com Kla em função da velocidade de circulação do líquido.

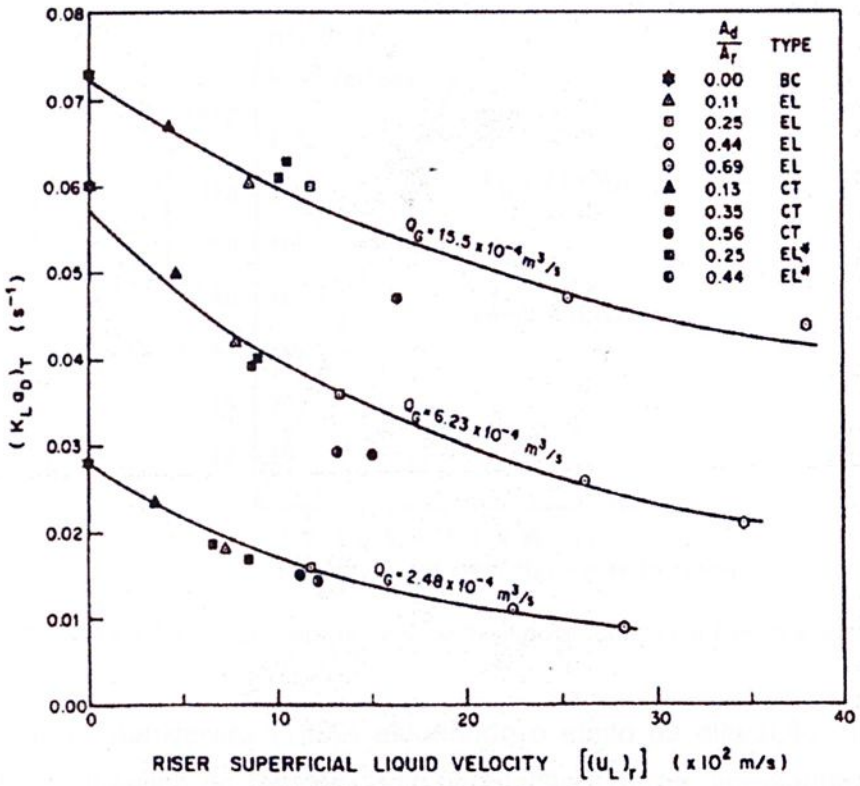


Figura 3.6: Kla em função da velocidade de circulação do líquido para diversas vazões de ar, obtidos por Bello et al. (1985).

Heijnen et al. (1990), apresentaram proposta de usar um reator de leito fluidizado com circulação por jato de ar para o efluente de um tratamento anaeróbio de esgoto sanitário. Para o dimensionamento, utilizaram dados de um modelo com 0,20m de diâmetro e 11m de altura. O coeficiente de transferência de oxigênio determinado pelos autores mostrou possuir uma relação linear com a velocidade superficial do ar, na faixa entre 0,02 e 0,06m/s. A figura 3.7 apresenta os resultados obtidos por Heijnen et al. (op. cit.).

unesp

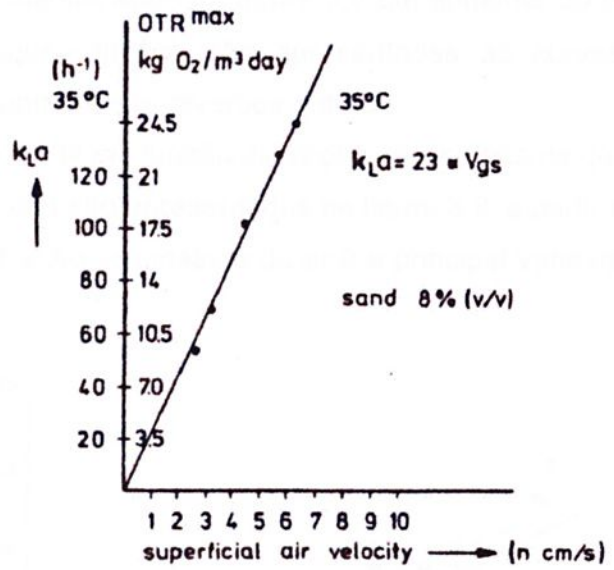


Figura 3.7: Kla em função da velocidade superficial do ar, obtido por Heijen et al. (1990).

Letzel e Stankiewicz (1999) estudando o efeito da elevação da pressão sobre a hidrodinâmica de reatores com circulação externa, apresentaram dados do Kla obtidos num modelo de 0,15m de diâmetro e 1,22m de altura. A figura 3.8 reproduz os resultados obtidos de Kla em função da velocidade superficial do gás.

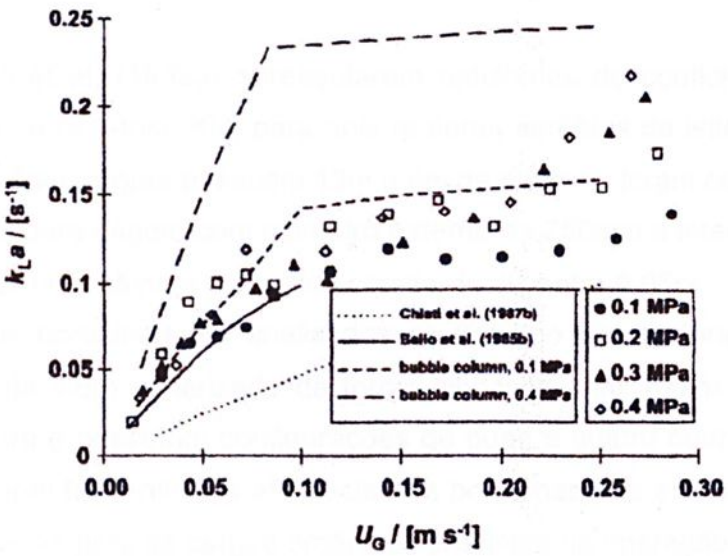


Figura 3.8: Kla em função da velocidade superficial do ar e da pressão, obtido por Letzel e Stankiewicz (1999).

Os autores identificaram na figura 3.8 um aumento do Kla com a pressão no reator. No mesmo gráfico são apresentadas as curvas previstas pelas correlações apresentadas por diversos autores.

Os valores de Kla em função da fração volumétrica de gás obtido por Letzel e Stankiewicz (op. cit.) são apresentados na figura 3.9, a partir da qual os autores concluíram que a fração volumétrica do ar é a principal variável influente sobre o Kla.

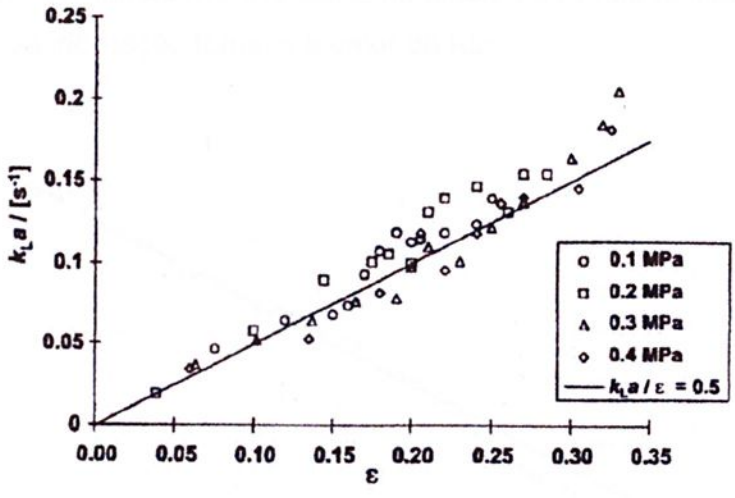


Figura 3.9: Kla em função da fração volumétrica do gás, obtido por Letzel e Stankiewicz (1999).

Gebara et al. (1999a) apresentaram resultados do coeficiente global de transferência de oxigênio, Kla, para dois reatores aeróbios de leito fluidizado em escala piloto. Os reatores possuem 12m e 6m de altura, e foram construídos com tubos de PVC para esgoto com diâmetro externo de 250mm e interno de 200mm, encimados por uma câmara de sedimentação de diâmetro 0,95m.

Os dois borbulhadores analisados no trabalho citado, foram construídos com pedras de vidro sinterizado de forma cilíndrica com 10mm de diâmetro e 25mm de altura e possuíam configurações de duas e quatro pedras injetoras. O objetivo principal foi verificar a eficiência dos borbulhadores e estimar as vazões de ar necessárias para as cargas orgânicas previstas na operação.

O ensaio para determinação do coeficiente Kla seguiu a metodologia padronizada para emprego com água limpa, método não estacionário,

recomendada pela ASCE (1990), utilizando cloreto de cobalto como catalisador e sulfito de sódio como reagente.

O cálculo do Kla seguiu uma metodologia simplificada, a partir da linearização da equação da trajetória da concentração em relação ao tempo, o que permitiu o ajuste por mínimos quadrados. Os valores de Kla situaram-se entre $0,0016s^{-1}$ e $0,0116s^{-1}$ para vazões de ar entre 400l/h e 3000l/h.

A figura 3.10 a seguir ilustra os dados obtidos por Gebara et al. (1999a), permitindo verificar também a qualidade do ajuste das retas obtidas por mínimos quadrados, cuja inclinação fornece o valor do Kla.

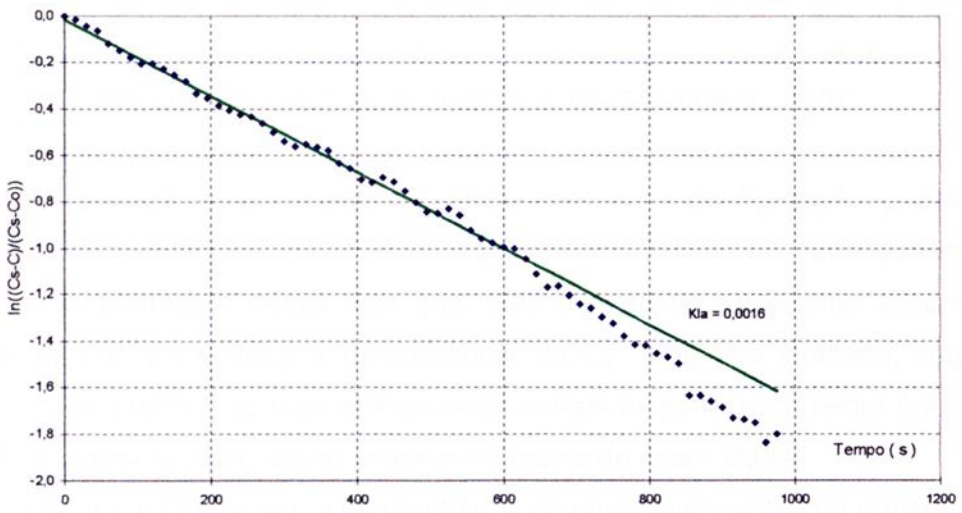


Figura 3.10: Dados de $\ln((C_S-C)/(C_S-C_0))$ em função do tempo e a reta ajustada para o reator de 12m e vazão de ar de 400l/h. (Fonte Gebara et al., 1999a).

A figura 3.11 ilustra um caso em que a concavidade da curva resultou invertida em relação aos casos normais. Este tipo de problema ocorreu em vários dos primeiros ensaios realizados, sendo que Gebara et al. (1999a) concluíram que esse comportamento deveu-se ao mau funcionamento da sonda medidora de oxigênio dissolvido. Para evitar essa ocorrência os autores recomendaram a agitação periódica da sonda durante o uso.

unesp

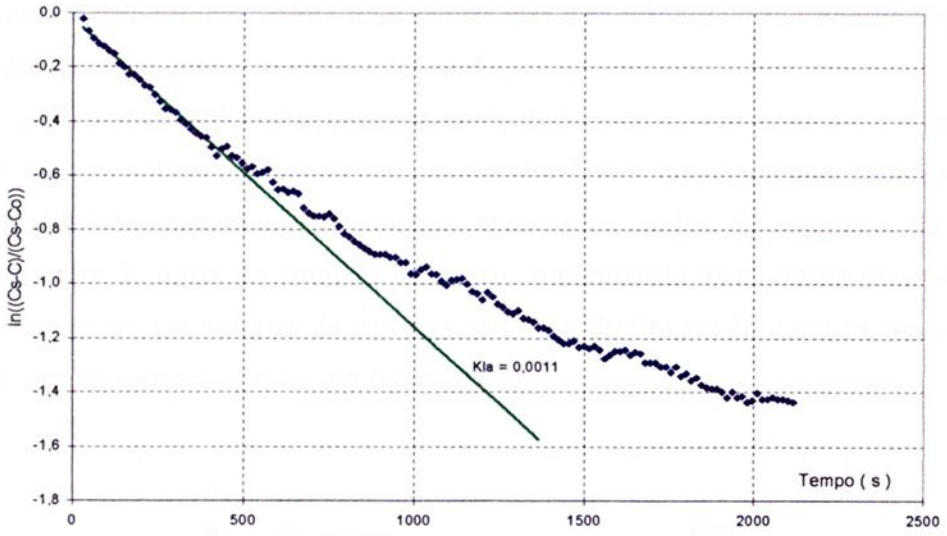


Figura 3.11: Dados de $\ln((C_S-C)/(C_S-C_0))$ em função do tempo e a reta ajustada para o reator de 12m e vazão de ar de 600l/h. (Fonte Gebara et al., 1999a).

Os ensaios foram repetidos ainda com uma configuração geométrica diferente do decantador, que aumentava o volume interno na parte superior do reator. Foi constatado nessa fase que, com o aumento do volume superior da região aerada, aumentava a transferência de O_2. Este fato indicaria, segundo Gebara et al. (1999a), que as bolhas ainda tinham oxigênio para ceder à água ao final de seu trajeto ascendente, mesmo no reator de maior altura.

A figura 3.12 apresenta os resultados do coeficiente global de transferência de oxigênio obtido por Gebara et al. (1999a), em função da vazão de ar no reator de 12 metros de altura.

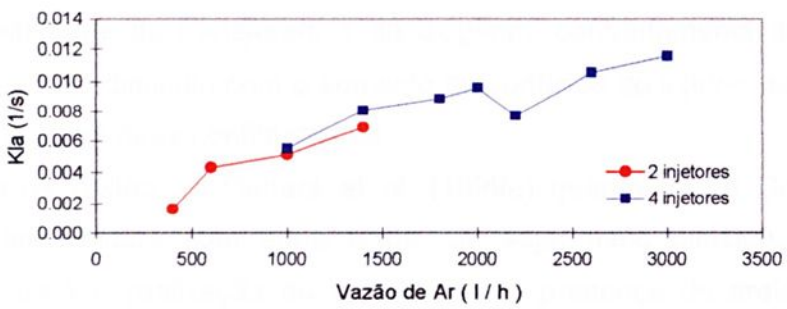


Figura 3.12: Coeficientes de transferência de O_2, Kla, para o reator de 12m de altura, obtidos por Gebara et al. (1999a).

Observa-se na figura 3.12 uma tendência de diminuição da inclinação da curva com o aumento da vazão de ar, também verificada nos dados apresentados

por Letzel e Stankiewicz (1999). Isso indica que a eficiência no aproveitamento do ar injetado diminui com o aumento da vazão.

Gebara et al. (2001a) apresentaram trabalho em que analisaram o efeito do tipo de injetor sobre o coeficiente de transferência nos mesmos reatores do trabalho de 1999 já comentado. Foram analisados dados de injetores de PVC perfurado com 36 furos de 1mm de diâmetro, substituindo os injetores originais de vidro sinterizado. Os valores de Kla nos reatores de 6m e 12m com os dois tipos de injetores são apresentados na figura 3.13.

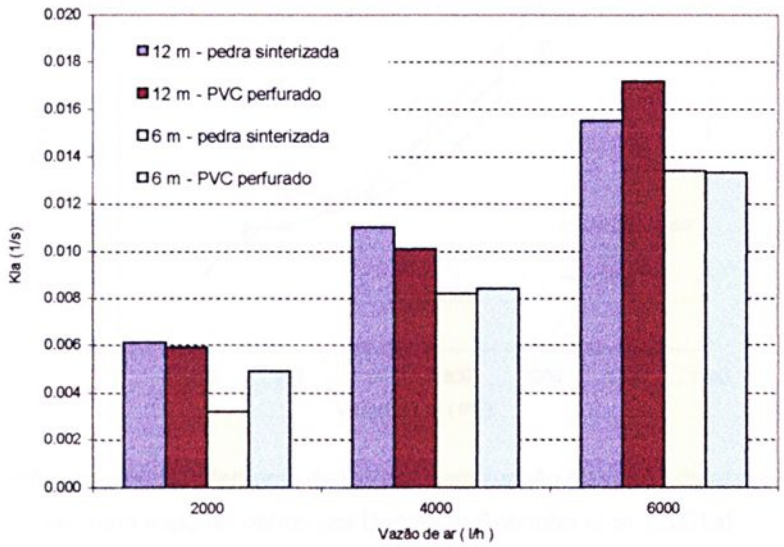


Figura 3.13: Coeficiente global de transferência de oxigênio (Kla) obtido por Gebara et al. (2001a), em reatores de 6m e 12m, com dois tipos de injetores.

O coeficiente de transferência de oxigênio, contrariamente ao esperado pelos autores, não diminuiu com o aumento dos orifícios do injetor, mostrando-se semelhante para as duas configurações.

Tanto os dados de Gebara et al. (1999a) quanto os de Gebara et al. (2001a) foram obtidos com água limpa, ou seja, meio bifásico, devido às dificuldades para a realização do ensaio com a presença de areia. Dall'Aglio Sobrinho et al. (2001a), tentaram suprir essa lacuna por meio de ensaios em modelo reduzido de reator de tubos concêntricos, determinando o coeficiente global de transferência de oxigênio em meio bifásico (ar + água) e meio trifásico (ar + água + areia).

O modelo reduzido possuía tubo interno com 5cm de diâmetro e altura de 3.08m, e tubo externo com diâmetro 15cm e altura 3,90m. Os ensaios em meio trifásico foram realizados com concentrações de areia de 25g/l e 50g/l. A figura 3.14 mostra os resultados obtidos por Dall'Aglio Sobrinho et al. (2001a). As margens de erro foram estimadas a partir das informações fornecidas pelo programa de ajuste não linear dos dados.

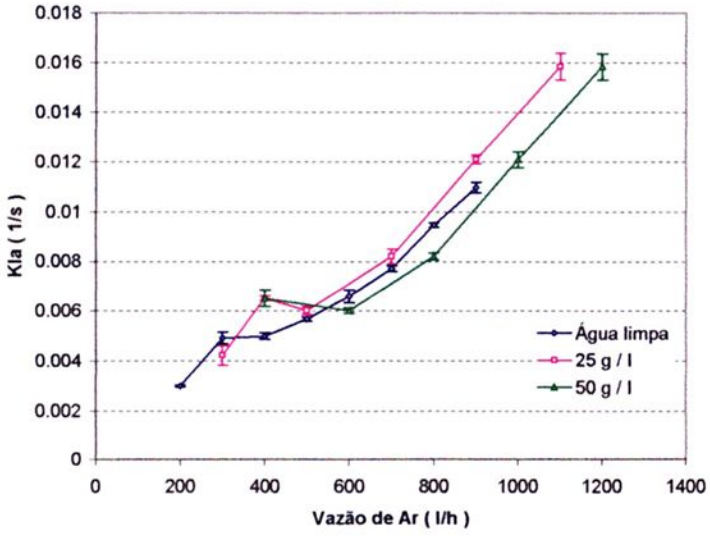


Figura 3.14: Coeficiente de transferência de oxigênio em função da vazão de ar e da concentração de meio suporte, obtido por Dall'Aglio Sobrinho et al. (2001a).

Observa-se na figura 3.14 que nas vazões de ar mais altas aumentou a margem de erro relativo na determinação do Kla. As causas desse efeito não foram claramente identificadas pelos autores, mas sugeriram que a formação de bolhas grandes poderia obstruir a membrana da sonda de oxigênio dissolvido, prejudicando as leituras. Outra causa possível levantada foi o tempo de resposta da sonda, que tenderia a diminuir os valores lidos em transientes rápidos, com maiores conseqüências nos ensaios em que a vazão de ar fosse maior, devido à variação mais brusca do oxigênio dissolvido.

Verifica-se portanto que os dados da literatura sobre o coeficiente global de transferência de oxigênio em reatores de leito fluidizado com circulação são ainda relativamente escassos e não englobam toda a gama de influência da geometria, pois não são encontrados dados cobrindo variações da altura dos modelos, e nem da hidrodinâmica de funcionamento, uma vez que a maioria dos trabalhos

unesp

refere-se a meios bifásicos e não são descritos adequadamente os regimes de circulação de bolhas identificados por Dall'Aglio Sobrinho et al. (2001a).

O presente trabalho procura suprir parte desta lacuna, com ensaios em meios trifásicos e em reatores de altura comparável à dos reatores piloto em operação.

unesp

4- MATERIAIS E MÉTODOS

4.1- Bancada experimental

A investigação foi conduzida no Laboratório de Hidrologia e Hidrometria, localizado na UNESP, Campus de Ilha Solteira, em um modelo de reator aeróbio de tubos concêntricos e leito fluidizado, especialmente construído para realização desta pesquisa. A figura 4.1 mostra o esquema da montagem experimental.

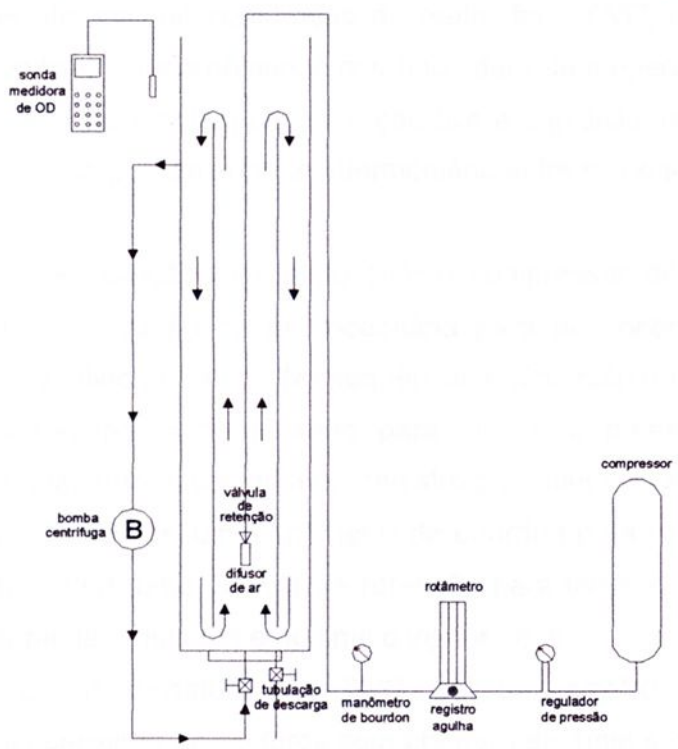


Figura 4.1: Esquema da bancada experimental.

Na bancada experimental foram instalados o modelo do reator, uma sonda medidora de oxigênio dissolvido, um rotâmetro acoplado a um registro agulha, uma bomba centrífuga, uma válvula reguladora de pressão, um manômetro de bourdon, um compressor de ar e uma estrutura suporte para garantir a verticalidade do reator bem como facilitar a obtenção de dados dos ensaios realizados.

4.2- Modelo do reator

A relação geométrica do reator é caracterizada por dois tubos concêntricos, que são denominados como tubo interno e tubo externo. O líquido sobe pelo tubo interno e circula pelo espaço anular entre os tubos, conforme indicado pelas setas do esquema da figura 4.1.

A geometria do reator foi disposta em um modelo com tubo interno de 100mm e tubo externo de 200mm e altura 6m. O modelo experimental não incluiu o decantador, adotando, por simplicidade construtiva, o diâmetro da área de separação do ar igual ao do tubo externo.

O material utilizado na construção do reator foi o PVC, com visores em acrílico para visualização de fenômenos ocorridos durante a operação.

O tubo interno se mantém com posição fixa e eqüidistante em relação ao tubo externo, garantido por um suporte intermediário entre os dois tubos chamado centralizador.

O sistema de aeração tem início com o compressor de ar, que tem a finalidade de enviar a vazão de ar necessária para que ocorra a circulação desejada do meio contido no reator. Na seqüência a tubulação de ar é constituída de uma válvula reguladora de pressão para ajustar a pressão conforme a metodologia, um rotâmetro acoplado a um registro para medir e regular as vazões de ar introduzidas no reator, um manômetro de bourdon para verificar falhas ou defeitos no borbulhador, uma válvula de retenção para evitar o refluxo do meio contido no reator nesta tubulação e no final o injetor de ar.

O injetor de ar constituído em PVC, possui diâmetro de 40mm e foi perfurado em seis carreiras de 36 furos com abertura de 1mm e espaçamento de

unesp

3mm entre carreiras. Foi instalado no centro do tubo interno numa altura fixa, atendendo a uma altura mínima suficiente para ficar acima do meio suporte, em caso de parada do reator e sedimentação do mesmo.

4.3- Seqüência de ensaios

Os ensaios realizados englobaram três variáveis com efeito sobre o Kla: geometria da saída superior do tubo interno, vazão de ar e concentração do meio suporte (bifásico e trifásico).

Em meio bifásico foi levantado o efeito da vazão de ar, em meio trifásico foi levantado o efeito da concentração do meio suporte e para ambos foi analisado o efeito da geometria superior.

Foram empregadas 5 vazões de ar para cada situação ensaiada, englobando ensaios com água limpa e quatro concentrações diferentes de meio suporte, bem como as configurações de saída livre e pressurizada.

As concentrações de meio suporte foram de 50g/l, 100g/l e 150g/l, valores semelhantes aos relatados na literatura. O meio suporte utilizado foi a areia com diâmetro médio de 0,28mm, mesmo diâmetro utilizado no reator empregado no monitoramento do tratamento com esgotos domésticos em operação na FEIS.

As vazões de ar utilizadas com água limpa e concentração de 50g/l de areia foram de 800l/h - 1100l/h - 1500l/h - 2000l/h - 2500l/h, determinadas com base em valores de velocidade superficial encontrados na literatura. Para as concentrações de areia maiores esses valores foram alterados em virtude da necessidade de manter o leito em suspensão.

Com isso as vazões de ar ensaiadas para a concentração de 100g/l de areia foram de 1000l/h - 1300l/h - 1700l/h - 2200l/h - 2700l/h e para a concentração de 150g/l as vazões foram de 1500l/h - 1800l/h - 2200l/h - 2700l/h - 3200l/h.

As saídas superiores ensaiadas foram a saída livre com o nível estático 10cm abaixo do tubo interno e a saída pressurizada com nível estático 10cm acima do tubo interno.

Os ensaios foram conduzidos segundo o esquema de combinação de efeitos, resultando em um total de 40 ensaios.

unesp

4.4- Determinação do coeficiente de aeração Kla

A determinação do coeficiente Kla seguiu a metodologia padronizada para emprego com água limpa, método não estacionário, recomendada pela ASCE (1990), cujo equacionamento foi apresentado no item 3.3.1. É utilizado cloreto de cobalto como catalisador e sulfito de sódio como reagente, para anular a concentração de oxigênio do meio fluido, o qual é, em seguida, reoxigenado até perto do nível de saturação.

A água deve ter a qualidade da água potável da rede pública. O sulfito de sódio exigido para desoxigenação da água de um reator situa-se entre 1 e 7,88mg/l.

O catalisador de cloreto de cobalto é normalmente adicionado apenas uma vez em cada série de ensaios. A solução de cloreto de cobalto é adicionada ao reator numa concentração entre 0,1 a 0,5mg/l.

Para proporcionar uma mistura correta e homogeneizada dos compostos utilizados no ensaio foi necessário utilizar uma tubulação auxiliar, com uma bomba centrífuga que retira água do topo do reator e recalca até a base do reator, fazendo assim uma recirculação sem aeração.

Após a adição do sulfito de sódio é introduzida a sonda Lambda (um medidor de oxigênio dissolvido portátil marca HANNA instruments - HI 9141), na parte superior do tubo externo, para determinar quando o oxigênio da água é completamente fixado pelo sulfito, ou seja, tem-se OD nulo. Nesse monitoramento é importante garantir que a mistura seja suficiente para homogeneizar toda a água, dependendo do tempo considerado. Enquanto não ocorre a mistura completa, podem ser observadas leituras de oxigênio aumentando e diminuindo em ciclos curtos, evidenciando a existência de oxigênio dissolvido que ainda não reagiu com o sulfito de sódio.

Assim que as leituras indicassem oxigênio nulo por um determinado tempo, os compressores eram ligados iniciando-se a aeração com a vazão de ar desejada, e registrando-se as leituras de OD em intervalos pré-determinados. Nos ensaios com os modelos foram adotados períodos de 5 segundos entre leituras.

unesp

A documentação do ensaio foi realizada por formulários contendo os dados de tempo, de OD, da vazão de ar aplicada no sistema, da concentração do meio suporte, do efeito analisado e observações.

De posse dos dados obtidos no ensaio, procedeu-se o cálculo do Kla. Para análise dos dados foi utilizada uma planilha no programa Excel, que possui macros escritas em Visual Basic para ajustar o Kla através de uma regressão não linear.

4.4.1- Metodologia de cálculo do Kla

Os valores de Kla foram determinados com o auxílio de uma rotina para regressão não linear, que ajusta a curva de oxigênio dissolvido em função do tempo obtida nos ensaios, tendo como parâmetros a concentração inicial, C_0, a concentração de saturação C_S e uma estimativa inicial do Kla.

Essa metodologia é mais eficiente que o ajuste linear, adotado em trabalhos anteriores citados na revisão, sendo recomendada pela ASCE (1990), que fornece um código com o algoritmo, implementado em FORTRAN77.

Para possibilitar a análise com maior eficiência, o algoritmo original foi traduzido para a linguagem BASIC e implementado na forma de macros na planilha EXCEL-BASIC, permitindo um uso mais iterativo com o usuário.

A seguir será apresentado um roteiro de utilização do programa, descrevendo os passos a serem executados em um ajuste.

Passo 1: seleção dos dados brutos

Primeiramente deve-se editar os dados obtidos no ensaio, de concentração de oxigênio dissolvido em função do tempo, para selecionar o período do transiente observado que será utilizado na análise.

Deve-se, como regra geral, descartar os pontos de concentração nula e os aumentos localizados que antecedem o período de aumento monotônico da concentração, para evitar problemas de convergência nas iterações. É conveniente também evitar a inclusão de um grande número de pontos no patamar final da curva, que podem conduzir a uma média não realista dos erros de ajuste.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Essa tarefa é efetuada numa planilha que já contém um gráfico de OD em função tempo, que serve para uma primeira análise dos dados obtidos. O nome desta planilha, usualmente "Dados Brutos", deve ser informado na planilha de cálculos, que pode ser qualquer das planilhas do arquivo. Deve-se anotar também qual o intervalo de linhas em que estão contidos os valores a serem utilizados e a coluna inicial do campo.

A figura 4.2 a seguir mostra um exemplo do trabalho de seleção dos dados, com todos os dados registrados de um ensaio.

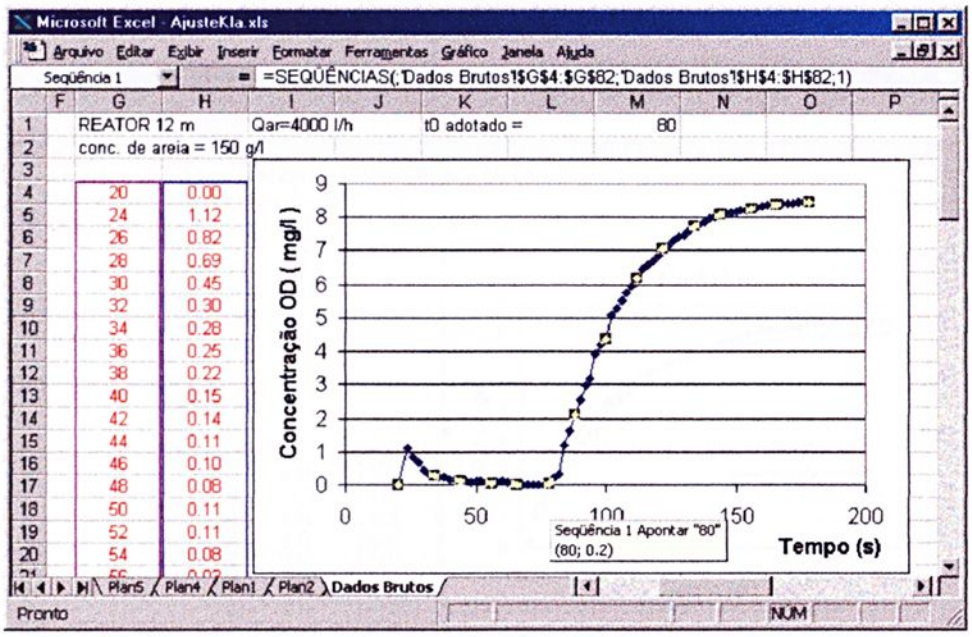


Figura 4.2: Exemplo da etapa de análise da seqüência de dados e seleção dos pontos para o ajuste com dados brutos de um ensaio.

Passo 2: determinação das estimativas iniciais

Nesta fase é utilizada como base uma planilha que já contém um gráfico padrão incorporado, bem como as equações para montar um campo com os valores da concentração ao longo do tempo, calculados com as estimativas iniciais dos parâmetros ajustados. Normalmente é usada a planilha "Plan1".

Na planilha base deve-se indicar os números de linha e coluna iniciais da faixa de dados determinada no passo 1 e o nome da planilha com os dados brutos. Em seguida executa-se a macro "Inicializa", que busca na planilha "Dados Brutos" os dados que o usuário acredita proporcionarem um bom ajuste. (Obs.: Para que seja executado qualquer macro, nada em nenhuma das planilhas deve estar selecionado).

Com os dados selecionados importados pela "Inicializa" aparecendo no gráfico como guia, deve-se editar valores para C_0, C_S e Kla que mais aproximam a curva "Ajuste Inicial" da curva "Ensaio". Para definir a concentração inicial C_0 pode-se escolher a última concentração nula da seqüência crescente de OD ou escolher uma concentração quase nula, pois essa redefinição não afeta o modelo.

Um exemplo dessa etapa do trabalho é apresentado na figura 4.3. A figura traz em vermelho os valores que devem ser fornecidos pelo usuário e em azul (colunas B e C a partir da linha 14) os dados importados da planilha que contém dados brutos originais.

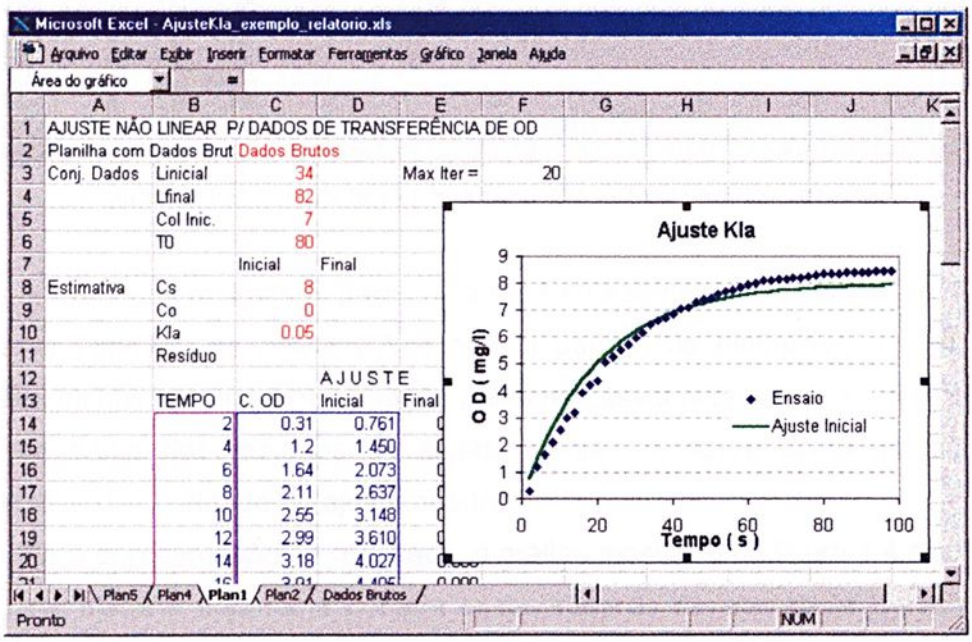


Figura 4.3: Exemplo da fase de estimativa inicial dos parâmetros de ajuste por meio visual.

Passo 3: determinação dos parâmetros de ajuste

Encontrados os valores que aproximam as curva "ajuste" e "ensaio", executa-se a macro "Ajusta", que por sua vez executa as rotinas "Calcula", com o núcleo do algoritmo apresentado pela ASCE (1990) e a rotina "Apresenta", que coloca os dados do melhor ajuste na planilha base.

A figura 4.4 apresenta o resultado dessa fase, com as informações fornecidas pelo programa destacadas em vermelho. O gráfico da planilha já inclui também a seqüência de dados ajustada.

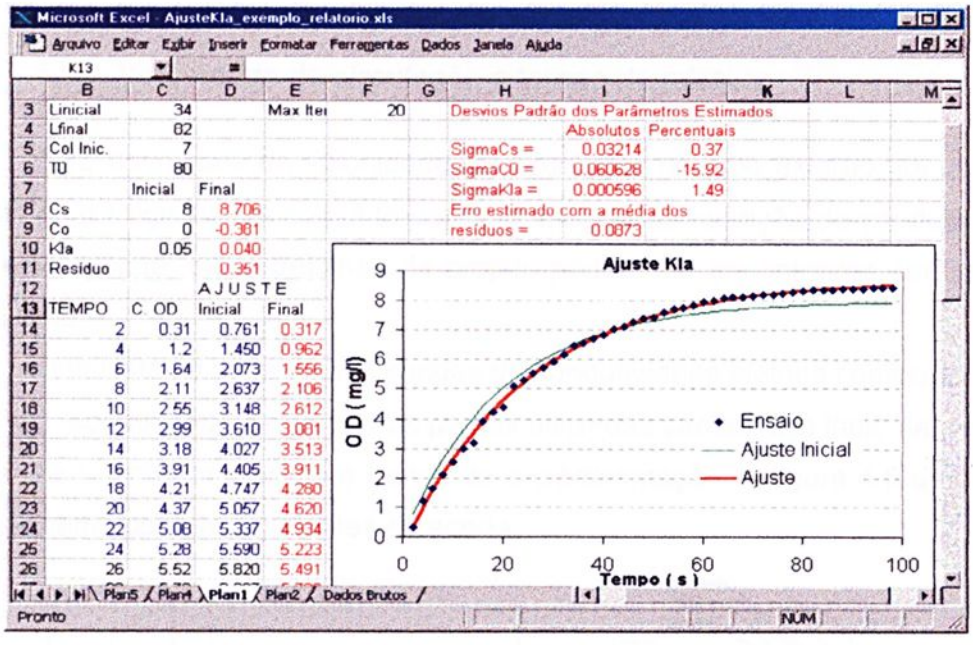


Figura 4.4: Exemplo da tela após a execução da fase final do programa.

A melhor aproximação para o Kla será apresentada na célula *D-10*, sendo fornecido também, na célula *I-7*, o desvio padrão da estimativa do Kla, que permite calcular as faixas de variação possíveis associadas ao erro esperado. O valor da soma dos resíduos do ajuste, célula *I-9*, serve como um controle quantitativo da qualidade do ajuste obtido.

Para apresentação do resultado, o gráfico mostrado na figura 4.4 é copiado para uma planilha cuja folha contém os padrões de apresentação do relatório, sendo eliminada ainda a seqüência do ajuste inicial.

4.5- Caracterização hidrodinâmica

Outros ensaios foram desenvolvidos para ajudar a caracterizar o regime de funcionamento do reator e para permitir referenciar, em trabalhos futuros, os dados obtidos com as condições hidrodinâmicas do escoamento. Determinou-se a velocidade de circulação da fase líquida, o tempo de mistura e a expansão do leito, em função das vazões de ar, para água limpa.

Para realizar os ensaios descritos acima, foi adicionado a bancada experimental um sistema de aquisição de dados de condutividade elétrica para os ensaios com traçadores.

4.5.1. Velocidade de circulação e tempo de mistura

Para estimativa da velocidade de circulação no tubo externo, foi utilizado NaCl como traçador em conjunto com um sistema de medição de condutividade elétrica da água, cujos detalhes de projeto podem ser encontrados em Guardia Filho (2001).

Este sistema possui duas sondas de condutividade elétrica confeccionadas em PVC, constituindo o corpo, e as pontas utilizadas são em aço inox, de maneira a não se corroerem durante o tempo de experimentação. A figura 4.5 apresenta um esquema com as dimensões da sonda.

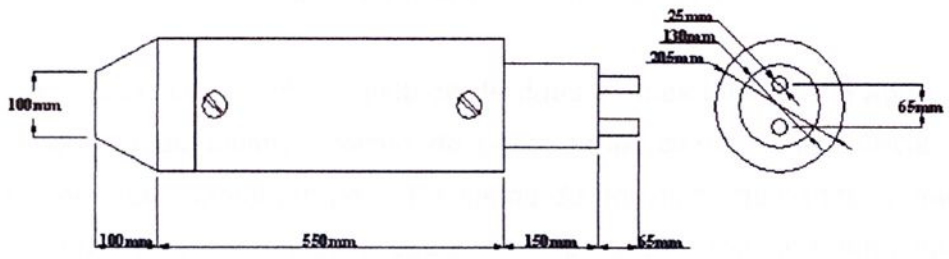


Figura 4.5: Esquema da sonda para medição de condutividade elétrica com suas dimensões. (Fonte: Guardia Filho, 2001).

Localizadas em dois pontos do tubo externo, a uma distância pré-determinada, estas estão interligadas a um condicionador de sinais que provê alimentação com corrente alternada e o condicionamento do sinal elétrico resultante.

A saída do condicionador é interligada ao computador por meio de um conversor analógico-digital para aquisição de dados. O sistema está representado na figura 4.6.

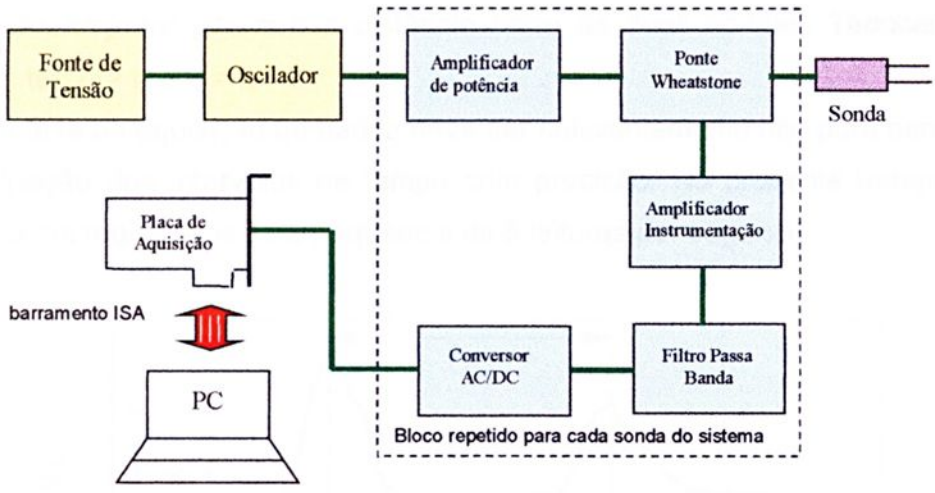


Figura 4.6: Diagrama de blocos do circuito condicionador de sinal implementado no condutivímetro. (Fonte: Guardia Filho, 2001).

