

FLÁVIA MARTINS DE QUEIROZ

**ESTUDO DA REAERAÇÃO DA ÁGUA EM CANAL
COM FUNDO DESLIZANTE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2013

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

Q3e
2013

Queiroz, Flávia Martins de, 1973-
Estudo da reaeração em água em canal com fundo deslizante
/ Flávia Martins de Queiroz. – Viçosa, MG, 2013.
xviii, 114 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Antônio Teixeira de Matos.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Recursos hídricos. 2. Água. 3. Água - Aeração - Modelos matemáticos. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

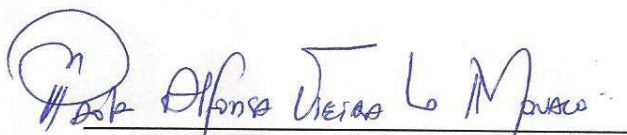
CDD 22. ed. 620.2514

FLÁVIA MARTINS DE QUEIROZ

**ESTUDO DA REAERAÇÃO DA ÁGUA EM CANAL
COM FUNDO DESLIZANTE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 04 de abril de 2013.



Paola Alfonsa Vieira Lo Mônaco




Sílvio Bueno Pereira



Alisson Carraro Borges



Marcos von Sperling
(Coorientador)



Antônio Teixeira de Matos
(Orientador)

Aos meus pais, Mozart (*in memoriam*) e Marize,
pela oportunidade da vida.

Aos meus queridos amigos de caminhada.

Aos meus amados, Ivano e Isabelle, grandes aliados.

*“A mente que se abre a uma nova idéia
jamais voltará ao seu tamanho original.”*
(Albert Einstein)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade de viver, aprender e perscrutar Suas leis naturais e eternas, ainda que meu trabalho e minha capacidade de compreensão sejam modestos frente à grandiosidade de Sua obra.

À Universidade Federal de Viçosa, por mais esta oportunidade e pela contribuição decisiva na minha formação profissional, especialmente a todos do Departamento de Engenharia Agrícola, os quais sempre estiveram presentes nesta caminhada.

Ao professor Antônio Teixeira de Matos, o qual confiou no meu trabalho e acreditou na realização deste projeto.

Ao professor Marcos von Sperling, da Universidade Federal de Minas Gerais, o qual acreditou no trabalho e com muita cordialidade e respeito forneceu importantes contribuições.

Ao CNPq, pelo financiamento da compra do equipamento fundamental à execução do trabalho.

Ao professor Aldo Tamburrino, da Universidad de Chile, o qual generosamente me forneceu uma cópia digitalizada de sua dissertação e me ajudou de forma decisiva no projeto do canal hidráulico.

Ao SENAI Roberto Mange de Anápolis, que foi parceiro, pois projetou e construiu a esteira, viabilizando, assim, a execução do trabalho; especialmente aos professores Márcio, José e Edsom, juntamente com seus alunos, os quais se empenharam nesta tarefa laboriosa.

A todos os companheiros de jornada, os quais colaboraram: uns, com a força de trabalho; alguns, com incentivo; outros, com “palpites”; e outros tantos, com desconfiança, descrença e incredulidade.

Aos queridos amigos da pós-graduação, Maria Joselma, Paola, Maike, Fabiana, Júnior, Antover, Silvano e Ed Carlo, por terem me ofertado, generosamente, o carinho e a amizade, neste tempo, que foi para mim o mais desafiador que já vivi.

Aos meus familiares, peço perdão pela minha ausência, pelas lágrimas e pelas marcas profundas que provoquei. Agradeço-lhes a paciência com as minhas limitações e a confiança de dias melhores.

BIOGRAFIA

FLÁVIA MARTINS DE QUEIROZ, filha de Mozart Vieira de Queiroz e Marize Martins de Queiroz, nasceu em Cataguases, Minas Gerais, aos 13 de junho de 1973.

Em 1992, ingressou no Curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG, concluindo-o em fevereiro de 1997, com o grau de Bacharel em Engenharia Agrícola.

Em março de 1998, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Viçosa, em nível de Mestrado, na área de Irrigação e Drenagem, submetendo-se à defesa da dissertação em outubro de 2000.

Em 2001, foi aprovada em concurso para professor substituto do curso de Matemática da Universidade Federal de Viçosa, onde lecionou até 2002.

Em 2004, foi contratada pela Universidade Estadual de Goiás para lecionar disciplinas relacionadas com a área de Irrigação e Drenagem.

Em 2009, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da UFV, em nível de Doutorado, na área de Recursos Hídricos e Ambientais, submetendo-se à defesa de tese em abril de 2013.

Em 2010, foi aprovada em concursos públicos, para área de Meio Ambiente, no Instituto Federal Goiano; e, para a área de Irrigação, da Universidade Estadual de Goiás, Unidade de Ciências Exatas e Tecnológica de Anápolis (UnUCET), Anápolis, Goiás, onde leciona até o momento.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xvi
INTRODUÇÃO GERAL	1
CAPÍTULO 1 - REVISÃO DE LITERATURA	7
1. METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO	7
2. MODELOS DE PREDIÇÃO DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO	10
2.1. Modelos conceituais	10
2.1.1. Teoria dos dois filmes	11
2.1.2. Teoria da renovação	13
2.2. Modelo dos grandes e pequenos vórtices	15
2.3. Modelos semiempíricos	17
2.4. Modelos empíricos	18
3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	22
4. REFERÊNCIAS	23
CAPÍTULO 2 - PROJETO E CONSTRUÇÃO DE CANAL HIDRÁULICO DE FUNDO DESLIZANTE PARA ESTUDO DA REAERAÇÃO	25
1. INTRODUÇÃO	26
2. CANAIS HIDRÁULICOS OU TÚNEIS HIDRODINÂMICOS EXPERIMENTAIS	27
3. MATERIAIS E MÉTODOS	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5. CONCLUSÃO	41

6. REFERÊNCIAS.....	42
CAPÍTULO 3 - CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DO ESCOAMENTO EM CANAL DE FUNDO DESLIZANTE	44
1. INTRODUÇÃO	45
2. CARACTERÍSTICA DA TURBULÊNCIA E FATOR DE FORMADO CANAL HIDRÁULICO	46
3. VELOCIDADE DO ESCOAMENTO DA ÁGUA	49
4. MATERIAIS E MÉTODOS	51
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5.1. Velocidade cisalhante da água e declividade do canal hidráulico.....	54
5.1.1. Velocidade média da água	56
6. CONCLUSÃO	60
7. REFERÊNCIAS.....	60
CAPÍTULO 4 - ESTUDO DA REAERAÇÃO EM ÁGUA LIMPA SOB OS ASPECTOS EXPERIMENTAL E DE PREDIÇÃO	63
1. INTRODUÇÃO	64
2. MATERIAIS E MÉTODOS	67
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
3.1. Reoxigenação da água	77
3.2. Análise do coeficiente de reaeração	79
3.3. Comparação entre os valores medidos e estimados por diferentes modelos de predição de K_2	84
3.4. Proposição de equação de estimativa	92
3.5. Análise de sensibilidade das equações propostas.....	95
3.6. Modelo matemático com base em turbulência.....	98
4. CONCLUSÃO	102
5. REFERÊNCIAS.....	103
CONCLUSÃO GERAL	107

RECOMENDAÇÕES PARA OUTROS TRABALHOS	108
APÊNDICE A - TESTES DE REAERAÇÃO.....	109
APÊNDICE B - DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO.....	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Equações empíricas preditivas do coeficiente de reaeração propostas por diferentes autores.....	21
Tabela 2.1 - Custo de execução do projeto do canal hidráulico com fundo deslizante.....	39
Tabela 3.1 - Velocidade média do escoamento da água em canal hidráulico de fundo deslizante e do deslocamento da esteira, considerando diferentes profundidades de lâmina d'água, bem como a relação entre a velocidade média e a da esteira e a declividade do fundo do canal	59
Tabela 4.1 - Dados meteorológicos médios da cidade de Anápolis, GO, de junho a outubro de 2012	71
Tabela 4.2 - Equações para estimativa do coeficiente de reaeração desenvolvidas por diferentes autores, utilizando modelo conceitual, semiempírico e empírico	72
Tabela 4.3 - Diferentes combinações das variáveis independentes (U, H, S, u^* , ff , Fr, R e Q) testadas na composição da equação preditora de K_2	75
Tabela 4.4 - Coeficiente de reaeração (K_2) obtido em testes conduzidos em canal hidráulico de fundo deslizante com diferentes profundidades de lâmina de água e velocidades de escoamento.....	81
Tabela 4.5 – Erros-padrão de estimativa (SE), médio normalizado (NME) e médio multiplicativo (MME), calculados ao comparar o valor de K_2 , determinado em canal hidráulico de fundo deslizante, com o predito, utilizando diferentes equações disponíveis na literatura, representativas dos modelos conceitual, semiempírico e empírico	90
Tabela 4.6 - Equações propostas de predição de K_2 com seus respectivos parâmetros: coeficiente de determinação R^2 e erros-padrão de estimativa (SE), médio normalizado (NME) e o médio multiplicativo (MME), calculados para verificação do ajuste dos modelos aos dados experimentais	94
Tabela 4.7 - Valor de n obtido a partir de dados experimentais de diferentes autores com o respectivo intervalo de confiança para 95% de probabilidade..	99
Tabela 1B - Equação cinética de primeira ordem ajustada aos dados experimentais de déficit de oxigênio dissolvido, em razão do tempo, obtidos em canal hidráulico com fundo deslizante	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema representativo de canais hidráulicos em circuito aberto (a) e fechado (b).....	28
Figura 2.2 - Geometria do canal hidráulico e regiões de escoamento, como proposto por Sarma et al. (1983).	29
Figura 2.3 - Vista, em corte, de um canal hidráulico com recirculação da água.	31
Figura 2.4 - Vista, em corte, de um canal hidráulico de fundo deslizante.	31
Figura 2.5 - Corte longitudinal (a) e planta baixa (b) do conjunto canal hidráulico e esteira transportadora.	34
Figura 2.6 - Canal hidráulico sem os fechamentos laterais e com a esteira transportadora.....	34
Figura 2.7 - Revestimento do canal com lona dupla face (a) e com lona de polietileno azul (b).	35
Figura 2.8 - Emenda do tapete de borracha com grampos (a) e em costura manual (b).....	36
Figura 2.9 - Detalhes das mudanças realizadas no sistema, em decorrência de uma série de problemas que ocorreu durante sua operação.	37
Figura 2.10 - Curva de calibração da velocidade da esteira no canal hidráulico.	38
Figura 3.1 - Esquema representativo da relação entre o número de grandes vórtices formados numa seção transversal de canal hidráulico para o fator de forma (B/H) igual a 6 do sentido de movimentação dos vórtices.	47
Figura 3.2 - Esquema representativo da formação de correntes secundárias em canais hidráulicos, cuja relação B/H < 5, e, por consequência, a ocorrência da velocidade <i>dip</i> , ou seja, velocidade máxima abaixo da superfície livre.....	48
Figura 4.1 - Dados experimentais brutos de concentração de oxigênio dissolvido na água, em razão do tempo, em testes de reaeração realizados em canal hidráulico com fundo deslizante, com diferentes lâminas (<i>H</i>) e velocidade média (<i>U</i>) da água variando de 0,10 ms ⁻¹ a 0,15 ms ⁻¹	78
Figura 4.2 - Curva ajustada aos dados experimentais de déficit de concentração de oxigênio dissolvido em razão do tempo, para diferentes profundidades e velocidades médias da água.....	80
Figura 4.3 - Curva ajustada aos valores experimentais de <i>K</i> ₂ , obtidos em canal hidráulico com fundo deslizante, em razão de diferentes velocidades de escoamento da água, para as profundidades de 0,11 m e 0,20 m.	83

