

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO

DANIEL JADYR LEITE COSTA

Estudo da Influência de Macro-Rugosidades do Leito de
um Canal Hidráulico sobre o Coeficiente de
Reoxigenação Superficial

Versão Corrigida
São Carlos, SP
2011

DANIEL JADYR LEITE COSTA

Estudo da Influência de Macro-Rugosidades do Leito de
um Canal Hidráulico sobre o Coeficiente de
Reoxigenação Superficial

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos,
Universidade de São Paulo, como
parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Ciências
(Engenharia Hidráulica e
Saneamento).

Orientador: Prof. Dr. Marcius F.
Giorgetti

São Carlos, SP
2011

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

C837e Costa, Daniel Jadyr Leite
Estudo da influência de macro-rugosidades do leito de um canal hidráulico sobre o coeficiente de reoxigenação superficial / Daniel Jadyr Leite Costa ; orientador Marcius F. Giorgetti. -- São Carlos, 2011.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia Hidráulica e Saneamento) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

1. Macro-rugosidades. 2. Reoxigenação superficial. 3. Transferência de gases. 4. Interface ar-água.
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **DANIEL JADYR LEITE COSTA**.

Dissertação defendida e julgada em 23/03/2011 perante a Comissão Julgadora:



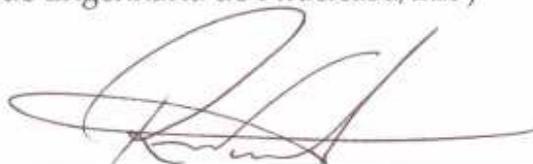
APROVADO

Prof. Titular **MARCIUS FANTOZZI GIORGETTI** - (Orientador) - (Aposentado)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)



APROVADO

Prof. Titular **LEONARDO RIOS**
(Escola de Engenharia de Piracicaba/EEP)

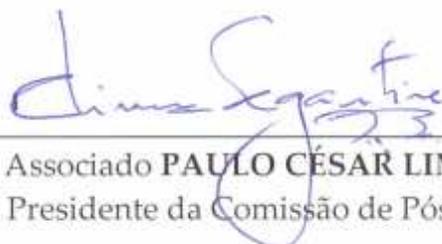


Aprovado

Prof. Associado **RODRIGO DE MELO PORTO**



Prof. Titular **EDSON CEZAR WENDLAND**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Hidráulica e Saneamento



Prof. Associado **PAULO CÉSAR LIMA SEGANTINE**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Reinaldo e Mara, ao meu irmão Thiago, e a todos os meus familiares, pelo amor, incentivo, otimismo e conselhos de ontem, hoje e sempre.

AGRADECIMENTOS

Ao professor, orientador e conselheiro Dr. Marcius F. Giorgetti, pela disposição em ajudar sempre que precisei.

Aos professores Denilson Teixeira e Leonardo Rios por me incentivarem, desde o início, a seguir a carreira acadêmica e pelos valiosos conselhos profissionais e pessoais.

Ao amigo Julio Cesar pela constante ajuda, disponibilidade e preciosas conversas.

Aos amigos de laboratório André Simões e Hemerson Pinheiro pelas valiosas contribuições e direcionamentos em meus estudos.

Ao Roberto C. Bérghamo, grande funcionário e técnico do laboratório de Fenômenos de Transporte do SHS, sempre presente conosco e sempre prestativo às nossas necessidades.

Aos funcionários e professores do SHS pelo auxílio e disposição em ajudar, em especial à Sá e à Pavi.

À Mariana, pelo amor, carinho e companheirismo. Muito obrigado.

Ao parceiro e amigo Romualdo Brito. Por sua simplicidade e conselhos de grande consistência. Por compartilhar conosco suas experiências pelo mundo fora. Sem dúvida sentiremos sua falta.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro.

RESUMO

COSTA, D. J. L. - Estudo da Influência de Macro-Rugosidades do Leito de um Canal Hidráulico sobre o Coeficiente de Reoxigenação Superficial. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2011.

O parâmetro que determina o processo de transferência de oxigênio através da interface ar-água em escoamentos com superfície livre é o coeficiente de reaeração superficial, K_2 . Existe um grande número de equações na literatura científica que realizam a previsão do coeficiente de reaeração, no entanto, a maioria dessas equações considera apenas algumas características hidráulicas do corpo de água como a velocidade e a profundidade, e ainda, como em sua maioria são de natureza empírica, acabam sendo adequadas para corpos de água específicos. Além destes dois parâmetros (velocidade e profundidade do escoamento), existem outros doze que são considerados importantes para estudos de reoxigenação em águas superficiais. É neste contexto que o objetivo deste trabalho foi estudar em condições de laboratório a influência da rugosidade do leito de um canal sobre o coeficiente de reaeração superficial. Além da rugosidade, foram variadas as condições de velocidade média do escoamento e profundidade da lâmina de água. A variação da rugosidade foi realizada através da implementação de obstáculos com geometria conhecida, dispostos transversalmente ao escoamento, e denominados como macro-rugosidades. Os resultados demonstraram evidências de que o coeficiente de reaeração superficial é controlado de forma significativa pela rugosidade do leito do canal. Foram desenvolvidos dois modelos matemáticos de natureza semi-empírica para a previsão do K_2 , os quais incorporam variáveis hidrodinâmicas e geométricas consideradas relevantes para o processo de transferência de massa na interface ar-água.

Palavras-chave: macro-rugosidades, reoxigenação superficial, transferência de gases, interface ar-água.

ABSTRACT

COSTA, D. J. L. - **Study about the Influence of Macro-Roughness in a Bed of a Hydraulic Channel on the Reoxygenation Superficial Coefficient.** Dissertation, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2011.

The parameter that determines the process of oxygen transfer through the air-water interface in flows with free surface is the superficial reaeration coefficient, K_2 . There are a large quantity of equations in the scientific literature that perform the prevision of the reaeration coefficient; however, most of them consider only some of the hydraulic characteristics of water body; for example, the velocity and the depth. Most of these equations have empirical origin and are adequate just for a specific water body. In addition to these two parameters (velocity and depth of flow), there are another twelve important parameters in reoxygenation studies in superficial waters. In this context, the aim of this work was to study the influence of bed roughness of a channel on the superficial reaeration coefficient, under laboratory conditions. Besides the roughness, the conditions of mean velocity of the flow and depth of water were varied. The variation of roughness was done with implementation of obstacles with known geometry, arranged transversely to the flow direction, and called macro-roughness. The results have shown evidences that the surface reaeration coefficient is controlled significantly by the roughness of the channel bed. Two mathematical models of semi-empirical origin for the K_2 prevision were developed, which incorporate hydrodynamic and geometric variables considered relevant in the process of mass transfer in air-water interface.

Keywords: macro-roughness, superficial reoxygenation, gas transfer, air-water interface

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	i
LISTA DE FIGURAS.....	iii
LISTA DE TABELAS.....	v
PARÂMETROS ADIMENSIONAIS.....	vi
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
2 OBJETIVOS.....	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1 Conceitos Fundamentais sobre Reoxigenação Superficial.....	5
3.1.1 Mecanismos que governam a transferência de gases na interface ar-água.....	5
3.1.2 Equações governantes.....	7
3.1.3 Velocidade de transferência de gases na interface ar-água (K_L).....	9
3.1.4 Resistência na fase líquida.....	10
3.1.5 Modelos de transferência de gases.....	11
3.1.5.1 Modelos conceituais.....	12
3.1.5.2 Modelos empíricos.....	13
3.1.6 Influência da temperatura sobre o coeficiente de reaeração.....	18
3.1.7 Influência da umidade atmosférica sobre o coeficiente de reaeração.....	20
3.2 Conceitos Fundamentais sobre Resistência ao Escoamento.....	21
3.2.1 Rugosidade e camada limite.....	24
3.2.2 O Fator de Atrito f	26
3.2.3 Macro-Rugosidade em canais.....	27
3.3 Estudos sobre a Influência de Macro-Rugosidades no Coeficiente de Reoxigenação Superficial.....	31
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
4.1 Aspectos gerais.....	36
4.2 Descrição da bancada experimental.....	36
4.3 Determinação da vazão e velocidade média do escoamento.....	39
4.4 Procedimentos experimentais.....	42

4.5 Construção de um modelo de regressão para o K_2	46
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
5.1 Características hidráulicas dos escoamentos	48
5.2 Coeficiente de Reoxigenação	50
5.3 Coeficiente de Rugosidade de Manning relativo	57
5.4 Construção de um modelo de regressão para K_2	61
5.4.1 Análise dimensional para o coeficiente de reaeração superficial.....	61
5.4.2 Análise de regressão.....	65
6 CONCLUSÕES	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
APÊNDICE.....	81

LISTA DE SÍMBOLOS

A = Área de interface gás-líquido	L^2
C = Concentração de gás dissolvido no volume líquido	ML^{-3}
C_0 = Concentração inicial de oxigênio dissolvido	ML^{-3}
C_s = Concentração de saturação de oxigênio dissolvido no líquido	ML^{-3}
C_L = Concentração do gás na fase líquida	ML^{-3}
D_m = Coeficiente de difusão molecular do gás no líquido	L^2T^{-1}
e = altura dos elementos rugosos	L
Fr = número de Froude, adimensional	
g = aceleração da gravidade	LT^{-2}
H = profundidade média do escoamento	L
J = Fluxo de massa ou taxa de transferência gasosa	ML^2T^{-1}
K_2 = Coeficiente de reoxigenação superficial	T^{-1}
$K_{2,20}$ = Coeficiente de reoxigenação superficial a 20°C	T^{-1}
K_g = Coeficiente do filme gasoso	LT^{-1}
K_l = Coeficiente do filme líquido	LT^{-1}
K_L = Coeficiente volumétrico de transferência de massa	T^{-1}
m = Massa de gás dissolvido	M
n = Coeficiente de rugosidade de Manning	$L^{-\frac{1}{3}}T$
n_r = Coeficiente de rugosidade de Manning relativo	$L^{-\frac{1}{3}}T$
p = Pressão atmosférica	$ML^{-1}T^2$
Re = Número de Reynolds, adimensional	
R_H = Raio hidráulico	L
R^2 = Coeficiente de determinação, adimensional	

Sh = Número de Sherwood, adimensional

t = Tempo T

T = Temperatura Θ

T' = Tempo médio de contato da parcela fluida na interface T

V = Velocidade média do escoamento LT^{-1}

We = Número de Weber, adimensional

λ = Distância entre os elementos rugosos L

ρ = Massa específica do fluido ML^{-3}

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração esquemática das fontes de geração de turbulência que governam a transferência de gases na interface ar-água no ambiente aquático.....	5
Figura 2 – Diagrama ilustrativo do processo de transferência de gases na interface ar-água, ocasionado pela tensão de cisalhamento no leito.....	6
Figura 3 – Imagens instantâneas da concentração de oxigênio dissolvido em um tanque com grade oscilatória.....	7
Figura 4 – Percentual de resistência de transferência de gases para a fase líquida em função da constante de Henry (H_c).....	11
Figura 5 – K_2 para rios (Velocidade média $U = 0,5$ m/s).....	16
Figura 6 – Forças que atuam sobre a massa fluida.....	21
Figura 7 – Transição da Camada Limite sobre Placa Plana.....	25
Figura 8 – Diagrama de Moody.....	27
Figura 9 – Descrição dos regimes intermediários de escoamento.....	28
Figura 10 – Classificação dos padrões de escoamento para diferentes rugosidades.....	30
Figura 11 – Variação do fator de atrito (f) em função do espaço relativo (λ/k).....	30
Figura 12 – Escoamento não-uniforme formado pelos elementos macro-rugosos submersos e não-submersos.....	32
Figura 13 - Ação da superfície de atrito oposta ao movimento das águas.....	33
Figura 14 – Valores de K_2 em função das profundidades médias.....	34
Figura 15 – Valores de K_2 em função dos fatores de resistência médios.....	34
Figura 16 – Valores de K_2 em função das profundidades pelos fatores de resistência (rugosidade) médios.....	35
Figura 17 – Esquema da montagem experimental do canal hidráulico.....	37
Figura 18 – Canal hidráulico.....	37
Figura 19 - Volante para variação da declividade do leito.....	38
Figura 20 – Conjunto motor-bomba de 5hp.....	38
Figura 21 – Inversor de frequência.....	38
Figura 22 – Sonda de OD.....	39
Figura 23 – Trocador de calor.....	39
Figura 24 – Medidor de vazão tipo orifício (ou diafragma).....	40
Figura 25 – Medidor de vazão.....	40

Figura 25' – Volume de controle.....	41
Figura 26 – Corte transversal da calha do canal.....	42
Figura 27 – Processo de <i>stripping</i>	43
Figura 28 – Elementos rugosos.....	44
Figura 29 – Configuração geométrica do leito para o escoamento turbulento liso ($\lambda/K = \infty$).....	44
Figura 30 – Configuração geométrica do leito para o escoamento turbulento semi-liso ($\lambda/K = 26,6$).....	44
Figura 31 – Configuração geométrica do leito para o escoamento hiperturbulento não-uniforme ($\lambda/K = 13,3$).....	45
Figura 32 – Configuração geométrica do leito para o escoamento hiperturbulento uniforme ($\lambda/K = 6,6$).....	45
Figura 33 – Configuração geométrica do leito para o escoamento quase-liso ($\lambda/K = 3,3$).....	45
Figura 34 – Elementos de transição.....	46
Figura 35 – Seções definidas para determinação do regime de escoamento (seções A e B) e para aferição da altura da lâmina de água (seções 1, 2 e 3).....	48
Figura 36 – Escoamento não-uniforme formado pelos elementos macro-rugosos submersos.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diferentes equações empíricas para previsão do K_2 (dia^{-1} a $20\text{ }^\circ\text{C}$) para rios.....	15
Tabela 2 – Parâmetros a serem considerados em estudos de reoxigenação.....	17
Tabela 3 – Características hidráulicas dos escoamentos e coeficientes de reoxigenação ($V = 0,111\text{ m/s}$).....	51
Tabela 4 – Características hidráulicas dos escoamentos e coeficientes de reoxigenação ($V = 0,161\text{ m/s}$).....	52
Tabela 5 – Características hidráulicas dos escoamentos e coeficientes de reoxigenação ($V = 0,22\text{ m/s}$).....	53
Tabela 6 – Características hidráulicas dos escoamentos e rugosidade de Manning relativa (n_r) ($V = 0,111\text{ m/s}$).....	58
Tabela 7 – Características hidráulicas dos escoamentos e rugosidade de Manning relativa (n_r) ($V = 0,161\text{ m/s}$).....	59
Tabela 8 – Características hidráulicas dos escoamentos e rugosidade de Manning relativa (n_r) ($V = 0,22\text{ m/s}$).....	60
Tabela 9 – Valores médios do coeficiente de Manning n para o escoamento da água em canais abertos.....	61
Tabela 10 – Resultados dos cálculos das grandezas adimensionais.....	67
Tabela 11 – Resultados da aplicação da regressão linear multivariada para o modelo matemático 1.....	68
Tabela 12 – Resultados dos cálculos das grandezas adimensionais.....	71
Tabela 13 – Resultados da aplicação da regressão linear multivariada para o modelo matemático 2.....	72

PARÂMETROS ADIMENSIONAIS

<u>Nome</u>	<u>Definição*</u>	<u>Razão de significância</u>
Número de Froude	$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$ ou $\left(\frac{V^2}{gL}\right)$	$\frac{\text{Força inercial}}{\text{Força gravitacional}}$
Número de Reynolds	$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu}$	$\frac{\text{Força inercial}}{\text{Força viscosa}}$
Número de Sherwood	$Sh = \frac{VL}{D_{AB}}$	$\frac{\text{Difusão de massa total}}{\text{Difusão de espécies}}$
Número de Weber	$We = \frac{\rho V^2 L}{\sigma_s}$	$\frac{\text{Força inercial}}{\text{Força de tensão superficial}}$

* V é uma velocidade característica, L é um comprimento característico, ρ é a massa específica do fluido, μ é a viscosidade dinâmica (ou absoluta) do fluido, ν é a viscosidade cinemática do fluido, D_{AB} é o coeficiente de difusão da espécie, e σ_s é a tensão superficial do fluido.

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A disponibilidade de água nas bacias hidrográficas para atendimento dos usos múltiplos depende das características de qualidade e quantidade de água presente no corpo hídrico. Esses dois fatores devem ser analisados de forma integrada, pois a defasagem de um deles, obrigatoriamente, ocasiona repercussões negativas ao outro. Bacias hidrográficas com adequada quantidade de águas para atendimento de seus usuários podem tornar seus recursos hídricos indisponíveis caso não sejam atendidos os níveis de qualidade desejados.

Quando utilizados como receptores de despejos domésticos ou industriais, os corpos de água passam por alterações de sua qualidade no decorrer do tempo e do espaço. A oxidação ou assimilação desses compostos pelo corpo receptor dependerá da capacidade de autodepuração do mesmo, sendo esta uma característica intrínseca em cada corpo de água. A capacidade de autodepuração de um corpo hídrico está intimamente relacionada com suas características hidráulicas.

O oxigênio dissolvido (*OD*) constitui-se numa importante medida da qualidade da água dos rios. São múltiplos os fatores que governam a concentração desse gás nesses ambientes. O balanço de oxigênio dissolvido é quantificado por fenômenos que realizam a deaeração (consumo de *OD*) e a reaeração (produção de *OD*) no meio.

O consumo de oxigênio dissolvido é ocasionado principalmente pela oxidação da matéria orgânica presente nos despejos (através da respiração dos microrganismos decompositores), pela demanda bentônica (lodo presente nos leitos dos rios) e pela nitrificação (oxidação da amônia). A produção ou reposição dá-se basicamente por dois fatores: pela fotossíntese realizada pelas plantas aquáticas e pela reaeração atmosférica.

Quando se procura determinar a capacidade de um rio assimilar poluentes orgânicos defronta-se com o problema da determinação quantitativa da reaeração, que depende do conhecimento do mecanismo de absorção de gases de baixa solubilidade pelo escoamento natural turbulento (BARBOSA Jr, 1989).

O fenômeno da reaeração atmosférica ocorre em corpos de água que estão expostos à atmosfera terrestre e possuem uma quantidade de oxigênio dissolvido abaixo da concentração de saturação (C_s), havendo um contínuo intercâmbio de moléculas da fase gasosa para a líquida (interface) e vice-versa. Este intercâmbio resulta num aumento da concentração do gás na fase líquida, até que seja atingida a concentração de saturação (C_s) do gás.

As águas constituem ambientes relativamente pobres em oxigênio, em virtude da baixa solubilidade deste. Enquanto no ar a sua concentração é a ordem de 270 mg/L, na água, às condições normais de temperatura e pressão sua concentração se reduz a aproximadamente 9 mg/L (adaptado de VON SPERLING, 2007).

O parâmetro que determina o processo de absorção do oxigênio pela água em escoamento é o coeficiente de reaeração, K_2 . A transferência de oxigênio da fase gasosa para a fase líquida se dá basicamente através de dois mecanismos: a difusão molecular e a difusão turbulenta.

A difusão turbulenta mostra-se como a mais importante para o processo de transferência de oxigênio para o meio líquido, pois envolve dois dos principais fatores para uma eficaz aeração: a criação de interfaces (com auxílio da difusão molecular, que corresponde ao movimento aleatório das moléculas de água em escala microscópica) e principalmente a renovação destas interfaces, devido ao movimento aleatório das moléculas de água em grande escala.

A investigação do fenômeno de transferência de oxigênio atmosférico para um corpo de água sob condições de agitação é um assunto complexo e não totalmente compreendido, de grande aplicação prática em áreas de domínio da Engenharia Ambiental e Sanitária (SILVEIRA, 2004).

Existe um grande número de equações na literatura para previsão do coeficiente de reaeração, no entanto, a maioria dessas equações considera apenas algumas características hidráulicas do corpo de água como a velocidade, profundidade e declividade, podendo prever valores bastante diferentes para o desejado coeficiente.

Devido à desconsideração das características intrínsecas de cada corpo de água, o emprego dessas equações deve ser realizado de forma cautelosa, e ainda assim verifica-se a necessidade de estudos que demonstrem a influência de outros parâmetros sobre o coeficiente de reaeração.

Na EESC-USP, Bicudo; Schulz & Giorgetti (1990) e Bicudo & Giorgetti (1991) ofereceram importantes contribuições referentes ao estudo da influência da rugosidade sobre o fenômeno da reaeração em corpos de água.

Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho foi estudar em condições de laboratório a influência da rugosidade sobre o coeficiente de reaeração superficial. Denota-se ser uma pesquisa diferenciada das demais realizadas na EESC-USP, pois foi utilizado um canal hidráulico original, o qual possui características geométricas e hidráulicas que garante que a transferência de oxigênio atmosférico para o corpo de

água ocorra somente através da superfície da lâmina de água (interface ar-água). Não existem quedas bruscas no escoamento e não há reservatório para armazenamento de água com superfície livre para a atmosfera.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral realizar uma investigação, em escala de laboratório, sobre os mecanismos que influenciam a transferência de gases na interface ar-água através da superfície livre de escoamentos sobre um canal hidráulico.

Especificamente, os objetivos foram analisar a influência da velocidade média do escoamento (3 conformidades), da altura da lâmina de água (3 conformidades) e, principalmente, da rugosidade do leito do canal (5 conformidades) sobre o coeficiente de reoxigenação superficial para os escoamentos estabelecidos nesta pesquisa.

Com o intuito de obter parâmetros práticos que englobem as diversas características dos escoamentos estabelecidos neste estudo, outro objetivo é a construção de um modelo empírico que correlacione o K_2 (variável dependente) em função da velocidade do escoamento, profundidade da lâmina de água e rugosidade do leito do canal (variáveis independentes).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Conceitos Fundamentais sobre Reoxigenação Superficial

3.1.1 Mecanismos que governam a transferência de gases na interface ar-água

As principais fontes de geração de turbulência no meio aquático podem ser classificadas em três tipos principais, a saber: turbulência induzida por tensão na superfície (ex. ventos sobre oceanos e lagos), turbulência induzida por tensão de cisalhamento no leito (ocorrendo em rios sem ventos e em escoamentos em canais abertos), e turbulência convectiva (ex. turbulência em lagos devido ao resfriamento da superfície) (adaptado de HERLINA, 2005). Uma ilustração esquemática das fontes de turbulência e suas interações podem ser visualizadas na Figura 1.

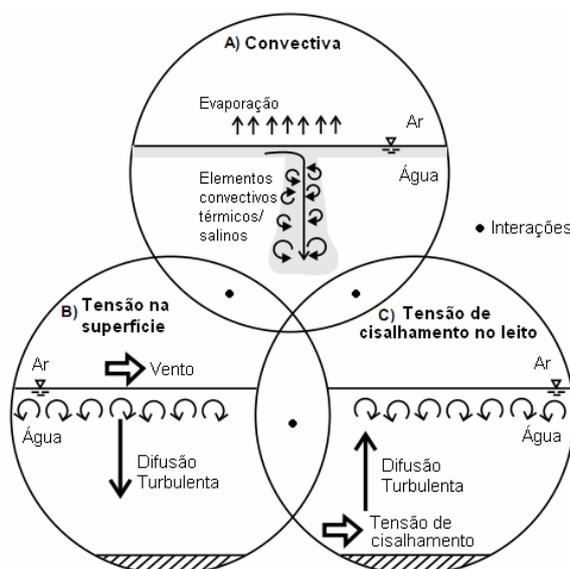


Figura 1 – Ilustração esquemática das fontes de geração de turbulência que governam a transferência de gases na interface ar-água no ambiente aquático. O tipo C representa a fonte investigada neste trabalho.

Muitos estudos sobre a transferência de gases na interface ar-água são realizados no âmbito da turbulência gerada através das correntes de ventos e dos fenômenos de resfriamento das superfícies aquáticas. No entanto, em córregos e rios com ausência de ventos acima da massa líquida, a fonte de geração de turbulência se dá predominantemente por meio de mecanismos que ocorrem abaixo da superfície líquida. Desta maneira, este trabalho possui o foco de investigações voltadas para o problema da reoxigenação em rios poluídos e que possuem como fonte de turbulência a tensão de cisalhamento no leito. Um diagrama ilustrativo desta situação está apresentado na Figura 2.

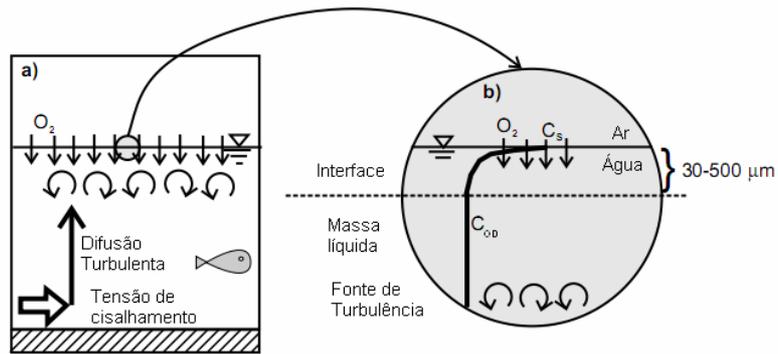


Figura 2 – Diagrama ilustrativo do processo de transferência de gases na interface ar-água, ocasionado pela tensão de cisalhamento no leito. a) representa a turbulência gerada no leito que se difunde em direção à interface; b) representa o processo de transferência de oxigênio na interface o qual é limitado pela camada-limite presente no meio líquido.

Fonte: Herlina, 2005.

Como verificado na Figura 2, a transferência de oxigênio da atmosfera para o meio líquido é controlada pela camada-limite presente no meio líquido (filme líquido). No entanto, a transferência de outros gases, como a amônia gasosa (NH_3), é controlada pela camada-limite presente no meio gasoso (filme gasoso). Em geral, este comportamento é determinado pela constante de Henry, intrínseca a cada componente gasoso – ver seção **3.1.4 Resistência na fase líquida**.

A possibilidade de visualização dos campos de concentrações de oxigênio dissolvido no meio líquido é muito útil e pode trazer muitos ganhos a respeito dos mecanismos de transferência de gases na interface ar-água.

A partir da técnica de Fluorescência Induzida por Laser (LIF), Herlina e Jirka (2004), obtiveram as variações das concentrações de oxigênio dissolvido próximo à interface a partir de imagens instantâneas dessas regiões, em um tanque com turbulência ocasionada por grades oscilatórias. Comparando-se uma imagem com a grade estática e uma seqüência de imagens com a grade em movimento, nota-se que a turbulência desempenha um papel importante no processo de transferência de gases na interface. A Figura 3 apresenta alguns exemplos das imagens obtidas pelos autores.

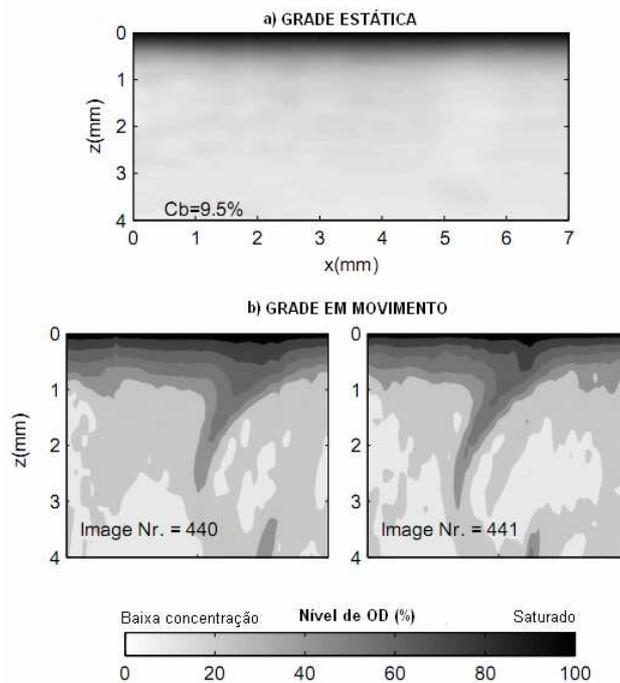


Figura 3 – Imagens instantâneas da concentração de oxigênio dissolvido em um tanque com grade oscilatória. a) grade estática; b) grade em movimento.

Representando o comportamento de ambientes calmos, verifica-se na imagem com a grade estacionada (a), que a camada de concentração de saturação de oxigênio dissolvido não chega a atingir 0,5mm de espessura. Com a grade em movimento (b), as camadas mais escuras, que representam os campos com elevadas concentrações de oxigênio dissolvido, se difundem na massa líquida ocasionando uma renovação da concentração na superfície líquida.

3.1.2 Equações governantes

O transporte de massa microscópico, independente de qualquer processo convectivo dentro de um sistema, é definido pela difusão molecular. Esta difusão é matematicamente representada pela lei de Fick, na qual o fluxo de massa de uma substância por unidade de área perpendicular à direção do fluxo é proporcional ao gradiente de concentração dessa substância. Essa lei pode ser expressa de modo unidimensional na forma indicada pela Equação 1

$$J_x = -\rho D_m \frac{dm_i}{dx} = -D_m \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

Em que

J_x = fluxo de massa na direção x;

ρ = massa específica do fluido;

m_i = fração mássica;

C = concentração do gás dissolvido no volume líquido;

D_m = coeficiente de difusão molecular ou difusividade molecular;

$\frac{dm_i}{dx}$ = gradiente de concentração na direção x em termos de fração mássica;

$\frac{dC}{dx}$ = gradiente de concentração na direção x em termos de massa.

Quando se aplica a equação do balanço de massa a um volume de controle infinitesimal qualquer, imaginado no interior de um líquido incompressível e em escoamento permanente, obtém-se uma expressão em termos da concentração do gás dissolvido conhecida como equação de advecção-dispersão, apresentada por Fischer et al (1979), na forma a seguir.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_m \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) \pm s \quad (2)$$

Sendo:

u_i = componente da velocidade do líquido na direção x_i ;

s = fontes (positivo) ou sumidouros (negativo) externos do gás no líquido.

O coeficiente de reaeração superficial (K_2) pode ser introduzido na equação de advecção-dispersão. Admitindo-se que o transporte dispersivo em rios pode ser modelado utilizando-se uma equação unidimensional, considerando-se o escoamento em um canal de seção prismática e profundidade constante com escoamento uniforme; por meio de um desenvolvimento matemático, Fischer et al (1979), apresentaram a seguinte equação de uso mais geral.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_L \frac{\partial C}{\partial x} \right) + K_2 (C_s - C) \pm s \quad (3)$$

Em que

D_L = coeficiente de dispersão longitudinal;

C_s = concentração de saturação do gás no líquido.

O termo representativo de todas as fontes e sumidouros para o oxigênio dissolvido (OD), foi originalmente desmembrado em dois componentes, sendo um termo devido à demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e ou outro correspondente ao efeito líquido da fotossíntese, respiração e remoção de OD por processos difusivos que ocorrem através das camadas bentônicas (O'CONNOR, 1967).

Bennett & Rathbun (1972), apresentam diversas outras variações da forma de expressar o termo correspondente às fontes e sumidouros na equação do balanço de massa para o oxigênio dissolvido.

3.1.3 Velocidade de transferência de gases na interface ar-água (K_L)

A taxa de transferência de gases na interface ar-água é comumente parametrizada pela velocidade de transferência de massa a interface K_L . Empiricamente define-se que a quantidade de massa transferida é proporcional ao gradiente de concentração e a área interfacial. Assim, K_L é definido como

$$K_L = \frac{j}{\Delta c} = \frac{j}{C_s - C_b} \quad (4)$$

Em que

C_b = concentração do gás dissolvido no volume líquido;

C_s = concentração de equilíbrio do gás dado pela lei de Henry (concentração de saturação).

A lei de Henry estabelece que em um sistema de duas fases, a concentração de saturação C_s de um gás dissolvido na fase líquida é proporcional a pressão parcial (p) do gás na fase gasosa. Sendo assim:

$$p = H_C C_s \quad (5)$$

Em que H_C representa a constante de Henry, a qual é afetada pela concentração de outros solutos e temperatura do sistema.

Liss, 1983 (apud Herlina, 2005), demonstrou que para gases com baixa solubilidade na água, a presença de sólidos dissolvidos (como na água do mar) podem influenciar de forma significativa no valor de H_C , ao passo que o efeito sobre outros gases pode ser insignificante.

3.1.4 Resistência na fase líquida

Lewis & Whitman (1924) propuseram um simples modelo de transferência de gases na interface (Teoria dos Dois Filmes) para estimar a importância relativa da resistência dos filmes gasoso e líquido para diferentes gases com solubilidades variadas. Desde então, esse modelo tem sido utilizado para estimar a velocidade de transferência de gases nessas regiões.

Lewis & Whitman (1924) simplificaram o perfil de concentração em um sistema de duas fases, assumindo a existência de dois filmes superficiais, um presente no lado líquido e outro presente no lado gasoso da interface. Cada filme superficial tem o seu correspondente coeficiente de transferência gasosa, denominado como k_l e k_g para a fase líquida e a fase gasosa, respectivamente. A velocidade global de transferência K_L está relacionada com cada um desses coeficientes, de acordo com o modelo de resistência em série a seguir.

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{k_l} + \frac{1}{H_C k_g} \quad (6)$$

Quando a razão $k_l \cdot H_C^{-1} k_g^{-1}$ é pequena, a resistência do filme líquido controla o processo de transferência, ao passo que a resistência do filme gasoso controla a transferência quando essa razão é grande.

Geralmente, gases que são ambientalmente importantes (ex. O₂, N₂, CO₂, CO) possuem baixa solubilidade. Esses gases possuem um elevado valor para a constante de Henry (H_C), de modo que a transferência dos mesmos da interface ar-água é controlada pelas condições hidrodinâmicas do escoamento.

Considerando como sendo R_l a razão entre a resistência do filme líquido e a resistência total, um gráfico entre R_l versus H_C apresenta uma indicação de qual filme (líquido, gasoso ou ambos) governam o transporte de contaminantes com diferentes solubilidades. A Figura 4 apresenta a relação entre essas duas variáveis para as condições hidrodinâmicas de grandes e pequenos lagos.

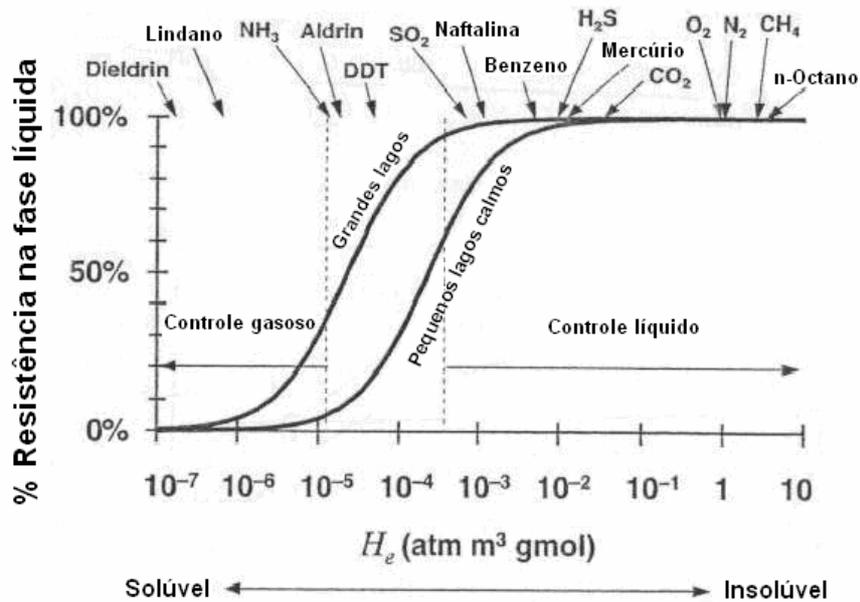


Figura 4 – Percentual de resistência de transferência de gases para a fase líquida em função da constante de Henry (H_c).

Fonte: Mackay, 1977 (apud Chapra, 1997).

A Figura 4 apresenta alguns valores de H_c para alguns gases ambientalmente importantes e algumas substâncias tóxicas. Nota-se que os pequenos lagos possuem maior tendência de serem controlados pelo filme gasoso do que os grandes lagos. Isso deve-se provavelmente ao fato de que nesses ambientes a turbulência gerada no meio aquático é, em geral, mais importante do que nos grandes lagos.

3.1.5 Modelos de transferência de gases

Estão relatados a seguir três modelos conceituais e alguns modelos empíricos para o processo de transferência de gases na interface ar-água. Os modelos empíricos são construídos a partir de dados experimentais. Os modelos conceituais são realizados a partir da solução simplificada de equações de conservação da massa e de quantidade de movimento.

Para Brumley & Jirka (1988), modelos conceituais são simples soluções da equação de difusão vertical, unidimensional, sem um campo de escoamento advectivo explícito. O efeito da turbulência é incorporado através das condições iniciais e de fronteira, os quais são caracterizados através da escala espacial e temporal.

3.1.5.1 Modelos conceituais

Modelo dos Dois Filmes

Com a finalidade de melhor compreender as leis que regem o fenômeno da absorção de gases por um corpo líquido através da interface, Lewis e Whitman (1924), elaboraram um modelo físico simplificado que procura descrever a interface de transferência, sem contudo, levar em conta os complexos problemas hidrodinâmicos presentes durante o processo de transferência de gases. Algumas características deste modelo já foram descritas na seção **3.1.4 Resistência na fase líquida**.

O Modelo dos Dois Filmes assume a existência de filmes estagnados em cada lado da interface ar-água, ocorrendo nessas regiões somente a difusão molecular. Essas condições levam a formação de um perfil linear de concentração no interior dos filmes estagnados e a seguinte relação pode ser deduzida

$$K_L = \frac{D}{\delta} \quad (7)$$

Em que K_L representa a velocidade de transferência de massa, D a difusividade molecular, e δ a espessura do filme estagnado.

Para Herlina (2005), está claro que este modelo simplifica demasiadamente os mecanismos existentes, contudo deve-se notar que a essência do modelo não é demonstrar fisicamente os filmes estagnados, mas sim as regiões em que a difusão molecular é um fator que controla o processo de transporte de massa. A proposta da teoria de Lewis e Whitman (1924), foi estimar a relativa importância das resistências das fases líquida e gasosa com relação a diferentes gases com variadas solubilizações (como apresentado na Figura 4).

Modelo de Higbie – Teoria da penetração

O modelo proposto originalmente por Higbie (1935) contradiz a teoria dos dois filmes, postulando que os gases dissolvidos não têm tempo suficiente para penetrar no filme líquido e estabelecer um perfil linear de concentração característico de um regime permanente. O modelo considera o efeito da mistura das porções de água no seu movimento para a superfície livre, ou seja, o líquido da interface é continuamente substituído por outros elementos fluidos.

Na interpretação de Chapra (1997), Higbie sugeriu que quando o líquido e o gás são colocados em contato, o filme líquido passará a ter a concentração da massa líquida. Assim, antecedente à situação vislumbrada no Modelo dos Dois Filmes, o gás

dissolvido deve penetrar no filme. Esse processo levou à denominação de Teoria da penetração. Assumindo essas condições, Higbie foi capaz de demonstrar que

$$K_L \approx \sqrt{\frac{D}{\pi T'}} \quad (8)$$

Em que T' é o tempo médio de contato da parcela fluida na interface.

Modelo de Renovação Superficial

Proposto por Danckwerts (1951), este modelo pode ser considerado como uma expansão da teoria da penetração, pelo fato de também considerar que a turbulência em um líquido sob agitação estende-se até a superfície. A diferença entre esse dois reside na definição dos tempos de exposição dos elementos de fluido na superfície.

Uma das condições assumidas por Higbie em 1935, foi que todos os elementos de fluido possuem o mesmo tempo de contato na interface. Danckwerts (1951) modificou esta abordagem ao assumir que os elementos de fluido alcançam e deixam a interface aleatoriamente. Foram essas condições que levaram a denominação de Teoria da renovação superficial, em que

$$K_L \approx \sqrt{Dr_l} \quad (9)$$

Em que r_l representa a taxa de renovação superficial líquida.

3.1.5.2 Modelos empíricos

Com base em considerações teóricas e investigações práticas, pesquisadores têm apresentado diferentes métodos e equações para a estimativa do K_2 , não havendo um senso comum em relação à influência dos fatores envolvidos no fenômeno de reaeração superficial.

O modelo clássico utilizado para avaliação da reaeração superficial foi proposto por Adney e Becker em 1919, com o objetivo de descrever, com base em dados experimentais, a taxa com que gases pouco solúveis dissolvem-se na água. Segundo o modelo, o fluxo de massa ou a taxa de transferência gasosa por unidade de área normal ao fluxo é diretamente proporcional ao déficit relativo à saturação do gás no líquido, ou seja

$$J = \frac{1}{A} \frac{dm}{dt} = K_L (C_s - C) \quad (10)$$

em que J é o fluxo de massa ou taxa de entrada de gás dissolvido; A é a área de interface gás-líquido; m a massa de gás dissolvido; t o tempo; C_s a concentração de saturação do gás no líquido; C a concentração do gás dissolvido no volume líquido e K_L o coeficiente global de transferência de massa.

Substituindo o termo dm/dt por $d(VC)/dt$, em que V é o volume do líquido no qual a massa do gás se dissolve, a Equação 1 toma a seguinte forma

$$\frac{dC}{dt} = K_L \frac{A}{V} (C_s - C) \quad (11)$$

Como na maioria dos casos, a área A é de difícil obtenção, especialmente em situações de agitação intensa, o termo $K_L AV^l$ é substituído pela notação K_2 , coeficiente de reaeração superficial com dimensão de tempo⁻¹.

$$\frac{dC}{dt} = K_2 (C_s - C) \quad (12)$$

A integração desta equação para uma concentração inicial C_0 , resulta na seguinte solução analítica

$$C = C_s - (C_s - C_0)e^{-K_2 t} \quad (13)$$

Com o desenvolvimento das pesquisas, foram elaborados outros modelos conceituais e fórmulas empíricas e semi-empíricas para a determinação do coeficiente de reaeração.

As equações empíricas presentes na literatura de forma geral estão focadas em alguns parâmetros hidráulicos como a velocidade e a profundidade do canal. Como exemplo verifica-se na Tabela 1 algumas dessas equações.

Correlação	Referência
$K_2 = 3,93 \cdot \frac{U^{0,5}}{H^{1,5}}$	O'Connor & Dobbins (1958)
$K_2 = 5,03 \cdot \frac{U^{0,969}}{H^{1,673}}$	Churchill et al. (1962)
$K_2 = 5,34 \cdot \frac{U^{0,67}}{H^{1,85}}$	Owens et al. (1964)
$K_2 = 4,75 \cdot \frac{U}{H^{1,5}}$	Isaacs e Gaudy (1968)
$K_2 = 10,9 \cdot \left(\frac{U}{H}\right)^{0,85}$	Negulescu e Rojanski (1969)
$K_2 = 4,54 \cdot \frac{U^{0,703}}{H^{1,054}}$	Padden e Gloyna (1971)
$K_2 = 5,49 \cdot \frac{U^{0,607}}{H^{1,689}}$	Bennett e Rathbun (1972)
$K_2 = 1,92 \cdot \frac{U^{0,273}}{H^{0,894}}$	Long (1984)
U = Velocidade média do canal (m/s) H = profundidade média do canal (m)	

Tabela 1 – Diferentes equações empíricas para previsão do K_2 (dia⁻¹ a 20 °C) para rios.
 Fonte: EPA (1985)

Barbosa (1989) salienta que um grande número de equações empíricas e semi-empíricas têm sido propostas numa tentativa de relacionar o coeficiente de reaeração, K_2 , a parâmetros médios mensuráveis, no entanto, com base nas avaliações críticas de alguns autores, a conclusão geral é que o emprego dessas equações deve ser feito com muito cuidado, uma vez que para um conjunto específico de condições hidráulicas elas podem prever valores bastante diferentes para o coeficiente de reaeração.

Apresenta-se na Figura 5 uma comparação de K_2 em função da profundidade H , obtido a partir das equações da Tabela 1, considerando-se a velocidade média do escoamento $U=0,5$ m/s.

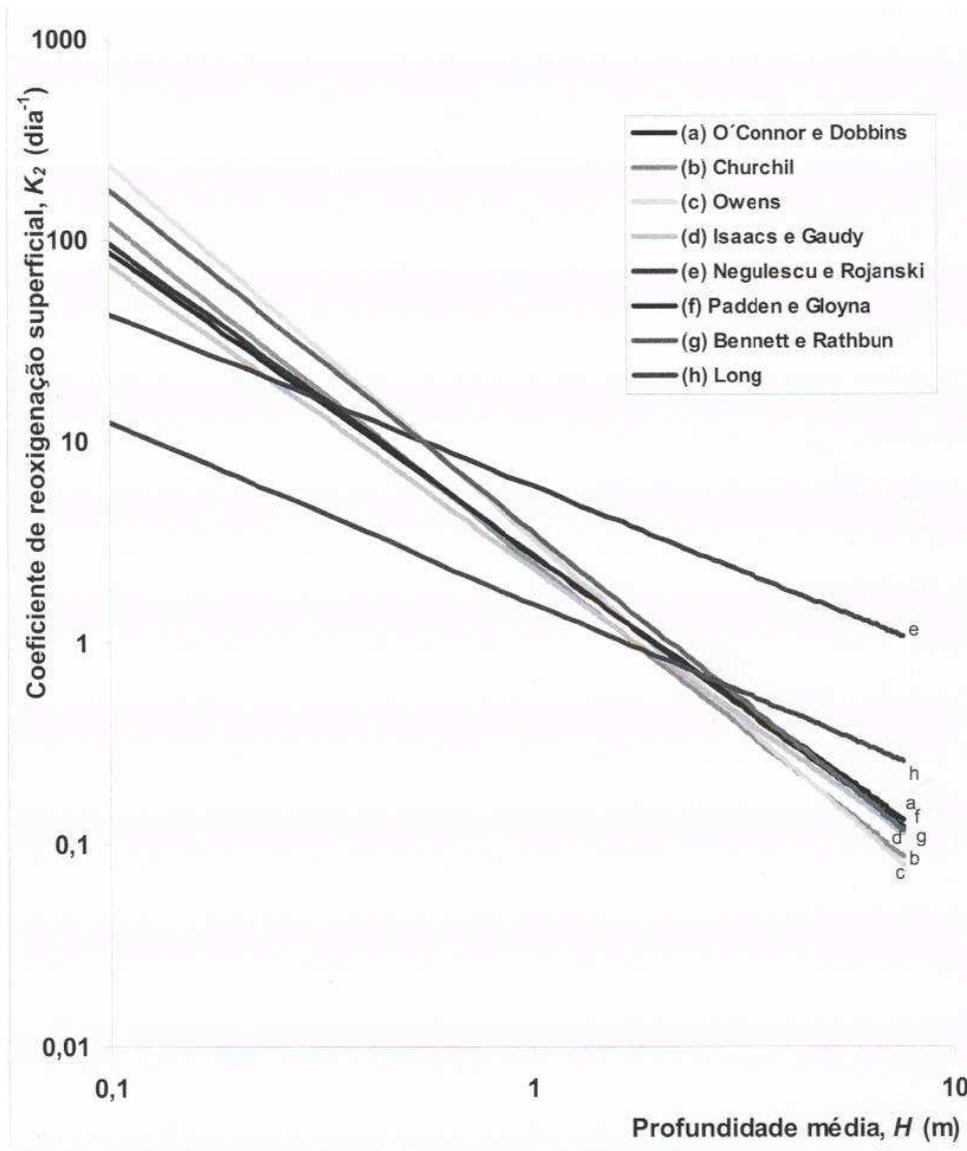


Figura 5 – K_2 para rios (Velocidade média $U = 0,5$ m/s).
 Fonte: EPA, 1985 (apud SILVEIRA, 2004)

Pesquisas realizadas na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP) têm oferecido importantes contribuições a essa questão, principalmente em relação à modelagem matemática dos processos envolvidos na transferência de gases na interface ar-água (Gonçalves, 2009; Silveira, 2004; Maia, 2003; Széliga, 2003; Costa, 1999; Barbosa Junior, 1997; Mello, 1996; Oliveira, 1996; Rodrigues, 1996; Carreira, 1995; Carvalho, 1995; Costa, 1992; Giorgetti, 1990; Barbosa Junior, 1989; Schulz, 1989; Roma, 1988; Giorgetti, 1986; Schulz, 1985).

Silveira (2004) observa que a partir da análise de alguns pesquisadores sobre as diversas fórmulas de previsão do coeficiente de reaeração, nenhuma equação pode ser aplicada para todo e qualquer rio, de modo que algumas formulações fornecem

resultados satisfatórios para determinados escoamentos, velocidades e profundidades, mas não são validadas para outras situações, ressaltando que cada equação fornece bons ajustes para dados experimentais obtidos no rio que produziu a equação.

Notando-se a necessidade de incrementar as formulações empíricas, alguns autores realizaram estudos abordando outros fatores que influenciam na previsão do coeficiente de reaeração, além dos parâmetros comumente utilizados como a profundidade, a velocidade e a declividade do canal.

A partir de um grande banco de dados do USGS¹, contendo 493 medidas de K_2 realizadas em 166 cursos de água localizados nos Estados Unidos (utilizando-se a técnica de traçadores gasosos), Melching & Flores (1999) fizeram um cuidadoso agrupamento dessas medidas e as subdividiram em 4 subgrupos, os quais foram baseados no regime de escoamento (escoamentos em canais prismáticos e canais naturais) e na vazão do corpo de água (vazões acima ou abaixo de $0,556\text{m}^3/\text{s}$).