Os dados da resistência elétrica de duas sondas imersas na água, ou de uma tensão de desbalanceamento de ponte proporcional à resistência, foram lidos a intervalos constantes por um sistema de aquisição de dados comandado por um software desenvolvido especialmente para este trabalho, em linguagem Delphi (Guardia Filho, 2001).

É possível neste programa a aquisição de dados utilizando-se até 8 sondas simultaneamente. A leitura da tensão em função do tempo é realizada através de uma placa de aquisição ligada ao microcomputador.

O programa permite que os dados sejam salvos em ambiente do Excel, na forma de planilhas eletrônicas, o que acabou tornando atraente sua utilização.

Pode ser observado que a curva para cada sonda apresentará picos que representam o instante em que a maior concentração do traçador passa pela sonda diminuindo a sua resistência elétrica. Conhecendo-se a distância entre as duas sondas e o tempo que o pico demora para percorrer a distância, a velocidade de circulação no tubo externo poderá ser determinada.

O comportamento das resistências ao longo do tempo reflete-se nas tensões de saída, de forma semelhante ao que se observa na figura 4.7. Com esses dados pode-se identificar dois intervalos de tempo, t_2 e t_4 , os quais representam o tempo necessário para que o traçador percorra um ciclo completo. Os tempos t_1 e t_3 representam o tempo necessário para que o centro de massa da

nuvem de traçador percorra a distância entre as duas sondas. Teoricamente deve-se ter: $t_1 = t_3$ e $t_2 = t_4$.

A taxa de aquisição de dados deve ser suficientemente alta para permitir a determinação dos intervalos de tempo com precisão. No presente trabalho os dados foram registrados com freqüência de 5 leituras por segundo.

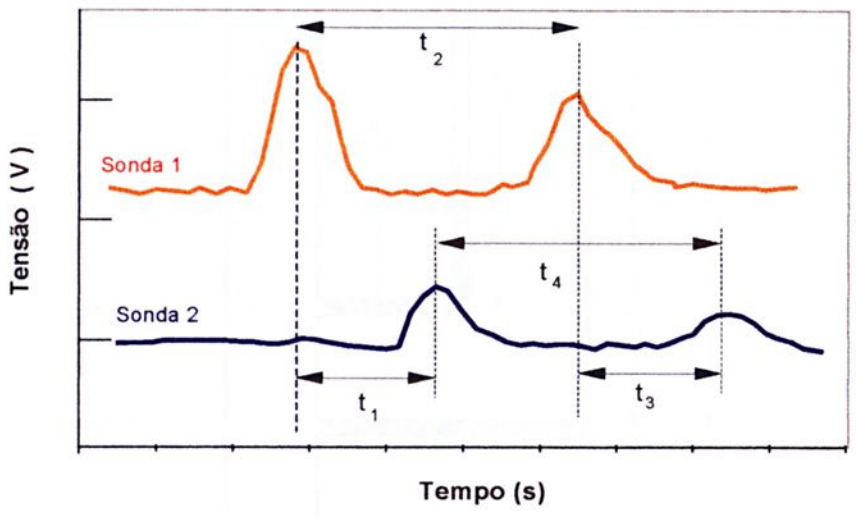


Figura 4.7: Comportamento qualitativo das leituras do ensaio com traçadores.

O tempo de mistura é determinado a partir da transformação das leituras de tensão em concentração de sal na água por meio da curva de calibragem das sondas. O tempo de mistura é determinado graficamente, identificando o ponto a partir do qual a variação da concentração de sal fica dentro de uma faixa de +/-5% do valor da concentração final. A concentração final é calculada pela média dos valores das últimas 100 leituras. Como a aquisição de dados no presente trabalho foi padronizada em 30 minutos, a uma taxa de 5 leituras por segundo, as últimas leituras fornecem leituras praticamente constantes.

4.5.2. - Determinação da expansão do leito

Para o sistema de medição de pressão e expansão do leito foram adicionadas a bancada tomadas locadas ao longo do tubo indutor e tubo externo. Mangueiras transparentes interligam estas tomadas a um quadro fixado à bancada, compondo desta maneira um quadro de piezômetros (tubos de vidro de 8 a 12mm de diâmetro).

Registros de esferas compõem estas tomadas com o intuito de minimizar os possíveis efeitos oscilatórios nos piezômetros.

A expansão do leito foi determinada conforme o equacionamento apresentado a seguir, desenvolvido com base no esquema apresentado na figura 4.8.

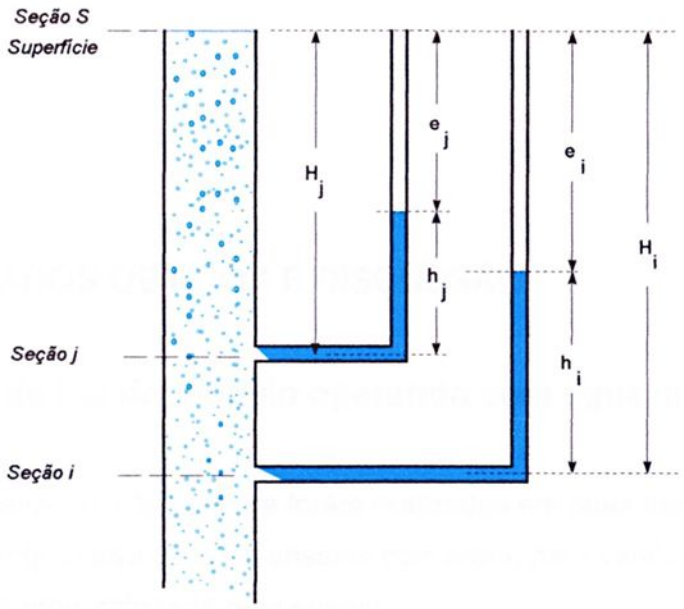


Figura 4.8: Esquema para cálculo da retenção de gás (Fonte: Dall'Aglio Sobrinho et al., 2000).

Seja uma coluna de bolhas de altura L com ar em seu interior, com pressões conhecidas em diversos níveis. A expansão do leito é dada pelo volume de gás dividido pela área do tubo. Pelo esquema tem-se que a expansão e_i do leito entre a seção i e a superfície é:

$$e_i = H_i - h_i \qquad 4.1$$

A expansão relativa ao tamanho total da coluna aerada, η, representa o volume de gás dividido pelo volume total de água e gás.

$$\eta_i = \frac{e_i}{H_i} = \frac{H_i - h_i}{H_i} = 1 - \frac{h_i}{H_i} \qquad 4.2$$

5- RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

5.1- Dados de Kla do modelo operando com água limpa

Os ensaios com água limpa foram realizados em duas etapas, sendo que a segunda foi programada após os ensaios com areia, para verificar a repetibilidade dos resultados proporcionada pelo ensaio.

No total das duas etapas foram realizadas determinações com 5 vazões de ar e 7 repetições para cada vazão, totalizando 35 ensaios com água limpa. Os dados brutos de oxigênio dissolvido em função do tempo de todos os ensaios são apresentados, para documentação, no Anexo 2.

Os dados de oxigênio dissolvido em função do tempo foram trabalhados com a metodologia descrita no item 4.4, para determinação do Kla. Um exemplo dos dados obtidos com água limpa e do resultado da regressão é apresentado na figura 5.1.

A figura 5.1 apresenta os dados de um ensaio com vazão de ar de 2500l/h, bem como a curva do ajuste obtido, permitindo verificar qualitativamente a qualidade da regressão.

unesp

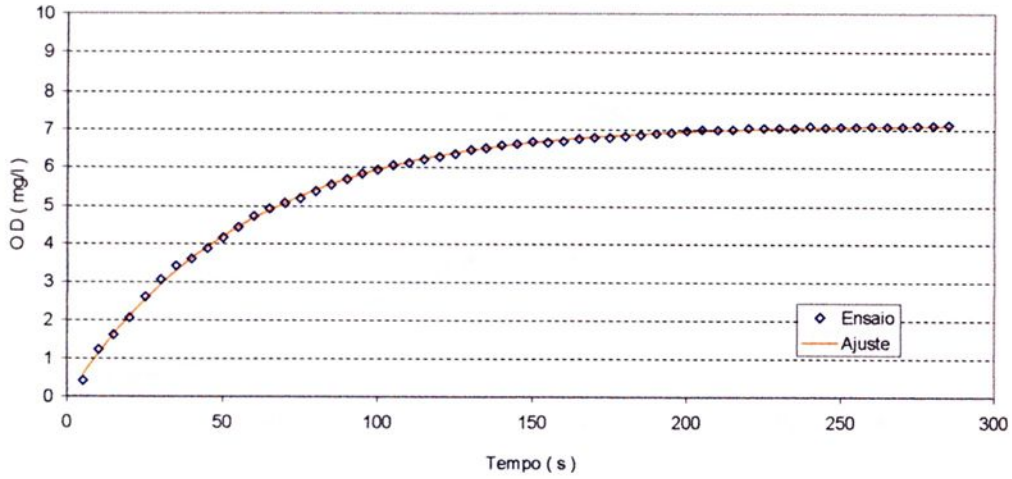


Figura 5.1: Oxigênio dissolvido em função do tempo para vazão de ar de 2500l/h e curva ajustada. Exemplo de ensaio com dados de boa qualidade.

Alguns ensaios resultaram em dados qualitativamente inferiores, mas ainda permitindo a realização da regressão. Como exemplo dessa situação, é apresentada a figura 5.2, com resultados de ensaio com 1100l/h de vazão de ar.

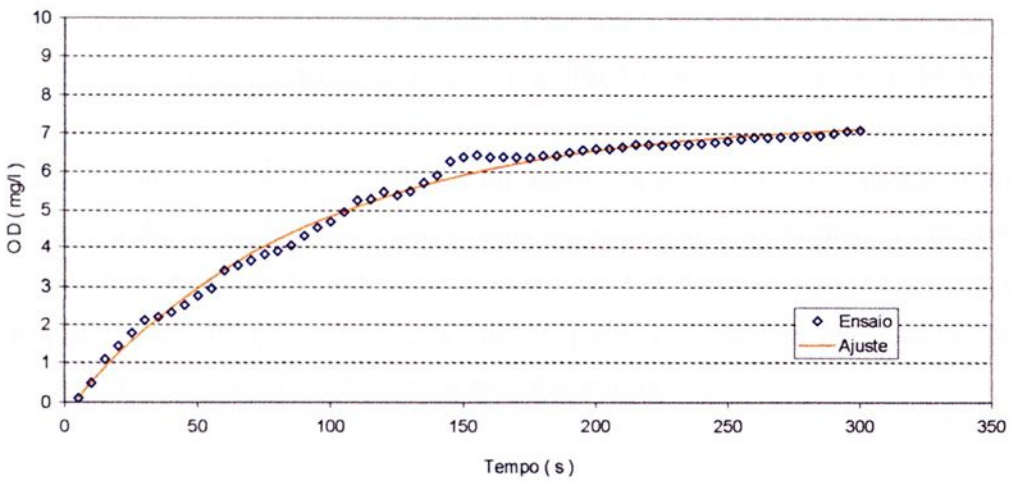


Figura 5.2: Oxigênio dissolvido em função do tempo para vazão de ar de 1100l/h e curva ajustada. Exemplo de ensaio com alterações nos dados, mas permitindo ajuste aceitável.

É importante que os dados sejam julgados qualitativamente antes do cálculo, pois curvas com comportamento incomum surgem freqüentemente no decorrer dos ensaios. Como exemplo de um ensaio com algum tipo de problema nos dados é apresentada a figura 5.3.

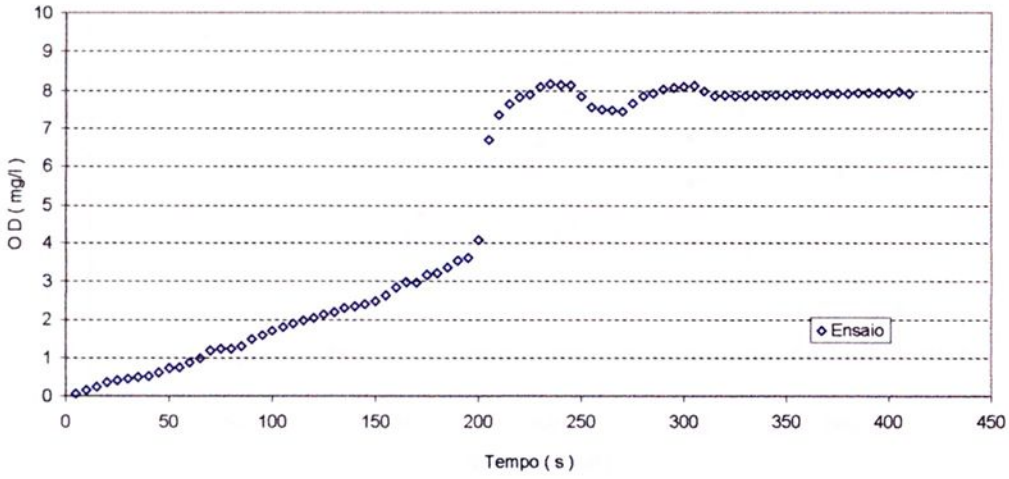


Figura 5.3: Oxigênio dissolvido em função do tempo para vazão de ar de 1500l/h. Exemplo de ensaio com dados anômalos, impossibilitando o ajuste.

A utilização de uma curva de aeração atípica levará a valores de Kla com erros grosseiros. Nessa fase da análise mostrou-se de grande ajuda a interface amigável do programa utilizado, permitindo identificar com facilidade os ensaios anômalos.

Os gráficos com todos os ajustes efetuados nos ensaios realizados com água limpa são apresentados, para documentação, no Anexo 3, permitindo uma verificação qualitativa.

Na primeira etapa de ensaios com água limpa buscou-se analisar o efeito da geometria da saída do tubo interno, livre ou pressurizada, sobre os valores do coeficiente Kla. A figura 5.4 apresenta os resultados dessa etapa, com os dados de Kla obtidos em função das vazões de ar, para as 5 vazões ensaiadas, tendo como parâmetro a geometria da saída do tubo interno.

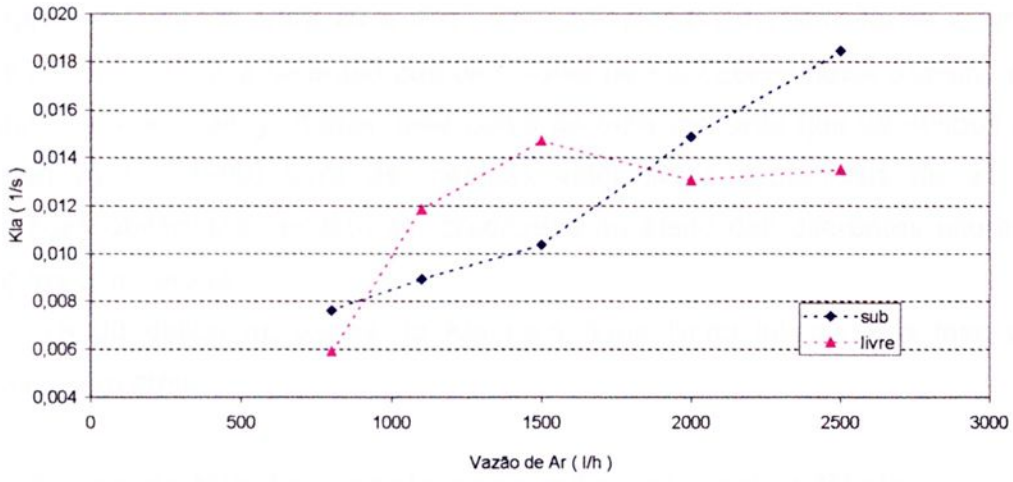


Figura 5.4: Coeficiente de transferência de oxigênio em função da vazão de ar, para água limpa e duas condições de saída do tubo interno: livre e submersa.

Os valores são crescentes com a vazão de ar, não se identificando um efeito claro da geometria da saída. Os valores situaram-se entre 0,06 e 0,018s^{-1}. Bello et al. (1985) obtiveram, para a maior relação entre áreas estudada (cerca de 0,7) valores de Kla entre 0,009 e 0,04s^{-1}, conforme apresenta a figura 3.4, para um reator de 1,80m de altura.

Para melhor comparação entre os valores obtidos com os apresentados por Bello et al. (1985), a potência injetada por volume unitário de reação foi calculada para o ensaio, conforme a equação 3.35, obtendo-se valores entre 40 e 240W/m^3. Portanto, a máxima vazão utilizada nos ensaios corresponde aproximadamente à vazão média utilizada por Bello et al (1985). Na figura 3.4 obtém-se, para abcissa 2,4 (Potência de 240W/m^3), Kla aproximadamente igual a 0,02s^{-1}, um valor próximo ao máximo observado na figura 5.4, indicando que os reatores de 1,8m de altura de Bello et al. e o utilizado neste trabalho, com cerca de 5,5m de altura, possuem valores comparáveis de Kla. Entretanto, essa comparação deve ser efetuada com cautela, uma vez que a relação entre áreas do modelo ensaiado neste trabalho é cerca de 4 vezes maior. O efeito das diferentes relações entre áreas de subida e descida será abordado mais adiante neste trabalho, item 5.4.

Os dados obtidos por Heijnen et al. (1990), para um reator de 11 metros de altura, são apresentados na figura 3.7, com Kla em h^{-1} em função da velocidade superficial em cm/s. Para fins de comparação, os resultados da figura 5.4, situam-

se aproximadamente entre 20 e 60h^{-1}, com velocidades superficiais de ar entre 1,8 e 8,8cm/s. Verifica-se então que os valores de Kla obtidos neste trabalho são da mesma ordem de grandeza, mas cerca de 50% menores que os obtidos por Heijnen et al. (1990) para as mesmas velocidades superficiais do ar. As diferenças observadas podem ser creditadas ao efeito das diferentes alturas e relações entre áreas.

Tendo obtido os dados do Kla para água limpa iniciou-se a fase dos ensaios com areia.

5.2- Dados de Kla do modelo operando com meio trifásico

Assim como no caso da água limpa, os dados originais do ensaio são apresentados no Anexo 1, e os gráficos dos ajustes efetuados com dados de todos os ensaios estão documentados no Anexo 3. As tabelas A1.6 e A1.7 no Anexo 1 apresentam o resumo dos coeficientes obtidos nos ensaios com areia, saída livre e pressurizada respectivamente, a partir do qual foram construídos os gráficos apresentados neste item.

A figura 5.5 apresenta os resultados obtidos com 50g/l, para as situações de tubo interno com saída livre e pressurizada.

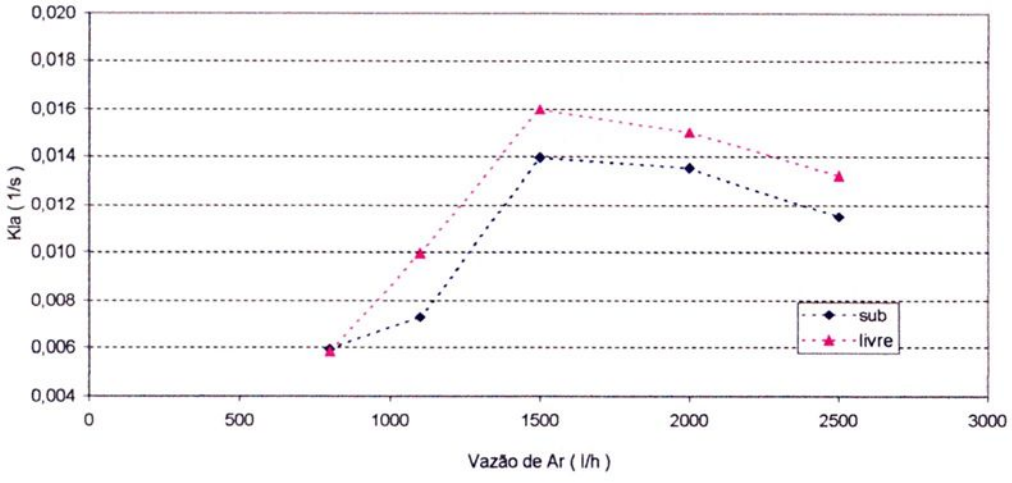


Figura 5.5: Efeito da configuração de saída livre e submersa do tubo indutor sobre o Kla em reator com 50g/l de meio suporte.

É interessante verificar que o Kla foi maior para a saída livre, exceto na menor vazão, refletindo as maiores expansões e menores velocidades de circulação que ocorrem nesta situação. Por outro lado, observações qualitativas em modelos mostraram que a saída submersa favorece os regimes 2 e 3 de circulação de bolhas, ao passo que a saída livre favorece o escape do gás, dificultando o aparecimento de bolhas no tubo externo (Dall'Aglio Sobrinho et al., 2001b). O resultado da figura 5.5 mostra que, para as condições envolvidas, os efeitos positivos da maior expansão e da menor velocidade de circulação no reator sobre o Kla, foram maiores que os causados pela maior presença de bolhas no tubo externo proporcionada pela saída submersa.

Identifica-se também uma tendência nítida de diminuição do Kla com o aumento da vazão para valores acima de 1500l/h, acarretando uma diminuição da eficiência do processo de transferência de oxigênio em relação a vazão. A explicação para esse decréscimo pode ser encontrada na mudança do regime de funcionamento do leito fluidizado, seja de homogêneo para heterogêneo ou de heterogêneo para leito com pistonamento.

O gráfico 5.6 apresenta o mesmo tipo de resultados do Kla, obtidos com a concentração de 100g/l, para as situações de saída livre e pressurizada. A menor vazão viável foi de 1000l/h, para não provocar a sedimentação da areia.

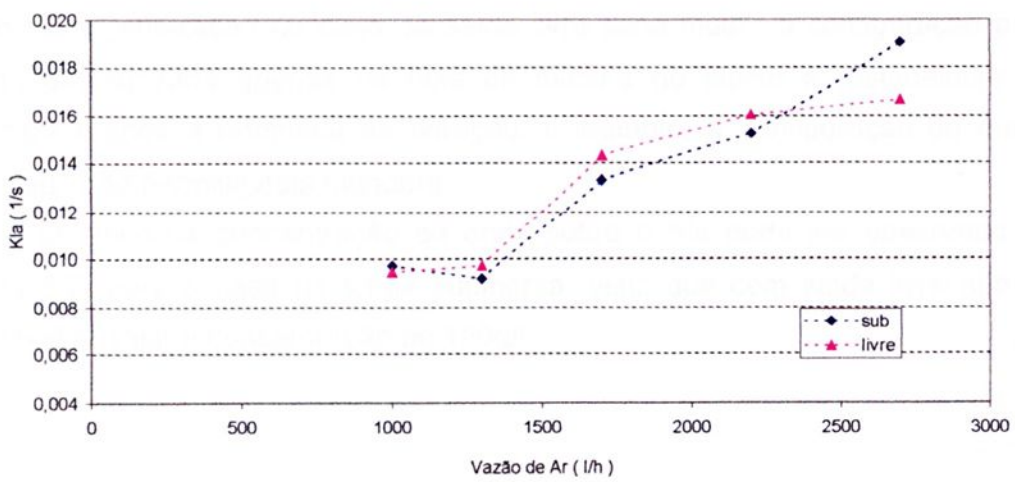


Figura 5.6: Variação do coeficiente de transferência de oxigênio em função da vazão de ar e da saída do tubo indutor em concentração de 100g/l de meio suporte.

Os dados da figura 5.6 não mostram a tendência de diminuição do Kla para as vazões maiores observada com 50g/l. Este comportamento pode ser atribuído ao fato de que a maior concentração de areia permite o funcionamento homogêneo do leito com as maiores vazões de ar, não diminuindo a área de contato entre ar e líquido.

Observa-se ainda a mesma tendência de diminuição do Kla com saída pressurizada, já observada nos ensaios com 50g/l, a menos de uma inversão para a maior vazão ensaiada. Pode-se notar ainda que a distância entre as curvas diminuiu, com exceção da maior vazão, o que indica que, com o aumento da concentração de areia, a diferença causada pela condição da saída tende a ser menos significativa.

Para a concentração de 150g/l não foi possível ensaiar a configuração de saída livre, devido a dificuldade para circular a areia e ao aparecimento de bolhas na fase de homogeneização dos produtos químicos utilizados para anular o oxigênio dissolvido na água. Os ensaios com saída submersa foram realizados normalmente, sendo de 1500l/h a vazão mínima de ar utilizada, de modo a garantir a suspensão da areia. Para viabilizar a homogeneização no caso da saída livre, tentou-se utilizar o tubo de sucção da tubulação de mistura no tubo interno, mas com isso a água do tubo externo praticamente não participava do processo. Uma possível solução para resolver o problema de suspensão da areia e de homogeneização no caso da saída livre seria mudar a configuração para saída pressurizada apenas na fase de mistura do sulfito e restabelecer as condições após a retomada da aeração. Entretanto, a configuração do reator ensaiado não permitia esta manobra.

O efeito da concentração de areia sobre o Kla pode ser observado na figura 5.7, para o caso de saída submersa, visto que com saída livre não foi possível ensaiar a concentração de 150g/l.



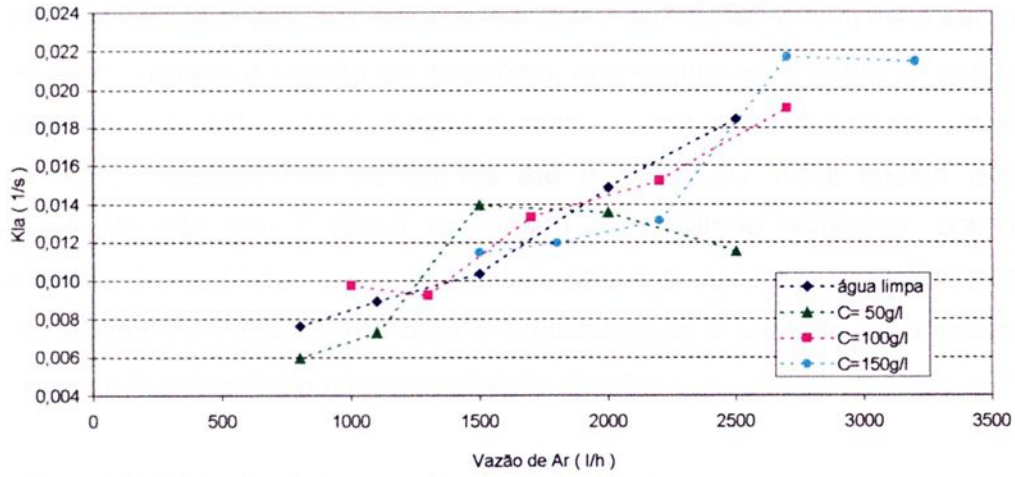


Figura 5.7: Coeficiente de transferência de oxigênio em função da vazão de ar e da concentração de areia, para saída submersa.

O que se observa na figura 5.7 é que não é possível identificar uma tendência clara, contrariamente ao esperado no início do trabalho. Isto pode ter ocorrido devido ao pequeno efeito da presença dos sólidos sobre o parâmetro analisado, ou devido ao fato da variabilidade dos resultados conseguida com o método de ensaio ser maior que o efeito da concentração de areia.

De forma geral observou-se no decorrer dos ensaios com adição de areia uma grande dificuldade na homogeneização dos produtos adicionados para consumir o oxigênio, agravada pelo alto tempo de mistura verificado no reator, conforme apresentado no item 5.6 deste trabalho. Este problema pode ser diminuído com uma modificação na metodologia de injeção do sulfito de sódio. No método tradicional a injeção é instantânea e na modificação haveria a injeção contínua de uma solução de água e sulfito de sódio, sendo que durante o tempo de injeção não seria interrompida a injeção de ar. Esse método teria a desvantagem de um maior consumo de sulfito, uma vez que a injeção do reagente deverá ocorrer por um tempo superior ao tempo de mistura do reator. Entretanto, esta desvantagem é atenuada pelo preço relativamente baixo do sulfito de sódio e também pela vantagem de não necessitar equipamento adicional.

Outra solução para facilitar a realização dos ensaios com meio trifásico seria utilizar dois gases, com nitrogênio para diminuir a saturação de oxigênio na água. Um exemplo da aplicação deste método é encontrado em Korpijarvi et al.

unesp

(1999). O início do ensaio ocorreria com o reator em regime e com meio saturado de oxigênio. Iniciada a injeção de nitrogênio, acompanha-se a curva de depleção do oxigênio no meio. Com oxigênio nulo, comuta-se novamente para ar comprimido, registrando-se as leituras até a saturação. Esse ensaio teria a vantagem de não tirar o reator do estado de equilíbrio hidráulico, pois não necessitaria de repartida, mas com a desvantagem de ser mais elaborado e caro, por necessitar de equipamento para a armazenagem e controle da pressão do nitrogênio, além do valor gasto na aquisição do gás.

5.3- Repetibilidade dos resultados de Kla

Para investigar a questão levantada no item anterior sobre a confiabilidade dos resultados obtidos, foi planejada uma extensão da fase experimental, com repetição dos ensaios em número mínimo para determinar a variabilidade estatística do ensaio adotado para determinação do Kla.

Foram efetuadas então mais seis repetições do ensaio com água limpa e saída submersa, devido à maior facilidade de realização nessas condições. A figura 5.8 apresenta os resultados de Kla obtidos em função das vazões de ar, para as 6 repetições efetuadas e para o ensaio original.

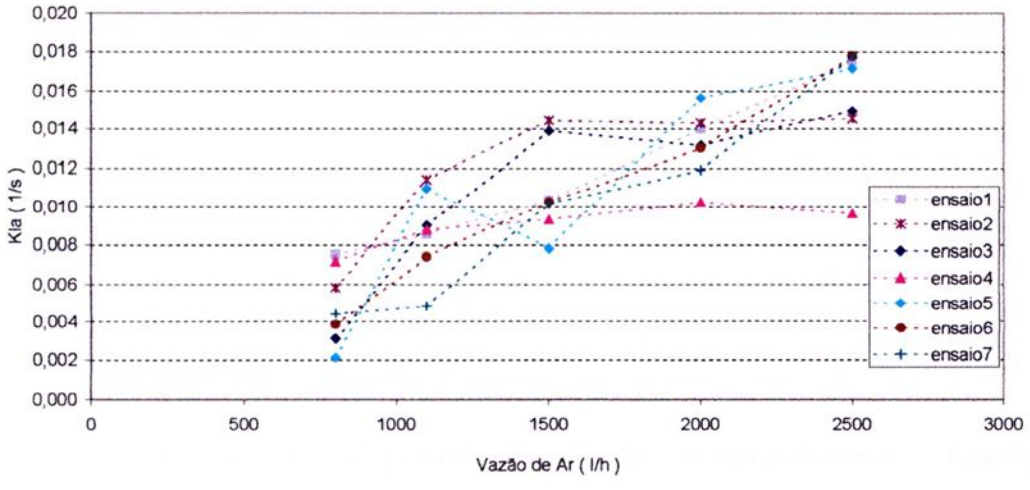


Figura 5.8: Variação do coeficiente de transferência de oxigênio em função da vazão de ar.

Observa-se na figura 5.8 uma dispersão acentuada dos valores obtidos em cada repetição. Para quantificar essa dispersão foram calculados as médias e

desvios padrão dos coeficientes de aeração obtidos para cada vazão de ar, obtendo-se a tabela 5.1.

Tabela 5.1: Valores de Kla em água limpa em função da vazão para as 7 repetições do ensaio.

Ensaio	Vazão de ar (l/h)				
	800	1100	1500	2000	2500
1	7,5E-03	8,9E-03	1,1E-02	1,5E-02	1,8E-02
2	5,8E-03	1,2E-02	1,4E-02	1,4E-02	1,5E-02
3	3,1E-03	9,0E-03	1,4E-02	1,5E-02	1,5E-02
4	7,2E-03	9,3E-03	9,9E-03	1,0E-02	9,6E-03
5	2,1E-03	1,1E-02	7,8E-03	1,6E-02	1,7E-02
6	3,8E-03	7,4E-03	1,0E-02	1,3E-02	1,9E-02
7	4,4E-03	4,8E-03	9,9E-03	1,2E-02	1,8E-02
Média	4,9E-03	8,9E-03	1,1E-02	1,4E-02	1,6E-02
s (s^{-1})	0,0021	0,0023	0,0024	0,0020	0,0031
s (%)	42,2	26,0	21,6	14,4	19,7

Obs: s = desvio padrão

Com os resultados da tabela 5.1 foi possível traçar a curva média e as margens de erro apresentadas na figura 5.9, referentes a 1 desvio padrão.

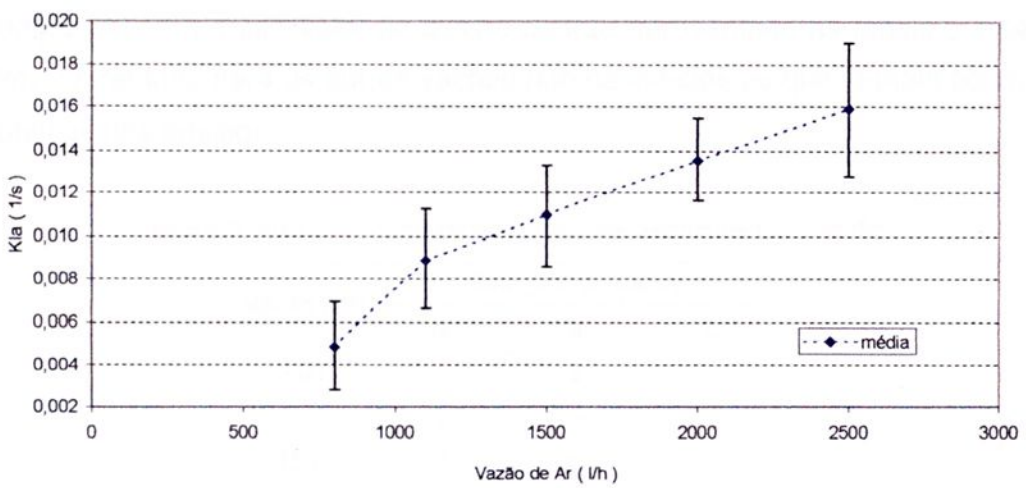


Figura 5.9: Kla médio para água limpa em função da vazão, com barras de erro de +/-1 desvio padrão.

Não era esperada uma dispersão tão acentuada dos valores obtidos nos ensaios de Kla, o que justifica uma análise mais aprofundada das causas deste comportamento.

A primeira hipótese refere-se à qualidade insuficiente dos dados, por algum erro de leitura ou mau funcionamento da sonda, não detectado durante os ensaios. Procedeu-se então a um julgamento qualitativo das curvas obtidas em todos os ensaios. As curvas foram classificadas em ordem decrescente de qualidade, a partir de inspeção visual das curvas e do ajuste obtido, em 3 categorias, denominadas A, B e C. Como resultado, do total de 35 curvas, foram classificadas 11 curvas na categoria A, 17 curvas na categoria B e apenas 7 na categoria C, indicando dados de pior qualidade relativa. Verificou-se, portanto, que a maioria dos ensaios rendeu resultados classificados como bons (classes A e B), não se podendo atribuir, em princípio, a dispersão dos resultados a uma condução descuidada dos ensaios.

Continuando a análise qualitativa das curvas obtidas, a classificação das curvas foi discriminada em função das vazões de ar dos ensaios, com o resultado apresentado na tabela 5.2.

Observa-se na tabela 5.2 que a maioria das curvas classificadas como "ruins" ocorreu nos ensaios com baixas vazões de ar. Esta observação, portanto, é compatível com o alto valor do desvio padrão apresentado na tabela 5.1 para 800l/h. Entretanto, para as outras vazões não há indícios de que tenham ocorrido problemas nos ensaios.

Tabela 5.2: Avaliação qualitativa dos ensaios discriminando a vazão.

Vazão (l/h)	Categoria da Curva		
	A	B	C
800	-	2	5
1100	1	5	1
1500	1	6	-
2000	4	2	1
2500	5	2	-
Total	11	17	7

Apesar do julgamento qualitativo apresentado na tabela 5.2 não indicar problemas graves na maioria das curvas de ajuste, procedeu-se à eliminação do



pior resultado de Kla para cada vazão, recalculando-se as médias e desvios padrão, conforme apresentado na tabela 5.3 e no gráfico da figura 5.10.

Tabela 5.3: Valores de Kla em água limpa em função da vazão, excluindo-se o pior ajuste.

Ensaio	Vazão de ar (l/h)				
	800	1100	1500	2000	2500
1	7,5E-03	8,9E-03	1,1E-02	1,5E-02	1,8E-02
2	5,8E-03	1,2E-02	1,4E-02	1,4E-02	1,5E-02
3	3,1E-03	9,0E-03	1,4E-02	1,5E-02	1,5E-02
4	7,2E-03	9,3E-03	9,9E-03		
5		1,1E-02		1,6E-02	1,7E-02
6	3,8E-03	7,4E-03	1,0E-02	1,3E-02	1,9E-02
7	4,4E-03		9,9E-03	1,2E-02	1,8E-02
Média	5,3E-03	9,6E-03	1,1E-02	1,4E-02	1,7E-02
s (s^{-1})	0,0018	0,0016	0,0021	0,0014	0,0016
s (%)	34,2	16,7	18,3	10,3	9,7

Obs: s = desvio padrão

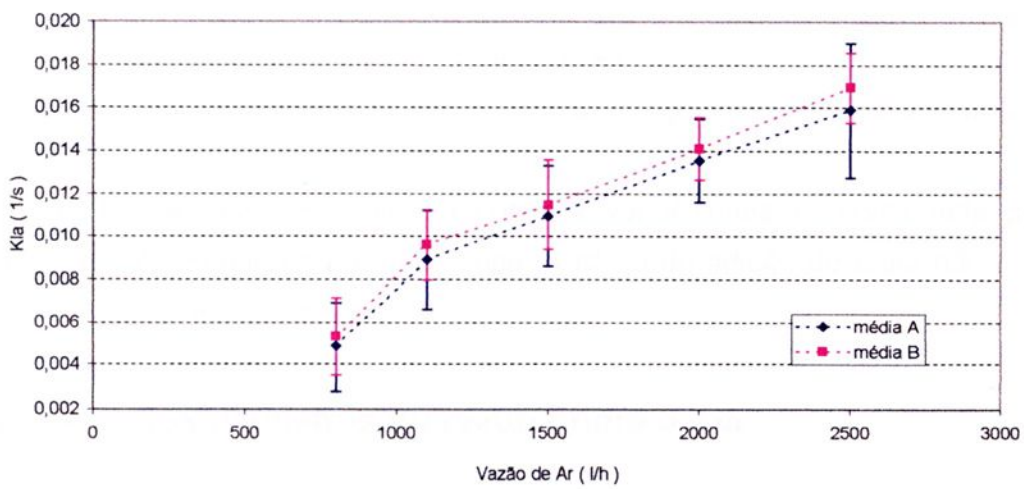


Figura 5.10: Kla médio para água limpa em função da vazão, dados originais (média A) e excluindo-se o pior resultado de cada vazão (média B). Barras de erro de +/-1 desvio padrão.

A partir dos dados das tabelas 5.1 e 5.3, pode-se verificar que o desvio padrão médio obtido nas repetições de ensaios de determinação do Kla, excluindo-se os dados da vazão 800l/h, é de 20,4%, considerando as sete repetições do ensaio. Esse valor diminui para 13,7% caso sejam excluídos os

valores do pior ensaio de cada vazão. Nessa condição o menor desvio padrão foi de 9,7% da média, para 2500l/h, e o maior foi de 18,3% para a vazão de 1500l/h.

A determinação das faixas de erro dos ensaios com água limpa permite avaliar a significância dos resultados obtidos sobre o efeito da adição de areia. Para isso o gráfico da figura 5.7 foi refeito, acrescentando-se para a água limpa o valor da media B e as faixas de erro correspondentes a 1 desvio padrão, conforme a figura 5.10. O resultado é apresentado na figura 5.11.

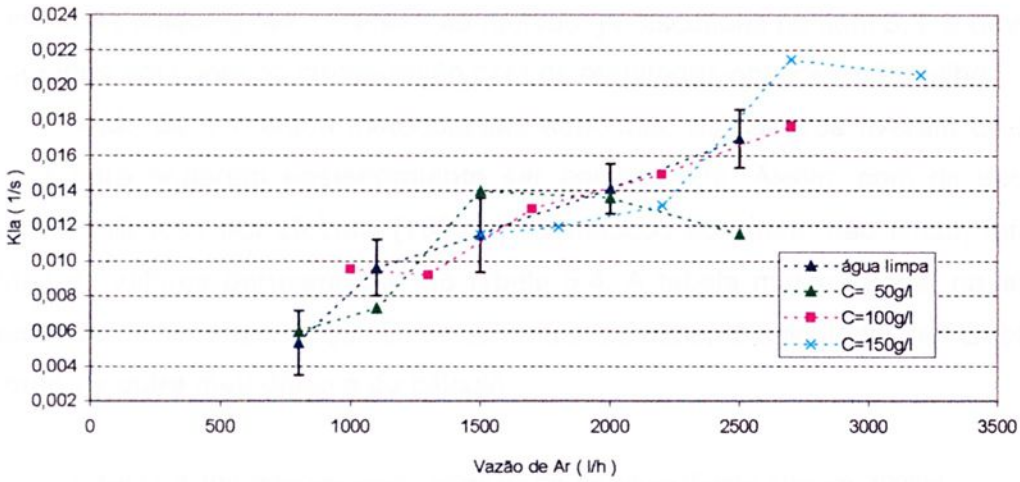


Figura 5.11: Variação do coeficiente de transferência de oxigênio em função da vazão de ar.

Verifica-se que, levando em conta a variabilidade proporcionada pela metodologia empregada para água limpa, o efeito da adição de areia não pode ser quantificado nos resultados.

5.4- Efeito dos diâmetros do reator sobre o Kla

Para verificar a influência dos diâmetros e da relação entre áreas externa e interna sobre o coeficiente global de transferência de oxigênio, resultados obtidos no trabalho foram comparados com resultados anteriores, obtidos no reator piloto de 6m de altura (Dall'Aglio Sobrinho, 2000).