Figura 4.4 - Comparação gráfica entre dados de K_2 obtidos experimentalmente, em canal hidráulico com fundo deslizante, e os estimados por equação preditora conceitual de O'Connor e Dobbins.	85
Figura 4.5 - Comparação dos dados de K_2 obtidos experimentalmente, em canal hidráulico com fundo deslizante, com os estimados por diferentes equações preditoras semiempíricas.....	87
Figura 4.6 - Comparação entre dados de K_2 obtidos experimentalmente, em canal hidráulico com fundo deslizante e os estimados por diferentes equações preditoras empíricas.....	89
Figura 4.7 - Análise de sensibilidade das equações de: A - Owens et al. (1964), B - Langbein e Durum (1967) e C - Bennet e Rathbun (1972) com visualização gráfica do efeito porcentual em K_2 , das variações de velocidade e profundidade da água, dentro do espectro em que as equações foram obtidas.....	91
Figura 4.8 - Apresentação gráfica da análise de sensibilidade das cinco equações preditoras de K_2 com base em características hidrodinâmicas do escoamento, proposta neste trabalho, em que (a) refere-se a $K_2 = a U b H c S d$; (b), a $K_2 = a S b f f c R d$; (c), a $K_2 = a u * b f f c R d$; (d), a $K_2 = a S b F r c R d$; e (e), $K_2 = a u * b F r c R d$	97
Figura 4.9 - Coeficiente de reaeração adimensionalizado, estimado a partir de dados experimentais obtidos em canais hidráulicos, comparado com os alcançados por equações preditoras que representam os fenômenos de pequenos vórtices (a) e de grandes vórtices (b).	101
Figura 1A - Dados experimentais brutos de concentração de oxigênio dissolvido na água, em razão do tempo, em testes de reaeração realizados em canal hidráulico com fundo deslizante e com lâminas de 0,11 m e 0,13 m e diferentes velocidades de escoamento.....	109
Figura 2A - Dados experimentais brutos de concentração de oxigênio dissolvido na água, em razão do tempo, em testes de reaeração realizados em canal hidráulico com fundo deslizante e com lâminas de 0,15 m e 0,17 m e diferentes velocidades de escoamento.....	110
Figura 3A - Dados experimentais brutos de concentração de oxigênio dissolvido na água, em razão do tempo, em testes de reaeração realizados em canal hidráulico com fundo deslizante e com lâminas de 0,20 m e 0,25 m e diferentes velocidades de escoamento.....	111
Figura 1B - Curva ajustada aos dados experimentais de déficit de concentração de oxigênio dissolvido, em razão do tempo, obtidos em canal hidráulico com fundo deslizante, para diferentes velocidades da água e profundidades de escoamento.....	113

LISTA DE SÍMBOLOS

A – área da interface líquido-gás	[L ²]
B – largura do canal hidráulico	[L]
C – concentração molar do soluto no líquido	[M L ⁻³]
c – constante de integração da equação logarítmica	adimensional
D – déficit de oxigênio dissolvido no tempo t	[M L ⁻³]
D ₀ – déficit de oxigênio dissolvido no tempo t=0	[M L ⁻³]
d _a – diâmetro molecular do gás a	[L]
d _b – diâmetro molecular do gás b	[L]
D _j – taxa de respiração de plantas a jusante	[M L ⁻³]
D _m – coeficiente de difusão molecular	[L ² T ⁻¹]
D _M – déficit de oxigênio dissolvido a montante	[M L ⁻³]
D _{m,a} – coeficiente de difusão molecular do gás a	[L ² T ⁻¹]
D _{m,b} – coeficiente de difusão molecular do gás b	[L ² T ⁻¹]
F _m – fluxo de massa	[M L ⁻² T ⁻¹]
Fr – número de Froude	adimensional
g – aceleração da gravidade	[L T ⁻²]
H – profundidade da lâmina de água	[L]
k – constante de von kármán	adimensional
K ₁ – coeficiente de desoxigenação	[T ⁻¹]
K ₂ – coeficiente de reaeração	[T ⁻¹]
k _g – coeficiente de difusão molecular por meio do filme gasoso	[L ² T ⁻¹]
K _{g,a} – coeficiente de transferência de massa do gás a	[L T ⁻¹]
K _{g,b} – coeficiente de transferência de massa do gás b	[L T ⁻¹]
K _H – constante de Henry	adimensional
K _L – coeficiente convectivo de transferência de massa	[LT ⁻¹]
k _L – coeficiente de difusão molecular por meio do filme líquido	[L ² T ⁻¹]
K _L ⁺ – coeficiente convectivo de transferência de massa adimensionalizado	adimensional
K _M – coeficiente de reaeração observado	[T ⁻¹]
K _p – coeficiente de reaeração predito	[T ⁻¹]
L – espessura do filme líquido	[L]
L ₀ – demanda bioquímica de oxigênio inicial	[M L ⁻³]
M – massa molar	[M]

M_a – transferência de oxigênio dissolvido na interface ar-água	$[M L^{-2} T^{-1}]$
MME – erro médio multiplicativo	adimensional
NME – erro médio normalizado	[%]
P – concentração do soluto no gás	$[M L^{-3}]$
p – consumo de oxigênio pelos depósitos bênticos a montante	$[M L^{-3}]$
p' – consumo de oxigênio pelos depósitos bênticos a jusante	$[M L^{-3}]$
P_a – produção de oxigênio dissolvido via fotossíntese	$[M L^{-3} T^{-1}]$
Q – vazão	$[L^3 T^{-1}]$
Q_0 – taxa de variação de oxigênio dissolvido no trecho	$[M L^{-2} T^{-1}]$
r – frequência da renovação superficial	adimensional
R – número de Reynolds	adimensional
R^* – número de Reynolds cisalhante	adimensional
R_a – taxa de consumo de oxigênio dissolvido por todos os processos	$[M L^{-2} T^{-1}]$
R_H – raio hidráulico	[L]
S – declividade do fundo do canal	$[L L^{-1}]$
Sc – número de Schmidt	adimensional
SE – erro-padrão de estimativa	$[T^{-1}]$
T – temperatura em graus celsius	[t]
t – tempo	[T]
U – velocidade média do escoamento	$[L T^{-1}]$
u^* – velocidade cisalhante	$[L T^{-1}]$
u' – é o rms das flutuações da velocidade	$[L T^{-1}]$
U_b – velocidade de movimentação da esteira	$[L T^{-1}]$
U_z – velocidade na posição vertical z , em referencial fixo	$[L T^{-1}]$
V – volume molar	$[L^3]$
W – massa do soluto	[M]
ϕ – parâmetro de associação do solvente	adimensional
μ – viscosidade dinâmica	$[ML^{-1}T^{-1}]$
ρ – massa específica	$[M L^{-3}]$
ν – viscosidade cinemática	$[L^2 T^{-1}]$

RESUMO

QUEIROZ, Flávia Martins de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2013. **Estudo da reaeração da água em canal com fundo deslizante.** Orientador: Antônio Teixeira de Matos. Coorientador: Marcos von Sperling.

Este trabalho teve por objetivos estudar o processo de reaeração de água limpa em canal raso; avaliar os principais fatores intervenientes; e propor equações preditoras, que possibilitassem a estimativa do coeficiente de reaeração (K_2), a partir das variáveis hidráulicas e de outras que representassem o processo de transferência de massa do oxigênio do ar para a água, no seu escoamento. Para a execução do experimento, foi necessária a construção de canal hidráulico, nas dimensões de comprimento, largura e altura de 5,00 m x 1,60 m x 0,80 m, e esteira transportadora, que foi posicionada no fundo do canal para movimentar a água em diferentes velocidades e promover turbulência. Para a condução dos testes de reaeração, inicialmente, o oxigênio dissolvido, presente na água da rede de abastecimento, foi removido por meio da adição de sulfito de sódio. A reintrodução do oxigênio na água ocorreu pelo fenômeno físico de transferência de massa, que foi favorecido pela movimentação da água em escoamento. Os testes foram conduzidos submetendo a esteira às velocidades de 0,54; 0,67; 0,74; 0,84; 0,94; 1,14; e 1,35 ms^{-1} , com profundidade das lâminas d'água na faixa de 0,11 a 0,25 m. Essas condições proporcionaram à água, velocidade média na faixa de 0,05 ms^{-1} a 0,20 ms^{-1} . Aos dados experimentais previamente tratados e transformados em déficit de oxigênio dissolvido ajustou-se o modelo cinético de decaimento de primeira ordem e determinou-se o parâmetro denominado coeficiente de reaeração (K_2) da água para os 27 testes conduzidos. Com os dados hidráulicos do canal, calculou-se o valor de K_2 , utilizando-se várias equações preditoras teóricas, semiempíricas e empíricas disponíveis na literatura. A avaliação da adequabilidade das equações se deu por meio da análise do coeficiente de determinação (R^2) e das estatísticas do erro-padrão de estimativa (SE), erro médio normalizado (NME) e erro médio multiplicativo (MME). Valores de K_2 estimados utilizando-

se as equações preditoras foram comparados com os calculados a partir de dados obtidos nos testes (medição da quantidade de oxigênio incorporado), tendo sido verificado que os melhores ajustamentos ocorreram nas equações semiempíricas propostas por Krenkel e Orlob (1962), Cadwallader e McDonnell (1969), Parkhurst e Pomeroy (1972), embora algumas equações empíricas também tenham fornecido bom ajuste. Foram testadas 20 combinações de variáveis para que se obtivesse uma equação preditiva geral, de bom ajuste aos dados experimentais. A equação que envolveu as variáveis fator de forma, declividade e número de Reynolds foi considerada a mais adequada porque além de ter apresentado coeficiente de determinação elevado e parâmetros significativos, as variáveis apresentaram semelhante grau de importância na análise de sensibilidade do modelo matemático. Foi analisado também um modelo baseado na teoria da renovação superficial e no fenômeno da turbulência, que indicou que os grandes vórtices foram os agentes principais no transporte de oxigênio do ar para a água. Com isso, foi proposta outra equação, ajustada, utilizando-se dados deste trabalho e do de Moog e Jirka (1999), em que se obteve estimativa do fenômeno físico.

ABSTRACT

QUEIROZ, Flávia Martins de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April, 2013. **Reaeration study of water in moving-bed channel**. Adviser: Antônio Teixeira de Matos. Co-adviser: Marcos von Sperling.