A partir deste estudo, Melching & Flores (1999) demonstraram alguns parâmetros importantes e que podem ser considerados durante a realização de investigações sobre a transferência de gases na interface ar-água. Os parâmetros e seus respectivos símbolos encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros a serem considerados em estudos de reoxigenação.

Parâmetro	Símbolo
Profundidade principal	h
Velocidade	v
Largura superficial	W
Fator de forma da seção transversal	Ψ
Número de Froude	Fr
Aceleração gravitacional	g
Declividade	i
Velocidade de cisalhamento	v^*
Descarga	Q
Viscosidade Cinemática	ν
Coefficiente de difusão molecular	D_m
Tensão superficial da água	T_s
Taxa de dissipação de energia por unidade de massa	gvi
Coefficiente de rugosidade de Manning	n

Fonte: Melching & Flores (1999), Gualtieri; Gualtieri & Doria (2002)

¹ U.S. Geological Survey (Serviço Geológico dos Estados Unidos)

Gualtieri; Gualtieri & Doria (2002) realizaram uma investigação sobre o processo de transferência de massa na interface ar-água baseada em análise dimensional. Também para esses autores nenhuma das equações disponíveis na literatura podem ser aplicadas de forma generalizada por não serem capazes de considerar todas as características hidrodinâmicas de um corpo de água. Os autores citam em seu artigo o estudo realizado por Melching & Flores (1999), e ao considerarem os 14 diferentes parâmetros que podem afetar o processo de transferência de massa na interface ar-água (mencionados na Tabela 2), apresentam a seguinte expressão geral para a taxa de reaeração

$$K_2 = f[h, v, W, \psi, Fr, g, i, v^*, Q, \nu, D_m, T_s, n] \quad (14)$$

Por meio de análise dimensional e das considerações realizadas no desenvolvimento da análise, os autores obtiveram a seguinte equação para o coeficiente de reaeração adimensional

$$K_{2ND} = f[Fr, i, Re, Sh, We, S] \quad (15)$$

Em que

K_{2ND} = coeficiente de reaeração adimensional

Fr = Número de Froude

i = declividade do leito do canal

Re = Número de Reynolds

Sh = Número de Sherwood

We = Número de Weber

S = rugosidade relativa

Além dos parâmetros mencionados acima, a temperatura e a umidade atmosférica são importantes fatores no processo de transferência de gases na interface, e sempre que possível devem ser considerados nos cálculos para determinação do coeficiente de reaeração.

3.1.6 Influência da temperatura sobre o coeficiente de reaeração

Estudos realizados por vários pesquisadores, visando determinar o efeito da temperatura sobre o coeficiente de absorção de oxigênio sobre um corpo de água em

agitação, concluíram que existe uma variação crescente do coeficiente de reaeração com o aumento de temperatura (OLIVEIRA, 1996).

No entanto, como apresentado por Von Sperling (2007), a influência da temperatura se faz sentir em dois diferentes aspectos. O aumento da temperatura tanto reduz a solubilidade do oxigênio no meio líquido (diminuindo a concentração de saturação do meio), como acelera os processos de absorção de oxigênio. Desta maneira, esses fatores atuam em sentidos opostos.

Pesquisas experimentais realizadas por Krenkel & Orlob (1962) produziram resultados que explicam a variação do coeficiente de reaeração em relação à temperatura a partir da lei de Arrhenius, que considera que o processo de absorção de gás em meio líquido é governado por energia cinética. Esses resultados foram ajustados por uma função exponencial do tipo

$$K_2(T) = a'e^{b'T} \quad (16)$$

Em que a' e b' são coeficientes obtidos através de ajuste da função aos pontos experimentais, e T é a temperatura absoluta (K).

Utilizando-se uma temperatura de referência, geralmente 20°C, a equação 16 torna-se

$$K_2(20) = a'e^{b'20} \quad (17)$$

Para permitir correções sobre o valor do coeficiente de reaeração a quaisquer temperatura, utiliza-se uma relação entre as equações 16 e 17 atribuindo-se ao termo $e^{b'}$ o valor de θ , de maneira que o efeito da temperatura no coeficiente de reaeração pode ser expresso da forma tradicional, através da seguinte equação

$$K_2(T) = K_2(20)\theta^{(T-20)} \quad (18)$$

Em que

$$K_2(T) = K_2 \text{ a uma temperatura } T \text{ qualquer;}$$

$$K_2(20) = K_2 \text{ a uma temperatura } T=20^\circ\text{C;}$$

θ = coeficiente de correção de temperatura.

Um valor bastante utilizado para o coeficiente de correção de temperatura, θ , é 1,024, pois este valor representa a média entre os extremos registrados por Streeter & Phelps (1926), Elmore & West (1961), Churchill et al (1962) e Tsvoglou (1967) (EPA, 1985).

3.1.7 Influência da umidade atmosférica sobre o coeficiente de reaeração

Existem poucas pesquisas relacionando a umidade relativa do ar com o coeficiente de reaeração, resultando em uma escassez de trabalhos presentes na literatura científica.

Para Silveira (2004), Adney e Becker, em 1919, foram os primeiros pesquisadores a relatar uma provável influência da umidade atmosférica sobre o processo de absorção de gases por um corpo líquido, sem, no entanto, investir na análise da influência deste fator. Durante as décadas que se seguiram, diversos pesquisadores investigaram o fenômeno de absorção de gases por corpos de água e propuseram diversas correlações empíricas baseadas em parâmetros médios do escoamento. Provavelmente, esses corpos de água estavam expostos a diferentes condições de umidade atmosférica que não foram levadas em conta nas formulações propostas. A dispersão dos resultados que podem ser obtidos para o coeficiente de reaeração com as formulações disponíveis, pode ser influenciada pela não consideração da umidade atmosférica local quando da realização dos experimentos.

Na EESC-USP, pesquisadores como Costa (1992), Oliveira (1996) e Silveira (2004), trouxeram importantes contribuições sobre a influência da umidade atmosférica no processo de transferência de gases na interface ar-água.

Costa (1992) investigou a influência da umidade relativa do ar na medida do coeficiente de reaeração. Os resultados de sua pesquisa indicam uma correlação negativa entre o coeficiente de reaeração e a umidade relativa do ar para uma faixa de umidade entre 55 e 98%. Em alguns resultados, para uma variação de 20 a 30% na umidade, correspondeu a variação de 30 a 50% no parâmetro K_2 .

Oliveira (1996) sugeriu em seu trabalho a existência de uma resistência ao processo de absorção de oxigênio pelo corpo de água em condições de elevada umidade atmosférica. Observou que para ensaios de reaeração realizados durante o dia, sem chuva, os valores de K_2 divergiram para os mesmos valores dos ensaios durante a noite, quando ocorreu chuva. Isto implicou em estudos mais profundos em seu trabalho visto que a umidade influenciaria na transferência de oxigênio na interface ar-água.

Silveira (2004) investigou profundamente a influência da umidade atmosférica no processo de absorção de oxigênio atmosférico por um corpo de água através de sua superfície livre. Através de metodologia clássica e de um modelo considerando um sumidouro de oxigênio ajustado aos dados experimentais de sua pesquisa, comprovou a

hipótese de que a taxa de evaporação, que é função da umidade atmosférica, tem influência no processo de transferência de oxigênio através da interface.

3.2 Conceitos Fundamentais sobre Resistência ao Escoamento

Os fundamentos das leis que modelam a resistência ao escoamento em canalizações genéricas foram postulados por Chézy, Darcy e Reynolds em fins do século XIX (ACKERS, 1958). De fato, deve-se a Chézy, através de seus experimentos com canais de terra com superfície da lâmina de água paralela ao fundo, a equação do movimento do fluido derivada da relação entre a força peso decomposta na direção paralela ao fundo do canal e a resistência ao escoamento em função do atrito em sentido contrário.

Como nos condutos forçados, os cálculos em canais estão baseados em equações de resistência, equações que ligam a perda de carga em um trecho à velocidade média, ou vazão, através de parâmetros geométricos e da rugosidade do perímetro molhado. Para o caso do escoamento permanente e uniforme em canais prismáticos com declividade de fundo baixa, isto pode ser feito a partir da condição de equilíbrio dinâmico entre as forças que atuam sobre a massa de água (PORTO, 2006). Ver Figura 6.

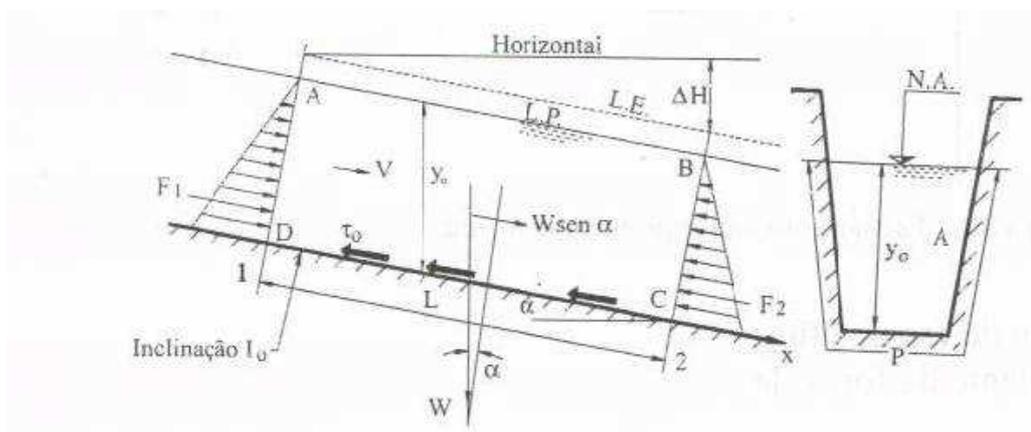


Figura 6 – Forças que atuam sobre a massa fluida.
Fonte: Porto (2006)

Sendo que $ABCD$ corresponde as fronteiras do volume de controle (massa fluida), $L.P.$ a linha piezométrica, $L.E.$ a linha de energia, ΔH a perda de carga, y_0 a altura da lâmina de água, α o ângulo de inclinação do canal, L o comprimento do leito de fundo e P o perímetro molhado.

As forças que atuam sobre as fronteiras do volume de controle $ABCD$ são: a componente da força de gravidade na direção do escoamento, $W \text{sen } \alpha$; as forças de pressão hidrostática, F_1 e F_2 ; e a força de cisalhamento, τ_0 nas paredes e fundo.

Aplicando a 2ª lei de Newton ao volume de controle, tem-se

$$\sum F_x = F_1 + W \text{sen } \alpha - F_2 - \tau_0 PL = 0 \quad (19)$$

Já que, por hipótese, o escoamento é uniforme, $y_1=y_2=y_0$, e, portanto, $F_1=F_2$, e como $W = \gamma AL$, em que A é a área molhada e P , o perímetro, a Equação 5 fica

$$\gamma AL \text{sen } \alpha = \tau_0 PL \quad (20)$$

E daí:

$$\tau_0 = \gamma \frac{A}{P} \text{sen } \alpha, \text{ portanto } \tau_0 = \gamma R_h \text{sen } \alpha \quad (21)$$

Em que R_h é o raio hidráulico do canal.

Como para ângulos pequenos ($\alpha < 6^\circ$), pode ser feita a aproximação

$$\text{sen } \alpha = \text{tg } \alpha = \Delta z / L = I_0$$

Fica:

$$\tau_0 = \gamma R_h I_0 \quad (22)$$

Em que τ_0 é a tensão média de cisalhamento sobre o perímetro molhado.

A tensão de cisalhamento também pode ser determinada como

$$\tau_0 = \frac{\rho f V^2}{8} \quad (23)$$

Em que f é o fator de atrito, função do número de Reynolds e da rugosidade da parede; ρ a massa específica do fluido; e V a velocidade média na seção. Assumindo que o raio hidráulico seja o parâmetro que serve para levar em conta as diferenças de forma entre seções retas de tubos circulares e canais prismáticos, a Equação 22 pode ser comparada com a Equação 23.

$$\tau_0 = \frac{\rho f V^2}{8} = \gamma R_h I_0 \quad (24)$$

Que após desenvolvida fica

$$V = \sqrt{\frac{8g}{f}} \sqrt{R_h I_0} \quad (25)$$

Fazendo $C = \sqrt{\frac{8g}{f}}$, tem-se finalmente

$$V = C \sqrt{R_h I_0} \quad (26)$$

Esta equação é conhecida como *fórmula de Chézy*, em que C é o coeficiente de resistência ou coeficiente de rugosidade de Chézy. Esta equação é indicada para os escoamentos turbulentos rugosos em canais (PORTO, 2006).

Utilizando-se a equação da continuidade, a fórmula de Chézy torna-se

$$Q = CA \sqrt{R_h I_0} \quad (27)$$

Em que Q é a vazão ou descarga de fluxo.

Diferentes fórmulas de origem empírica são propostas para ao cálculo do coeficiente C de Chézy, ligando-o ao raio hidráulico da seção. Uma relação simples, e atualmente a mais empregada, foi proposta por Robert Manning em 1889, através da análise de resultados experimentais obtidos por ele e outros pesquisadores (PORTO, 2006). A relação empírica é da forma

$$C = \frac{R_h^{1/6}}{n} \quad (28)$$

Substituindo a Equação 28 na Equação 26, tem-se

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} I_0^{1/2} \quad (29)$$

Esta equação é denominada *fórmula de Manning*, válida para os escoamentos permanentes, uniformes e turbulentos rugosos, com grande número de Reynolds. Nestas condições, o coeficiente n de Manning permanece constante para uma rugosidade dada, enquanto o coeficiente de Chézy é proporcional à rugosidade relativa da seção R_h/n (PORTO, 2006).

Combinando-se a Equação 28 com a Equação 27, chega-se a:

$$n = \frac{R_h^{2/3} I_0^{1/2}}{V} \quad (30)$$

Deve-se observar que a fórmula de Manning, além de ter uma origem empírica, carrega um coeficiente n que não é um adimensional.

A principal dificuldade de utilizar a fórmula de Manning dá-se quanto a determinação exata do valor do coeficiente de rugosidade n . Cada canal apresenta suas próprias características e o coeficiente de rugosidade depende do tamanho e forma do canal, do substrato presente no leito, das diferentes feições presentes no canal como vegetação, pedregulhos, e profundidade da lâmina de água. Observações no campo têm

mostrado que em uma seção transversal o coeficiente de rugosidade de Manning varia conforme a profundidade (DEFRA/EA, 2003).

Chow (1959) descreve que não há um método exato para determinação do coeficiente de rugosidade n da fórmula de Manning. Com a finalidade de orientar sobre uma adequada determinação do coeficiente discute sobre quatro abordagens gerais, a saber: 1) entendimento dos fatores que afetam o valor de n e deste modo adquirir um conhecimento básico do problema e reduzir o grau de adivinhação (ver abaixo); 2) consultar tabelas com valores típicos de n para vários tipos de canais; 3) examinar e familiarizar-se com a aparência de alguns canais típicos os quais possuem o coeficiente de rugosidade conhecido e apresentado em fotografias; e 4) determinar o valor de n através de um procedimento analítico baseado na distribuição teórica da velocidade da seção transversal do canal e nos dados de velocidade ou rugosidade medidos.

Os fatores que afetam o valor do coeficiente de rugosidade n citados no item 1 do parágrafo acima estão detalhados na obra do autor, sendo eles: rugosidade superficial, vegetação, irregularidades no canal, alinhamento do canal, sedimentação e erosão, obstruções, tamanho e forma do canal, profundidade e vazão, variações sazonais e materiais em suspensão e depositados no leito. O método de Cowan é abordado como um procedimento que reconhece diversos fatores que afetam o coeficiente de rugosidade, podendo também ser utilizado para estimativa do valor do coeficiente n .

3.2.1 Rugosidade e camada limite

Schlichting, 1968 (apud MARTINS, 2003), a partir de estudos sobre o desenvolvimento da camada limite (região de interface fluido-parede) efetuados por diversos pesquisadores, apresenta uma interpretação dos efeitos da rugosidade das paredes sobre o escoamento a qual foi subdividi-lo em três regiões o escoamento no contato: camada laminar, camada turbulenta e subcamada viscosa.

De acordo com Giorgetti (2008), o escoamento no interior da camada limite formada sobre uma placa plana permanece laminar somente até uma certa distância da borda frontal, tornando-se turbulento a partir de então. Sempre há perturbações em um fluido em escoamento; porém, quando as forças viscosas forem grandes quando comparadas com as forças inerciais associadas a essas perturbações, elas são inibidas e impedidas de crescer e se propagar. A Figura 7 ilustra um trecho onde ocorre a transição do escoamento na camada limite.

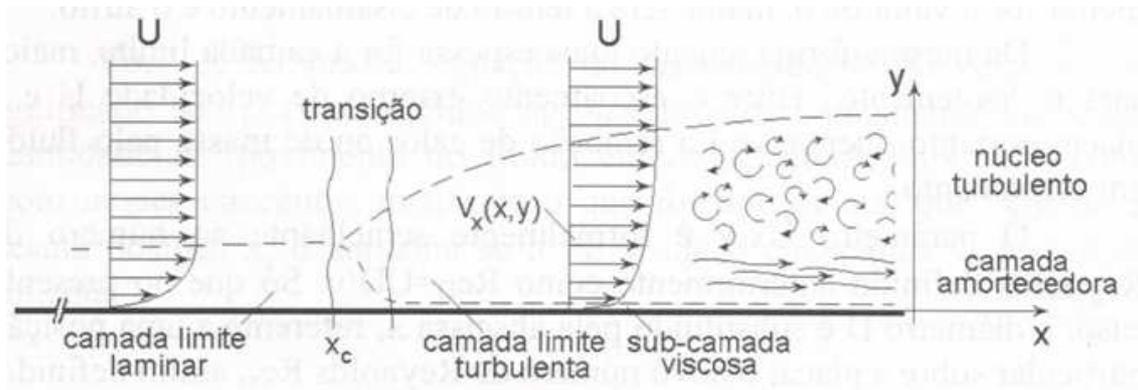


Figura 7 – Transição da Camada Limite sobre Placa Plana.
 Fonte: Giorgetti (2008)

Na camada limite turbulenta um conjunto amplo de turbilhões se soma ao escoamento principal. Um escoamento quase laminar persiste, no entanto, em uma camada muito fina junto à superfície da placa; esta região é denominada de sub-camada viscosa. A região que separa a sub-camada viscosa da zona nitidamente turbulenta é denominada camada amortecedora (GIORGETTI, 2008).

De acordo com o autor mencionado acima, deve-se ter em conta que esta estratificação em três camadas é feita, na verdade, por razões didáticas e para a construção de modelos matemáticos complementares, cada um com um conjunto particular de hipóteses, capazes de, em conjunto, descrever o perfil de velocidade ao longo de toda a espessura da camada limite turbulenta. Na verdade, não há uma separação nítida entre “camadas”, mas uma evolução gradual nas características do escoamento desde viscos, bem junto à placa, até totalmente turbulento, passando por uma fase intermediária de ligação.

A teoria da camada limite mostra que a espessura δ da sub-camada limite pode ser calculada por (PORTO, 2006):

$$\delta = \frac{11,6\nu}{v^*} \quad (31)$$

No caso em que as rugosidades da parede da tubulação ε estão totalmente cobertas pela sub-camada limite laminar, tem-se:

$$\frac{v^* \varepsilon}{\nu} < 5 \quad \text{Escoamento turbulento hidraulicamente liso} \quad (32)$$

Para a situação em que as asperezas da parede afloram a sub-camada limite laminar, alcançando o núcleo turbulento e gerando fontes de turbulência, tem-se:

$$\frac{v^* \varepsilon}{\nu} > 70 \quad \text{Escoamento turbulento hidraulicamente rugoso} \quad (33)$$

Na condição intermediária, em que apenas as asperezas maiores transpassam a sub-camada limite laminar, alcançando o núcleo turbulento, fica:

$$5 \leq \frac{v^* \varepsilon}{\nu} \leq 70 \quad \text{Escoamento turbulento hidraulicamente misto ou de transição} \quad (34)$$

O termo $\frac{v^* \varepsilon}{\nu}$ é chamado de *número de Reynolds de rugosidade*.

Em que

v^* = velocidade de cisalhamento (ou atrito);

ε = rugosidade absoluta da parede;

ν = viscosidade cinemática do fluido.

3.2.2 O Fator de Atrito f

O comportamento do fator de atrito f , pode ser analisado a partir das equações que definem o perfil de velocidade nos condutos. Para valores do adimensional Re inferiores a 2000, a rugosidade não tem efeito sobre a resistência ao escoamento. A perfeita relação obtida por Nikuradse (1933) para a região de escoamento laminar, permitiu definir a seguinte equação

$$f = \frac{64}{Re} \quad (35)$$

Com os experimentos de Nikuradse, pode-se levantar, para os escoamentos turbulentos, as relações entre o fator de atrito f , o número de Reynolds, Re , e a rugosidade relativa artificial $\frac{\varepsilon}{D}$.

Para escoamentos hidraulicamente lisos, Blasius propôs uma relação válida para a região $3000 < Re < 10^5$, como sendo

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (36)$$

Em 1976, Swamee (apud PORTO, 2006), apresentou uma equação geral para o cálculo do fator de atrito, válida para os escoamentos laminar, turbulento liso, de transição e turbulento rugoso, na seguinte forma

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Re} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{\epsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{Re} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (37)$$

Esta equação foi utilizada para reproduzir o diagrama de Moody, apresentado na Figura 8.

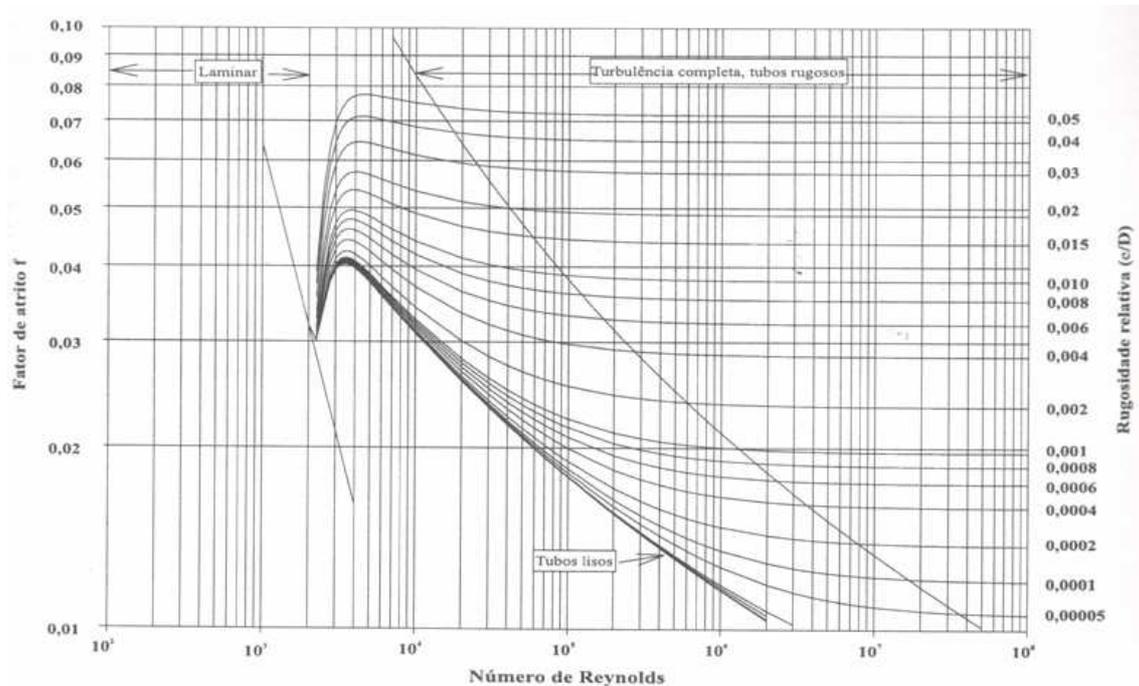


Figura 8 – Diagrama de Moody.
Fonte: Porto (2006)

Nota-se, interessante, no diagrama de Moody, que ao atingir a condição de turbulência completa, o fator de atrito \$f\$ torna-se pouco dependente ou independente do número de Reynolds.

3.2.3 Macro-Rugosidade em canais

A macro-rugosidade pode definir-se quando da existência de elementos de geometria uniforme, aplicados ao fundo do canal. As formas geométricas podem ser variadas, desde pilares circulares dispostos verticalmente, elementos de forma circular ou retangular dispostos horizontalmente no fundo, ou ainda blocos com seções geométricas regulares, com geometrias retangulares, triangulares e trapezoidais, com espaçamentos uniformes ou variados.

Morris & Wiggert, 1972 (apud MARTINS, 2003), apresentaram uma extensão do conceito de turbulência associada aos efeitos de parede, de forma a abranger também a rugosidade isolada ou macro-rugosidade. O conceito de *turbulência normal*, como

tratada por Colebrook & White, implica em se admitir a geração e dissipação contínua de vórtices induzidos pela dimensão característica a da rugosidade, seja a altura em relação à parede ou o espaçamento superficial. Esta dimensão caracteriza a frequência das fontes geradoras de vórtices.

Este conceito é perfeitamente válido para, por exemplo, paredes revestidas de areia com granulometria uniforme, como o modelo empregado por Nikuradse. A perda de energia ocorre em sua maior parte durante a geração dos vórtices e o restante na dissipação viscosa. Os processos de transferência de massa e momento, bem como o atrito viscoso, se combinam para reduzir a estrutura da turbulência a um padrão típico na região central do escoamento (afastado das paredes).

De acordo Morris, 1955 (apud CHOW, 1959), a macro-rugosidade ou rugosidade de larga escala cria uma região de interferência, que depende da geometria da rugosidade, em particular da altura e do espaçamento dos elementos. Desta forma, pode-se redefinir a classificação do escoamento como escoamento **turbulento semi-liso**, quando os elementos estão suficientemente distantes, escoamento **hiper-turbulento** para a situação em que os elementos estão convenientemente próximos e, finalmente, escoamento **quase-liso**, quando a distância entre eles é pequena. Esta classificação está ilustrada na Figura 9.

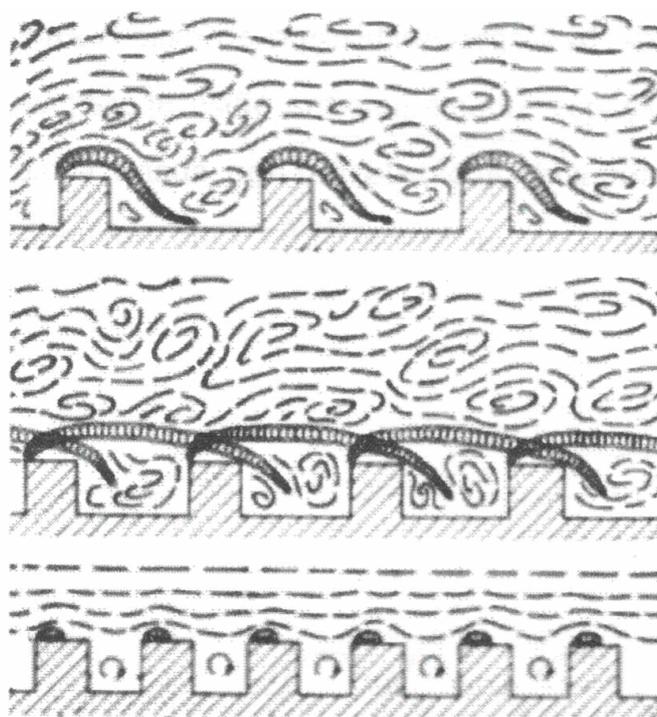


Figura 9 – Descrição dos regimes intermediários de escoamento.
Fonte: Morris, 1955 (apud CHOW, 1959)

Alguns autores foram pioneiros nos estudos sobre a hidrodinâmica de canais com rugosidades artificiais. Em 1961, Sayre & Albertson publicaram os resultados de suas pesquisas comparando-os com dados de diferentes pesquisadores americanos, com o objetivo de estabelecer uma lei matemática para o cálculo de canais com rugosidade artificial de larga escala.

Para Martins (2003), o trabalho de Sayre & Albertson trouxe importantes contribuições, devido ao pioneirismo e definição do padrão geométrico da rugosidade artificial de larga escala, apesar de alguns pontos do trabalho não terem sido explicado, como o comportamento de alguns resultados experimentais.

Outros pesquisadores notáveis foram Knight & Macdonald (1979) que realizaram um estudo a respeito da resistência hidráulica de elementos rugosos artificiais em escoamentos com superfície livre. Os autores desenvolveram uma análise comparativa entre as formulações propostas por pesquisadores como Morris, Sayre & Albertson, Adachi e Raju & Garde, com a finalidade de ratificar as conclusões relativas ao comportamento das macro-rugosidades.

Como parte da metodologia do presente trabalho foi baseada no trabalho realizado por Knight & Macdonald (1979), torna-se interessante apresentar neste momento alguns detalhes desta relevante pesquisa.

No trabalho de Knight & Macdonald (1979), algumas séries de experimentos foram conduzidas utilizando elementos rugosos artificiais, fixados transversalmente e em intervalos regulares, em um canal artificial. Os materiais utilizados foram tiras de acrílico com dimensões de 3 mm quadrado na sua seção transversal e 460 mm de comprimento.

Os autores detalharam a classificação de turbulência desenvolvida por Morris (1955), incluindo duas categorias de padrões e escoamentos a mais: o escoamento hiperturbulento não-uniforme e o escoamento semi-quase-liso.

Considerando λ o espaço entre os elementos rugosos e k a altura dos elementos, o espaço relativo (λ/k) foi variado, criando-se seis diferentes padrões de escoamento, a partir da técnica de injeção de tinta. Assim, os padrões de escoamento determinados foram: (a) escoamento turbulento liso ($\lambda/k = \infty$); (b) escoamento turbulento semi-liso ($\lambda/k = 333$ a 13.9); (c) escoamento hiperturbulento não-uniforme ($\lambda/k = 10.4$); (d) escoamento hiperturbulento uniforme ($\lambda/k = 6.95$); (e) escoamento semi-quase-liso ($\lambda/k = 5.21$); e (f) escoamento quase-liso ($\lambda/k = 3.47$). Como apresentado na Figura 10.



Figura 10 – Classificação dos padrões de escoamento para diferentes rugosidades.
 Fonte: Knight & Macdonald (1979)

Após a realização dos experimentos, encontrou-se uma relação do fator de atrito f em função do espaço relativo (λ/k) como verificado na Figura 11.

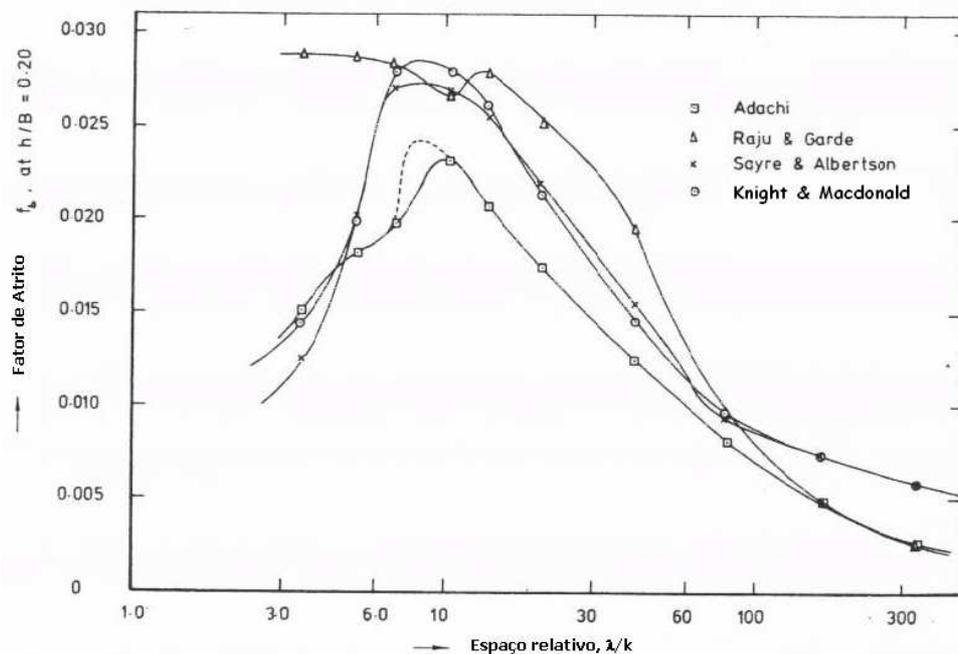


Figura 11 – Variação do fator de atrito (f) em função do espaço relativo (λ/k).
 Fonte: Knight & Macdonald (1979)

Verifica-se que com a diminuição do espaço relativo (λ/k), há aumento do fator de atrito f , atingindo um limite máximo, com posterior decréscimo. O decréscimo do fator de atrito deve-se às zonas mortas que foram formadas nos escoamentos (e) semi-quase-liso e (f) quase-liso, os quais podem ser visualizados na Figura 10.

3.3 Estudos sobre a Influência de Macro-Rugosidades no Coeficiente de Reoxigenação Superficial

Numerosos experimentos (TSENG et al, 1974; NAKAGAWA, 1975; SMOOT, 1988; BICUDO & GIORGETTI, 1991; HICKS & MASON, 1991; JIRKA, 1991; MOOG, 1995; MOOG & JIRKA, 1995, 1999 e 2002) foram realizados para relacionar os processos de transferência de gases na interface ar-água em escoamentos sobre canais com superfície livre com diferentes macro-rugosidades.

De acordo com Herlina (2005), os resultados apresentados nos experimentos de Moog & Jirka se ajustaram bem ao modelo de pequenos-turbilhões (small-eddy model) (Equação 38), para elementos que formam rugosidades relativamente pequenas.

O coeficiente volumétrico de transferência de gases (K_L) na interface ar-água, por meio do modelo de pequenos-turbilhões, pode ser representado pela seguinte equação (MOOG & JIRKA, 1999)

$$K_L = 0,161Sc^{-0,5}(\epsilon\nu)^{0,25} \quad (38)$$

Em que Sc = número de Schmidt, ϵ = taxa de dissipação de energia turbulenta por unidade de massa próximo a superfície livre, e ν = viscosidade cinemática da água.

Para escoamentos com macro-rugosidades, o modelo de pequenos-turbilhões é válido somente quando a intensidade da turbulência é calculada utilizando macro-escalas (ex. velocidade média ao invés de velocidade de cisalhamento) (HERLINA, 2005).

Apenas para exemplificar um estudo de caso, apresenta-se uma breve descrição do trabalho realizado por Moog & Jirka (1999).

O efeito da macro-rugosidade sobre a reaeração foi investigado por Moog & Jirka (1999) a partir de experimentos realizados em um canal hidráulico artificial, em que foram fixados obstáculos no leito do canal de forma semi-aleatória. Os obstáculos utilizados foram tijolos retangulares de dimensões 20,7 cm de comprimento x 8,9cm de largura x 5,7 cm de altura. A profundidade dos escoamentos variaram de 2,5cm a 20cm, de modo que em alguns casos os tijolos ficaram submersos e em outros casos não-

submersos. Um dos efeitos das macro-rugosidades é o estabelecimento de condições de não-uniformidade no escoamento, as quais podem ser visualizadas na Figura 12.

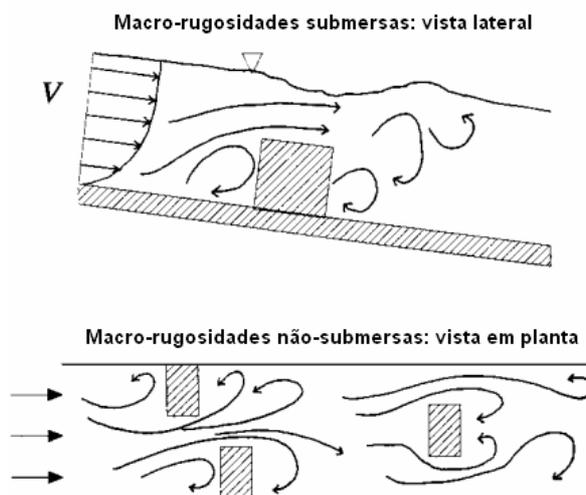


Figura 12 – Escoamento não-uniforme formado pelos elementos macro-rugosos submersos e não-submersos.
Fonte: Moog & Jirka (1999).

O escoamento ilustrado na Figura 12 é caracterizado por significativas variações espaciais na resistência ao escoamento, resultando em sulcos, jatos e zonas de recirculação. Tanto a profundidade como os campos de velocidades sofrem variações nas direções verticais e longitudinais. A não-uniformidade é resultante não apenas do grande tamanho dos tijolos, mas também devido a resistência ao escoamento. Como ilustrado na imagem com a vista lateral, e sendo uma característica de escoamentos quase ou totalmente estabelecidos, altas velocidades desenvolvem-se acima do leito liso (formando um gradiente vertical de velocidades) antes de haver colisão com os tijolos. Após a colisão, há perdas de energia localizadas e distorções no perfil de velocidades, afetando a maioria ou a totalidade da profundidade do escoamento – uma característica essencial de escoamentos com macro-rugosidades.

Outras importantes contribuições para estudos relacionados à influência da hidrodinâmica de escoamentos com macro-rugosidades sobre o processo de transferência de gases na interface ar-água, foram apresentadas por Bicudo & Giorgetti (1991). Pode-se considerar que este trabalho é uma das principais referências do presente estudo.

Com base no trabalho de Knight & Macdonald (1979), apresentado na seção **3.2.3 (Macro-Rugosidade em canais)**, Bicudo & Giorgetti (1991) realizaram

experimentos na EESC-USP, com a finalidade de estudar o efeito de leitos rugosos artificiais sobre o coeficiente de reaeração superficial.

Os experimentos foram realizados procurando-se encontrar a correlação existente entre a variação da profundidade da lâmina de água e dos espaços relativos (λ/K) de macro-rugosidades fixadas no leito de um canal artificial sobre o percentual de mudança do coeficiente de reaeração superficial K_2 , em escoamentos com superfície livre.

De acordo com os autores, o mais importante fator que controla o processo de reaeração desenvolve-se na medida em que as flutuações turbulentas próximas à superfície penetram no corpo de água e levam consigo concentrações significativas de oxigênio dissolvido. Essas tensões turbulentas são geradas pelas tensões de cisalhamento ocasionadas pelo fundo e paredes do canal, através da ação do atrito superficial oposto ao movimento das águas que escoam, como ilustrado na Figura 13.

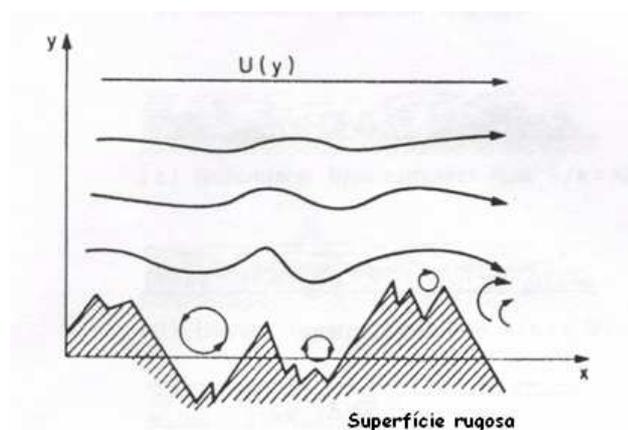


Figura 13 - Ação da superfície de atrito oposta ao movimento das águas.
Fonte: Bicudo e Giorgetti (1991)

Tomando-se como principal aparato experimental um canal artificial de dimensões 0,25 m de largura x 0,20 m de altura x 12 m de comprimento, os experimentos foram realizados no período noturno para evitar instabilidade de temperatura, no entanto, ainda assim houve uma variação média de 1,68°C para alguns ensaios. Os ensaios foram realizados com duração em torno de 12 horas. Foram utilizadas três lâminas de água (0,08m, 0,12m e 0,16m) e quatro conformidades de rugosidades diferentes, com espaços relativos entre as macro-rugosidades de 600mm (fator de resistência $x = 6,25\text{mm}$), 156mm ($x = 17,24\text{mm}$), 104mm ($x = 17,65\text{mm}$) e 52mm ($x = 3,60\text{mm}$), obtendo-se quatro padrões de escoamento diferentes: escoamento

turbulento semi-liso, escoamento hiperturbulento não-uniforme, escoamento hiperturbulento uniforme e escoamento quase-liso.

Os resultados dos experimentos demonstraram que o efeito da profundidade sobre o K_2 foi muito significativo. Variando-se a profundidade de 0,08m para 0,16m, houve redução do coeficiente de reaeração em mais de 50%, como apresentado na Figura 14.

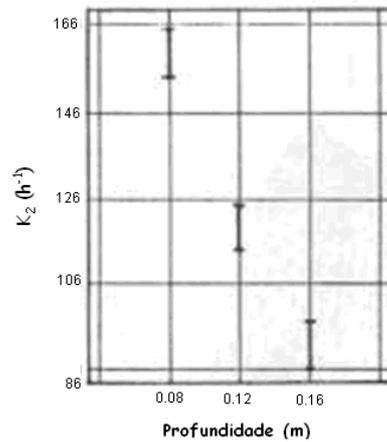


Figura 14 – Valores de K_2 em função das profundidades médias.
Fonte: Bicudo e Giorgetti (1991)

Com relação ao efeito das macro-rugosidades, houve um aumento médio em torno de 15% no valor do K_2 quando $6,25\text{mm} < x < 17,25\text{mm}$, com maior aumento, de 17%, quando $x = 17,24\text{mm}$; e um decréscimo de aproximadamente 35% no K_2 quando $x = 3,60\text{mm}$, como apresentado no Figura 15.

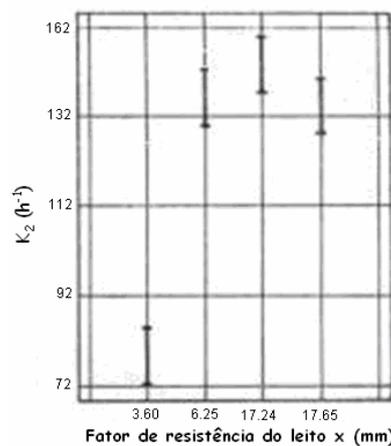


Figura 15 – Valores de K_2 em função dos fatores de resistência médios.
Fonte: Bicudo e Giorgetti (1991)

A Figura 16 demonstra os efeitos conjuntos da profundidade e da macro-rugosidade sobre o coeficiente de reaeração. Verifica-se que para um determinado número de Reynolds (neste caso sua variação é representada pelas diferentes profundidades H_1 , H_2 e H_3), há aumento do valor de percentual de mudança do coeficiente K_2 com o aumento do fator de resistência (diminuição de λ/K), atingindo um valor máximo, com posterior decréscimo.

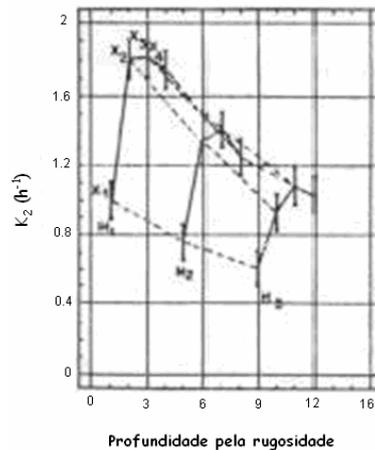


Figura 16 – Valores de K_2 em função das profundidades pelos fatores de resistência (rugosidade) médios.
Fonte: Bicudo e Giorgetti (1991)

Devido as características dos equipamentos utilizados por Bicudo & Giorgetti (1991), houve algumas limitações operacionais em seus experimentos. Por exemplo, não foi possível variar a velocidade do escoamento e a declividade do canal (o que pode ter dificultado o estabelecimento de um escoamento uniforme), e também não houve garantia de que o fenômeno da reaeração ocorreu apenas superficialmente e somente através da calha do canal principal, pois o circuito hidráulico contava com um reservatório para armazenamento de água, além de possuir variações bruscas no escoamento da água.

Desta maneira, a proposta do presente trabalho possui os objetivos semelhantes aos determinados por Bicudo & Giorgetti (1991), no entanto, os equipamentos utilizados possibilitaram um maior controle dos fatores envolvidos no processo de reaeração para as condições experimentais estabelecidas.

Os experimentos foram realizados em um canal hidráulico artificial (inédito), a partir de diferentes condições de escoamentos, variando-se parâmetros como velocidade do escoamento, profundidade da lâmina de água e macro-rugosidades do leito do canal.

Um importante diferencial com relação ao trabalho de Bicudo & Giorgetti (1991) é que o canal possui aspectos construtivos que garantem que a reaeração ocorra apenas superficialmente ao fluido, pois o circuito hidráulico é totalmente fechado, com escoamento aberto apenas no trecho da calha, e sua geometria não permite a ocorrência de variações bruscas no escoamento da água.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Aspectos gerais

Para a caracterização dos efeitos da macro-rugosidade composta por estacas de madeira aplicadas no fundo do canal, desenvolveu-se um estudo apoiado em modelação física e matemática, visando a interpretação do fenômeno de reoxigenação superficial a partir das condições estabelecidas nos experimentos.

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Fenômenos de Transportes (Setor de Modelagem Física e Matemática de Processos Ambientais) da Escola de Engenharia de São Carlos.

4.2 Descrição da bancada experimental

O modelo físico utilizado foi um canal hidráulico, com circuito hidráulico fechado, construído em chapa de ferro, tendo aderido em sua superfície epóxi/esmalte sintético (tipo pintura automotiva), cor azul. O canal possui 6m de comprimento útil, com seção transversal retangular de dimensões 0,20m x 0,30m. A declividade do fundo pode ser controlada a partir de um volante de nível, localizado próximo à montante da calha.

A circulação do fluido em escoamento foi realizada por meio de um conjunto motor-bomba de 5hp. A velocidade do escoamento foi variada a partir de ajuste na rotação do rotor da bomba, que foi realizado por meio de um inversor de frequência instalado no sistema. O oxigênio dissolvido foi quantificado por um sensor de OD, com registro automático dos dados. O equipamento com o sensor de OD também realizou as medidas de temperatura da água e de pressão atmosférica. A temperatura da água foi, dentro do possível, mantida constante com auxílio de dois trocadores de calor. A Figura 17 ilustra o esquema experimental para os estudos no canal hidráulico

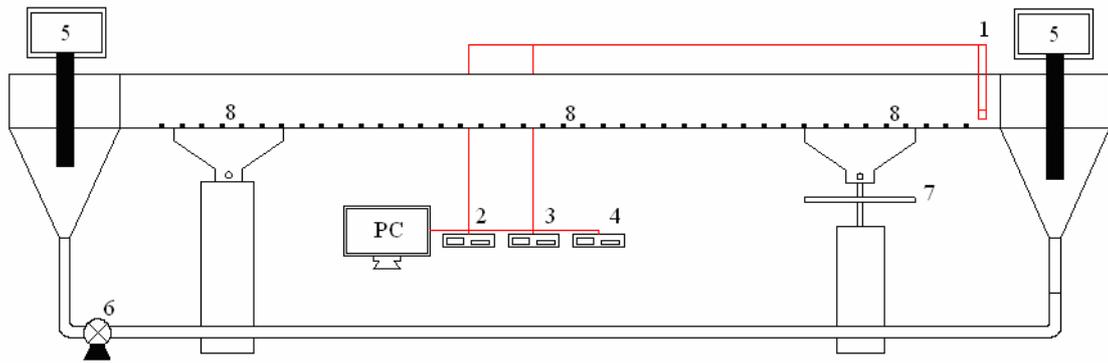


Figura 17 – Esquema da montagem experimental do canal hidráulico.

Sendo

- 1 – Sensor de OD e temperatura da água;
- 2 – Medidor/Registrador de OD;
- 3 – Medidor/Registrador da temperatura da água;
- 4 – Medidor/Registrador da pressão atmosférica;
- 5 – Trocador de calor;
- 6 – Bomba para recirculação da água no canal;
- 7 – Volante para variação da declividade do leito;
- 8 – Elementos rugosos (macro-rugosidades).

Todos os detalhes descritos estão ilustrados nas Figuras 18 a 23, apresentadas a seguir.



Figura 18 – Canal hidráulico.

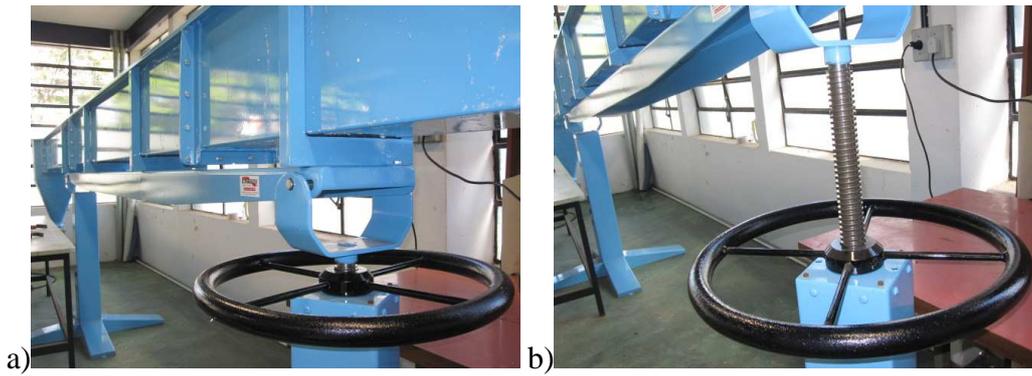


Figura 19 - Volante para variação da declividade do leito. a) sem declividade; b) com declividade.



Figura 20 – Conjunto motor-bomba de 5hp.