O reator piloto possui 200mm de diâmetro interno e 250mm de diâmetro externo. Verifica-se, portanto, uma relação entre áreas de subida e descida diferente nos dois reatores e uma área do tubo interno 4 vezes maior, mas a mesma altura, esperando-se dados de Kla semelhantes.

unesp

Alguns dos resultados mais antigos foram calculados com metodologia de regressão linear. Nessa metodologia, os dados obtidos no ensaio são submetidos a uma linearização por meio de logaritmos, e a uma regressão linear, pelo método dos mínimos quadrados. Através do coeficiente angular da reta de regressão obtém-se o Kla. Em alguns ensaios não foi possível determinar facilmente o Kla, pois o comportamento dos gráficos fugiu dos padrões normais esperados. Nestes casos incluem-se os gráficos que possuíam vários pontos de máximo e mínimo. O fato de alguns ensaios no reator piloto se mostrarem imprecisos deve ser creditado às dificuldades inerentes ao método, já discutidas no item 5.3, e devem ser levados em conta na comparação com os resultados obtidos no trabalho.

Devido às diferentes metodologias adotadas, os cálculos tiveram de ser refeitos para poderem posteriormente ser comparados. Assim, com os dados originais utilizados por Gebara (1999b), submetidos ao ajuste não linear, foram obtidos os valores apresentados na tabela 5.4. A tabela mostra ainda, na linha superior de cada concentração C, os valores originalmente calculados por Gebara utilizando a outra metodologia de cálculo.

Tabela 5.4: Kla obtido no reator piloto de 6m de altura (Fonte: Gebara, 1999b)

C_{areia} (g/l)	Vazão de ar (l/h)						
	2000	2500	3500	4000	5000	6000	6500
água limpa	1,2E-02*		1,5E-02*		1,6E-02*		
	1,0E-02		2,2E-02		1,6E-02		
50	1,5E-02*		2,3E-02*		2,1E-02*		2,5E-02*
	6,8E-03		1,6E-02		1,8E-02		3,6E-02
100		2,1E-02*		2,3E-02*		2,4E-02*	
		2,0E-02		4,9E-02		5,5E-02	
150		3,7E-02*		3,4E-02*		5,3E-02*	
		3,0E-02		2,8E-02		7,1E-02	

* - valores originais com ajuste linear

Note-se que apenas três resultados na tabela 5.4 apresentaram valores de Kla semelhantes aos originais. Esses são os resultados de água limpa vazão 2000l/h, água limpa vazão 5000l/h e concentração 100g/l vazão 2500l/h, nos quais as duas análises (linear e não linear) aproximaram-se do mesmo resultado. Investigando-se mais detalhadamente os dados brutos de Gebara (1999b)

unesp

constatou-se que apenas os ensaios relativos aos três resultados coincidentes apresentaram uma curva de aeração típica, conforme já mostrado neste trabalho, podendo-se identificar nos demais dados diversas anomalias.

Para comparar os resultados obtidos por Gebara (1999b) com os obtidos neste trabalho, os dados foram colocados em função da velocidade superficial do ar, como forma de compensar as diferentes áreas dos tubos internos. O resultado pode ser verificado na figura 5.12, que apresenta os dados de Kla do reator piloto e os valores médios obtidos no modelo com água limpa.

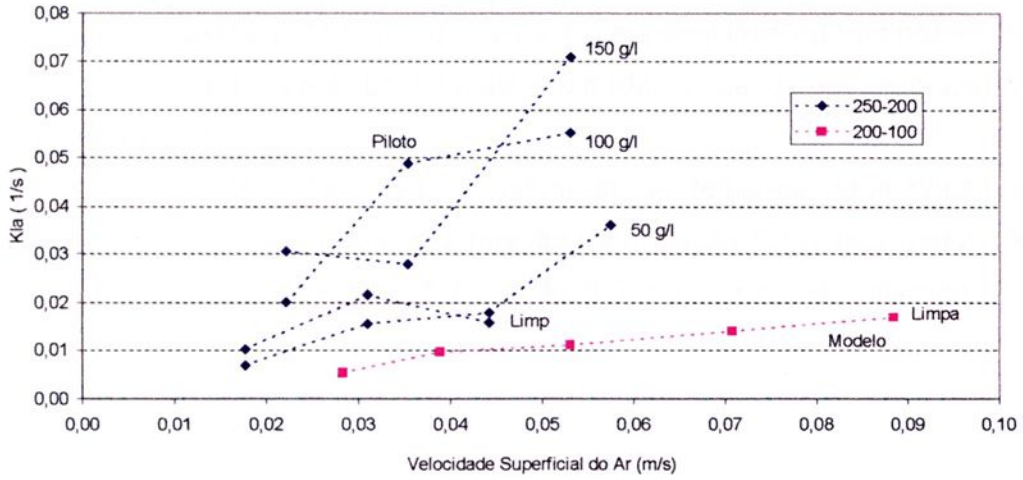


Figura 5.12: Resultados de Kla em função da velocidade superficial de ar obtidos no reator piloto com várias concentrações de areia e com água limpa no modelo.

Observa-se inicialmente uma grande disparidade nos valores, que pode ser atribuída às dificuldades para realização do ensaio nas condições de campo, uma vez que grande parte dos dados do reator piloto foi considerada qualitativamente pior que os obtidos no modelo.

Entretanto, deve-se considerar também a possibilidade de que as diferentes relações entre áreas externa e interna estejam influindo significativamente. Verifica-se que a relação entre área interna e área externa é de 0,33 no modelo experimental deste trabalho e de 1,78 no reator piloto utilizado por Gebara (1999b). Expressando de outra forma, o volume do tubo interno é de 25% do volume total no modelo e 64% no piloto. Considerando-se que a transferência de massa no tubo externo seja menor que no tubo interno, a

diferença de volume útil para o contato poderia explicar as discrepâncias observadas nos valores.

Para levar em conta os diferentes volumes úteis de reação pode ser usada a relação seguinte, escrita a partir da definição do Kla:

$$Kla\, V_T = Kla_R\, V_R + Kla_D\, V_D \qquad 5.1$$

Como não são disponíveis informações sobre o regime de circulação de bolhas no tubo de descida, pode-se supor, para uma análise inicial, que toda a transferência de massa se dá apenas no tubo interno. Essa hipótese implica em que os reatores estão operando no regime 1, sem circulação de bolhas no tubo externo, o que leva a um Kla_D bem menor que o Kla_R, podendo ser desprezado na análise aproximada.

Com essas considerações, e utilizando as relações geométricas dos reatores modelo e piloto, chega-se à relação da equação 5.2 para o reator piloto ensaiado por Gebara (1999b) e à equação 5.3 para o modelo utilizado neste trabalho.

$$Kla_{R,Piloto} = 1{,}56\, Kla \qquad 5.2$$

$$Kla_{R,Modelo} = 4\, Kla \qquad 5.3$$

Aplicando-se as equações 5.2 e 5.3 aos dados de coeficiente global de transferência de oxigênio da figura 5.12, foram obtidos os resultados apresentados na figura 5.13, relativos ao coeficiente de transferência de massa no tubo interno, considerado o volume útil de reação.

unesp

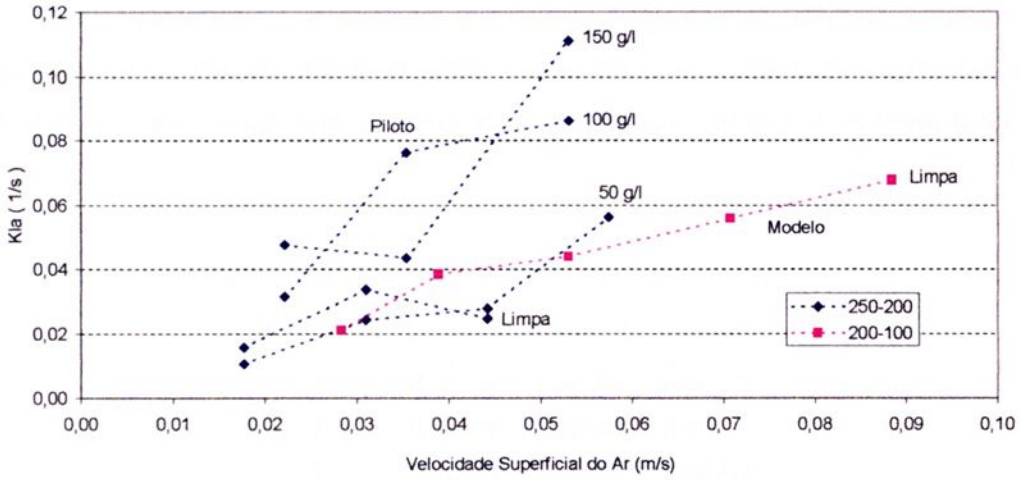


Figura 5.13: Resultados de Kla_R em função da velocidade superficial de ar obtidos no reator piloto com várias concentrações de areia e com água limpa no modelo.

No momento, não há como garantir a exatidão das considerações utilizadas para calcular o Kla_R , mas considera-se, à luz dos resultados expostos na figura 5.13, que a correção do Kla em função do volume útil de reação apresenta-se como uma alternativa útil para comparar reatores com diferentes relações entre áreas externas e internas.

5.5- Confiabilidade do ensaio de Kla e do equipamento utilizado

Devido à alta dispersão verificada nos valores do coeficiente de transferência nas repetições dos ensaios com água limpa, foi programado um ensaio auxiliar para verificar o funcionamento e a confiabilidade do equipamento em uma situação de controle mais fácil e sem a presença de bolhas de ar.

Para isso foi utilizado um tanque circular (caixa de água de 250 litros de cimento amianto) em que era promovida a circulação da água em circuito fechado por meio de uma bomba centrífuga de 1CV. A tubulação de PVC de ½" lança um jato horizontal semi-submerso para provocar aeração e movimento circular da água.

O volume de água contida no tanque foi determinado por tentativas, até obter taxas de aeração e tempos de ensaio comparáveis aos existentes no modelo de reator.

unesp

A metodologia de ensaio foi a mesma adotada nos demais ensaios de determinação do Kla. Foram realizados 3 ensaios com 7 repetições cada um, em dois dias consecutivos. Um resumo dos resultados obtidos é apresentado na tabela 5.5.

Tabela 5.5: Valores de Kla calculados no tanque circular.

Repetições	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
1	6,0E-03	5,9E-03	8,8E-03
2	6,1E-03	6,6E-03	8,9E-03
3	6,0E-03	7,2E-03	8,0E-03
4	5,2E-03	7,3E-03	8,1E-03
5	6,5E-03	9,0E-03	8,4E-03
6	6,3E-03	6,0E-03	8,1E-03
7	6,6E-03	7,1E-03	8,7E-03
Média	6,1E-03	7,0E-03	8,4E-03
s (s-1)	0,00044	0,00105	0,00036
s (%)	7,3	15,0	4,3

Obs: s = desvio padrão

Uma visualização melhor da repetibilidade alcançada é fornecida pela figura 5.14, que une os valores obtidos nas repetições de cada ensaio.

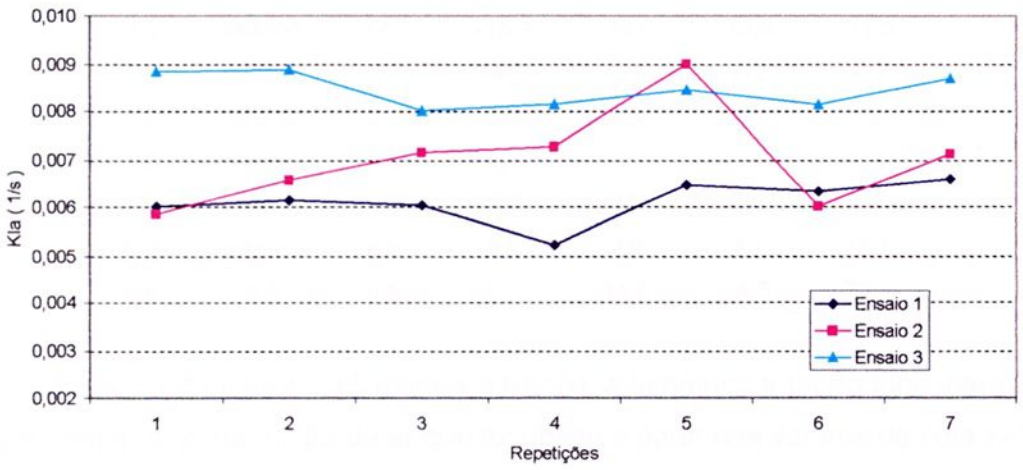


Figura 5.14: Kla obtido nos ensaios auxiliares realizados no tanque circular.

Os resultados mostram que os ensaios de verificação da metodologia e equipamento conduzidos no tanque circular produziram um desvio padrão médio

de 8,8% (sem eliminar os piores ensaios), diminuindo para 5,7% caso sejam excluídos os valores da pior repetição de cada ensaio.

Constata-se portanto que, com os resultados do ensaio em tanque circular, o equipamento e a metodologia de ensaios adotados tem potencial para fornecer resultados muito mais precisos para o coeficiente de transferência de massa que os obtidos no modelo do reator, de forma que alguma característica inerente à condição do reator com injeção de ar deve ser o principal responsável pela dispersão observada nos valores apresentados no item 5.3.

5.6- Caracterização da hidrodinâmica do reator

As expansões foram determinadas conforme a metodologia do item 4.5.2. A tabela 5.6 apresenta um quadro resumo das leituras piezométricas efetuadas em função da vazão. Os valores referem-se às cotas em relação ao nível estático da água no reator.

Tabela 5.6: Resumo das leituras piezométricas efetuadas em função da vazão.

Cota	ponto	Vazão de ar (l/h)				
z (m)		800	1100	1500	2000	2500
1,0	interno	-9,1	-12,8	-16,8	-21,8	-23,3
1,0	externo	7,9	8,6	9,5	8,6	8,8
2,0	interno	-14,1	-15,4	-10,8	-13,8	-14,5
3,0	interno	-2,4	-4,3	-6,2	-8,0	-4,2
3,0	externo	8,0	8,9	9,6	8,8	9,2
4,0	interno	1,5	0,7	-0,2	-0,8	2,3
5,0	interno	5,8	6,0	6,5	7,4	9,9
5,0	externo	8,1	8,9	9,9	9,2	13,4
5,6	NA	9,5	12,0	14,5	15,5	23,0

O gráfico da figura 5.15 mostra a fração volumétrica total do tubo interno e externo em função da vazão de ar que foi obtido a partir dos valores da cota z=1m encontrados na tabela 5.6.

unesp

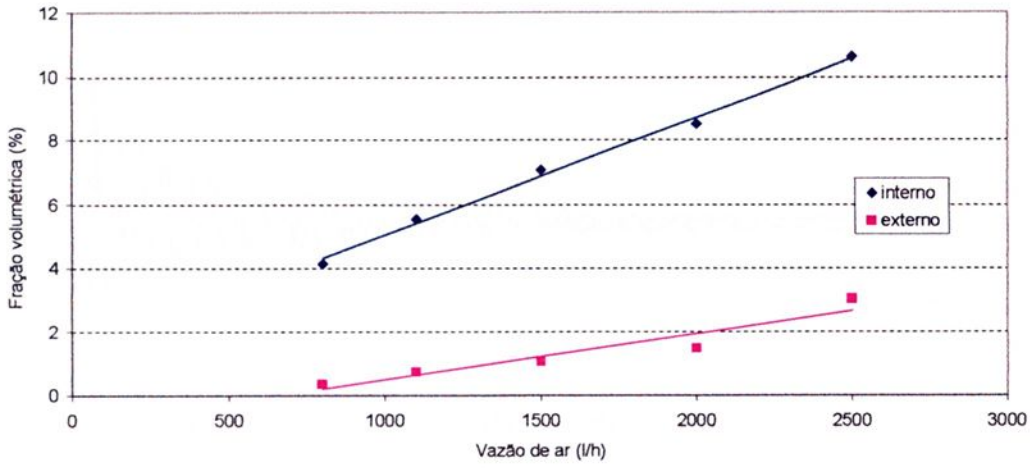


Figura 5.15: Fração volumétrica total em função da vazão de ar para cota z=1m.

Os resultados da fração volumétrica indicam uma menor presença de ar no tubo externo, resultando num maior peso específico. Estes dados comprovam o princípio motor da circulação induzida pelo jato de ar, conforme referido na introdução deste trabalho.

Observa-se ainda na figura 5.15 uma tendência de crescimento linear da fração volumétrica com a vazão de ar, resultado observado por vários autores na bibliografia (Heijnen et al., 1997, Lu et al 1999, Couvert et al. 2001, Camarasa et al 2001). A inclinação constante das retas indica ainda, conforme Heijnen et al. (1997), que não ocorreu mudança no regime de circulação de bolhas na faixa de vazões abrangida no experimento.

Os ensaios com traçador salino permitiram medir as velocidades de circulação da água no tubo externo, os tempos de circulação e o tempo de mistura do reator em função da vazão, segundo a metodologia do item 4.5.1.

O gráfico da figura 5.16 ilustra o comportamento das leituras obtidas com o equipamento. O tempo de aquisição de dados foi padronizado em 30 minutos.

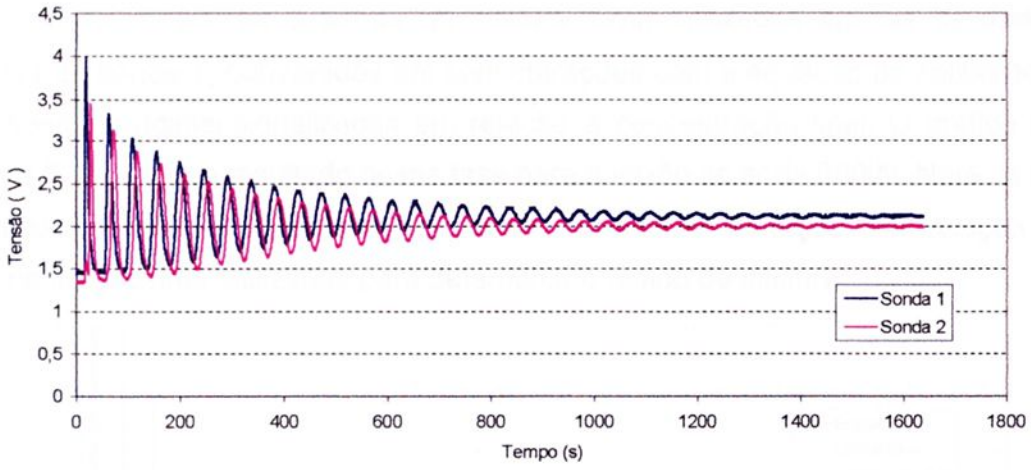


Figura 5.16: Gráfico de uma curva típica do ensaio realizado com as sondas de condutividade elétrica para medir velocidades. Ensaio com vazão de 800l/h.

Foram selecionados os primeiros picos de passagem do traçador na sonda para determinar a velocidade e o tempo de circulação, conforme mostra a figura 5.17 a seguir.

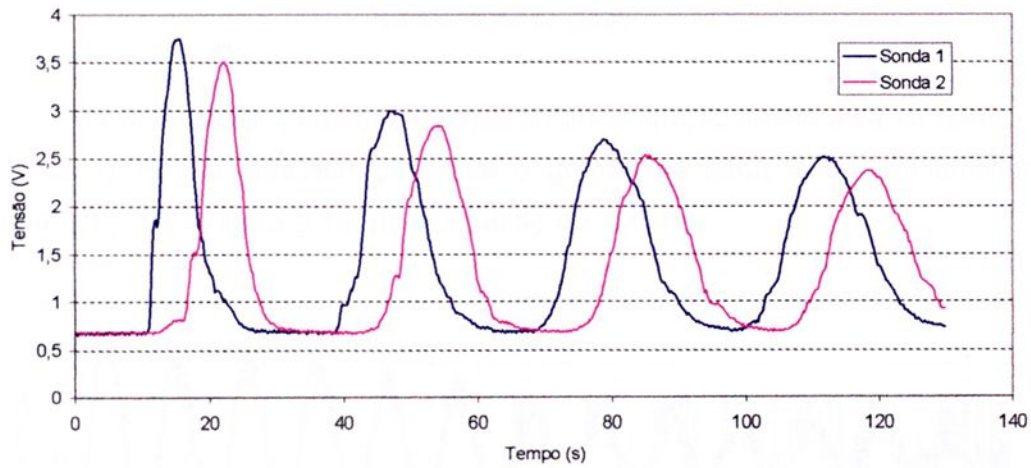


Figura 5.17: Gráfico com quatros picos de passagem para o calculo do tempo de mistura e do tempo de circulação para vazão de 2500l/h.

Os picos foram identificados visualmente apontando o mouse sobre o gráfico e anotando os valores fornecidos pela planilha utilizada. Com esse procedimento foram determinados 4 valores para a velocidade e 6 valores para o tempo de circulação, adotando-se os valores médios.

Para determinar o tempo de mistura foram utilizados apenas os dados brutos da sonda 1, convertidos em concentrações com a equação de calibragem da sonda e adimensionalizados em relação à concentração final. O gráfico da figura 5.18 ilustra o resultado dessa fase para a vazão de ar de 800l/h. Note-se no gráfico as retas delimitadoras da faixa de 5% de variação em relação à concentração final, utilizadas para determinar o tempo de mistura.

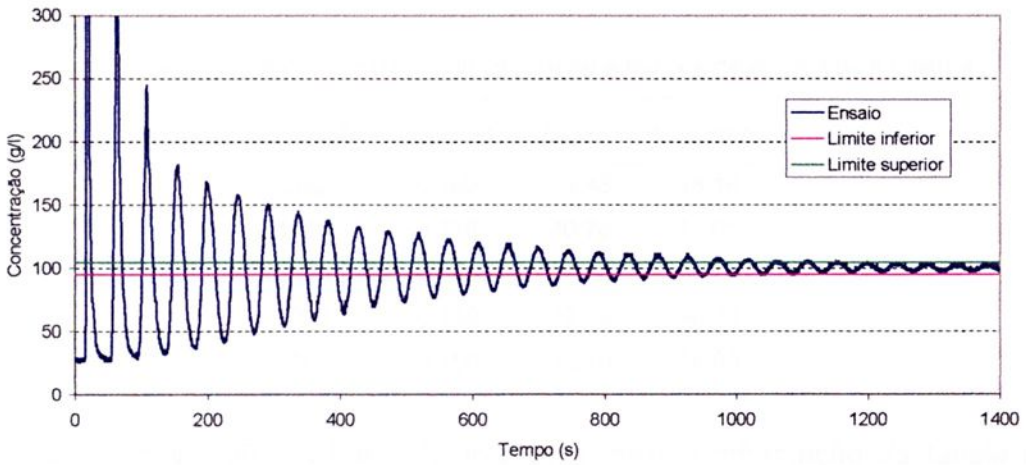


Figura 5.18: Gráfico com o ensaio de do traçador e com as retas delimitadoras na faixa de 5% para a vazão de 800l/h.

Para determinar o instante em que a concentração passa a variar dentro da faixa de +/-5% da concentração final o gráfico de cada leitura foi ampliado, conforme ilustra a figura 5.19, para a vazão de 800l/h.

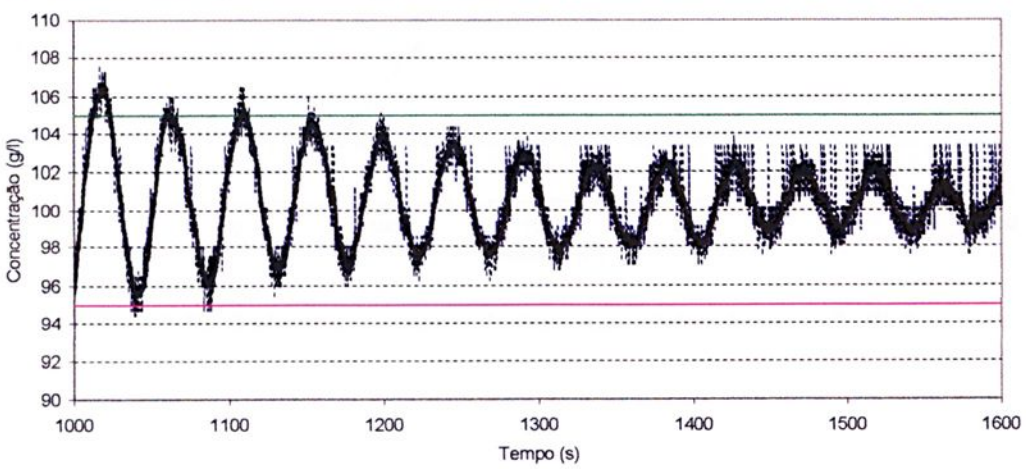


Figura 5.19: Gráfico ampliado para determinar o instante em que a concentração passa a variar dentro da faixa de +/-5% da concentração final para vazão de 800l/h.

Os tempos foram identificados visualmente no gráfico e subtraídos do tempo inicial, considerado como o início da subida da concentração no primeiro pico.

A tabela 5.7 a seguir resume os resultados obtidos nesta fase, com as velocidades de circulação da fase líquida, os tempos de circulação e os tempos de mistura em função da vazão de ar.

Tabela 5.7: Resumo das velocidades de circulação e tempos de circulação e mistura.

Vazão (l/h)	V_{circ} (m/s)	t_{circ} (s)	t_{mist} (min)
800	0,109	45,43	18,18
1100	0,128	40,78	17,05
1500	0,140	36,70	17,78
2000	0,159	33,53	20,73
2500	0,150	32,20	14,85

As figuras 5.20, 5.21 e 5.22 trazem a mesma informação da tabela na forma gráfica.

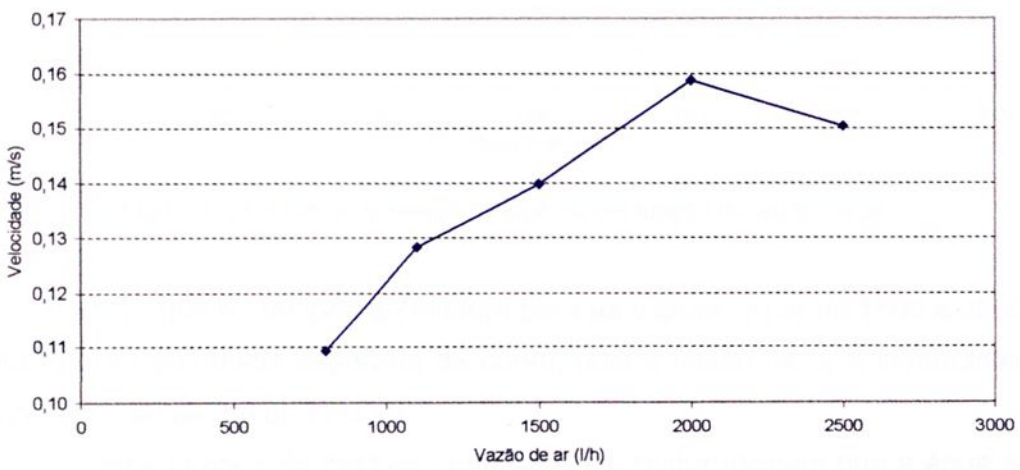


Figura 5.20: Gráfico da velocidade de circulação em função da vazão de ar.

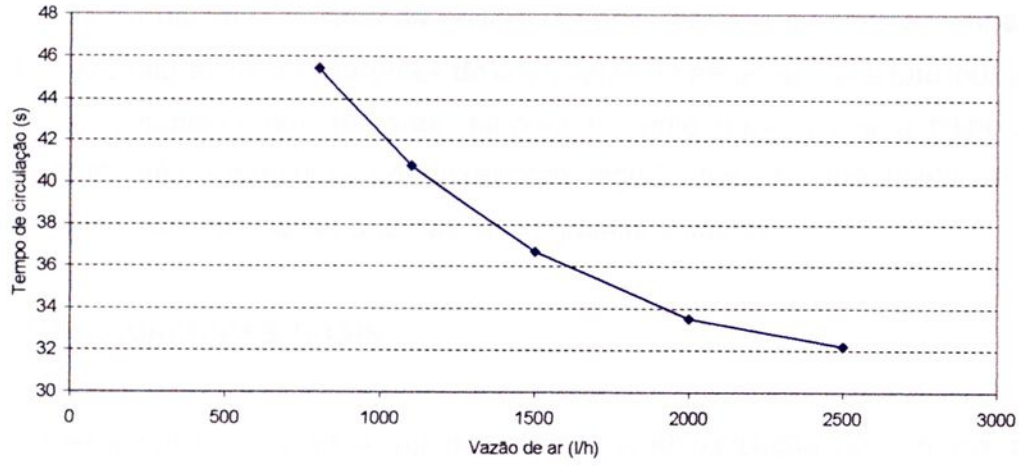


Figura 5.21: Gráfico do tempo de circulação em função da vazão de ar.

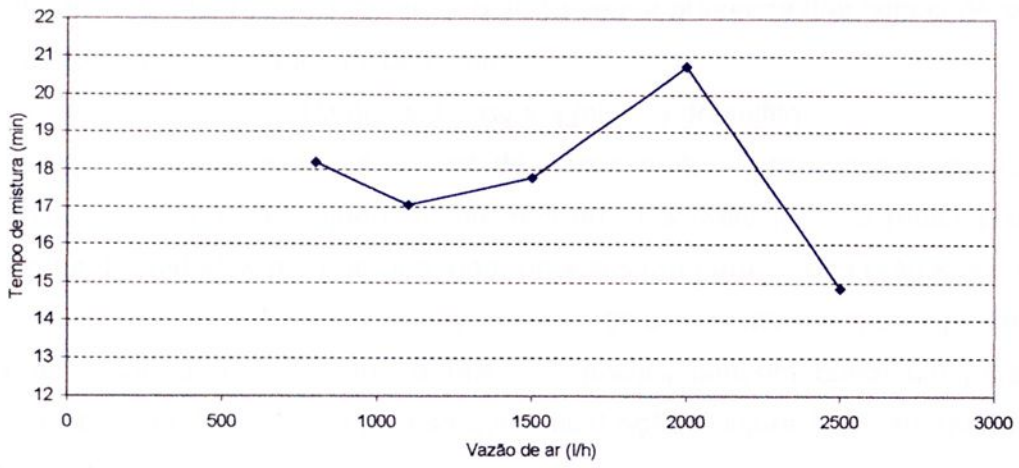


Figura 5.22: Gráfico do tempo de mistura em função da vazão de ar.

Nota-se que os tempos de mistura para as vazões de ar de 1500 e 2000l/h estão fora da tendência esperada da curva, pois a vazão de ar é inversamente proporcional ao tempo de mistura.

Os altos tempos de mistura verificados no reator indicam que a água está realizando cerca de 20 a 30 ciclos completos de circulação antes da homogeneização, configurando uma situação de baixa mistura axial. Heijnen et al. (1997) cita para os reatores estudados em seu trabalho, com diversas escalas geométricas, cerca de 7 ciclos para a mistura completa.

É possível que a condição de baixa mistura tenha ocorrido no modelo pela ausência do decantador e da zona superior de liberação do ar com diâmetro maior que o do tubo externo. Entretanto, é notável que essa configuração

hidrodinâmica bastante distinta da observada por Heijnen (op. cit) não tenha se refletido em valores muito diferentes do coeficiente de aeração. Esse fato indicaria que a zona superior dos reatores, embora eficiente para induzir a dispersão longitudinal, não representa um acréscimo significativo às oportunidades de contato e de troca de massa entre as fases gasosa e líquida.

5.7- Considerações finais

Resta como questão a ser investigada a identificação dos fatores que interferem nos ensaios com borbulhamento de ar no modelo para levar aos resultados obtidos no trabalho, uma vez que em situação com taxas de transferência comparáveis, mas em processo sem a presença das bolhas de ar, a variabilidade dos resultados foi bem menor.

Hipótese 1 – pouca mistura do sulfito

Essa condição provoca curvas de dados brutos com vários picos. Este problema ocorreu mais freqüentemente nos ensaios realizados no reator piloto, devido às dificuldades para proporcionar uma mistura perfeita dos reagentes, em virtude dos maiores volumes envolvidos. O uso de uma bomba de menor potência para promover a recirculação na fase de mistura também contribuiu para a ocorrência do problema. Observe-se como ilustração a figura 5.23, em que este problema torna-se evidente.

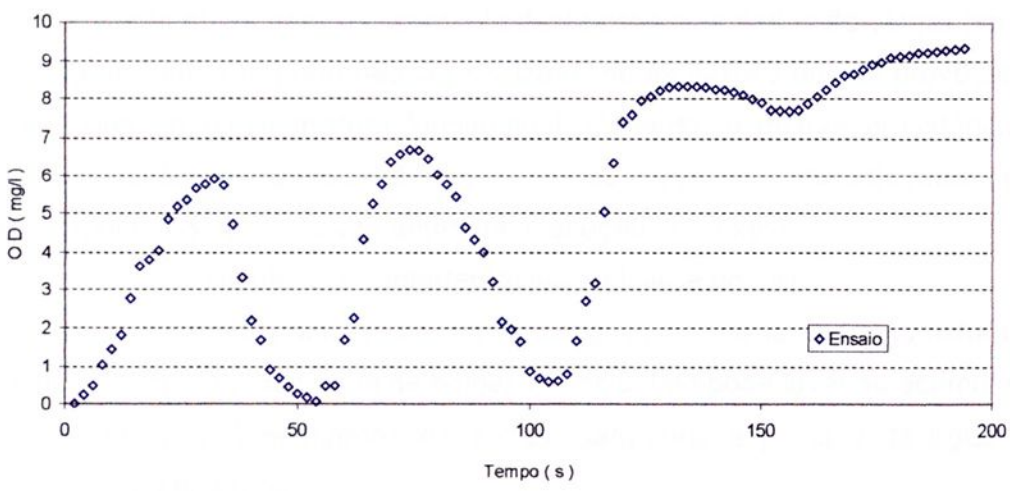


Figura 5.23: Exemplo de curva provocada por mistura insuficiente do sulfito. Dados para 6000l/h de ar e 100g/l de areia no reator de 12m (Fonte: Gebara, 1999b).

O comportamento exemplificado na figura 5.23 ocorreu em vários dos ensaios realizados no reator piloto por Gebara (1999b). Entretanto, nos ensaios realizados no modelo, durante este trabalho, foi possível aferir a mistura do sulfito, visualizando as condições de fluidização e o volume da areia decantada pelas aberturas transparentes na base do reator.

Com a visualização foi possível verificar que a bomba de recirculação inicialmente utilizada era insuficiente, de forma que, para diminuir essa causa de erro, a potência da bomba de recirculação foi aumentada. Esses fatores, bem como a análise das curvas, permitem descartar a deficiência de homogeneização como causa do problema.

Caso sejam detectadas curvas com as características da figura 5.23 em ensaios de campo, as soluções possíveis são aumentar o tempo de homogeneização e a vazão de circulação.

Hipótese 2 – escoamento com baixa mistura axial

O emprego de baixas vazões de ar provoca um escoamento tipo pistonado (plug flow) no reator, com baixa mistura axial. Essa condição hidrodinâmica explicaria a ocorrência de vários patamares na curva de aeração, caso a mistura do reagente não seja efetuada com rigor.

Esse fator, entretanto, explicaria o comportamento observado com a vazão de 800l/h, mas não as demais curvas, além do que poucas curvas apresentaram patamares.

A solução óbvia para a ocorrência deste problema seria não utilizar baixas vazões de ar, mas isso pode não ser realizável se as vazões de uso provocarem as condições de baixa mistura longitudinal. Portanto, a melhor providência é utilizar tempos de homogeneização superiores ao tempo de mistura do reator, que deve ser estimado ou verificado antes da execução do ensaio.

Hipótese 3 – interferências na leitura do OD

Devido ao funcionamento da sonda pode haver interferência na leitura do OD devido à grande quantidade de bolhas no meio. Isto pode levar ao acúmulo de bolhas de ar junto à membrana da sonda, saturando a película de água em contato com a membrana.

Para verificar a influência das bolhas de ar sobre o equipamento de medição utilizado no trabalho, foi empreendida uma investigação auxiliar com um

unesp

modelo de tanque circular, com os resultados descritos no item 5.5. Os resultados indicaram uma melhoria na média e no desvio padrão dos ensaios, confirmando que uma das causas da grande variabilidade encontrada nas repetições é a presença de bolhas em grande quantidade no meio, facilitando o acúmulo de ar na membrana da sonda medidora.

As soluções para este problema não são triviais. A mais simples seria utilizar sondas especiais dotadas de agitador mecânico junto à membrana, uma solução bem mais cara que as sondas comuns. Outra solução seria tentar um posicionamento mais adequado para evitar que bolhas de ar se acumulem na membrana, o que é dificultado pelas próprias características do meio, intensamente aerado.

Uma vez que o Kla é medido pelo aumento no tempo da concentração de oxigênio dissolvido na fase líquida, pode-se pensar, como sugestão para trabalhos futuros, num esquema de amostragem contínua da água do reator e medição após a passagem por uma câmara de liberação das bolhas. A influência de tempos de trânsito e atenuação da resposta pelo volume do compartimento de separação do ar precisam ser levados em conta numa análise cuidadosa para verificar a viabilidade desta proposta.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

6- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo geral do trabalho foi atingido, com a determinação de coeficientes de transferência de oxigênio em reatores aeróbios com leito fluidizado em circulação, contribuindo para o aumento do acervo de dados experimentais obtidos com meios trifásicos de altura comparável à dos reatores piloto em operação. Juntamente com os coeficientes de transferência de massa, foram determinados parâmetros hidrodinâmicos de funcionamento que servirão como referência em futuras utilizações dos dados com modelos teóricos de previsão. Foram determinadas as frações volumétricas do ar, velocidades de circulação induzidas e tempo de mistura, em função da vazão de ar injetado.

Foram ainda estabelecidos os limites de erro esperados nas medições, informação importante para o planejamento de futuros experimentos. Os desvios padrão das medições do Kla situaram-se entre 10% e 18% do valor estimado.

Os resultados do coeficiente de transferência de massa obtidos neste trabalho apresentaram um crescimento aproximadamente linear com as vazões de ar, sendo que a influência da areia em concentrações entre 50g/l e 150g/l não foi detectada claramente, considerando a incerteza do método de medição.

Desta forma, ao que tudo indica até o momento, o ensaio padrão recomendado pela ASCE (1990) não apresenta repetibilidade suficiente para justificar a realização de testes em protótipos com areia ao invés de água limpa, dadas as dificuldades de realização.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Os ensaios realizados no modelo confirmaram a dificuldade de realização prática em meios trifásicos do método de ensaio proposto pela ASCE (1990), em especial na fase de homogeneização dos reagentes.

Verificou-se que os coeficientes de transferência determinados neste trabalho, com tubo interno de 100mm de diâmetro, são semelhantes aos obtidos no reator piloto, com tubo indutor de 200mm de diâmetro, se for desprezada a contribuição do tubo de descida externo ao processo. Portanto, conclui-se que o efeito de escala dos diferentes diâmetros e áreas relativas de tubos interno e externo precisa ser levado em conta na comparação de coeficientes volumétricos globais de transferência de massa, tendo em vista as diferentes proporções dos volumes ativos no processo.

Algumas recomendações para a realização das medições do coeficiente de transferência com o método da ASCE (1990) podem ser apresentadas a partir deste trabalho:

- a fase de mistura do sulfito pelo tempo adequado é a principal responsável pelo sucesso da medição, de forma que é necessário conhecer aproximadamente o tempo de mistura no reator;
- como sugestão para facilitar o processo de mistura, procurar injetar o volume de reagente de forma gradual, regulando a vazão injetada de forma que o lançamento dure aproximadamente o tempo de circulação do reator;
- a presença de bolhas junto à membrana da sonda medidora constitui a maior causa de curvas anômalas de aeração, devendo-se tomar cuidados especiais de posicionamento e agitação constante do medidor;
- as curvas de aeração devem ser analisadas qualitativamente antes de submetidas à regressão não linear para evitar a ocorrência de erros grosseiros;
- um bom critério para decidir se os pontos utilizados estão bem escolhidos é o efeito da supressão de alguns pontos extremos do processo de ajuste, que não deve causar variações sensíveis no valor do Kla;

unesp

Para futuros trabalhos na mesma linha de pesquisa, apresentam-se as seguintes sugestões:

- investigar o método de substituição de gases como alternativa à determinação pelo método tradicional proposto pela ASCE;
- como forma de melhorar a homogeneização dos reagentes no meio trifásico, propõe-se a utilização de um propulsor axial no tubo interno para promover a circulação do meio, em substituição ao circuito auxiliar com bomba centrífuga adotado neste trabalho;
- investigar a possibilidade de medição do oxigênio dissolvido com um amostrador contínuo dotado de dispositivo de liberação das bolhas, permitindo que as medições sejam efetuadas sem acúmulo de ar na membrana;
- ampliar o acervo de dados experimentais com a determinação do Kla em reatores de maior altura e com diferentes relações entre área interna e externa do reator;
- determinar a influência da área de liberação de gás e da presença do decantador sobre o coeficiente de transferência de oxigênio;

Finalmente informa-se que, em cumprimento aos regulamentos do programa de pós-graduação, os resultados obtidos e dados levantados durante esta pesquisa foram divulgados, até o momento, por meio dos seguintes trabalhos científicos:

1 - GEBARA, D; DALL'AGLIO SOBRINHO, M.; RUGGERI JR., H.C.; MILANEZ, D.H.E.; HERNANDES, T.N. Desempenho de dois tipos de injetores de ar na transferência de oxigênio em reator aeróbio de leito fluidizado. In: Congresso brasileiro de engenharia sanitária e ambiental, 21, João Pessoa, 2001. Anais CD-ROM, II-154, 6p.

unesp

2 - DALL'AGLIO SOBRINHO, M.; GEBARA, D; MILANEZ, D.H.E.; HERNANDES, T.N.; RUGGERI JR., H.C. Comparação de diferentes tipos de injetores na transferência de oxigênio e no comportamento da fluidização em reatores aeróbios. In: Reunião sociedade brasileira de pesquisadores nikkeis, 9, Bauru, 2001. Anais da 9a reunião da SBPN, 2001, p.336-337.

3 - DALL'AGLIO SOBRINHO, M.; GEBARA, D; MILANEZ, D.H.E.; RUGGERI JR., H.C.; HERNANDES, T.N. Funcionamento hidráulico de reatores aeróbios com circulação por jatos de ar para tratamento biológico de efluentes. In: Simpósio brasileiro de recursos hídricos, 14, Aracaju, 2001. Anais CD-ROM, 8p.

7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASCE. *Asce standard:* Measurement of oxygen transfer in clean water. 1ª edição. American Society of Civil Engineers, 1990. 66p.

BELLO, R. A., ROBINSON, C. W., MOO-YOUNG, M. Gas holdup and overall volumetric oxygen transfer coefficient in airlift contactors. *Biotechnology Bioengineering*, v.27, p.369-381, 1985.

BENNETT, C. O., MYERS, J. E.,*Fenômenos de transporte*: Quantidade de movimento, calor e massa. 1ª edição. São Paulo: Macgraw-Hill do Brasil, 1978. p.821.

BILLERBECK, G. M., CONDORET, J. S., FONADE, C. Study of mass transfer in a novel gas-liquid contactor: the aero-ejector. *Chemical Engineering Journal*, v.72, p.185-193, 1999.

CAMARASA, E., CARVALHO, E., MELEIRO, L. A. C., MARCIEL FILHO, R., DOMINGUES, A., WILD, G., PONCIN, S., MIDOUX, N., BOUILLARD, J. Development of a complete model for an air-lift reactor. *Chemical Engineering Science*, v.56, p.493-502, 2001.