This work aimed to study the reaeration of clean water in shallow channel process, to evaluate the main factors intervening and to propose predictive equations, which could allow the estimation of the reaeration coefficient (K_2) from hydraulic and other variables representing the process of mass transfer of oxygen from air to flowing water. To implement the experiment was necessary to build a water channel, with the length, width and height dimensions of 5.00 m x 1.60 m x 0.80 m, and a conveyor belt, which was positioned at the bottom of the channel, whose function was to move the water at different velocities and to promote turbulence. To conduct reaeration tests, initially, the oxygen dissolved, present in the water supply network, was removed by adding sodium sulfite. The reintroduction of oxygen in the water was due to physical phenomenon of mass transfer, which was favored by the water motion. The tests were conducted by subjecting the belt slide at the speeds of 0.54, 0.67, 0.74, 0.84, 0.94, 1.14 and 1.35 ms^{-1} , with of water depths in range 0.11 to 0.25 m. These conditions provided the water an average speed in the range of 0.05 ms^{-1} to 0.20 ms^{-1} . To the experimental data, previously treated and converted into a deficit of dissolved oxygen, were fitted to first-order kinetics model and determined the parameter named reaeration coefficient (K_2) of water for all 27 tests conducted. With the hydraulic channel data, the value of K_2 was estimated using various predictive theoretical, empirical and semiempirical equations available in the literature. The suitability of the equations have been evaluated by analyzing the coefficient of determination (R^2) and error estimation such as standard error (SE), normal mean error (NME) and mean multiplicative error (MME). Estimated K_2 values using predictive equations were compared to those calculated from data obtained in the tests (measurement of absorbed oxygen), having been found that the best adjustments occurred in semiempirical equations proposed by Krenkel and Orlob (1962), Cadwallader

and McDonnell (1969), Parkhurst and Pomeroy (1972), although some empirical also have provided good fit. Twenty combinations of variables were tested to obtain a predictive general equation that produce a good fit to experimental data. The equation involving the variables shape factor channel, slope and Reynolds number was considered the most appropriate because it presented a high determination coefficient and significant parameters, and also variables showed a similar degree of importance in the sensitivity analysis of the mathematical model. It was also analyzed a model based on surface renewal theory and the phenomenon of turbulence, which indicated that large vortices were the principal agents in the transport of oxygen from air to water. Therefore, another equation was proposed, adjusted using data obtained in this work and the Moog and Jirka (1999), with which the adequate estimation of physical phenomenon was obtained.

INTRODUÇÃO GERAL

A qualidade da água dos corpos receptores é influenciada pelo lançamento de efluentes de origem orgânica, já que na sua biodegradação por microrganismos aeróbios há consumo do oxigênio dissolvido (OD), podendo sua concentração atingir níveis críticos, o que inviabilizaria a vida de organismos aeróbios nesse meio. Existe, entretanto, tendência de natural restabelecimento do equilíbrio perdido na concentração de OD e essa capacidade de autorecuperação ou autodepuração do corpo hídrico se dá por meio da absorção do oxigênio atmosférico pelo meio líquido via processos de fotossíntese e de reaeração.

A fotossíntese tem maior importância, para a recuperação de oxigênio, em meios lânticos, onde existem plantas aquáticas vivas em grande quantidade. Em rios sujeitos a fortes cargas de sedimentos em suspensão, ou seja turvos, a produção de oxigênio por essa via é pequena, podendo ser desprezível (GLEIZER, 1992). A reaeração tem maior importância em meios lóticos, sendo a incorporação de oxigênio do ar atmosférico tanto maior quanto maior for o turbilhonamento da água em escoamento.

A reaeração, segundo Bennett e Rathbun (1972), é definida como a incorporação, por meios físicos, do oxigênio atmosférico na água, sendo esse o principal processo em que as águas recuperam o oxigênio consumido na biodegradação da matéria orgânica. Em águas turbulentas, esse processo físico ocorre por efeito combinado da difusão molecular e da difusão turbulenta. A turbulência promove a mistura da água e a troca contínua da camada superficial, saturada por oxigênio atmosférico, pelas camadas mais profundas. A renovação ou troca de posição nas camadas possibilita o aumento na taxa de entrada de moléculas de oxigênio na superfície do corpo hídrico, com a subsequente difusão por meio de todo o volume de água (GLEIZER, 1992).

O conhecimento da capacidade de reaeração da água é, portanto, fundamental para a computação do oxigênio dissolvido, tanto em modelos de qualidade como para alocação de cargas orgânicas no corpo hídrico (MOOG; JIRKA, 1998). A precisão da medida ou estimativa do OD pode ser a chave de um programa de controle de poluição orgânica, sendo a base necessária para a determinação acurada do grau de tratamento exigido para os rejeitos,

podendo ser o fator principal na avaliação dos custos de um programa de controle de qualidade de água (VENDRAME, 1982).

Para o estudo de reaeração em rios, existem algumas técnicas em que envolvem grande esforço, com pequena possibilidade de repetição, visto que as condições do escoamento real são dinâmicas. Além disso, essas não permitem o controle de muitas variáveis, sejam elas hidráulicas ou ambientais. Por isso, o estudo em canais hidráulicos instalados em laboratório torna-se alternativa viável, por permitir a supressão das desvantagens dos estudos realizados em condições de campo. Entretanto, para que esse tipo de estudo, realizado em laboratório, seja representativo de condições reais, deve-se atender a vários requisitos geométricos no canal hidráulico, a fim de possibilitar que o escoamento se desenvolva plenamente, como seria obtido em canal natural.

Para que se possa representar as condições reais do escoamento em canais hidráulicos tradicionais, cujo movimento da água se dá por diferença de energia potencial, o comprimento do canal tem que ser, no mínimo, igual a cem vezes a profundidade da lâmina de água (MOOG; JIRKA, 1999). A alternativa é o canal com fundo deslizante, cujas dimensões são menores que as do tradicional. Em contrapartida, a construção e operação de tal equipamento têm maior nível de complexidade e os dados de características hidráulicas nele obtidos têm de passar por tratamento matemático apropriado, para que possam se relacionar com as condições que ocorreriam em campo.

Tendo em vista a relevância do assunto, muito esforço vem sendo empreendido por pesquisadores do mundo todo, para compreender melhor o fenômeno físico das trocas gasosas entre o ar e a água. Por isso, muitos experimentos em campo e em laboratório hidráulico têm sido desenvolvidos e das observações efetuadas várias teorias surgiram. A pioneira foi a apresentada por Lewis e Whitman (1924), conhecida como teoria dos dois filmes. A partir dela, outras foram desenvolvidas como a teoria da renovação de Higbie (1935). Pautadas em modelos teóricos, algumas equações semiempíricas e dezenas de empíricas foram ajustadas para a predição do coeficiente de reaeração por diversos pesquisadores, em que se utilizam, como variáveis independentes, características hidráulicas e do escoamento, como profundidade, declividade e velocidade média. Sobre essas equações, algumas

delas foram geradas para ampla faixa de profundidade, variando de centímetros até vários metros, como a equação de Owens et al. (1964), sendo comum encontrar referências na literatura sobre superestimativas de K_2 , quando se utiliza essa e outras equações para a predição, principalmente em rios rasos.

Em estudos de alocação de cargas poluidoras, o período crítico ocorre na estação seca, em que o volume de água dos rios, em alguns casos, reduz-se consideravelmente. Daí a relevância do estudo desse tema, para condições de escoamento com lâminas de pequena profundidade, como ocorreria em rios rasos. Considerando que o processo de autodepuração está fortemente relacionado ao coeficiente de reaeração, torna-se essencial a determinação experimental de K_2 , para pequenas profundidades, para obter equações preditoras e, ou, fazer novas proposições, direcionadas para essas condições, visto que as equações preditoras de K_2 disponíveis na literatura são confiáveis em situações particulares para as quais foram desenvolvidas, conforme relataram Melching e Flores (1999), fornecendo valores muito elevados de K_2 em escoamentos rasos, o que nem sempre é verificado na prática.

Segundo Janzen et al. (2006), o processo de reaeração está associado ao fenômeno da turbulência, que se caracteriza por movimento altamente aleatório, instável e tridimensional, cujo equacionamento não possui, ainda, solução analítica, mas, somente numérica, para baixos números de Reynolds, no contexto da simulação numérica direta (DNS). Tanto o movimento turbulento como a transferência de massa, associada a esse, são difíceis de serem previstos e descritos teoricamente. Essa complexidade do fenômeno das trocas gasosas entre o ar e a água tem se refletido na dificuldade em obter quantificações definitivas; muitas vezes, ao se priorizarem formulações simples e de fácil aplicação, são excluídos das equações variáveis que estão altamente relacionadas com o fenômeno físico da troca gasosa, dessa forma, limitando a sua capacidade preditora.

Estrutura da tese

Para o desenvolvimento deste trabalho, algumas etapas tiveram de ser cumpridas. Na etapa inicial, houve a construção e operação do canal hidráulico com fundo deslizante, cujas características geométricas e de operação

influenciaram decisivamente no estudo de reaeração, que foi o objetivo final do trabalho. Nas fases seguintes, avaliou-se o escoamento, em que as características eram também fundamentais para a reaeração e geração de banco de dados, que possibilitasse ajuste de equações de predição do coeficiente de reaeração da água.

Considerando que a experiência adquirida na construção e operação do canal hidráulico deveria ser repassada a pesquisadores interessados em construir estruturas semelhantes, optou-se por apresentá-la em capítulos separados da avaliação do escoamento, além de um capítulo inicial de revisão de literatura sobre as metodologias de determinação experimental K_2 e os principais modelos de predição. Dessa forma, a tese foi dividida em quatro capítulos.

No capítulo 1, “Revisão de literatura”, foi realizada uma revisão de literatura em que são descritas as metodologias do balanço de oxigênio dissolvido, da quebra do equilíbrio e do traçador gasoso para determinação em campo de K_2 , sendo incluídos também os modelos conceitual, semiempírico e empírico de predição de K_2 e algumas das equações mais citadas na literatura, que representam esses modelos.

“Projeto e construção de canal hidráulico de fundo deslizante para estudo da reaeração”, no capítulo 2 abordou-se a construção e operação do canal hidráulico com fundo deslizante. Os assuntos tratados foram os critérios de dimensionamento, materiais utilizados na construção, custos de construção e problemas operacionais. Na literatura, existem relatos do uso de equipamentos semelhantes ao utilizado neste trabalho para estudos hidráulicos; entretanto, para estudos de reaeração, as informações são muito escassas.

Em “Características hidráulicas do escoamento em canal de fundo deslizante”, no capítulo 3, abordaram-se as principais características hidráulicas, que são de interesse no estudo da reaeração, e o tratamento matemático em que os dados foram submetidos para que representassem o escoamento em um canal com fundo fixo e pudessem, assim, serem comparados àqueles que foram observados em um canal natural.