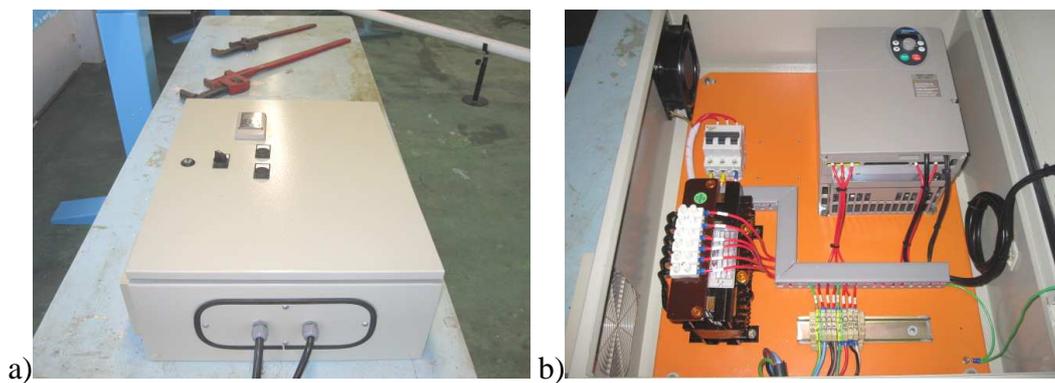


Figura 21 – Inversor de frequência. a) fechado; b) aberto.



Figura 22 – Sonda de OD. a) detalhes da interface de comando; b) sonda imersa na água.

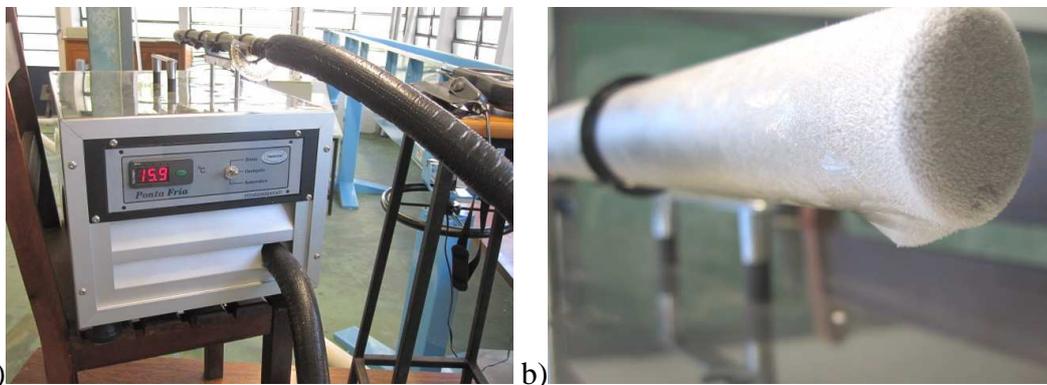


Figura 23 – Trocador de calor. a) vista em perspectiva do equipamento; b) detalhe da ponta fria congelada.

Para medição da concentração de oxigênio dissolvido foi utilizada uma sonda com sensores de OD luminescente (LDO – *Luminescence Dissolved Oxygen*) da marca Hach, tipo HQ40d (apresentada na Figura 22), que não necessita de calibração. O método de luminescência da Hach é recomendado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), para medição de OD em águas e efluentes. Esta sonda é capaz de medir a concentração de OD em uma faixa de 0,2 a 20 mg/L. Possui um adaptador tipo USB, o qual permite, com facilidade, a transferência dos dados para o computador.

4.3 Determinação da vazão e velocidade média do escoamento

A vazão de escoamento foi determinada através de um medidor de vazão do tipo orifício (ou diafragma), construído a partir de padrões determinados pela ASME

(American Society of Mechanical Engineers), e semelhante ao representado pela Figura 24.

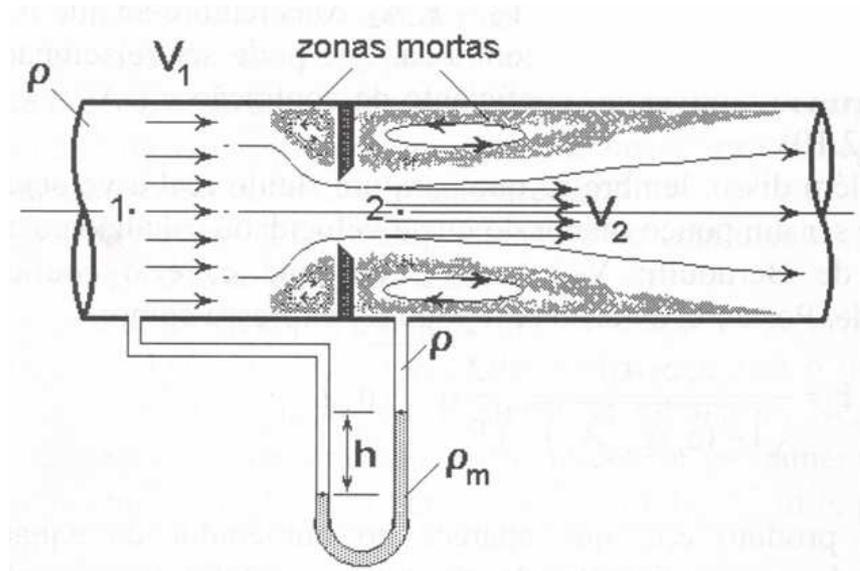


Figura 24 – Medidor de vazão tipo orifício (ou diafragma).
Fonte: Giorgetti (2008)

A partir deste método, devem ser realizadas duas tomadas de pressão estáticas, aferidas por um manômetro de mercúrio, determinando-se a variação de pressão entre a região de velocidade não perturbada pela existência do medidor de vazão (ponto 1) e a zona de mais alta velocidade criada por ele (ponto 2), chamada de *veia contraída*. A localização precisa das tomadas de pressão pode ser encontrada em diferentes normas técnicas.

O orifício e as colunas do manômetro de mercúrio podem ser visualizados nas Figuras 25 a e b, respectivamente.

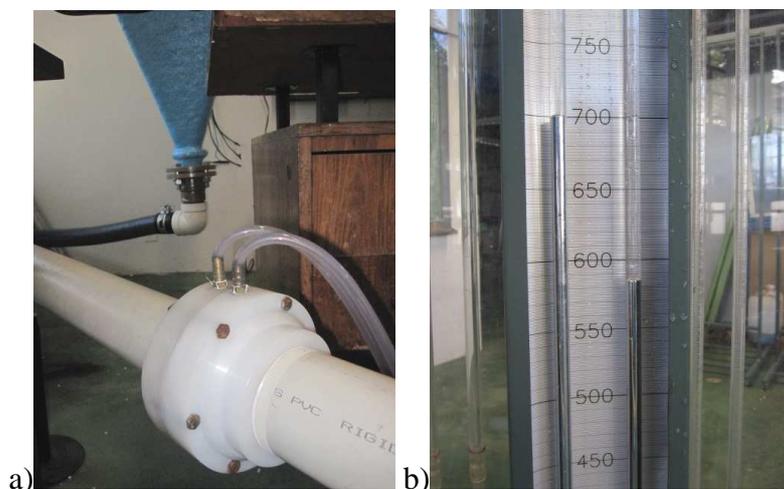


Figura 25 – Medidor de vazão. a) orifício; b) colunas do manômetro de mercúrio.

Para obter a equação que calcula a vazão do escoamento no orifício, deve-se empregar a equação de Bernoulli (Eq. 39), aplicada nos pontos 1 e 2. Como a velocidade V_1 não é desprezível, devemos relacioná-la com a velocidade V_2 através do emprego da equação da continuidade (Eq. 40) para um volume de controle (Fig. 25) que tem a seção 1 como entrada e a seção 2 (da *veia contraída*) como saída.

$$\left(z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} \right) = 0 \quad (39)$$

$$Q_1 - Q_2 = 0 \quad (40)$$

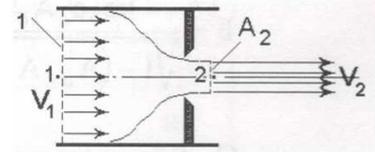


Fig. 25' – Volume de controle.

Correlacionando as Equações 39 e 40, obtém-se, por fim

$$Q = \frac{c_F A_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_0}{A_1} \right)^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)} \quad (41)$$

A diferença de pressão $p_1 - p_2$ é igual a $(\rho_m - \rho)gh$. Portanto

$$Q = \frac{c_F A_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_0}{A_1} \right)^2}} \sqrt{2 \frac{\rho_m - \rho}{\rho} gh} \quad (42)$$

Em que

Q = vazão do escoamento, $[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$

c_F = coeficiente de vazão (adimensional determinado experimentalmente)

A_0 = área do orifício $[\text{m}^2]$

A_1 = área da seção 1 $[\text{m}^2]$

ρ_m = massa específica do fluido manométrico $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

ρ = massa específica do fluido em escoamento $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

g = aceleração da gravidade $[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$

h = altura diferencial $[\text{m}]$

Como a vazão do escoamento é dada pelo produto da velocidade média V_m pela área da seção transversal, a velocidade média foi determinada a partir de

$$V_m = \frac{Q}{A_c} \quad (43)$$

Em que

A_c = área da seção transversal do escoamento [m²].

A área da seção transversal do escoamento é determinada pelo produto da largura do canal hidráulico (20cm) pela altura da lâmina de água, que poderá atingir no máximo 30cm, como pode ser visualizado na Figura 26.

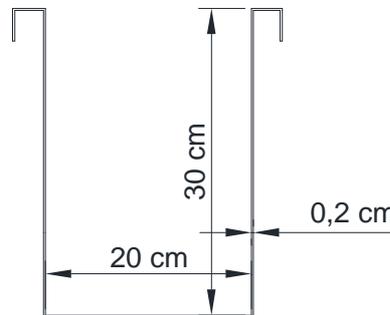


Figura 26 – Corte transversal da calha do canal.

4.4 Procedimentos experimentais

Os experimentos foram realizados utilizando-se água destilada, deaerada por um processo de borbulhamento de gás nitrogênio (processo de *stripping*). A deaeração ocorre devido a transferência de oxigênio que ocorre do meio líquido para as bolhas de nitrogênio, devido a diferença de concentração de oxigênio existente nos dois compartimentos. Ao escapar para a atmosfera, as bolhas de nitrogênio levam consigo moléculas de oxigênio anteriormente dissolvidas no meio líquido. Para otimizar a transferência de oxigênio do meio líquido para as bolhas de nitrogênio, utilizou-se um difusor (pedra porosa), de modo a diminuir o diâmetro das bolhas de nitrogênio e aumentar o tempo de permanência das mesmas no meio líquido.

O cilindro de nitrogênio, o difusor e um instante do processo de borbulhamento de gás nitrogênio no meio líquido podem ser visualizados nas Figuras 27 a, b e c; respectivamente.

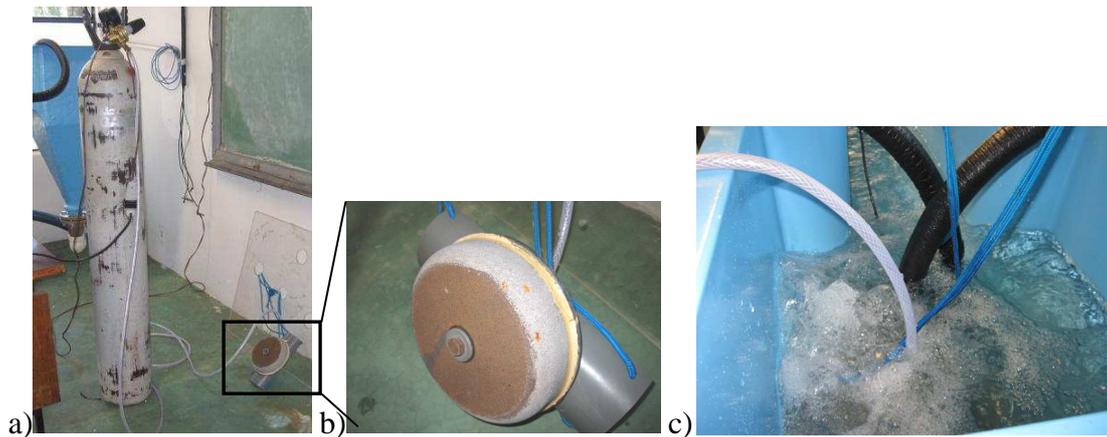


Figura 27 – Processo de *stripping*. a) cilindro de nitrogênio gasoso; b) difusor; c) borbulhamento de nitrogênio no meio líquido.

Para a obtenção dos diferentes níveis de turbulência, foram determinadas diferentes condições para o escoamento, variando-se a velocidade através de ajuste na rotação do rotor da bomba; a profundidade da lâmina de água, a partir do volume de água no sistema hidráulico; e a rugosidade a partir da construção de revestimento (macro-rugosidades) no fundo do canal.

As velocidades médias dos escoamentos tiveram 3 níveis de variação, sendo: 0,111m/s; 0,161m/s e 0,22m/s.

As profundidades da lâmina de água também tiveram 3 níveis de variação, modificadas a partir do volume e água no canal. Os níveis de variação foram 0,08 m, 0,12 m e 0,16 m.

Os elementos rugosos que constituíram as macro-rugosidades foram compostos por tiras de madeira do tipo *pinus*, com dimensões de 1,5 cm de largura, 1,5 cm de altura e 20 cm de comprimento, sendo expostas transversalmente ao escoamento, com distanciamentos variados, como apresentado na Figura 28.

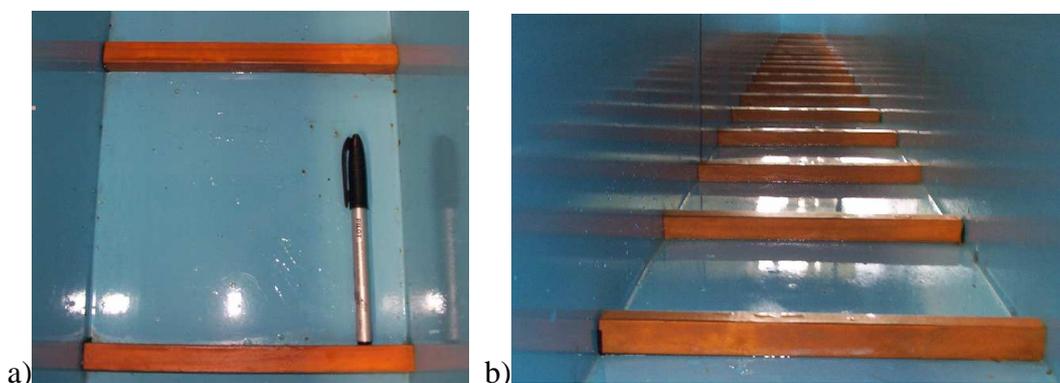


Figura 28 – Elementos rugosos. a) vista superior; b) vista em perspectiva.

As tiras foram impermeabilizadas com uma resina química do tipo “stain” - um produto desenvolvido especialmente para materiais sujeitos às intempéries climáticas ou submersos em água.

Considerando-se λ o espaço entre os elementos rugosos e k a altura dos elementos que é de 1,5 cm, o espaço relativo (λ/K) teve 5 configurações diferentes, sendo: 1) $\lambda/K = \infty$ (escoamento turbulento liso); 2) $\lambda/K = 26,6$ (escoamento turbulento semi-liso); 3) $\lambda/K = 13,3$ (escoamento hiperturbulento não-uniforme); 4) $\lambda/K = 6,6$ (escoamento hiperturbulento uniforme) e; 5) $\lambda/K = 3,3$ (escoamento quase-liso).

As figuras 29 a 33 apresentam as configurações geométricas do leito para os 5 diferentes tipos característicos de escoamentos e à direita uma imagem representativa dos padrões de escoamentos esperados.

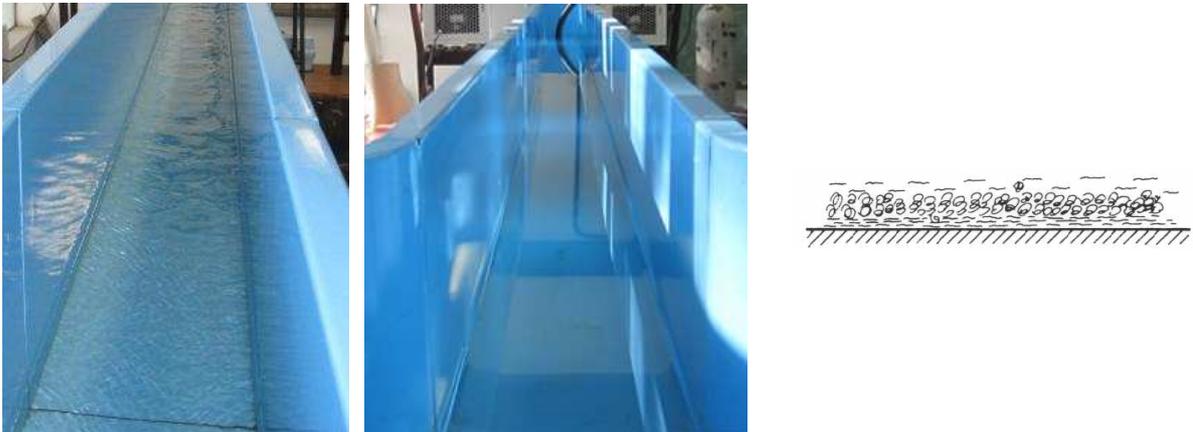


Figura 29 – Configuração geométrica do leito para o escoamento turbulento liso ($\lambda/K = \infty$).

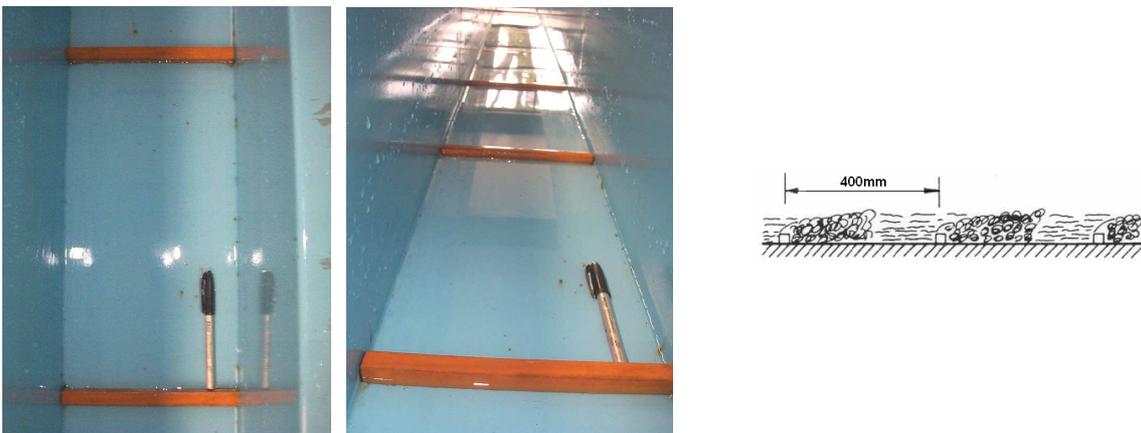


Figura 30 – Configuração geométrica do leito para o escoamento turbulento semi-liso ($\lambda/K = 26,6$).



Figura 31 – Configuração geométrica do leito para o escoamento hiperturbulento não-uniforme ($\lambda/K = 13,3$).



Figura 32 – Configuração geométrica do leito para o escoamento hiperturbulento uniforme ($\lambda/K = 6,6$).



Figura 33 – Configuração geométrica do leito para o escoamento quase liso ($\lambda/K = 3,3$).

Durante a realização dos experimentos a água deaerada atravessa a bomba que promoverá sua recirculação, passando em seguida pelo trocador de calor que manterá a

temperatura da água constante (em torno de 25°C). Posteriormente a água flui através de um elemento de transição para a estabilização do escoamento e entra no canal, sendo então exposta à atmosfera para que ocorra a reaeração. No final do canal há outro elemento de transição para estabilização do escoamento, iniciando-se a partir desse ponto a linha de sucção da bomba. Os elementos de transição podem ser visualizados na Figura 34.

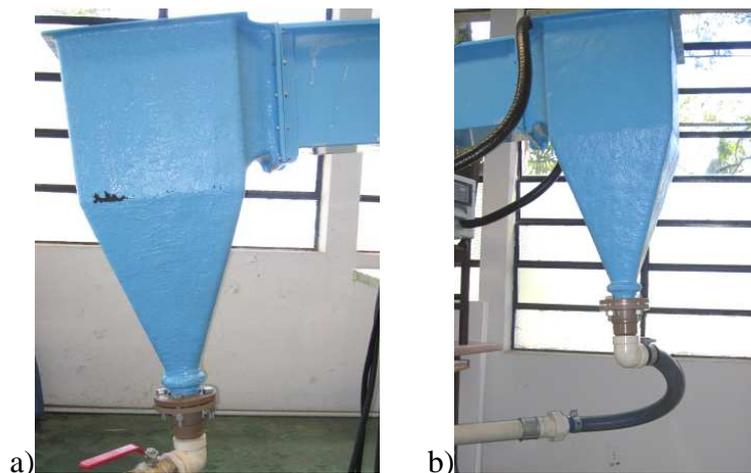


Figura 34 – Elementos de transição. a) de jusante; b) de montante.

O equipamento de aquisição de dados de concentração de oxigênio dissolvido (sonda de OD) é acionado no início do processo de *stripping*. Quando a concentração de OD atinge níveis em torno de 4 mg/L, a deaeração é interrompida e inicia-se a fase da reaeração. O tempo de realização dos experimentos foi de tal modo que procurou-se atingir valores de oxigênio dissolvido próximos aos valores de concentração de saturação (C_s) estimados.

A estimativa da concentração de saturação de OD foi realizada a partir de uma planilha eletrônica on-line disponível no site do USGS², a qual seus valores são baseados no trabalho de Weiss (1970)³.

4.5 Construção de um modelo de regressão para o K_2

A construção de um modelo de regressão para o K_2 foi realizada por meio de uma análise dimensional direcionada às características específicas dos escoamentos

² U.S. Geological Survey (Serviço Geológico dos Estados Unidos)
<<http://water.usgs.gov/software/DOTABLES/>>

³ Weiss, R.F., 1970, The solubility of nitrogen, oxygen, and argon in water and seawater: Deep Sea Research, v. 17, no. 4, p. 721-735.

estabelecidos neste estudo, utilizando o método de Buckingham, também conhecido como Teorema dos Pi.

Para Çengel & Cimbala (2007), os parâmetros adimensionais gerados pela adimensionalização das equações são extremamente úteis e podem economizar esforço e despesas consideráveis a longo prazo.

Giorgetti (2008) descreve que este procedimento torna a representação dos fenômenos muito mais compacta e geral, e a análise dos dados experimentais muito mais fácil.

Após a obtenção dos termos adimensionais por meio da aplicação do Teorema de Buckingham, foi adotado um modelo de potência para descrever a relação de dependência entre as variáveis e, por fim, aplicado a regressão linear multivariada sobre o modelo na forma logarítmica resultando em um modelo matemático de natureza semi-empírica.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Características hidráulicas dos escoamentos

Nesta seção são apresentadas sucintamente as características hidráulicas dos escoamentos obtidos a partir das diferentes conformidades geométricas ao longo do comprimento da seção longitudinal da calha do canal hidráulico. Inicialmente os experimentos foram realizados com o canal relativamente liso, sem a presença de tiras de madeira (macro-rugosidades), podendo o canal ser considerado prismático por possuir ao longo do comprimento seção reta e declividade constante.

Considerando o trecho entre as seções A e B da Figura 35, com as condições iniciais sem macro-rugosidades, apesar de o regime de escoamento ser considerado permanente, verificou-se, a partir de aferições da profundidade da lâmina de água nas seções de medida 1, 2 e 3, que não foi possível atingir a sua uniformidade. Essa característica hidráulica ocorreu devido à desaceleração que o escoamento sofre ao entrar no elemento de transição de jusante (apresentado na Figura 34 a), havendo a formação de remanso, de modo que o escoamento passa a ser gradualmente variado.

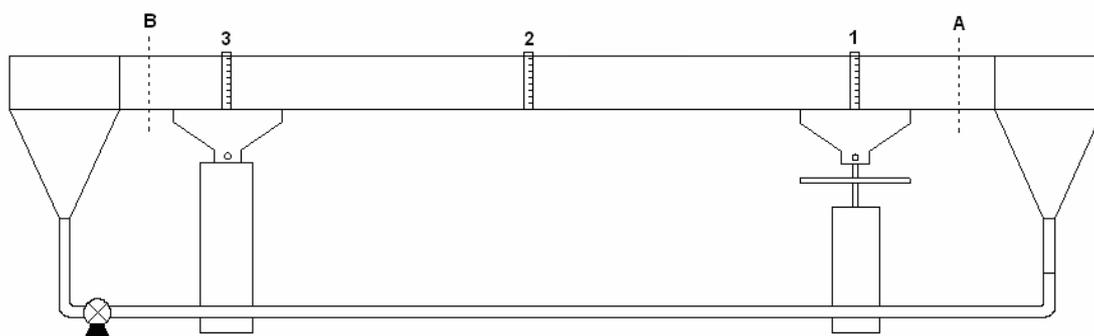


Figura 35 – Seções definidas para determinação do regime de escoamento (seções A e B) e para aferição da altura da lâmina de água (seções 1, 2 e 3).

Houve, portanto, em todos os experimentos com o canal relativamente liso, aumento progressivo da altura da lâmina de água a partir de determinadas seções, as quais geralmente localizavam-se entre as seções de medida 2 e 3, dependendo da inclinação do leito do canal e da velocidade do escoamento.

Com a implementação das macro-rugosidades, houve aumento da força de resistência ao escoamento, e com isso a formação de escoamentos não-uniformes, pois a altura da lâmina de água no trecho inicial (trecho de montante: aproximadamente entre as seções A e 1 da Figura 35), passou a ser maior do que o restante da calha.

Aumentando a inclinação do leito do canal foi possível atingir a uniformidade do escoamento.

Constatando-se a possibilidade de atingir o regime de escoamento permanente e uniforme com a presença de macro-rugosidades, buscou-se sempre atingir esta condição nos experimentos realizados.

Apesar da presença dos elementos macro-rugosos ser favorável ao estabelecimento do escoamento permanente e uniforme, dependendo da velocidade do escoamento poderá haver aumento excessivo da turbulência do meio, e com isso o estabelecimento de condições não-uniformes. Esta condição pode ser visualizada em parte da Figura 12 (apresentada anteriormente) de Moog e Jirka (1999).

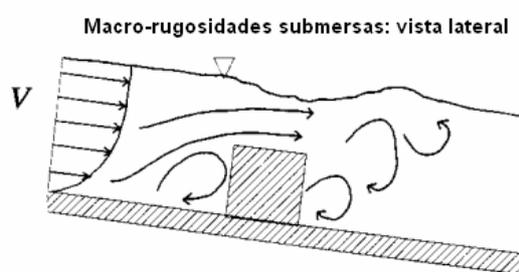


Figura 12 – Escoamento não-uniforme formado pelos elementos macro-rugosos submersos.

Fonte: Moog & Jirka (1999).

Ao colidir com os elementos macro-rugosos, tanto a profundidade do escoamento como os campos de velocidades sofrem variações nas direções verticais e longitudinais, o que pode resultar na formação de sulcos à jusante do obstáculo.

Apenas como propósito de observação, essas condições foram estabelecidas no aparato experimental utilizado nesta pesquisa, e as imagens podem ser visualizadas na Figura 36.

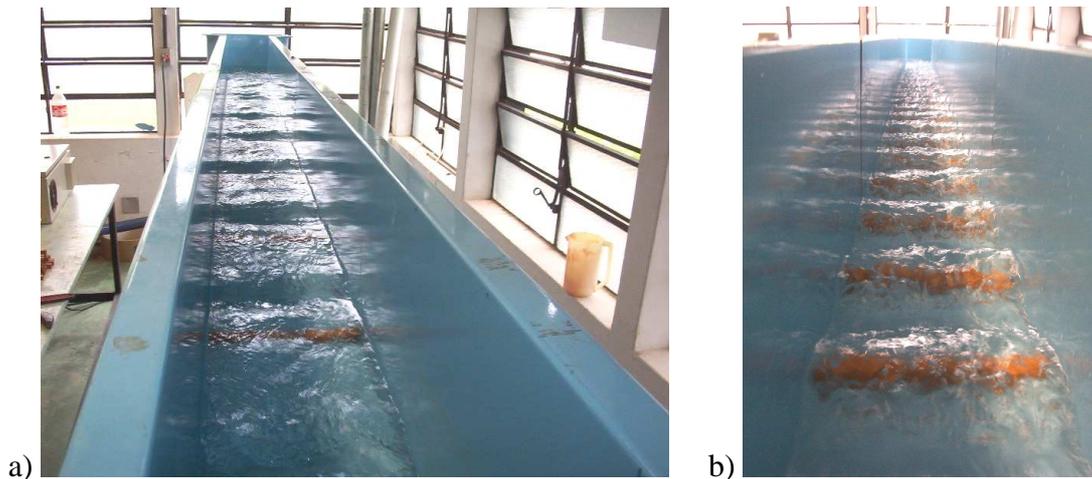


Figura 36 – Escoamento não-uniforme formado pelos elementos macro-rugosos submersos. a) $V = 0,29 \text{ m.s}^{-1}$, $\lambda = 40 \text{ cm}$; b) $V = 0,31 \text{ m.s}^{-1}$, $\lambda = 10 \text{ cm}$.

5.2 Coeficiente de Reoxigenação

Nesta seção são apresentados os resultados da estimativa dos parâmetros K_2 , C_S e C_0 , a partir do modelo representado pela equação 13

$$C = C_S - (C_S - C_0)e^{-K_2 t} \quad (13)$$

Cada ensaio possui características hidráulicas peculiares como velocidade média do escoamento no canal hidráulico (V), profundidade da lâmina de água (H) e espaçamento relativo entre os elementos macro-rugosos (λ).

As Tabelas 3, 4 e 5 apresentam as características hidráulicas dos escoamentos e os coeficientes de reoxigenação para todos os experimentos realizados com as velocidades 0,111 m/s, 0,161 m/s e 0,22 m/s, respectivamente. Os valores dos coeficientes de reoxigenação estão apresentados para as temperaturas ambiente e para uma temperatura padrão, de 20 °C, corrigido a partir do uso da Equação 18 apresentada na seção **3.1.5.3 (Influência da temperatura sobre o coeficiente de reaeração)**.

No Apêndice estão apresentadas as curvas de reoxigenação para os 90 experimentos realizados. Essas curvas são produzidas ao correlacionarmos os dados experimentais de K_2 em função do tempo. São apresentados, portanto, os dados experimentais (pontos discretos) e o modelo (linha contínua) ajustado a partir dos parâmetros K_2 , C_S e C_0 . A curva do modelo foi extrapolada para além dos pontos experimentais com a finalidade de facilitar a diferenciação entre os dados experimentais e o modelo ajustado.

Tabela 3 – Características hidráulicas dos escoamentos e coeficientes de reoxigenação (V = 0,111 m/s).

V (m/s)	H (m)	λ (cm)	Exp.	C ₀ (mg/L)	C _s (mg/L)	K ₂ (h ⁻¹)	R ²	ΔT (°C)	\bar{T} (°C)	K ₂ (20°C) (h ⁻¹)	$\bar{K}_{2,20}$ (h ⁻¹)
0,111	0,08	Liso	1	4,37	8,1	0,27	0,9997	0,4	20,6	0,27	0,31±0,055
			2	4,07	7,7	0,37	0,9995	0,5	23,0	0,34	
		40	3	4,09	7,3	0,41	0,9975	0,9	26,0	0,36	0,35±0,004
			4	4,20	7,3	0,36	0,9995	0,6	21,2	0,35	
		20	5	4,15	7,4	0,45	0,9995	0,7	25,4	0,40	0,42±0,035
			6	4,06	7,7	0,47	0,9990	0,3	22,3	0,45	
		10	7	4,11	7,3	0,62	0,9979	0,3	25,7	0,54	0,60±0,088
			8	4,33	7,8	0,70	0,9942	0,2	22,1	0,67	
		5	9	3,77	7,9	0,57	0,9896	0,5	22,9	0,53	0,51±0,034
			10	3,88	7,7	0,52	0,9948	0,9	23,0	0,48	
	0,12	Liso	11	4,14	7,7	0,36	0,9996	1,0	22,8	0,34	0,34±0,010
			12	4,18	7,2	0,41	0,9997	0,9	26,6	0,35	
		40	13	4,10	7,4	0,40	0,9999	0,8	25,1	0,35	0,35±0,005
			14	4,25	7,1	0,41	0,9995	0,2	27,0	0,35	
		20	15	4,34	7,6	0,40	0,9999	1,0	23,5	0,37	0,37±0,006
			16	4,17	7,8	0,39	0,9997	0,7	21,9	0,38	
		10	17	4,32	7,2	0,54	0,9921	0,3	25,9	0,47	0,51±0,061
			18	4,05	7,7	0,60	0,9919	0,6	23,2	0,56	
		5	19	4,12	7,2	0,44	0,9865	0,3	26,0	0,38	0,38±0,005
			20	4,11	7,5	0,43	0,9998	0,3	24,3	0,39	
	0,16	Liso	21	3,99	7,0	0,43	0,9995	1,9	28,2	0,35	0,36±0,002
			22	4,18	7,4	0,40	0,9975	0,4	24,8	0,36	
		40	23	4,16	7,5	0,45	0,9997	0,4	24,0	0,41	0,40±0,008
			24	4,21	7,1	0,46	0,9999	0,9	26,1	0,40	
		20	25	4,16	7,5	0,46	0,9997	0,5	24,2	0,42	0,43±0,025
			26	3,98	7,3	0,52	0,9970	1,3	25,9	0,45	
		10	27	4,30	7,6	0,54	0,9993	1,4	23,5	0,50	0,55±0,074
			28	4,12	7,3	0,69	0,9908	1,4	25,8	0,60	
		5	29	4,03	7,6	0,53	0,9966	1,5	23,7	0,49	0,49±0,001
			30	4,21	7,7	0,52	0,9997	1,6	22,8	0,49	

* V = velocidade média do escoamento; H = altura da lâmina de água; λ = espaço relativo das macro-rugosidades; Exp. = número do experimento; C₀ = concentração inicial de OD; C_s = concentração de saturação de OD; K₂ = coeficiente de reoxigenação à temperatura ambiente; R² = coeficiente de determinação; ΔT = variação de temperatura no experimento; \bar{T} = temperatura média; $\bar{K}_{2,20}$ = coeficiente de reoxigenação médio.

Tabela 4 – Características hidráulicas dos escoamentos e coeficientes de reoxigenação (V = 0,161 m/s).

V (m/s)	H (m)	λ (cm)	Exp.	C_0 (mg/L)	C_S (mg/L)	K_2 (h ⁻¹)	R ²	ΔT (°C)	\bar{T} (°C)	K_2 (20°C) (h ⁻¹)	$\bar{K}_{2,20}$ (h ⁻¹)	
0,161	0,08	Liso	31	4,26	7,4	0,38	0,9998	0,7	24,7	0,34	0,38±0,050	
			32	4,25	7,4	0,46	0,9999	0,4	24,8	0,41		
		40	33	4,33	7,6	0,64	0,9998	0,2	23,2	0,59	0,59±0,002	
			34	4,28	7,5	0,65	0,9999	0,4	23,7	0,60		
		20	35	4,25	7,2	0,71	0,9997	0,5	25,9	0,62	0,62±0,002	
			36	4,55	7,4	0,69	0,9994	0,5	24,9	0,61		
		10	37	4,16	7,2	0,81	0,9997	0,3	26,2	0,70	0,69±0,008	
			38	4,28	7,3	0,78	0,9999	0,6	25,3	0,69		
		5	39	4,13	7,3	0,60	0,9991	0,8	25,4	0,53	0,56±0,044	
			40	4,06	7,4	0,66	0,9989	1,1	24,7	0,59		
		0,12	Liso	41	4,25	7,5	0,49	0,9998	1,2	24,2	0,44	0,45±0,013
				42	4,24	7,3	0,53	0,9999	1,2	25,8	0,46	
	40		43	4,24	7,5	0,54	0,9998	0,8	23,6	0,50	0,49±0,006	
			44	4,24	4,4	0,54	0,9998	0,2	24,3	0,49		
	20		45	4,20	7,1	0,61	0,9998	1,0	27,0	0,52	0,51±0,011	
			46	4,12	7,2	0,58	0,9998	0,1	26,2	0,50		
	10		47	4,17	7,2	0,73	0,9985	0,7	25,8	0,64	0,61±0,037	
			48	4,26	7,2	0,68	0,9956	0,1	26,4	0,58		
	5		49	4,20	7,0	0,64	0,9998	0,0	27,5	0,54	0,53±0,012	
			50	4,08	7,2	0,60	0,9987	0,5	26,1	0,52		
	0,16		Liso	51	4,19	6,9	0,65	0,9998	0,1	28,7	0,53	0,50±0,041
				52	4,22	7,1	0,56	0,9998	0,3	27,3	0,47	
		40	53	4,26	7,2	0,63	0,9999	0,9	26,7	0,54	0,53±0,004	
			54	3,87	7,1	0,63	0,9996	1,0	27,1	0,53		
20		55	4,20	7,3	0,64	0,9999	1,1	25,8	0,56	0,57±0,013		
		56	4,23	7,1	0,68	0,9999	0,9	27,0	0,58			
10		57	4,23	7,1	0,69	0,9998	1,2	27,1	0,58	0,64±0,079		
		58	4,28	7,3	0,79	0,9961	2,1	25,4	0,70			
5		59	3,98	7,3	0,65	0,9990	0,9	25,3	0,57	0,54±0,040		
		60	4,38	7,1	0,61	0,9986	0,4	27,0	0,52			

* V = velocidade média do escoamento; H = altura da lâmina de água; λ = espaço relativo das macro-rugosidades; Exp. = número do experimento; C_0 = concentração inicial de OD; C_S = concentração de saturação de OD; K_2 = coeficiente de reoxigenação à temperatura ambiente; R² = coeficiente de determinação; ΔT = variação de temperatura no experimento; \bar{T} = temperatura média; \bar{K}_2 = coeficiente de reoxigenação médio.

Tabela 5 – Características hidráulicas dos escoamentos e coeficientes de reoxigenação (V = 0,22 m/s).

V (m/s)	H (m)	λ (cm)	Exp.	C ₀ (mg/L)	C _s (mg/L)	K ₂ (h ⁻¹)	R ²	ΔT (°C)	\bar{T} (°C)	K ₂ (20°C) (h ⁻¹)	$\bar{K}_{2,20}$ (h ⁻¹)	
0,22	0,08	Liso	61	4,00	7,6	0,69	0,9999	0,1	23,5	0,64	0,65±0,020	
			62	4,11	7,7	0,71	0,9999	0,7	22,9	0,66		
		40	63	4,12	8,1	0,88	0,9998	0,5	20,2	0,88	0,88±0,002	
			64	4,03	7,4	0,99	0,9998	0,5	25,0	0,88		
		20	65	4,09	7,8	1,08	0,9999	0,3	22,2	1,03	1,00±0,031	
			66	3,97	7,3	1,12	0,9990	0,3	25,6	0,98		
		10	67	4,12	7,9	1,48	0,9960	0,3	21,6	1,42	1,24±0,257	
			68	4,04	7,9	1,09	0,9993	0,4	21,1	1,06		
		5	69	4,22	7,6	1,06	0,9966	0,3	23,7	0,97	0,87±0,136	
			70	4,12	7,8	0,82	0,9998	0,1	22,2	0,78		
		0,12	Liso	71	4,06	7,3	0,74	0,9996	1,4	25,8	0,64	0,66±0,028
				72	4,26	7,2	0,80	0,9998	0,0	26,7	0,68	
			40	73	4,03	7,2	0,81	0,9999	0,4	26,5	0,69	0,69±0,001
				74	4,12	7,5	0,76	0,9993	0,4	23,9	0,69	
	20		75	4,14	7,6	0,80	0,9998	1,4	23,4	0,74	0,74±0,008	
			76	4,12	7,6	0,81	0,9998	1,6	23,3	0,75		
	10		77	4,08	7,7	0,98	0,9986	1,1	22,6	0,92	0,89±0,050	
			78	4,19	7,6	0,92	0,9997	0,7	23,3	0,85		
	5		79	4,14	7,2	0,79	0,9962	1,8	26,1	0,68	0,68±0,002	
			80	4,02	7,4	0,76	0,9981	1,8	24,6	0,68		
	0,16		Liso	81	4,08	7,0	0,96	0,9996	1,2	28,1	0,79	0,76±0,039
				82	4,06	6,8	0,93	0,9999	0,4	29,8	0,74	
			40	83	4,06	7,7	0,87	0,9989	2,2	22,4	0,82	0,83±0,010
				84	4,12	6,7	1,06	0,9998	0,8	30,0	0,84	
		20	85	4,09	6,9	1,08	0,9998	2,5	27,9	0,90	0,93±0,048	
			86	4,32	7,2	1,11	0,9914	0,9	26,0	0,96		
		10	87	3,81	7,0	1,25	0,9966	3,2	27,4	1,05	1,03±0,031	
			88	3,86	7,1	1,18	0,9996	1,9	26,8	1,00		
		5	89	4,56	7,0	0,88	0,9991	3,9	27,8	0,73	0,68±0,066	
			90	4,23	7,0	0,76	0,9994	3,1	27,4	0,64		

* V = velocidade média do escoamento; H = altura da lâmina de água; λ = espaço relativo das macro-rugosidades; Exp. = número do experimento; C₀ = concentração inicial de OD; C_s = concentração de saturação de OD; K₂ = coeficiente de reoxigenação à temperatura ambiente; R² = coeficiente de determinação; ΔT = variação de temperatura no experimento; \bar{T} = temperatura média; $\bar{K}_{2,20}$ = coeficiente de reoxigenação médio.

No Apêndice também estão apresentados os gráficos dos resíduos (OD medido – OD do modelo) em função do tempo para cada experimento. São apresentados os valores absolutos (em mg/L) dos resíduos. Nos gráficos, é possível observar se existe alguma tendência nos valores dos resíduos ou se estes estão distribuídos aleatoriamente.

Verifica-se que em todos os ensaios realizados houve tendência nos resíduos dos dados experimentais. Levanta-se a hipótese de haver um erro sistemático da sonda de OD utilizada, devido ao fato de que mesmo nos experimentos que tiveram consideráveis tempos de permanência de coleta de dados (além do necessário para a estimativa do K_2), houve formações de significativas tendências nos resíduos. São exemplos os ensaios 22 (com tempo de experimentação em torno de 16h), 51 (com t.e.⁴ em torno de 5,3h), 81 (com t.e. em torno de 8h), 87 (com t.e. em torno de 7h) e 90 (com t.e. em torno de 5,9h).

E ainda, por outro lado, alguns experimentos realizados em um tempo relativamente curto, apresentaram seus resíduos de modo quase aleatório. O termo “quase” deve-se ao fato de que mesmo nestes casos houve tendências na ordem de microescala (ou segunda ordem). São exemplos os ensaios 13 (com t.e. em torno de 3,8h), 15 (com t.e. em torno de 2,8h), 30 (com t.e. em torno de 3,5h), 38 (com t.e. em torno de 2,5h), 82 (com t.e. em torno de 2,5h) e 84 (com t.e. em torno de 3,2h).

Analisando-se os dados das Tabelas 3, 4 e 5, verifica-se que os resultados de K_2 em função do espaço relativo (λ/k) apresentaram o mesmo comportamento dos resultados do fator de atrito em função do espaço relativo (λ/k) dos experimentos realizados por Knight & Macdonald (1979). Quando comparados os resultados dos valores de K_2 em função das condições de rugosidade $\lambda = \infty$, 40 cm, 20 cm e 10 cm, verifica-se que houve aumento progressivo dos valores, e ao implementar a última condição de distanciamento entre os elementos rugosos, $\lambda = 5$ cm, houve diminuição do fator de atrito provavelmente devido a ocupação dos espaços entre os elementos rugosos por zonas mortas ou zonas de recirculação do escoamento, havendo uma conseqüente redução dos valores de K_2 .

Considerando-se λ o espaço entre os elementos rugosos e k a altura dos elementos que é de 1,5 cm, o Gráfico 1 apresenta os valores dos coeficientes de reaeração (K_2) em função dos espaços relativos (λ/K) para os 90 experimentos realizados, sendo $\lambda/K = \infty$ (escoamento turbulento liso); $\lambda/K = 26,6$ (escoamento

⁴ Tempo de experimentação

turbulento semi-liso); $\lambda/K = 13,3$ (escoamento hiperturbulento não-uniforme); $\lambda/K = 6,6$ (escoamento hiperturbulento uniforme); e $\lambda/K = 3,3$ (escoamento quase-liso).

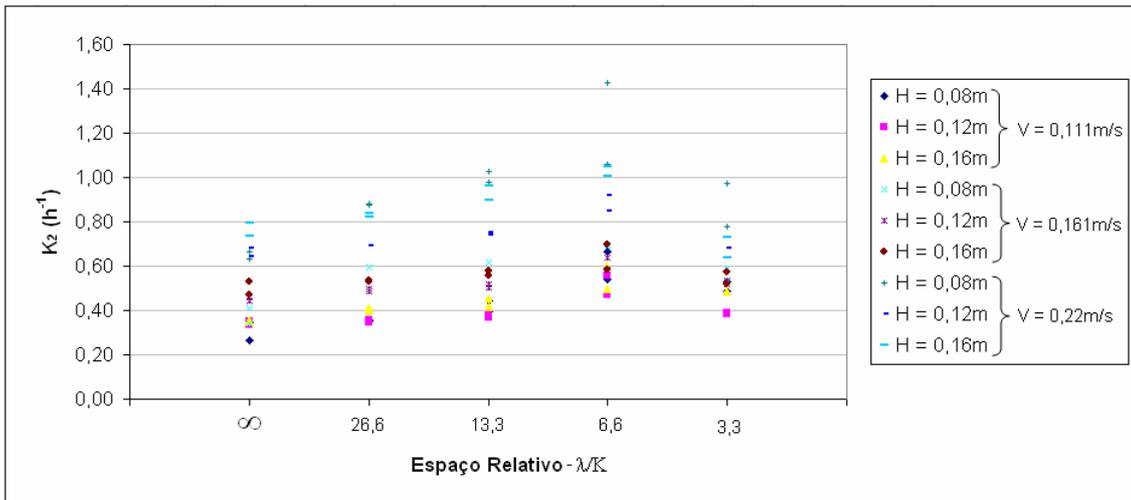


Gráfico 1 - Coeficientes de reaeração (K_2) em função dos espaços relativos (λ/K).

Para otimizar a visualização dos resultados, os Gráficos 2, 3 e 4 a seguir apresentam os valores coeficientes de reaeração (K_2) em função dos espaços relativos (λ/K), especificamente para as velocidades médias de escoamento 0,111m/s; 0,161m/s e 0,22m/s, respectivamente. Como os experimentos foram realizados em duplicata, cada ponto presente no gráfico refere-se à média aritmética dos valores encontrados nas duplicatas.

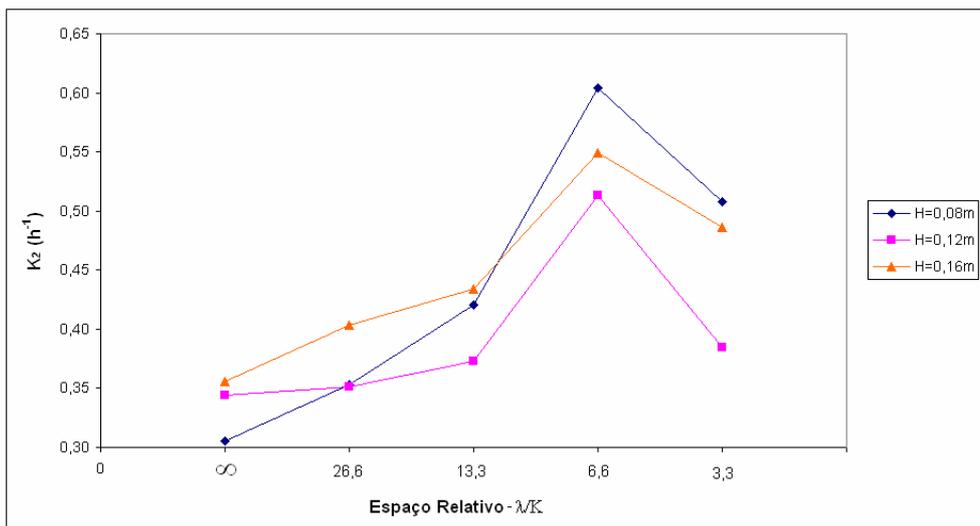


Gráfico 2 - Coeficientes de reaeração (K_2) em função dos espaços relativos (λ/K), para $V = 0,111m/s$.