COUVERT, A., BASTOUL, D., ROUSTAN, M., LINE, A, CHATELLIER, P. Prediction of liquid velocity and gas hold-up in rectangular air-lift reactors of different scales. *Chemical Engineering and Processing*, v.40, p.113-9, 2001.

unesp

DALL'AGLIO SOBRINHO, M. *Desempenho de um reator aeróbio de leito fluidizado no tratamento de esgoto doméstico*. Ilha Solteira, 2000. 112p. Relatório final (Saneamento Ambiental) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.

DALL'AGLIO SOBRINHO, M. et al. Efeito da concentração de areia na transferência de oxigênio em modelos reduzidos de reator aeróbio de leito fluidizado em tubos concêntricos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, 2001a, João Pessoa. *Anais II-152*, CD-Rom.

DALL'AGLIO SOBRINHO, M.; GEBARA, D; MILANEZ, D.H.E.; RUGGERI JR., H.C.; HERNANDES, T.N. Funcionamento hidráulico de reatores aeróbios com circulação por jatos de ar para tratamento biológico de efluentes. In: Simpósio brasileiro de recursos hídricos, 14, Aracaju, 2001b. Anais CD-ROM, 8p.

GEBARA, D. Coeficientes de transferência de oxigênio em reator aeróbio de leito fluidizado para tratamento de esgoto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20, 1999, Rio de Janeiro. *Anais I-085*. Rio de Janeiro: ABES, 1999a, p.366-374.

GEBARA, D. Dados não publicados, informação pessoal do autor (1999b).

GEBARA, D. et al. Avaliação do desempenho de reatores de leito fluidizado no tratamento de esgoto sanitário. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27, 2000, *Anais I-016*, CD-Rom.

GEBARA, D. et al. Desempenho de dois tipos de injetores de ar na transferência de oxigênio em reator aeróbio de leito fluidizado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, 2001a, João Pessoa. *Anais II-153*, CD-Rom.

GEBARA, D. et al. Desempenho de reatores aeróbios de leito fluidizado na remoção da carga orgânica de esgoto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, 2001b, João Pessoa. *Anais II-154*, CD-Rom.



GUARDIA FILHO, L. E. *Sistema de aquisição de dados de condutividade elétrica e software para investigação da hidrodinâmica de reatores FBBR*. Ilha Solteira, 2001. 67p. Relatório Final de bolsa PIBIC-CNPq período 2000/2001 - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.

HAVELKA, P. et al. Hydrodynamic and mass transfer characteristics of ejector loop reactors. *Chemical Engineering Science*, v.55, p.535-549, 2000.

HEIJNEN, J. J. et al. Large-scale anaerobic/aerobic treatment of complex industrial wastewater using immobilized biomass in fluidized bed and air-lift suspension reactors. *Journal Chemical Engineering Technology*, v.13, p.202-208, 1990.

HEIJNEN, J. J. et al. A simple hydrodynamic model for the liquid circulation velocity in a full-scale two-and three-phase internal airlift reactor operating in the gas recirculation regime. *Chemical Engineering Science*, v.52, p.2527-2540, 1997.

HEIJNEN, J. J. et al. The biofilm airlift suspension extension reactor. *Chemical Engineering Science*, v.54, p.1909-1924, 1999.

KORPIJARVI, J., OINAS, P., REUNANEN, J. Hydrodynamics and mass transfer in an airlift reactor. *Chemical Engineering Science*, v.54, p.2255-2262, 1999.

LETZEL, M., STANKIEWICZ, A. Gas hold-up and mass transfer in gas-lift reactors operated at elevated pressures. *Chemical Engineering Science*, v.54, p.5153-5157, 1999.

LU, X., LI, H. Wavelet analysis of pressure fluctuation signals in a bubbling fluidized bed. *Chemical Engineering journal*, v.75, p.113-9, 1999.

PORTO, M. F. A., BRANCO, S. M., LUCA, S. J. Caracterização da qualidade de água. In: BRANCO, S. M. *Hidrologia Ambiental*: 1ª edição. São Paulo: USP-ABRH, 1991. Volume 3, capítulo2, p.27-66.

SILVA, E. A. *Determinação da taxa de transferência de oxigênio (OTR) em reatores FBBR*. Ilha Solteira, 2000. 32p. Dissertação (Iniciação Científica em Saneamento Ambiental) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

SOUZA, P. C. *Determinação da taxa de transferência de oxigênio (OTR) em reatores FBBR*. Ilha Solteira, 1999. 79p. Dissertação (Iniciação Científica em Saneamento Ambiental) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.

VON SPERLING, M. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*: Princípios básicos do tratamento de esgotos. 1ª edição. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 1996a. p.211.

VON SPERLING, M. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 2ª edição. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 1996b. p.243.

VON SPERLING, M. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*: Lodos ativados. 1ª edição. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 1997. p.416.

STREETER, V. L., WYLIE, E. B. *Mecânica dos fluidos*: 7ª edição. São Paulo: Mcgraw-Hill do Brasil, 1982. p.585.

VAN BENTHUM, W. A. J., VAN DER LANS, R. G. J. M., VAN LOOSDRECHT, M. C. M., HEIJNEN, J.J. Bubble recirculation regimes in an internal-loop airlift reactor. *Chemical Engineering Science*, v.54, p.3995-4006, 1999b.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

ANEXO 1

Dados brutos dos ensaios com areia

Tabela A1.1

Dados brutos dos ensaios com areia e saída superior

data	19/09/01	26/09/01	17/10/01	04/10/01	08/10/01	10/10/01	02/10/01
Q (l/h)	800	800	1000	800	800	1000	1500
C (g/l)	limpa	50	100	limpa	50	100	150
saída	livre	livre	livre	submersa	submersa	submersa	submersa
T_o (°C)	25,2	27,7	26,6	30,7	28,5	30,2	27,7
T_f (°C)	26,5	28,9	28,5	31,8	29,8	31,8	29,1
tempo (s)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)
5	0,03	0,03	0,10	0,05	0,49	0,67	0,28
10	0,20	0,24	0,24	0,17	0,52	0,80	0,64
15	0,32	0,49	0,33	0,40	0,56	1,17	1,33
20	0,45	0,70	0,51	0,54	0,62	1,37	1,70
25	0,62	0,99	0,87	0,75	0,67	1,63	2,13
30	0,74	1,36	1,25	0,96	0,73	1,78	2,47
35	0,88	1,56	1,50	1,09	0,87	1,85	2,69
40	1,15	1,75	1,83	1,28	1,37	1,97	2,84
45	1,23	1,96	2,48	1,66	1,67	2,12	2,97
50	1,45	2,20	2,95	1,89	1,91	2,30	3,19
55	1,80	2,54	3,12	2,13	2,01	2,52	3,54
60	2,06	3,16	3,28	2,23	2,26	2,77	3,87
65	2,41	3,85	3,48	2,45	2,52	3,00	4,16
70	2,60	4,07	3,65	2,52	2,64	3,20	4,43
75	2,71	4,11	3,81	2,64	2,67	3,41	4,69
80	2,80	4,16	4,04	3,04	2,76	3,55	4,84
85	2,93	3,79	4,23	3,23	2,93	3,65	4,98
90	3,00	3,55	4,37	3,36	3,02	3,71	5,11
95	3,10	3,41	4,56	3,52	3,08	3,81	5,25
100	3,29	3,29	4,67	3,66	3,18	3,89	5,37
105	3,42	3,19	4,80	3,80	3,19	3,95	5,59
110	3,46	3,17	4,98	4,01	3,34	4,10	5,79
115	3,49	3,73	5,15	4,02	3,42	4,27	5,85
120	3,52	4,59	5,31	4,10	3,76	4,39	6,06
125	3,56	4,86	5,48	4,23	4,03	4,52	6,11
130	3,69	5,07	5,60	4,31	4,05	4,64	6,16
135	3,75	5,05	5,72	4,57	3,97	4,71	6,31
140	3,86	5,13	5,83	4,73	4,00	4,77	6,35
145	3,94	5,33	5,94	4,89	4,02	4,84	6,45
150	4,02	5,45	6,04	4,98	4,06	4,88	6,58
155	4,12	5,56	6,17	5,04	4,03	4,95	6,65
160	4,14	5,58	6,27	5,09	4,31	5,04	6,75
165	4,19	6,08	6,36	5,18	4,54	5,10	6,82
170	4,29	6,48	6,40	5,23	4,73	5,08	6,91
175	4,36	6,53	6,46	5,30	4,94	5,19	6,98
180	4,45	6,37	6,57	5,45	5,05	5,26	6,99
185	4,55	6,28	6,70	5,44	5,07	5,30	7,04
190	4,59	6,35	6,79	5,49	5,18	5,39	7,07
195	4,63	6,35	6,88	5,60	5,33	5,42	7,15
200	4,81	6,40	6,93	5,71	5,48	5,44	7,20
205	4,97	6,46	6,96	5,69	5,63	5,49	7,22
210	5,10	6,72	7,01	5,78	5,75	5,53	7,30
215	5,12	6,81	7,07	5,77	5,78	5,58	7,37
220	5,14	6,87	7,16	5,80	5,79	5,59	7,38
225	5,18	6,87	7,24	5,98	5,58	5,60	7,40
230	5,30	6,86	7,26	6,00	5,56	5,62	7,43
235	5,38	6,92	7,30	6,07	5,61	5,65	7,40
240	5,45	6,98	7,35	6,08	5,74	5,66	7,50
245	5,47	6,99	7,40	6,08	5,84	5,69	7,52
250	5,49	6,94	7,45	6,09	5,72	5,70	7,51
255	5,55	7,09	7,52	6,13	5,77	5,71	7,56
260	5,57	7,40	7,55	6,25	5,94	5,71	7,58
265	5,61	7,48	7,59	6,35	5,84	5,72	7,65
270	5,63	7,49	7,63	6,35	5,71	5,72	7,65
275	5,65	7,51	7,66	6,28	5,88	5,75	7,63
280	5,79	7,61	7,71	6,31	6,10	5,79	7,62
285	5,83	7,71	7,77	6,43	6,29	5,80	7,53
290	5,99	7,70	7,80	6,39	6,37	5,80	7,67
295	6,05	7,76	7,81	6,41	6,39	5,80	7,69
300	6,11	7,90	7,83	6,46	6,47	5,77	7,69
305	6,14	7,91	7,87	6,62	6,48	5,76	7,71
310	6,16	7,81	7,63	6,67	6,42	5,73	7,72
315	6,16	7,84	7,65	6,67	6,41	5,70	7,76
320	6,22	7,78	7,64	6,71	6,44	5,66	7,79



Tabela A1.1

(continuação)

325	6,23	7,87	7,66	6,75	6,51	5,62	7,77
330	6,25	7,95	7,71	6,78	6,41	5,59	7,72
335	6,26	7,98	7,82	6,77	6,42	5,55	7,77
340	6,27	7,97	8,06	6,77	6,34	5,52	7,77
345	6,28	7,92	8,07	6,76	6,26	5,50	7,80
350	6,30	7,76	8,09	6,83	6,32	5,49	7,81
355	6,31	7,67	8,11	6,84	6,44	5,47	7,83
360	6,32	7,70	8,11	6,94	6,45	5,42	7,83
365	6,32	7,90	8,13	6,95	6,52	5,40	7,80
370	6,34	7,97	8,14	6,94	6,63	5,32	7,76
375	6,34	7,98		6,92	6,66	5,28	7,80
380	6,37	7,96		6,93	6,63		7,77
385	6,38	8,01		6,94	6,67		7,77
390	6,39	8,01		6,96	6,71		7,80
395	6,42	7,78		6,99	6,76		
400	6,45			7,01	6,78		
405				6,95	6,87		
410				6,95	6,97		
415				6,97	6,97		
420				7,01	7,01		
425				7,07	6,94		
430				7,14	6,96		
435				7,11	6,97		
440				7,13	7,07		
445				7,09	7,14		
450				7,05	7,23		
455				7,14	7,28		
460				7,16	7,30		
465				7,18	7,31		
470				7,14	7,26		
475				7,22	7,33		
480				7,29	7,36		
485				7,24	7,34		
490				7,28	7,33		
495				7,26	7,31		
500				7,23	7,07		

Obs: As células realçadas delimitam os pontos utilizados na regressão.

Tabela A1.2

Dados brutos dos ensaios com areia e saída superior.

data	19/09/01	25/09/01	28/09/01	04/10/01	08/10/01	10/10/01	02/10/01
Q (l/h)	1100	1100	1300	1100	1100	1300	1800
C (g/l)	limpa	50	100	limpa	50	100	150
saída	livre	livre	livre	submersa	submersa	submersa	submersa
T_o (°C)	25,9	28,0	26,8	26,5	25,7	27,3	25,3
T_f (°C)	27,2	29,4	28,4	27,9	26,9	29,4	26,7
tempo (s)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)
5	0,18	0,02	0,01	0,04	0,15	0,68	0,49
10	0,73	0,11	0,25	0,14	0,32	1,09	1,55
15	1,24	0,17	0,47	0,29	0,50	1,57	2,22
20	1,58	0,28	0,75	0,47	0,81	1,90	2,65
25	1,93	0,88	1,09	0,75	1,16	2,58	3,01
30	2,23	1,63	1,43	1,15	1,37	2,82	3,13
35	2,42	2,01	1,63	1,53	1,58	2,98	3,17
40	2,69	2,33	2,09	1,74	1,79	3,10	3,29
45	2,94	2,68	2,47	1,83	1,98	3,21	3,52
50	3,14	3,03	2,90	2,13	2,04	3,45	4,08
55	3,46	3,59	3,12	2,29	2,30	3,70	4,62
60	3,82	3,81	3,27	2,73	2,39	4,13	5,08
65	3,99	3,99	3,48	3,15	2,59	4,28	5,27
70	4,23	4,15	3,68	3,46	2,97	4,53	5,45
75	4,40	4,29	3,88	3,70	3,32	4,61	5,51
80	4,57	4,51	4,05	3,86	3,58	4,74	5,63
85	4,77	4,71	4,24	4,03	3,70	4,81	5,81

unesp

Tabela A1.2

(continuação)

90	4,82	4,84	4,44	4,10	4,06	4,87	6,12
95	5,13	4,96	4,62	4,39	4,26	5,01	6,31
100	5,21	5,08	4,76	4,61	4,45	5,13	6,50
105	5,32	5,29	4,91	4,79	4,53	5,30	6,60
110	5,52	5,44	5,11	5,00	4,66	5,23	6,67
115	5,61	5,57	5,24	5,11	4,77	5,39	6,67
120	5,73	5,68	5,37	5,20	4,85	5,50	6,58
125	5,79	5,75	5,47	5,36	4,99	5,83	6,71
130	5,91	5,89	5,58	5,49	5,08	5,91	7,00
135	6,00	5,99	5,71	5,62	5,24	5,91	7,23
140	6,11	6,10	5,82	5,64	5,22	5,94	7,36
145	6,15	6,20	5,89	5,79	5,32	6,03	7,41
150	6,19	6,31	6,03	6,00	5,46	6,01	7,48
155	6,30	6,41	6,16	6,15	5,53	6,18	7,51
160	6,38	6,50	6,24	6,21	5,58	6,34	7,58
165	6,44	6,57	6,31	6,25	5,61	6,44	7,64
170	6,51	6,66	6,36	6,26	5,70	6,53	7,86
175	6,59	6,76	6,42	6,40	5,76	6,66	7,81
180	6,67	6,82	6,53	6,52	5,85	6,70	7,88
185	6,66	6,89	6,57	6,72	5,93	6,71	8,00
190	6,70	6,97	6,59	6,74	5,99	6,72	8,11
195	6,76	7,04	6,73	6,77	6,14	6,79	8,14
200	6,77	7,07	6,79	6,95	6,27	6,89	8,16
205	6,87	7,12	6,85	7,12	6,34	6,96	8,21
210	6,89	7,15	6,88	7,14	6,33	7,02	8,25
215	6,93	7,18	6,95	7,08	6,33	7,10	8,27
220	6,97	7,29	7,01	7,14	6,35	7,06	8,34
225	6,96	7,34	7,04	7,17	6,41	7,11	8,31
230	6,98	7,40	7,10	7,17	6,51	7,16	8,36
235	7,10	7,45	7,13	7,28	6,57	7,19	8,19
240	7,12	7,50	7,19	7,21	6,76	7,19	8,07
245	7,16	7,59	7,23	7,39	6,88	7,26	8,08
250	7,13	7,65	7,28	7,45	6,85	7,28	8,13
255	7,17	7,65	7,31	7,39	6,88	7,23	8,19
260	7,18	7,69	7,34	7,51	6,97	7,27	8,25
265	7,21	7,72	7,36	7,55	7,06	7,40	8,36
270	7,20	7,74	7,38	7,51	7,15	7,54	8,37
275	7,24	7,80	7,43	7,59	7,21	7,67	8,37
280	7,26	7,81	7,46	7,66	7,23	7,71	8,51
285	7,30	7,87	7,49	7,72	7,24	7,73	8,61
290	7,35	7,94	7,51	7,72	7,31	7,78	8,76
295	7,32	7,95	7,56	7,72	7,32	7,79	8,67
300	7,33	7,97	7,59	7,87	7,37	7,81	8,59
305	7,30	8,05	7,60	7,95	7,40	7,83	8,65
310	7,35	8,04	7,64	7,98	7,44	7,82	8,77
315	7,38	8,07	7,66	7,95	7,56	7,82	8,75
320	7,41	8,09	7,71	7,95	7,57	7,84	8,74
325	7,41	8,10	7,71	7,99	7,55	7,70	8,65
330	7,42	8,08	7,71	8,03	7,48	7,70	8,61
335	7,44	8,17	7,64	8,01	7,52	7,84	8,77
340	7,43	8,18	7,71	7,98	7,60	7,86	8,69
345	7,42	8,19	7,74	8,01	7,66	7,85	
350	7,46	8,24	7,75	8,04	7,69	7,84	
355	7,43	8,21	7,79	8,12	7,69	7,83	
360	7,40	8,24	7,81	8,09	7,76		
365	7,45	8,28	7,84	8,14	7,74		
370	7,52	8,30	7,86	8,15	7,70		
375	7,47	8,32	7,81	8,12	7,70		
380	7,48	8,38	7,83	8,09	7,70		
385	7,46	8,39	7,83	8,12	7,74		
390	7,50	8,37	7,85	8,19	7,78		
395	7,53	8,35	7,88	8,21	7,78		
400	7,52	8,39	7,90	8,23	7,82		
405	7,48	8,43	7,92	8,18	7,86		
410	7,50	8,44	7,93	8,16	7,85		
415	7,51	8,45	7,94	8,15	7,79		
420	7,54	8,44	7,92	8,17	7,86		
425	7,53	8,41	7,93	8,22	7,88		
430	7,58	8,45	7,96	8,30	7,92		
435		8,50	7,97	8,33	7,94		
440		8,55	7,98	8,37	8,03		



Tabela A1.2

(continuação)

445	8,52	7,94	8,41	8,05
450	8,54	7,97	8,28	8,12
455	8,57	7,97	8,39	8,07
460	8,57	7,99	8,30	8,06
465	8,50	7,94	8,32	8,01
470	8,55	8,00	8,23	8,04
475	8,56	8,00		8,07
480	8,62			8,10

Obs: As células realçadas delimitam os pontos utilizados na regressão.

Tabela A1.3

Dados brutos dos ensaios com areia e saída superior

data	18/09/01	25/09/01	27/09/01	04/10/01	05/10/01	10/10/01	02/10/01
Q (l/h)	1500	1500	1700	1500	1500	1700	2200
C (g/l)	limpa	50	100	limpa	50	100	150
saída	livre	livre	livre	submersa	submersa	submersa	submersa
T_o (°C)	24,1	28,5	27,2	23,3	28,2	25,1	22,5
T_f (°C)	25,3	29,1	28,7	24,8	29,6	26,5	24,0
tempo (s)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)
5	0,02	0,08	0,09	0,07	0,32	0,35	0,01
10	0,60	0,73	0,49	0,35	1,47	0,48	0,42
15	1,02	0,31	0,91	0,68	1,94	0,72	1,14
20	1,35	0,03	1,51	1,11	2,42	1,66	1,90
25	1,94	0,00	1,82	1,44	2,75	1,97	2,61
30	2,45	0,11	2,17	1,80	2,85	2,48	3,34
35	2,79	1,92	2,63	2,19	2,99	3,05	3,68
40	3,16	2,07	3,12	2,49	3,22	3,36	3,85
45	3,45	1,18	3,57	2,74	4,13	3,35	4,15
50	3,67	0,71	3,82	3,18	4,44	3,53	4,41
55	3,80	0,26	4,14	3,55	4,76	3,81	4,70
60	4,15	0,20	4,40	3,75	4,95	4,05	5,02
65	4,35	0,75	4,62	3,90	5,09	4,31	5,42
70	4,60	1,77	4,83	4,36	5,20	4,57	5,65
75	5,01	3,21	5,05	4,63	5,36	4,88	5,87
80	5,15	3,83	5,23	4,90	5,47	5,11	6,10
85	5,35	4,08	5,41	5,13	5,71	5,63	6,36
90	5,47	4,07	5,56	5,36	5,92	5,95	6,60
95	5,62	4,00	5,75	5,55	6,06	6,05	6,77
100	5,78	3,95	5,92	5,77	5,98	6,00	6,95
105	5,88	4,11	6,04	5,90	5,90	6,07	7,07
110	6,03	4,38	6,19	5,92	5,96	6,38	7,22
115	6,14	4,90	6,33	6,02	6,01	6,74	7,39
120	6,29	5,29	6,48	6,11	6,16	6,91	7,53
125	6,38	5,69	6,54	6,34	6,28	7,03	7,67
130	6,49	5,89	6,62	6,50	6,72	7,14	7,81
135	6,59	5,97	6,71	6,73	6,82	7,26	7,92
140	6,69	6,01	6,77	6,89	6,92	7,37	8,04
145	6,70	6,04	6,86	6,93	6,92	7,44	8,15
150	6,75	6,10	6,94	7,00	7,01	7,50	8,21
155	6,81	6,16	6,90	7,19	6,94	7,60	8,29
160	6,91	6,41	7,10	7,29	6,95	7,64	8,36
165	7,04	6,61	7,16	7,45	6,99	7,71	8,41
170	7,10	6,80	7,20	7,56	7,19	7,86	8,49
175	7,16	6,82	7,28	7,56	7,42	7,86	8,55
180	7,17	6,82	7,32	7,61	7,44	7,95	8,61
185	7,22	6,99	7,36	7,71	7,43	8,03	8,56
190	7,19	6,98	7,40	7,84	7,35	8,09	8,62
195	7,24	7,08	7,45	7,93	7,45	7,85	8,65
200	7,25	7,21	7,48	7,99	7,56	7,90	8,69
205	7,31	7,31	7,50	8,08	7,60	8,07	8,78
210	7,37	7,36	7,51	8,13	7,62	7,90	8,87
215	7,42	7,41	7,56	8,11	7,57	7,91	8,95
220	7,39	7,44	7,58	8,16	7,66	7,90	9,00
225	7,34	7,50	7,63	8,15	7,62	7,95	9,07
230	7,36	7,48	7,65	8,15	7,72	8,01	9,11

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Tabela A1.3

(continuação)

235	7,39	7,49	7,68	8,21	7,67	8,08	9,17
240	7,37	7,51	7,70	8,30	7,79	8,12	9,19
245	7,37	7,52	7,71	8,24	7,80	8,15	9,20
250	7,37	7,58	7,72	8,30	7,84	8,19	9,25
255	7,40	7,67	7,73	8,41	7,80	8,20	9,27
260	7,44	7,74	7,76	8,42	7,68	8,19	9,31
265	7,49	7,77	7,77	8,50	7,67	8,22	9,30
270	7,50	7,81	7,78	8,55	7,69	8,24	9,35
275		7,83	7,83	8,50	7,65	8,26	9,38
280		7,82	7,84	8,55	7,66	8,29	9,40
285		7,84	7,81	8,53	7,69	8,39	9,39
290		7,88	7,85	8,60	7,75	8,47	9,41
295		7,90	7,89	8,63	7,80	8,56	9,43
300		7,93	7,89	8,69	8,18	8,65	9,47
305		7,94	7,89	8,72	8,19	8,64	9,49
310		7,93	7,90	8,70	8,17	8,63	9,46
315		7,94	7,92	8,71	7,80	8,67	9,51
320		7,93	7,94	8,76	7,87	8,48	9,58
325		7,93	7,91	8,76	7,87	8,48	9,62
330		7,93	7,92	8,73	7,88	8,49	9,60
335		7,98	7,94	8,70	7,89	8,69	9,61
340		8,03	7,95	8,76	7,90	8,73	9,62
345		8,05	7,92	8,78	7,93	8,56	9,63
350		8,03	7,93	8,74	7,93	8,45	9,65
355		8,07	7,93	8,79	7,94	8,45	9,65
360		8,04	7,95	8,81	7,94	8,54	9,67
365		8,10	7,98	8,81	7,98	8,72	9,65
370		8,12	7,94	8,78	7,99	8,74	9,67
375		8,13	7,94	8,79	7,91	8,78	9,70
380		8,15	7,98	8,91		8,84	9,71
385		8,16	8,00	8,95		8,87	9,70

Obs: As células realçadas delimitam os pontos utilizados na regressão.

Tabela A1.4

Dados brutos dos ensaios com areia e saída superior

data	18/09/01	25/09/01	27/09/01	03/10/01	05/10/01	09/10/01	01/10/01
Q (l/h)	2000	2000	2200	2000	2000	2200	2700
C (g/l)	limpa	50	100	limpa	50	100	150
saída	livre	livre	livre	submersa	submersa	submersa	submersa
T_o (°C)	27,0	25,6	27,0	26,5	27,3	29,9	33,2
T_f (°C)	28,2	27,3	28,6	27,4	28,5	31,7	34,9
tempo (s)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)
5	0,12	0,10	0,26	0,13	0,24	0,42	0,74
10	0,37	0,62	0,86	0,38	0,92	0,91	1,17
15	0,74	1,06	1,55	0,67	1,46	1,33	1,78
20	1,08	1,36	1,94	1,18	1,71	1,80	2,54
25	1,53	1,86	2,22	1,80	1,98	2,06	2,97
30	1,77	2,20	2,47	2,40	2,33	2,54	3,23
35	2,20	2,69	2,72	2,54	3,02	2,97	3,47
40	2,52	3,29	3,30	3,14	3,58	3,40	3,67
45	3,11	3,90	3,84	3,60	4,16	3,76	3,91
50	3,45	4,24	4,40	4,02	4,56	4,01	4,18
55	3,84	4,60	4,75	4,39	4,83	4,20	4,50
60	4,29	4,85	5,07	4,88	5,07	4,25	4,68
65	4,52	5,15	5,24	4,97	5,20	4,35	4,87
70	4,69	5,34	5,24	5,28	5,48	4,58	5,01
75	4,77	5,47	5,30	5,52	5,76	4,73	5,13
80	5,03	5,70	5,79	5,81	6,06	4,93	5,25
85	5,43	5,96	5,96	6,09	6,35	5,19	5,35
90	5,74	6,14	6,17	6,22	6,56	5,33	5,44
95	5,98	6,37	6,30	6,39	6,68	5,46	5,60
100	6,14	6,53	6,38	6,48	6,79	5,55	5,70
105	6,33	6,68	6,57	6,61	6,94	5,59	5,75
110	6,49	6,81	6,67	6,75	7,04	5,69	5,84
115	6,64	6,92	6,77	6,93	7,13	5,84	5,86



Tabela A1.4

(continuação)

120	6,79	6,97	6,86	7,12	7,24	5,92	5,89
125	6,95	7,04	6,93	7,21	7,46	6,08	5,97
130	6,98	7,19	6,98	7,27	7,52	6,08	6,00
135	7,11	7,35	7,08	7,41	7,63	6,17	6,04
140	7,19	7,44	7,21	7,49	7,75	6,27	6,06
145	7,26	7,45	7,33	7,66	7,83	6,30	6,12
150	7,34	7,48	7,35	7,68	7,92	6,30	6,15
155	7,42	7,59	7,38	7,68	7,98	6,39	6,17
160	7,50	7,63	7,47	7,77	8,01	6,44	6,23
165	7,56	7,72	7,50	7,80	8,05	6,48	6,22
170	7,62	7,81	7,47	7,84	8,14	6,51	6,26
175	7,74	7,88	7,58	8,00	8,33	6,57	6,30
180	7,79	7,91	7,61	8,10	8,34	6,62	6,30
185	7,81	7,93	7,63	8,15	8,41	6,67	6,30
190	7,84	7,96	7,64	8,18	8,50	6,74	6,28
195	7,92	8,04	7,68	8,24	8,53	6,76	6,31
200	7,94	8,06	7,44	8,33	8,59	6,81	6,33
205	8,01	8,08	7,50	8,36	8,69	6,83	6,35
210	8,09	8,12	7,76	8,32	8,75	6,87	6,37
215	8,09	8,17	7,83	8,45	8,78	6,88	6,37
220	8,12	8,20	7,87	8,53	8,78	6,91	6,32
225	8,12	8,21	7,88	8,55	8,81	6,92	6,32
230	8,11	8,24	7,88	8,59	8,91	6,97	6,35
235	8,12	8,26	7,86	8,60	8,97	7,02	6,37
240	8,09	8,33	7,89	8,59	8,96	7,05	6,37
245	8,13	8,35	7,92	8,63	8,98	7,08	6,32
250	8,17	8,38	7,94	8,65	9,01	7,05	6,30
255	8,16	8,37	7,95	8,64		7,12	6,27
260	8,21	8,42	7,98	8,58		7,23	6,25
265	8,23	8,45	8,00	8,54		7,16	6,23
270	8,24	8,47	7,94	8,54		7,13	6,21
275	8,28	8,44	8,02	8,53		7,18	6,20
280	8,30	8,47	8,03	8,55		7,10	
285		8,51	8,03	8,53		7,16	
290		8,54	8,04	8,56		7,17	
295		8,53	8,07	8,58		7,18	
300		8,54	8,08	8,52		7,13	
305		8,57	8,11			7,20	
310		8,57	8,10			7,24	
315		8,54	8,10			7,20	

Obs: As células realçadas delimitam os pontos utilizados na regressão.

Tabela A1.5

Dados brutos dos ensaios com areia e saída superior

data	18/09/01	25/09/01	16/10/01	03/10/01	05/10/01	17/10/01	01/10/01
Q (l/h)	2500	2500	2700	2500	2500	2700	3200
C (g/l)	limpa	50	100	limpa	50	100	150
saída	livre	livre	livre	submersa	submersa	submersa	submersa
T_o (°C)	25,4	23,5	30,2	23,8	25,4	29,8	30,0
T_f (°C)	26,7	24,6	31,8	25,6	26,9	31,4	32,0
tempo (s)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)	O.D. (mg/l)
5	0,08	0,03	1,05	0,83	0,77	0,54	1,42
10	0,98	0,62	1,16	1,08	1,18	0,65	2,69
15	1,49	0,85	1,57	1,47	1,44	0,94	3,37
20	1,85	0,76	1,87	2,23	1,78	1,43	3,92
25	2,26	0,61	2,44	2,75	2,01	1,93	4,34
30	2,51	0,29	2,93	3,52	2,23	2,72	4,62
35	2,89	0,40	3,36	4,24	2,60	3,16	4,79
40	3,25	0,52	3,73	4,86	3,27	3,43	5,04
45	3,73	1,03	4,06	5,26	3,73	3,66	5,29
50	4,25	1,08	4,44	5,40	4,15	4,08	5,43
55	4,58	1,15	4,64	5,70	4,60	4,44	5,66
60	4,85	0,92	4,91	6,15	4,73	4,80	5,83
65	5,10	0,85	5,04	6,33	4,81	5,17	5,94
70	5,27	1,13	5,06	6,40	5,08	5,41	6,19



Tabela A1.5

(continuação)

75	5,45	1,55	5,33	6,80	5,38	5,67	6,29
80	5,59	2,42	5,47	7,04	5,75	5,80	6,40
85	5,74	3,29	5,63	7,23	5,99	5,98	6,50
90	5,83	3,76	5,86	7,43	6,05	6,16	6,57
95	5,99	4,05	6,07	7,41	6,44	6,29	6,63
100	6,04	4,13	5,95	7,60	6,74	6,47	6,74
105	6,11	4,48	6,24	7,74	6,88	6,57	6,84
110	6,27	4,79	6,36	8,02	6,92	6,70	6,82
115	6,31	4,95	6,47	8,05	6,95	6,74	6,85
120	6,42	5,30	6,38	8,18	7,12	6,82	6,96
125	6,58	5,71	6,45	8,21	7,19	6,93	7,06
130	6,65	5,85	6,44	8,30	7,38	7,01	7,05
135	6,71	6,08	6,60	8,34	7,55	7,05	7,16
140	6,78	6,35	6,78	8,44	7,64	7,09	7,19
145	6,89	6,25	6,86	8,51	7,64	7,14	7,27
150	6,94	6,67	6,91	8,61	7,75	7,21	7,34
155	7,00	6,74	6,86	8,64	7,94	7,18	7,37
160	7,05	6,83	6,98	8,71	8,00	7,21	7,39
165	7,10	7,17	7,04	8,73	8,04	7,18	7,41
170	7,19	7,35	7,11	8,78	8,16	7,25	7,45
175	7,29	7,44	7,18	8,85	8,23	7,32	7,46
180	7,35	7,48	6,94	8,92	8,28	7,33	7,53
185	7,41	7,63	7,23	8,93	8,29	7,35	7,51
190	7,59	7,74	7,26	8,98	8,36	7,39	7,53
195	7,61	7,79	7,28	9,04	8,46	7,45	7,55
200	7,70	7,90	7,29	9,04	8,51	7,42	7,62
205	7,75	7,95	7,34	9,07	8,54	7,42	7,64
210	7,78	8,02	7,32	9,08	8,60	7,41	7,65
215	7,89	8,07	7,32	9,14	8,66	7,42	7,63
220	7,90	8,12	7,35	9,14	8,70	7,39	7,67
225	7,91	8,23	7,39	9,18	8,76	7,37	7,70
230	7,96	8,40	7,44	9,21	8,83	7,35	7,71
235	7,97	8,49	7,46	9,22	8,85	7,37	7,71
240	7,98	8,49	7,46	9,25	8,88	7,39	7,69
245	8,00	8,64	7,47	9,28	8,91	7,37	7,68
250	8,02	8,67	7,47	9,28	8,96	7,42	7,74
255	8,04	8,70	7,47	9,32	8,97	7,42	7,79
260	8,05	8,77	7,47	9,33	9,00	7,41	7,78
265	8,07	8,82	7,49	9,35	9,07	7,44	7,78
270	8,10	8,86	7,51	9,34	9,08	7,32	7,75
275	8,13	8,89	7,53	9,39	9,08	7,32	7,77
280	8,14	8,89	7,54	9,39	9,08		7,76
285	8,19	8,89	7,56	9,39	9,17		7,81
290	8,21	8,90	7,57	9,42	9,12		7,83
295	8,23	8,94	7,56	9,42	9,13		7,83
300	8,25	8,94	7,56	9,42	9,16		7,85
305	8,25	9,00	7,58	9,42	9,21		7,87
310		9,04	7,59	9,43	9,26		7,90
315		8,99	7,57	9,49	9,28		7,90
320		9,05	7,57	9,46	9,32		7,91
325		9,08	7,59	9,43	9,33		7,89
330			7,60	9,42	9,34		7,87
335			7,61		9,35		7,85
340			7,62		9,38		7,87
345			7,62		9,40		7,86
350			7,65		9,40		7,90
355			7,65		9,39		7,88
360					9,40		7,92
365					9,41		7,88
370					9,44		
375					9,42		
380					9,41		
385					9,42		
390					9,42		
395					9,45		
400					9,45		

Obs: As células realçadas delimitam os pontos utilizados na regressão.



Tabela A1.6

Resumo de resultados do ajuste (ensaios com areia saída livre)

ensaio	C areia	vazão	Cs	C0	Kla	resíduo	erro	sigmaCs	sigmaC0	sigmaKla
1	limpa	800	7,22	-0,28	5,9E-03	1,453	0,137	0,0850	0,0615	0,0002
2	limpa	1100	7,54	-0,13	1,2E-02	0,153	0,053	0,0213	0,0316	0,0001
3	limpa	1500	7,69	-0,61	1,5E-02	0,255	0,071	0,0244	0,0465	0,0002
4	limpa	2000	8,64	-1,04	1,3E-02	1,272	0,155	0,0583	0,0968	0,0003
5	limpa	2500	8,25	-0,11	1,3E-02	1,465	0,160	0,0512	0,1000	0,0004
6	50	800	9,46	-0,17	5,8E-03	8,982	0,394	0,4615	0,1921	0,0006
7	50	1100	8,45	0,57	9,9E-03	1,826	0,154	0,0435	0,0809	0,0002
8	50	1500	8,00	0,31	1,6E-02	4,461	0,285	0,0792	0,1917	0,0008
9	50	2000	8,56	-0,85	1,5E-02	0,615	0,110	0,0371	0,0729	0,0003
10	50	2500	9,33	1,59	1,3E-02	0,841	0,137	0,0680	0,0890	0,0004
11	100	1000	8,32	0,30	9,5E-03	0,557	0,101	0,0569	0,0561	0,0002
12	100	1300	8,04	-0,63	9,7E-03	0,306	0,066	0,0220	0,0347	0,0001
13	100	1700	7,98	-0,65	1,4E-02	0,177	0,054	0,0145	0,0340	0,0001
14	100	2200	8,09	-0,50	1,6E-02	0,947	0,128	0,0328	0,0854	0,0003
15	100	2700	7,53	0,55	1,7E-02	0,438	0,099	0,0357	0,0700	0,0004

Tabela A1.7

Resumo de resultados do ajuste (ensaios com areia saída submersa)

ensaio	C areia	vazão	Cs	C0	Kla	resíduo	erro	sigmaCs	sigmaC0	sigmaKla
16	limpa	800	7,38	-0,33	7,6E-03	0,491	0,080	0,0337	0,0387	0,0001
17	limpa	1100	8,48	-0,31	8,9E-03	0,537	0,094	0,0475	0,0500	0,0002
18	limpa	1500	9,13	-0,73	1,0E-02	0,518	0,091	0,0358	0,0509	0,0001
19	limpa	2000	8,82	0,05	1,5E-02	0,344	0,087	0,0368	0,0593	0,0002
20	limpa	2500	9,31	0,95	1,8E-02	0,703	0,119	0,0327	0,0863	0,0004
21	50	800	7,59	1,04	5,9E-03	2,638	0,177	0,0906	0,0775	0,0002
22	50	1100	8,31	-0,34	7,3E-03	1,345	0,124	0,0431	0,0572	0,0001
23	50	1500	7,94	0,35	1,4E-02	1,921	0,202	0,0859	0,1328	0,0006
24	50	2000	9,26	-0,48	1,4E-02	0,819	0,132	0,0584	0,0858	0,0003
25	50	2500	9,52	-0,14	1,1E-02	1,093	0,129	0,0393	0,0734	0,0002
26	100	1000	6,26	0,47	9,7E-03	0,402	0,087	0,0508	0,0494	0,0003
27	100	1300	8,09	0,75	9,2E-03	1,349	0,153	0,0811	0,0832	0,0003
28	100	1700	8,62	0,37	1,3E-02	1,871	0,202	0,0952	0,1309	0,0006
29	100	2200	7,13	-0,06	1,5E-02	0,366	0,089	0,0350	0,0608	0,0003
30	100	2700	7,78	0,15	1,9E-02	0,176	0,084	0,0720	0,0719	0,0006
31	150	1500	8,01	-0,08	1,1E-02	0,358	0,085	0,0449	0,0520	0,0002
32	150	1800	8,88	0,52	1,2E-02	1,586	0,199	0,1462	0,1295	0,0006
33	150	2200	9,63	-0,42	1,3E-02	1,108	0,127	0,0309	0,0758	0,0002
34	150	2700	6,39	0,12	2,2E-02	0,192	0,077	0,0352	0,0655	0,0005
35	150	3200	7,56	1,48	2,1E-02	1,105	0,168	0,0568	0,1365	0,0010

unesp

ANEXO 2

Dados brutos dos ensaios com água limpa

Tabela A2.1

Dados brutos dos ensaios com água limpa (vazão de 800l/h)

data	18/09/01	26/10/01	07/11/01	09/11/01	13/11/01	21/11/01
ensaio	1	2	3	4	5	6
T_o (°C)	27,1	25,7	33,4	33,0	30,0	29,3
T_f (°C)	28,4	27,2	35,0	34,7	30,7	30,7
ΔT (°C)	1,3	1,5	1,6	1,7	0,7	1,4
média T(°C)	28	26	34	34	30	30
tempo (s)	O.D.(mg/l)	O.D.(mg/l)	O.D.(mg/l)	O.D.(mg/l)	O.D.(mg/l)	O.D.(mg/l)
5	0,01	0,16	0,31	0,05	0,21	0,28
10	0,22	0,27	0,65	0,12	0,40	0,62
15	0,36	0,33	0,78	0,24	0,61	0,75
20	0,50	0,43	1,21	0,35	0,62	0,85
25	0,64	0,62	1,38	0,52	0,67	0,98
30	0,76	0,60	1,60	0,69	0,69	1,08
35	0,93	0,72	1,65	0,95	0,77	1,30
40	1,20	0,79	1,78	1,07	0,80	1,43
45	1,26	0,88	1,84	1,20	0,94	1,59
50	1,54	1,01	2,02	1,25	1,04	1,69
55	1,88	1,08	2,10	1,29	1,08	1,90
60	2,11	1,28	2,45	1,30	1,17	2,08
65	2,47	1,73	2,79	1,37	1,25	2,17
70	2,70	1,81	2,88	1,45	1,46	2,35
75	2,78	1,79	3,00	1,54	1,54	2,45
80	2,84	1,90	3,24	1,62	1,85	2,56
85	2,96	1,96	3,38	1,68	1,99	2,67
90	3,04	2,07	3,45	1,68	2,11	2,78
95	3,14	2,46	3,58	1,72	2,22	2,82
100	3,31	2,38	3,67	1,84	2,30	2,89
105	3,44	2,45	3,77	1,97	2,41	3,04
110	3,46	2,67	3,82	2,08	2,51	3,25
115	3,49	2,79	3,96	2,15	2,65	3,29
120	3,52	2,91	4,09	2,19	2,77	3,38
125	3,56	2,94	4,20	2,34	2,93	3,48
130	3,69	3,01	4,41	2,34	3,08	3,71
135	3,75	3,22	4,49	2,36	3,24	3,78
140	3,86	3,32	4,59	2,39	3,32	3,87
145	3,94	3,40	4,66	2,40	3,49	3,95
150	4,03	3,50	4,64	2,49	3,62	4,06
155	4,14	3,76	4,67	2,63	3,72	4,10
160	4,16	3,86	4,85	2,68	3,78	4,18
165	4,20	4,04	4,85	2,81	3,89	4,21
170	4,29	4,01	4,77	2,89	4,04	4,31
175	4,36	4,00	4,87	2,92	4,11	4,42
180	4,45	4,09	4,96	2,98	4,28	4,57
185	4,55	4,27	5,08	3,11	4,40	4,66
190	4,59	4,39	5,18	3,18	4,47	4,72
195	4,63	4,39	5,28	3,25	4,57	4,83
200	4,81	4,51	5,37	3,19	4,65	4,91
205	4,97	4,68	5,35	3,15	4,73	5,01
210	5,10	4,75	5,49	3,18	4,80	5,16
215	5,12	4,84	5,61	3,36	4,90	5,25
220	5,06	5,01	5,70	3,43	4,97	5,38
225	5,18	5,02	5,81	3,56	5,01	5,35
230	5,30	5,06	5,82	3,68	5,05	5,31
235	5,38	5,03	5,78	3,81	5,17	5,43
240	5,45	5,15	5,79	3,85	5,22	5,47
245	5,47	5,27	5,82	3,86	5,31	5,57
250	5,49	5,31	5,82	3,93	5,35	5,63
255	5,55	5,38	5,90	4,05	5,44	5,57
260	5,57	5,39	5,95	4,20	5,47	5,64
265	5,61	5,50	6,01	4,39	5,57	5,80
270	5,63	5,56	6,07	4,35	5,65	5,88
275	5,65	5,58	6,09	4,39	5,67	5,98
280	5,79	5,68	6,13	4,59	5,74	6,06
285	5,83	5,74	6,15	4,74	5,73	6,11
290	5,99	5,82	6,17	4,84	5,80	6,18
295	6,05	5,90	6,20	4,95	5,82	6,23
300	6,11	5,97	6,22	4,98	5,93	6,29
305	6,14	6,01	6,23	5,11	5,95	6,34
310	6,16	6,05	6,28	5,30	5,96	6,37
315	6,16	6,14	6,19	5,24	6,00	6,34
320	6,22	6,22	6,26	5,26	6,13	6,49



Tabela A2.1

(continuação)

325	6,23	6,28	6,27	5,34	6,18	6,54
330	6,22	6,34	6,33	5,34	6,21	6,57
335	6,26	6,37	6,28	5,34	6,29	6,60
340	6,27	6,41	6,30	5,35	6,29	6,68
345	6,28	6,47	6,36	5,33	6,29	6,67
350	6,32	6,49	6,47	5,33	6,40	6,71
355	6,29	6,54	6,54	5,34	6,43	6,65
360	6,31	6,58	6,46	5,32	6,48	6,72
365	6,29	6,59	6,43	5,32	6,57	6,71
370	6,34	6,62		5,28	6,65	6,81
375	6,34	6,69		5,24	6,68	6,88
380	6,37	6,87		5,26	6,62	6,89
385	6,46	7,10		5,28	6,53	6,93
390	6,46	7,18		5,28	6,59	6,94
395	6,45	7,21		5,31	6,67	6,85
400	6,47	7,25		5,42	6,70	6,97
405	6,38	7,24		5,52	6,72	7,02
410	6,38	7,23		5,66	6,87	6,99
415	6,39	7,20		5,73	6,84	7,04
420	6,35	7,22		5,87	6,88	7,01
425	6,34	7,36		5,93	6,96	7,00
430	6,43	7,35		5,93	7,02	7,07
435	6,44	7,40		5,97	7,03	6,99
440	6,44	7,44		6,03	7,02	7,06
445	6,49	7,45		6,03	7,09	7,11
450	6,50	7,45		6,05	7,06	7,19
455	6,52	7,51		6,09	6,97	7,22
460	6,56	7,53		6,10	7,05	7,23
465	6,51	7,53		6,15	7,02	7,21
470	6,39	7,58		6,19	7,05	7,23
475	6,42	7,62		6,20	7,10	7,28
480	6,47	7,63		6,22	7,14	7,28
485		7,70		6,22		7,26
490		7,75		6,22		7,30
495		7,73		6,26		7,34
500		7,77		6,27		7,33
505		7,76				
510		7,77				
515		7,82				
520		7,87				

Obs: As células realçadas delimitam os pontos utilizados na regressão.