No capítulo 4, “Estudo da reaeração em água limpa sob os aspectos experimental e de predição”, discutiu-se a obtenção experimental do coeficiente

de reaeração e avaliou-se a capacidade de predição de algumas equações disponíveis na literatura. A partir dos resultados, juntamente com a análise feita por diversos autores, os quais relataram sobre os fatores que devem estar relacionados com a transferência de massa do oxigênio do ar para a água, fez-se a proposição de equações preditoras. Essas equações foram obtidas por combinação linear de diversos fatores como velocidade, profundidade, velocidade cisalhante, número de Froude e de Reynolds etc. Neste estudo, conseguiu-se chegar a equações que foram significativas e que envolveram fatores que representam alguns fenômenos físicos afetos ao escoamento da água. Avaliou-se, também, um modelo, com base no fenômeno de turbulência, que está relacionado com a teoria da renovação superficial. Tal modelo permitiu inferir sobre que fenômeno estaria mais fortemente relacionado com a transferência de massa, se pequeno ou grande vórtice, que, por sua vez, referiu-se à taxa de dissipação de energia no meio.

Objetivos gerais

Estudar o processo de reoxigenação da água em canal hidráulico com fundo deslizante, para profundidade de lâmina de água que caracterize escoamento raso; identificar os principais fatores intervenientes no processo de reaeração; e propor equações de predição do coeficiente de reaeração.

Objetivos específicos

- Construir um canal hidráulico com fundo deslizante para avaliar as condições de operação para estudo do processo de reaeração.
- Relacionar variáveis hidráulicas (velocidade média e velocidade cisalhante) obtidas no escoamento da água do canal hidráulico de fundo deslizante com as obtidas em canais hidráulicos tradicionais, com diferentes declividades de fundo.
- Obter o coeficiente de reaeração em água limpa para diferentes profundidades de lâminas e velocidades de escoamento.
- Avaliar a capacidade de predição do coeficiente de reaeração da água, de algumas equações de estimativa disponíveis na literatura, para condições de escoamento raso.

- Identificar as variáveis hidrodinâmicas de maior influência, propondo a equação preditora do processo de reaeração da água, para condições de escoamento raso.
- Detectar a estrutura de turbulência de maior influência no processo transferência de oxigênio do ar para a água a fim de propor a equação de predição.

CAPÍTULO 1

REVISÃO DE LITERATURA

1. METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO

Na avaliação experimental de K_2 , há três métodos assim denominados: técnica do balanço de oxigênio dissolvido (STREETER; PHELPS, 1925), técnica da quebra do equilíbrio (ZOGORSKI; FAUST, 1973); e técnica do traçador (TSIVOGLOU; WALLACE, 1972).

A técnica do balanço de oxigênio dissolvido (OD) possibilita que se obtenha K_2 em rios onde a presença de OD deve-se, prioritariamente, à reaeração superficial e ao grau de poluição, pois caso contrário a variação de OD seria muito pequena, causando imprecisão ao estudo (GLEIZER, 1992). O método consiste em medir o déficit de OD em um trecho do rio, sob condições hidráulicas semelhantes, medindo-se ou calculando-se todas as fontes e os sumidouros de oxigênio dissolvido, exceto a reaeração. O K_2 é obtido por meio do resíduo entre o déficit de OD e as fontes e os sumidouros envolvidos (GLEIZER, 1992). Em caso de velocidade do rio inferior a $0,2 \text{ ms}^{-1}$, deve ser considerada a influência do lodo de fundo da calha do rio na elevação da demanda bêmica de oxigênio (DBO) (BRANCO, 1986, citado por GLEIZER, 1992).

O balanço de oxigênio foi realizado no estudo de Streeter e Phelps (1925), os quais conduziram a uma fórmula implícita para o cálculo de K_2 (Equação 1.1), que pode ser resolvida por técnicas numéricas.

$$D = \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \quad (1.1)$$

em que K_1 é a taxa de desoxigenação (T^{-1}); L_0 , a DBO inicial; e D_0 , a concentração inicial de oxigênio dissolvido, ambos em ($M L^{-3}$).

A técnica de quebra de equilíbrio, desenvolvida pelo *Water Pollution Research Laboratory*, é adequada para rios onde é pequena a variação da

concentração de OD, num dado trecho, e é com base na seguinte equação de balanço de oxigênio:

$$Q_0 = P_a \pm M_a - R_a \quad (1.2)$$

em que Q_0 é a taxa de variação de OD; P_a , a taxa de produção de oxigênio, via fotossíntese; M_a , a taxa de transferência de oxigênio por meio da superfície; e R_a , a taxa de consumo de OD.

De acordo com Vendrame (1982), o método consiste em se medir a concentração de OD a montante e jusante do trecho de interesse, para dois valores diferentes de déficit de OD, a montante do trecho. Esses valores podem ser obtidos, naturalmente, pelas variações diurnas de fotossíntese e respiração de plantas e pelo consumo de oxigênio pelos depósitos bênticos, pela variação na carga de DBO, ou artificialmente, pela adição de sulfito de sódio ou cobalto. Edwards et al. (1961, citados por VENDRAME, 1982) propuseram uma expressão (Equação 1.3) para determinar o K_2 , incluindo os déficits de oxigênio a montante (D_M e D'_M) e a jusante (D_j e D'_j), a taxa de respiração de plantas (p) e o consumo de oxigênio pelos depósitos bênticos (p'), sendo, por isso, K_2 denominado de coeficiente integral. Como na Equação 1.3, K_2 aparece nos dois lados da igualdade, então, para se obter uma solução, é necessário o uso de métodos numéricos.

$$K_2 = \frac{1}{t} \ln \left[\frac{(D_M - D'_M) + \frac{(p-p')}{K_2}}{(D_j - D'_j) + \frac{(p-p')}{K_2}} \right] \quad (1.3)$$

A técnica dos traçadores é derivada da teoria cinética e foi originalmente desenvolvida por Tsvoglou (1967), o qual utilizou-se de espécies gasosas radioativas, sendo descrita pela Equação 1.4.

$$\frac{(K_g)_a}{(K_g)_b} = \frac{(D_m)_a}{(D_m)_b} = \frac{d_b}{d_a} \quad (1.4)$$

em que $K_{g,a}$ e $K_{g,b}$ são coeficientes de transferência de massa dos gases a e b; $D_{m,a}$ e $D_{m,b}$, coeficientes de difusão molecular dos gases a e b; e d_a e d_b , diâmetros moleculares dos gases a e b.

O método baseia-se no princípio da relação constante entre a taxa de absorção do oxigênio pela água e a taxa de dessorção de um gás traçador injetado na amostra de interesse (SOARES, 2011). Portanto, um gás que não sofra transformações e, ou, perdas por processos bioquímicos e biológicos, poderá ser usado como traçador para o oxigênio. Desse modo, é possível determinar o coeficiente de reaeração, mesmo na presença de efeitos de poluição, fotossíntese ou quaisquer outras fontes ou sumidouros, já que o valor da razão entre os coeficientes de transferência de gás inerte e o oxigênio são conhecidos e invariáveis com as condições do ambiente (GLEIZER, 1992).

O processo de obtenção do coeficiente de reaeração consiste na injeção, simultânea e instantânea, de três traçadores, em um ponto a montante do trecho que se deseja determinar K_2 , que são: traçador fluorescente, com objetivo de identificação *in situ*; água tritiada, utilizada como traçador conservativo, para simular a dispersão e servir de referência; e traçador radioativo Kr-85, usado na medição da transferência de gases. O inconveniente dessa técnica é a utilização de material radioativo em águas superficiais; por isso, Rathbun et al. (1975, citado por GLEIZER, 1992) desenvolveram a técnica de traçadores modificada, que utiliza um traçador fluorescente e outro gasoso, inerte. Amostras são coletadas a fim de se obter a curva de concentração dos traçadores ao longo do tempo, no início e no fim do trecho. A capacidade de transferência dos gases é obtida das concentrações relativas do traçador, nos dois extremos do trecho do curso de água.

Em razão do inconveniente de se usar material radioativo em águas superficiais, surgiu a técnica denominada “traçadores gasosos modificada”, que utiliza hidrocarbonetos de baixo peso molecular, como o etileno e propano, e a Rodamina WT, como traçador de referência (FORMENTINI; GASTALDINI, 2010). Da mesma forma que com o traçador radioativo, considera-se que ocorra perda do traçador somente para a atmosfera. O problema de uso desses traçadores é o custo, que, segundo Pinheiro et al. (2012), em 2010 o cilindro de propano, com 99,5% de pureza custava R\$ 8.000,00. Por isso, esses autores propuseram o uso de GLP, que, segundo os autores, tanto do

ponto de vista analítico como financeiro é mais viável o uso desse traçador, com o qual obtiveram-se resultados comparáveis ao obtido com o propano com alto grau de pureza.

2. MODELOS DE PREDIÇÃO DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO

Segundo Bennett e Rathbun (1972), os métodos clássicos empregados para estimativa do coeficiente de reaeração podem ser divididos em três grupos gerais: modelos conceituais, que são fundamentados em teorias do processo de transferência de massa na interface gás-líquido e são descritos por modelos matemáticos que pretendem descrever o fenômeno físico; modelos semiempíricos, que relacionam, qualitativamente, o coeficiente de transferência de massa com algumas propriedades mensuráveis do escoamento, sendo as constantes obtidas por regressão múltipla; e modelos empíricos, que são resultado de análise dimensional, sendo as constantes também determinadas por regressão múltipla.

2.1. Modelos conceituais

Os modelos conceituais ou teóricos são, geralmente, representados por equações diferenciais que descrevem o processo de transferência de massa, como a Lei de Fick, que é usada para difusão molecular de gases sob condição de estagnação, isto é, sem convecção. O modelo estabelece que o fluxo de massa (F_m) é proporcional ao gradiente de concentração, normal à essa seção $\left(\frac{\partial C}{\partial y}\right)$, ou seja:

$$F_m = -D_m \frac{\partial C}{\partial y} \quad (1.5)$$

A partir da Equação 1.5, e considerando o balanço de massa, chega-se à equação que representa, matematicamente, a difusão de um gás numa camada de fluido líquido, estagnada:

$$\frac{dC}{dt} = D_m \frac{d^2C}{dy^2} \quad (1.6)$$

As condições de contorno utilizadas para a solução da Equação 1.6 são variáveis de modelo para modelo; entretanto, essas nem sempre estão claramente relacionadas com características médias do escoamento, como velocidade, profundidade e intensidade turbulenta (BENNETT; RATHBUN, 1972).

Os principais modelos, de acordo com o mecanismo de incorporação de oxigênio proposto pelos seus autores, são: do filme, da renovação e dos grandes vórtices.

2.1.1. Teoria dos dois filmes

Na teoria dos dois filmes, proposta por Lewis et al. (1924), os autores partiram do pressuposto que a taxa de absorção de um gás em um líquido seria governado pelo processo de difusão molecular. Esses autores assumiram que, na interface entre gases e líquido, haveria a formação de uma fina camada contígua, em ambas as fases, em que o movimento do fluido por convecção seria pequeno, se comparado ao que ocorre fora dela. Portanto, considerou-se a existência de filmes estacionários de gás e líquido sobre os dois lados da interface. Entretanto, externamente ao filme, a mistura dos fluidos, por convecção, ocorreria tão rapidamente que a concentração do soluto no fluido seria uniforme em todos os pontos.