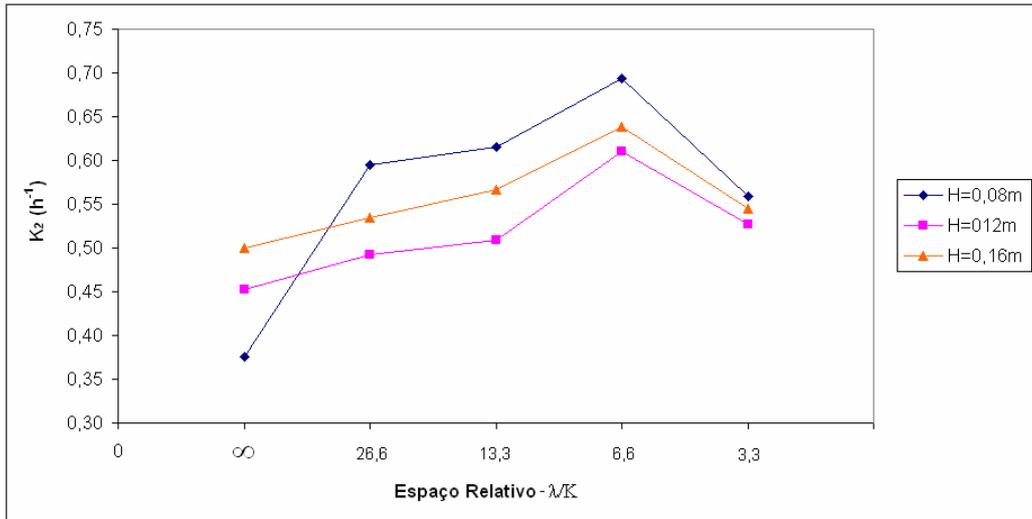


Gráfico 3 - Coeficientes de reaeração (K_2) em função dos espaços relativos (λ/K), para $V = 0,161\text{m/s}$.

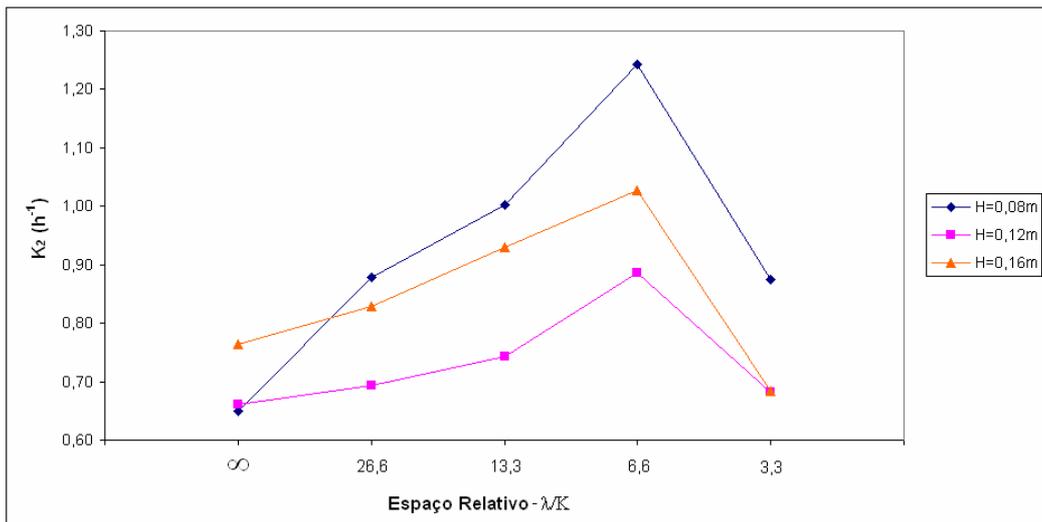


Gráfico 4 - Coeficientes de reaeração (K_2) em função dos espaços relativos (λ/K), para $V = 0,22\text{m/s}$.

Para visualizar os resultados de uma forma global, o Gráfico 5 abaixo foi construído a partir do agrupamento dos valores numéricos de K_2 apresentados nos Gráficos 2, 3 e 4 acima. O agrupamento foi realizado por meio da média aritmética dos valores de K_2 presentes em cada gráfico.

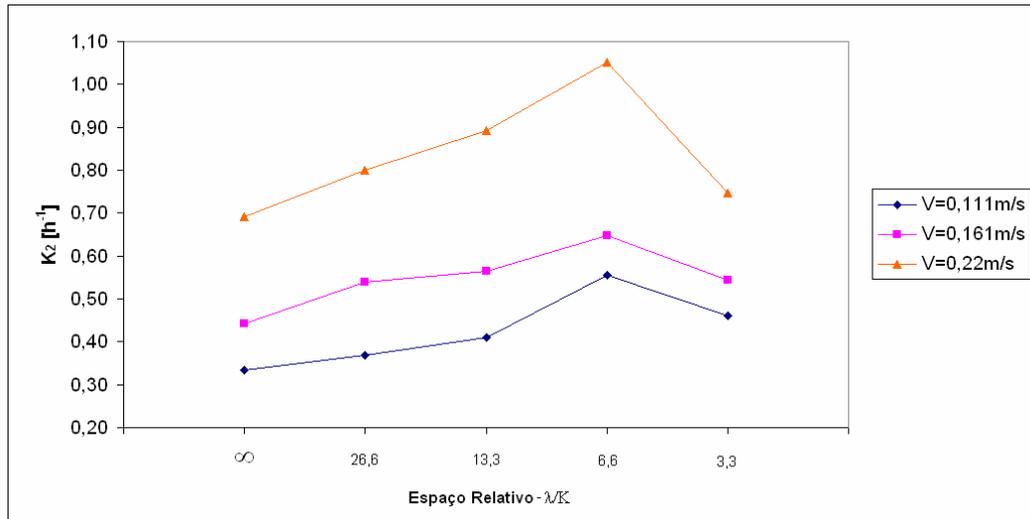


Gráfico 5 – Agrupamento dos coeficientes de reeração (K_2) em função dos espaços relativos (λ/K), para $V = 0,111\text{m/s}$, $0,161\text{m/s}$ e $0,22\text{m/s}$.

Nota-se uma tendência global de aumento progressivo dos valores de K_2 em função das condições de rugosidade com $\lambda = \infty$, 40 cm, 20 cm e 10 cm, seguido de decréscimo dos valores devido à provável ocupação dos espaços entre os elementos rugosos por zonas de recirculação do escoamento, quando $\lambda = 5$ cm.

5.3 Coeficiente de Rugosidade de Manning relativo

Considerando que a fórmula empírica de Manning (Equação 30) é muito utilizada para o dimensionamento de canais hidráulicos, torna-se interessante determinarmos os coeficientes de Manning relativos às condições experimentais realizadas neste trabalho de pesquisa.

$$n = \frac{R_h^{2/3} I_0^{1/2}}{V} \quad (30)$$

Este coeficiente será denominado de coeficiente de Manning relativo (n_r). Os valores desses coeficientes estão apresentados nas Tabelas 6, 7 e 8.

Os valores de n_r determinados de acordo com as características hidráulicas dos escoamentos empregados para a realização dos experimentos desta pesquisa se encontram na faixa de $0,010 \leq n_r \leq 0,072$.

Tabela 6 – Características hidráulicas dos escoamentos e rugosidade de Manning relativa (n_r) ($V = 0,111$ m/s).

V (m/s)	H (m)	λ (cm)	Exp.	I (m/m)	n_r	$\bar{K}_{2,20}$ (h ⁻¹)
0,111	0,08	Liso	1	0,00034	0,021	0,27
			2	0,00034	0,021	0,34
		40	3	0,00100	0,036	0,36
			4	0,00170	0,046	0,35
		20	5	0,00069	0,029	0,40
			6	0,00034	0,021	0,45
		10	7	0,00069	0,029	0,54
			8	0,00034	0,021	0,67
		5	9	0,00069	0,029	0,53
			10	0,00069	0,029	0,48
	0,12	Liso	11	0,00034	0,024	0,34
			12	0,00034	0,024	0,35
		40	13	0,00100	0,041	0,35
			14	0,00069	0,034	0,35
		20	15	0,00069	0,034	0,37
			16	0,00100	0,041	0,38
		10	17	0,00069	0,034	0,47
			18	0,00069	0,034	0,56
		5	19	0,00034	0,024	0,38
			20	0,00034	0,024	0,39
	0,16	Liso	21	0,00034	0,025	0,35
			22	0,00034	0,025	0,36
		40	23	0,00100	0,044	0,41
			24	0,00069	0,036	0,40
		20	25	0,00100	0,044	0,42
			26	0,00069	0,036	0,45
		10	27	0,00069	0,036	0,50
			28	0,00034	0,025	0,60
		5	29	0,00034	0,025	0,49
			30	0,00034	0,025	0,49

* V = velocidade média do escoamento; H = altura da lâmina de água; λ = espaço relativo das macro-rugosidades; Exp. = número do experimento; I = declividade do leito; n_r = rugosidade de Manning relativa; $\bar{K}_{2,20}$ = coeficiente médio de reoxigenação a 20°C.

Tabela 7 – Características hidráulicas dos escoamentos e rugosidade de Manning relativa (n_r) ($V = 0,161$ m/s).

V (m/s)	H (m)	λ (cm)	Exp.	I (m/m)	n_r	$\bar{K}_{2,20}$ (h ⁻¹)
0,161	0,08	Liso	31	0,00034	0,014	0,34
			32	0,00034	0,014	0,41
		40	33	0,00069	0,020	0,59
			34	0,00069	0,020	0,60
		20	35	0,00069	0,020	0,62
			36	0,00100	0,024	0,61
		10	37	0,00069	0,020	0,70
			38	0,00100	0,024	0,69
		5	39	0,00034	0,014	0,53
			40	0,00034	0,014	0,59
	0,12	Liso	41	0,00034	0,016	0,44
			42	0,00034	0,016	0,46
		40	43	0,00069	0,023	0,50
			44	0,00069	0,023	0,49
		20	45	0,00069	0,023	0,52
			46	0,00069	0,023	0,50
		10	47	0,00034	0,016	0,64
			48	0,00034	0,016	0,58
		5	49	0,00034	0,016	0,54
			50	0,00034	0,016	0,52
	0,16	Liso	51	0,00034	0,018	0,53
			52	0,00034	0,018	0,47
		40	53	0,00069	0,025	0,54
			54	0,00069	0,025	0,53
		20	55	0,00069	0,025	0,56
			56	0,00069	0,025	0,58
		10	57	0,00034	0,018	0,58
			58	0,00034	0,018	0,70
		5	59	0,00034	0,018	0,57
			60	0,00034	0,018	0,52

* V = velocidade média do escoamento; H = altura da lâmina de água; λ = espaço relativo das macro-
rugosidades; Exp. = número do experimento; I = declividade do leito; n_r = rugosidade de Manning
relativa; $\bar{K}_{2,20}$ = coeficiente médio de reoxigenação a 20°C.

Tabela 8 – Características hidráulicas dos escoamentos e rugosidade de Manning relativa (n_r) ($V = 0,22$ m/s).

V (m/s)	H (m)	λ (cm)	Exp.	I (m/m)	n_r	$\bar{K}_{2,20}$ (h ⁻¹)	
0,22	0,08	Liso	61	0,00034	0,010	0,64	
			62	0,00034	0,010	0,66	
		40	63	0,00310	0,032	0,88	
			64	0,00310	0,032	0,88	
		20	65	0,00210	0,026	1,03	
			66	0,00210	0,026	0,98	
		10	67	0,00240	0,028	1,42	
			68	0,00240	0,028	1,06	
		5	69	0,00034	0,010	0,97	
			70	0,00034	0,010	0,78	
		0,12	Liso	71	0,00034	0,012	0,64
				72	0,00034	0,012	0,68
			40	73	0,00170	0,027	0,69
				74	0,00170	0,027	0,69
	20		75	0,00140	0,024	0,74	
			76	0,00140	0,024	0,75	
	10		77	0,00170	0,027	0,92	
			78	0,00170	0,027	0,85	
	5		79	0,00034	0,012	0,68	
			80	0,00034	0,012	0,68	
	0,16	Liso	81	0,00034	0,013	0,79	
			82	0,00034	0,013	0,74	
		40	83	0,00100	0,022	0,82	
			84	0,00100	0,022	0,84	
		20	85	0,00100	0,022	0,90	
			86	0,00100	0,022	0,96	
		10	87	0,00069	0,018	1,05	
			88	0,00069	0,018	1,00	
		5	89	0,00034	0,013	0,73	
			90	0,00034	0,013	0,64	

* V = velocidade média do escoamento; H = altura da lâmina de água; λ = espaço relativo das macro-rugosidades; Exp. = número do experimento; I = declividade do leito; n_r = rugosidade de Manning relativa; $\bar{K}_{2,20}$ = coeficiente médio de reoxigenação a 20°C.

Considerando uma tabela típica de valores de n para escoamentos em canais abertos, como os valores apresentados na Tabela 9, pode-se verificar que os experimentos realizados neste trabalho englobaram quase a totalidade dos valores existentes.

Tabela 9 – Valores médios do coeficiente de Manning n para o escoamento da água em canais abertos.

Natureza das paredes	Condições			
	Muito boa	Boa	Regular	Má
Alvenaria de pedra argamassada	0,017	0,020	0,025	0,030
Alvenaria de pedra aparelhada	0,013	0,014	0,015	0,017
Alvenaria de pedra seca	0,025	0,033	0,033	0,035
Alvenaria de tijolos	0,012	0,013	0,015	0,017
Calhas metálicas lisas (semicirculares)	0,011	0,012	0,013	0,015
Canais abertos em rocha (irregular)	0,035	0,040	0,045	-
Canais c/ fundo em terra e talude c/ pedras	0,028	0,030	0,033	0,035
Canais c/ leito pedregoso e talude vegetado	0,025	0,030	0,035	0,040
Canais com revestimento de concreto	0,012	0,014	0,016	0,018
Canais de terra (retilíneos e uniformes)	0,017	0,020	0,023	0,025
Canais dragados	0,025	0,028	0,030	0,033
Condutos de barro (drenagem)	0,011	0,012	0,014	0,017
Condutos de barro vitrificado (esgoto)	0,011	0,013	0,015	0,017
Condutos de prancha de madeira aplainada	0,010	0,012	0,013	0,014
Gabião	0,022	0,030	0,035	-
Superfícies de argamassa de cimento	0,011	0,012	0,013	0,015
Superfícies de cimento alisado	0,010	0,011	0,012	0,013
Tubo de ferro fundido revestido c/ alcatrão	0,011	0,012	0,013	-
Tubo de ferro fundido sem revestimento	0,012	0,013	0,014	0,015
Tubos de bronze ou de vidro	0,009	0,010	0,011	0,013
Tubos de concreto	0,012	0,013	0,015	0,016
Tubos de ferro galvanizado	0,013	0,014	0,015	0,017
Córregos e rios Limpos, retilíneos e uniformes	0,025	0,028	0,030	0,033
Igual anterior porém c/ pedras e vegetação	0,030	0,033	0,035	0,040
Com meandros, bancos e poços, limpos	0,035	0,040	0,045	0,050
Margens espraiadas, pouca vegetação	0,050	0,060	0,070	0,080
Margens espraiadas, muita vegetação	0,075	0,100	0,125	0,150

Fonte: Cirilo, J. A. et al (2003).

5.4 Construção de um modelo de regressão para K_2

5.4.1 Análise dimensional para o coeficiente de reaeração superficial

Para aplicação da análise dimensional procura-se inicialmente fazer a identificação dos parâmetros relevantes no processo. Para o presente caso, como apresentado na seção 3.1.5.2 (Modelos empíricos), o mais adequado seria considerar todos os parâmetros que podem afetar o processo de transferência de massa na interface ar-água, como aqueles presentes na Equação 14.

No entanto, a inclusão de todos esses parâmetros envolveria um esforço operacional e uma necessidade temporal não previsto no cronograma desta pesquisa.

Em vista de tais considerações, para a análise dimensional realizada no presente estudo, foram considerados os parâmetros: velocidade média do escoamento (V); altura da lâmina de água (H); macro-rugosidade do leito, representada pelas características geométricas de altura dos elementos rugosos (e) e distanciamento entre os elementos (λ); aceleração gravitacional (g) e massa específica do fluido em escoamento (ρ).

Assim, tornando-se K_2 como variável dependente, esta deverá ser expressa como uma função do conjunto de variáveis intervenientes:

$$K_2 = f[H, V, e, \lambda, g, \rho] \quad (44)$$

Utilizando-se o Teorema de Buckingham (ou Teorema dos Pi), e tomando-se a dimensões de comprimento, L, de massa, M, e de tempo, T, como fundamentais e independentes para especificação das dimensões dos sete parâmetros envolvidos, tem-se:

$$[K_2] = T^{-1};$$

$$[H] = L;$$

$$[V] = L.T^{-1};$$

$$[e] = L;$$

$$[\lambda] = L;$$

$$[g] = L.T^{-2};$$

$$[\rho] = M.L^{-3}.$$

Como determinado neste teorema, escolhem-se aqui os parâmetros repetitivos (sistema pró-básico).

De acordo com Porto (2006), para melhor consistência física da metodologia, o sistema pró-básico deve ser constituído por uma grandeza cinemática (como a velocidade ou a vazão), uma grandeza dinâmica (como a massa específica) e uma grandeza geométrica característica qualquer.

Para Streeter et al (1997) os termos de menor importância não devem ser selecionados como parâmetros repetitivos.

Verifica-se, portanto, que a escolha dos parâmetros constituintes do sistema pró-básico é arbitrária, sendo significativo neste momento a experiência do pesquisador para o estabelecimento dos critérios de escolha.

Optou-se, desta maneira, por definir dois sistemas pró-básicos, para consequentemente obter dois modelos semi-empíricos de previsão do coeficiente de reaeração.

Para o primeiro sistema pró-básico, escolheu-se como parâmetros repetitivos V, ρ e H (como dimensão característica). Sendo sete os parâmetros dimensionais e três os parâmetros repetitivos, restam quatro grupos adimensionais a determinar, sendo eles π_1 , π_2 , π_3 e π_4 . Escrevendo-se

$$F(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4) = 0 \quad (45)$$

ou

$$\pi_1 = F_1(\pi_2, \pi_3, \pi_4) \quad (46)$$

Pode-se, então, obter os grupos adimensionais:

$$\pi_1 = V^a \rho^b H^c K_2 = (L.T^{-1})^a (M.L^{-3})^b (L)^c (T^{-1}) = M^0 L^0 T^0 \quad (47)$$

Equacionando os expoentes de M, L e T

$$\begin{array}{l} \text{M:} \\ \text{L:} \\ \text{T:} \end{array} \quad \left[\begin{array}{ll} b = 0 & b = 0 \\ a + c = 0 & c = 1 \\ -a - 1 = 0 & a = -1 \end{array} \right.$$

$$\text{Portanto, } \pi_1 = \frac{K_2}{V.H^{-1}} \quad (48)$$

Da mesma forma,

$$\pi_2 = V^d \rho^e H^f e = (L.T^{-1})^d (M.L^{-3})^e (L)^f (L) = M^0 L^0 T^0 \quad (49)$$

Equacionando os expoentes de M, L e T

$$\begin{array}{l} \text{M:} \\ \text{L:} \\ \text{T:} \end{array} \quad \left[\begin{array}{ll} b = 0 & b = 0 \\ a - 3b + c + 1 = 0 & c = -1 \\ -a = 0 & a = 0 \end{array} \right.$$

$$\text{Portanto, } \pi_2 = \frac{e}{H} \quad (50)$$

$$\pi_3 = V^g \rho^h H^i \lambda = (L.T^{-1})^g (M.L^{-3})^h (L)^i (L) = M^0 L^0 T^0 \quad (51)$$

Equacionando os expoentes de M, L e T

$$\begin{array}{l} \text{M:} \\ \text{L:} \\ \text{T:} \end{array} \left(\begin{array}{ll} b = 0 & b = 0 \\ a - 3b + c + 1 = 0 & c = -1 \\ -a = 0 & a = 0 \end{array} \right.$$

$$\text{Portanto, } \pi_3 = \frac{\lambda}{H} \quad (52)$$

$$\pi_4 = V^j \rho^k H^l g = (L.T^{-1})^j (M.L^{-3})^k (L)^l (L.T^{-2}) = M^0 L^0 T^0 \quad (53)$$

Equacionando os expoentes de M, L e T

$$\begin{array}{l} \text{M:} \\ \text{L:} \\ \text{T:} \end{array} \left(\begin{array}{ll} b = 0 & b = 0 \\ a - 3b + c + 1 = 0 & c = 1 \\ -a - 2 = 0 & a = -2 \end{array} \right.$$

$$\text{Portanto, } \pi_4 = \frac{g.H}{V^2} = \frac{V^2}{g.H} = \text{Froude} \quad (54)$$

A relação expressa pela função é:

$$\pi_1 = F_1(\pi_2, \pi_3, \pi_4) = F_1\left(\frac{e}{H}, \frac{\lambda}{H}, \text{Fr}\right) \quad (55)$$

ou

$$\frac{K_2}{V.H^{-1}} = f\left(\frac{e}{H}, \frac{\lambda}{H}, \text{Fr}\right) \quad (56)$$

Para o segundo sistema pró-básico, escolheu-se como parâmetros repetitivos V, ρ e e (como comprimento característico). Sendo sete os parâmetros dimensionais e três os parâmetros repetitivos, restam quatro grupos adimensionais a determinar, sendo eles π_1 , π_2 , π_3 e π_4 .

Seguindo os mesmos procedimentos utilizados para determinação da função F acima, com o sistema pró-básico atual, os grupos adimensionais encontrados foram:

Sendo

$$G(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4) = 0 \quad (57)$$

ou

$$\pi_1 = G_1(\pi_2, \pi_3, \pi_4) \quad (58)$$

Tem-se

$$\pi_1 = \frac{K_2}{V \cdot e^{-1}}; \quad (59)$$

$$\pi_2 = \frac{H}{e}; \quad (60)$$

$$\pi_3 = \frac{\lambda}{e}; \quad (61)$$

$$\pi_4 = \frac{g \cdot e}{V^2} = \frac{V^2}{g \cdot e} = \frac{V}{\sqrt{g \cdot e}} = \text{Froude} .$$

(62)

A relação expressa pela função é:

$$\pi_1 = G_1(\pi_2, \pi_3, \pi_4) = G_1\left(\frac{e}{H}, \frac{\lambda}{H}, \text{Fr}\right) \quad (63)$$

ou

$$\frac{K_2}{V \cdot e^{-1}} = f\left(\frac{H}{e}, \frac{\lambda}{e}, \text{Fr}\right) \quad (64)$$

5.4.2 Análise de regressão

Por meio da técnica de análise de regressão linear multivariada aplicada a um conjunto de dados obtidos nos experimentos realizados no canal hidráulico, foi possível construir dois modelos matemáticos de previsão do coeficiente de reaeração superficial, K_2 .

O primeiro modelo foi obtido a partir da relação definida na Equação 56, onde se tomam como variáveis independentes $\frac{e}{H}$, $\frac{\lambda}{H}$ e Fr, e como variável dependente

$\frac{K_2}{V.H^{-1}}$. Adotando-se o modelo de potência para descrever a relação de dependência entre essas variáveis, tem-se

$$\frac{K_2}{V.H^{-1}} = K \cdot \left(\frac{e}{H}\right)^a \cdot \left(\frac{\lambda}{H}\right)^b (Fr)^c \quad (65)$$

Para aplicação da técnica numérica de regressão linear multivariada, a Equação 65 foi escrita na forma logarítmica

$$\log\left(\frac{K_2}{V.H^{-1}}\right) = \log K + a \cdot \log\left(\frac{e}{H}\right) + b \cdot \log\left(\frac{\lambda}{H}\right) + c \cdot \log(Fr) \quad (66)$$

A qual é do tipo

$$Y = k + a.X + b.Z + c.W \quad (67)$$

Na Tabela 10 estão apresentados os resultados dos cálculos das grandezas adimensionais, realizados com base no conjunto de algumas das variáveis consideradas relevantes para o processo de transferência de massa na interface ar-água, para cada um dos experimentos realizados no canal hidráulico.

A partir da Equação 66 e com base nos dados da Tabela 10, utilizando o software STATISTICA 7.0, foi feita a aplicação da análise numérica de regressão linear múltipla, que produziu os resultados apresentados na Tabela 11.

Tabela 10 – Resultados dos cálculos das grandezas adimensionais.

Exp.	$K_2/V/H$	e/H	λ/H	Froude
1	0,220	0,188	1250,0	0,125
2	0,223	0,188	1250,0	0,125
3	0,254	0,188	500,0	0,125
4	0,252	0,188	500,0	0,125
5	0,303	0,188	250,0	0,125
6	0,303	0,188	250,0	0,125
7	0,435	0,188	125,0	0,125
8	0,432	0,188	125,0	0,125
9	0,366	0,188	62,5	0,125
10	0,368	0,188	62,5	0,125
11	0,372	0,125	833,3	0,102
12	0,368	0,125	833,3	0,102
13	0,379	0,125	333,3	0,102
14	0,378	0,125	333,3	0,102
15	0,403	0,125	166,7	0,102
16	0,400	0,125	166,7	0,102
17	0,554	0,125	83,3	0,102
18	0,551	0,125	83,3	0,102
19	0,416	0,125	41,7	0,102
20	0,411	0,125	41,7	0,102
21	0,512	0,094	625,0	0,089
22	0,519	0,094	625,0	0,089
23	0,582	0,094	250,0	0,089
24	0,577	0,094	250,0	0,089
25	0,626	0,094	125,0	0,089
26	0,620	0,094	125,0	0,089
27	0,792	0,094	62,5	0,089
28	0,793	0,094	62,5	0,089
29	0,701	0,094	31,3	0,089
30	0,706	0,094	31,3	0,089
31	0,186	0,188	1250,0	0,182
32	0,189	0,188	1250,0	0,182
33	0,295	0,188	500,0	0,182
34	0,293	0,188	500,0	0,182
35	0,306	0,188	250,0	0,182
36	0,308	0,188	250,0	0,182
37	0,345	0,188	125,0	0,182
38	0,343	0,188	125,0	0,182
39	0,278	0,188	62,5	0,182
40	0,278	0,188	62,5	0,182
41	0,337	0,125	833,3	0,148
42	0,335	0,125	833,3	0,148
43	0,367	0,125	333,3	0,148
44	0,365	0,125	333,3	0,148
45	0,379	0,125	166,7	0,148
46	0,380	0,125	166,7	0,148
47	0,455	0,125	83,3	0,148
48	0,455	0,125	83,3	0,148
49	0,393	0,125	41,7	0,148
50	0,395	0,125	41,7	0,148
51	0,497	0,094	625,0	0,129
52	0,497	0,094	625,0	0,129
53	0,532	0,094	250,0	0,129
54	0,527	0,094	250,0	0,129
55	0,563	0,094	125,0	0,129
56	0,566	0,094	125,0	0,129
57	0,635	0,094	62,5	0,129
58	0,636	0,094	62,5	0,129
59	0,542	0,094	31,3	0,129
60	0,537	0,094	31,3	0,129
61	0,236	0,188	1250,0	0,248
62	0,236	0,188	1250,0	0,248
63	0,319	0,188	500,0	0,248
64	0,320	0,188	500,0	0,248
65	0,365	0,188	250,0	0,248
66	0,364	0,188	250,0	0,248
67	0,452	0,188	125,0	0,248
68	0,451	0,188	125,0	0,248
69	0,318	0,188	62,5	0,248
70	0,316	0,188	62,5	0,248
71	0,360	0,125	833,3	0,203
72	0,360	0,125	833,3	0,203
73	0,378	0,125	333,3	0,203
74	0,376	0,125	333,3	0,203
75	0,406	0,125	166,7	0,203
76	0,404	0,125	166,7	0,203
77	0,483	0,125	83,3	0,203
78	0,485	0,125	83,3	0,203
79	0,372	0,125	41,7	0,203
80	0,371	0,125	41,7	0,203
81	0,556	0,094	625,0	0,176
82	0,553	0,094	625,0	0,176
83	0,603	0,094	250,0	0,176
84	0,604	0,094	250,0	0,176
85	0,676	0,094	125,0	0,176
86	0,676	0,094	125,0	0,176
87	0,747	0,094	62,5	0,176
88	0,749	0,094	62,5	0,176
89	0,498	0,094	31,3	0,176
90	0,495	0,094	31,3	0,176

Tabela 11 – Resultados da aplicação da regressão linear multivariada para o modelo matemático 1.

Estatística de regressão	
<i>R</i>	0,9431
<i>R-quadrado</i>	0,8895
<i>R-quadrado ajustado</i>	0,8846
<i>S</i>	0,0505
<i>Número total de casos</i>	72
	Coeficientes
Intercepto	-0,6394
a	-0,8348
b	-0,1809
c	0,0259

Na Tabela 11 verifica-se ser 72 o número total de casos analisados pela estatística de regressão. Isso deve-se ao fato de que o modelo de regressão foi aplicado para o conjunto de dados que englobam todos experimentos, exceto àqueles que possuem o distanciamento entre os elementos rugosos (λ) de 5cm. A justificativa para esta determinação é que o modelo que está sendo utilizado é unidimensional, incapaz de determinar o campo de velocidades em toda seção do escoamento e, ainda menos, a formação de zonas de recirculação em trechos à jusante dos elementos rugosos.

Deste modo, se considerados os experimentos com $\lambda = 5\text{cm}$, haverá maior dispersão dos dados quando correlacionarmos os valores do K_2 adimensional do modelo com os valores do K_2 adimensional obtidos experimentalmente (ver relação no Gráfico 6). Ou seja, o coeficiente de determinação (R^2), que mede a proporção da variação da variável dependente (K_2) explicada pelas variáveis independentes, poderá ser menos significativo ao considerarmos a condição de $\lambda = 5\text{cm}$ no modelo de regressão.

A partir da Tabela 11 são obtidos os parâmetros da expressão na forma da Equação 67:

$$\text{Intercepto em } Y, k = -0,6397 \rightarrow K = 10^{-0,6394} = 0,2294$$

$$a = -0,6394$$

$$b = -0,8348$$

$$c = 0,0259$$

Logo, obtém-se o modelo ajustado que se escreve na forma:

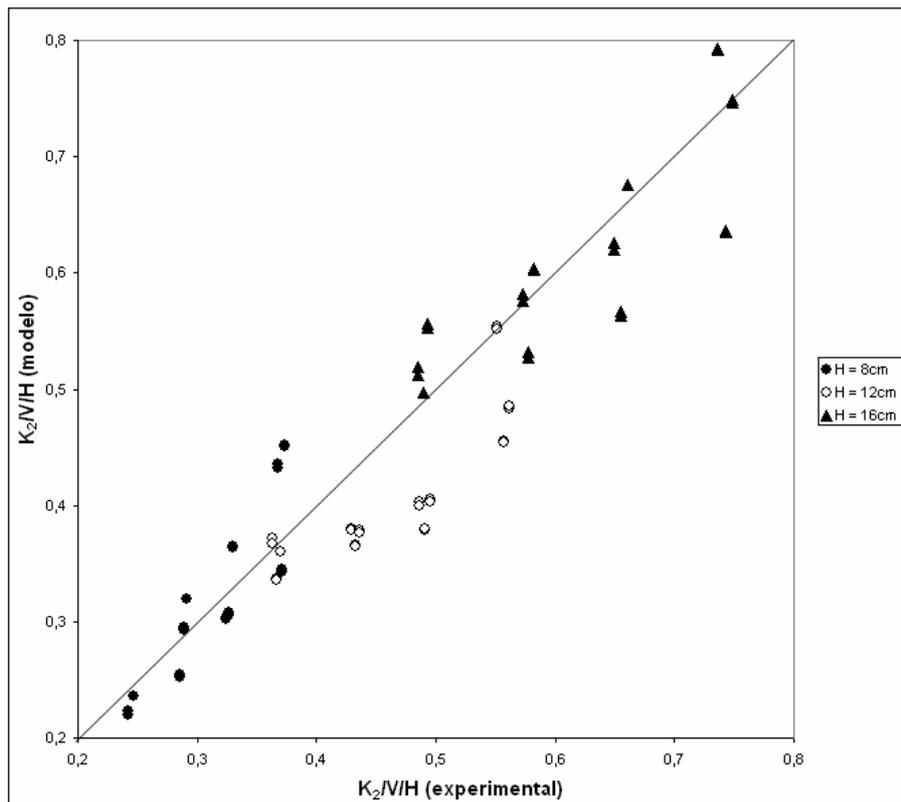
$$\frac{K_2}{V.H^{-1}} = 0,2294 \cdot \left(\frac{e}{H}\right)^{-0,6394} \cdot \left(\frac{\lambda}{H}\right)^{-0,8348} (Fr)^{0,0259} \quad (68)$$

Em termos mais práticos, a expressão pode ser representada por

$$K_2 = \frac{V}{H} \left[0,2294 \cdot \left(\frac{e}{H}\right)^{-0,6394} \cdot \left(\frac{\lambda}{H}\right)^{-0,8348} (Fr)^{0,0259} \right] \quad (69)$$

No Gráfico 6 está apresentada a correlação entre o K_2 adimensional do modelo e os valores de K_2 adimensional obtidos experimentalmente.

Gráfico 6 - Correlação entre K_2 adimensional (modelo e experimental) para o modelo matemático 1.



Pode-se verificar a formação de três principais agrupamentos de dados, sendo que o agrupamento superior refere-se aos experimentos com H=16cm, o intermediário com H=12cm e o inferior com H=8cm.

Para a construção do segundo modelo, foi utilizada a relação definida na Equação 64, em que se consideram as variáveis independentes $\frac{H}{e}$, $\frac{\lambda}{e}$ e Fr, e a variável dependente $\frac{K_2}{V.e^{-1}}$. Adotando-se o modelo de potência para descrever a relação de dependência entre essas variáveis, tem-se

$$\frac{K_2}{V.e^{-1}} = K \cdot \left(\frac{H}{e}\right)^a \cdot \left(\frac{\lambda}{e}\right)^b \cdot (Fr)^c \quad (70)$$

Para aplicação da técnica numérica de regressão linear multivariada, a Equação 70 foi escrita na forma logarítmica

$$\log\left(\frac{K_2}{V.e^{-1}}\right) = \log K + a \cdot \log\left(\frac{H}{e}\right) + b \cdot \log\left(\frac{\lambda}{e}\right) + c \cdot \log(Fr) \quad (71)$$

A qual é do tipo

$$Y = k + a.X + b.Z + c.W \quad (72)$$

Na Tabela 12 estão apresentados os resultados dos cálculos das grandezas adimensionais, realizados com base no conjunto de algumas das variáveis consideradas relevantes para o processo de transferência de massa na interface ar-água, para cada um dos experimentos realizados no canal hidráulico.

A partir da Equação 71 e com base nos dados da Tabela 12, utilizando o software STATISTICA 7.0, foi feita a aplicação da análise numérica de regressão múltipla, que produziu os resultados apresentados conforme a Tabela 13.

Tabela 12 – Resultados dos cálculos das grandezas adimensionais.

Exp.	K_2V/H	H/e	λe	Froude	Exp.	K_2V/H	H/e	λe	Froude
1	0,041	5,333	6666,7	0,290	46	0,048	8,000	1333,3	0,420
2	0,042	5,333	6666,7	0,290	47	0,057	8,000	666,7	0,420
3	0,048	5,333	2666,7	0,290	48	0,057	8,000	666,7	0,420
4	0,047	5,333	2666,7	0,290	49	0,049	8,000	333,3	0,420
5	0,057	5,333	1333,3	0,290	50	0,049	8,000	333,3	0,420
6	0,057	5,333	1333,3	0,290	51	0,047	10,667	6666,7	0,420
7	0,082	5,333	666,7	0,290	52	0,047	10,667	6666,7	0,420
8	0,081	5,333	666,7	0,290	53	0,050	10,667	2666,7	0,420
9	0,069	5,333	333,3	0,290	54	0,049	10,667	2666,7	0,420
10	0,069	5,333	333,3	0,290	55	0,053	10,667	1333,3	0,420
11	0,046	8,000	6666,7	0,290	56	0,053	10,667	1333,3	0,420
12	0,046	8,000	6666,7	0,290	57	0,060	10,667	666,7	0,420
13	0,047	8,000	2666,7	0,290	58	0,060	10,667	666,7	0,420
14	0,047	8,000	2666,7	0,290	59	0,051	10,667	333,3	0,420
15	0,050	8,000	1333,3	0,290	60	0,050	10,667	333,3	0,420
16	0,050	8,000	1333,3	0,290	61	0,044	5,333	6666,7	0,574
17	0,069	8,000	666,7	0,290	62	0,044	5,333	6666,7	0,574
18	0,069	8,000	666,7	0,290	63	0,060	5,333	2666,7	0,574
19	0,052	8,000	333,3	0,290	64	0,060	5,333	2666,7	0,574
20	0,051	8,000	333,3	0,290	65	0,068	5,333	1333,3	0,574
21	0,048	10,667	6666,7	0,290	66	0,068	5,333	1333,3	0,574
22	0,049	10,667	6666,7	0,290	67	0,085	5,333	666,7	0,574
23	0,055	10,667	2666,7	0,290	68	0,085	5,333	666,7	0,574
24	0,054	10,667	2666,7	0,290	69	0,060	5,333	333,3	0,574
25	0,059	10,667	1333,3	0,290	70	0,059	5,333	333,3	0,574
26	0,058	10,667	1333,3	0,290	71	0,045	8,000	6666,7	0,574
27	0,074	10,667	666,7	0,290	72	0,045	8,000	6666,7	0,574
28	0,074	10,667	666,7	0,290	73	0,047	8,000	2666,7	0,574
29	0,066	10,667	333,3	0,290	74	0,047	8,000	2666,7	0,574
30	0,066	10,667	333,3	0,290	75	0,051	8,000	1333,3	0,574
31	0,035	5,333	6666,7	0,420	76	0,050	8,000	1333,3	0,574
32	0,035	5,333	6666,7	0,420	77	0,060	8,000	666,7	0,574
33	0,055	5,333	2666,7	0,420	78	0,061	8,000	666,7	0,574
34	0,055	5,333	2666,7	0,420	79	0,047	8,000	333,3	0,574
35	0,057	5,333	1333,3	0,420	80	0,046	8,000	333,3	0,574
36	0,058	5,333	1333,3	0,420	81	0,052	10,667	6666,7	0,574
37	0,065	5,333	666,7	0,420	82	0,052	10,667	6666,7	0,574
38	0,064	5,333	666,7	0,420	83	0,057	10,667	2666,7	0,574
39	0,052	5,333	333,3	0,420	84	0,057	10,667	2666,7	0,574
40	0,052	5,333	333,3	0,420	85	0,063	10,667	1333,3	0,574
41	0,042	8,000	6666,7	0,420	86	0,063	10,667	1333,3	0,574
42	0,042	8,000	6666,7	0,420	87	0,070	10,667	666,7	0,574
43	0,046	8,000	2666,7	0,420	88	0,070	10,667	666,7	0,574
44	0,046	8,000	2666,7	0,420	89	0,047	10,667	333,3	0,574
45	0,047	8,000	1333,3	0,420	90	0,046	10,667	333,3	0,574

Tabela 13 – Resultados da aplicação da regressão linear multivariada para o modelo matemático 2.

Estatística de regressão	
<i>R</i>	0,8072
<i>R-quadrado</i>	0,6517
<i>R-quadrado ajustado</i>	0,6363
<i>S</i>	0,5005
<i>Número total de casos</i>	72
	Coefficientes
Intercepto	-0,6394
a	-0,0102
b	-0,1809
c	0,0259

A partir da Tabela 13 são obtidos os parâmetros da expressão na forma da Equação 72:

$$\text{Intercepto em Y, } k = -0,683 \rightarrow K = 10^{-0,6394} = 0,2294$$

$$a = -0,0102$$

$$b = -0,1809$$

$$c = 0,0259$$

Logo, obtém-se o modelo ajustado que se escreve na forma:

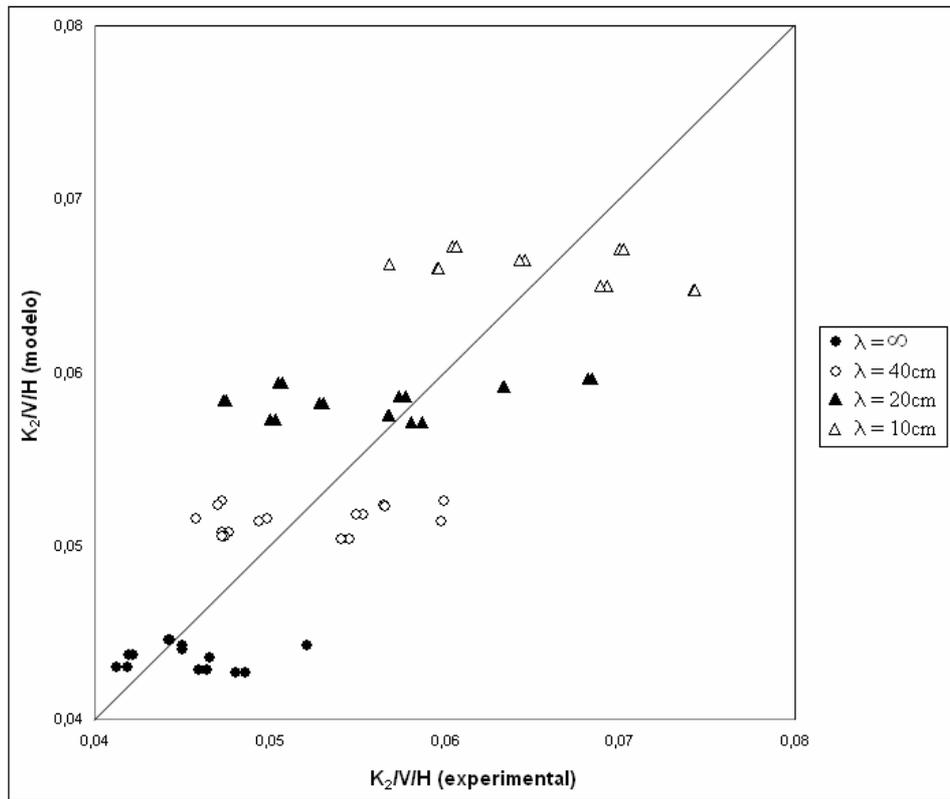
$$\frac{K_2}{V \cdot e^{-1}} = 0,2294 \cdot \left(\frac{H}{e}\right)^{-0,0102} \cdot \left(\frac{\lambda}{e}\right)^{-0,1809} (\text{Fr})^{0,0259} \quad (73)$$

Em termos mais práticos, a expressão pode ser representada por

$$K_2 = \frac{V}{e} \left[0,2294 \cdot \left(\frac{H}{e}\right)^{-0,0102} \cdot \left(\frac{\lambda}{e}\right)^{-0,1809} (\text{Fr})^{0,0259} \right] \quad (74)$$

No Gráfico 7 está apresentada a correlação entre o K_2 adimensional do modelo e os valores de K_2 adimensional obtidos experimentalmente.

Gráfico 7 - Correlação entre K_2 adimensional (modelo e experimental) para o modelo matemático 2.



Verifica-se que na correlação entre o K_2 adimensional do modelo e o K_2 adimensional dos experimentos para o modelo matemático 2, houve agrupamento de dados com relação ao distanciamento entre os elementos rugosos (λ). Considerando-se as extremidades dos dados de correlação, os agrupamentos inferiores apresentados no Gráfico 7 se referem aos valores de $\lambda = \infty$, e os agrupamentos localizados na região superior do gráfico se referem aos valores de $\lambda = 10\text{cm}$. Comparando com o modelo matemático 1, a análise de regressão demonstrou que para este modelo (modelo matemático 2) houve diminuição do coeficiente de determinação (R^2), havendo maior dispersão dos dados.

Na forma das Equações 69 e 74, se consideradas as incertezas devido à dispersão demonstrada pelo coeficiente R^2 , as expressões podem ser úteis para a realização de previsões do coeficiente de reaeração superficial de cursos de água sobre canais artificiais que tenham características hidráulicas e físicas semelhantes àqueles estudados neste trabalho.

6 CONCLUSÕES

Algumas considerações com relação à revisão bibliográfica podem ser realizadas. Pode-se verificar que este estudo englobou elementos de duas grandes áreas da engenharia, sendo elas: a área de Hidráulica, por se tratar de observações realizadas em escoamentos de uma massa fluida sobre um canal hidráulico; e a área de Fenômenos de Transporte, por se tratar de aspectos que influenciam na transferência de massa de determinadas moléculas (O_2) na interface entre a atmosfera e o fluido em escoamento. Foi necessário, portanto a integração prática de conhecimentos presentes nessas áreas, o que tornou as investigações realizadas neste estudo bastante dinâmicas.

Os estudos experimentais demonstraram que os efeitos dos parâmetros profundidade da lâmina de água, velocidade do escoamento e rugosidade do leito do canal são significativos sobre o coeficiente de reaeração superficial. Diferentes condições estabelecidas nos escoamentos a partir destes três parâmetros, afetam diferentemente o processo de transferência de massa na interface ar-água.

A partir dos resultados ficou evidente que os valores do coeficiente de reaeração superficial são controlados de forma significativa pela tensão de cisalhamento existente entre o fluido e o leito do canal.

Além dos efeitos das macro-rugosidades, ficou claro o efeito da velocidade do escoamento sobre K_2 . A análise interativa entre os parâmetros velocidade, profundidade e rugosidade deve ser considerada ao analisar os níveis de turbulência de corpos de água que fluem em canais artificiais e naturais. Tomando-se como referência os 14 diferentes parâmetros considerados importantes para estudos de reoxigenação (apresentados na seção **3.1.5.2 Modelos empíricos**) estes três parâmetros (velocidade, profundidade e rugosidade) estão entre os principais a serem considerados.

Considerada a importância prática de se conhecer um modelo de previsão do K_2 para corpos de água, foram desenvolvidos neste trabalho dois modelos matemáticos de natureza semi-empírica para a previsão deste coeficiente (modelo de regressão multivariada), os quais incorporam as variáveis hidrodinâmicas e geométricas relevantes no processo de transferência de massa na interface ar-água.

Ressalta-se que os usos desses modelos devem-se limitar aos escoamentos com características hidrodinâmicas e geométricas semelhantes àsquelas estabelecidas nos experimentos desta pesquisa. Além de sua importância prática, os modelos desenvolvidos podem ser utilizados de forma comparativa com relação à modelos que

venham a ser desenvolvidos em canais hidráulicos semelhantes ao utilizado neste trabalho. Neste contexto, seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

Sugere-se que seja investigada a influência de macro-rugosidades sobre o processo de transferência de massa na interface ar-água a partir de elementos rugosos com diferentes geometrias daquelas utilizadas neste trabalho, além de diferentes arranjos espaciais dos elementos no decorrer do leito da calha.

Considerando que em todos os experimentos realizados neste trabalho houve um aumento progressivo dos valores de K_2 em função das condições de rugosidade com $\lambda = \infty$, 40 cm, 20 cm e 10 cm, seguido de decréscimo dos valores quando $\lambda = 5$ cm; sugere-se a realização de experimentos na faixa de $0\text{cm} \leq \lambda \leq 5\text{cm}$, com várias discretizações λ nesta faixa de valores, para verificar se o decréscimo também será progressivo ou, de certo modo, imprevisível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERS, P. (1958). Resistance of fluids flowing in channels and pipes. **Hydraulics Research Paper**. London: Her Majesty's Stationary Office, 39p.

ADENEY, W. E. & BECKER, H. G. (1919). The determination of the rate of solution of atmospheric nitrogen and oxygen by water. Part I. **Philosophical Magazine**, s. 6, v. 38, n. 225. p. 317-337, September.

ASCE (1992). **ASCE Standard - Measurement of oxygen transfer in clear water**. ANSI-ASCE 2-91, 2ª Edição.

BARBOSA Jr, A. R. (1989). **Desenvolvimento de metodologia para a determinação do coeficiente de reaeração dos escoamentos naturais da água com o emprego de traçador gasoso**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

BARBOSA, A. R. (1997). **Uso de traçadores na determinação de parâmetros de qualidade em escoamentos naturais da água**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

BENNET, J. P. & RATHBUN R. E. (1972). **Reaeration in Open-Channel Flow**. U.S. Geological Survey Professional Paper, 73.

BICUDO, J. R.; SCHULZ, H. E. & GIORGETTI, M. F. (1990). **O uso de procedimentos empíricos para a correção dos efeitos de parede em canais com rugosidade não-homogênea: aspectos de dissipação de energia e transferência de massa**. In: XIV Congresso Latino-Americano de Hidráulica, Montevideo-Uruguay, p.109-120, 1990.

BICUDO, J. R. & GIORGETTI, M. F. (1991). The effect of strip bed roughness on the reaeration rate coefficient. **Water Science and Technology**, Kyoto, v. 23, p.1929-1939.

BRUMLEY, B. & JIRKA, G. (1988) Air-water Transfer of Slightly Soluble Gases: Turbulence, Interfacial Processes and Conceptual Models. **Physicochemical Hydrodynamics**, 10, 3, pp 295-319.

CARREIRA, M. F. (1995). **Relação entre o coeficiente de absorção de massa k_l e parâmetros de turbulência superficial obtidos por método óptico**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

CARVALHO, G. S. de (1995). **Determinação do coeficiente de transferência gasosa de hidrocarbonetos e sua relação com o coeficiente de reaeração**. Dissertação

(Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: McGraw-Hill, 2007.

CHAPRA, S. C. (1997). **Surface water quality modeling**. McGraw-Hill.

CHOW, V. T. (1959). **Open-Channel Hydraulics**. McGraw-Hill Kogakusha, 1959, 680p.

CIRILO, J. A., et al (2003) **Hidráulica aplicada**. 2ª ed. rev. ampl. Porto Alegre: ABRH, 2003.

COSTA, O. S. (1992). **Análise do efeito da umidade atmosférica sobre o coeficiente de reoxigenação**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.

COSTA, O. S. (1999). **Contribuição à metodologia para determinação indireta do coeficiente de reaeração dos escoamentos naturais de água com emprego do método da sonda solúvel**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

DANCKWERTS, P. V. (1951). Significance of liquid-film coefficients in gas absorption. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 43, n. 6, p. 1460-1467.

DEFRA/EA, Department for Environment, Food & Rural Affairs/Environment Agency of United Kingdom (2003). **Reducing uncertainty in river flood conveyance: Roughness Review**. Project W5A-057. Disponível em: <<http://www.river-conveyance.net/>>. Acesso em: 16 nov. 2009.