Tabela A2.2

Dados brutos dos ensaios com água limpa (vazão de 1100l/h)

data	19/09/01	24/10/01	07/11/01	09/11/01	13/11/01	21/11/01
ensaio	1	2	3	4	5	6
T_o (°C)	26,7	32,0	30,9	29,3	27,2	26,7
T_f (°C)	28,0	33,4	31,9	31,4	28,8	28,2
ΔT (°C)	1,3	1,4	1,0	2,1	1,6	1,5
média T(°C)	27	33	31	30	28	27
tempo (s)	O.D.(mg/l)	O.D.(mg/l)	O.D.(mg/l)	O.D.(mg/l)	O.D.(mg/l)	O.D.(mg/l)
5	0,02	0,44	0,08	0,11	0,47	0,12
10	0,24	0,86	0,16	0,49	0,66	0,45
15	0,51	1,28	0,31	1,07	0,89	0,62
20	0,88	1,56	0,49	1,42	1,20	0,83
25	1,28	1,64	0,69	1,77	1,48	1,21
30	1,83	1,82	1,00	2,12	1,64	1,48
35	2,34	1,90	1,36	2,20	1,84	1,63
40	2,68	2,12	1,66	2,33	2,04	1,77
45	3,03	2,23	1,94	2,52	2,13	1,90
50	3,33	2,63	2,18	2,77	2,33	1,97
55	3,52	2,79	2,34	2,95	2,52	2,18
60	3,79	2,86	2,53	3,40	2,67	2,33
65	4,04	3,10	2,69	3,53	2,88	2,45
70	4,24	3,33	2,89	3,65	3,12	2,69



Tabela A2.2

(continuação)

75	4,56	3,52	3,03	3,80	3,27	2,95
80	4,92	3,64	3,27	3,89	3,52	3,06
85	5,09	3,84	3,45	4,04	3,75	3,09
90	5,33	3,97	3,63	4,30	3,93	3,24
95	5,50	4,15	3,85	4,52	4,15	3,48
100	5,67	4,32	4,01	4,68	4,23	3,60
105	5,87	4,79	4,13	4,95	4,42	3,74
110	5,92	5,03	4,26	5,26	4,52	4,04
115	6,23	5,12	4,37	5,29	4,64	4,14
120	6,31	5,16	4,51	5,48	4,72	4,45
125	6,42	5,27	4,69	5,39	4,89	4,51
130	6,62	5,36	4,78	5,50	4,93	4,61
135	6,71	5,55	4,87	5,70	5,05	4,73
140	6,83	5,56	5,01	5,90	5,17	4,81
145	6,89	5,65	5,17	6,26	5,31	4,95
150	7,01	5,73	5,19	6,37	5,42	5,09
155	7,10	5,77	5,24	6,43	5,52	5,16
160	7,21	5,84	5,35	6,36	5,56	5,30
165	7,25	5,89	5,40	6,37	5,66	5,37
170	7,29	5,95	5,52	6,36	5,85	5,41
175	7,40	5,97	5,59	6,34	5,94	5,58
180	7,48	6,09	5,66	6,40	6,08	5,61
185	7,54	6,10	5,74	6,40	6,12	5,70
190	7,61	6,16	5,77	6,49	6,16	5,75
195	7,69	6,23	5,81	6,55	6,22	5,96
200	7,77	6,29	5,88	6,58	6,27	6,07
205	7,76	6,30	5,95	6,58	6,28	6,16
210	7,80	6,32	6,03	6,62	6,35	6,23
215	7,86	6,33	6,09	6,70	6,46	6,30
220	7,87	6,36	6,09	6,70	6,52	6,45
225	7,97	6,46	6,11	6,68	6,62	6,55
230	7,99	6,50	6,10	6,70	6,69	6,66
235	8,03	6,52	6,23	6,70	6,70	6,70
240	8,07	6,53	6,26	6,72	6,73	6,74
245	8,06	6,60	6,27	6,75	6,74	6,88
250	8,08	6,67	6,28	6,79	6,76	6,99
255	8,20	6,68	6,30	6,84	6,79	7,04
260	8,22	6,69	6,36	6,88	6,87	7,08
265	8,26	6,73	6,40	6,89	6,88	7,14
270	8,23	6,76	6,46	6,90	6,94	7,16
275	8,27	6,80	6,48	6,92	6,94	7,22
280	8,28	6,85	6,51	6,92	7,00	7,29
285	8,31	6,88	6,57	6,93	7,01	7,39
290	8,30	6,92	6,63	7,00	7,00	7,44
295	8,34	6,81	6,67	7,05	7,03	7,46
300	8,36	6,90	6,74	7,08	7,08	7,48
305	8,40	6,97	6,75	7,06	7,09	7,53
310	8,45	7,02	6,73	7,06	7,17	7,59
315	8,42	7,00	6,71	7,09	7,24	7,63
320	8,43	7,07	6,78	7,11	7,25	7,59
325	8,40	7,07	6,77	7,14	7,27	7,67
330	8,45	7,09	6,81	7,14	7,30	7,70
335	8,48	7,14		7,11	7,32	7,80
340	8,51	7,16		7,16	7,42	7,84
345	8,51	7,15		7,28	7,45	7,89
350	8,52	7,19		7,36		7,95
355	8,54	7,22		7,34		8,02
360	8,53	7,23		7,37		8,05
365	8,52	7,25				
370	8,56	7,23				
375	8,53	7,31				
380	8,50	7,40				
385	8,55	7,40				
390	8,62	7,42				
395	8,57	7,40				
400	8,58	7,41				

Obs: As células realçadas delimitam os pontos utilizados na regressão.



Tabela A2.3

Dados brutos dos ensaios com água limpa (vazão de 1500l/h)

data	19/09/01	24/10/01	07/11/01	09/11/01	12/11/01	20/11/01
ensaio	1	2	3	4	5	6
T_o (°C)	29,3	28,9	31,3	27,2	29,5	30,7
T_f (°C)	30,7	30,0	32,4	28,9	30,6	31,7
ΔT (°C)	1,4	1,1	1,1	1,7	1,1	1,0
média T(°C)	30	29	32	28	30	31
tempo (s)	O.D.(mg/l)	O.D.(mg/l)	O.D.(mg/l)	O.D.(mg/l)	O.D.(mg/l)	O.D.(mg/l)
5	0,15	0,25	0,11	0,12	0,06	0,26
10	0,54	0,45	0,51	0,48	0,54	0,46
15	0,80	0,71	1,03	0,97	0,81	0,67
20	1,07	1,03	1,62	1,20	0,97	0,85
25	1,61	1,27	2,06	1,38	1,21	1,09
30	2,08	1,67	2,12	1,56	1,52	1,38
35	2,65	1,98	2,28	1,74	1,72	1,73
40	3,20	2,38	2,77	1,99	2,17	1,96
45	3,58	2,76	2,70	2,19	2,99	2,17
50	3,94	3,03	2,95	2,46	3,01	2,42
55	4,13	3,23	3,25	2,78	3,20	2,66
60	4,41	3,53	3,47	3,09	3,68	2,87
65	4,63	4,11	3,63	3,50	3,76	3,09
70	4,90	4,39	3,83	3,71	4,13	3,20
75	5,18	4,57	4,09	3,73	4,17	3,32
80	5,48	4,67	4,20	3,83	4,38	3,41
85	5,85	4,89	4,34	3,98	4,73	3,60
90	5,97	4,98	4,43	4,15	5,11	3,76
95	6,12	4,98	4,58	4,27	5,19	3,92
100	6,28	5,03	4,76	4,36	5,51	4,08
105	6,38	5,15	4,97	4,42	5,41	4,11
110	6,53	5,21	5,12	4,49	5,53	4,30
115	6,64	5,33	5,28	4,87	5,77	4,42
120	6,79	5,34	5,38	4,98	5,82	4,53
125	6,88	5,47	5,54	5,01	5,89	4,72
130	6,99	5,63	5,68	5,04	6,06	4,84
135	7,09	5,68	5,78	5,11	6,15	4,91
140	7,19	5,80	5,87	5,23	6,23	5,02
145	7,20	5,89	5,98	5,35	6,25	5,10
150	7,25	5,93	6,11	5,48	6,28	5,16
155	7,31	6,03	6,17	5,59	6,31	5,26
160	7,41	6,12	6,21	5,69	6,40	5,31
165	7,54	6,11	6,23	5,79	6,52	5,36
170	7,60	6,15	6,38	5,79	6,64	5,38
175	7,66	6,19	6,45	5,82	6,83	5,40
180	7,67	6,20	6,49	5,91	6,85	5,47
185	7,72	6,27	6,52	5,98	6,88	5,48
190	7,69	6,42	6,62	6,05	6,96	5,60
195	7,74	6,50	6,66	6,14	6,99	5,64
200	7,75	6,52	6,68	6,15	7,15	5,67
205	7,81	6,54	6,75	6,20	7,21	5,70
210	7,87	6,54	6,82	6,21	7,25	5,74
215	7,92	6,60	6,83	6,29	7,37	5,81
220	7,89		6,86	6,41	7,55	5,87
225	7,84		6,89	6,36	7,61	5,91
230	7,86		7,13	6,33	7,55	5,92
235	7,89		7,23	6,46	7,60	5,92
240	7,87		7,21	6,57	7,63	6,01
245	7,87		7,24	6,74	7,63	6,01
250	7,87		7,28	7,04	7,73	6,06
255	8,02		7,35	7,05	7,81	6,07
260	8,06		7,40	7,08	7,82	6,10
265	8,09		7,36	7,08	7,83	6,16
270	8,10		7,35	7,10	7,80	6,20
275	8,08		7,35	7,10	7,78	6,22
280	8,06		7,40	7,10	7,94	6,24
285	8,06		7,41	7,12		6,24
290	8,07		7,48	7,17		6,31
295			7,50	7,21		6,29
300			7,53	7,20		6,26
305			7,51	7,22		6,22
310			7,53	7,26		6,20
315				7,30		6,24
320				7,36		6,30



Tabela A2.3

(continuação)

325		7,36	6,26
330		7,33	6,26
335		7,33	6,27
340		7,35	6,30
345		7,36	
350		7,44	
355		7,42	
360		7,45	
365		7,44	
370		7,47	
375		7,50	
380		7,52	
385		7,53	
390		7,58	
395		7,60	
400		7,64	
405		7,65	
410		7,64	
415		7,68	
420		7,71	
425		7,71	
430		7,69	
435		7,71	
440		7,70	
445		7,71	
450		7,75	
455		7,76	
460		7,77	
465		7,76	
470		7,79	
475		7,78	
480		7,84	

Obs: As células realçadas delimitam os pontos utilizados na regressão.

Tabela A2.4

Dados brutos dos ensaios com água limpa (vazão de 2000l/h)

data	21/09/01	22/10/01	07/11/01	08/11/01	12/11/01	19/11/01
ensaio	1	2	3	4	5	6
T_o (°C)	24,3	30,0	28,5	29,9	27,5	31,7
T_f (°C)	25,5	31,2	29,9	31,7	29,1	32,7
ΔT (°C)	1,2	1,2	1,4	1,8	1,6	1,0
média T(°C)	25	31	29	31	28	32
tempo (s)	O.D.(mg/l)	O.D.(mg/l)	O.D.(mg/l)	O.D.(mg/l)	O.D.(mg/l)	O.D.(mg/l)
5	0,03	0,48	0,09	0,10	0,49	0,89
10	1,20	0,55	0,25	0,30	1,01	1,35
15	2,20	0,79	0,68	0,70	1,46	1,56
20	2,50	1,15	1,09	1,13	1,70	1,83
25	2,74	1,61	1,66	1,68	2,04	1,91
30	2,96	2,22	2,20	2,22	2,49	2,15
35	3,33	2,76	2,54	2,67	2,90	2,23
40	3,87	3,24	2,86	2,96	3,29	2,56
45	4,49	3,53	2,93	3,12	3,65	2,78
50	4,97	3,77	3,12	3,54	3,97	2,96
55	5,42	3,88	3,45	3,87	4,31	3,29
60	5,65	4,08	3,70	4,24	4,43	3,48
65	5,82	4,33	3,89	4,46	4,79	3,65
70	5,90	4,61	4,02	4,49	5,02	3,81
75	6,16	4,91	4,35	4,78	5,33	4,00
80	6,56	5,27	4,45	4,78	5,50	4,25
85	6,87	5,36	4,56	4,89	5,71	4,35
90	7,11	5,62	4,89	5,09	5,91	4,54
95	7,27	5,60	4,86	5,26	6,12	4,85
100	7,46	5,68	4,99	5,46	6,30	4,91
105	7,62	6,20	5,20	5,51	6,48	5,08
110	7,77	6,14	5,33	5,67	6,62	5,15



Tabela A2.4

(continuação)

115	7,92	6,28	5,46	5,91	6,76	5,21
120	8,08	6,45	5,50	5,99	6,95	5,41
125	8,21	6,48	5,60	5,99	7,03	5,58
130	8,34	6,58	5,72	6,09	7,18	5,65
135	8,42	6,62	6,12	6,29	7,22	5,69
140	8,49	6,70	6,36	6,38	7,32	5,75
145	8,57	6,76	6,48	6,40	7,39	5,80
150	8,65	6,91	6,55	6,43	7,46	5,82
155	8,73	6,98	6,68	6,49	7,49	5,91
160	8,79	7,02	6,95	6,50	7,61	6,02
165	8,85	7,05	6,95	6,64	7,66	6,07
170	8,97	7,18	7,07	6,64	7,71	6,14
175	9,02	7,11	7,11	6,72	7,77	6,19
180	9,04	7,39	7,15	6,71	7,82	6,18
185	9,07	7,48	7,22	6,73	7,90	6,21
190	9,15	7,55	7,30	6,75	7,92	6,23
195	9,17	7,46	7,33	6,72	8,03	6,28
200	9,24	7,28	7,36	6,74	8,02	6,30
205	9,32	7,29	7,38	6,74	8,03	6,39
210	9,32	7,44	7,44	6,78	8,09	6,37
215	9,35	7,27	7,47	6,76	8,11	6,40
220	9,35	7,31	7,52	6,80	8,12	6,39
225	9,34	7,38	7,55	6,85	8,18	6,45
230	9,35	7,40	7,57	6,93	8,20	6,48
235	9,32	7,44	7,57	6,91	8,28	6,47
240	9,36	7,41	7,57	6,91	8,29	6,49
245	9,40		7,59	6,93	8,30	6,51
250	9,39		7,62	7,00	8,29	6,49
255	9,44		7,63	7,02	8,30	6,49
260	9,46		7,66	6,96	8,37	6,52
265	9,47		7,67	6,94	8,40	6,54
270	9,51		7,70	6,94	8,37	6,53
275	9,53		7,70	7,04	8,42	6,53
280	9,45		7,71	7,08	8,43	6,51
285	9,49		7,75	7,10		6,55
290	9,47			7,08		6,55
295				7,04		6,53
300				7,05		6,57
305				7,11		6,58
310				7,16		6,62
315				7,18		6,63
320				7,17		6,64
325				7,20		6,64
330						6,68

Obs: As células realçadas delimitam os pontos utilizados na regressão.

Tabela A2.5

Dados brutos dos ensaios com água limpa (vazão de 2500l/h)

data	21/09/01	22/10/01	06/11/01	08/11/01	09/11/01	19/11/01
ensaio	1	2	3	4	5	6
T_o (°C)	26,4	27,0	31,0	28,9	35,4	29,0
T_f (°C)	27,4	28,4	33,6	30,2	37,2	30,0
ΔT (°C)	1,0	1,4	2,6	1,3	1,8	1,0
média T(°C)	27	28	32	30	36	30
tempo (s)	O.D.(mg/l)	O.D.(mg/l)	O.D.(mg/l)	O.D.(mg/l)	O.D.(mg/l)	O.D.(mg/l)
5	0,08	0,66	0,45	0,20	0,45	0,41
10	0,22	0,87	0,80	0,89	1,20	1,24
15	0,24	1,31	1,32	1,46	1,68	1,62
20	0,33	1,81	1,79	1,88	1,95	2,07
25	0,65	2,27	2,05	2,11	2,21	2,60
30	0,65	2,68	2,20	2,80	2,69	3,06
35	0,74	3,19	2,51	3,14	3,16	3,41
40	0,73	3,64	2,71	3,53	3,52	3,60
45	0,80	3,98	2,84	3,83	3,92	3,87

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Tabela A2.5

(continuação)

50	0,84	4,15	3,01	4,07	4,18	4,16
55	1,08	4,57	3,30	4,32	4,40	4,44
60	1,82	4,91	3,54	4,75	4,47	4,72
65	2,29	5,22	3,85	5,07	4,77	4,92
70	2,63	5,68	4,01	5,47	4,88	5,07
75	3,38	5,79	4,13	5,75	5,06	5,19
80	3,73	5,72	4,28	5,65	5,23	5,38
85	4,25	5,88	4,30	5,76	5,39	5,54
90	4,68	5,96	4,59	5,98	5,51	5,68
95	5,07	6,33	4,87	6,06	5,64	5,83
100	5,36	6,57	5,01	6,23	5,75	5,92
105	5,37	6,72	5,20	6,62	5,85	6,04
110	5,45	6,83	5,17	6,81	5,94	6,10
115	5,93	7,03	5,30	6,87	5,97	6,20
120	6,09	7,11	5,34	6,94	6,04	6,26
125	6,43	7,23	5,62	6,97	6,10	6,34
130	6,41	7,26	6,06	7,01	6,14	6,45
135	6,76	7,23	6,20	7,08	6,16	6,49
140	7,07	7,34	6,39	7,12	6,18	6,57
145	7,16	7,45	6,43	7,19	6,23	6,60
150	7,22	7,54	6,52	7,21	6,29	6,67
155	7,47	7,66	6,59	7,25	6,33	6,64
160	7,71	7,69	6,67	7,38	6,35	6,68
165	7,90	7,77	6,79	7,41	6,37	6,74
170	8,01	7,80	6,89	7,37	6,42	6,78
175	8,13	7,86	6,93	7,28	6,48	6,78
180	8,08	7,91	6,98	7,38	6,51	6,81
185	8,14	7,94	7,03	7,26	6,55	6,84
190	8,17	7,95	7,10	7,38	6,53	6,88
195	8,23	7,97	7,18	7,41	6,56	6,91
200	8,36	8,04	7,21	7,50	6,58	6,96
205	8,36	7,91	7,14	7,52	6,63	6,99
210	8,51	7,99	7,05	7,51	6,67	6,98
215	8,60	8,11	7,14	7,59	6,70	6,99
220	8,56	8,15	7,30	7,61	6,67	7,04
225	8,66	8,17	7,35	7,62	6,68	7,04
230	8,66	8,20	7,40	7,66	6,69	7,04
235	8,72	8,19	7,32	7,63	6,72	7,04
240	8,76	8,14	7,34	7,66	6,73	7,08
245	8,78		7,39		6,73	7,06
250	8,89		7,41		6,76	7,07
255	8,90		7,42		6,73	7,07
260	8,89		7,42		6,71	7,09
265	8,96		7,48		6,72	7,08
270	8,97		7,47		6,74	7,08
275	8,98		7,51		6,74	7,10
280	9,07		7,57		6,74	7,12
285	9,11		7,57		6,74	7,13
290	9,18		7,56		6,72	
295	9,16		7,63		6,73	
300	9,21		7,65		6,74	
305	9,22				6,78	
310	9,18				6,77	
315	9,34				6,74	
320	9,33				6,74	
325	9,23					
330	9,22					
335	9,35					
340	9,35					
345	9,29					

Obs: As células realçadas delimitam os pontos utilizados na regressão.



Tabela A2.6

Resumo de resultados do ajuste (ensaio repetitivo com água limpa)

ensaio	vazão	Cs	C0	Kla	resíduo	erro	sigmaCs	sigmaC0	sigmaKla
1	800	7,25	-0,22	5,8E-03	1,576	0,147	0,1043	0,0666	0,0002
2	800	10,06	-0,28	3,1E-03	1,008	0,102	0,1216	0,0371	0,0001
3	800	7,00	0,13	7,2E-03	0,565	0,091	0,0525	0,0444	0,0002
4	800	9,84	0,02	2,1E-03	3,524	0,191	0,4672	0,0659	0,0002
5	800	8,73	-0,39	3,8E-03	2,440	0,162	0,1421	0,0623	0,0001
6	800	8,35	0,09	4,4E-03	0,719	0,086	0,0535	0,0337	0,0001
7	1100	8,64	-0,02	1,2E-02	0,160	0,053	0,0200	0,0315	0,0001
8	1100	7,48	0,05	9,0E-03	1,436	0,143	0,0548	0,0741	0,0002
9	1100	7,14	-0,16	9,3E-03	0,167	0,055	0,0308	0,0302	0,0001
10	1100	7,38	-0,29	1,1E-02	1,726	0,174	0,0729	0,1008	0,0004
11	1100	8,03	0,00	7,4E-03	0,473	0,085	0,0493	0,0420	0,0001
12	1100	9,80	-0,06	4,8E-03	0,469	0,082	0,0923	0,0366	0,0001
13	1500	8,37	-0,92	1,4E-02	0,695	0,132	0,0717	0,0909	0,0004
14	1500	6,93	-0,67	1,4E-02	1,119	0,167	0,0967	0,1138	0,0006
15	1500	7,79	-0,01	9,9E-03	0,504	0,110	0,1006	0,0667	0,0003
16	1500	7,95	-0,01	7,8E-03	1,177	0,112	0,0313	0,0523	0,0001
17	1500	8,36	-0,56	1,0E-02	1,268	0,155	0,0831	0,0891	0,0003
18	1500	6,67	-0,28	9,9E-03	0,228	0,064	0,0342	0,0363	0,0002
19	2000	9,84	-0,30	1,4E-02	0,996	0,156	0,0822	0,1065	0,0004
20	2000	7,94	0,27	1,5E-02	0,482	0,121	0,0943	0,0878	0,0005
21	2000	8,35	0,04	1,0E-02	1,461	0,166	0,0885	0,0958	0,0004
22	2000	7,13	-0,31	1,6E-02	0,411	0,082	0,0196	0,0545	0,0002
23	2000	8,69	-0,26	1,3E-02	0,317	0,077	0,0293	0,0482	0,0002
24	2000	6,86	0,28	1,2E-02	1,098	0,132	0,0417	0,0771	0,0003
25	2500	9,36	0,00	1,5E-02	0,619	0,112	0,0421	0,0743	0,0003
26	2500	8,46	0,13	1,5E-02	0,319	0,094	0,0566	0,0681	0,0004
27	2500	8,21	0,09	9,6E-03	1,569	0,166	0,0850	0,0921	0,0003
28	2500	7,82	-0,58	1,7E-02	0,697	0,127	0,0479	0,0922	0,0004
29	2500	6,77	0,51	1,9E-02	0,371	0,090	0,0277	0,0664	0,0004
30	2500	7,14	-0,03	1,8E-02	0,111	0,045	0,0116	0,0320	0,0002

unesp

ANEXO 3

Gráficos com as regressões efetuadas

Figuras 3.1 a 3.15

Gráficos dos ensaios com areia e saída livre no reator modelo

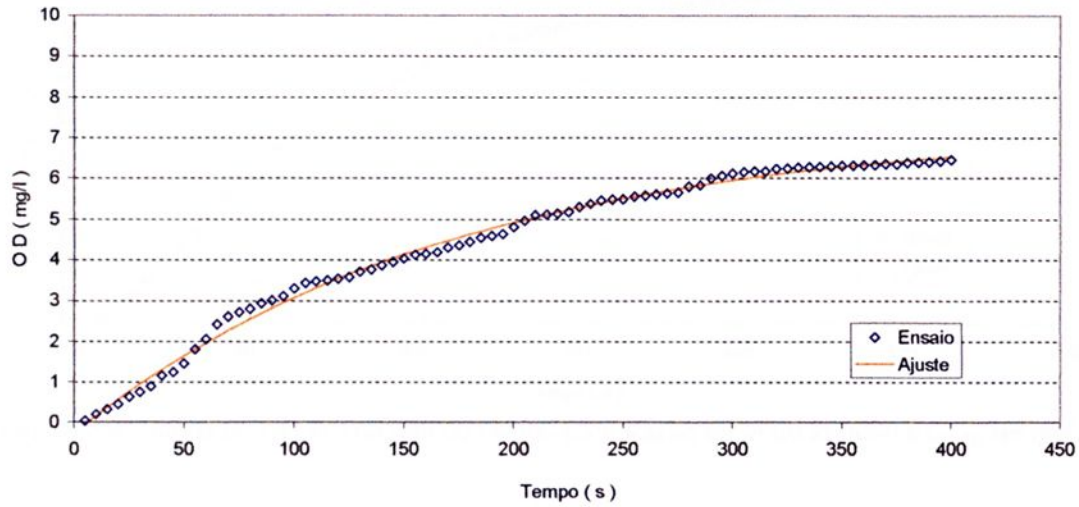


Figura 3.1: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 800l/h e C_{areia} de 0g/l.

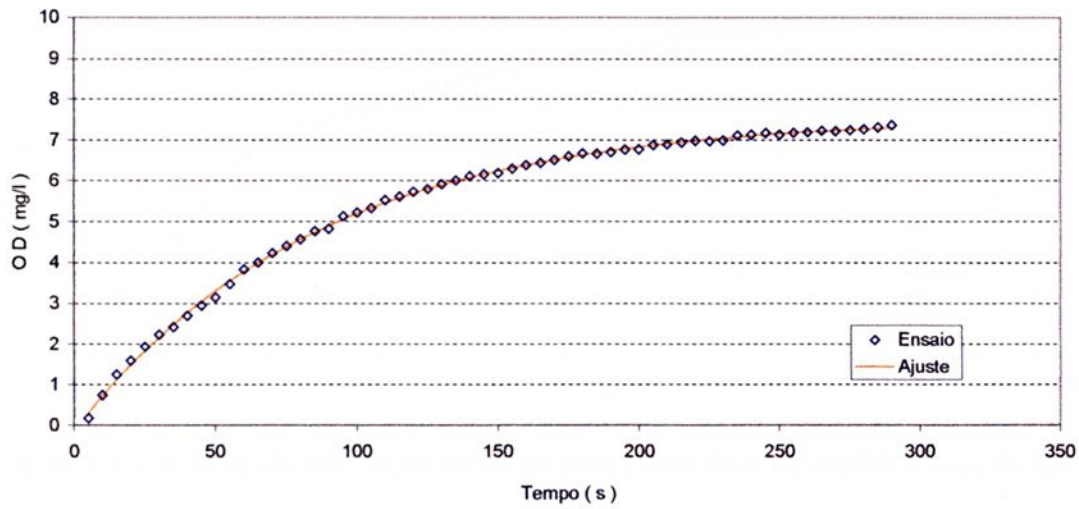


Figura 3.2: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1100l/h e C_{areia} de 0g/l.

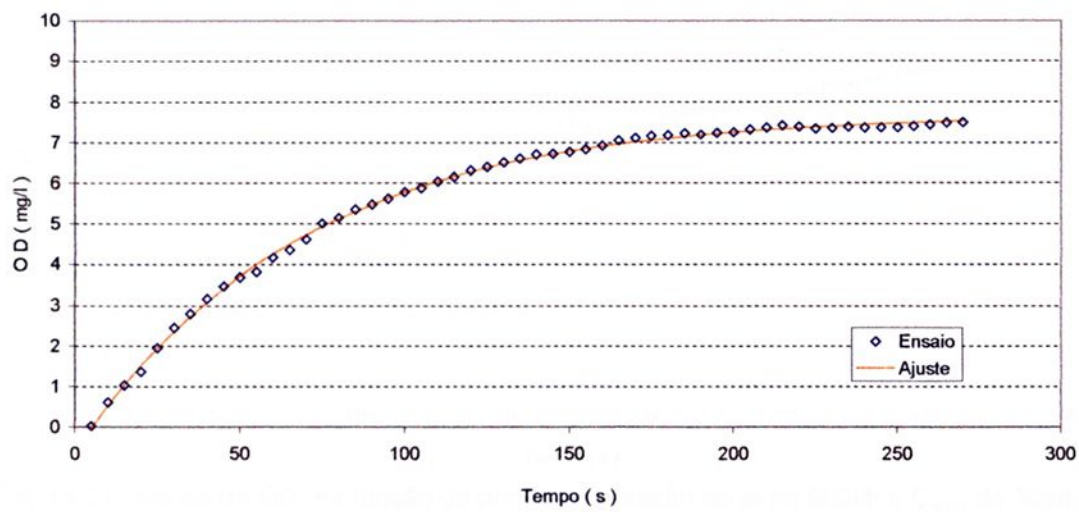


Figura 3.3: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1500l/h e C_{areia} de 0g/l.

BCpIS - FEIS - UNESP

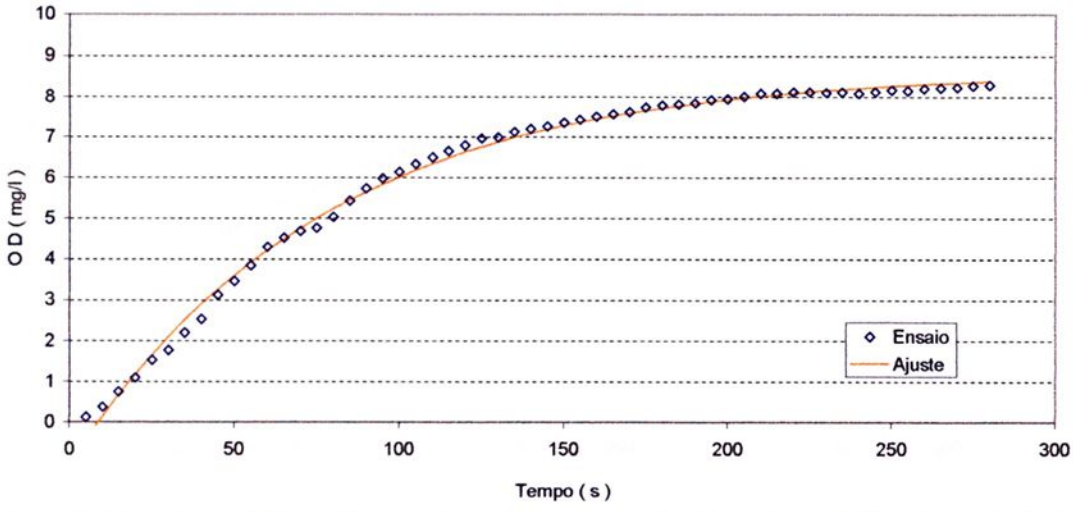


Figura 3.4: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2000l/h e C_{areia} de 0g/l.

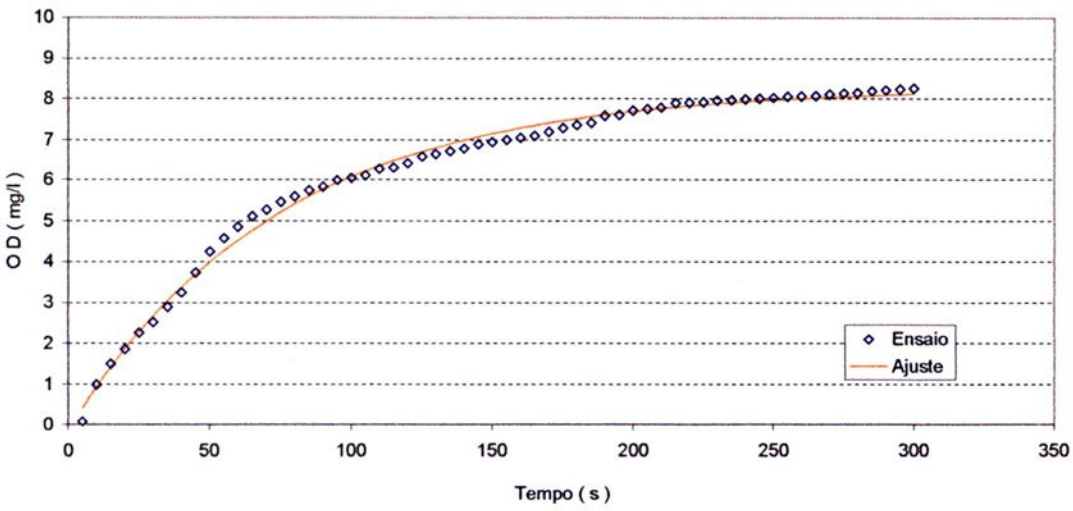


Figura 3.5: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2500l/h e C_{areia} de 0g/l.

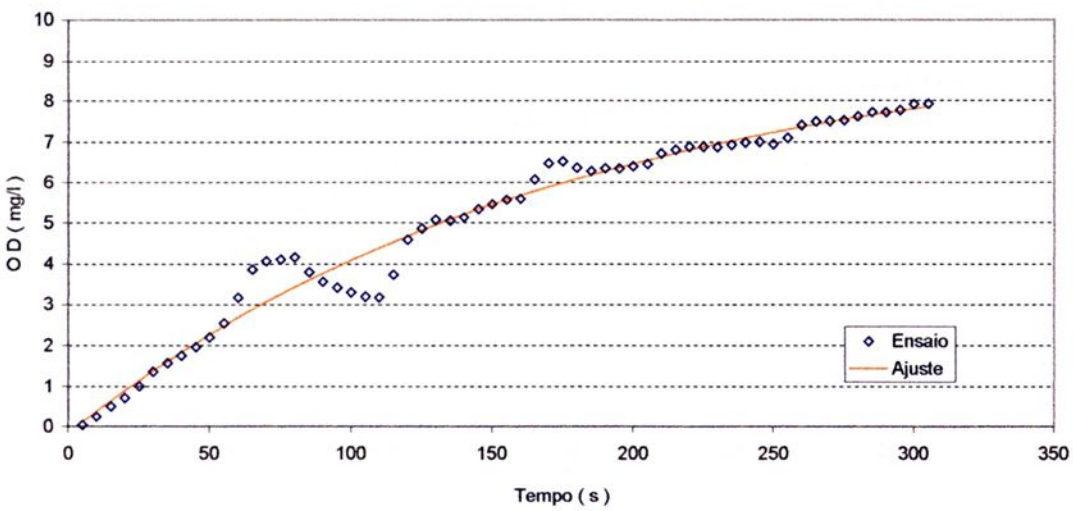


Figura 3.6: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 800l/h e C_{areia} de 50g/l.

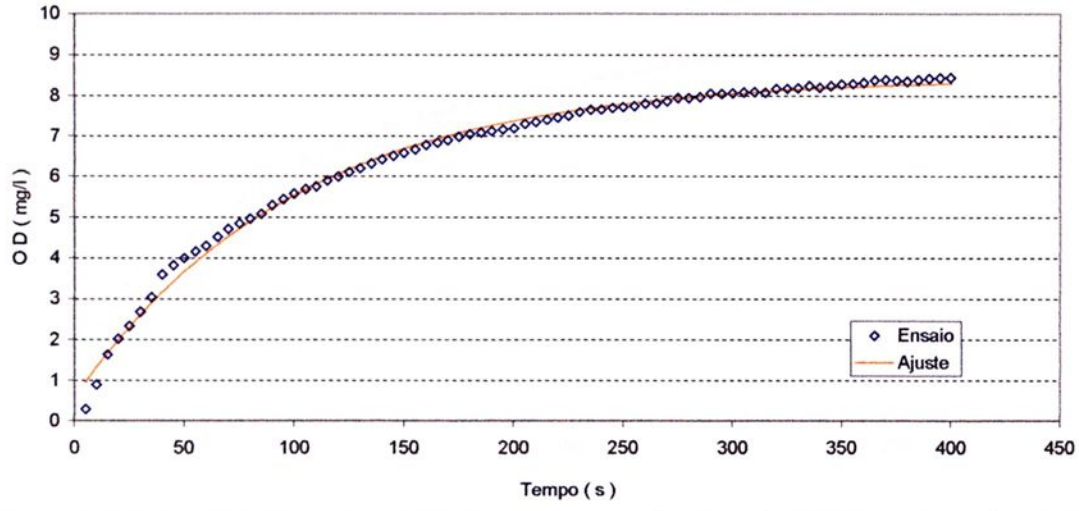


Figura 3.7: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1100l/h e C_{areia} de 50g/l.

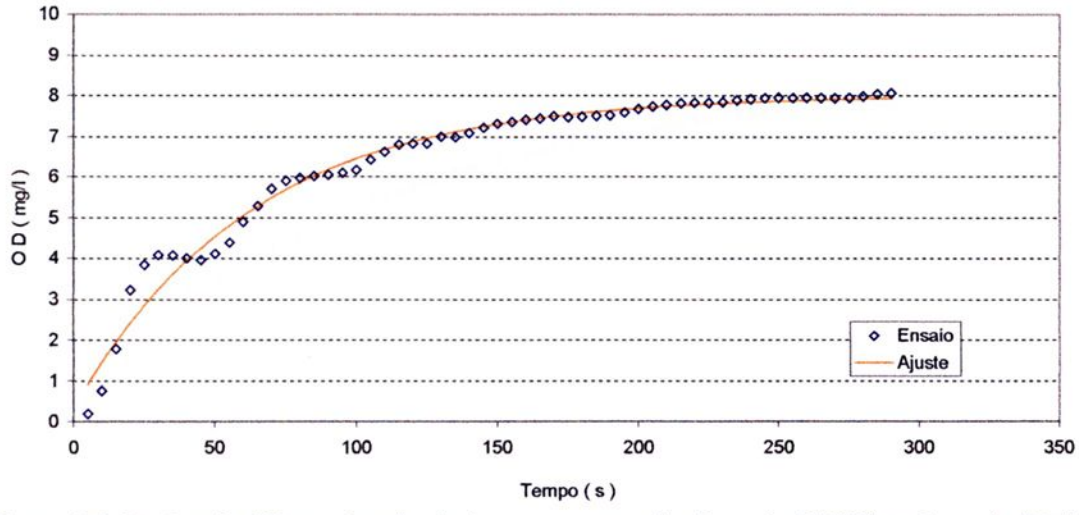


Figura 3.8: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1500l/h e C_{areia} de 50g/l.

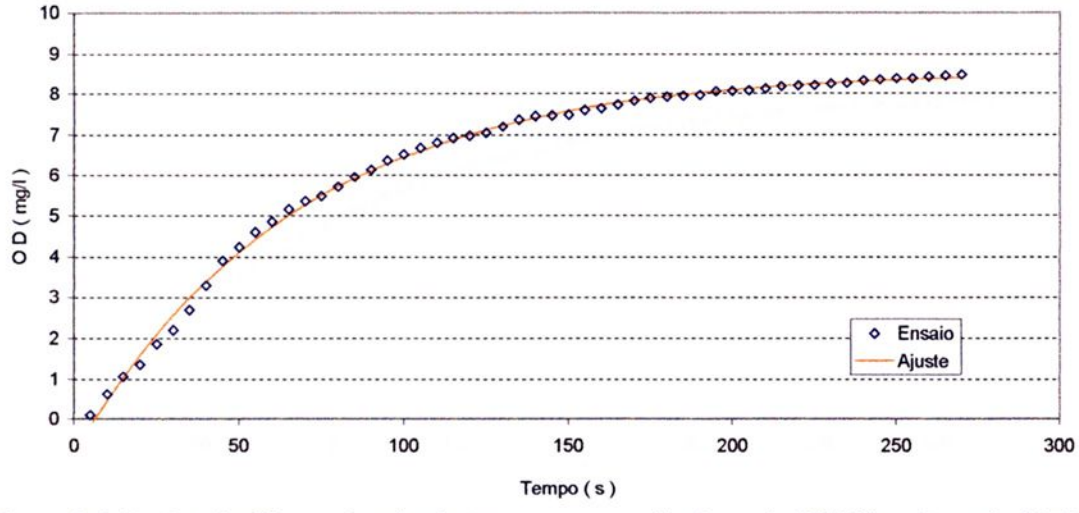


Figura 3.9: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2000l/h e C_{areia} de 50g/l.