Os autores consideraram que a força motriz para a difusão do soluto advém da diferença de concentração dentro e fora do filme gasoso, o mesmo acontecendo no filme líquido. Como a espessura do filme é muito fina, a quantidade de soluto contida nele, em qualquer tempo, é desprezível se comparada à que o permeia. Portanto, todo soluto que passa por um filme deve, também, passar por meio do outro e os dois filmes poderiam ser considerados como duas resistências difusivas, em série.

Como consequência da suposição de filmes estacionários, tem-se que esses oferecem resistência ao transporte de massa de uma fase para outra, em razão das colisões das moléculas do soluto com outras interferentes no gás

ou no líquido. Como a massa específica do líquido é maior, as colisões nele são mais frequentes, aumentando, assim, a sua resistência difusiva. Entretanto, as resistências de absorção são dependentes também da espessura do filme que, no lado do gás, deve ser mais espessa para compensar a menor resistência difusiva desse meio.

O fluxo de massa do soluto por meio dos dois filmes é obtido pelo produto do coeficiente difusivo pela diferença de concentração, conforme apresentado na Equação 1.7, em que os subscritos g , i e L referem-se, respectivamente, às condições fora do filme gasoso, na interface e no meio externo ao filme líquido.

$$\frac{dW}{Adt} = k_g(P_g - P_i) = k_L(C_i - C_L) \quad (1.7)$$

em que W é a massa do soluto, M ; A , a área de interface líquido-gás, L^2 ; t , o tempo de passagem do soluto pelos dois filmes, T ; k_g , o coeficiente de difusão por meio do filme gasoso, LT^{-1} ; P , a concentração do soluto no gás, FL^{-2} ; k_L , o coeficiente de difusão pelo filme líquido, LT^{-1} ; e C , a concentração do soluto no líquido, ML^{-3} .

Em gases de solubilidade intermediária, pode-se utilizar um coeficiente geral, combinando-se os coeficientes dos dois filmes e usando a lei de Henry. Nesse caso, consideram-se a incorporação isotérmica e a diferença de concentração total entre gás e líquido. Assim, se a concentração gasosa for expressa em pressão parcial, P_g , a correspondente concentração do líquido deve ser dada como pressão parcial P_L , em equilíbrio com a concentração do líquido C_L . De forma semelhante, a concentração do líquido pode ser expressa por C_L e a gasosa por C_g , em equilíbrio com P_g . Assim, a equação de incorporação torna-se:

$$\frac{dW}{Adt} = K_g(P_g - P_L) \quad (1.8)$$

$$\frac{dW}{Adt} = K_g(C_g - C_L) \quad (1.9)$$

Usando a equação que descreve a lei de Henry ($P_i = K_H C_i$) e as equações 1.7, 1.8 e 1.9 e rearranjando algebricamente, tem-se:

$$K_g = \frac{K_H k_L k_g}{K_H k_L + k_g} \quad (1.10)$$

$$K_L = \frac{K_g}{K_H} = \frac{k_L k_g}{K_H k_L + k_g} \quad (1.11)$$

No caso da transferência de oxigênio do ar para a água, o filme líquido oferece maior resistência ao transporte que o gasoso, por isso, assume-se que a concentração no limite superior do filme líquido seja igual à da saturação e, como a camada líquida é fina, considera-se que a concentração varie linearmente na espessura do filme (L).

$$K_L = \frac{D_m}{L} \quad (1.12)$$

2.1.2. Teoria da renovação

Na teoria da renovação, assume-se a existência de um filme laminar na superfície do líquido que permanece em contato com a fase gasosa por determinado tempo e que, posteriormente, é substituído por camadas inferiores, o que ocorre numa dada frequência. Durante o tempo de contato, a transferência de massa se dá por difusão molecular, mas, fora da camada laminar, a difusividade é considerada infinita e a concentração independente da profundidade (BENNETT; RATHBUN, 1972).

O modelo da penetração foi originalmente postulado por Higbie (1935), sendo, posteriormente, refinado por Danckwerts (1951). De acordo com Moog e Jirka (1999), no modelo de penetração, Higbie (1935) admitia que o movimento turbulento superava a resistência próxima à interface por causa da colisão dos vórtices com a fina camada limite de concentração (CLC), renovando-a periodicamente. Entretanto, o modelo da penetração de Higbie incluía somente o movimento que atingia toda a superfície, renovando-a por completo e que, longe da interface, o movimento do oxigênio dentro do fluido se daria por difusão molecular. Nesse caso, sobre a superfície livre, a concentração seria a de saturação (C_{sat}), mas que em todo o perfil abaixo dela (C_b) redefinir-se-ia periodicamente. Danckwerts (1951) generalizou esse

modelo, incluindo a substituição aleatória das camadas vezes a frequência média (r), cuja solução para K_L é dada por

$$K_L = \sqrt{D_m r} \quad (1.13)$$

Segundo Chao et al. (1987), Dobbins, utilizando as condições de contorno apropriadas para a Equação 3.6, obteve a seguinte solução matemática:

$$K_L = (D_m r)^{0,5} \coth \left(\frac{r L^2}{D_m} \right)^{0,5} \quad (1.14)$$

em que r é a frequência média de renovação ou taxa de renovação da superfície líquida.

Quando o valor de $(r L^2/D_m)$ é maior que 3, K_L vale $(D_m r)^{0,5}$, que é o mesmo resultado obtido por Danckwerts (1951); e quando a taxa de renovação superficial é muito pequena, a equação aproxima-se à obtida na teoria do filme. Posteriormente, O'Connor (1961), utilizando a mesma equação, mas com condições de contorno diferentes, obteve a seguinte expressão:

$$K_L = (D_m r)^{0,5} \tanh \left(\frac{r L^2}{D_m} \right)^{0,5} \quad (1.15)$$

Utilizando os mesmos valores adotados por Dobbins, para r , D_m e L , a tangente hiperbólica é aproximadamente 1 e a equação pode ser simplificada, assumindo a forma da Equação 1.13 que, reescrita para K_2 , torna-se:

$$K_2 = \frac{(D_m r)^{0,5}}{H} \quad (1.16)$$

Como a taxa de renovação é difícil de ser quantificada, O'Connor e Dobbins (1956) expressaram r em razão de fatores mensuráveis do escoamento, isto é, a razão entre a flutuação vertical da velocidade do escoamento (U) e o comprimento de mistura. Em condições de turbulência isotrópica, os autores assumiram que ambos, velocidade e comprimento,

correspondem a 10% do valor médio desses fatores, resultando em $r = U H^{-1}$. Nesse caso, K_2 é expresso pela Equação 1.17, em que D_m é o coeficiente de difusão do oxigênio na água, em $m^2 d^{-1}$.

$$K_2 = 292,4283(D_m U)^{0,5} H^{-1,5} \quad (1.17)$$

Moog e Jirka (1999) e Cremasco (2002) compartilharam a mesma ideia de que a teoria da renovação parece ser justificada e o modelo de penetração parece ser a forma mais apropriada de descrição do fenômeno de transferência de massa para a fase líquida e, do ponto de vista da engenharia, o essencial é a determinação do r .

2.2. Modelo dos grandes e pequenos vórtices

O que caracteriza o escoamento turbulento, além das flutuações instantâneas de velocidade, temperatura e outros escalares, é a presença de grande quantidade de vórtices numa vasta gama de escalas temporais e espaciais. Dentro desse espectro, os maiores vórtices drenam energia do escoamento médio e a transferem para outros menores e esses para outros menores ainda. Cria-se, assim, um processo contínuo de transferência de energia que se direciona para escalas de tamanhos, em que a energia passa a ser dissipada pelas tensões viscosas, atingindo-se um estado de equilíbrio. Esse processo é conhecido por cascata de energia e foi descrito por Kolmogorov, em 1941 (SOUZA et al., 2011).

Os grandes vórtices dependem fortemente da geometria do escoamento e da maneira como são gerados; por isso, possuem características anisotrópicas e comportamento um tanto determinístico (ROSMANN, 1989, citado por SOUZA et al., 2011). A partir desse conceito, foi desenvolvido o modelo dos grandes vórtices de Fortescue e Perason (1967), em que a camada superficial foi dividida numa série de células rotacionais, tendo diâmetro L e velocidade proporcional a u' , em que L é a macroescala turbulenta e u' , a raiz quadrada da média do quadrado das flutuações da velocidade (rms). Supõe-se, nesse modelo, que a série de células da superfície

é lançada para dentro do corpo do fluido com velocidade igual à velocidade média do escoamento. Esse modelo está representado na Equação 1.18.

$$K_L = 1,46 \sqrt{D_m \frac{u'}{L}} \quad (1.18)$$

De acordo com Moog e Jirka (1999), nesse estudo, u' foi relacionado com a velocidade média, mas o melhor seria relacioná-lo à velocidade cisalhante (u^*) e, considerando L proporcional à H , tem-se que r é proporcional a $u^* H^1$. Adimensionalizando a Equação 1.18, tem-se o modelo de grandes vórtices.

$$K_L^+ = \frac{K_L}{u'} \sim \frac{K_L}{u^*} \propto Sc^{-0,5} R_*^{-0,5} \quad (1.19)$$

em que Sc é o número de Schmidt (ν/D_m); e R_* , o número de Reynolds cisalhante.

Admitindo-se a validade da teoria da cascata de energia, considera-se que as menores escalas tendem a ter escalas-tempo também menores e que esses movimentos são independentes da turbulência de larga escala e do escoamento médio, que são mais lentos. Se essa hipótese for válida, o movimento de pequena escala depende somente da taxa de energia que ele recebe das grandes escalas e da viscosidade molecular. No equilíbrio, a taxa de suprimentos de energia tem que ser igual à de dissipação de energia, sendo essa a base da teoria do equilíbrio universal de Kolmogorov (SOUZA et al., 2011). A partir dessa teoria, Lamont e Scott (1970), ao observarem que a superfície livre exerce uma atenuação, funcionando como espécie de filtro, consideraram que pequenos vórtices podem contribuir para a renovação superficial. Assim, do modelo de penetração, os autores deduziram o de pequenos vórtices, que adimensionalizado, tem a forma:

$$K_L^+ \propto Sc^{-0,5} R_*^{-0,25} \quad (1.20)$$

2.3. Modelos semiempíricos

Os modelos semiempíricos resultam da consideração e combinação de fatores que influenciam o fenômeno físico da transferência de massa e que estão relacionados com propriedades mensuráveis do escoamento, sendo expressos por equações teóricas, cujos coeficientes e expoentes são obtidos por análise de regressão dos dados experimentais.