EPA, United States Environmental Protection Agency (1985). **Rates, constants and kinetics formulations in surface water quality modeling**. 2ª ed. Athens, 455p.

FISCHER, et al (1979). **Mixing in Inland and Coastal Waters**. Academic, New York.

GIORGETTI, M. F. (2008). **Fundamentos de fenômenos de transporte para estudantes de engenharia**. São Carlos: Suprema.

GIORGETTI, M. F., et al. (1995). **Preliminary tests for measuring reaeration rate coefficient using sodium chloride monocrystals**. Unpublished report of the Department of Civil Engineering, University of New Castle upon Tyne.

GIORGETTI, M. F. & SCHULZ, H. E. (1990). **Sobre o método da sonda solúvel flutuante para a determinação indireta do coeficiente de reoxigenação superficial em corpos d'água**. In: III ENCIT, Itapema-SC, 1990.

GONÇALVES, J.C.S.I. (2009). **Desenvolvimento de modelo numérico para simulação da qualidade da água em rios utilizando o software Vensim PLE®**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

GUALTIERI, C.; GUALTIERI P. & DORIA G.P. (2002). Dimensional analysis of reaeration rate in streams. **Journal of Environmental Engineering**, p. 12-18, jan.

HERLINA (2005). **Gas transfer at the air-water interface in a turbulent flow environment**. Doctoral Thesis, Institute for Hydromechanics, University of Karlsruhe, University Press ISBN 3-937300-74-0.

HERLINA & JIRKA, G. H. (2004). Application of LIF to investigate gas transfer near the air-water interface in a grid-stirred tank. **Experiments in Fluids**, Vol. 37, pp. 341-349.

HICKS, D. M., & MASON, P. D. (1991). Roughness characteristics of New Zealand Rivers. **Water Resources Survey**, Kilbirnie, Wellington, New Zealand.

JIRKA, G. H. (1991). Gas transfer processes at the air/water interface. **Proc., Envir. Hydr.**, J. H. W. Lee and Y. K. Cheung, eds., Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

KNIGHT, D. W. & MACDONALD, J. A. (1979). Hydraulic resistance of artificial strip roughness. **Journal of the Hydraulics Division**, HY6, p. 675-690, jun.

KRENKEL, P. A. & ORLOB, G. T. (1962). Turbulent diffusion and the reaeration coefficient. **Journal of Sanitary Engineering Division**, American Society of Civil Engineers, 88 (2), 53-83.

LEVINE, D. M. et al. **Estatística: teoria e aplicações**. Tradução Teresa Cristina P. S. – Rio de Janeiro: LTC, 2008. 5ª Ed. + CD-ROM.

LEWIS, W. K. & WHITMAN, W. E. (1924). Principles of gas absorption. Absorption Symposium. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 16, n. 12, p. 1215-1220, December.

MAIA, G. N. (2003). **Análise dos parâmetros cinéticos no fenômeno da reoxigenação e desoxigenação da água**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

MARINS, J. R. S. (2003). **Hidrodinâmica das macro-rugosidades de fundo em canais**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, 2003.

MELCHING, C. S. & FLORES, H. E. (1999). Reaeration Equations Derived from USGS Data Base. **Journal of Environmental Engineering**, ASCE, 125(5), 407-414.

MELLO, E. D. (1996). **Sistema óptico para avaliação do coeficiente de reaeração superficial em corpos d'água**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

MOOG, D. B. (1995). **Stream reaeration and the effects of large-scale roughness and bedforms**. PhD thesis, Cornell Univ., Ithaca, New York.

MOOG, D. B. & JIRKA, G. H. (1995). Macro-roughness effects on stream reaeration. **Air-Water Gas Transfer**, pp. 89-99.

MOOG, D. B. & JIRKA, G. H. (1999). Stream reaeration in non-uniform channel flow: Macro-roughness enhancement. **Journal Hydraulic Engineering**, 125 (1), pp. 11-16.

MOOG, D. B. & JIRKA, G. H. (2002). Air-water gas transfer in uniform flows with large gravel-bed roughness. **Geophysical Monograph** 127, Gas Transfer at Water Surfaces, pp. 371-376.

NAKAGAWA, H., NEZU, I., & UEDA, H. (1975). Turbulence of open-channel flow over smooth and rough beds. **Proc., Japan Soc. Civil Eng.**, 241, 155–168.

OLIVEIRA, F. C. (1996). **Estudo da influencia da umidade atmosférica sobre o coeficiente de reaeração superficial**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

PORTO, R. M. (2006). **Hidráulica Básica**. 4. ed. rev. São Carlos: EESC-USP.

RODRIGUES, I. C. (1996). **Determinação do coeficiente de reaeração superficial de um corpo d'água com o uso de sondas solúveis esféricas**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

ROMA, W. N. L. (1988). **Medida dos parâmetros de turbulência superficial e sua inter-relação com o coeficiente de reaeração**. Tese (Livre Docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1988.

SAYRE W. W. & ALBERTSON M. L. (1961). Roughness spacing in rigid open channels. **Jounal f Hydraulics Division**, ASCE, v. 879, Ser. HY, n. 3, p. 343-427, May, 1961.

SCHULZ, H. E. (1985). **Investigação do mecanismo de reoxigenação da água em escoamento e sua correlação com o nível de turbulência junto à superfície**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1985.

SCHULZ, H. E. (1989). **Investigação do mecanismo de reoxigenação da água em escoamento e sua correlação com o nível de turbulência junto à superfície**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

SILVEIRA, A. (2004). **Influência da umidade atmosférica sobre o mecanismo de transferência de gases através da interface água-atmosfera**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

SMOOT, J. L. (1988). **An examination of stream reaeration coefficients and hydraulic conditions in a pool-and-riffle stream**. PhD thesis, Virginia Polytechnic Inst. and State Univ., Blacksburg, Va.

STENSTRON, M. K. & LEU, P. J. (2006). **Theory to Practice: Oxygen transfer and the new ASCE Standard**. In: 79th WEFtec Conference, Dallas, TX, October 25, 2006.

STREETER, V. L., WYLIE, E. B., BEDFORD, K. W. (1997). **Fluid Mechanics**. 9th edition, McGraw-Hill Higher Education; ISBN: 0070625379

SZÉLIGA, M. R. (2003). **Sistema óptico baseado em visão computacional para obtenção de níveis de turbulência na superfície de escoamentos livres com aplicação na determinação de parâmetros relacionados com a reoxigenação do meio líquido**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

TSENG, M. T., YOUNG, G. K., & CHILDREY, M. R. (1974). **Evaluation of flood risk factors in the design of highway stream crossings**. Vol. 1. Experimental determination of channel resistance for large scale roughness. Rep. No. FHWA-RD-75-51, National Technical Information Service, Springfield, Va.

VON SPERLING, M. (2007). **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; UFMG.