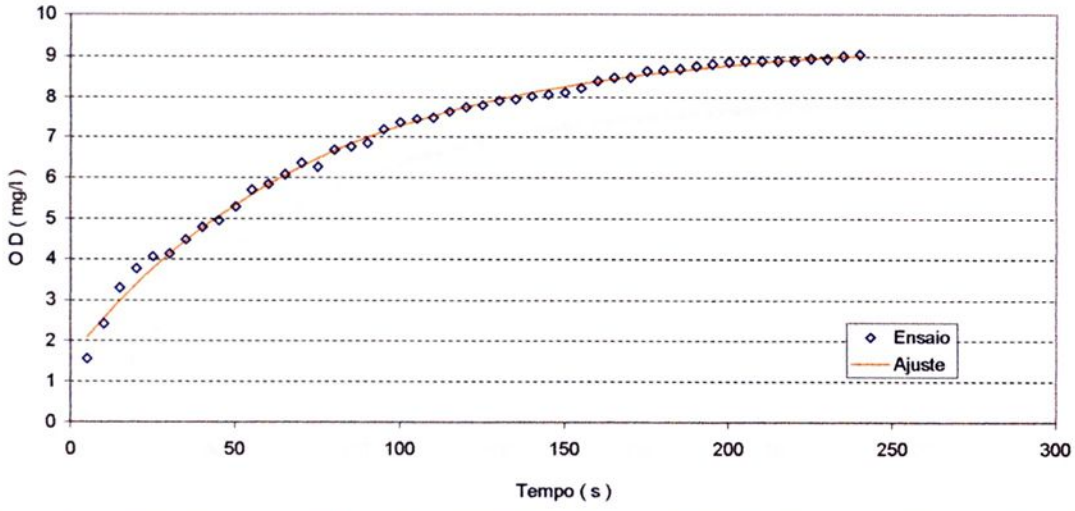


Figura 3.10: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2500l/h e C_{areia} de 50g/l.

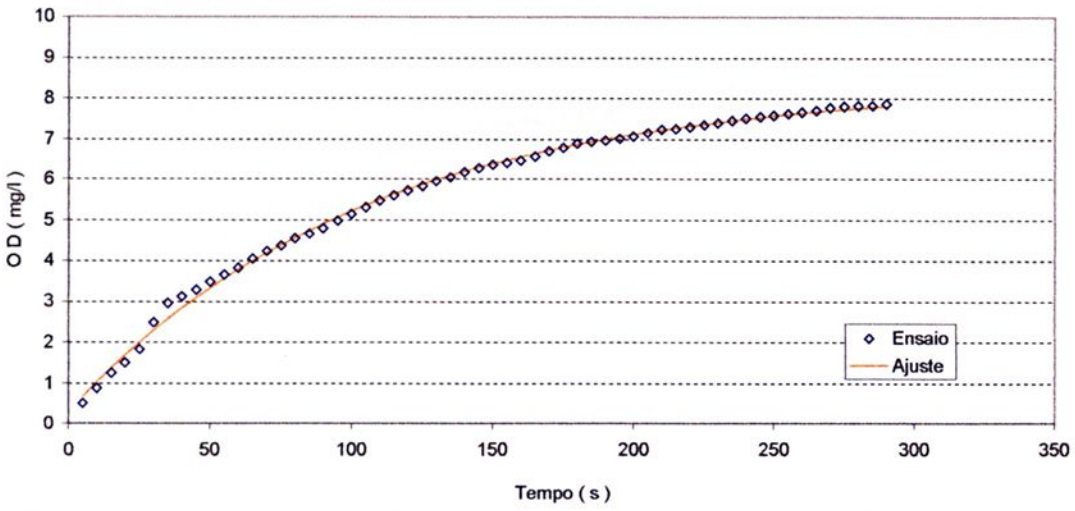


Figura 3.11: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1000l/h e C_{areia} de 100g/l.

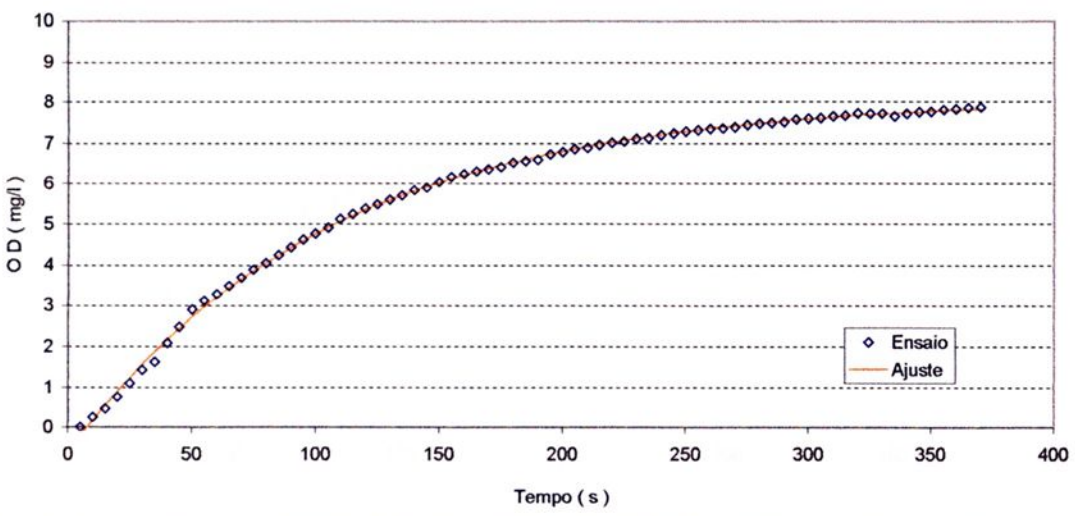


Figura 3.12: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1300l/h e C_{areia} de 100g/l.

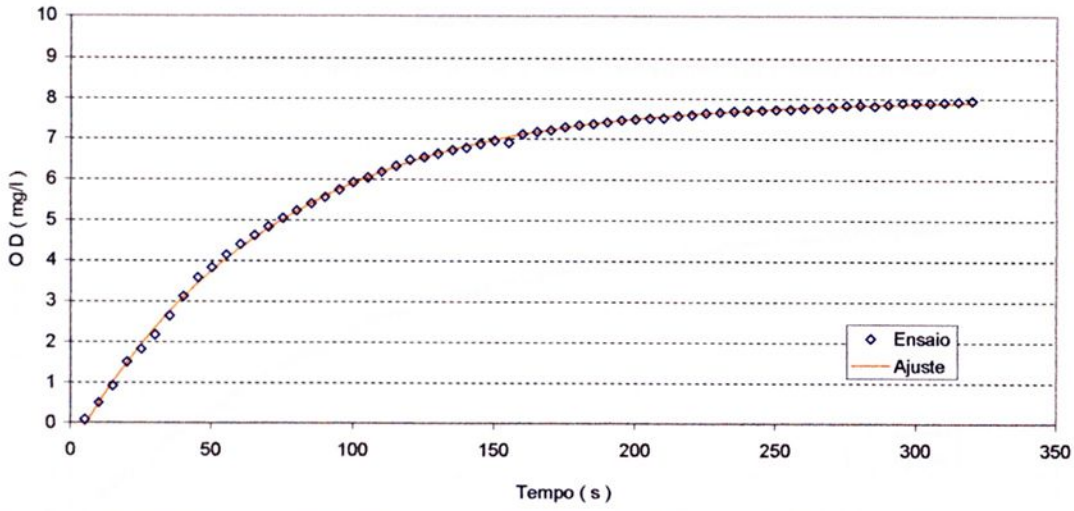


Figura 3.13: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1700l/h e C_{areia} de 100g/l.

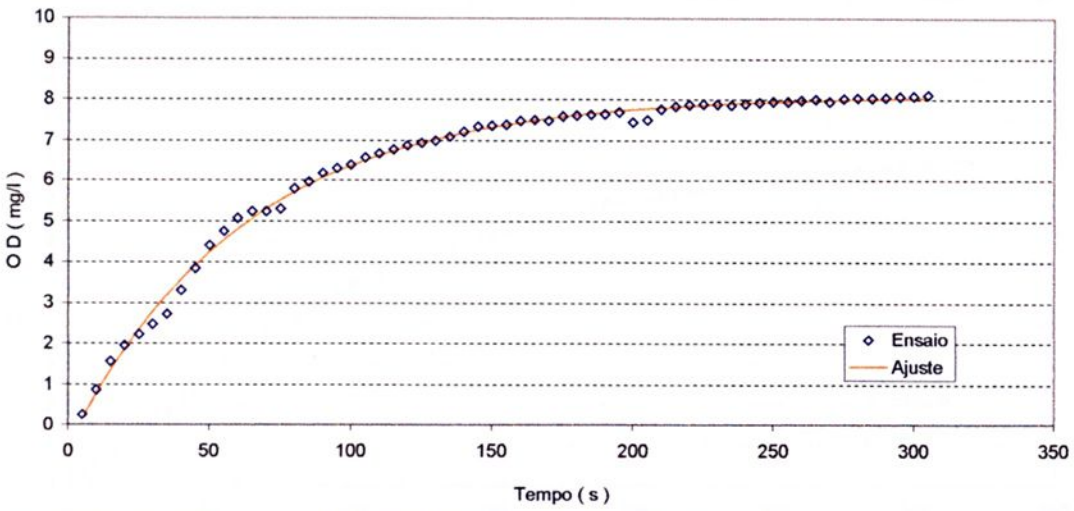


Figura 3.14: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2200l/h e C_{areia} de 100g/l.

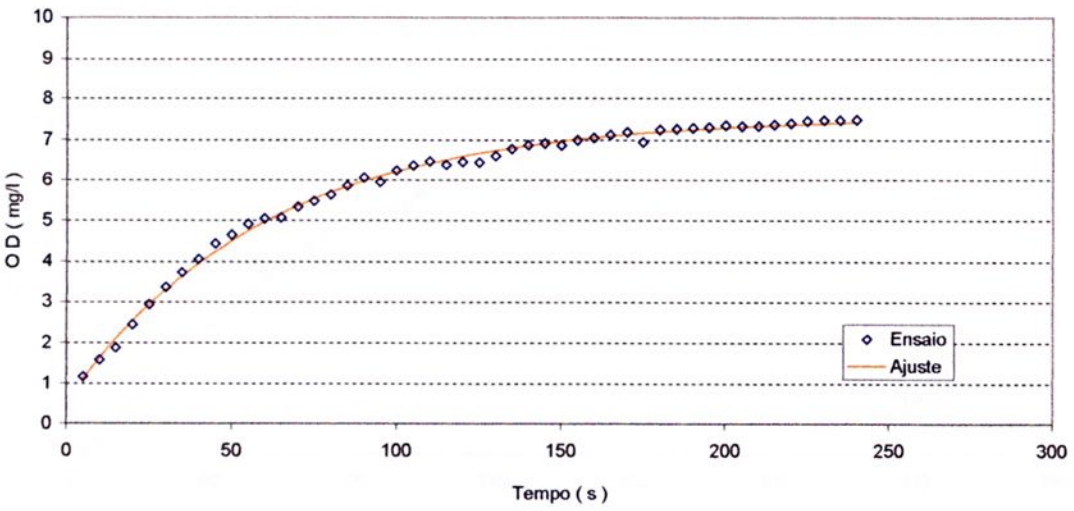


Figura 3.15: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2700l/h e C_{areia} de 100g/l.

Figuras 3.16 a 3.35

Gráficos dos ensaios com areia e saída submersa no reator modelo

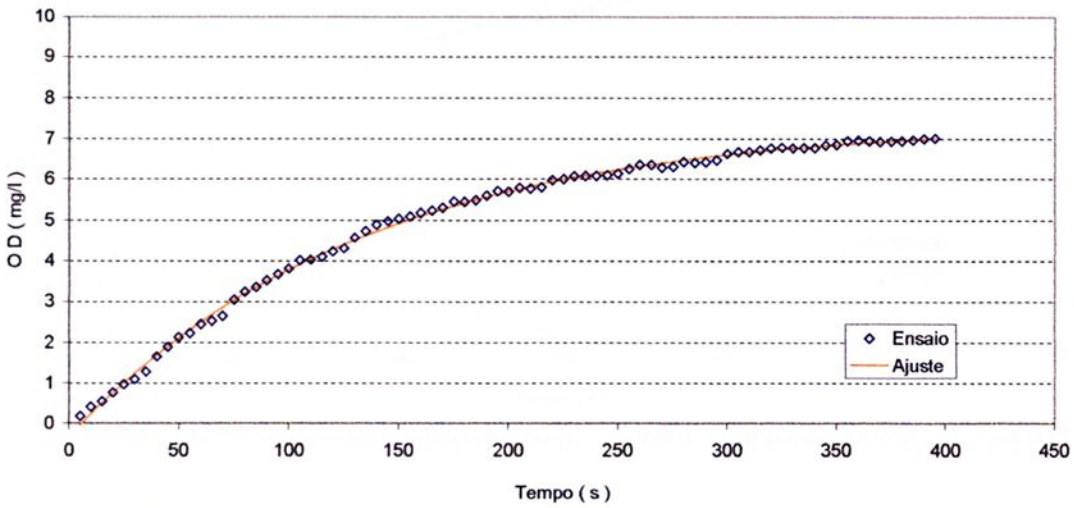


Figura 3.16: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 800l/h e C_{areia} de 0g/l.

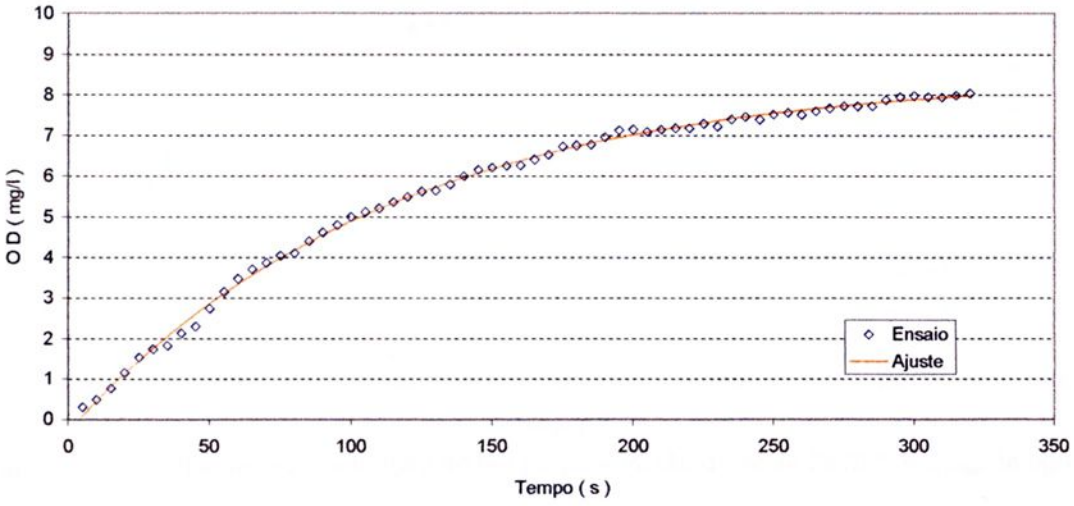


Figura 3.17: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1100l/h e C_{areia} de 0g/l.

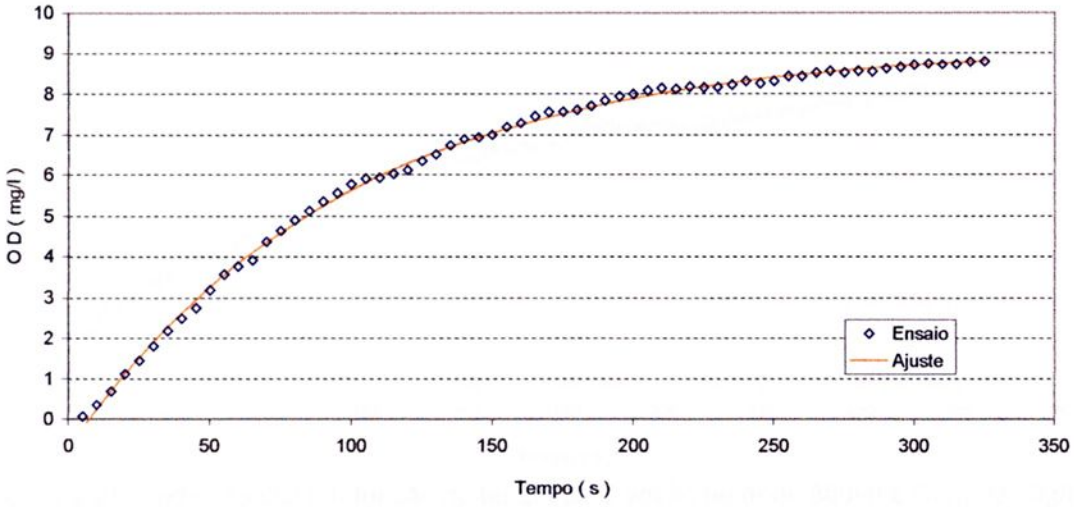


Figura 3.18: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1500l/h e C_{areia} de 0g/l.

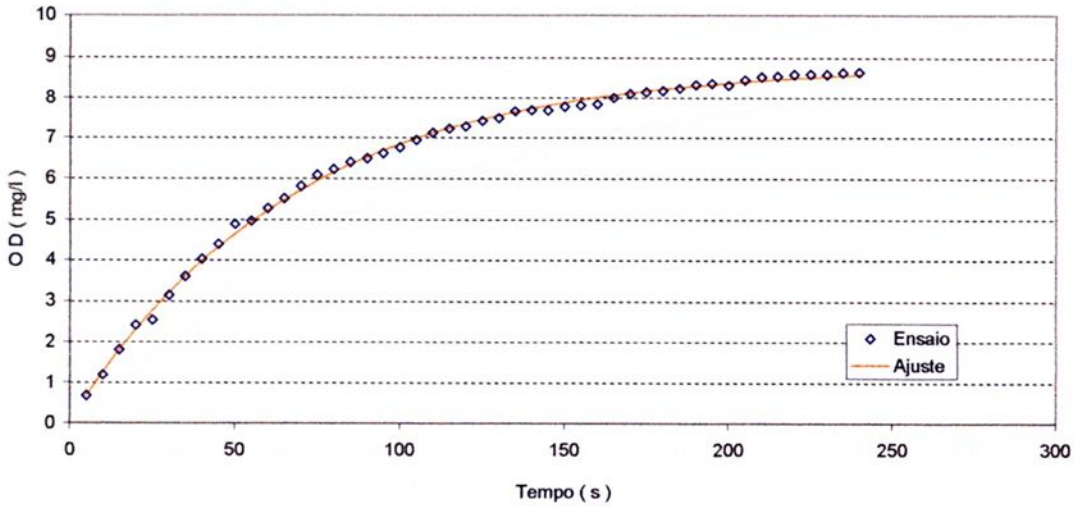


Figura 3.19: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2000l/h e C_{areia} de 0g/l.

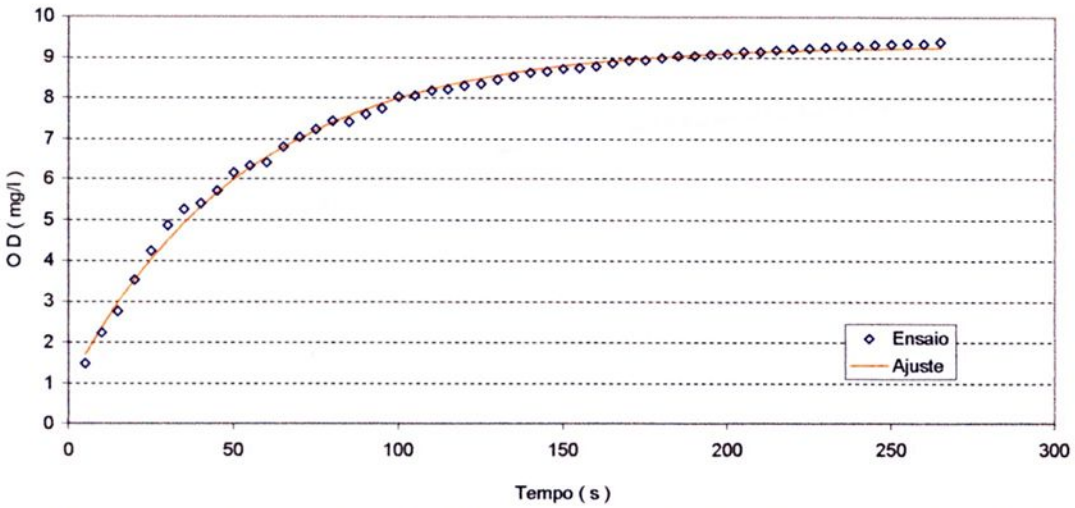


Figura 3.20: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2500l/h e C_{areia} de 0g/l.

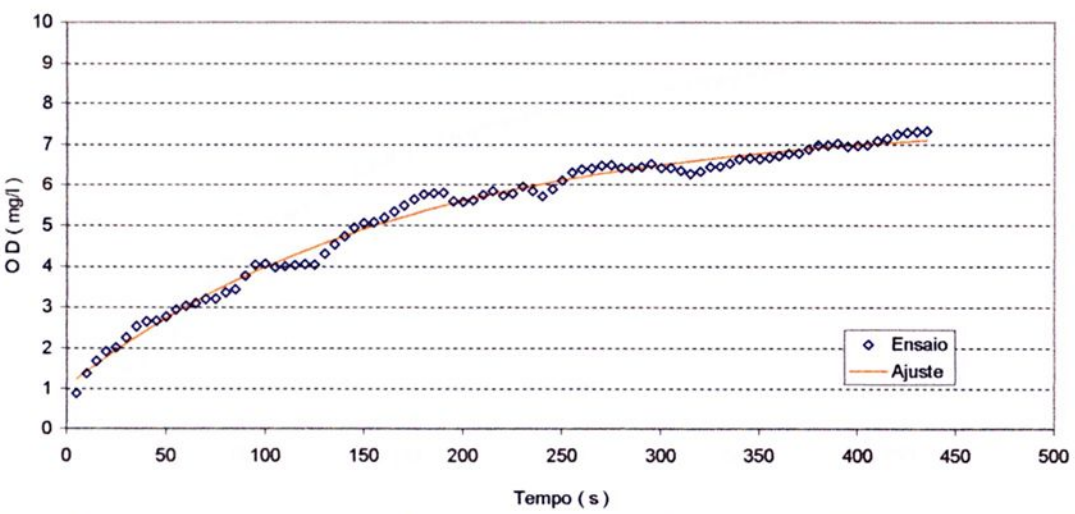


Figura 3.21: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 800l/h e C_{areia} de 50g/l.

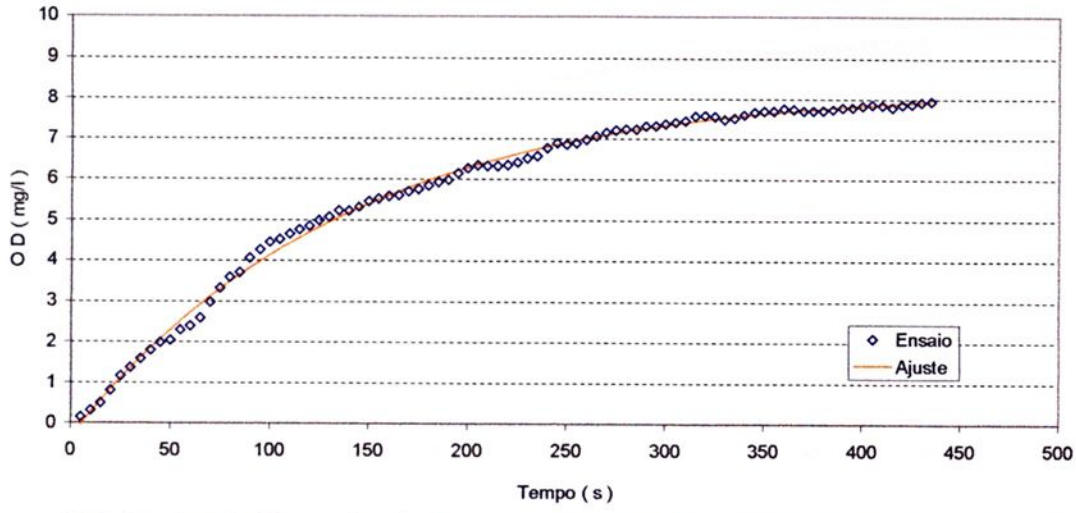


Figura 3.22: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1100l/h e C_{areia} de 50g/l.

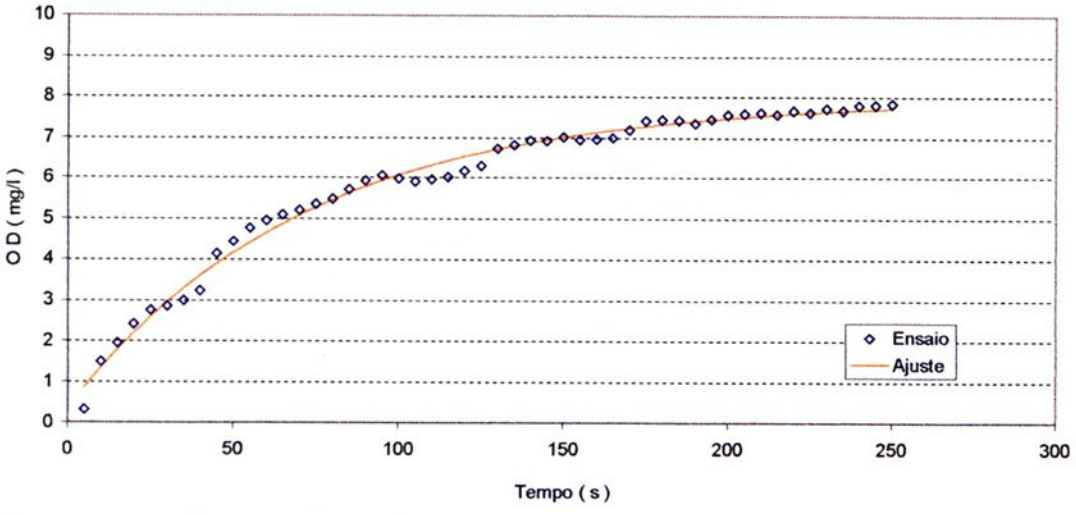


Figura 3.23: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1500l/h e C_{areia} de 50g/l.

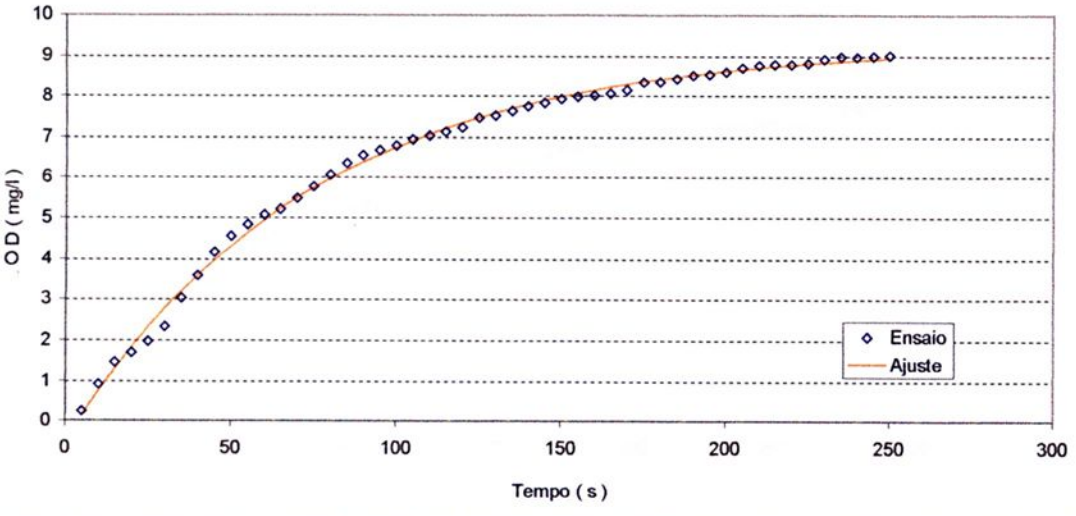


Figura 3.24: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2000l/h e C_{areia} de 50g/l.

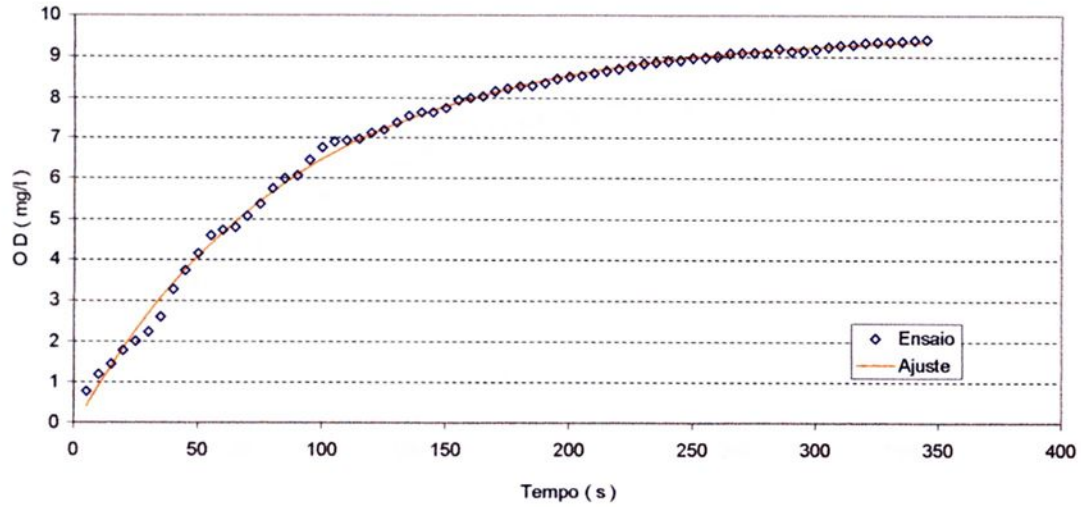


Figura 3.25: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2500l/h e C_{areia} de 50g/l.

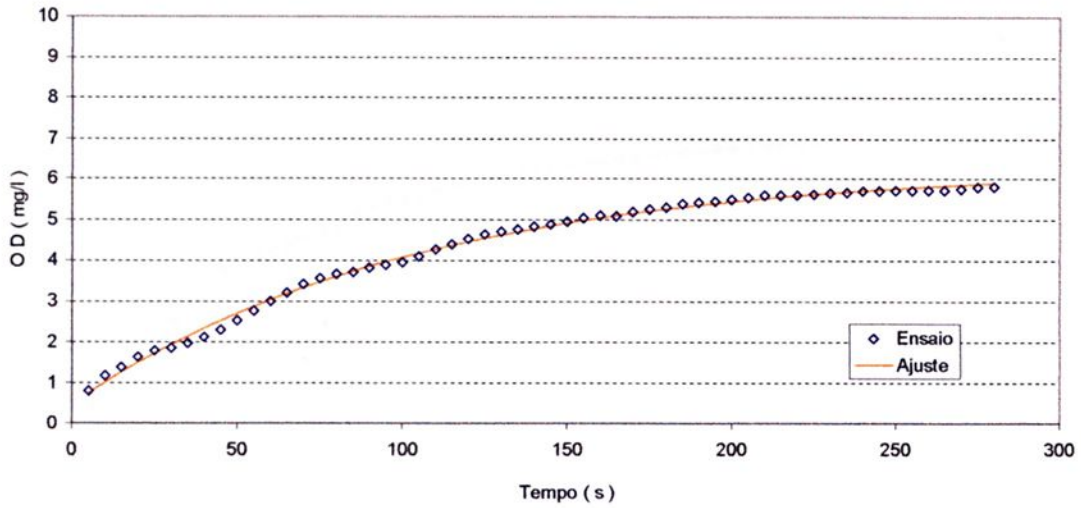


Figura 3.26: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1000l/h e C_{areia} de 100g/l.

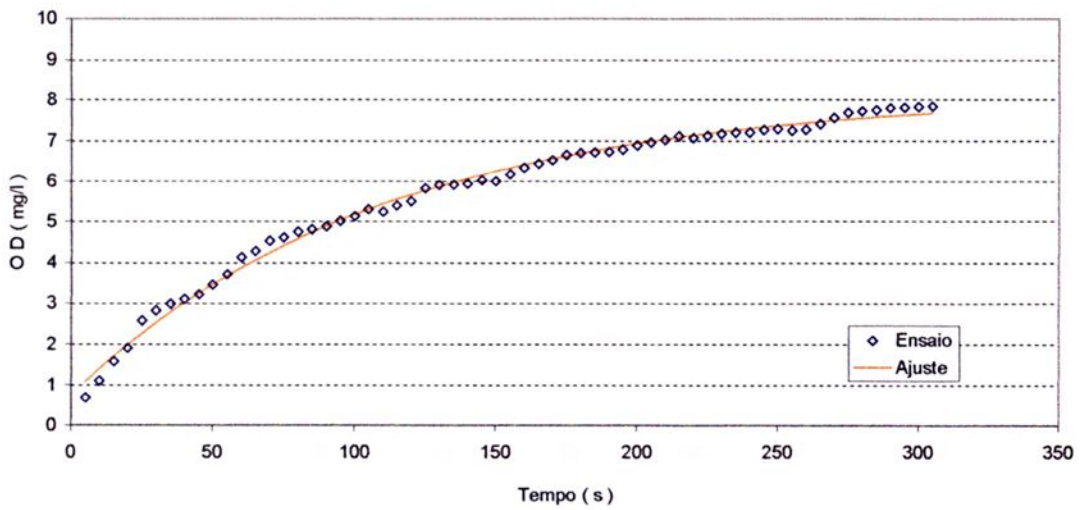


Figura 3.27: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1300l/h e C_{areia} de 100g/l.

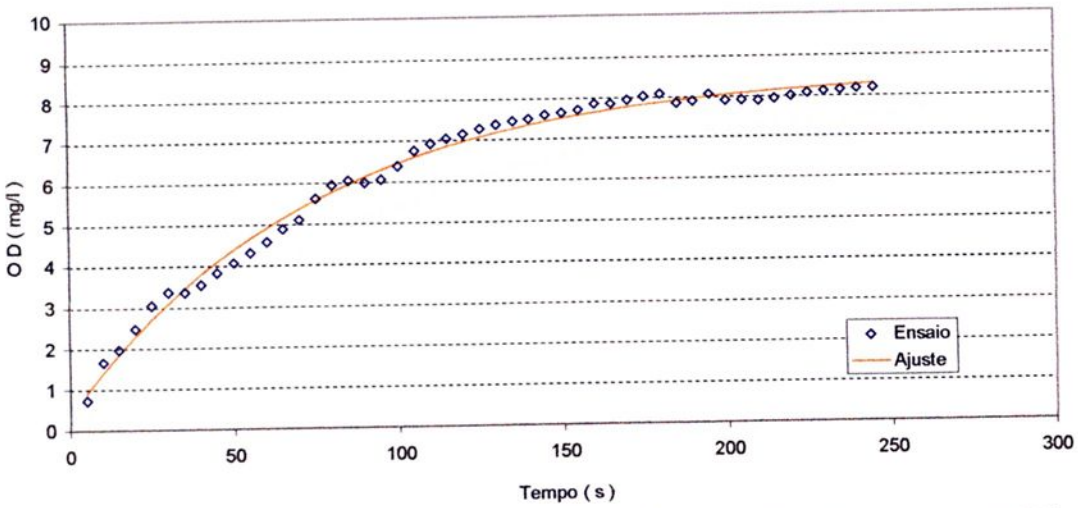


Figura 3.28: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1700l/h e C_{areia} de 100g/l.

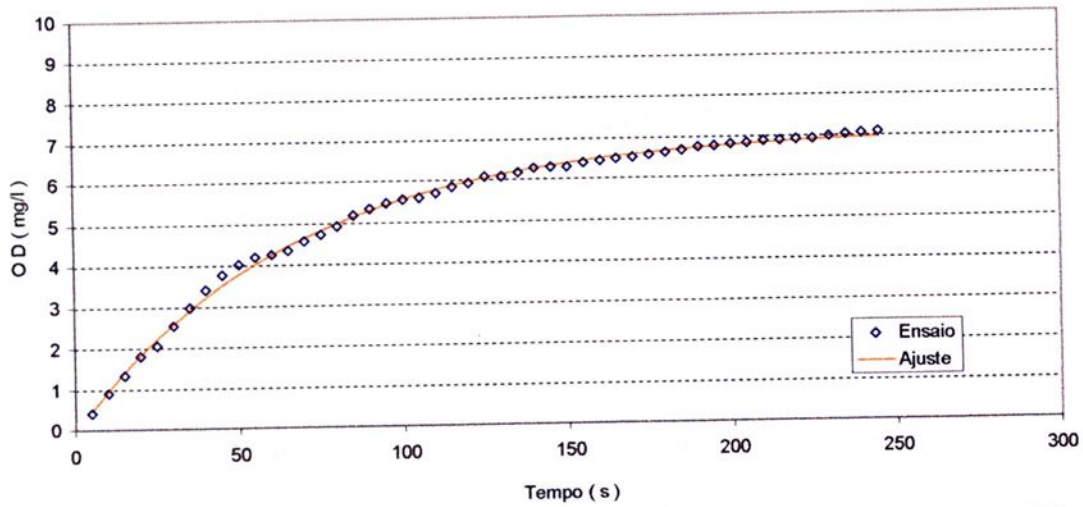


Figura 3.29: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2200l/h e C_{areia} de 100g/l.

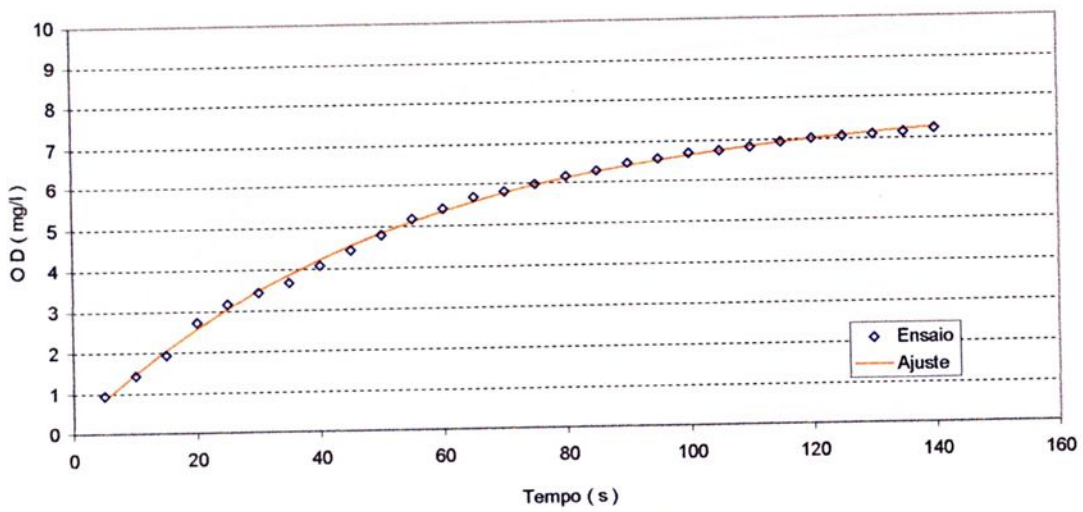


Figura 3.30: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2700l/h e C_{areia} de 100g/l.

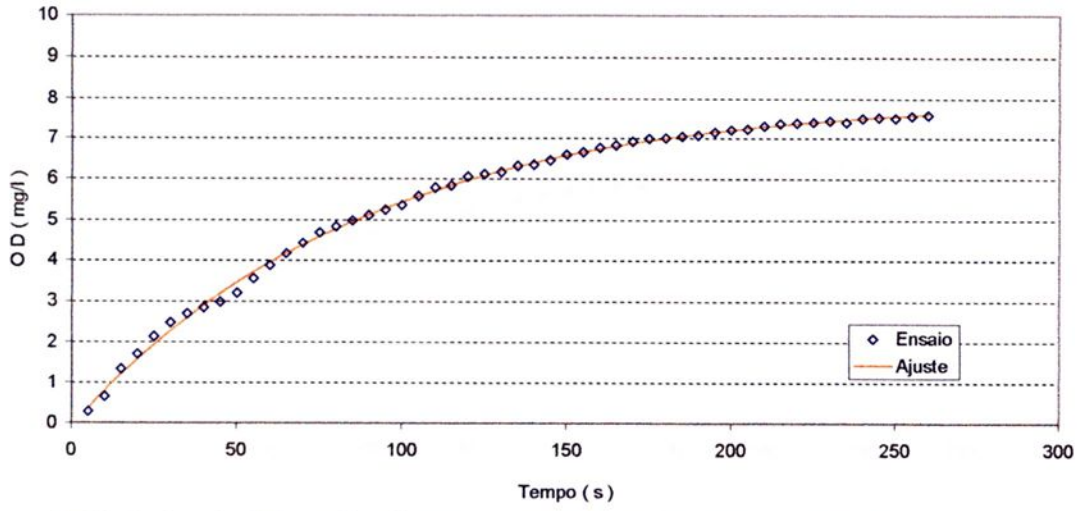


Figura 3.31: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1500l/h e C_{areia} de 150g/l.

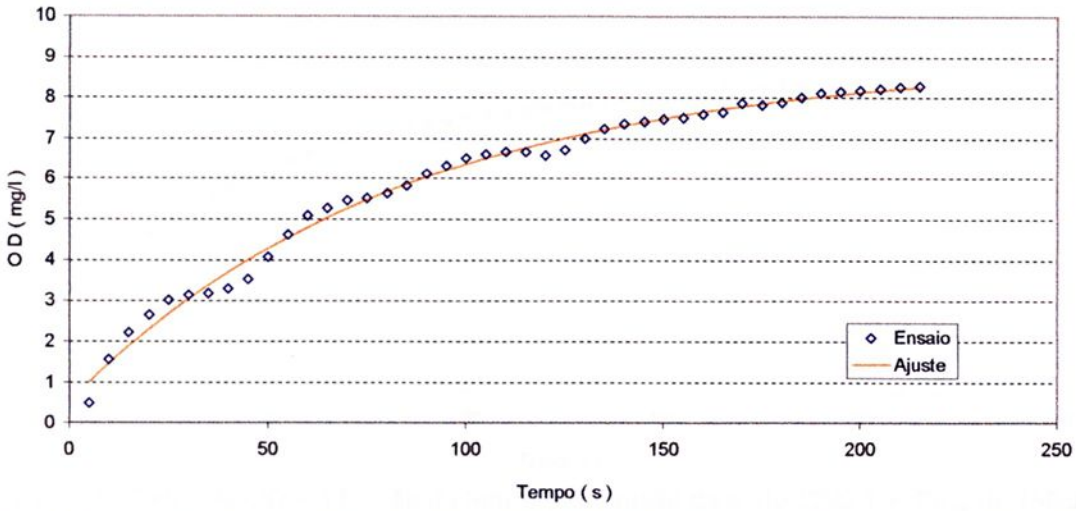


Figura 3.32: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1800l/h e C_{areia} de 150g/l.