Krenkel e Orlob (1963), a partir de 58 medições de K_2 , feitas em canal hidráulico experimental, em laboratório, para as profundidades que variaram de 0,024 a 0,060 m e largura de 0,304 m, obtiveram K_2 de 10,63 a 115,3 d⁻¹ para velocidade média, variando entre 0,074 a 0,65 ms⁻¹. A equação ajustada, por meio de análise de regressão múltipla, relaciona declividade (S), velocidade (U) e profundidade (H), conforme apresentado abaixo:

$$K_2 = 173,45(US)^{0,408}H^{-0,66} \quad (1.21)$$

Thackston e Krenkel (1969) desenvolveram um modelo com base na teoria da renovação superficial, utilizando 40 medidas de K_2 realizadas em canal hidráulico, em laboratório, com 0,608 m de largura e profundidade de lâmina d'água variando entre 0,015 e 0,070 m. Esses autores obtiveram, por análise de regressão, os coeficientes, resultando na seguinte expressão:

$$K_2 = 24,9(1 + Fr^{0,5}) \frac{u^*}{H} \quad (1.22)$$

Cadwallader e McDonnell (1969), citados por Vendrame (1982), aplicaram análise multivariada ao conjunto de dados de outros pesquisadores, junto com os que conseguiram em laboratório, o que resultou na obtenção da equação:

$$K_2 = 185,5012 (SU)^{0,5}H^{-1} \quad (1.23)$$

Além dos já apresentados, outros autores obtiveram equações semiempíricas, como Parkhurst e Pomeroy (1972), Equação 1.24, e Lau

(1972), Equação 1.25, citados por Epa (1985), cuja formulação se baseou nos modelos de dissipação de energia e difusão molecular, respectivamente.

$$K_2 = 23,04(1 + 0,17Fr^2)(SU)^{0,375}H^{-1} \quad (1.24)$$

$$K_2 = 0,02911 (u^*{}^3 U^{-2} H^{-1}) \quad (1.25)$$

em que Fr é o número de Froude (adimensional); S , a declividade do fundo do canal (LL^{-1}); U , a velocidade média (LT^{-1}); H , a profundidade (L); e eu^* , a velocidade cisalhante ($L T^{-1}$).

2.4. Modelos empíricos

Os modelos empíricos são resultantes de análise dimensional, cujas constantes são obtidas por regressão. São várias as equações, entretanto, Rathbun (1977) verificou que essas geralmente apresentam K_2 diretamente proporcional à velocidade média do escoamento da água, elevada a um expoente a , que varia de 0,50 a 1,00, sendo inversamente proporcional à profundidade média do escoamento, elevado a uma potência c , que varia de 0,85 a 1,85, como apresentado na Equação 1.26.

$$K_2 \propto U^a H^{-c} \quad (1.26)$$

A escolha de uma equação de predição deve se basear na qualidade dos dados que a originaram e no desempenho na estimativa de K_2 , quando comparada com dados obtidos experimentalmente.

Diversos pesquisadores desenvolveram equações de predição do coeficiente de reaeração utilizando o método empírico; Streeter e Phelps (1925) foram pioneiros nesse tipo de estudo e, a partir de dados coletados no rio Ohio, propuseram a seguinte equação:

$$K_2 = z \frac{U^n}{H^z} \quad (1.27)$$

em que z é o fator de irregularidade, definido como o número de mudanças de declividade do canal, que produz mudança na declividade maior que $1,89 \times 10^{-4} \text{ m m}^{-1}$ [para o número de irregularidades entre 2 e 3 ($z = 5,64 S + 17$) e entre 3 e 5 ($z = 1,1 S^{2,3}$)]; H' , profundidade acima do nível das águas no período de seca mais rigorosa (m); e n , coeficiente obtido em razão de δ , que representa o aumento médio relativo da velocidade por 1,52 m de acréscimo de altura na água (adimensional).

$$n = \frac{(\delta - 0,17)}{(\delta - 1,17)}$$

Apesar do mérito do pioneirismo de Streeter e Phelps, ao desenvolverem essa equação, falta nela a generalidade que possibilitasse ser utilizada em outros rios, visto ser o fator n de difícil quantificação e H' não ser característica verdadeira do escoamento (BENNETT; RATHBUN, 1972).

Na tentativa de obter equações preditivas que pudessem ser usadas em diferentes condições, muitos pesquisadores agruparam dados obtidos em rios e canais, com diferentes técnicas experimentais, resultando em várias formulações citadas por Jha et al. (2004), as quais serão descritas a seguir.

Churchill et al. (1962), utilizando a técnica do balanço do oxigênio dissolvido, estudaram 16 trechos em cinco rios, a jusante de barragens para 30 condições diferentes de escoamento, e verificaram que o K_2 variou de $0,225 \text{ d}^{-1}$ a $5,558 \text{ d}^{-1}$; a profundidade variou entre 0,64 m e 3,47 m; e a velocidade média do escoamento esteve entre $0,56 \text{ ms}^{-1}$ e $1,52 \text{ ms}^{-1}$. Nessas condições, a equação que resultou em melhor estimativa foi:

$$K_2 = 5,014U^{0,969}H^{-1,673} \quad (1.28)$$

Owens et al. (1964), usando a técnica da quebra de equilíbrio, fizeram medições do coeficiente de reaeração em 21 trechos de seis rios, resultando em 32 medidas de K_2 , para profundidade e velocidade média variando entre 0,12 e 3,35 m e $0,039$ a $1,54 \text{ ms}^{-1}$, respectivamente. A partir desses dados, foi ajustada a seguinte equação:

$$K_2 = 5,34U^{0,67}H^{-1,85} \quad (1.29)$$

As informações hidráulicas do rio e os coeficientes de reaeração obtidos por Owens et al. (1964) foram agrupados aos dados de Churchill et al. (1962) e Gameson (1955), perfazendo 68 dados analisados em que o K_2 experimental variava de 0,25 a 75 d⁻¹, para profundidade e velocidade variando entre 0,12 m e 3,35 m e 0,030 ms⁻¹ e 0,54 ms⁻¹, respectivamente. Nessas condições, a seguinte equação preditiva foi desenvolvida:

$$K_2 = 6,935U^{0,73}H^{-1,75} \quad (1.30)$$

Langbein e Durum (1967) combinaram dados obtidos em rios, por O'Connor e Dobbins (1958) e Churchill et al. (1962), com os obtidos em laboratório por Krenkel e Orlob (1963) e Streeter et al. (1936) e, por meio de regressão, obtiveram a equação:

$$K_2 = 5,1349UH^{-1,33} \quad (1.31)$$

Nessa equação, foi considerado o efeito da variação na vazão de jusante sobre K_2 , sendo verificado que esse valor decresce com a raiz quadrada da vazão.

A técnica do balanço do oxigênio dissolvido foi usada por Jha et al. (2001) para obtenção de K_2 ao longo do Rio Kali, na Índia, sendo coletados dados em 22 pontos, onde 16 foram em trechos do rio e seis em tributários. Na equação ajustada (Equação 1.32), foi obtido R² de 0,96.

$$K_2 = 5,792U^{0,5}H^{-0,25} \quad (1.32)$$

Ao agrupar os dados do Rio Kali a outros de diferentes rios e canais, como os de O'Connor e Dobbins (1958), Churchill et al. (1962), Thackston e Krenkel (1969), Parkhurst e Pomeroy (1972), Hren (1984) e Wilcok (1988), Jha et al. (2004), ajustaram-se duas equações (Equação 1.33 a e b), tendo por critério o número de Froude, validando-as com 176 dados de Tsivoglou et al.

(1968), Issacs e Gaudy (1968) e Cleveland (1989), obtendo-se R^2 de 0,72 e 0,94, respectivamente para regime subcrítico e supercrítico.

$$K_2 = 0,603286U^{0,4}H^{0,154}S^{-1}, \text{ para } Fr < 1 \quad (1.33a)$$

$$K_2 = 866,307U^{1,393}H^{0,8}S^{-0,173}, \text{ para } Fr > 1 \quad (1.33b)$$

Outros autores obtiveram equações empíricas a partir de dados de rios ou canais hidráulicos, em laboratório; algumas dessas estão apresentadas na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Equações empíricas preditivas do coeficiente de reaeração propostas por diferentes autores

Equação*	Faixa de aplicação	Autor
$K_2 = 31200SU$	$Q < 0,28 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	Tsivoglou e Wallace, 1972
$K_2 = 15200SU$	$Q > 0,28 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	Tsivoglou e Wallace, 1972
$K_2 = 5,5773U^{0,607}H^{-1,689}$		Bennett e Rathbun, 1972
$K_2 = 543 S^{0,6236}U^{0,5325}H^{-0,7258}$		Smoot, 1988
$1740U^{0,46}S^{0,79}H^{0,74}$	$S > 0,004 \text{ m m}^{-1}$	Moog e Jirka, 1998
$K_2 = 517(US)^{0,524}Q^{-0,242}$	$Q < 0,556 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	Melching e Flores, 1999

* K_2 é o coeficiente de reaeração, base e, d^{-1} ; S , declividade, m m^{-1} ; U , velocidade média, ms^{-1} ; H , profundidade, m ; e Q , vazão, m^3s^{-1} .

Melching e Flores (1999) fizeram uma revisão sobre a determinação em campo de K_2 e os problemas das equações preditivas. Os autores avaliaram que a maioria das equações foi obtida a partir de pequena base de dados e grupos específicos de rios, fornecendo, portanto, resultados acurados para as situações que as originaram e pobres para as demais.

Ao analisar as variáveis que são definidas pela literatura como importantes no processo de reaeração, como profundidade (H), velocidade média (U), cisalhante (u^*), fator de forma, número de Froude (Fr), declividade (S), viscosidade cinemática (ν), coeficiente de difusão molecular (D_m), tensão superficial (τ_s), energia de dissipação e coeficiente de rugosidade, Gualtieri et al. (2002), por análise dimensional, deduziram quais são os fatores intervenientes no processo (Equação 1.34), em que R é o número de Reynolds. Os autores concluíram que muitas das equações preditoras não englobam

todas as variáveis que influenciam a transferência de oxigênio; além disso, a estrutura monomial das formulações, apesar de ter a simplicidade desejada, resulta em aplicabilidade limitada a condições hidrodinâmicas específicas.

$$K_2 = \frac{U}{H} f[Fr, S, R] \quad (1.34)$$

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As metodologias de determinação experimental do coeficiente de reaeração são de difícil implementação prática, tanto por questão operacional quanto financeira. Na técnica do balanço do oxigênio dissolvido, por exemplo, a dificuldade consiste em se quantificar a concentração de oxigênio em todas as fontes e sumidouros, visto que esses podem não ser pontuais e, caso sejam, não há garantia de uniformidade de distribuição ao longo do trecho em análise. A técnica considerada por diversos autores como a mais consistente, a do traçador gasoso, ainda é impraticável em razão dos custos. As equações de predição, embora em grande número, não conseguem descrever adequadamente os fenômenos, sendo, por isso, pouco confiáveis, principalmente em escoamentos rasos. Portanto, são necessários avanços no entendimento dos fenômenos físicos envolvidos diretamente com a transferência de massa entre o ar e a água para que equações de predição sejam desenvolvidas e tenham maior probabilidade de se obterem, com essas, estimativas confiáveis. Nesse contexto, experimentos em canais hidráulicos, em laboratório, têm potencial para atender a esse propósito, por haver maior possibilidade de controle das variáveis hidrodinâmicas.

4. REFERÊNCIAS

BENNETT, J.P.; RATHBUN, R.E. **Reaeration in open channel flow**. Washington: United States Department of the interior, 1972. 86 p.