APÊNDICE

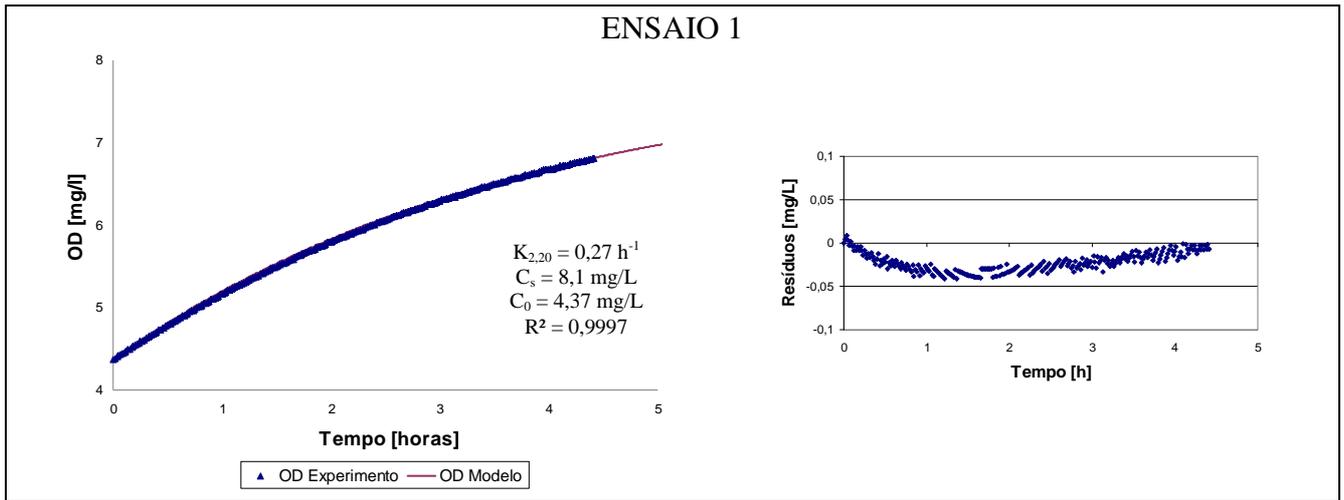


Figura A1 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

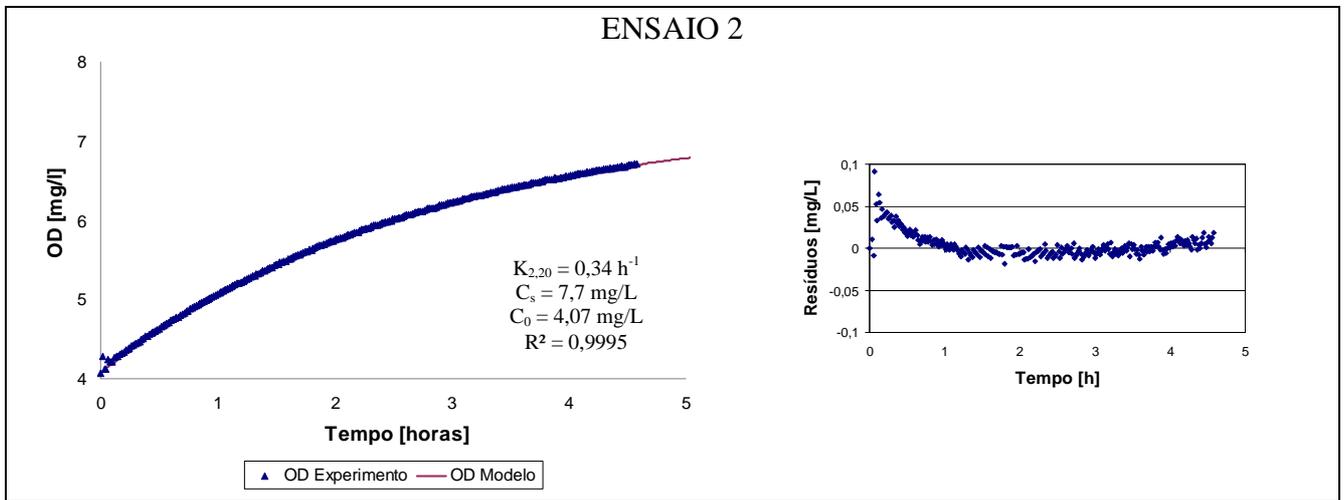


Figura A2 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

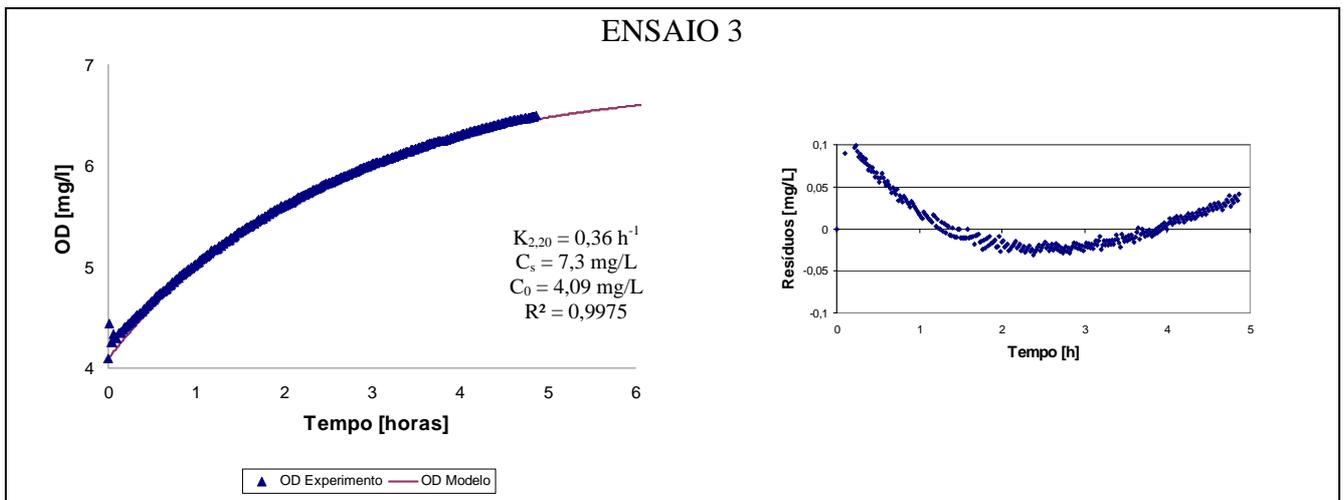


Figura A3 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

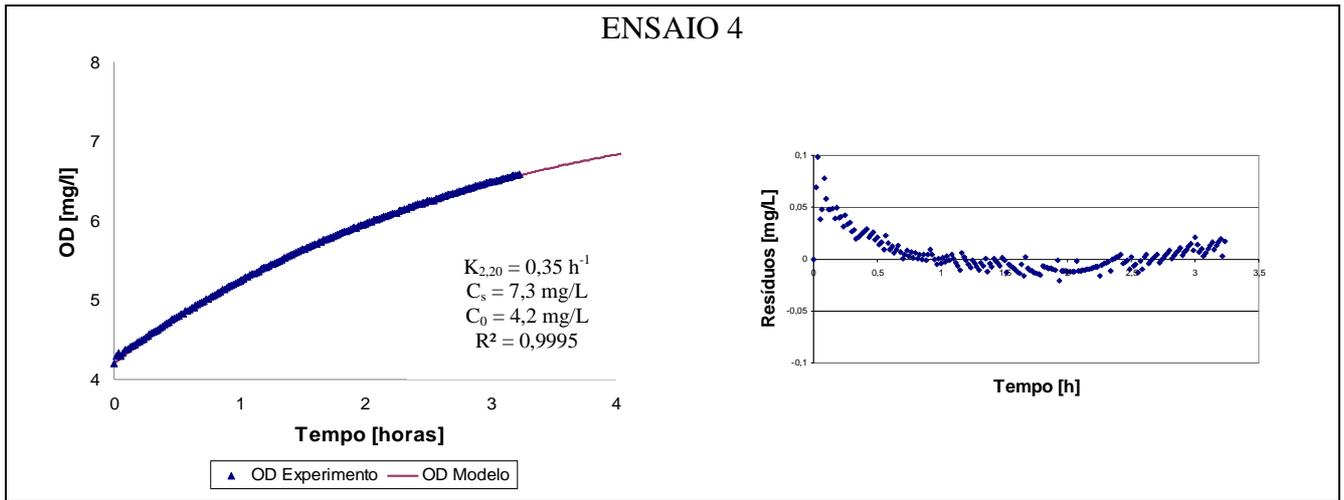


Figura A4 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

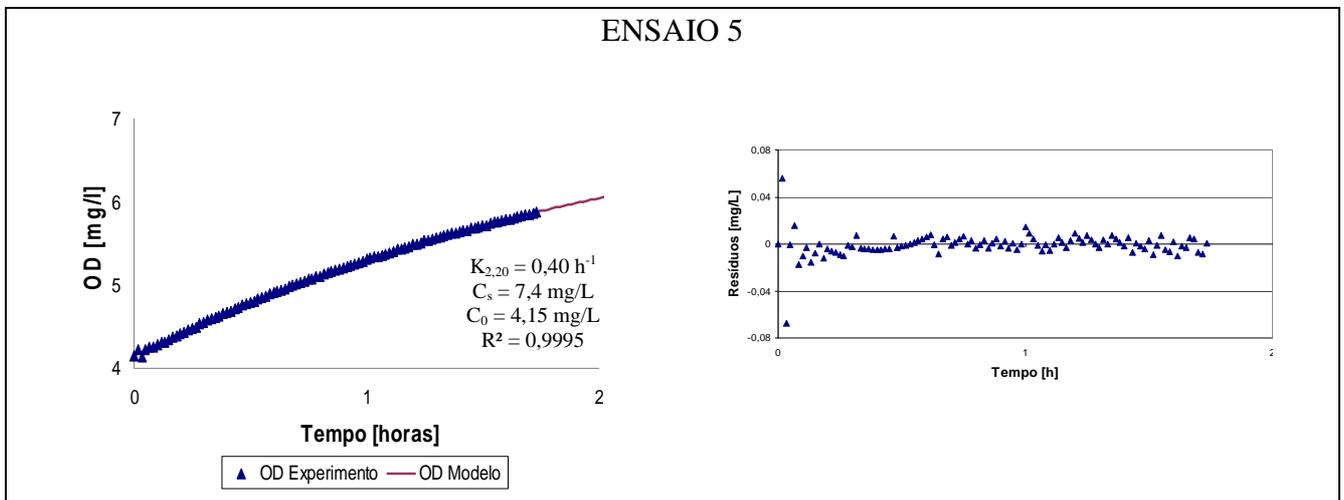


Figura A5 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

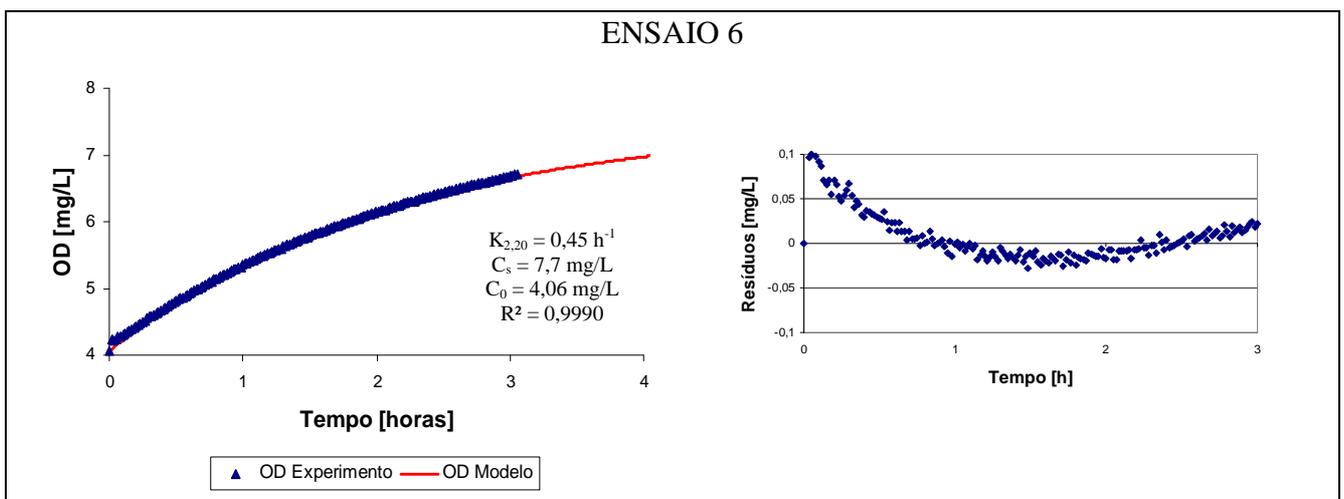


Figura A6 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

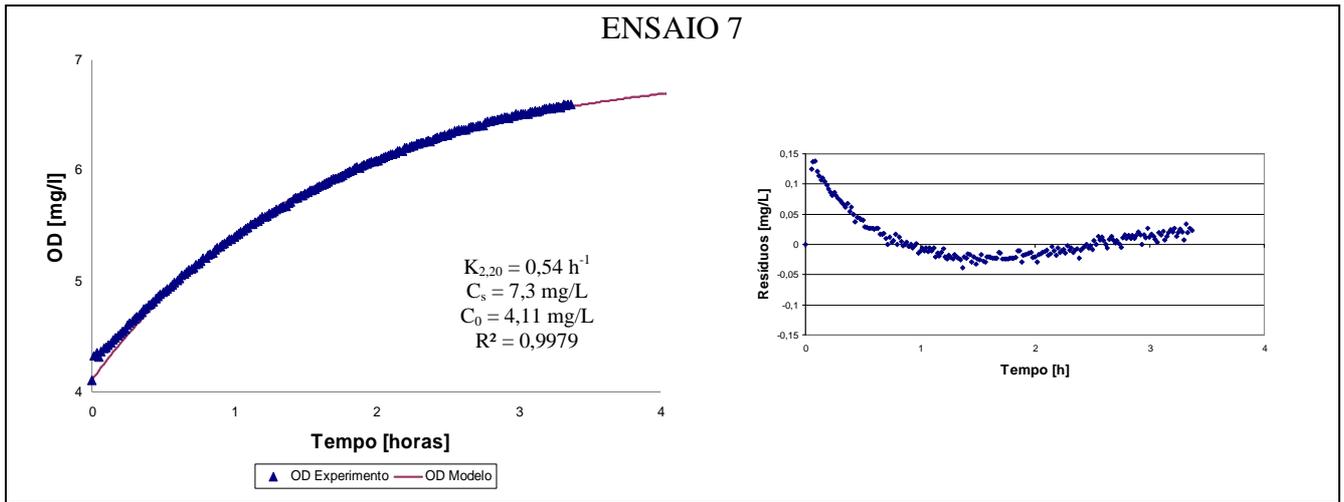


Figura A7 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

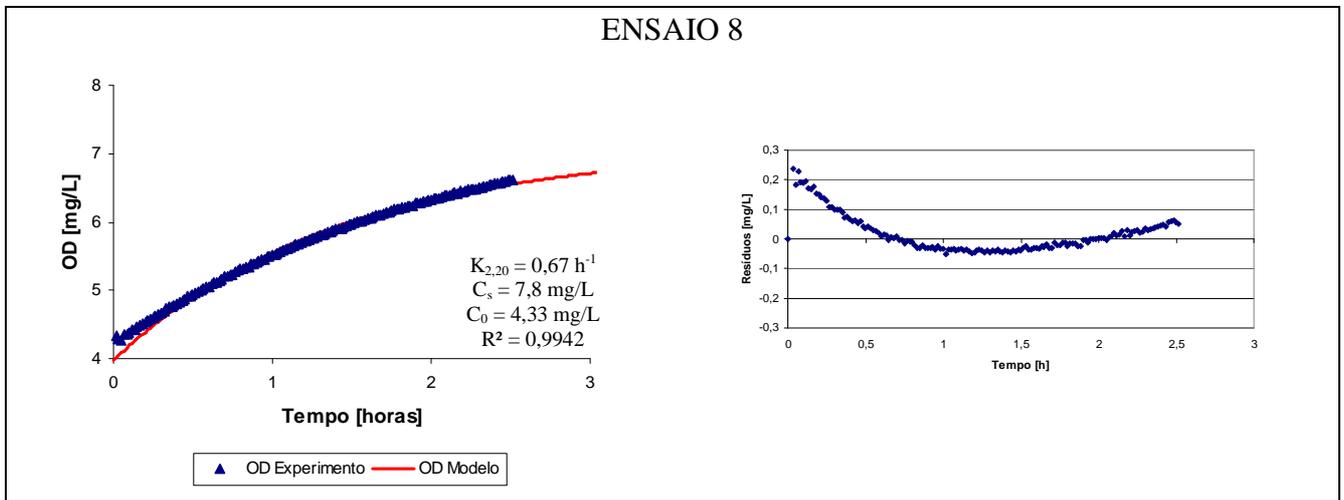


Figura A8 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

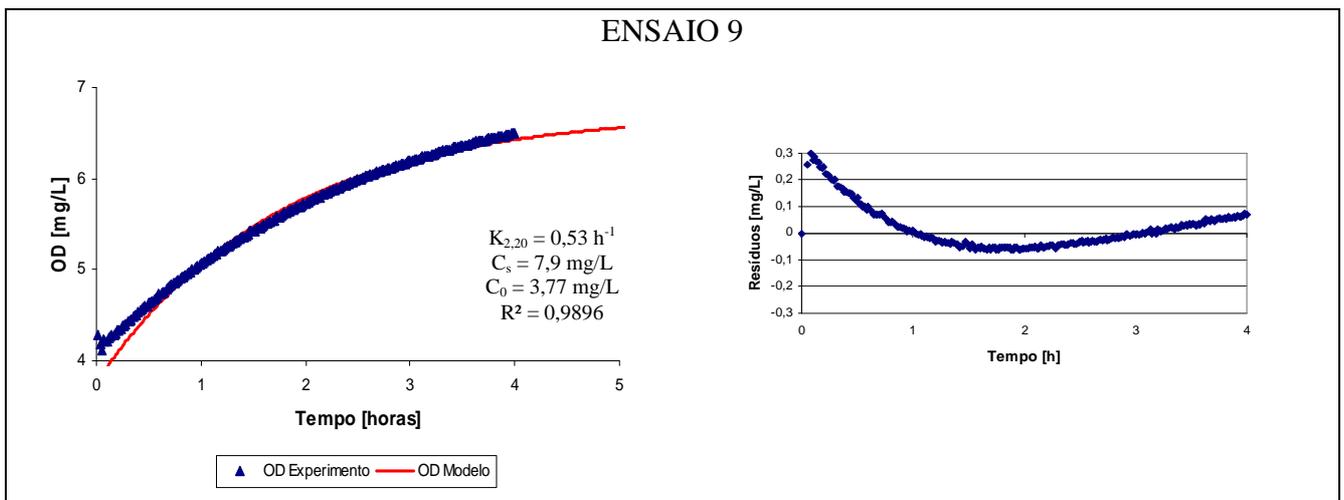


Figura A9 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

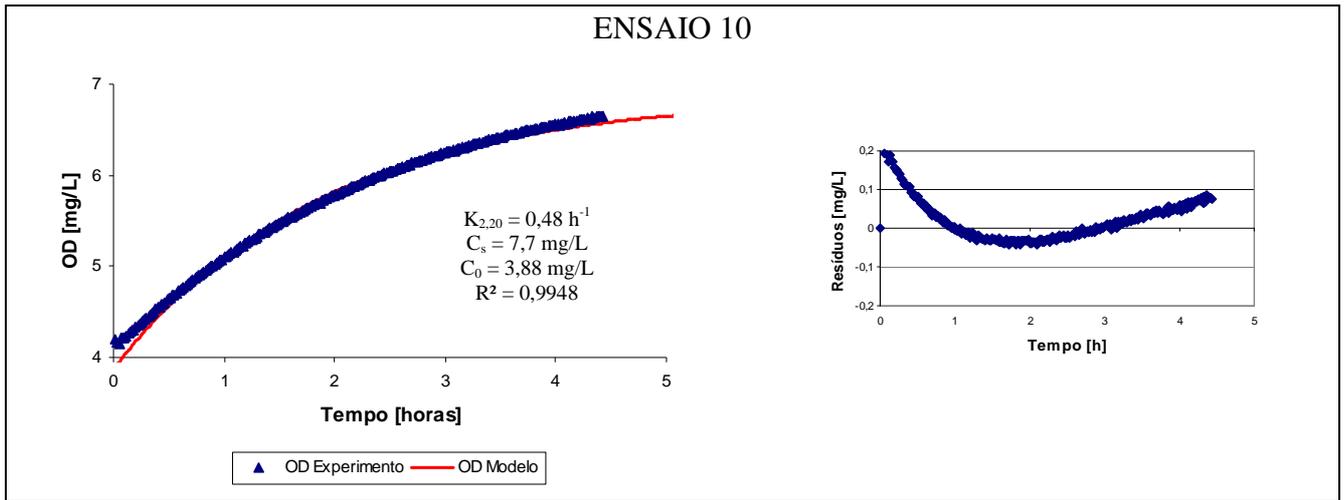


Figura A10 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

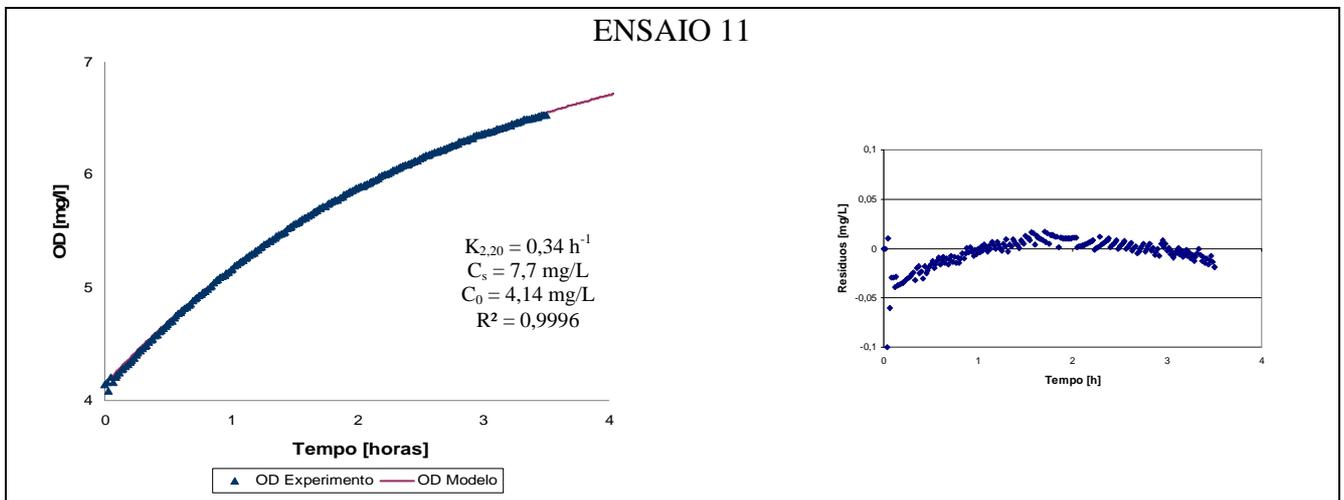


Figura A11 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

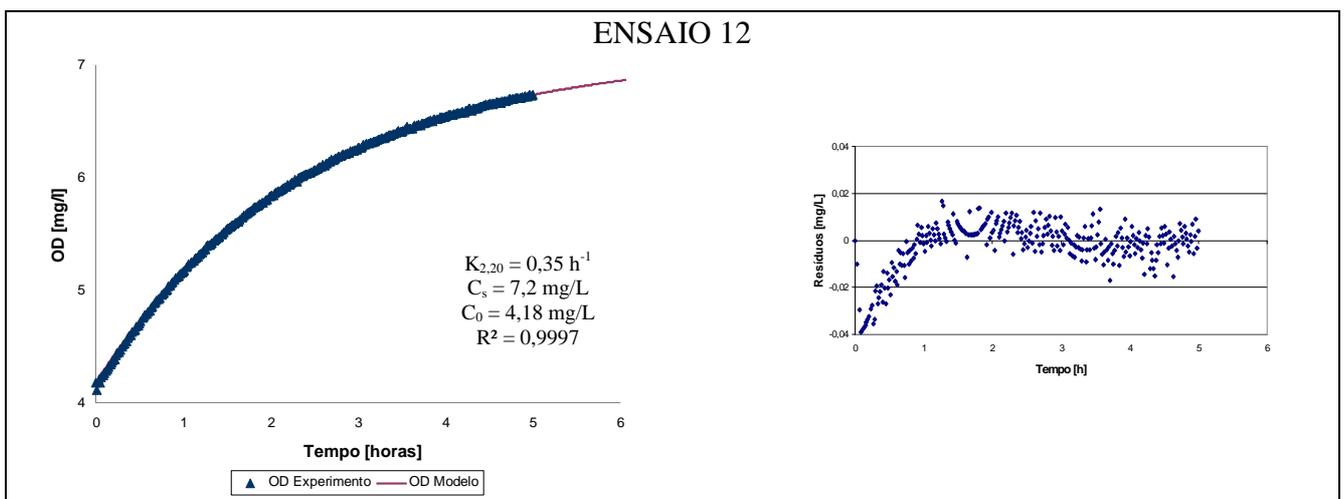


Figura A12 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

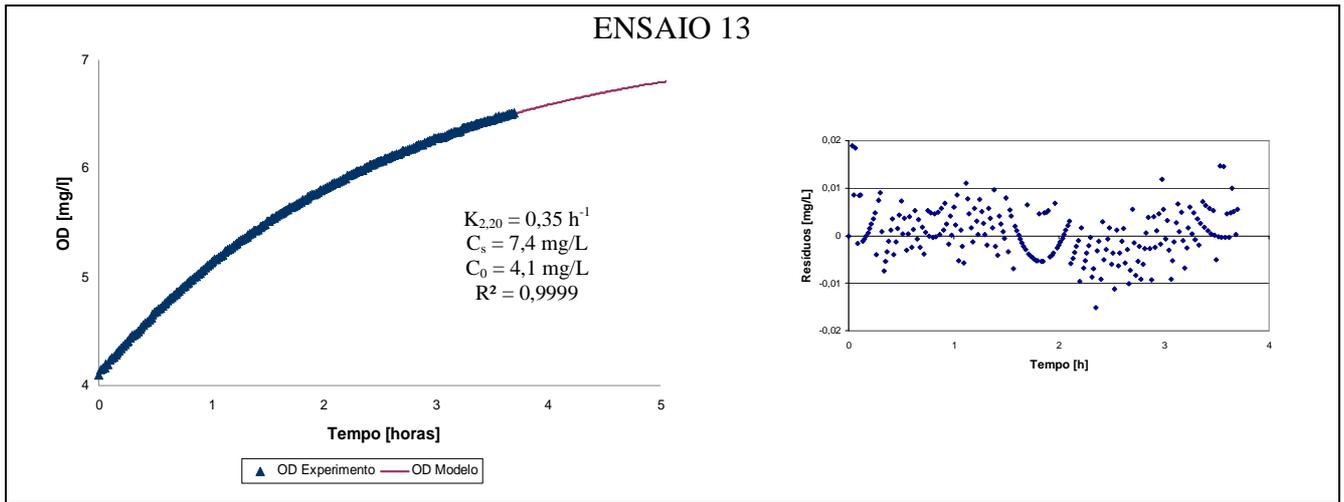


Figura A13 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

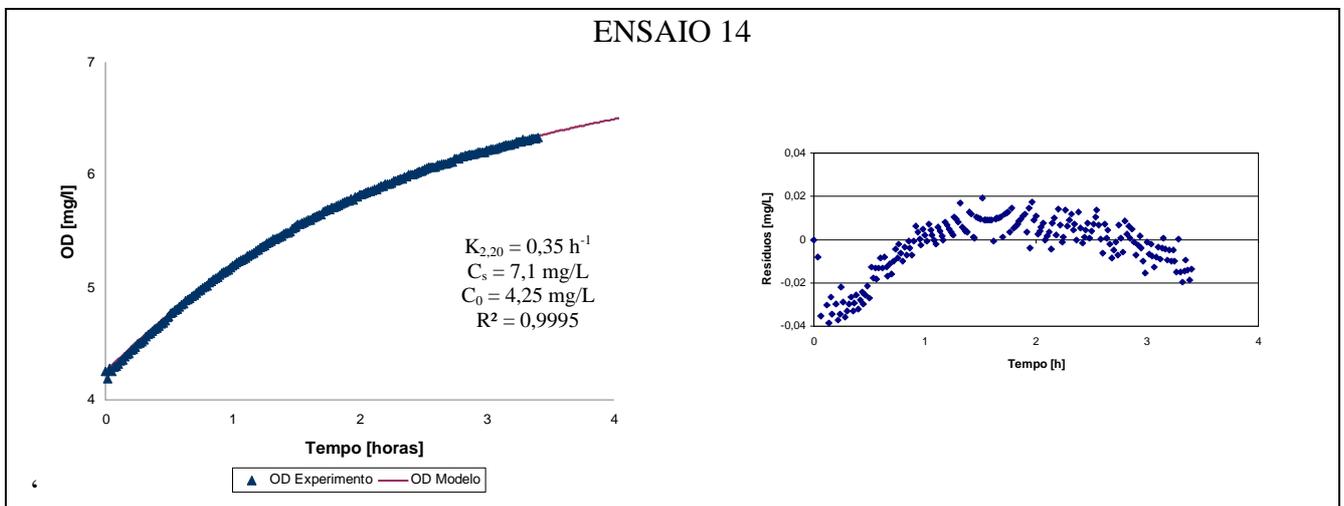


Figura A14 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

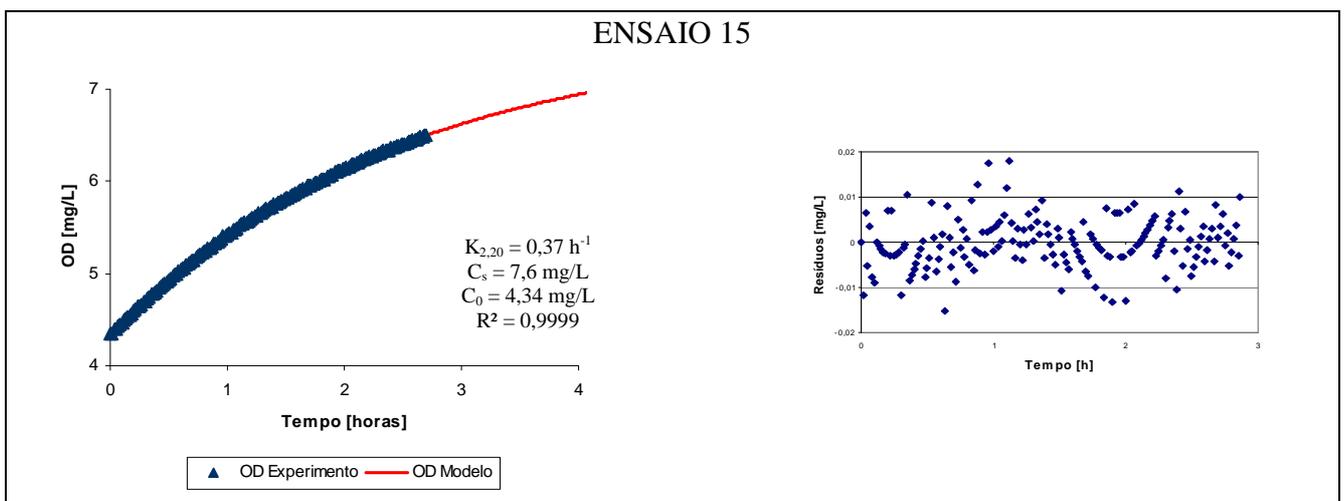


Figura A15 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

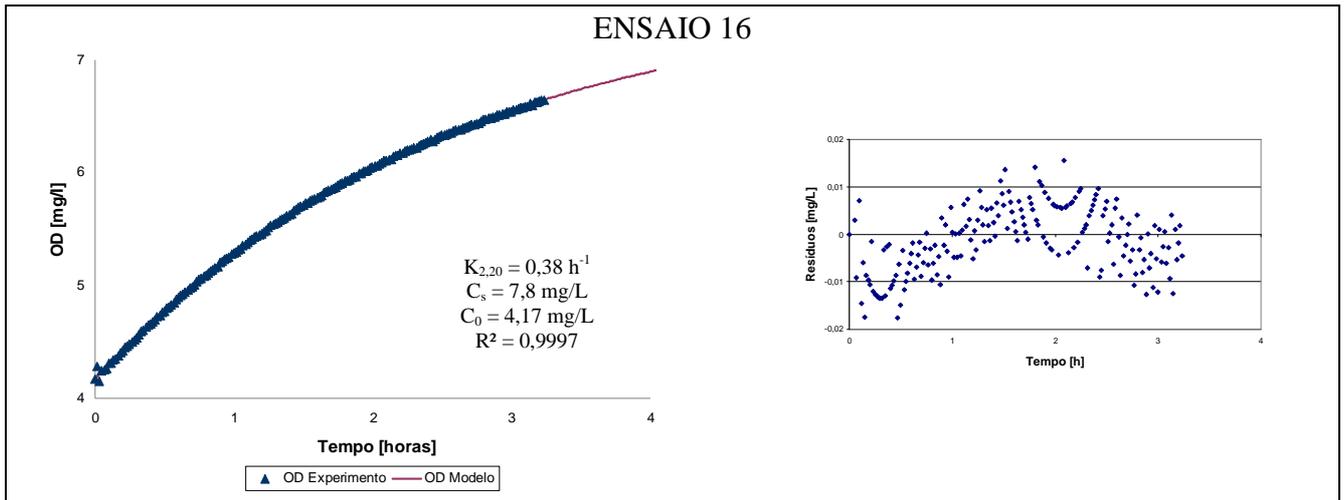


Figura A16 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

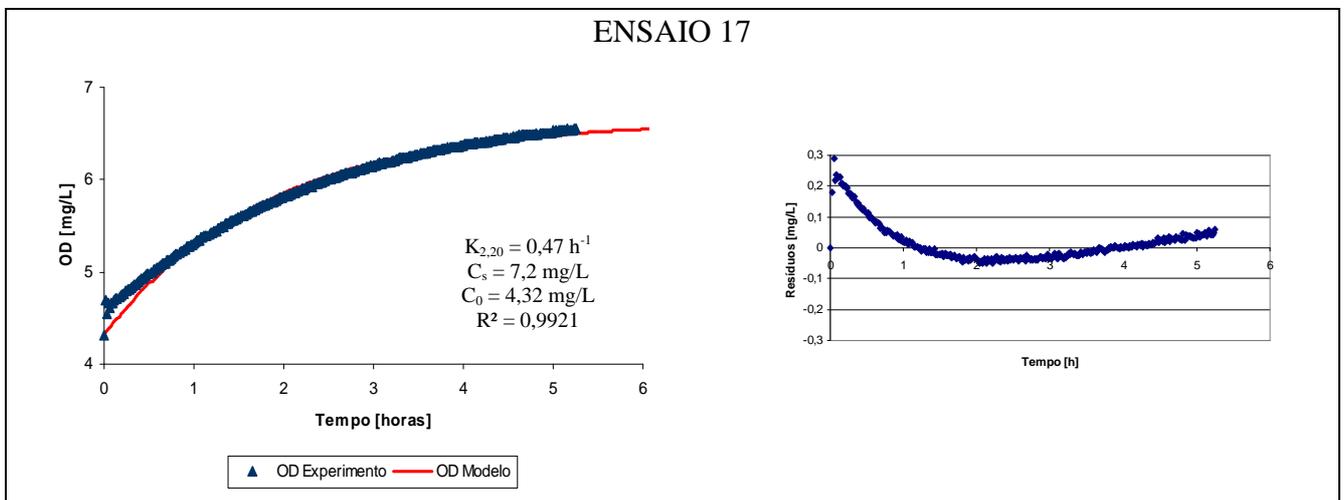


Figura A17 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

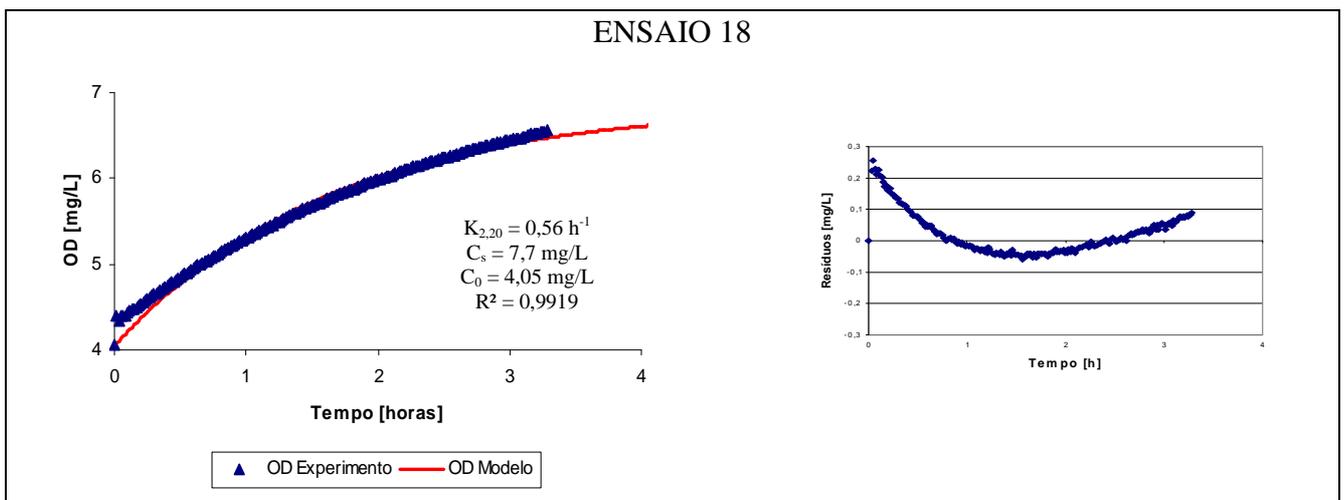


Figura A18 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

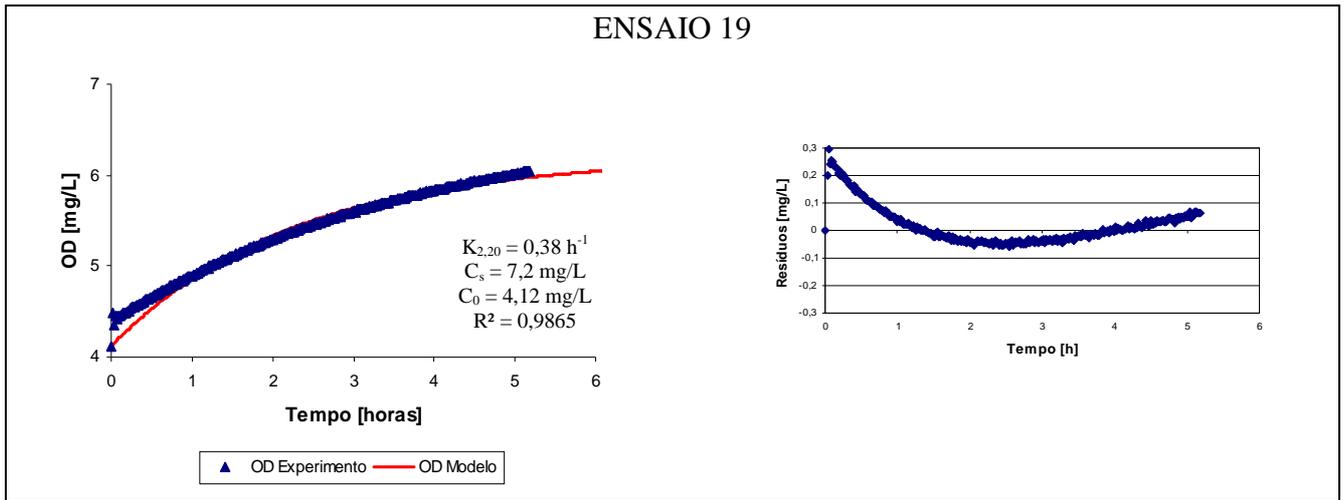


Figura A19 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

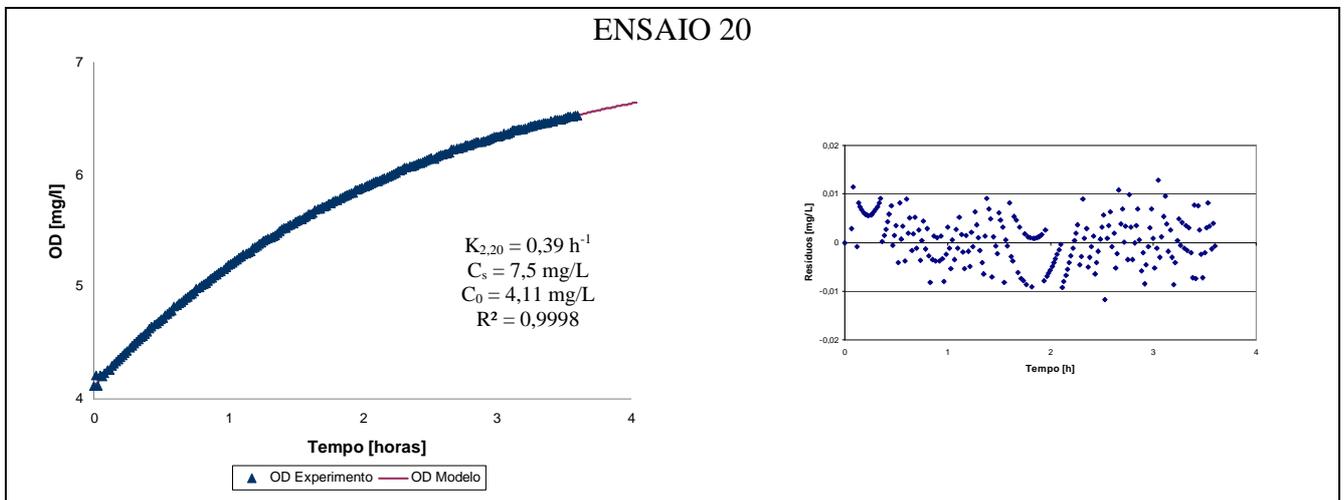


Figura A20 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

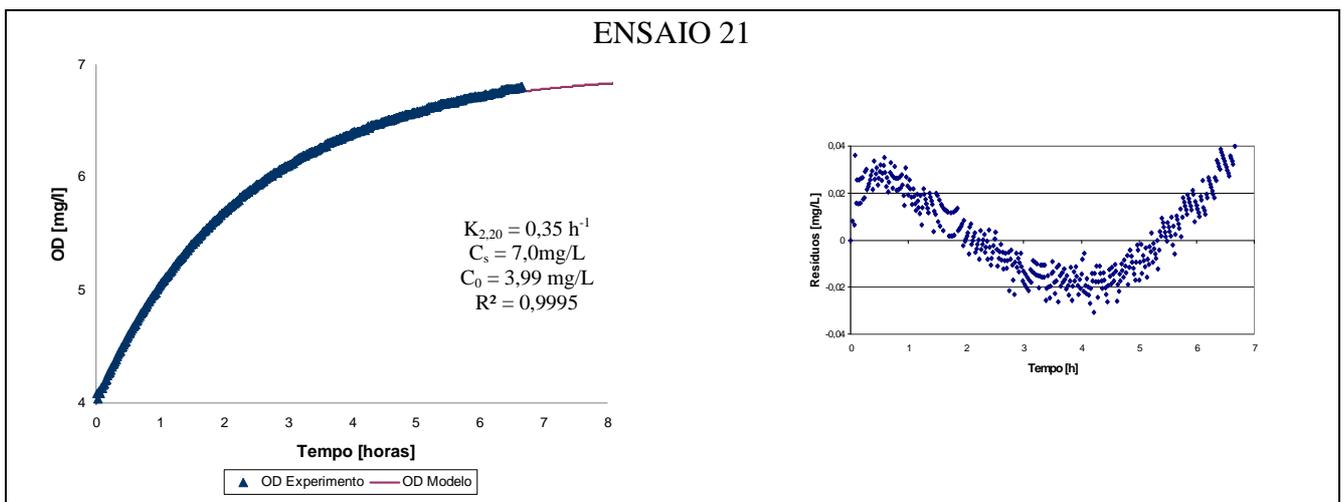


Figura A21 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

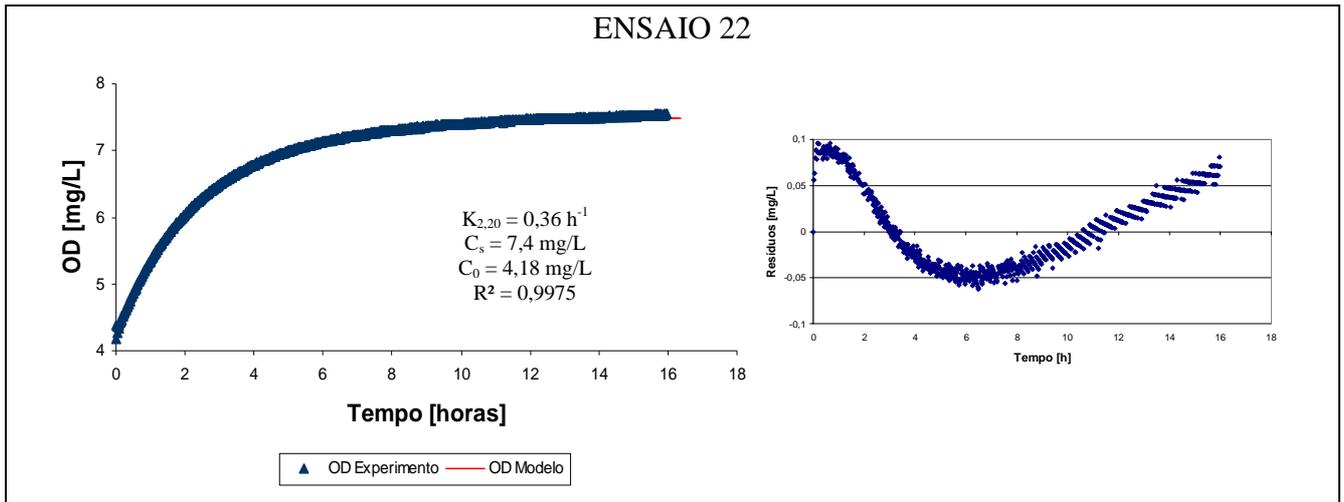


Figura A22 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

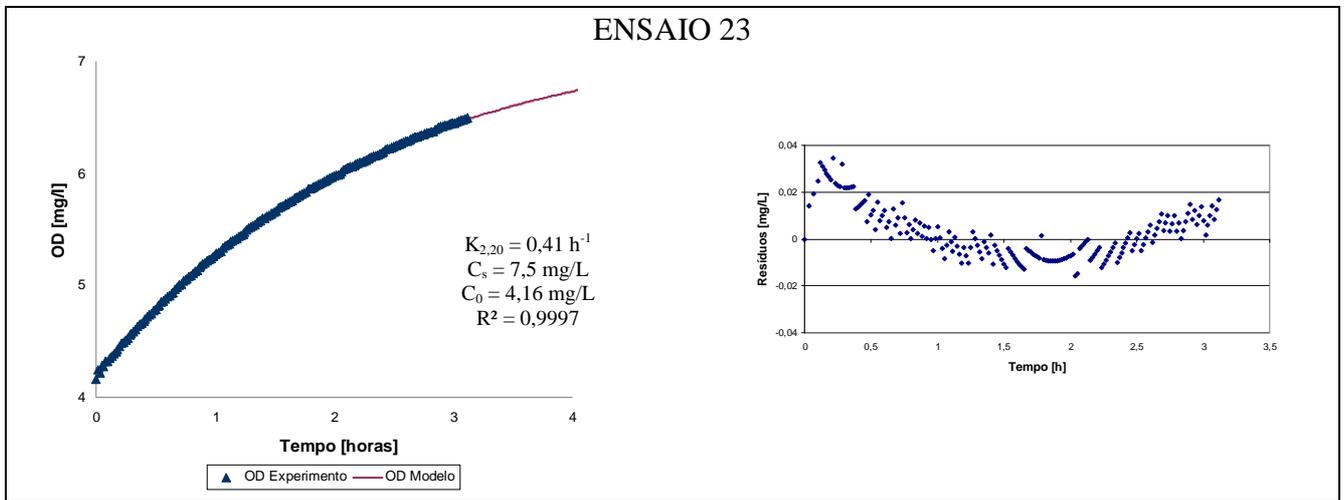


Figura A23 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

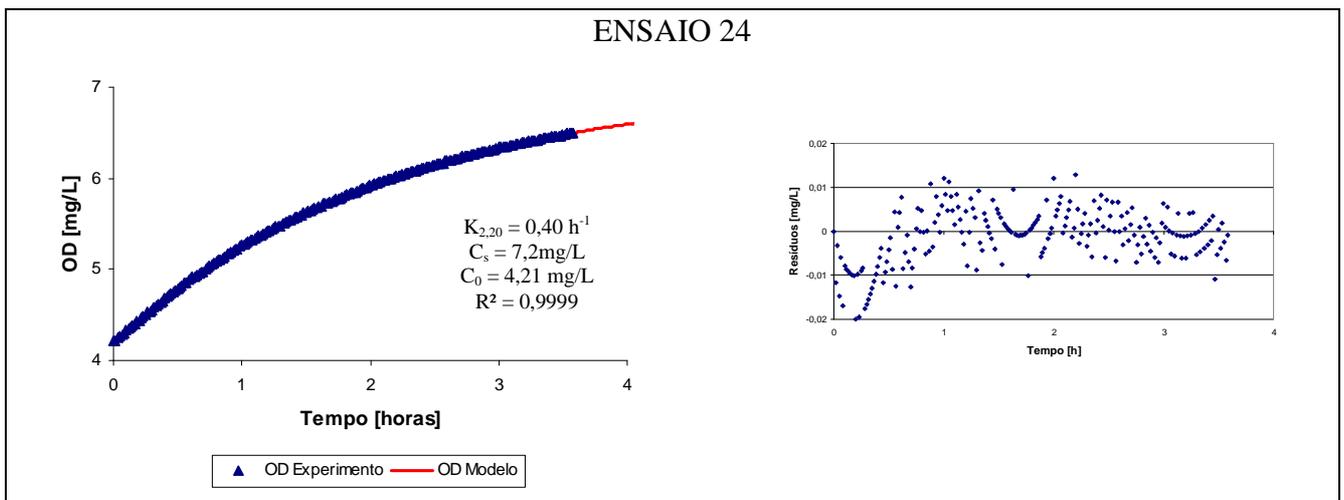


Figura A24 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

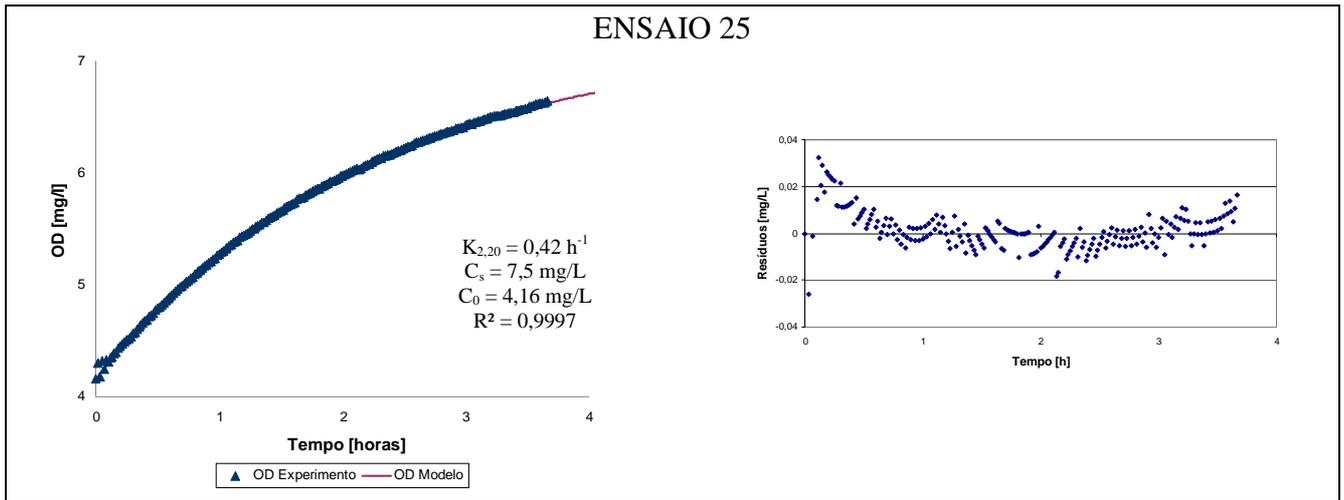


Figura A25 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

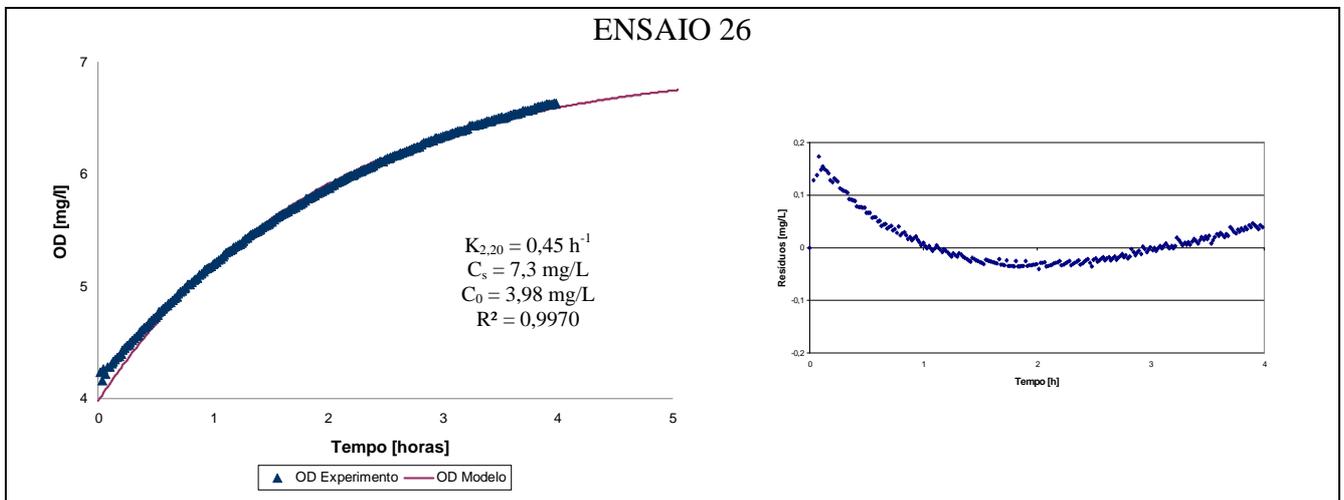


Figura A26 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

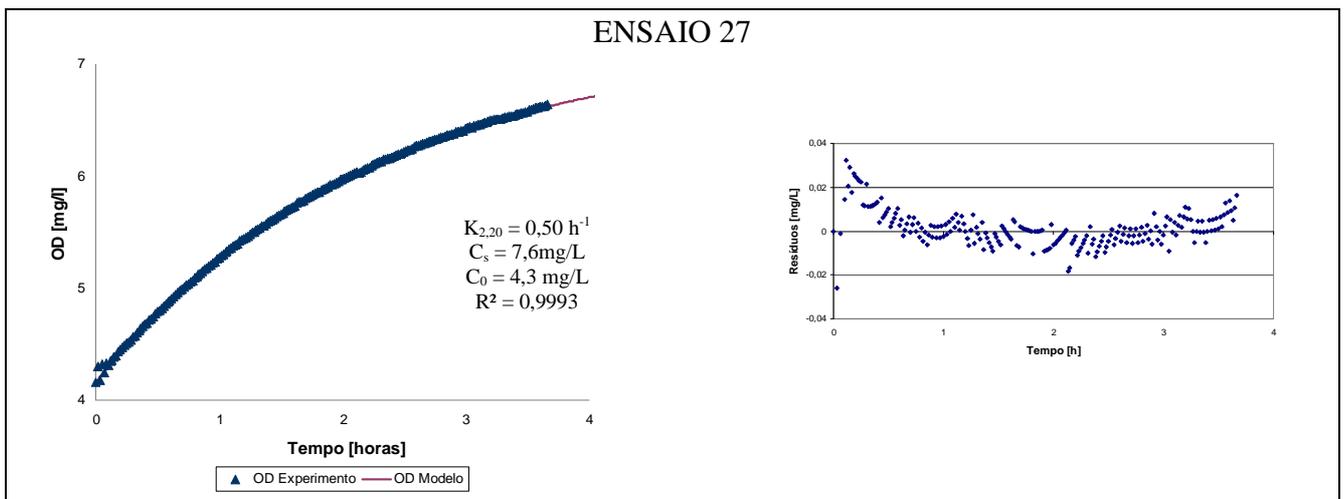


Figura A27 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

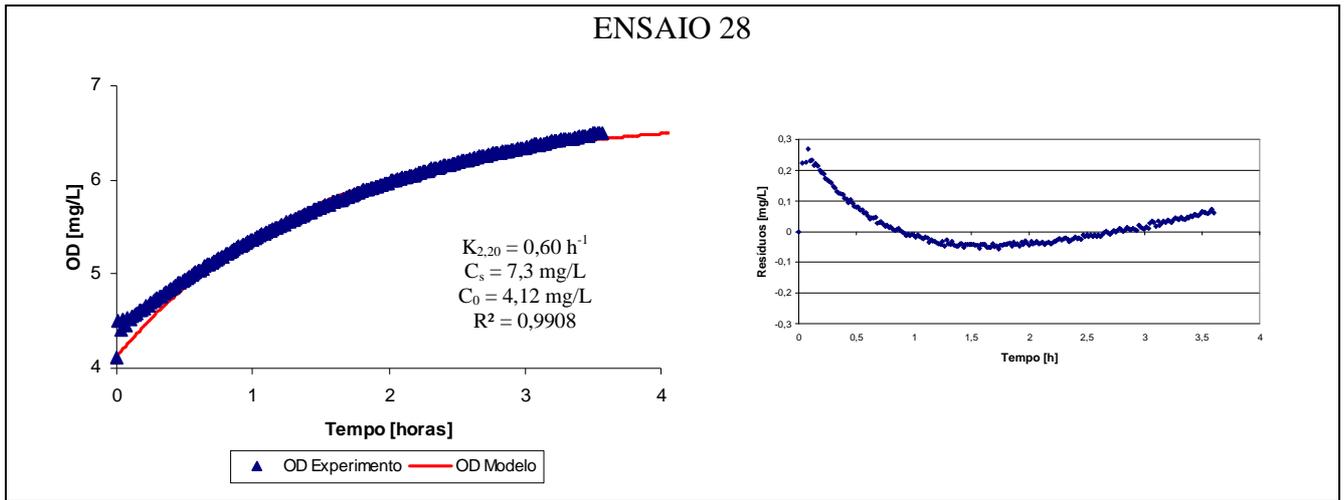


Figura A28 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

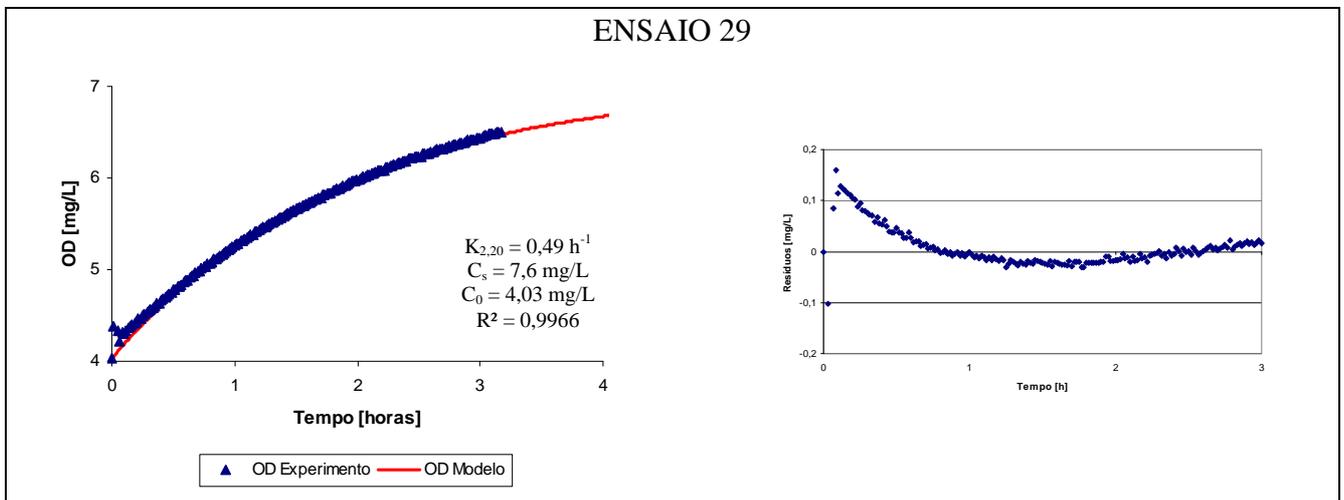


Figura A29 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

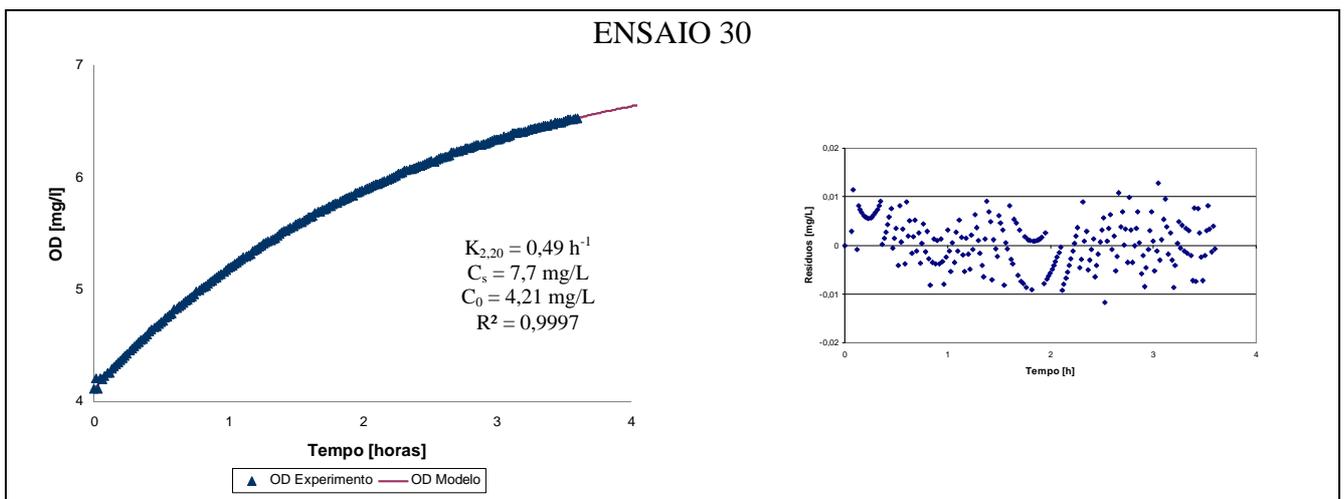


Figura A30 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