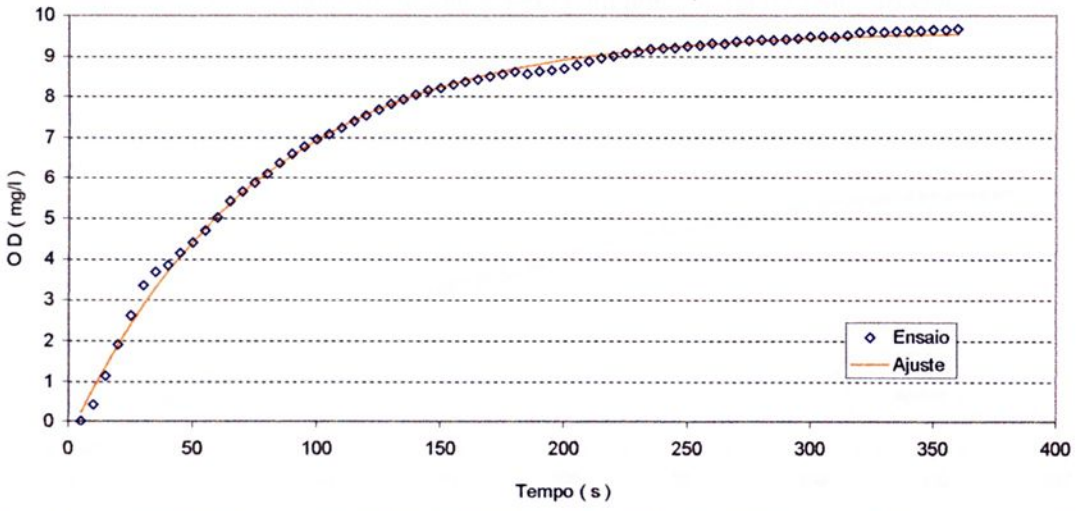


Figura 3.33: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2200l/h e C_{areia} de 150g/l.

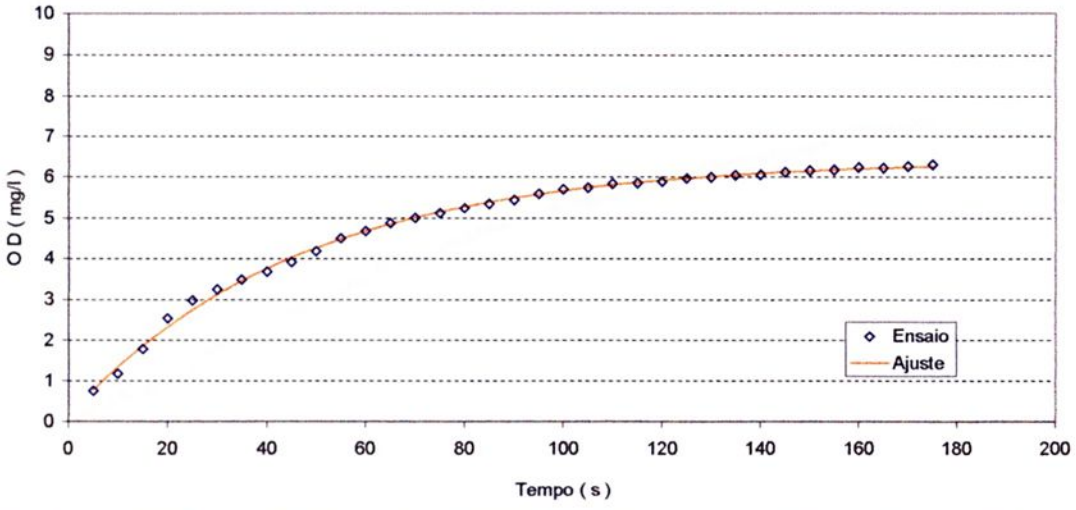


Figura 3.34: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2700l/h e C_{areia} de 150g/l.

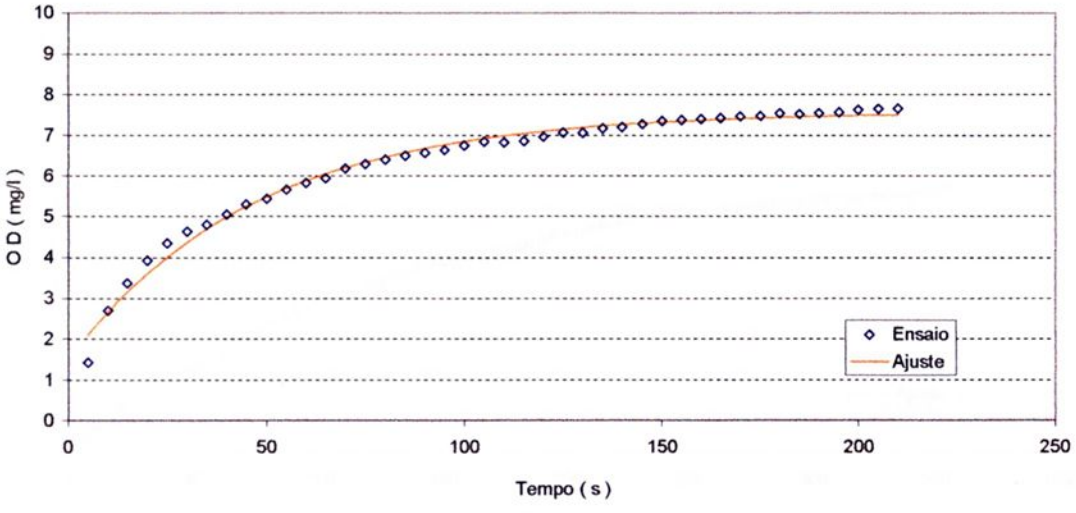


Figura 3.35: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 3200l/h e C_{areia} de 150g/l.

Figuras 3.36 a 3.65

Gráficos dos ensaios de repetibilidade com água limpa no reator modelo

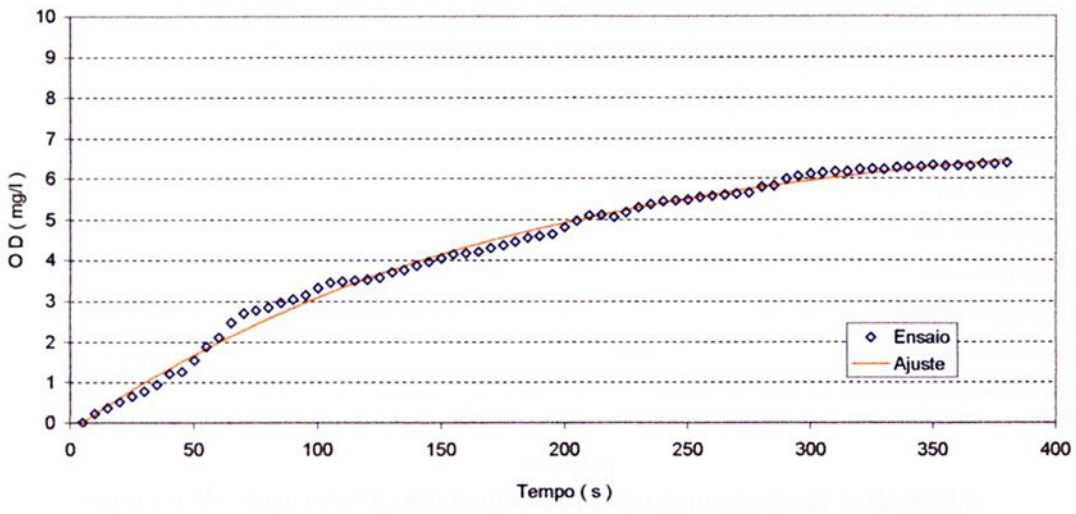


Figura 3.36: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 800l/h.

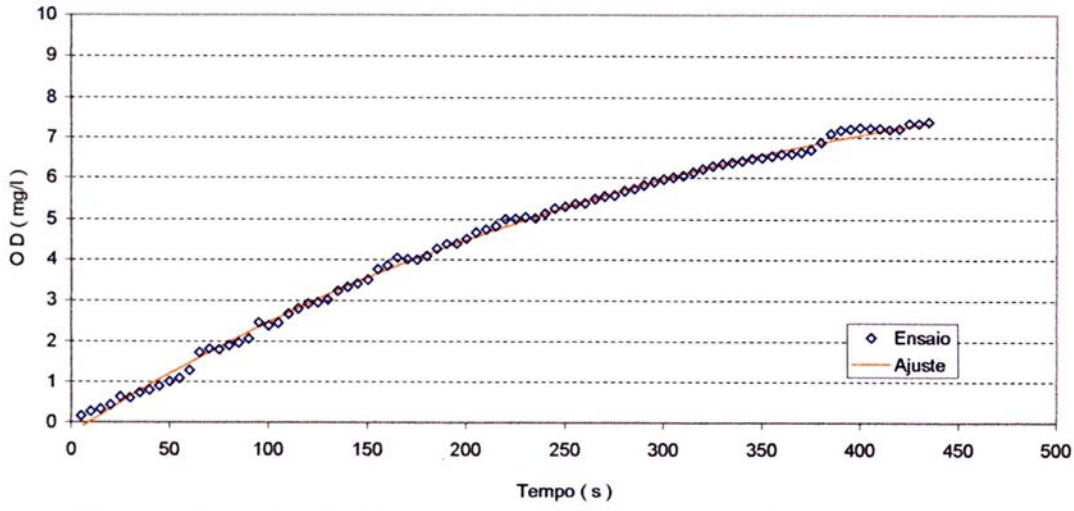


Figura 3.37: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 800l/h.

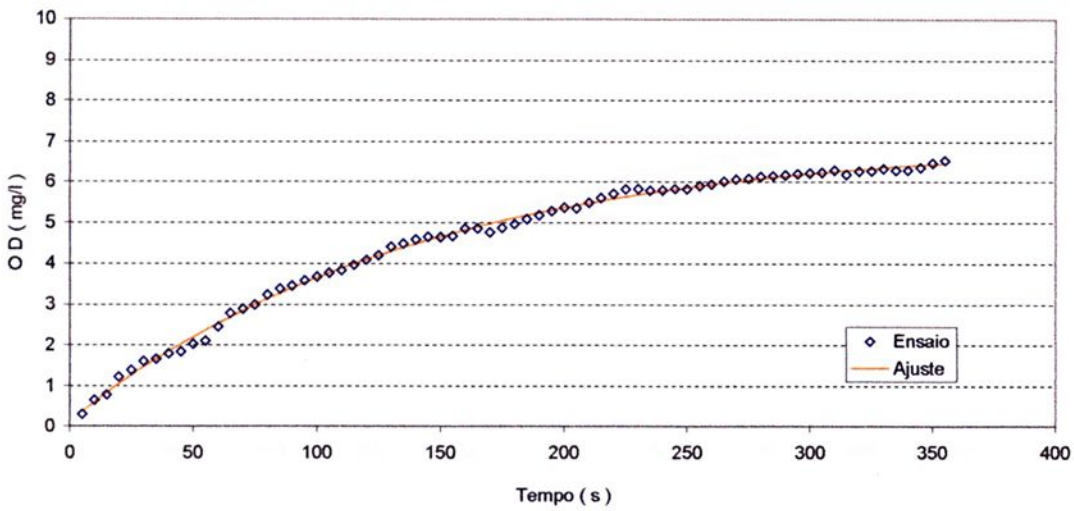


Figura 3.38: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 800l/h.

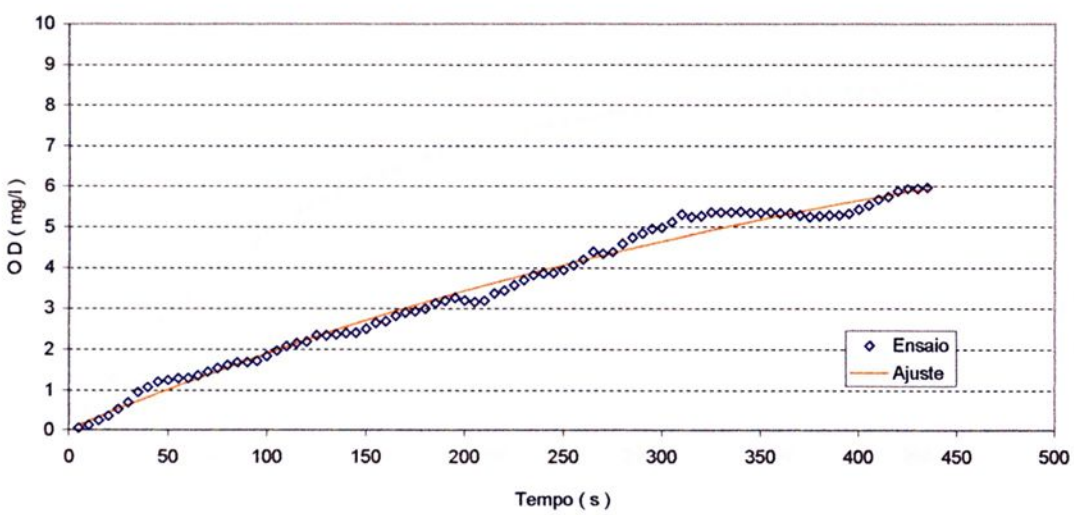


Figura 3.39: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 800l/h.

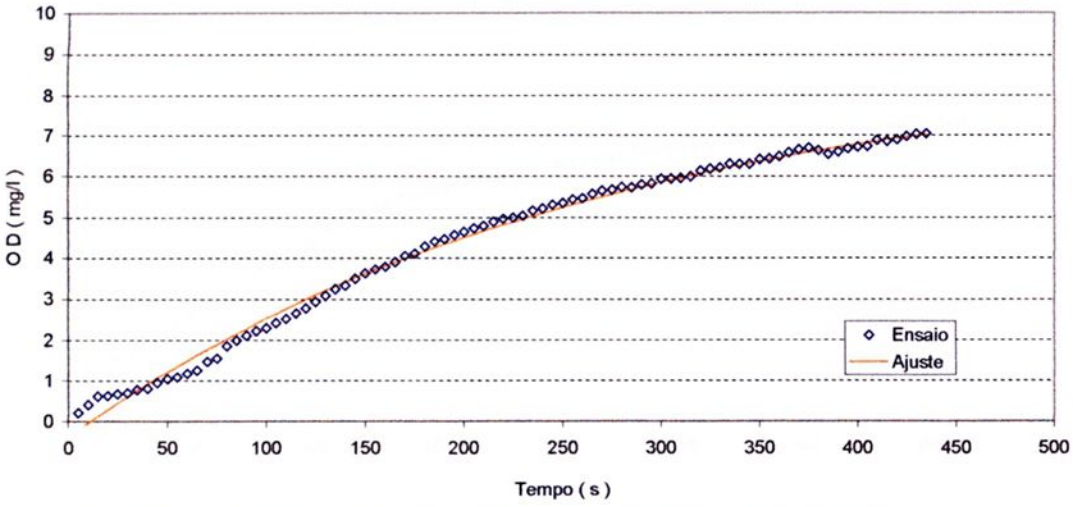


Figura 3.40: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 800l/h.

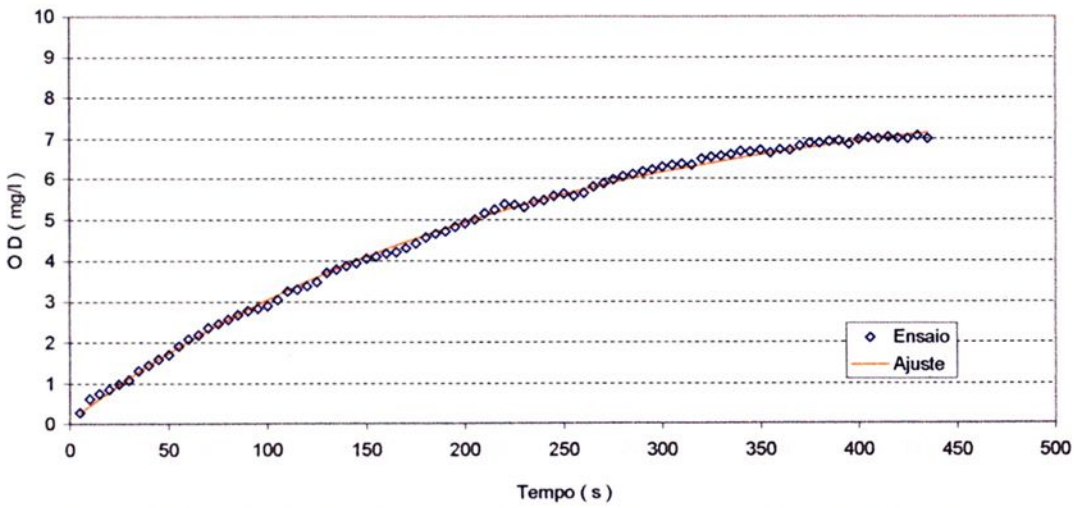


Figura 3.41: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 800l/h.

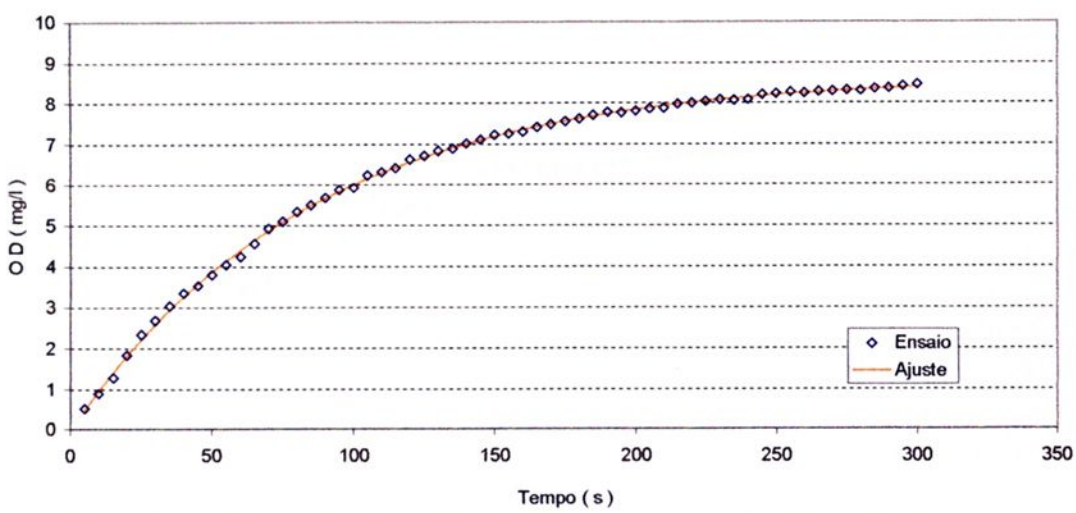


Figura 3.42: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1100l/h.

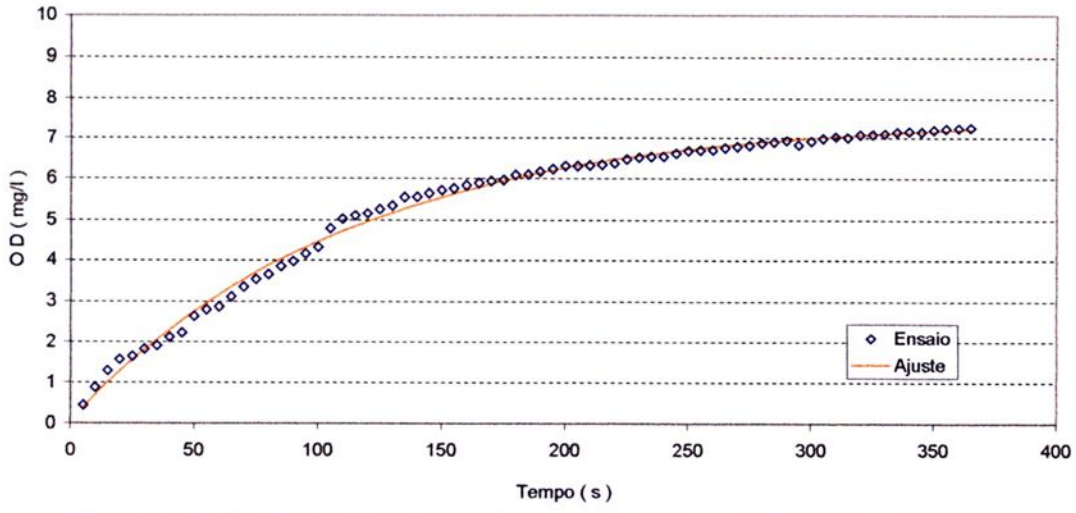


Figura 3.43: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1100l/h.

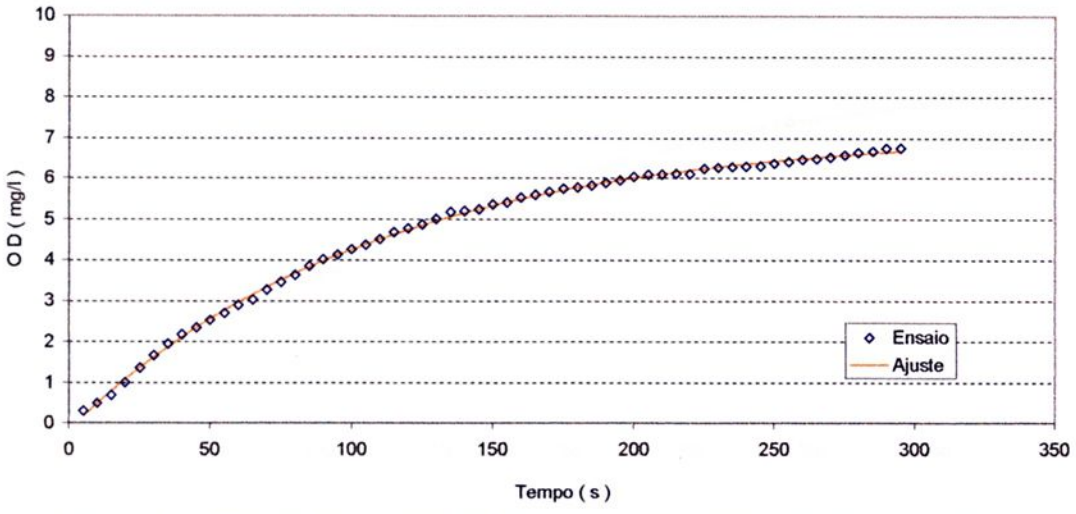


Figura 3.44: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1100l/h.

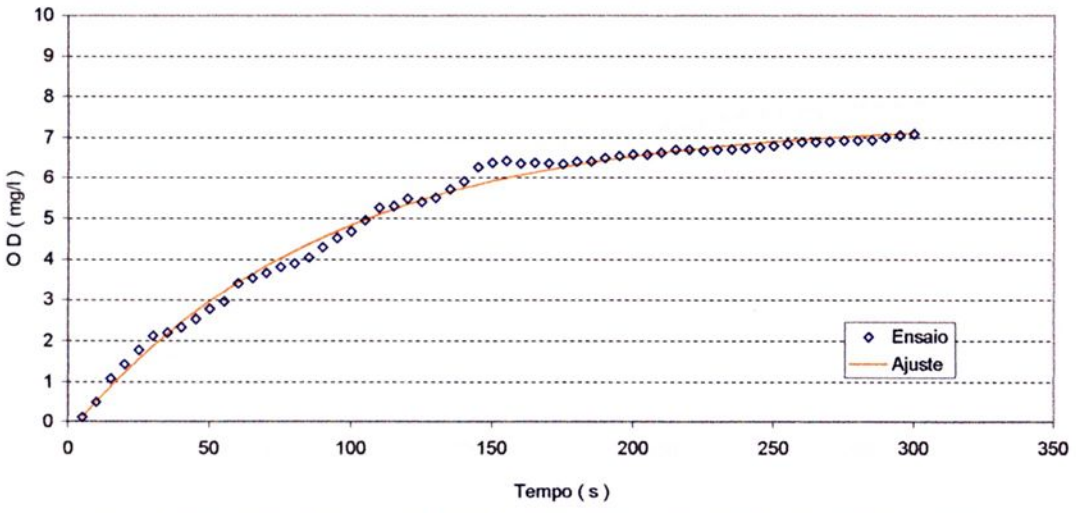


Figura 3.45: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1100l/h.

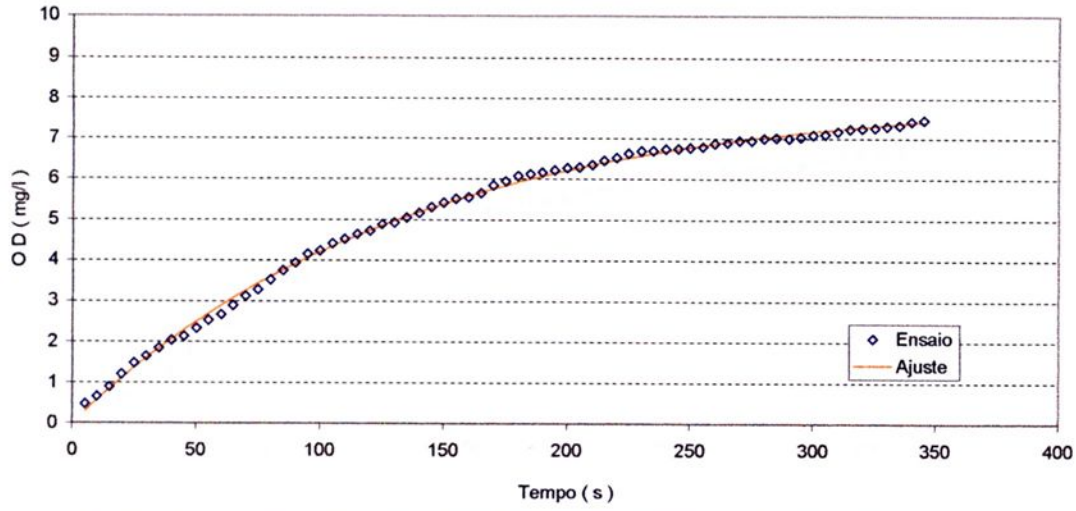


Figura 3.46: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1100l/h.

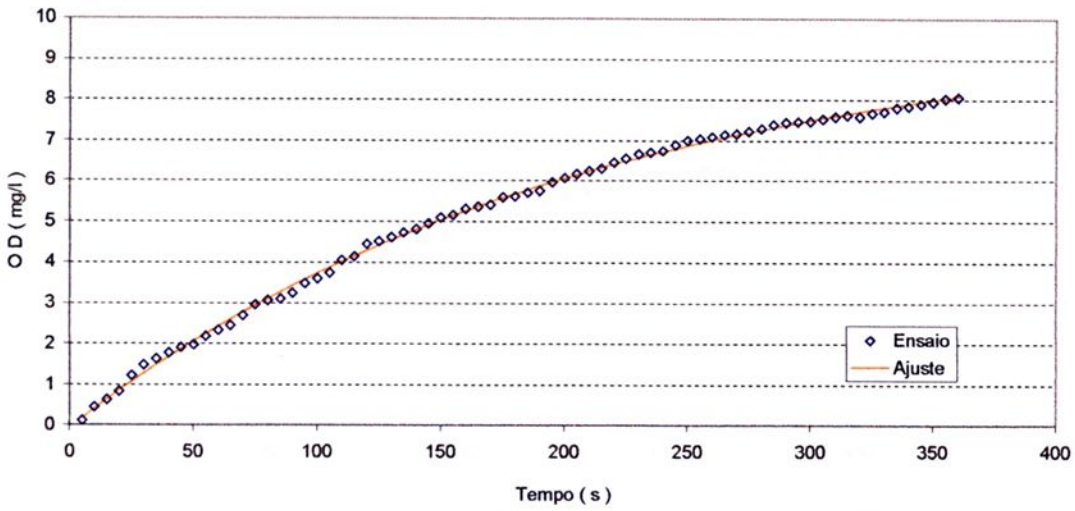


Figura 3.47: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1100l/h.

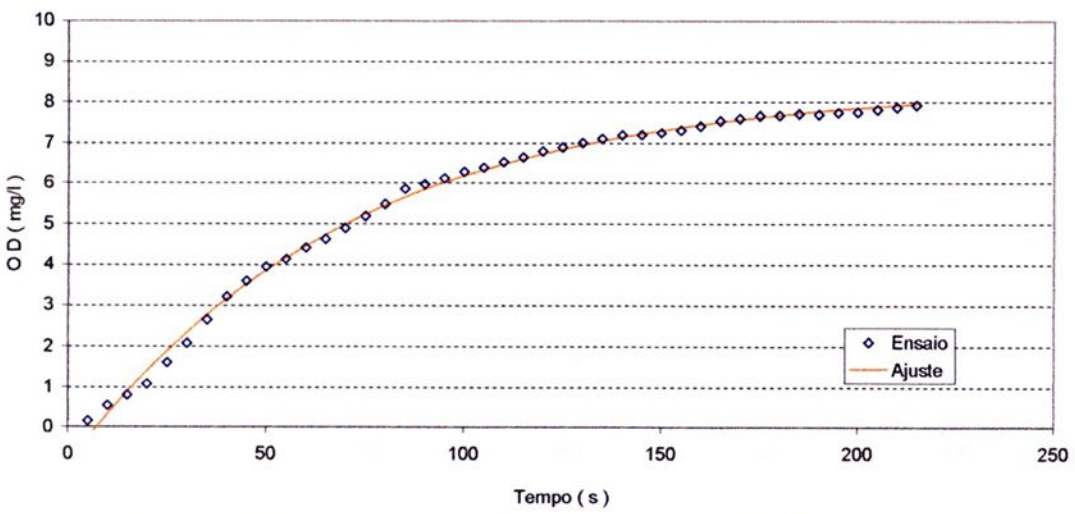


Figura 3.48: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1500l/h.

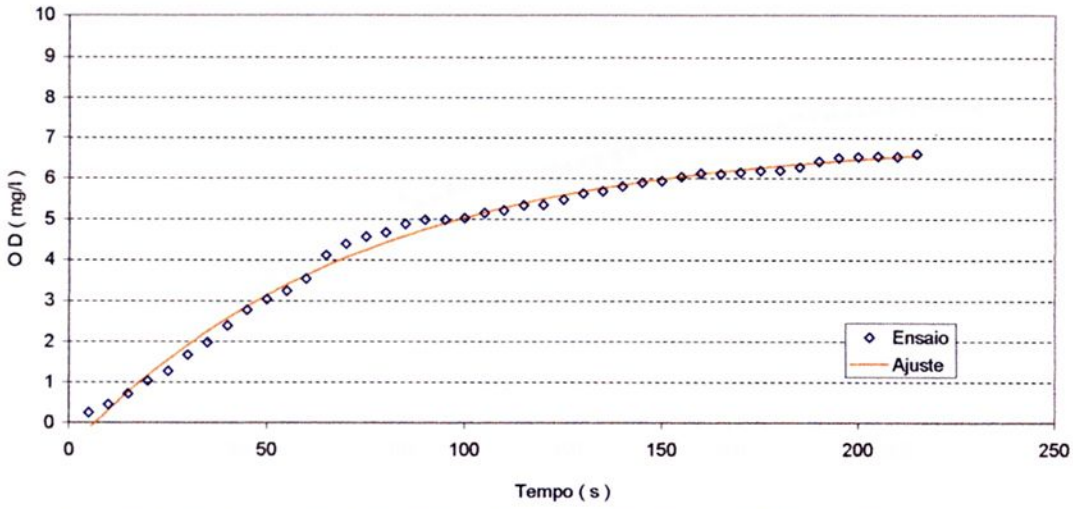


Figura 3.49: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1500l/h.

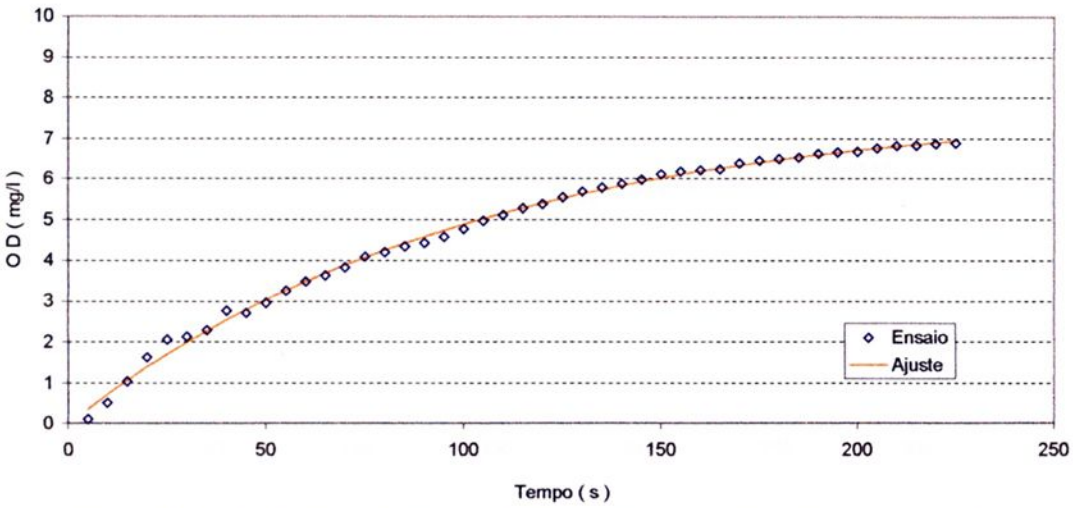


Figura 3.50: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1500l/h.

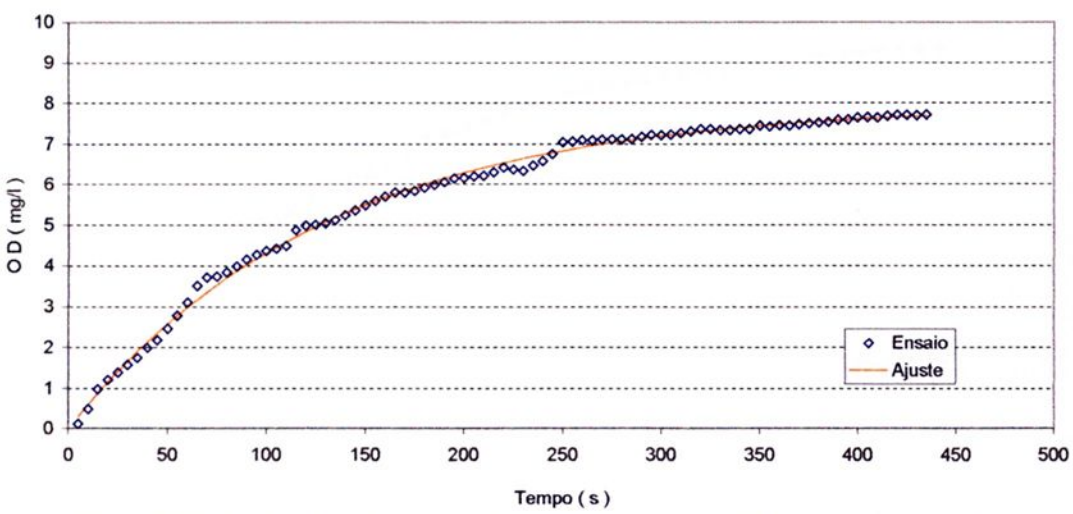


Figura 3.51: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1500l/h.

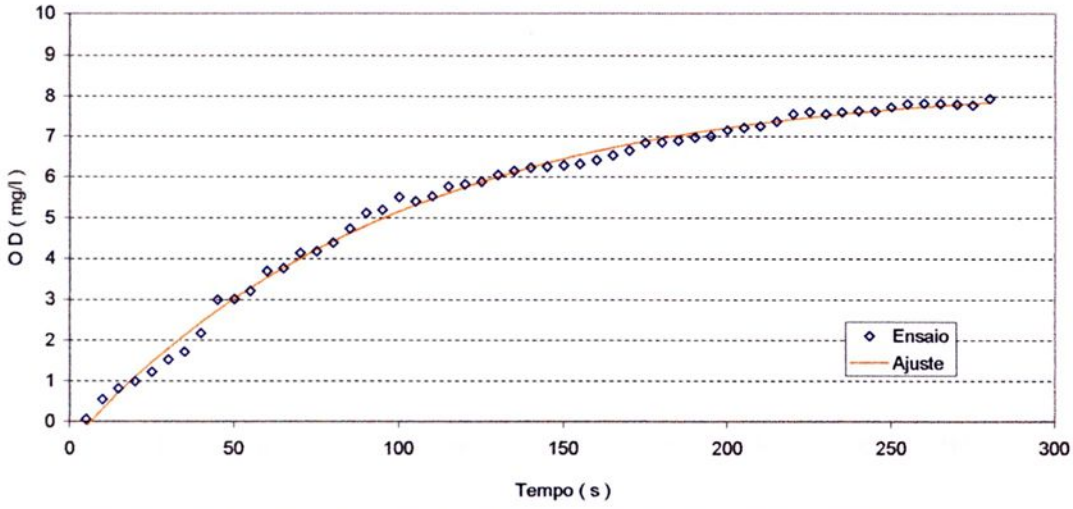


Figura 3.52: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1500l/h.

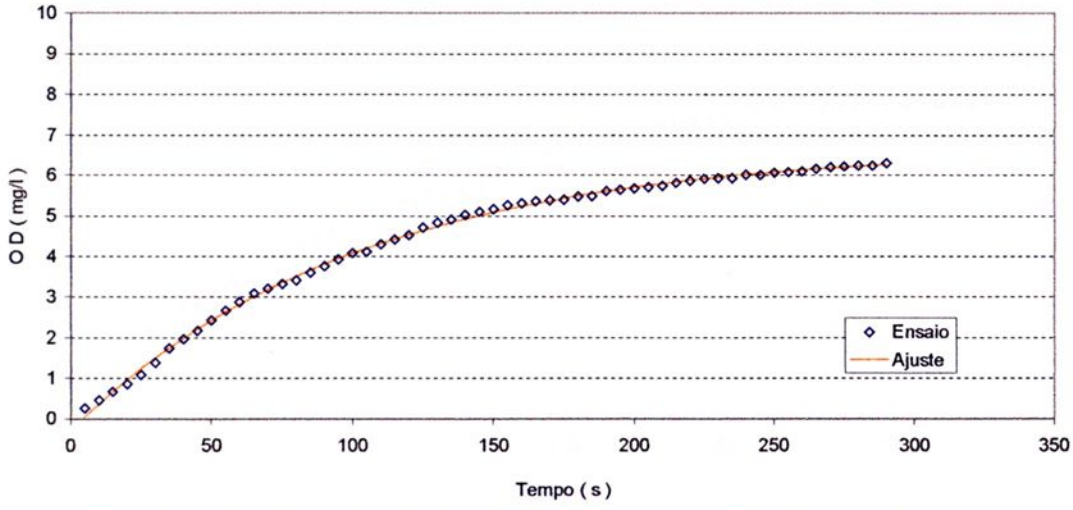


Figura 3.53: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 1500l/h.

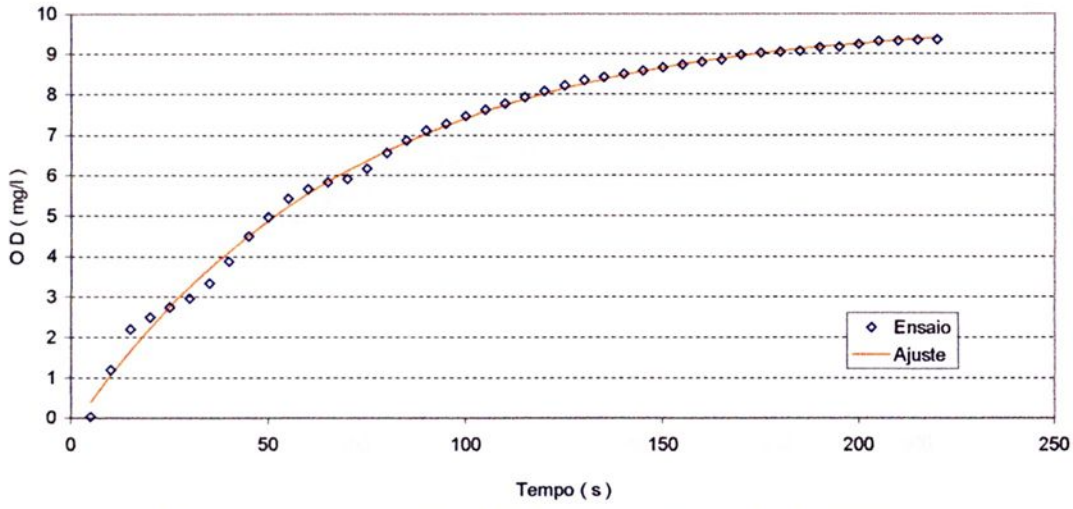


Figura 3.54: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2000l/h.

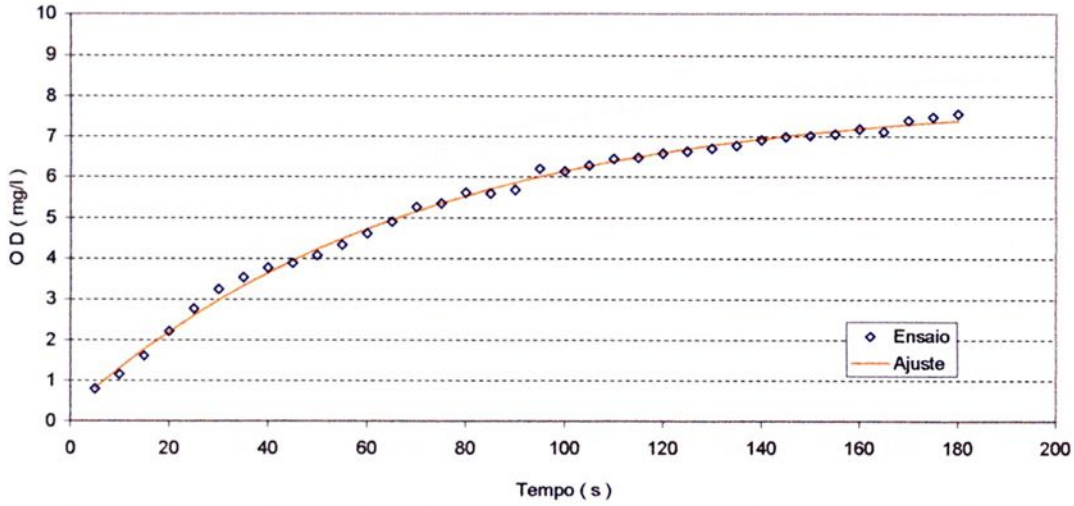


Figura 3.55: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2000l/h.