CHAO, A.C.; CHANG, D.S.; SMALLWOOD JR., C.; GALLER, W.S. Influence of temperature on oxygen transfer. **Journal Environment Engineering**, v. 113, n. 4, p. 722-735, 1987.

CREMASCO, M.A. **Fundamentos de transferência de massa**. Campinas: UNICAMP, 2002. 728 p.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Rates, constants and kinetics formulations in surface water quality modeling**. 2.ed. Athens, 1985. 455 p.

FORMENTINI, T.A.; GASTALDINI, M.C.C. Determinação experimental do coeficiente de reaeração superficial: estado da arte. In: SIMPÓSIO ITALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 10, 2010. **Anais...** ABES, 2010. 8 p.

GLEIZER, S. **Determinação experimental do coeficiente de reaeração em rios, com uso do traçador gasoso inerte**. 1992. 135 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

JANZEN, J.G.; SCHULZ, H.E.; JIRKA, G. Detalhes da transferência de gases na interface ar-água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 11, n. 4, p. 153-161, 2006.

JHA, R.; OJHA, C.S.P.; BHARIA, K.K.S. A supplementary approach for estimating reaeration rate coefficients. **Hydrological Processes**, n. 18, p. 65-79, 2004.

JHA, R.; OJHA, C.S.P.; BHATIA, K.K.S. Refinement of predictive reaeration equations for a typical Indian river. **Hydrological Processes**, n. 15, p. 1047-1060, 2001.

LEWIS, W.K.; WHITMAN, W.G. Principles of gas absorption. **Absorption Symposium**, v. 16, n. 12, p. 1215-1220, 1924.

MELCHING, C.S.; FLORES, H.E. Reaeration equations derived from U.S. Geological Survey database. **Journal of Environmental Engineering**, Reston, v. 125, n. 5, p. 407-414, 1999.

MOOG, D.B.; JIRKA, G.H. Air-water gas transfer in uniform channel flow. **Journal of Hydraulic Engineering**, Reston, , v. 125, n. 1, p. 3-10, 1999.

PINHEIRO, A.; FAHT, G.; SILVA, M.R. Determinação do coeficiente de reaeração em rios através do uso do traçador gasoso GLP. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 17, n. 1, p. 107-116, 2012.

SOARES, P.A. **Estimativa e aplicação do coeficiente de dispersão longitudinal e de reaeração em corpos de água naturais**. Blumenau: Universidade Regional de Blumenau, 2011. 119 p.

SOUZA, J.F.A.; OLIVEIRA, L.R.; AZEVEDO, J.L.L.; SOARES, I.D.; MATA, M.M. Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, n. 1, p. 21-41, 2011.

STREETER, H.W.; PHELPS, E.B. **A study of the pollution and natural purification of the Ohio river**. Washington: Public Health Service, 1925. 75 p. (Public Health Service, 146).

TSIVOGLU, E.C.; WALLACE, J.R. **Characterization of stream reaeration capacity**. Washington: Environmental Protection Agency, 1972. (Report, 12).

VENDRAME, I.F. **Determinação experimental do coeficiente de reaeração, em rios e canais abertos, com uso de traçadores**. 1982. 200 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

ZOGORSKI, J.S.; FAUST, D.S. Atmospheric reaeration capacity of stream: critical review of methods available to measure and to calculate the atmospheric reaeration rate constant. **Environmental Letters**, v. 4, n. 1, p. 35-59, 1973.

CAPÍTULO 2

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE CANAL HIDRÁULICO DE FUNDO DESLIZANTE PARA ESTUDO DA REAERAÇÃO

RESUMO: A estimativa da capacidade de reaeração de corpos d'água é essencial em estudos de autodepuração; entretanto, a sua determinação em campo, além de dispendiosa, não permite que sejam controladas, ao longo do tempo, as características hidráulicas do escoamento. A estimativa dessa variável, por equações disponíveis na literatura, tem se evidenciado pouco confiável, principalmente em canais rasos em que se obtêm valores de K_2 muito elevados, o que nem sempre é verificado na prática. O interesse por canais rasos reside na constatação de que o período crítico para estudos de autodepuração coincide com a estação seca, quando os rios apresentam redução significativa em seus caudais. Por isso, estudos de reaeração em canais hidráulicos que operem em condições de pequena profundidade são de grande relevância. Tendo em vista o exposto, os objetivos deste trabalho foram projetar, executar e avaliar a operação de canal hidráulico com fundo deslizante para estudos de trocas gasosas entre o ar e a água. As condições operacionais do canal possibilitaram o estudo de reaeração para a profundidade máxima da lâmina de água de 0,25 m e a velocidade máxima de movimentação da água de $0,20 \text{ ms}^{-1}$. Considerou-se que dentro das condições disponíveis, o equipamento apresentou características promissoras ao estudo de reaeração.

Palavras-chave: Canal hidráulico, reaeração, hidráulica.

ABSTRACT: The estimate of water bodies reaeration capacity is essential in studies of self-purification, however its determination on the field besides being costly, doesn't allow being controlled, over time, the hydraulic characteristics of the flow. The estimate of this variable, through equations available in the literature, has been proven unreliable especially in shallow depth channels in which are obtained very high values of K_2 , what is not always observed in practice. The interest in shallow depth channels lies in the realization that the critical period for self-purification studies coincides with the dry season, when the rivers have a significant reduction in its flow rate. Therefore, reaeration studies on hydraulic channels operating in conditions of shallow depth are of great relevance. Considering the above, the objectives of this study were to design, to execute and to evaluate the operation of moving-bed channel for studies about gas exchange between air and water. The operating conditions of the channel made possible the study of reaeration to the maximum water depth of 0.25 m and a maximum water movement velocity of 0.20 ms^{-1} . It is considered that within the available conditions, the equipment showed promising characteristics for the reaeration study.

Keywords: Hydraulic channel, reaeration, hydraulic.

1. INTRODUÇÃO

O estudo de autodepuração em cursos de água é necessário para avaliar os impactos ambientais e a qualidade da água. Nesses estudos, a estimativa da capacidade de reaeração do curso de água é de grande importância e o termo coeficiente de reaeração (K_2) é a variável associada com a taxa de incorporação de oxigênio à massa líquida. Para se obter essa estimativa, fazem-se medições em campo, ou em laboratório, ou estima-se por meio de equações matemáticas que relacionem K_2 com características hidráulicas do curso de água (BENNETT; RATHBUN, 1972).

A determinação em campo de K_2 é um trabalho oneroso e limitado às condições hidráulicas reinantes no momento do ensaio e a estimativa por equações preditoras não têm se apresentado satisfatórias, o que pode ser depreendido pelo número expressivo de equações citadas na literatura (MOOG; JIRKA, 1999). Por essa razão, trabalhos conduzidos em laboratório têm sido considerados a alternativa mais viável.

Embora o desenvolvimento de *softwares* tenha permitido simulações com fluidos em máquinas e equipamentos, o que trouxe grandes avanços para a Mecânica dos Fluidos e a Hidráulica, possibilitando inclusive a simulação do processo de reoxigenação da água, para sua plena utilização é necessário adequado entendimento dos fenômenos envolvidos no estudo. Por isso, ensaios experimentais ainda são muito utilizados, seja para validar as simulações, seja para analisar os escoamentos que apresentam características ainda pouco compreendidas, como é o caso da incorporação de oxigênio do ar na água.

O instrumental usado em experimentos nessa área permite estudos do escoamento em diferentes níveis de sofisticação, sendo utilizados desde a técnica da pitometria e anemometria de fio e filme quente até as mais modernas técnicas de velocimetria de partícula. Em todos os casos, os trabalhos são desenvolvidos em estruturas como túneis hidrodinâmicos, aerodinâmicos e em canais de água, que permitem que os ensaios sejam executados sob condição controlada, o que confere maior confiança aos resultados alcançados.

Dentre as estruturas, os canais de água são os mais difundidos; entretanto, segundo Mega (2006), a construção de aparato desse gênero não constitui tarefa trivial de engenharia, visto que não existem critérios explícitos de dimensionamento para a maioria de seus componentes e, assim, o sucesso é determinado pela experiência da equipe envolvida, que quase sempre se utiliza de informações não documentadas.

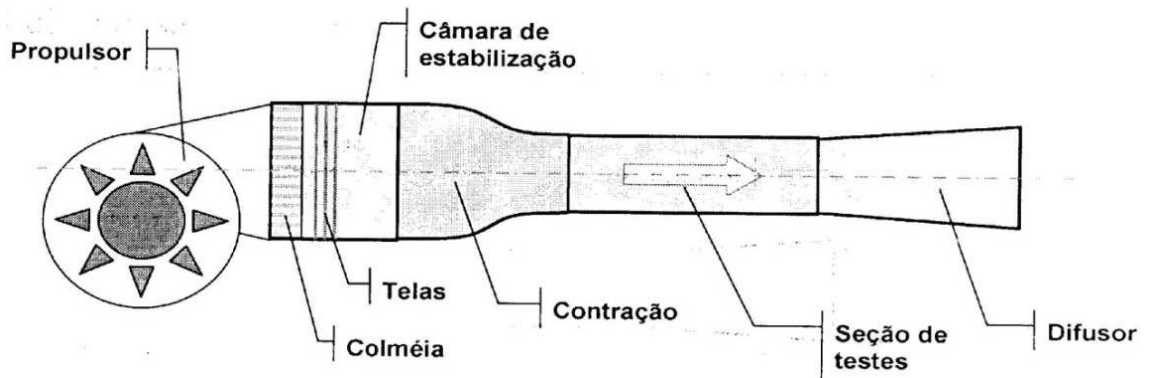
Apesar dos desafios oferecidos por essa construção, justifica-se o esforço quando se pretende obter escoamento em que as variáveis hidrodinâmicas sejam mantidas constantes por tempo indeterminado, na região de teste. Por isso, foram objetivos deste trabalho: projetar e construir um canal hidráulico, com fundo deslizante, para condução de experimentos laboratoriais que possibilitassem a utilização de diferentes velocidades de escoamento e de lâmina de água, proporcionando turbulência uniforme; avaliar as condições de operação do canal hidráulico construído, para estudo do processo de reaeração; e analisar os custos de construção do canal hidráulico de fundo deslizante.