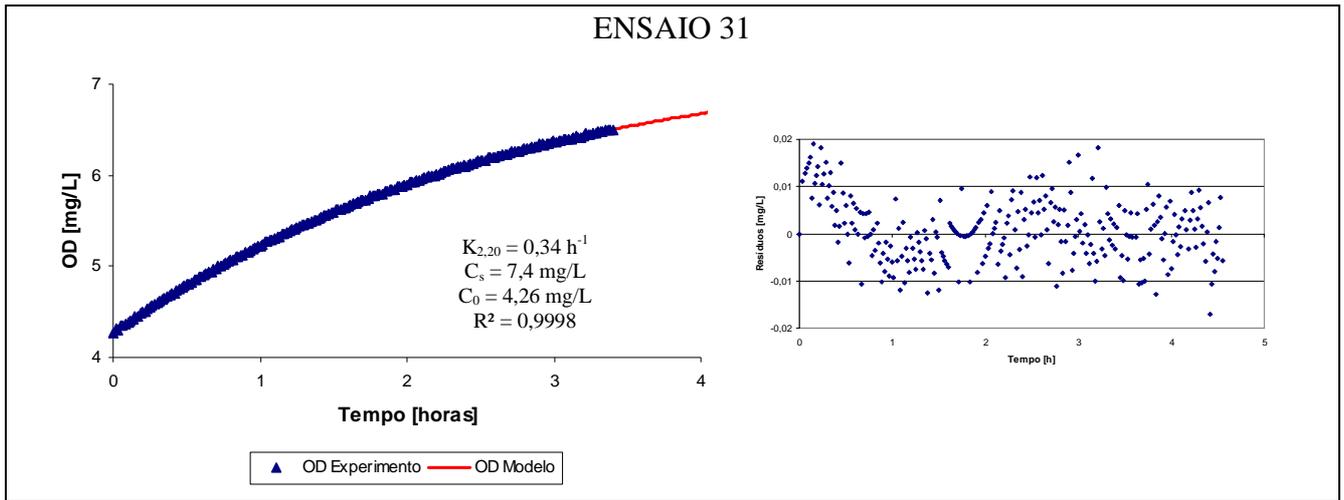


Figura A31 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

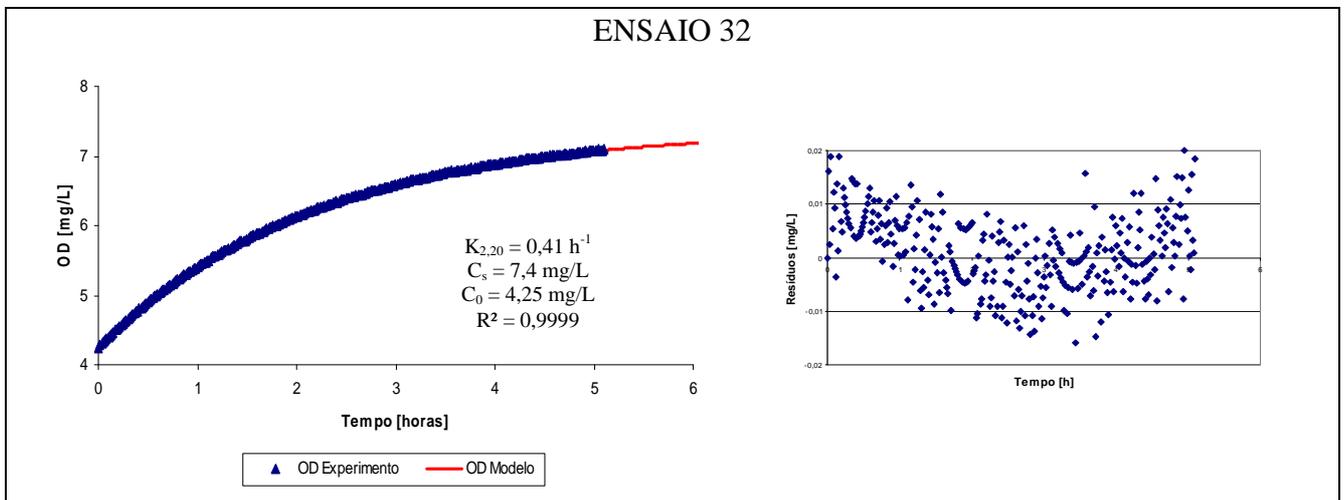


Figura A32 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

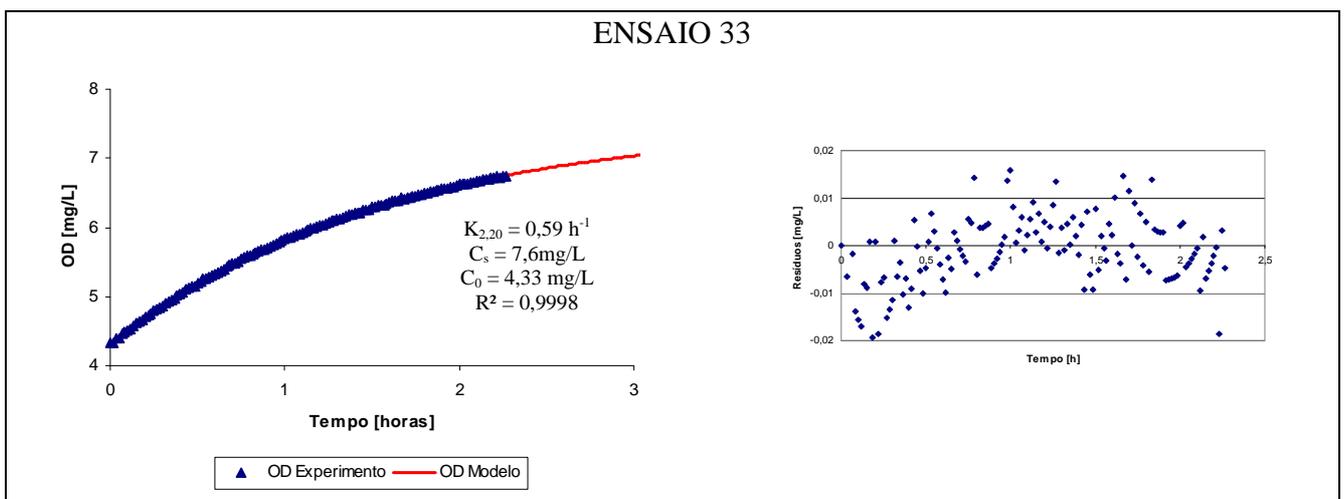


Figura A33 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

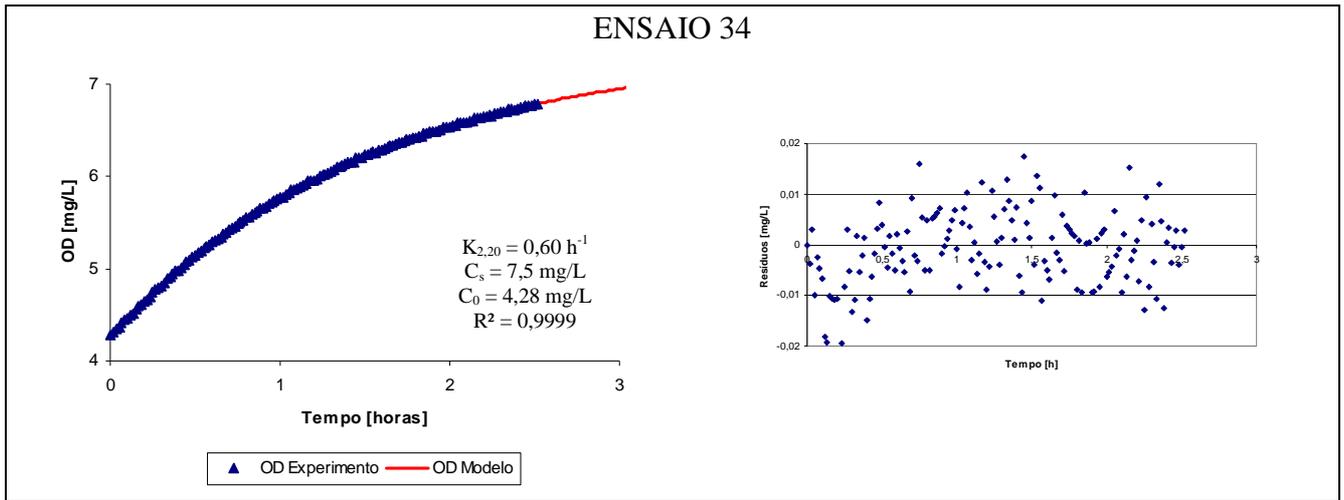


Figura A34 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

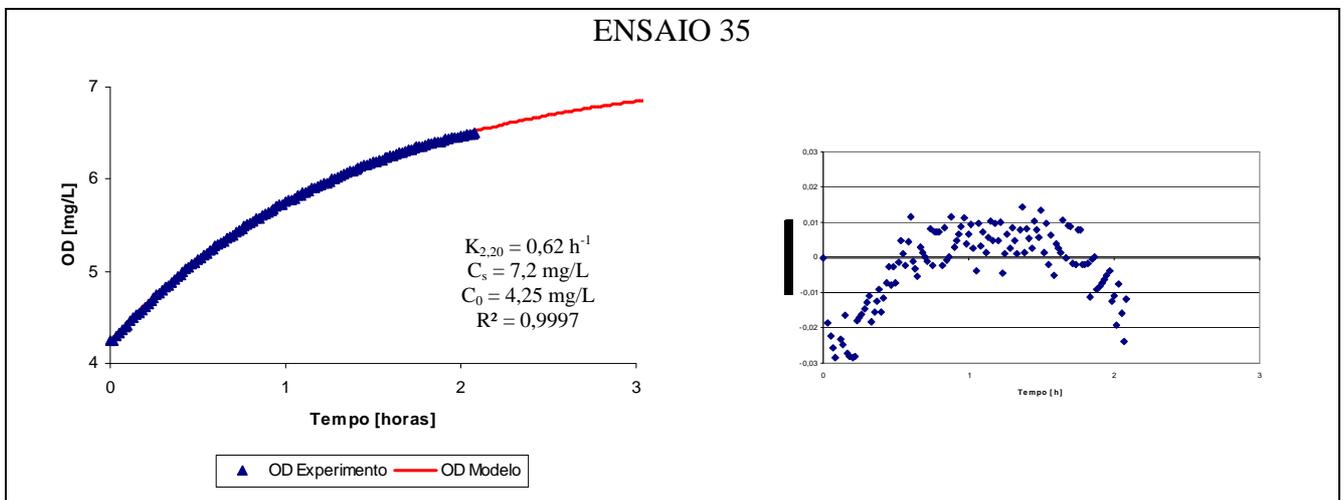


Figura A35 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

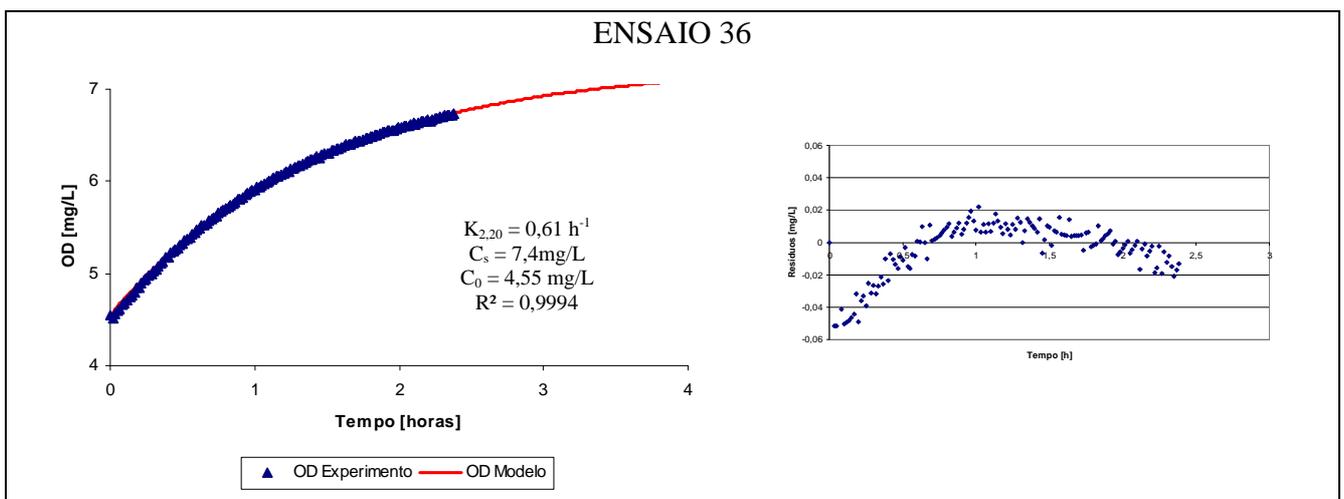


Figura A36 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

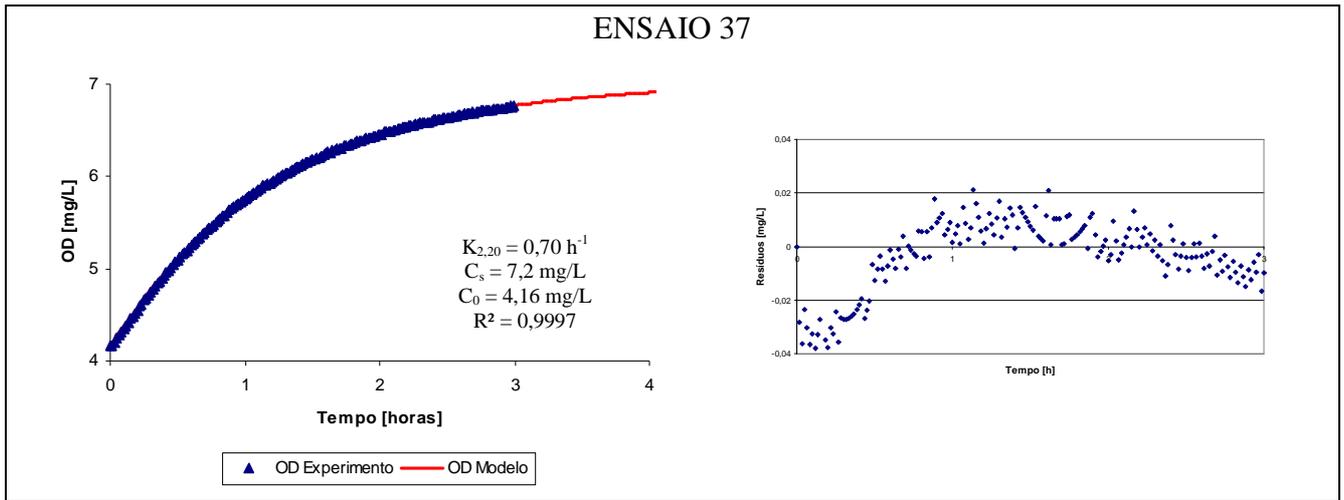


Figura A37 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

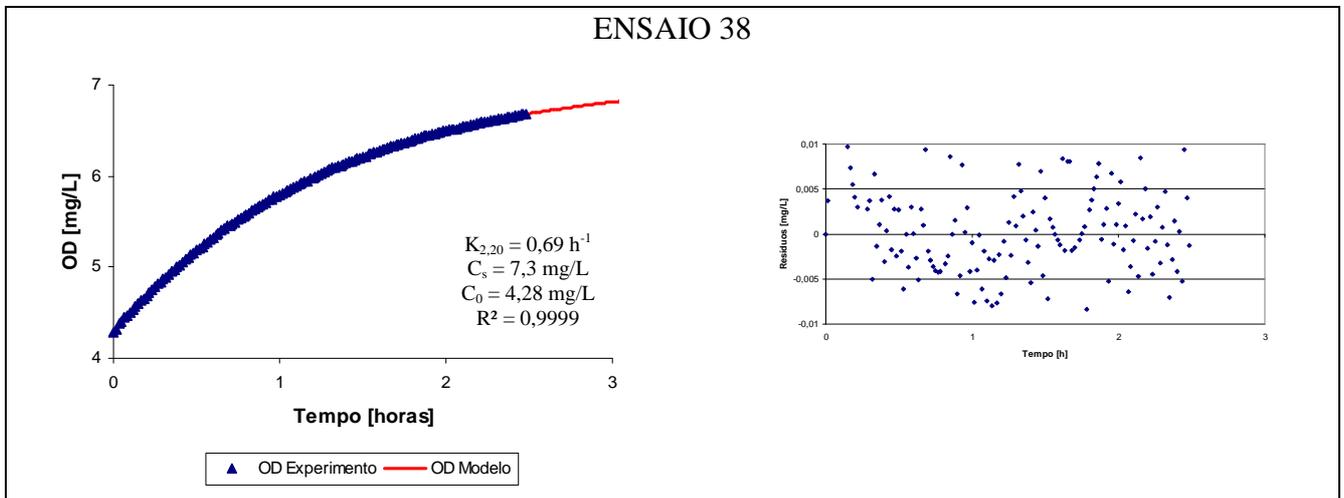


Figura A38 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

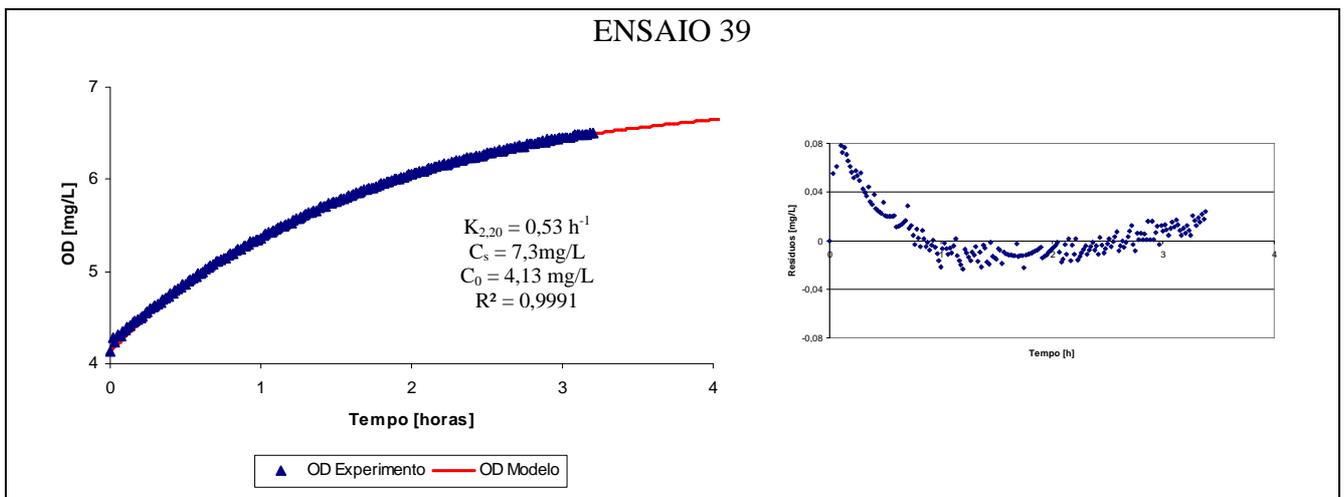


Figura A39 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

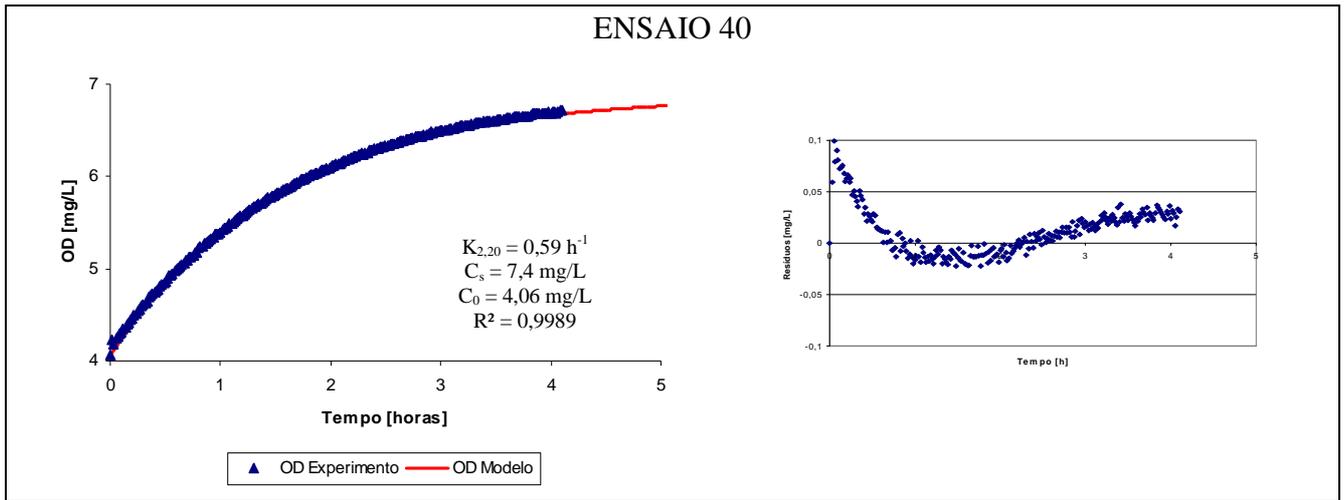


Figura A40 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

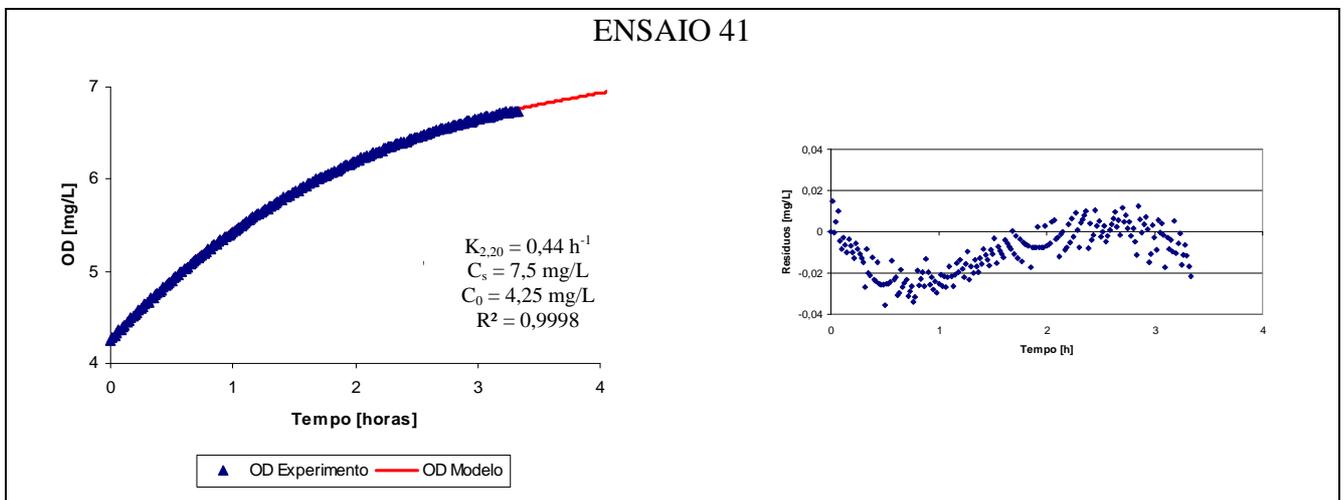


Figura A41 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

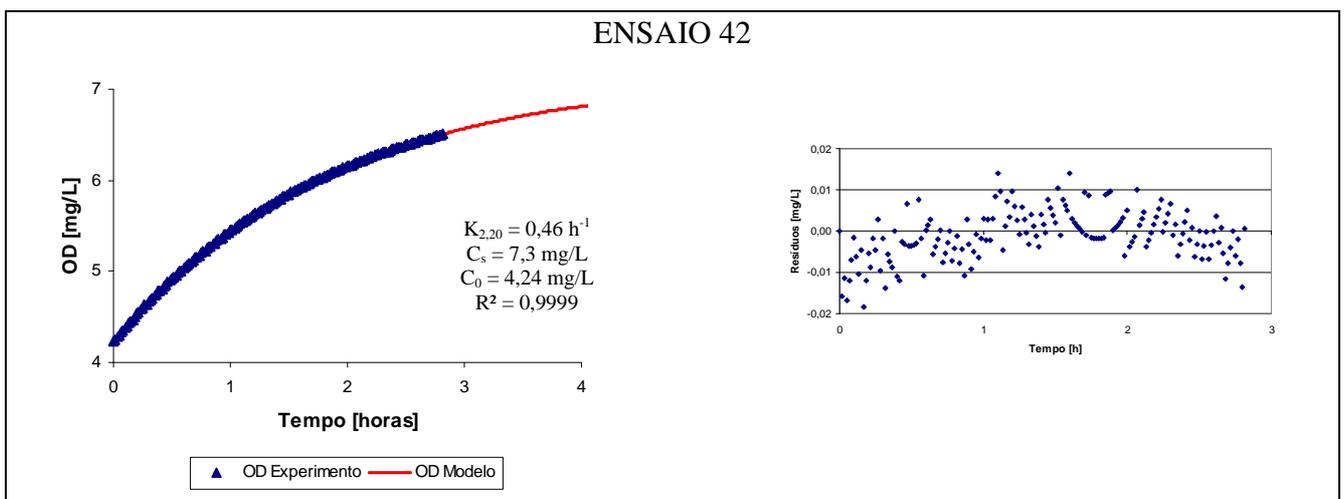


Figura A42 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

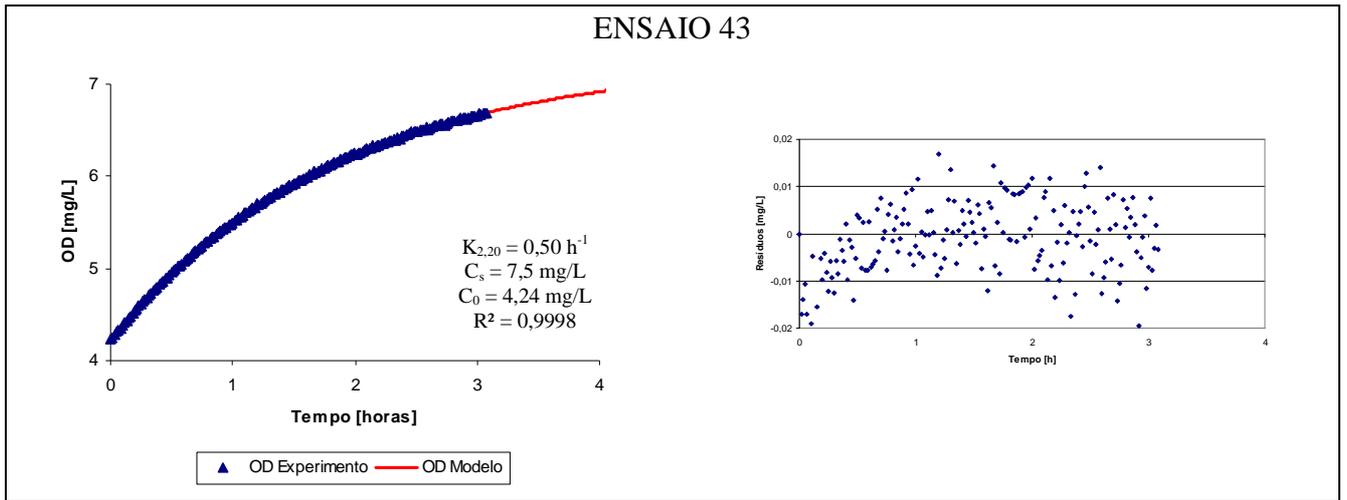


Figura A43 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

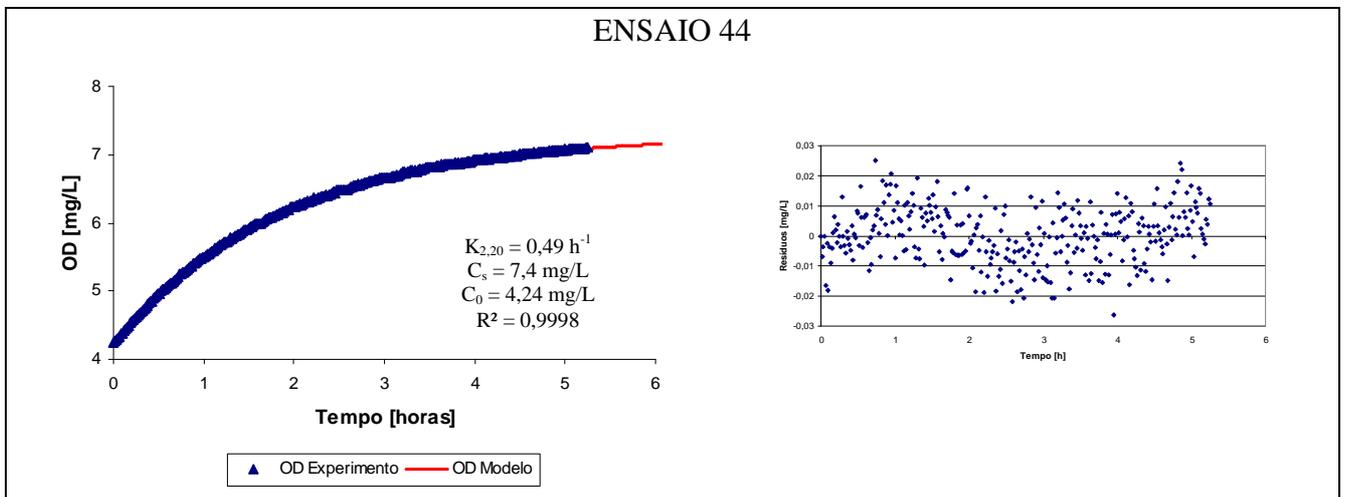


Figura A44 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

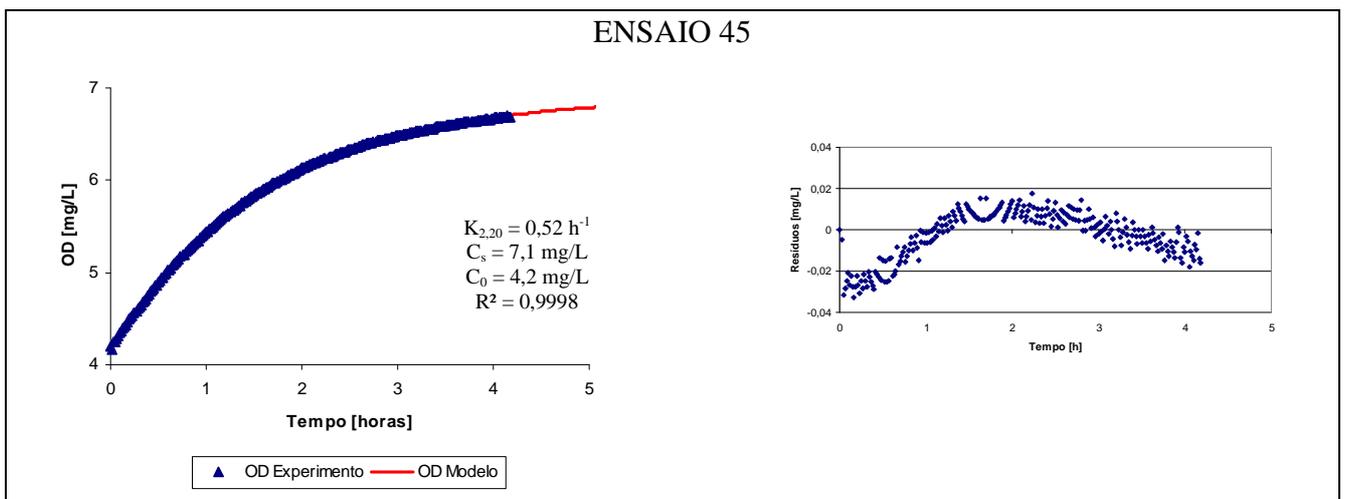


Figura A45 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

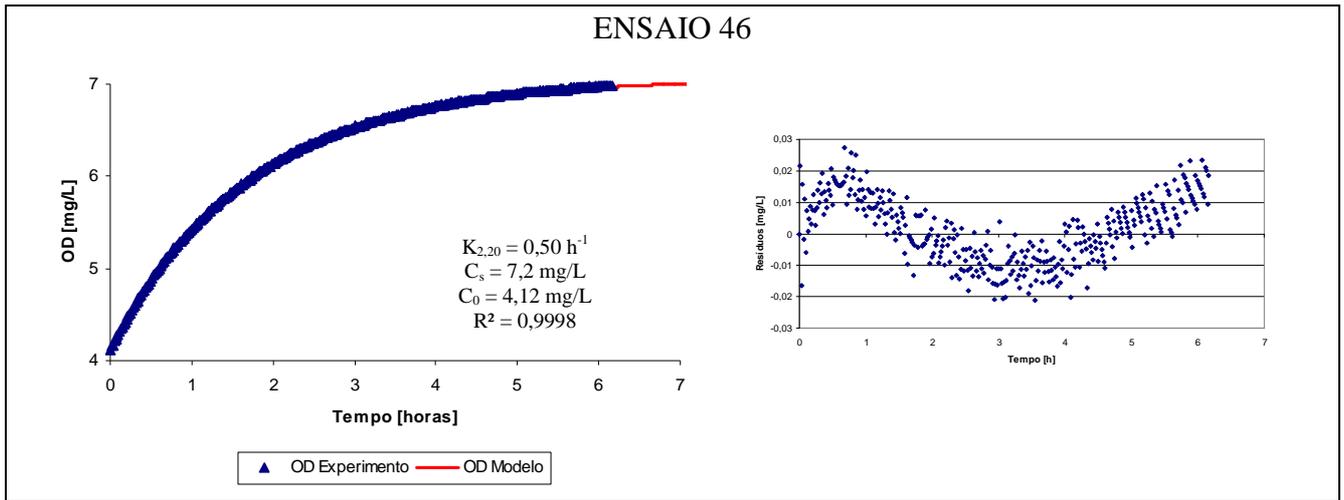


Figura A46 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

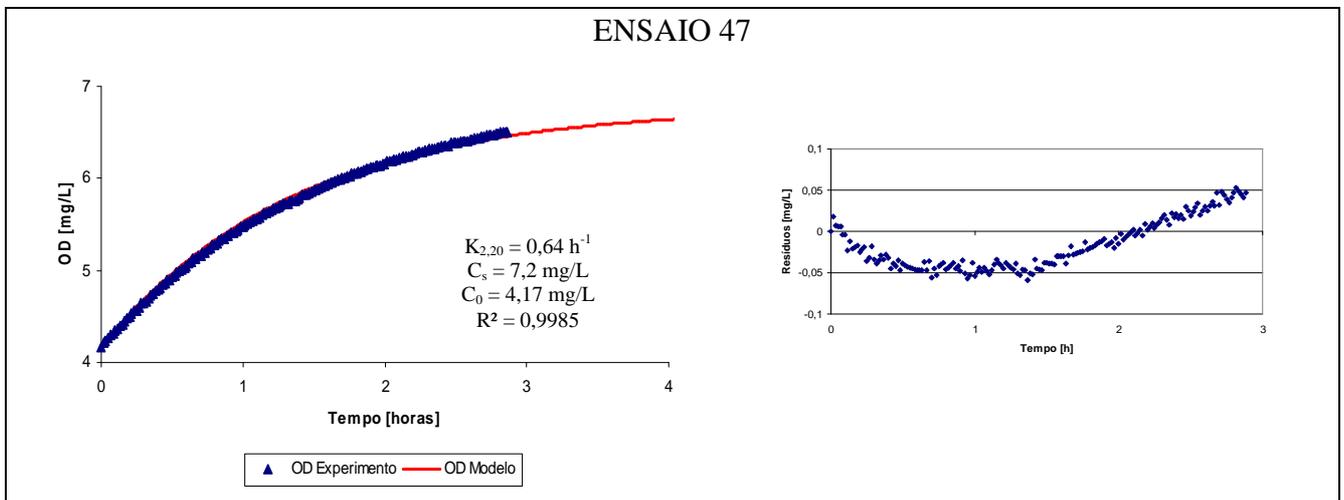


Figura A47 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

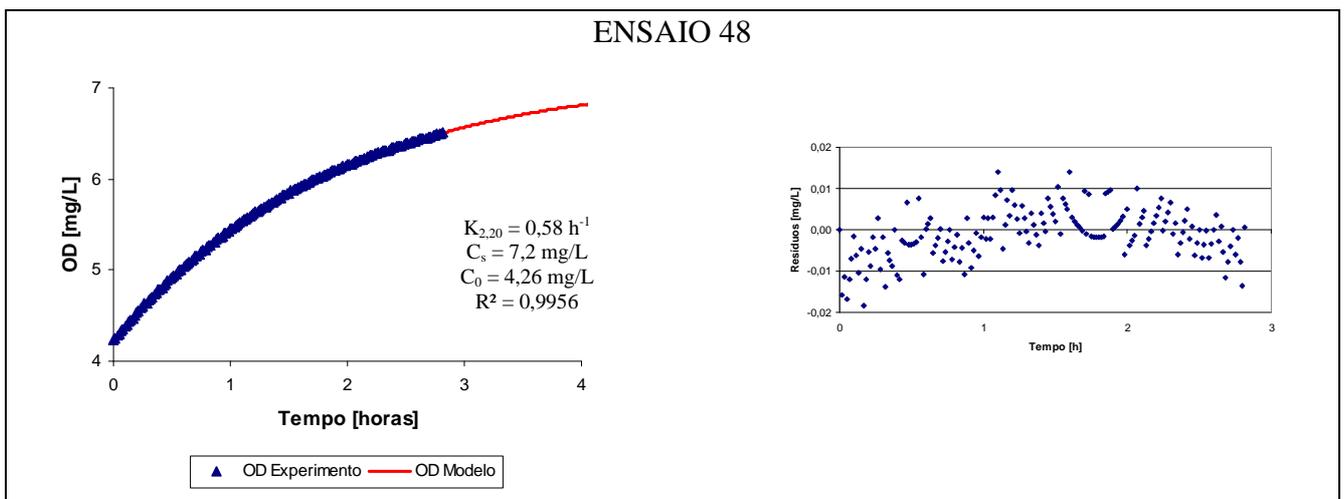


Figura A48 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

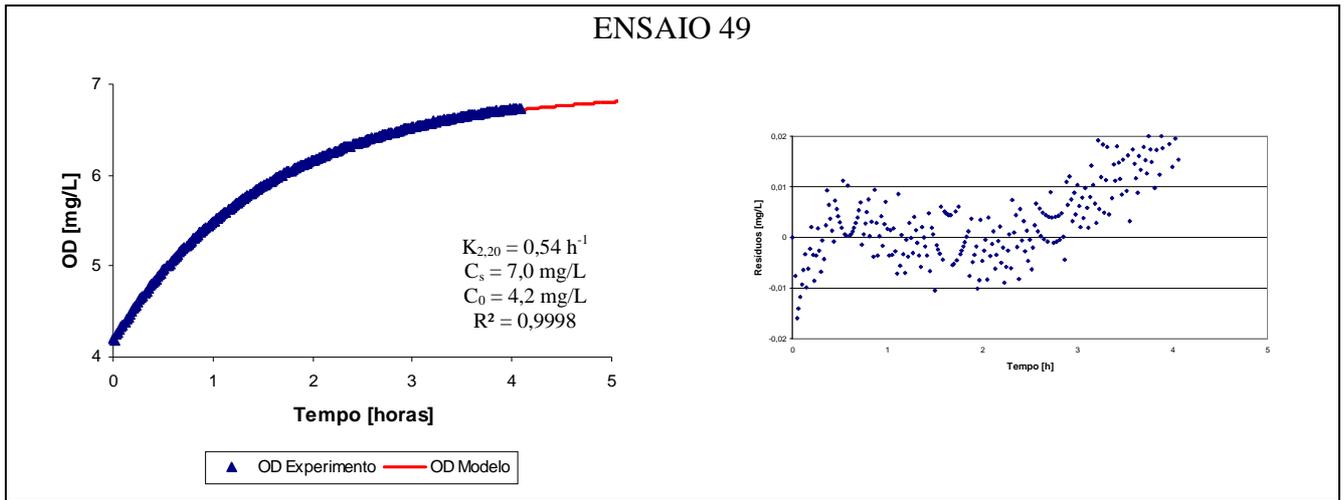


Figura A49 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

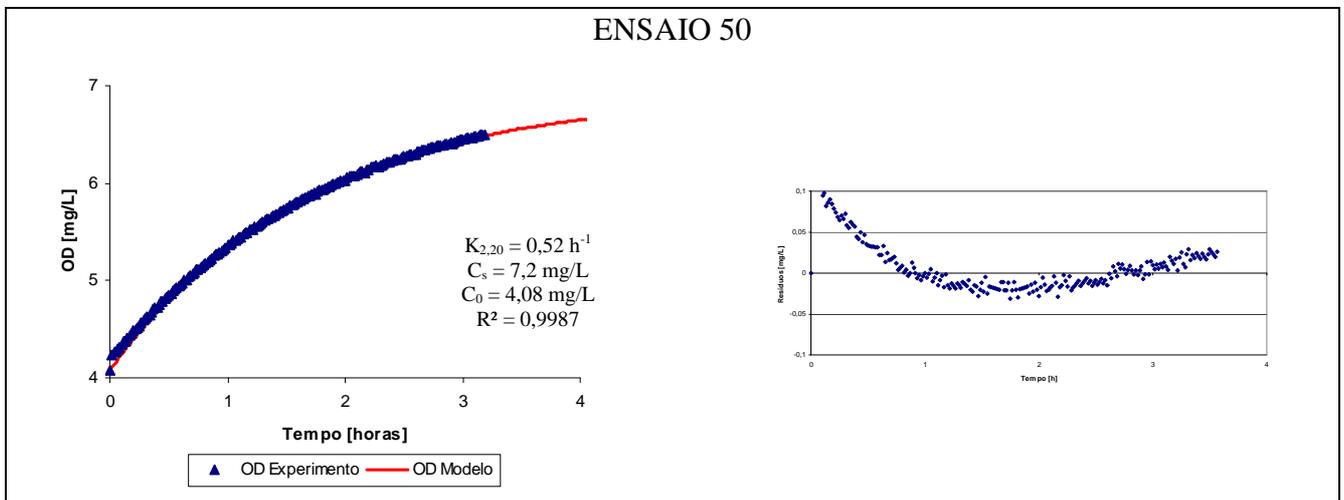


Figura A50 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

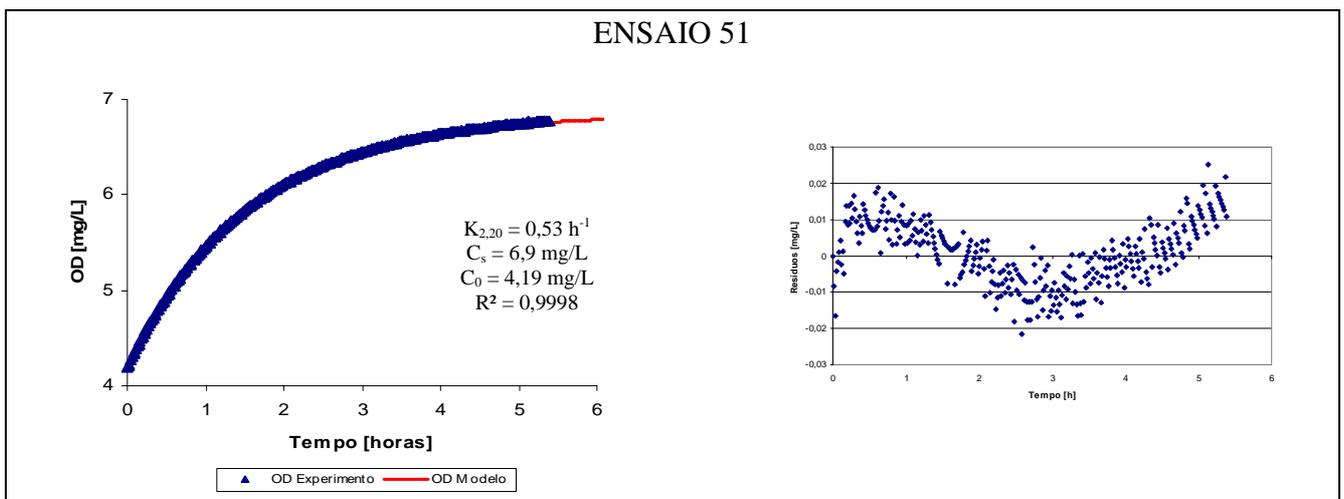


Figura A51 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

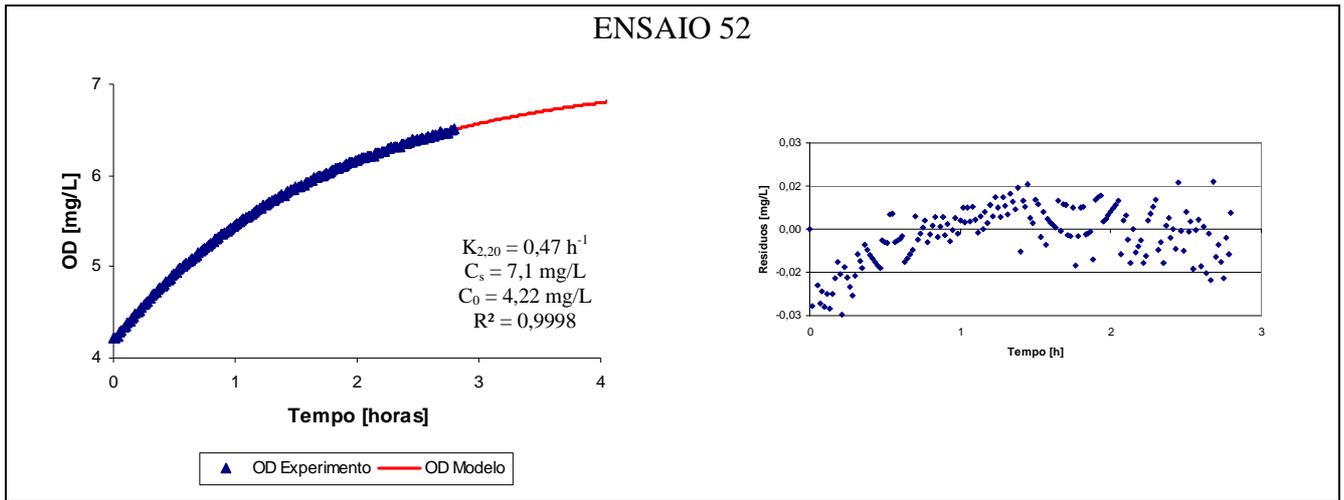


Figura A52 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

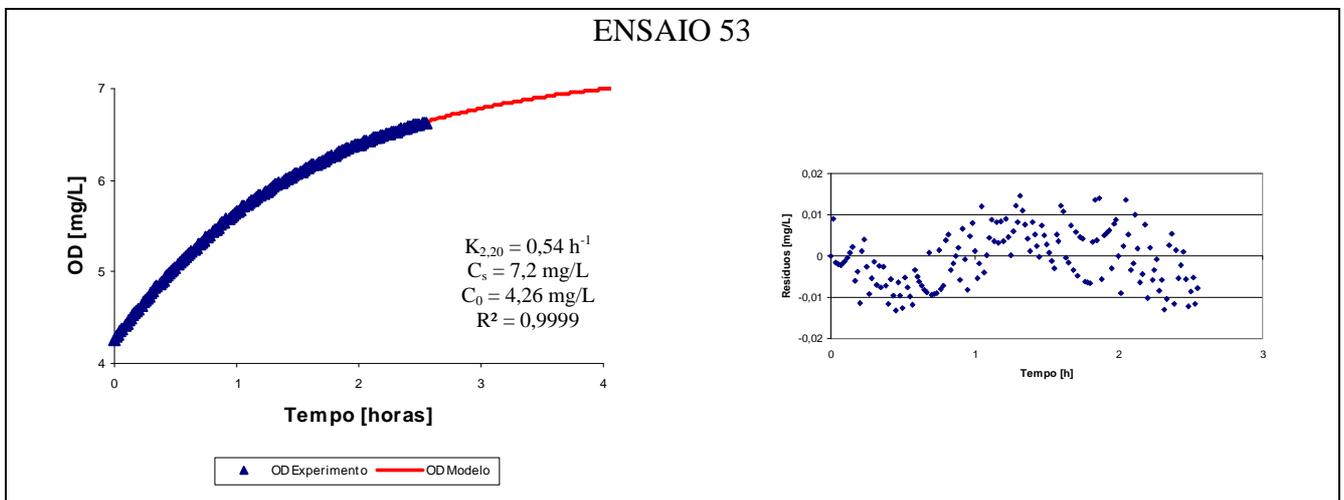


Figura A53 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

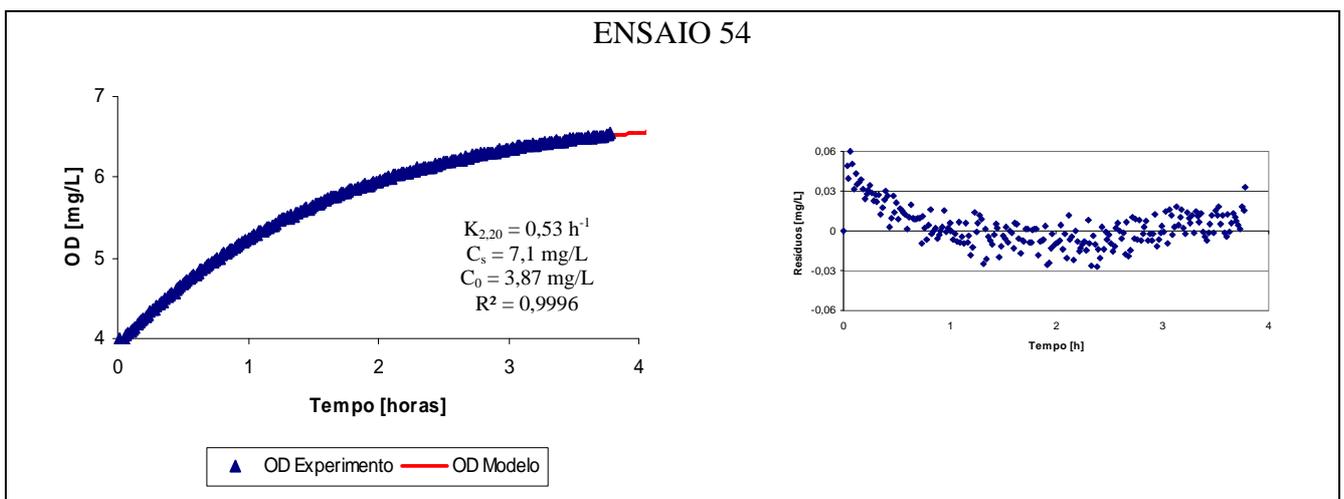


Figura A54 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

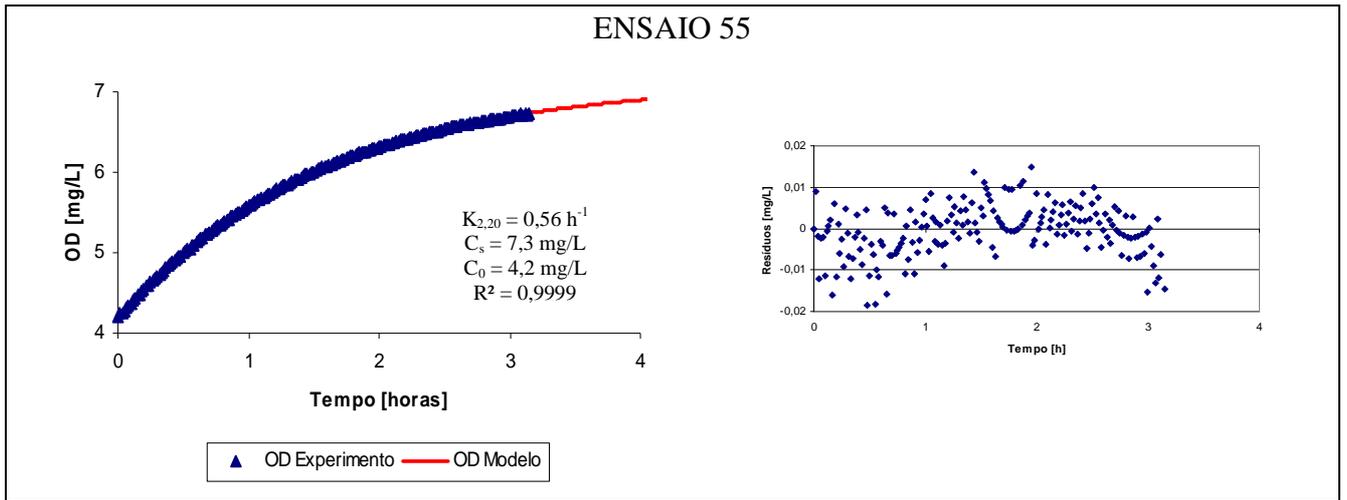


Figura A55 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

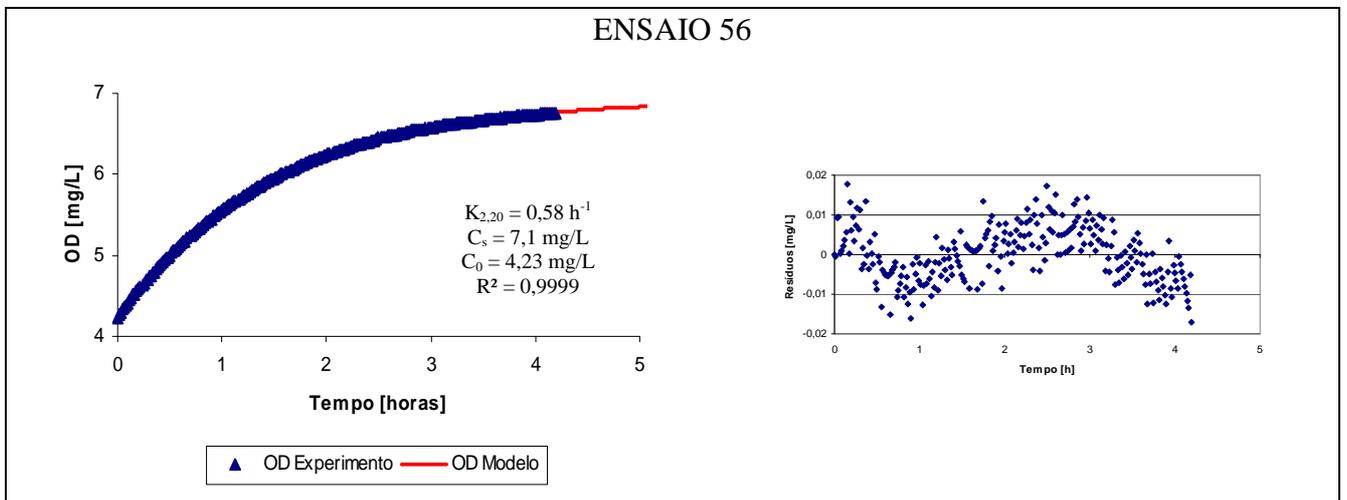


Figura A56 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

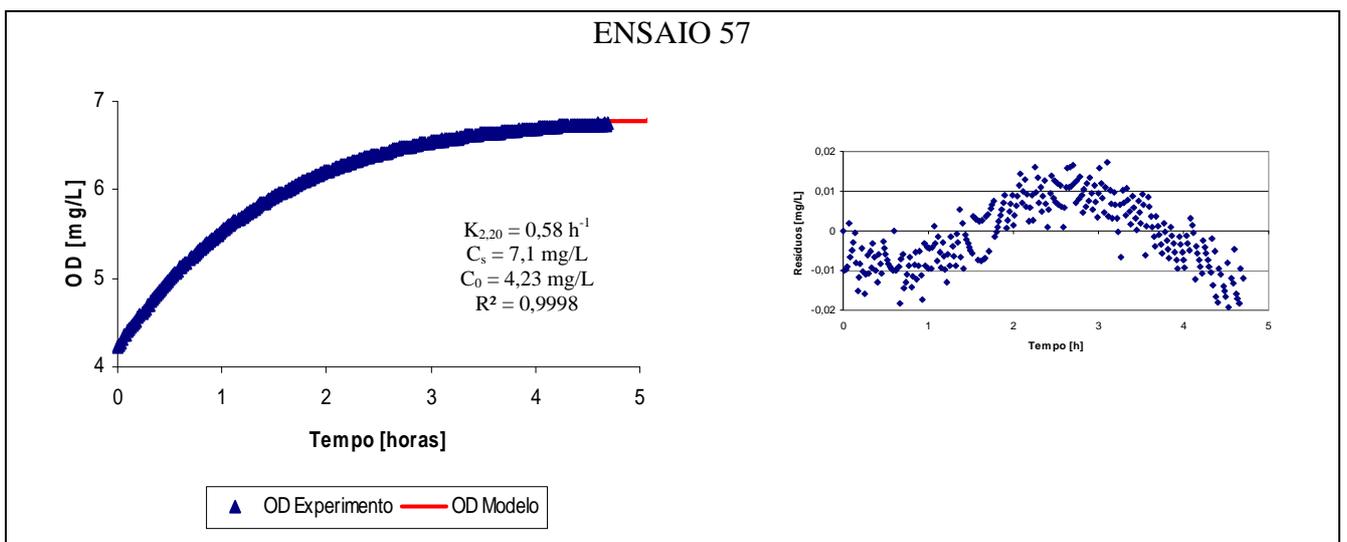


Figura A57 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

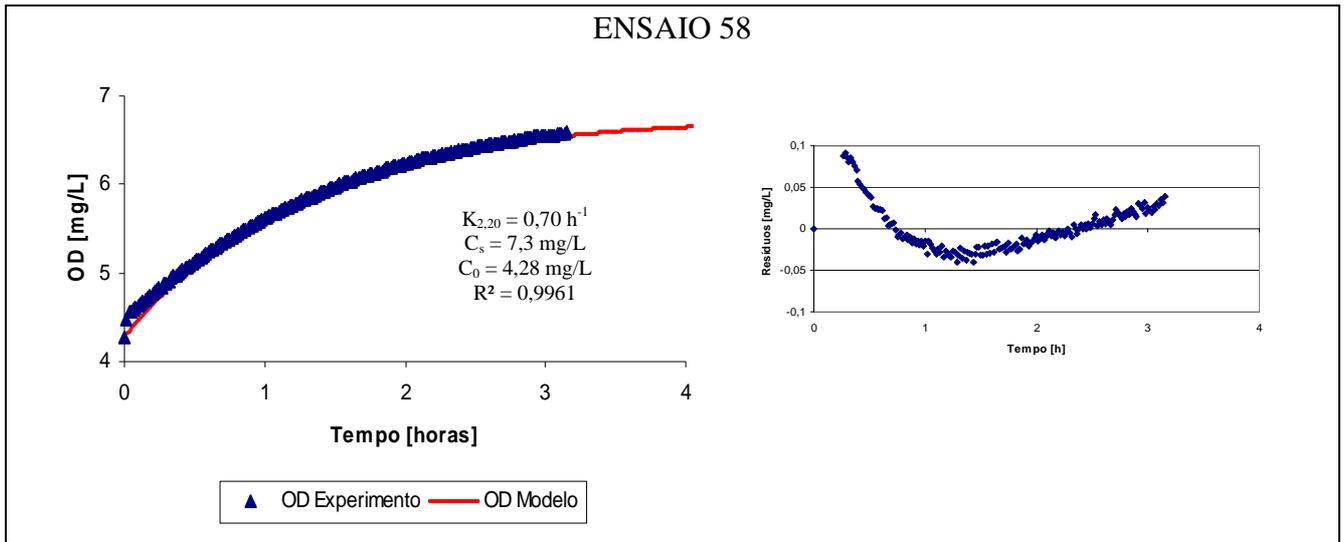


Figura A58 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

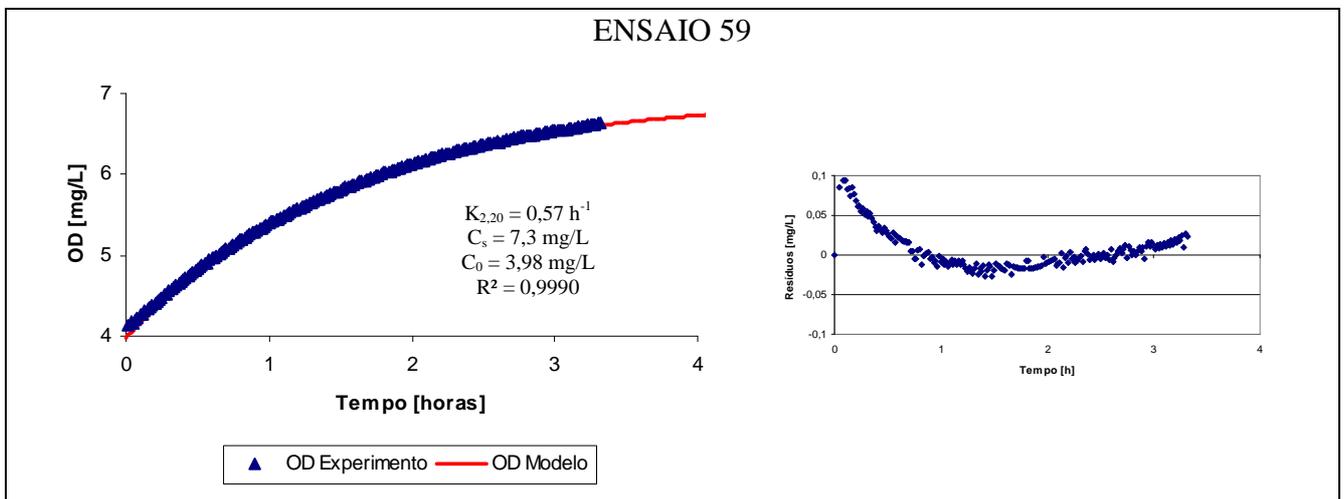


Figura A59 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

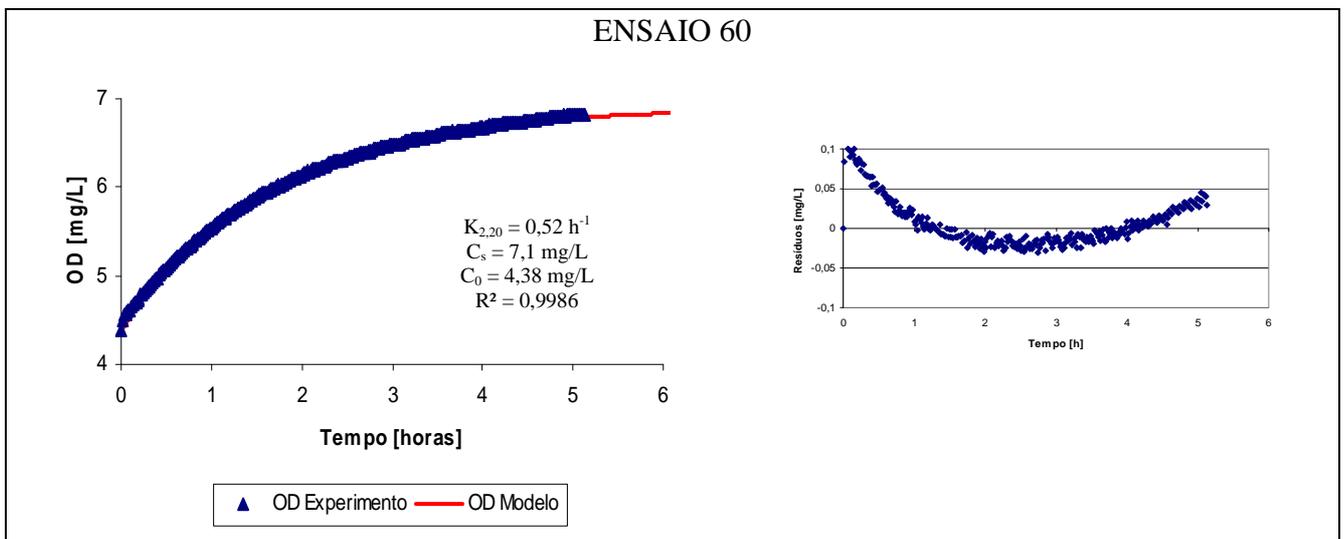


Figura A60 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