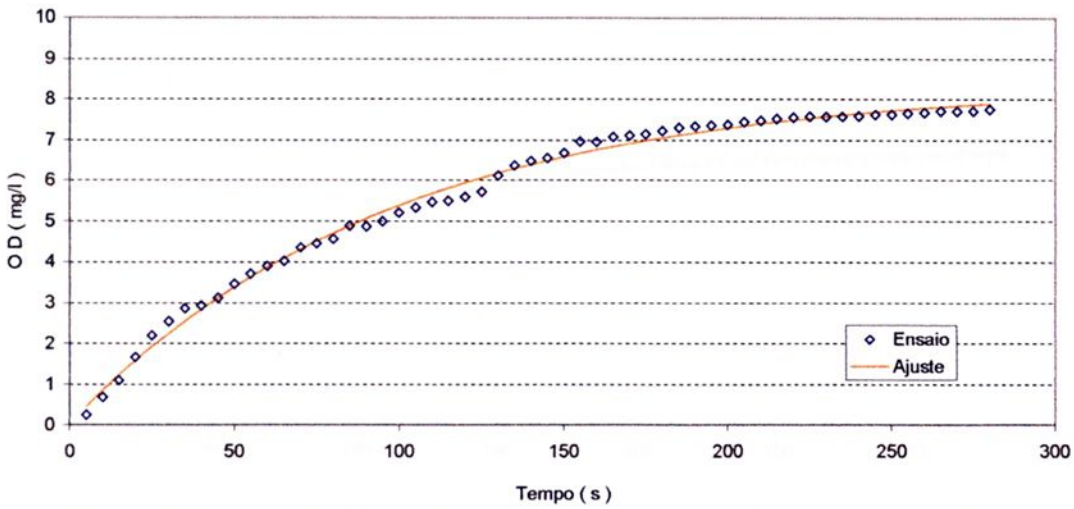


Figura 3.56: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2000l/h.

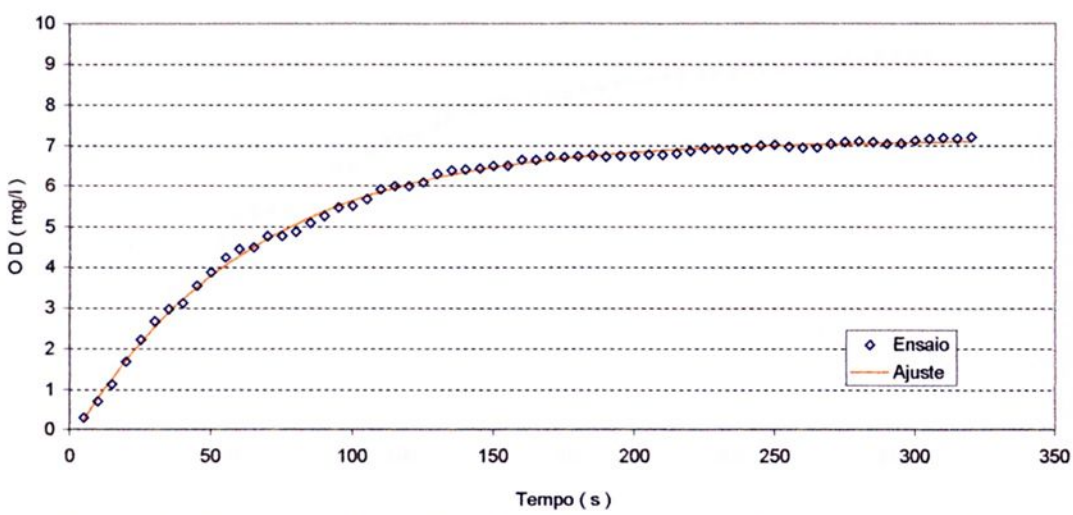


Figura 3.57: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2000l/h.

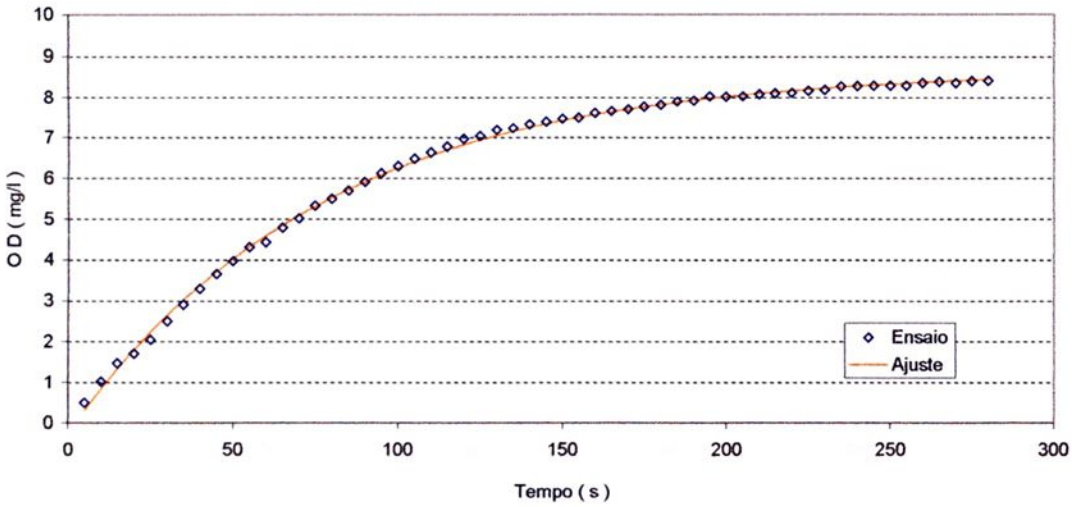


Figura 3.58: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2000l/h.

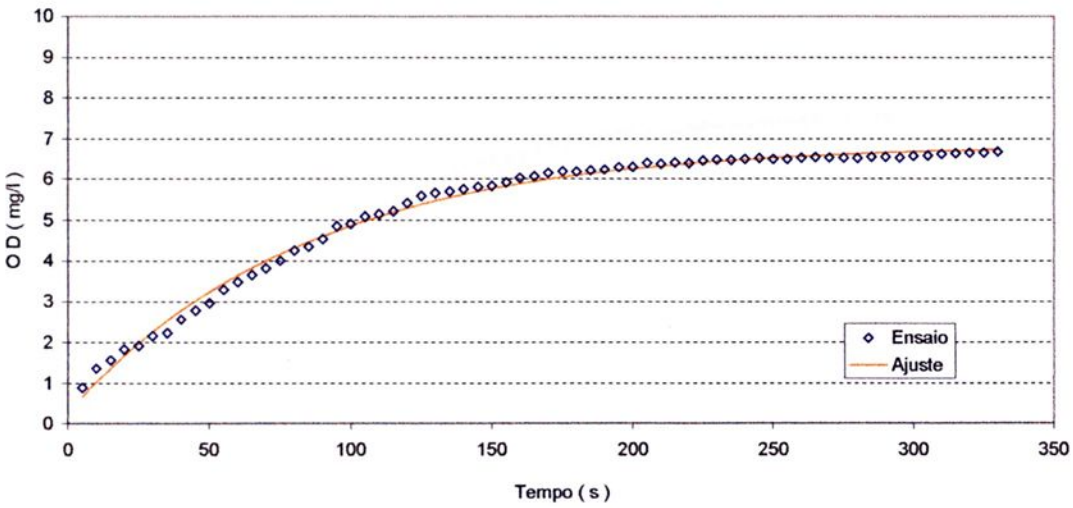


Figura 3.59: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2000l/h.

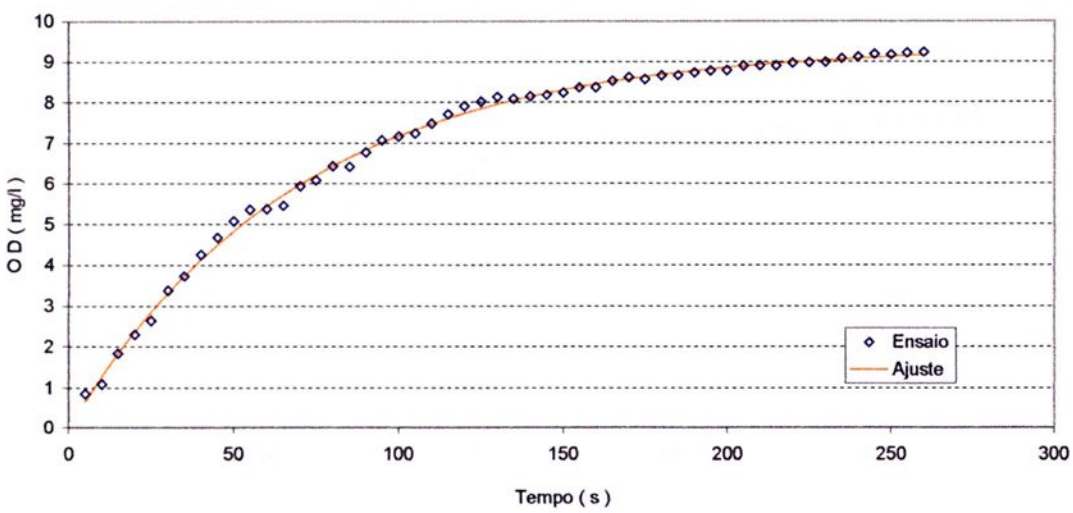


Figura 3.60: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2500l/h.

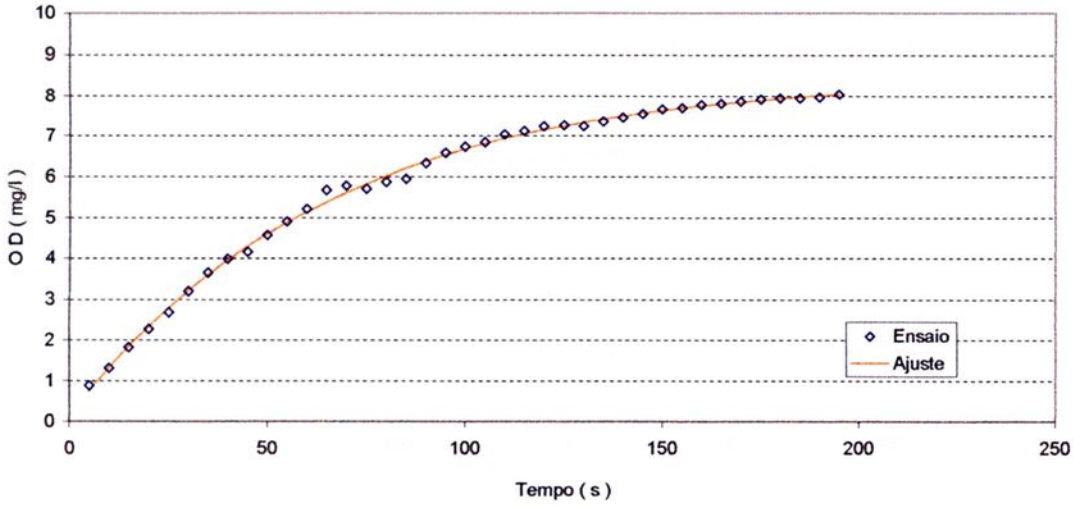


Figura 3.61: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2500l/h.

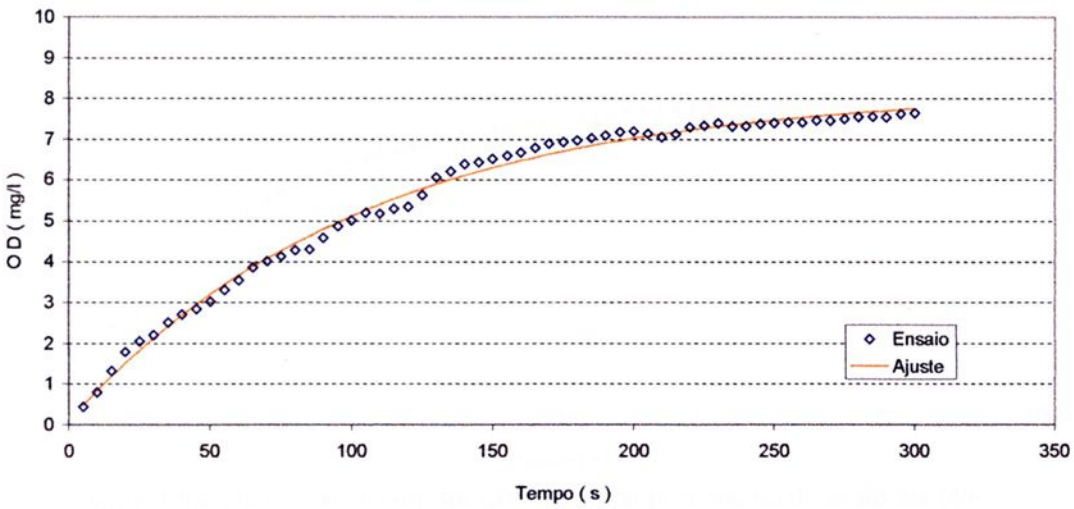


Figura 3.62: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2500l/h.

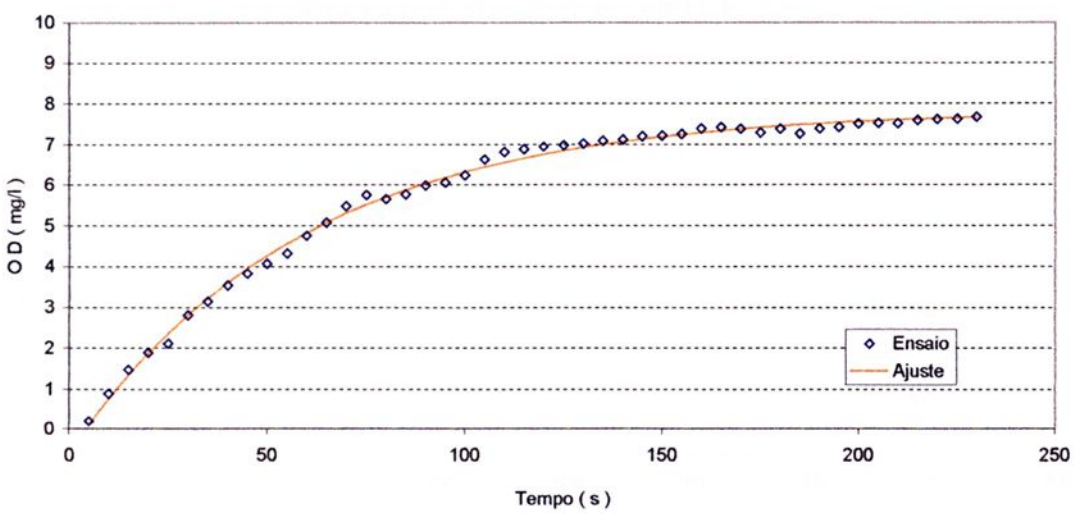


Figura 3.63: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2500l/h.

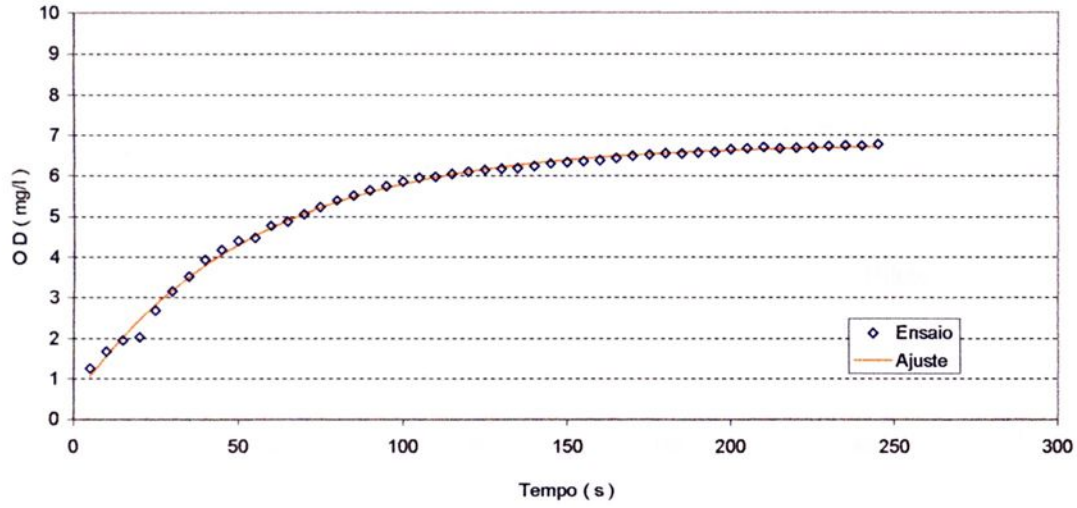


Figura 3.64: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2500l/h.

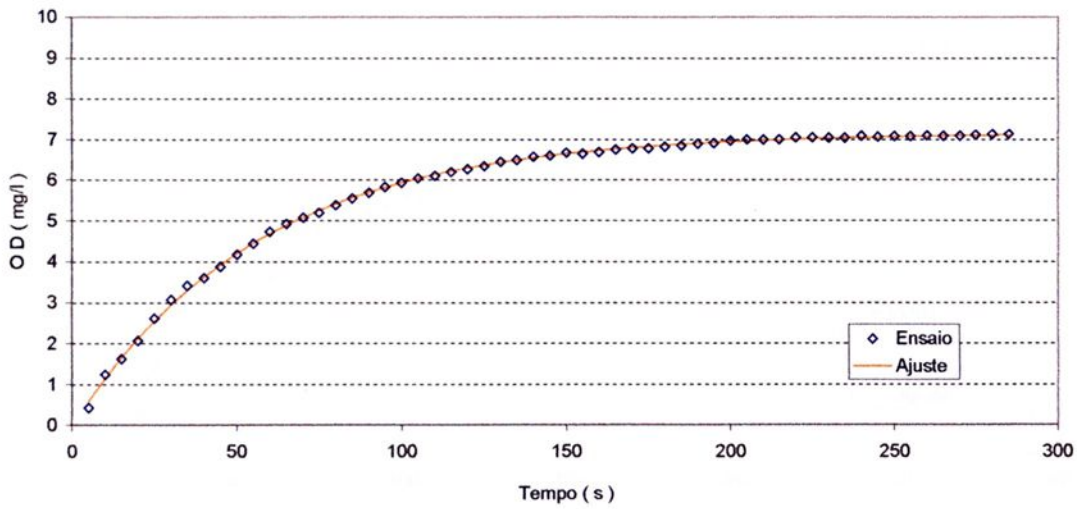


Figura 3.65: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2500l/h.

Figuras 3.66 a 3.78

Gráficos dos ensaios no reator piloto de 6m.

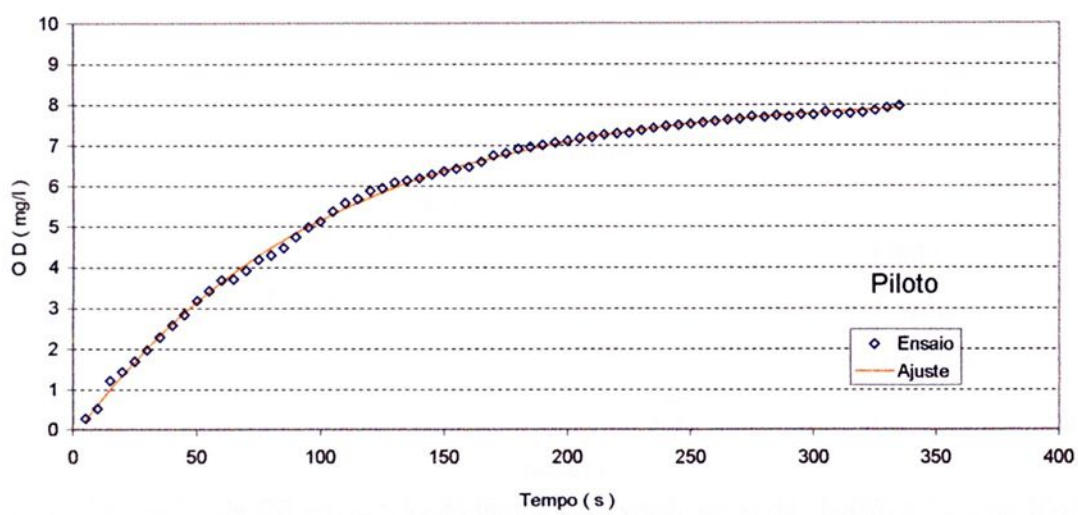


Figura 3.66: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2000l/h e C_{areia} de 0g/l.

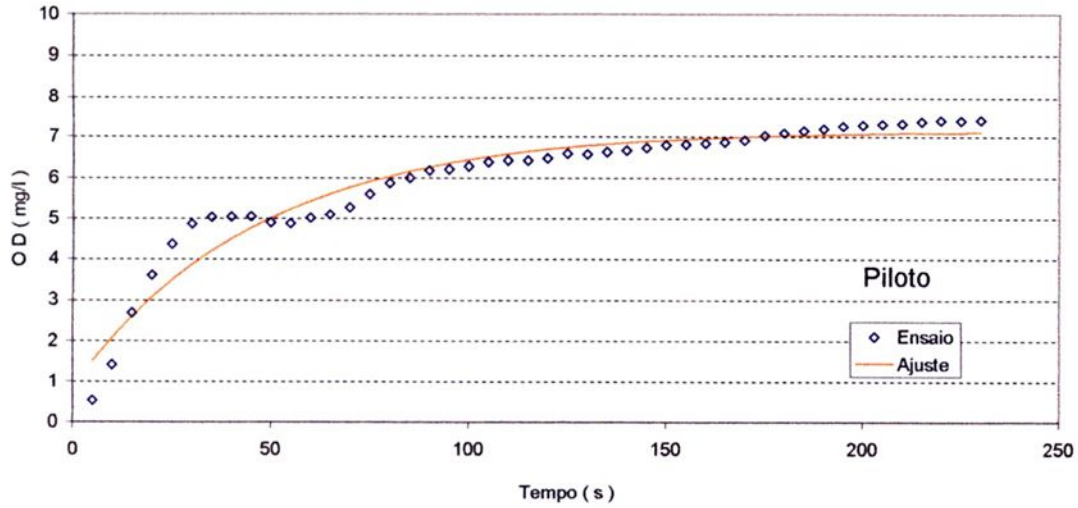


Figura 3.67: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 3500l/h e C_{areia} de 0g/l.

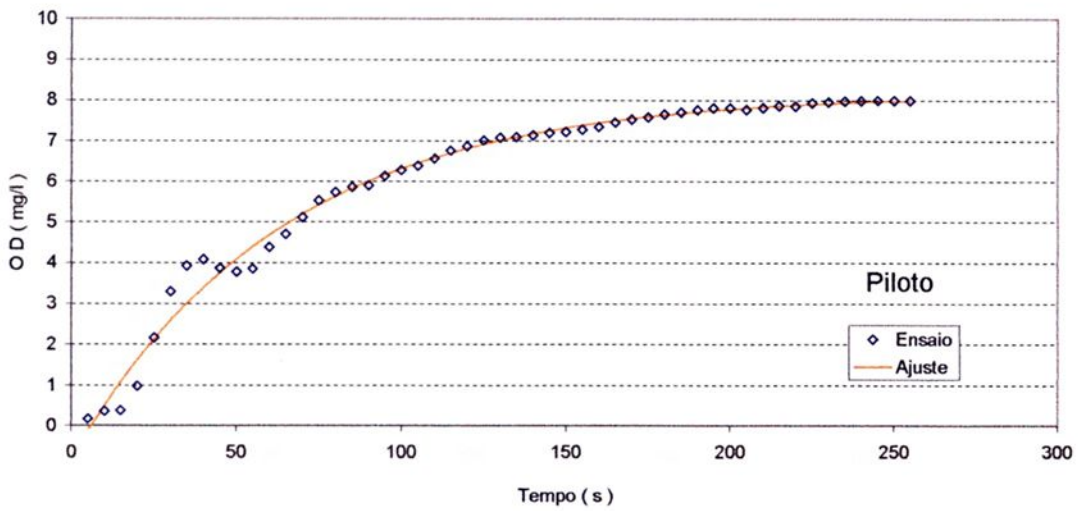


Figura 3.68: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 5000l/h e C_{areia} de 0g/l.

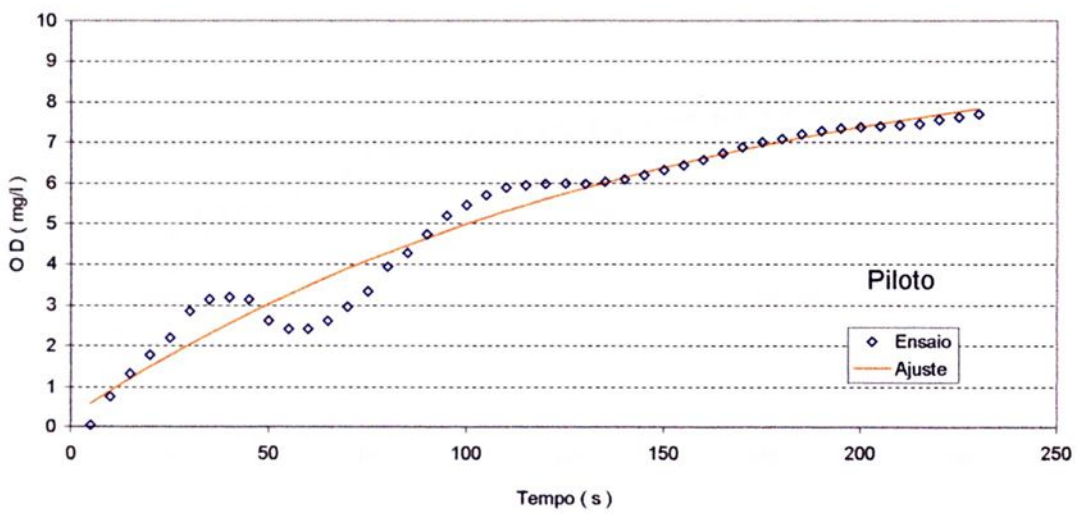


Figura 3.69: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2000l/h e C_{areia} de 50g/l.

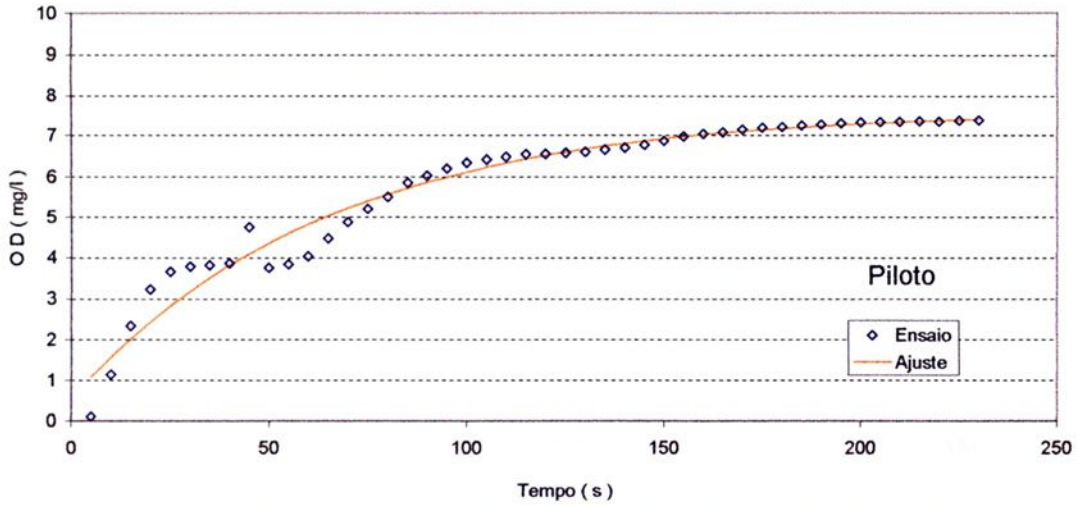


Figura 3.70: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 3500l/h e C_{areia} de 50g/l.

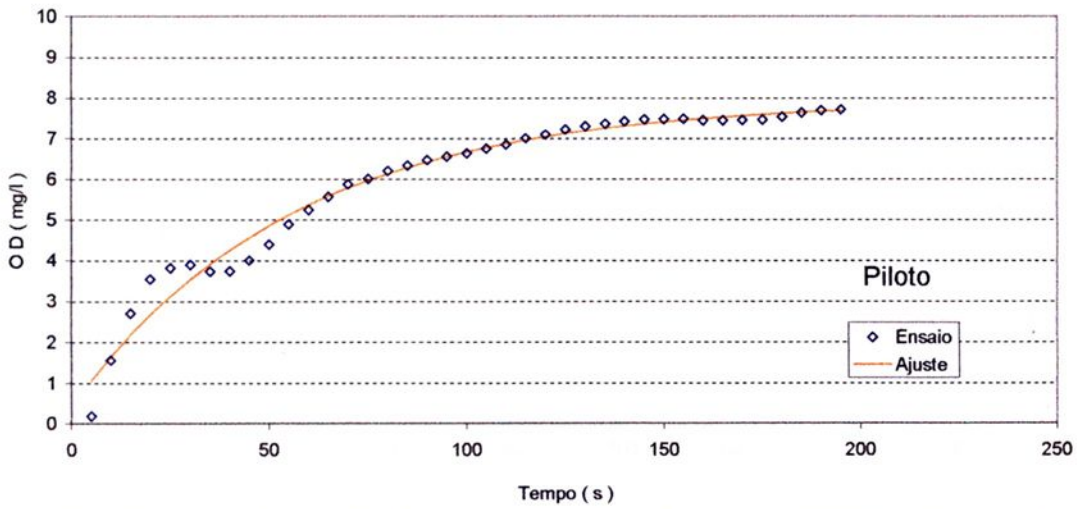


Figura 3.71: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 5000l/h e C_{areia} de 50g/l.

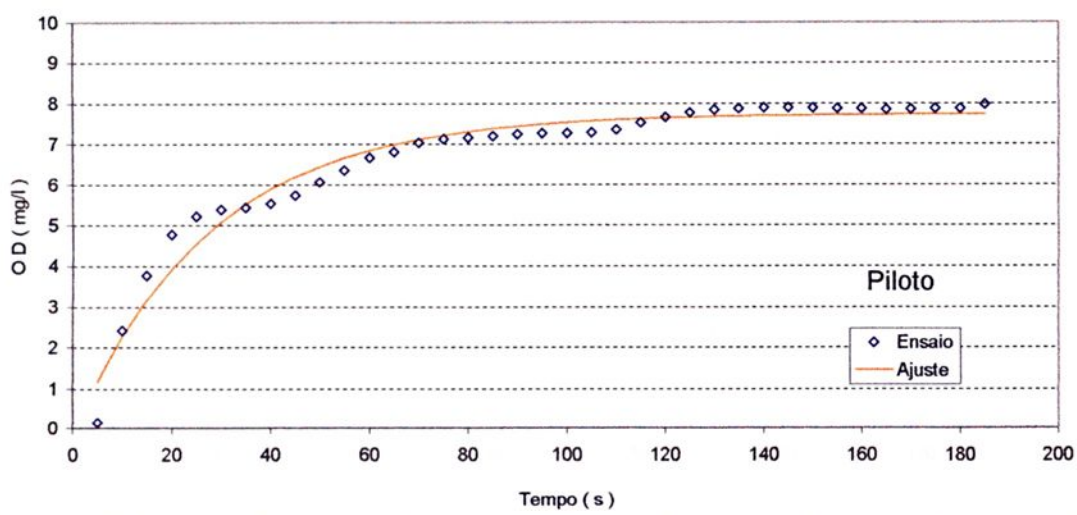


Figura 3.72: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 6500l/h e C_{areia} de 50g/l.

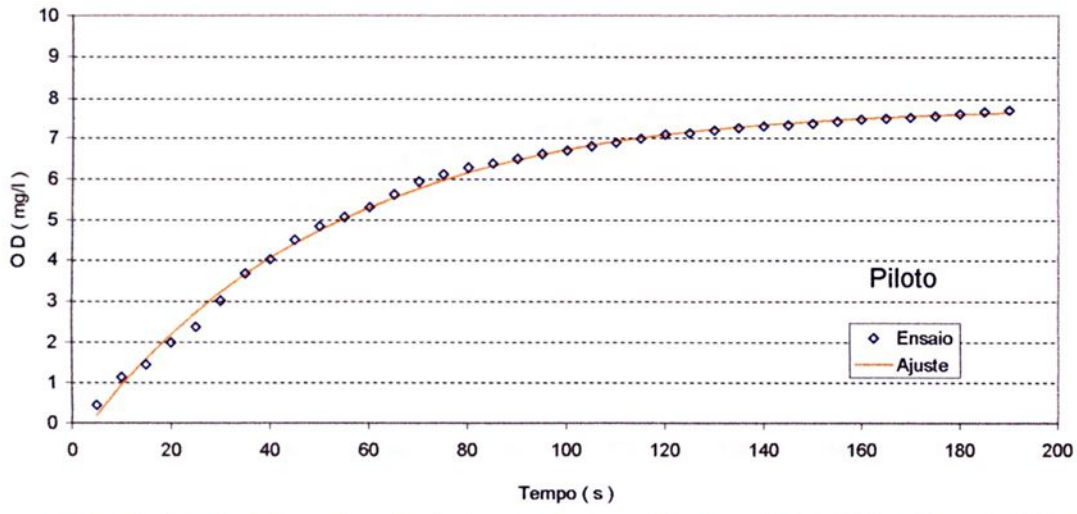


Figura 3.73: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2500l/h e C_{areia} de 100g/l.

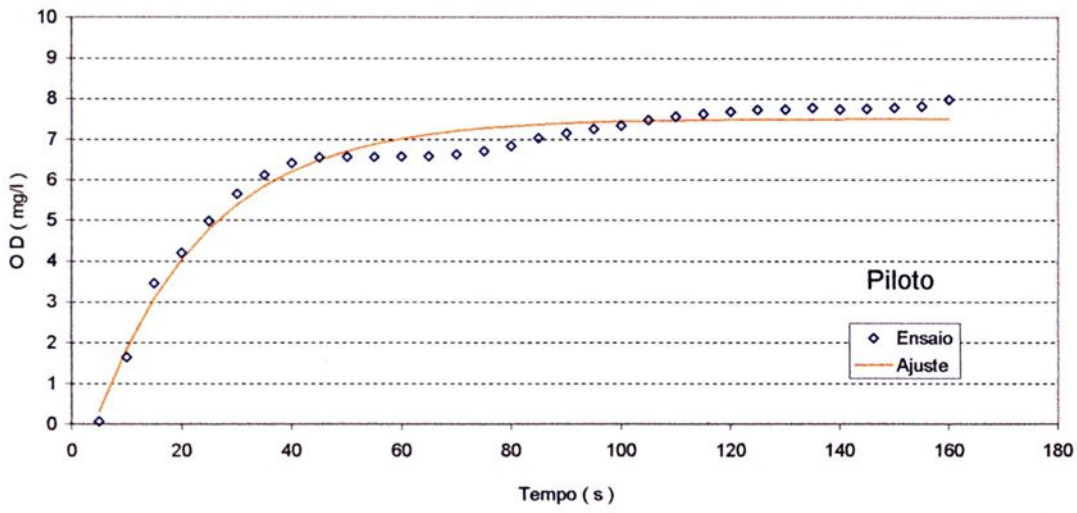


Figura 3.74: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 4000l/h e C_{areia} de 100g/l.

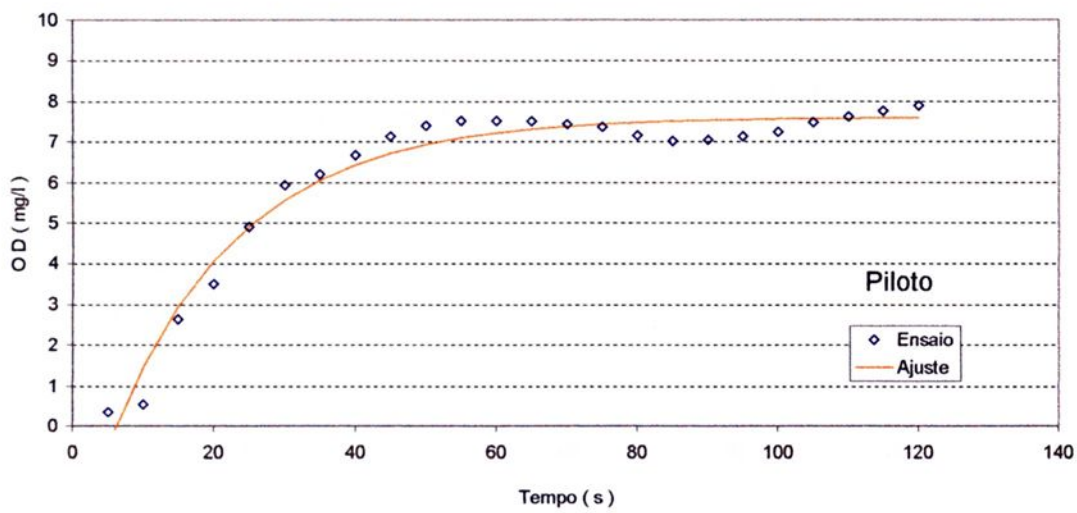


Figura 3.75: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 6000l/h e C_{areia} de 100g/l.

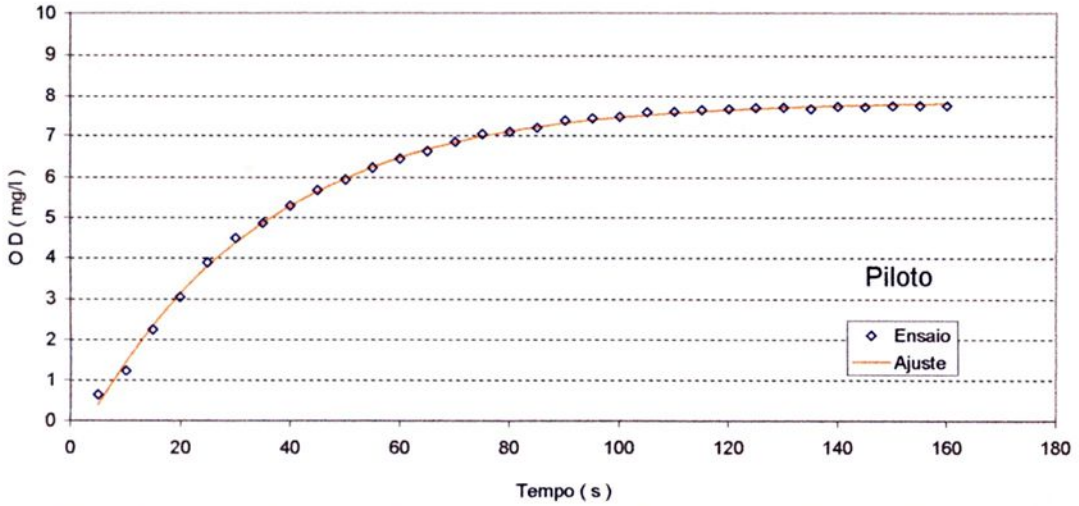


Figura 3.76: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 2500l/h e C_{areia} de 150g/l.

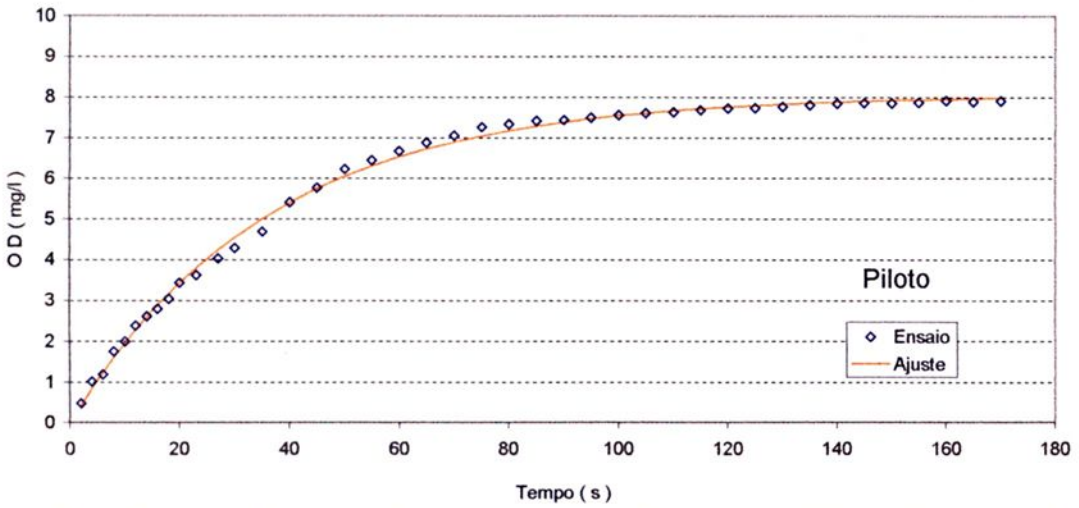


Figura 3.77: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 4000l/h e C_{areia} de 150g/l.

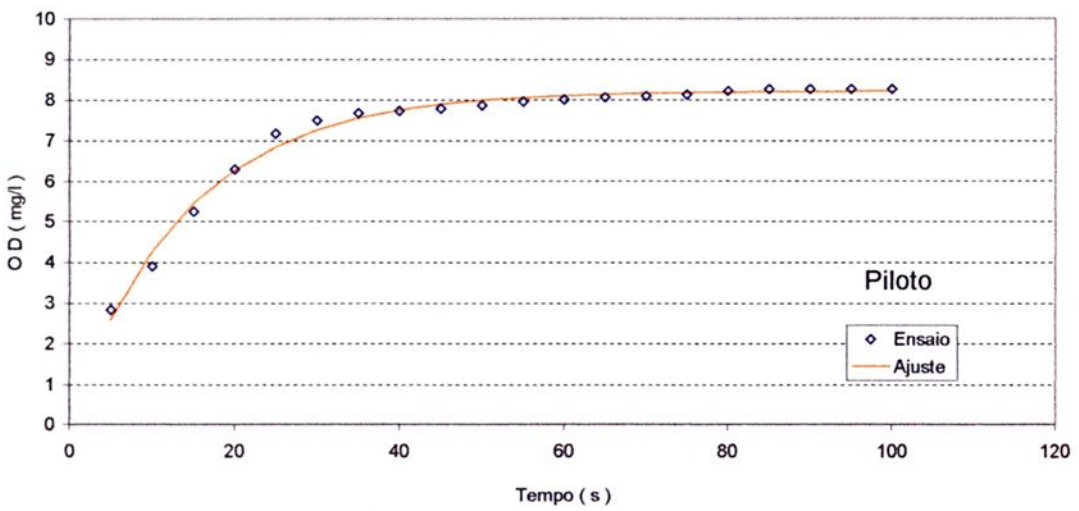


Figura 3.78: Dados de OD em função do tempo para vazão de ar de 6000l/h e C_{areia} de 150g/l.

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Av. Brasil Centro, 56
15385-000 Ilha Solteira - SP
www.dec.feis.unesp.br