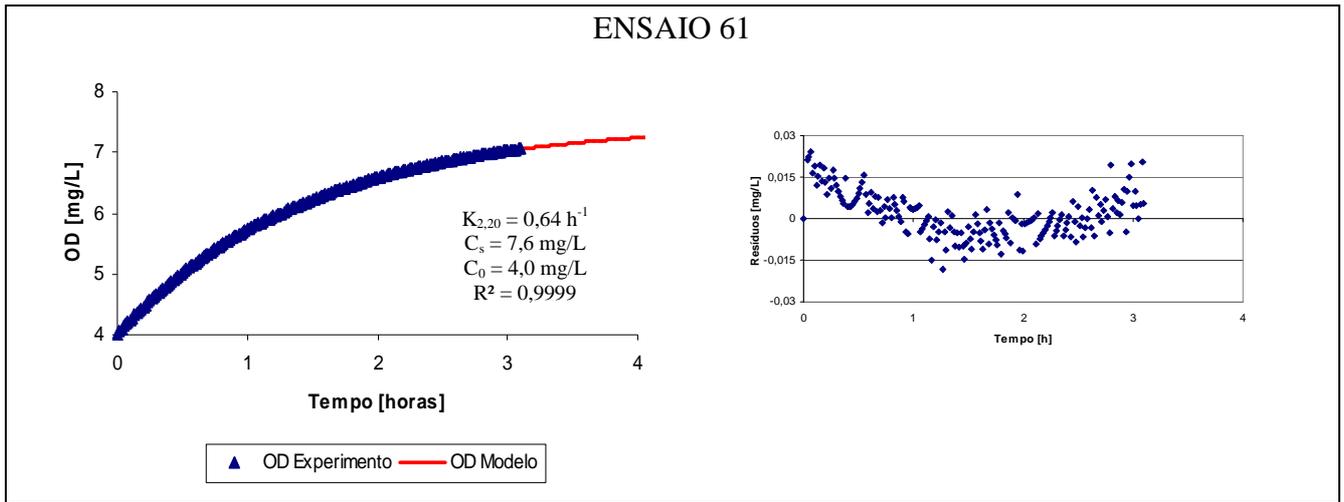


Figura A61 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

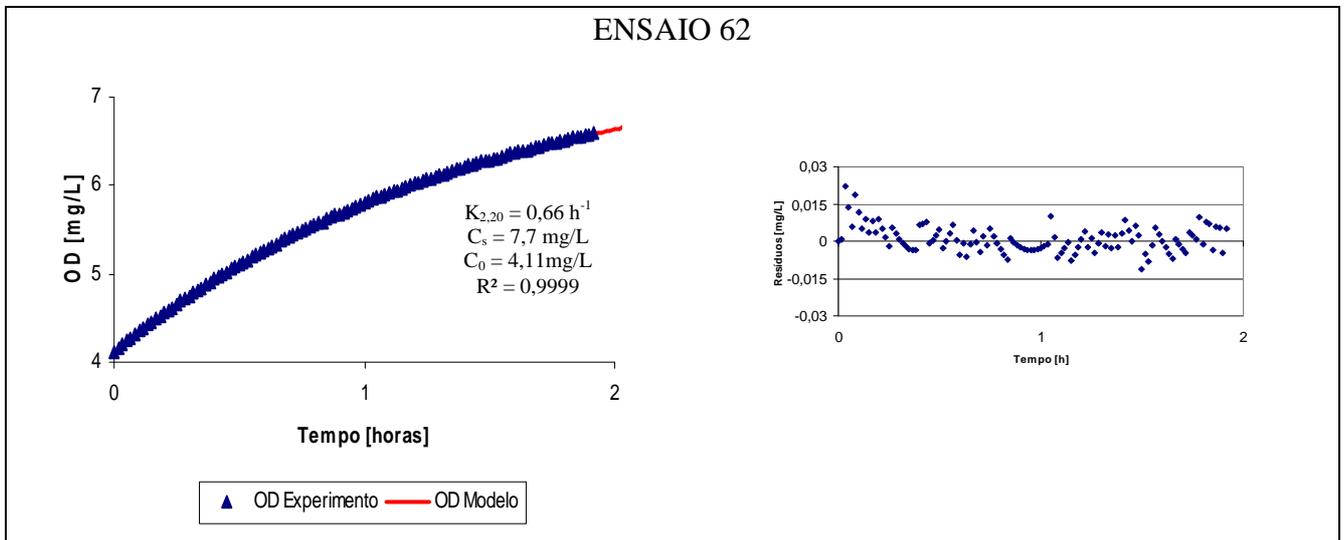


Figura A62 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

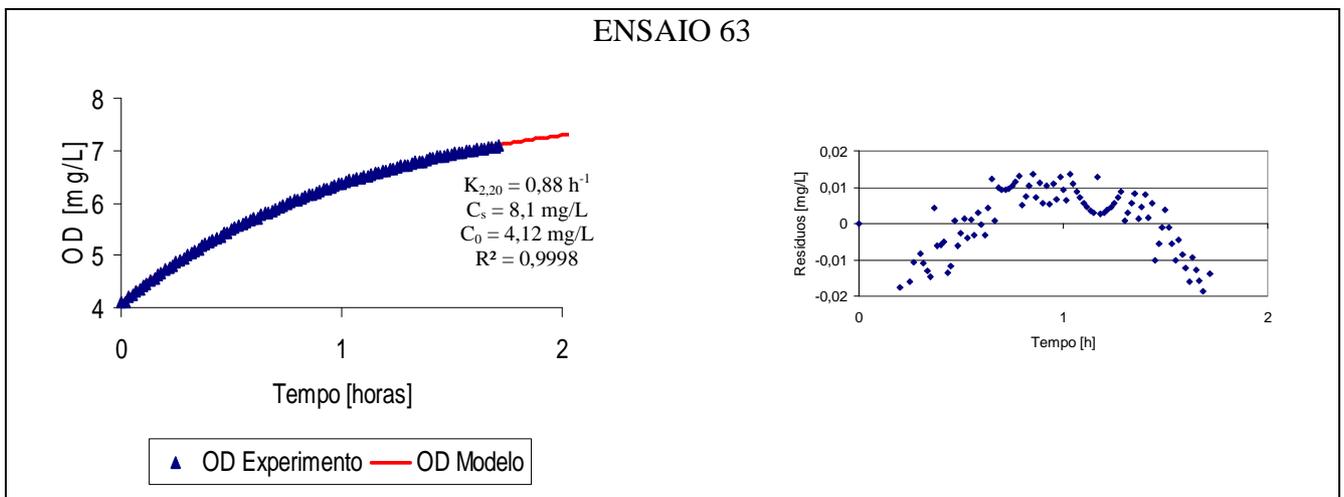


Figura A63 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

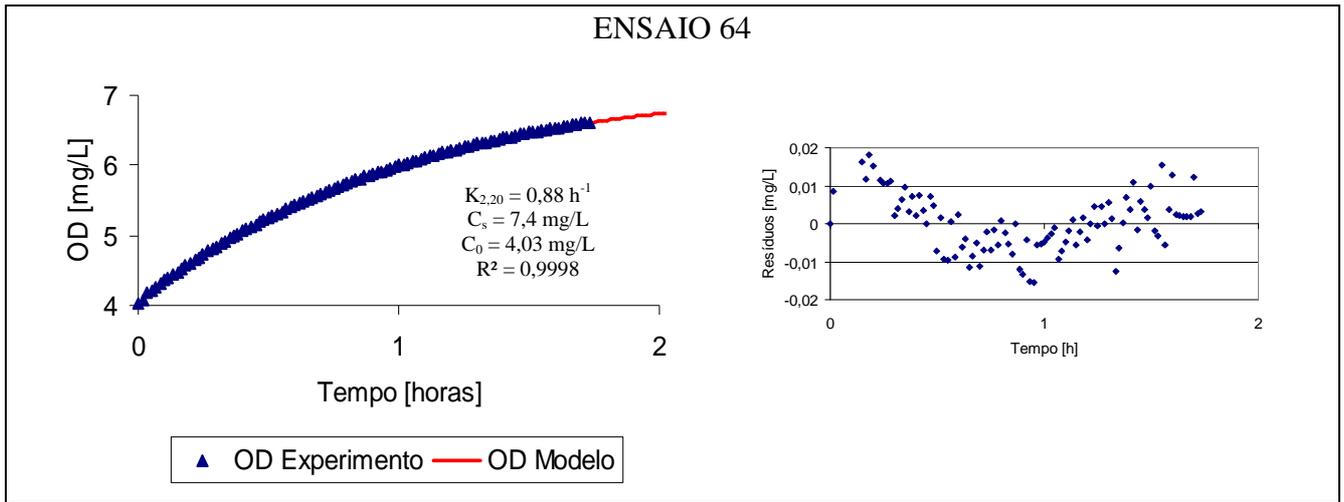


Figura A64 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

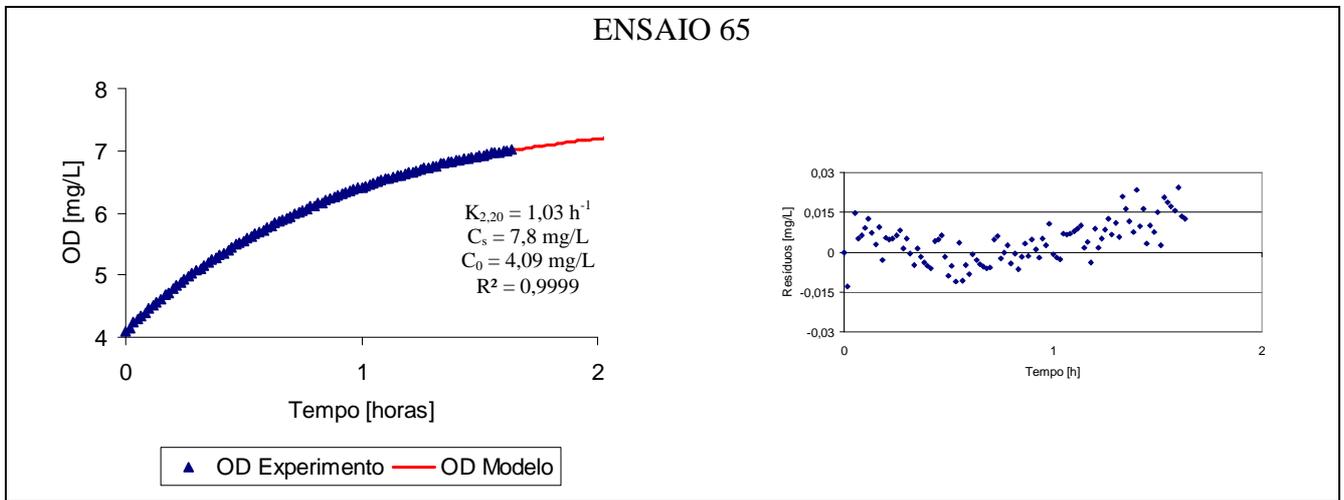


Figura A65 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

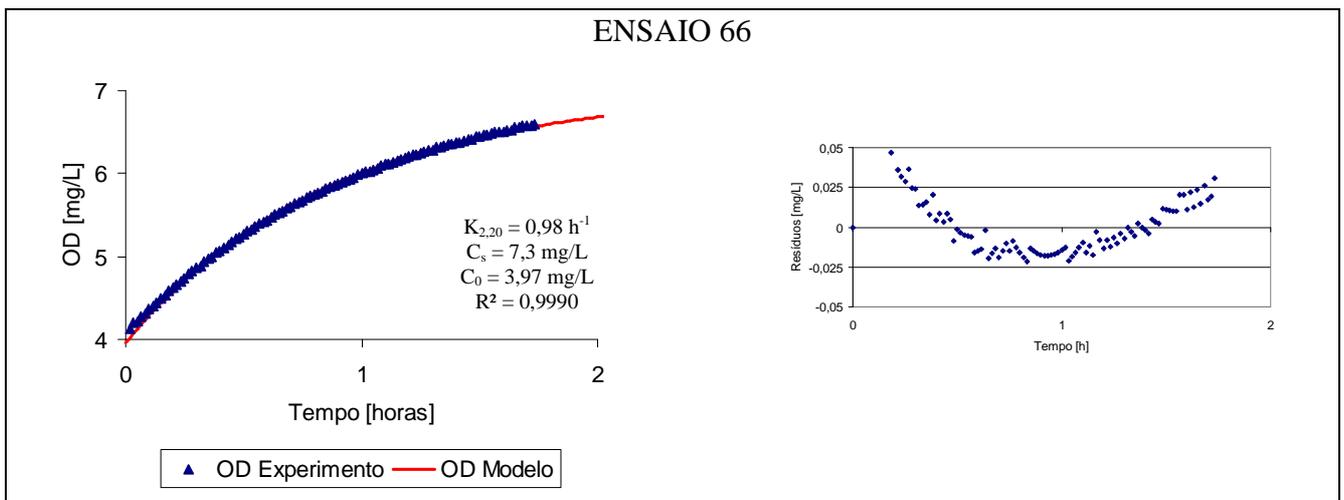


Figura A66 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

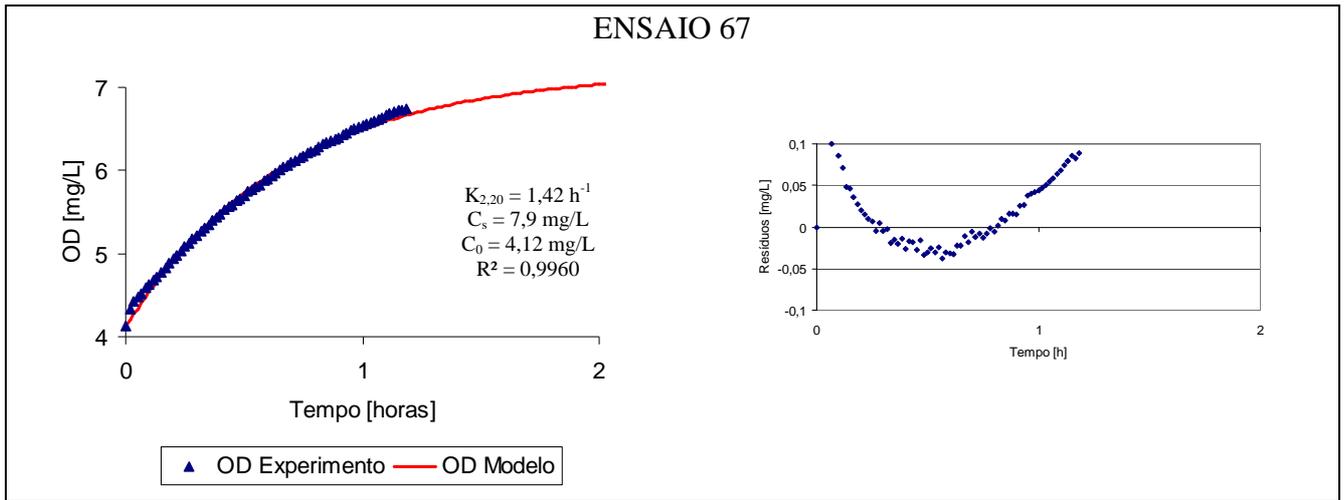


Figura A67 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

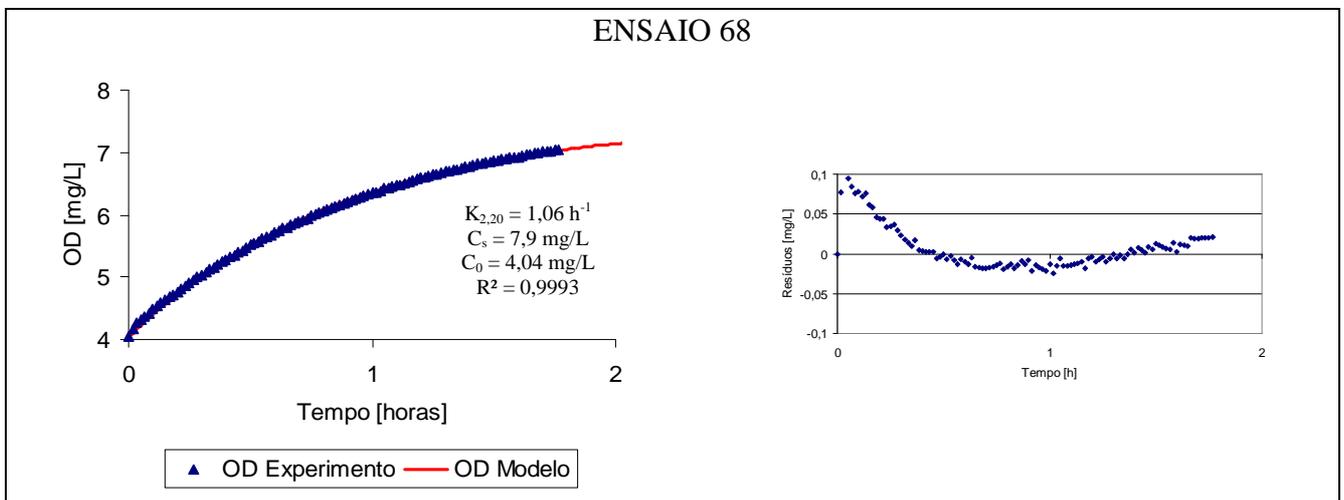


Figura A68 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

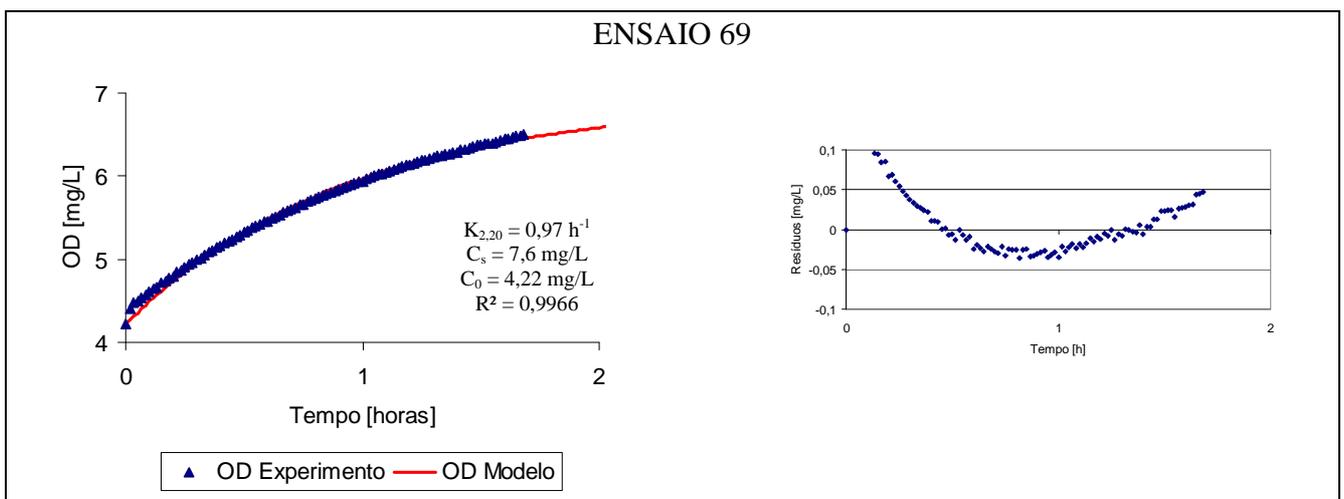


Figura A69 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

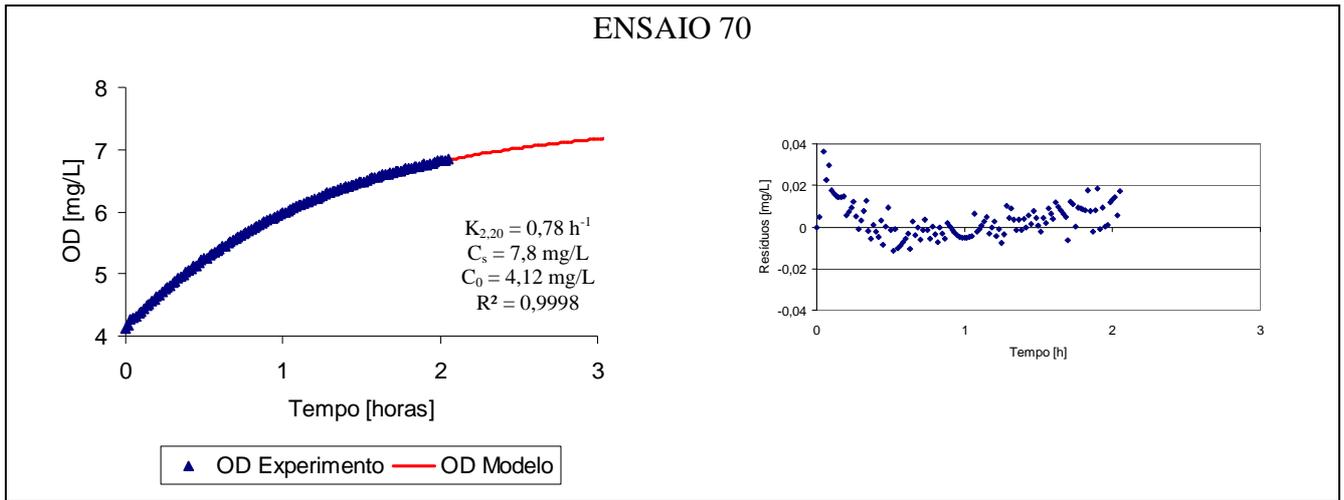


Figura A70 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

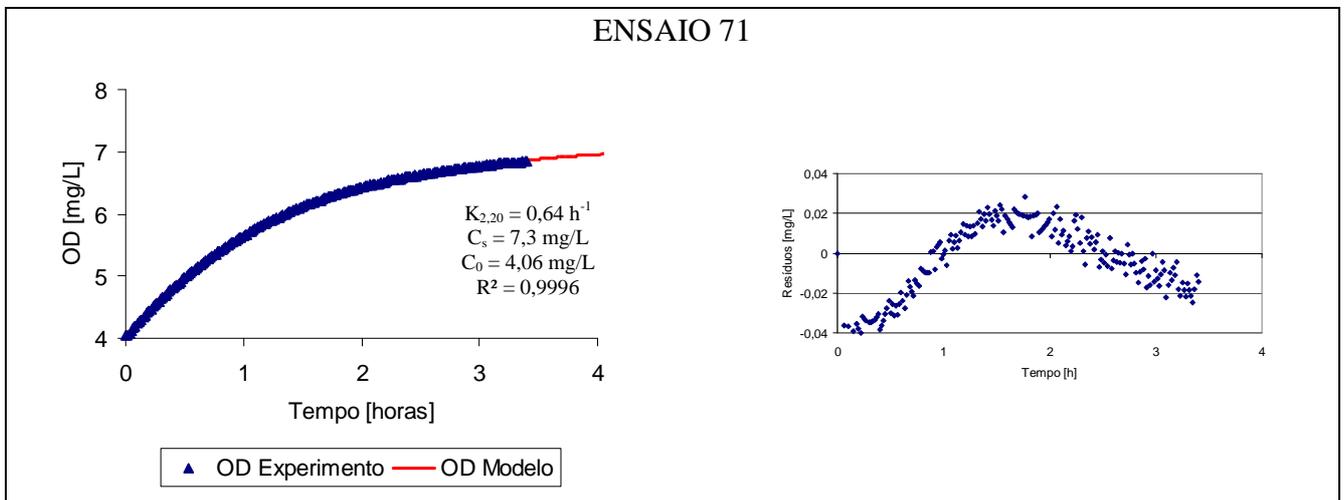


Figura A71 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

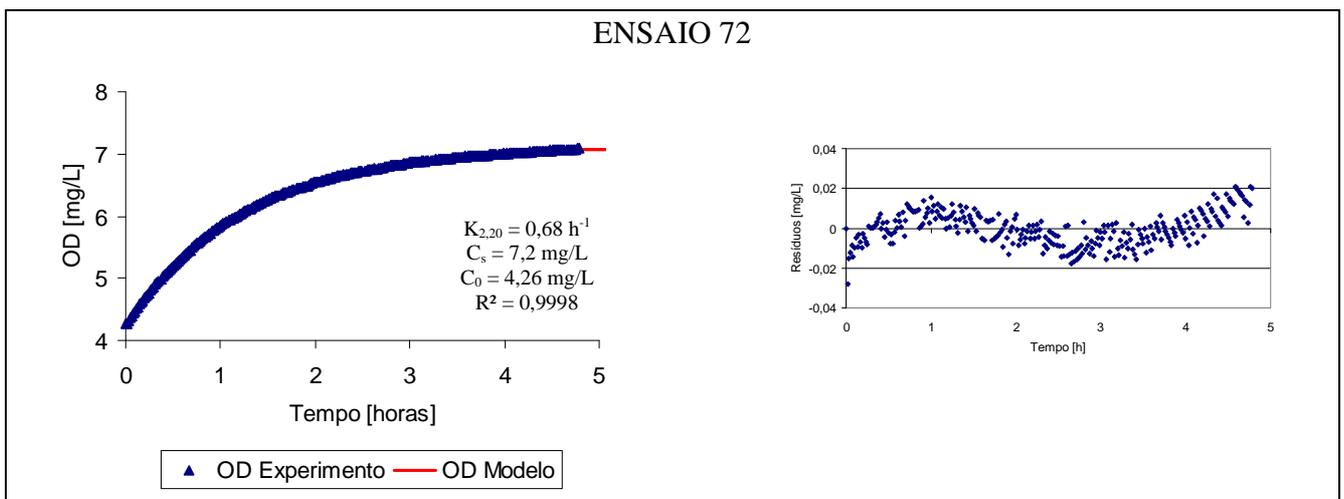


Figura A72 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

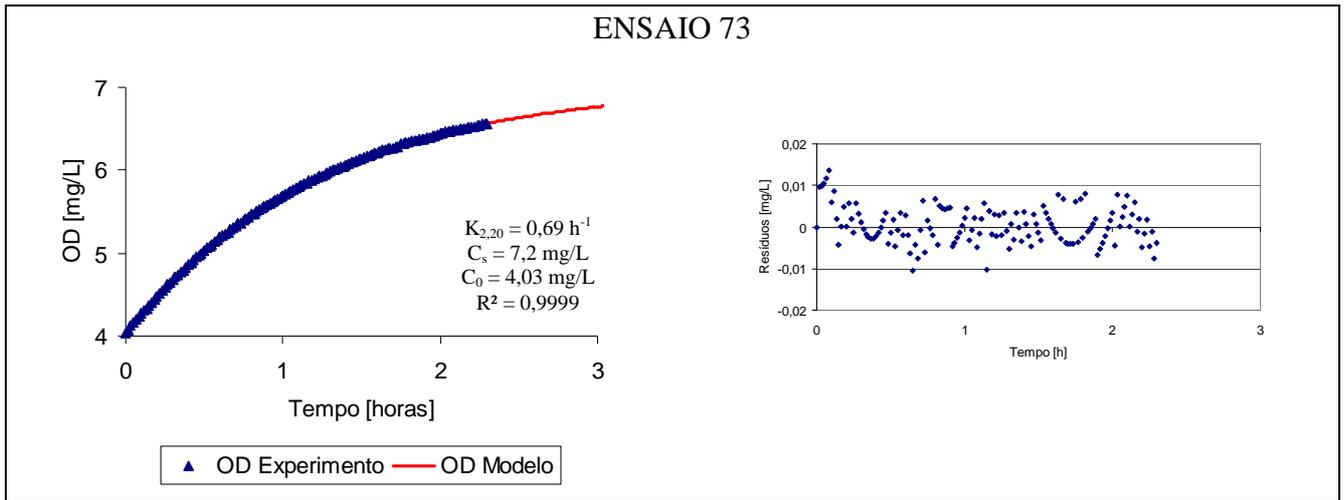


Figura A73 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

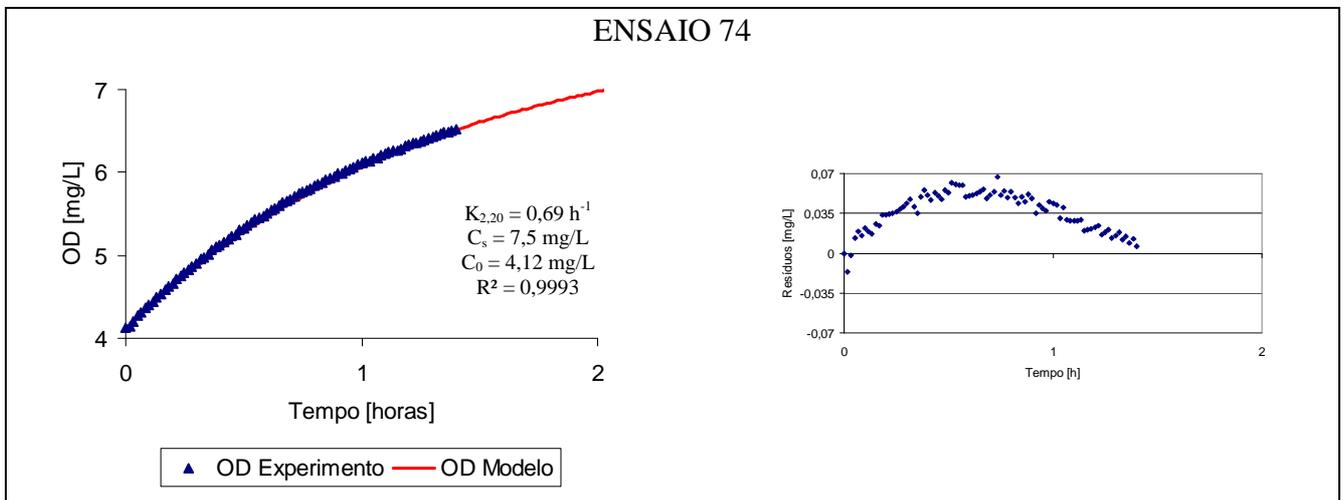


Figura A74 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

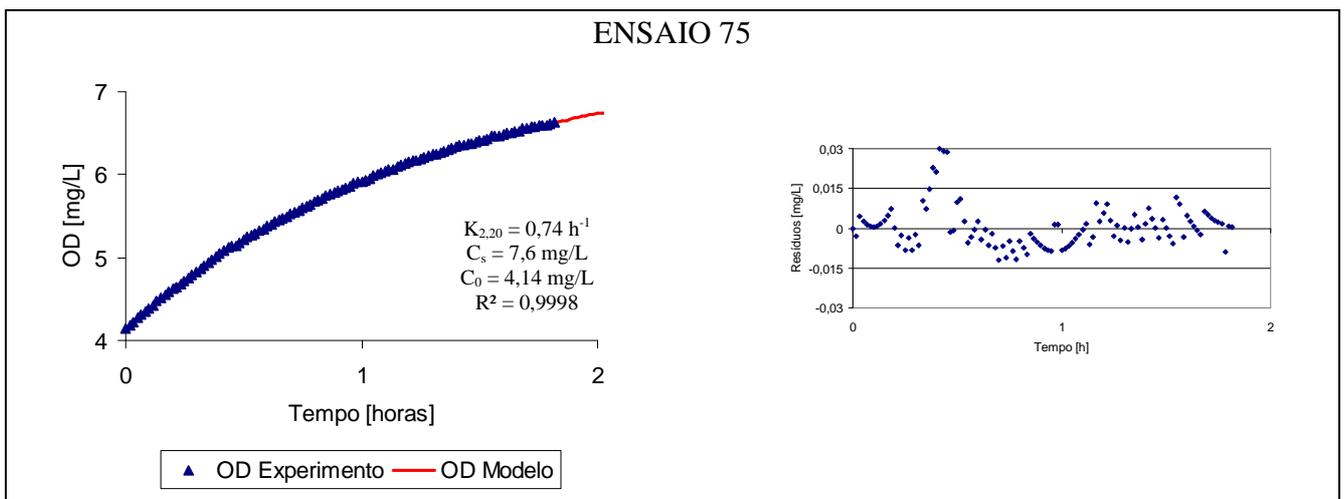


Figura A75 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

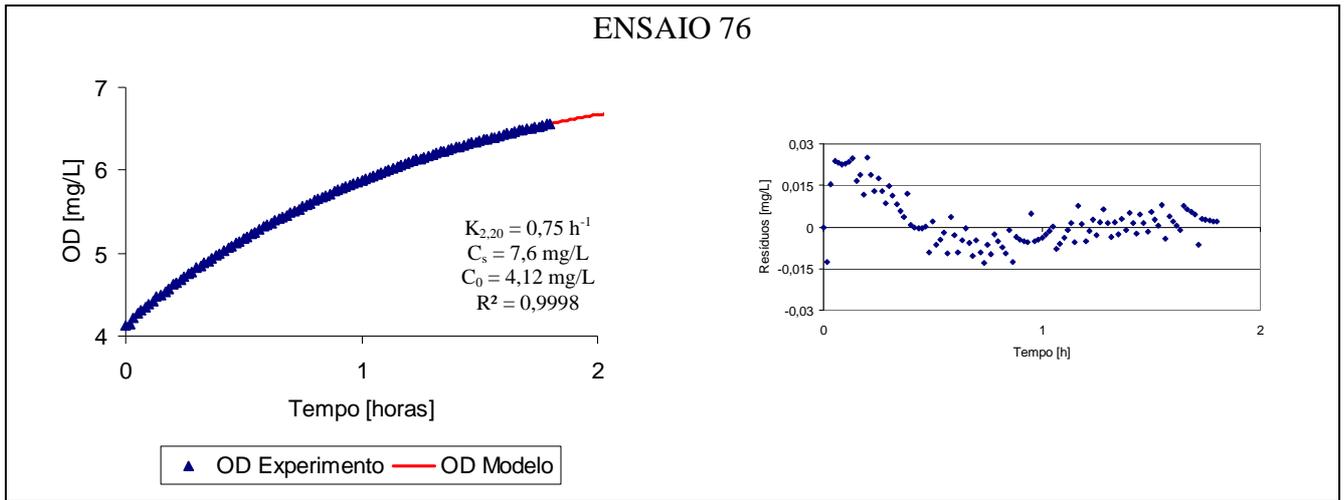


Figura A76 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

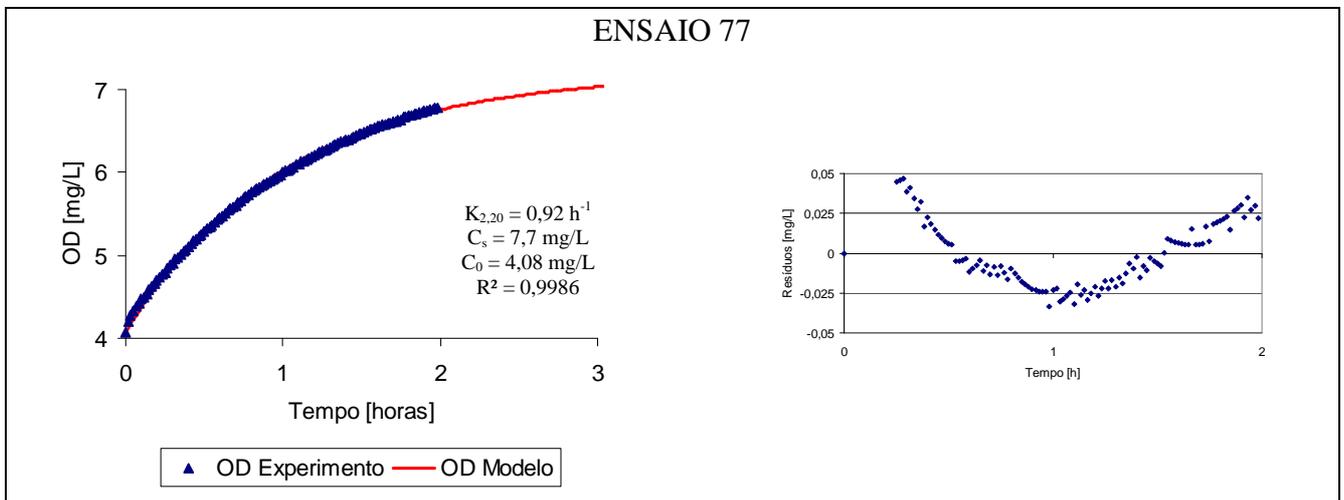


Figura A77 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

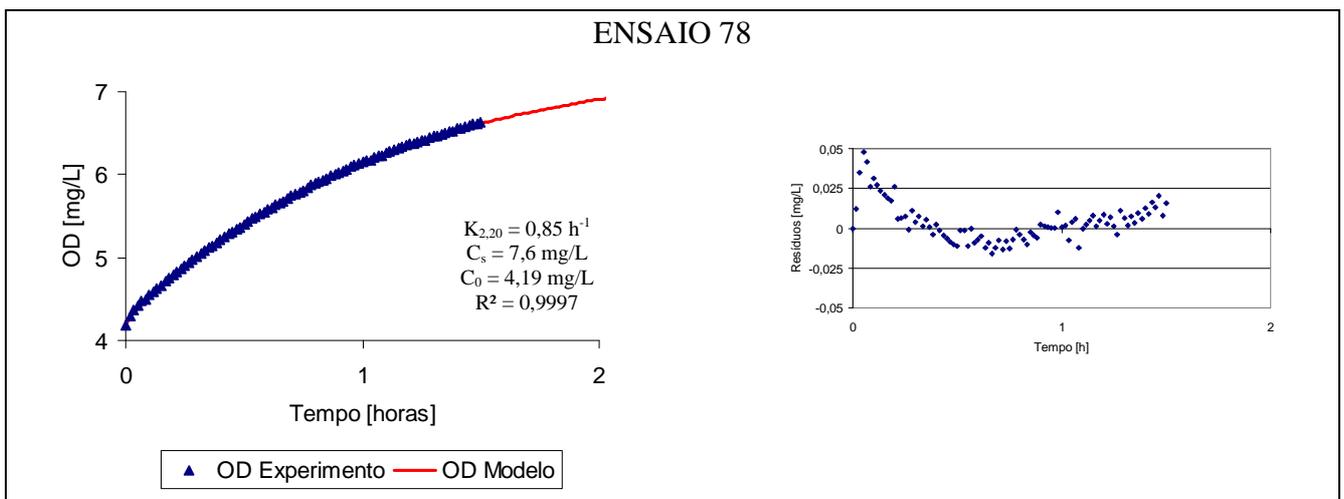


Figura A78 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

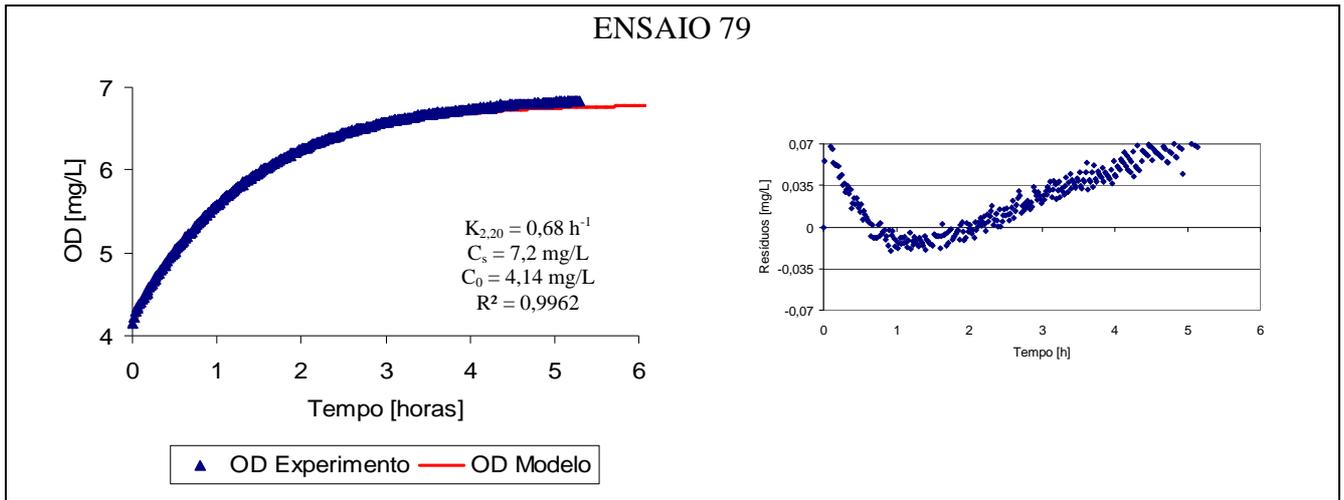


Figura A79 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

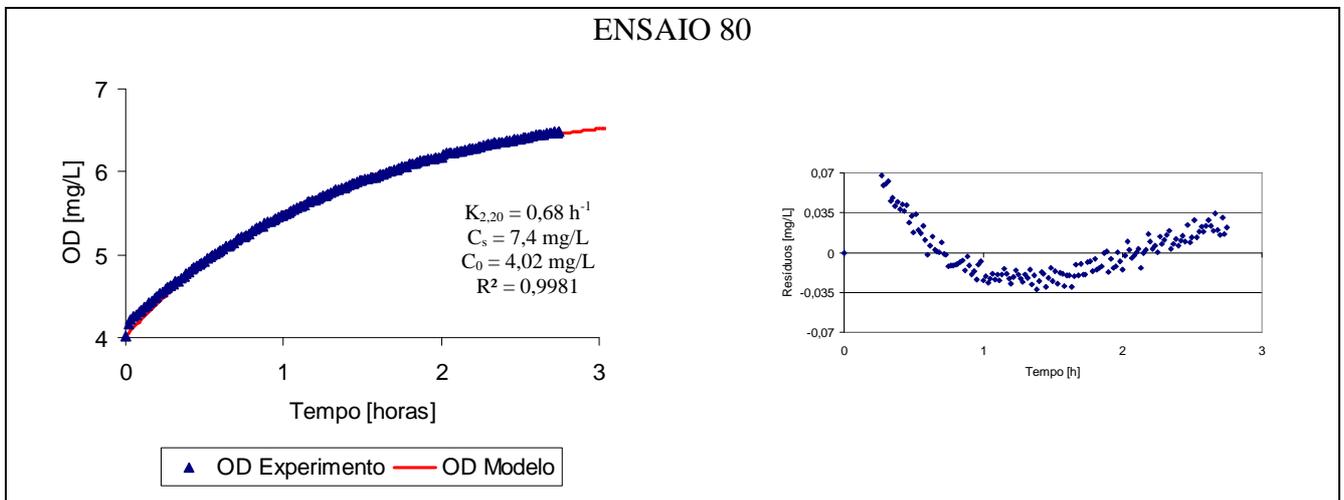


Figura A80 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

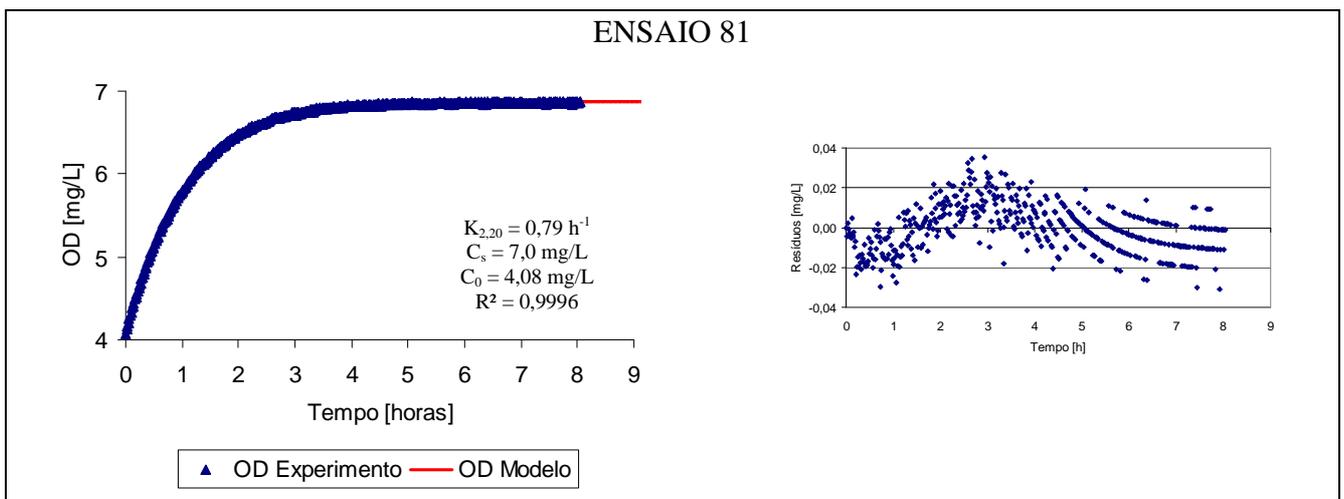


Figura A81 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

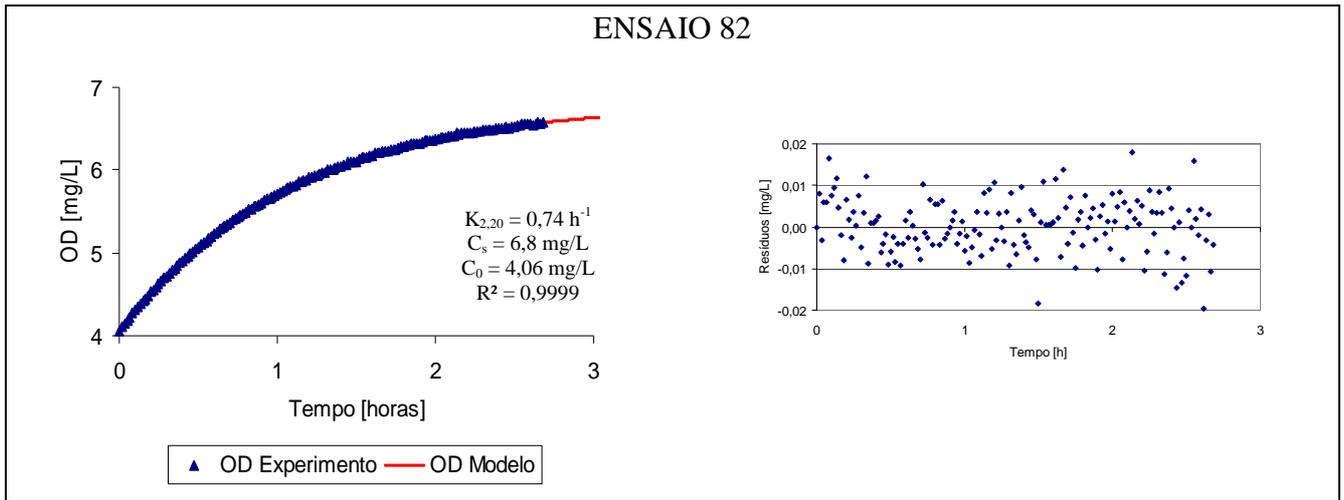


Figura A82 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

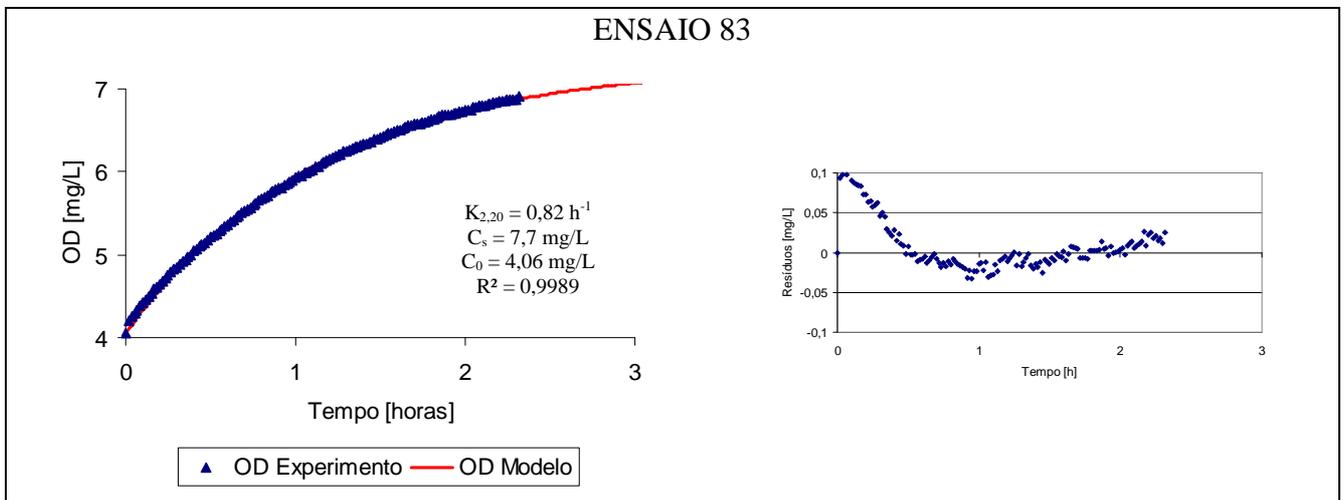


Figura A83 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

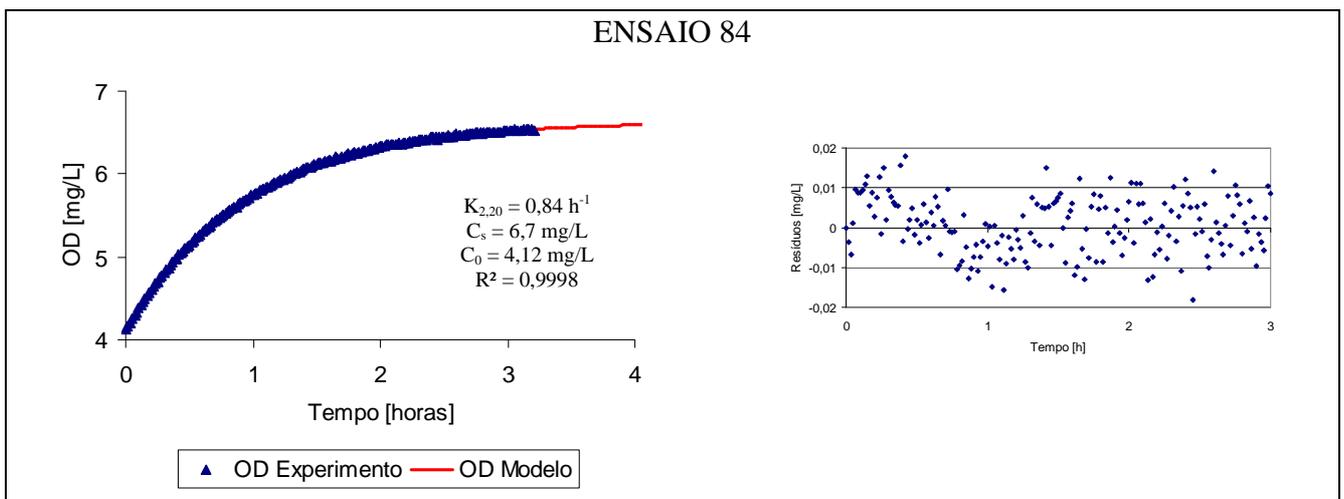


Figura A84 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

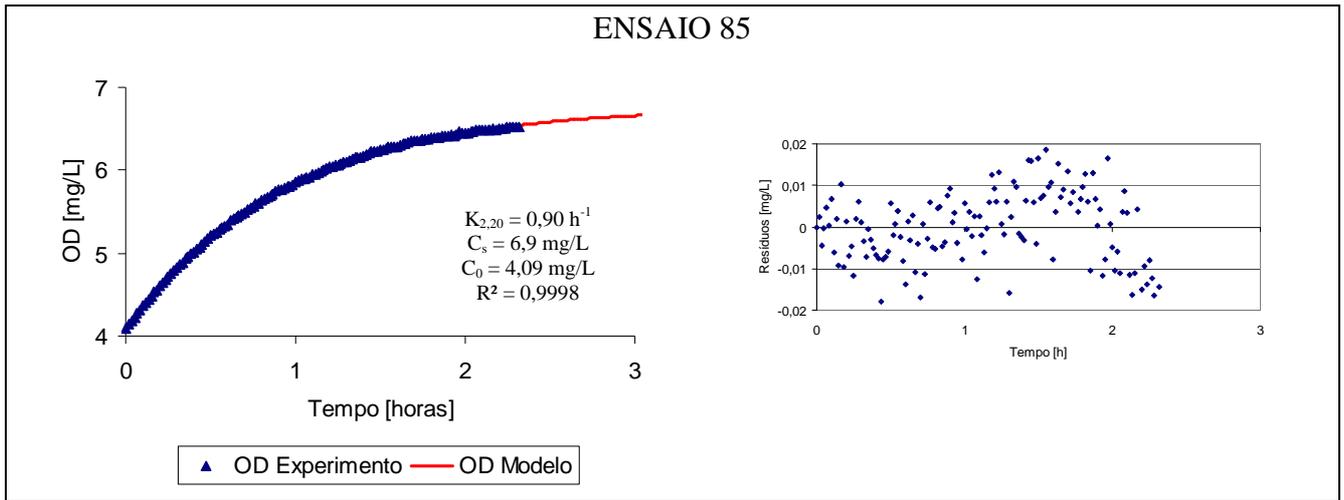


Figura A85 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

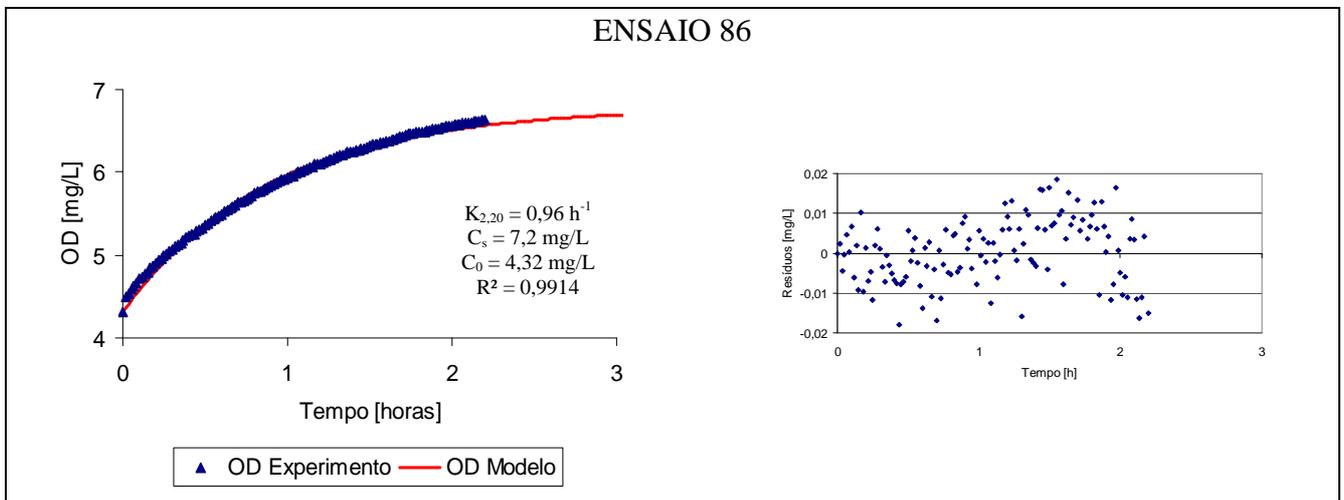


Figura A86 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

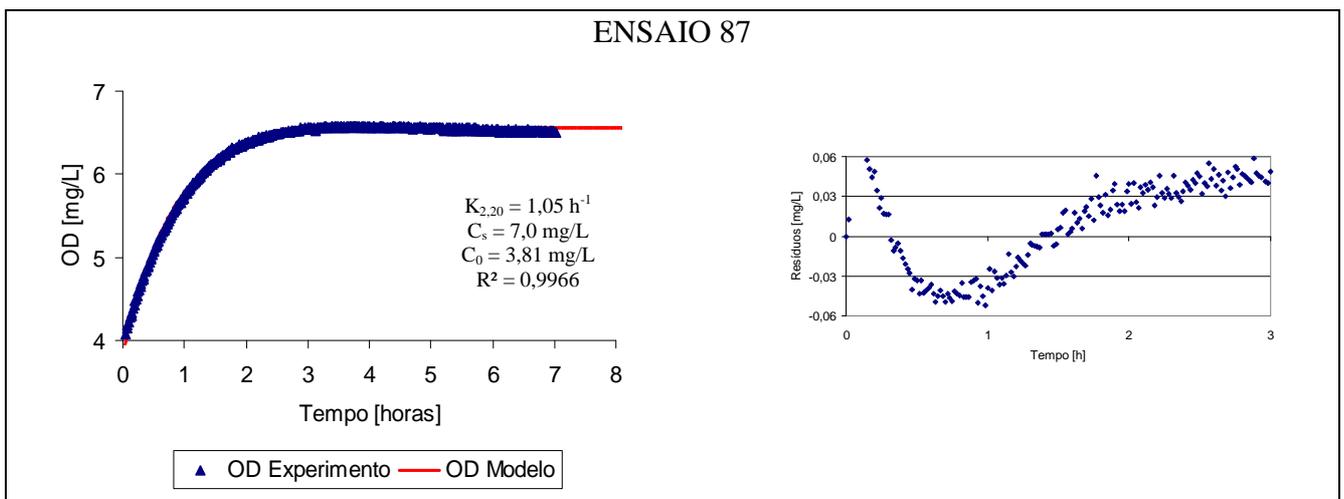


Figura A87 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

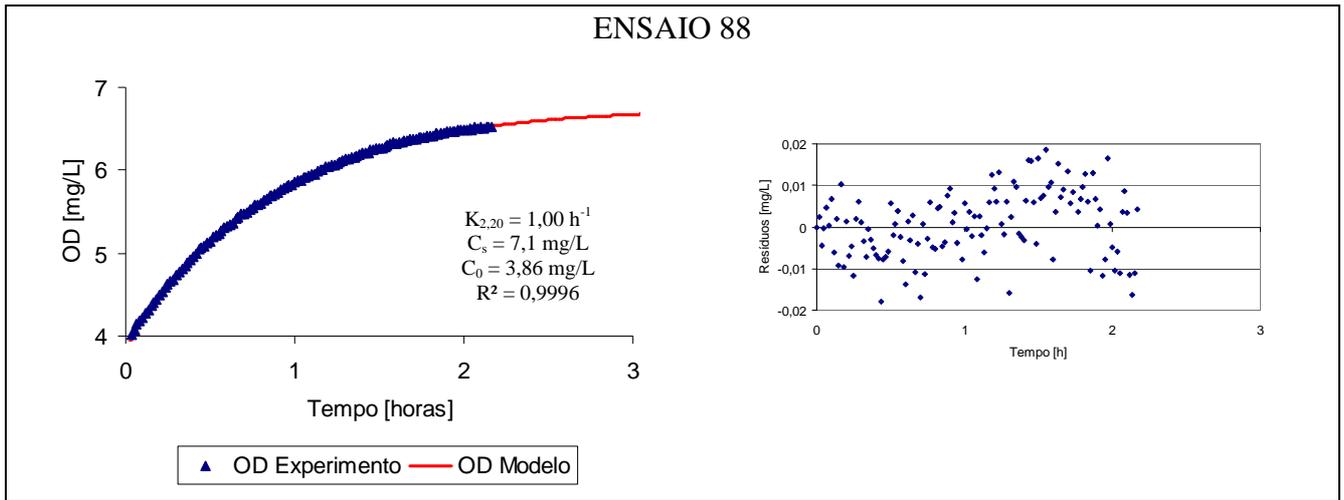


Figura A88 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

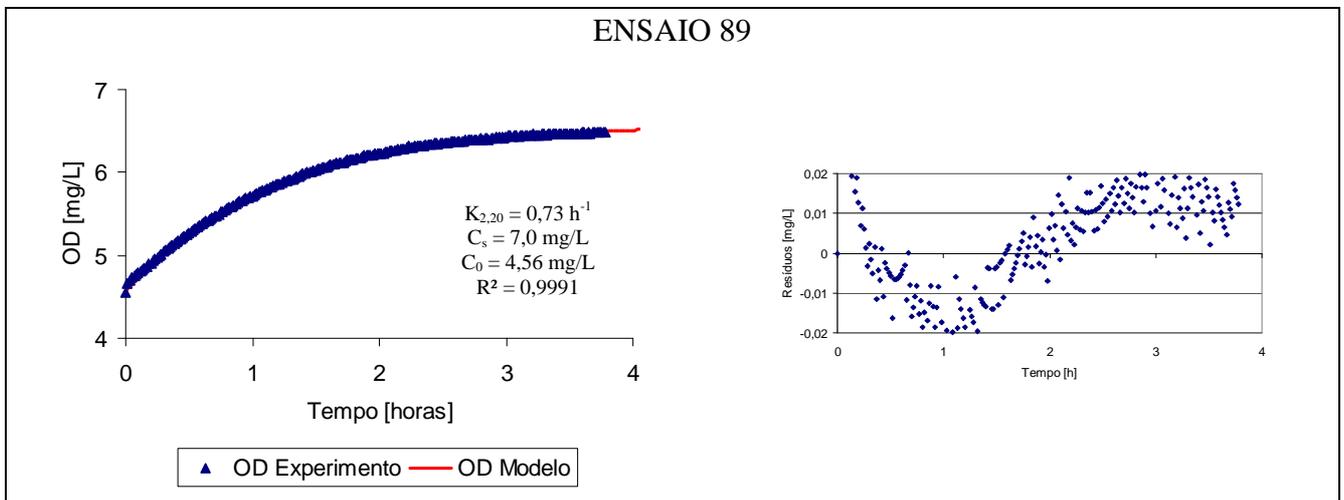


Figura A89 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.

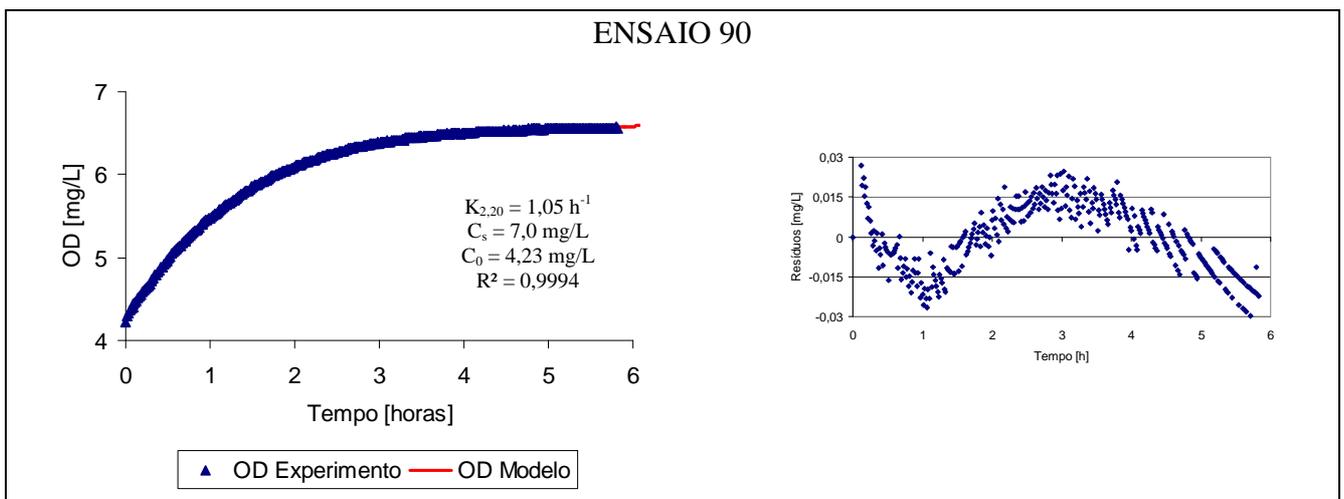


Figura A90 – Curva de reoxigenação e resíduos em função do tempo.