2. CANAIS HIDRÁULICOS OU TÚNEIS HIDRODINÂMICOS EXPERIMENTAIS

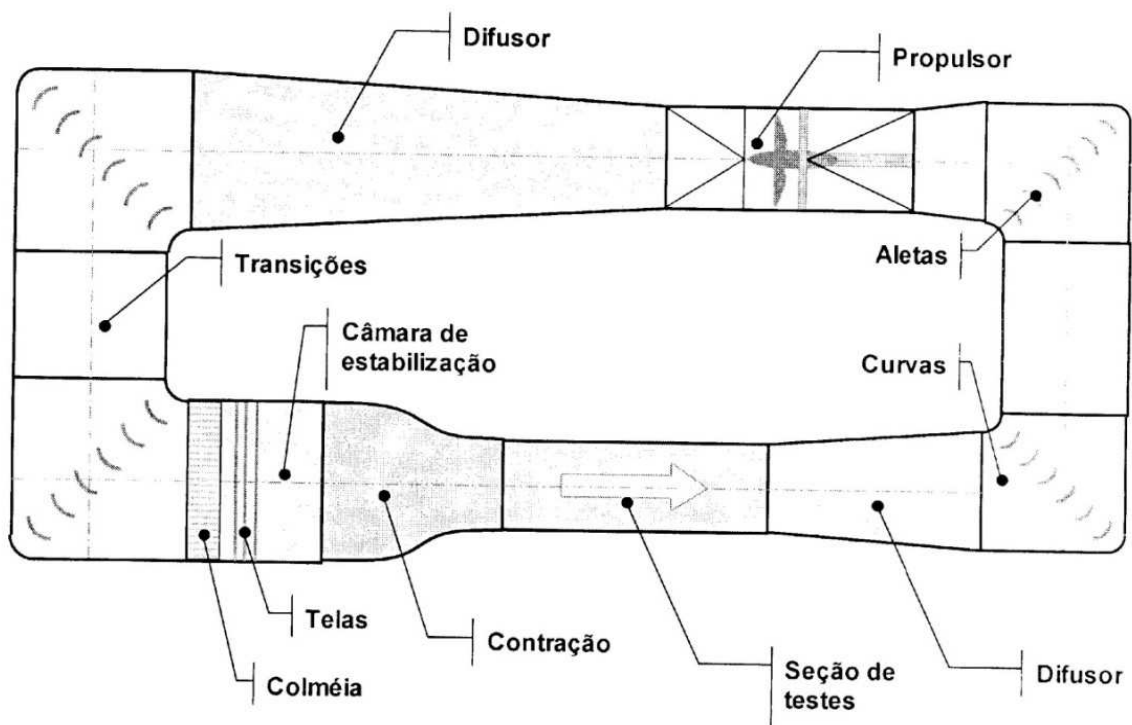
Canais ou túneis hidráulicos podem ser projetados para atender a experimentos com diferentes tipos de fluido. Entretanto, o mais comum é que sejam utilizados para água e ar, em razão dos custos e das manutenções requeridas.

Segundo Ássis (2005), os canais hidráulicos podem ser divididos, de acordo com o circuito do escoamento, em abertos e fechados. Os canais que apresentam duto aberto em ambas as extremidades são de circuito aberto. Nesse caso, o fluido sofre propulsão para entrar no canal e sair do circuito no lado oposto. Esses canais hidráulicos são, geralmente, formados por duto linear e curto, sendo usados em escoamento com vapor, fumaça ou outras partículas, como em ensaios com combustão. Já os de circuito fechado, caracterizam-se por apresentarem recirculação do fluido e por terem a vantagem de serem passíveis de maior controle no escoamento, além de requererem menor potência para acionamento. Apresentam, porém, grande

complexidade de construção, devendo ser compostos das seguintes partes: seção com paredes paralelas, contração, câmara de estabilização, curvas, aletas, difusor e propulsor, conforme apresentado na Figura 2.1.



(a)



(b)

Fonte: Ásis (2005).

Figura 2.1 - Esquema representativo de canais hidráulicos em circuito aberto (a) e fechado (b).

Ássis (2005) recomendou atenção especial à estrutura do canal, pois essa terá de suportar, além da pressão hidrostática, as tensões cisalhantes nas paredes, quando o fluido estiver em movimento. Além disso, as vibrações provocadas pelo sistema propulsor de movimentação do fluido devem ser minimizadas, devendo-se utilizar materiais absorventes entre as estruturas.

Em canais hidráulicos, cuja seção de teste for projetada para atender às condições de escoamento turbulento, sem que haja efeito de parede, os trabalhos são com base em estudos, como os realizados por Sarma et al. (1983), os quais que dividiram a seção retangular do canal em quatro regiões para a avaliação da distribuição de velocidade, de acordo com a Figura 2.2. As regiões de distribuição da velocidade da água foram divididas em: região 1, próxima ao fundo e longe da parede lateral; região 2, próxima ao fundo e à parede lateral; região 3, próxima à parede lateral e longe do fundo; e região 4: longe, tanto do fundo como das paredes.

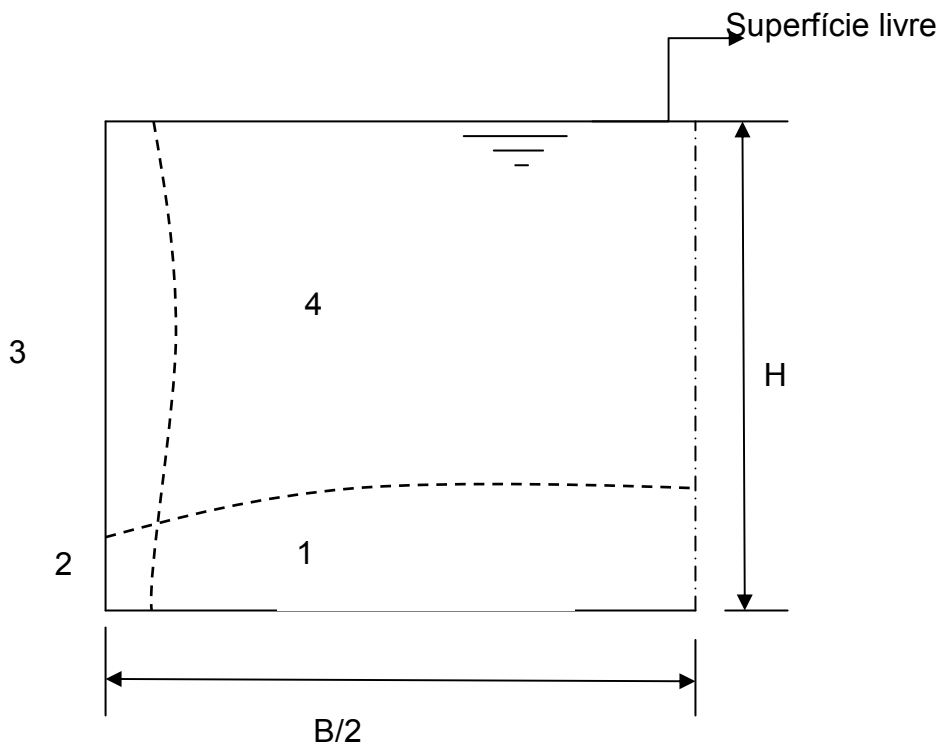


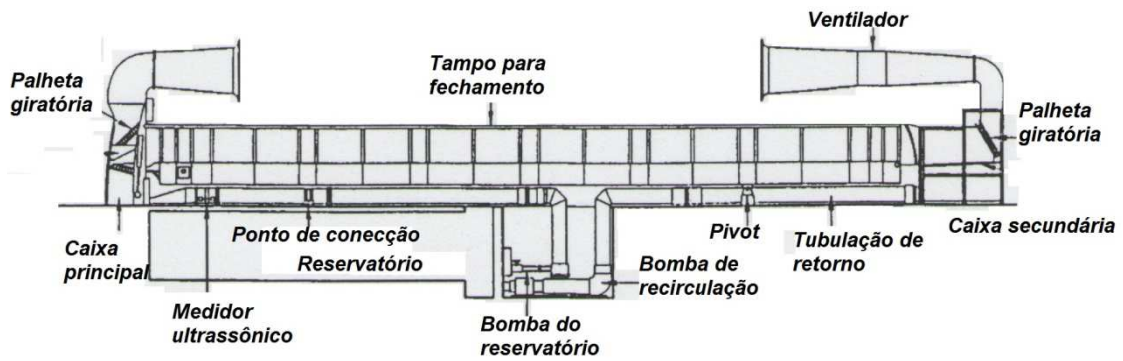
Figura 2.2 - Geometria do canal hidráulico e regiões de escoamento, como proposto por Sarma et al. (1983).

Nesse estudo, os autores concluíram que na região externa, ou seja, região 4, que fica a $d/H \geq 0,15$, em que d é a distância da parede, o escoamento é influenciado pela profundidade do escoamento (H) e velocidade máxima; nessa região, a superfície livre exerce sua maior influência, o que implica na ausência de efeito de parede.

Segundo Araújo (1995), em canais hidráulicos retangulares, pode-se definir uma zona central, onde o escoamento é bidimensional e não sofre influência das paredes laterais. De acordo com Chiu e Chiou (1986), isso ocorre quando o fator de forma (B/H) é maior que um limite situado entre cinco e 10, dependendo da rugosidade, ou seja, todos os canais hidráulicos em que a largura (B) é 10 vezes maior que a profundidade da água (H) possui zona central, sendo denominado “canal largo”. Além disso, fator de forma menor que cinco interfere na estrutura turbulenta do escoamento (NEZU et al., 1993), não devendo ser utilizado em estudos em que a turbulência é fator importante.

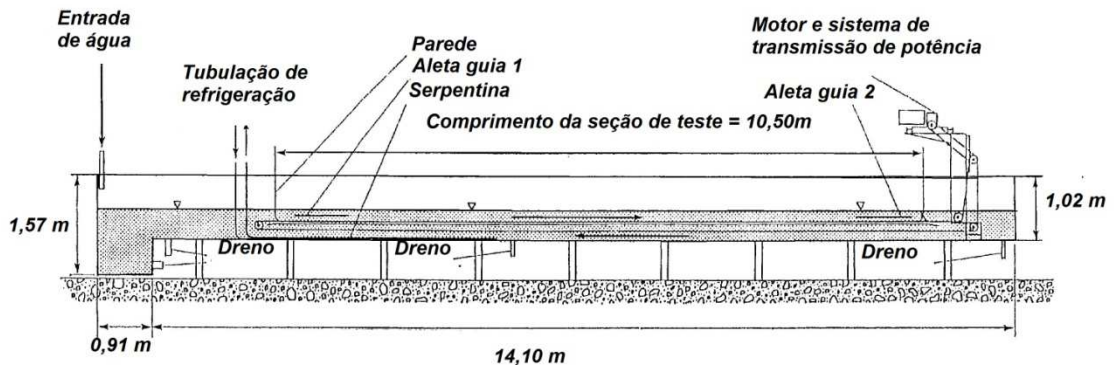
Segundo Moog e Jirka (1999), em estudos cujo objetivo é determinar a taxa de absorção de oxigênio do ar pela água, para se estabelecer escoamento uniforme e confiabilidade na medida das variações de concentração, o comprimento do canal deve ser de, no mínimo, $100 H$, desde que haja recirculação. Os autores citaram como referência o canal *Tilting wind-water tunnel* do *De Free Hydraulics Laboratory* (Figura 2.3), que tem circuito fechado e as dimensões da seção de teste são: 20 m de comprimento e 1 m de largura, sendo as paredes em vidro e o fundo em aço inoxidável, interligada a reservatório de preparação da água de 31 m^3 . Esse canal hidráulico, segundo os autores, foi projetado especificamente para estudos de trocas gasosas entre o ar e a água (MOOG; JIRKA, 1995).

No final da década de 1980 do século XX, foi desenvolvido por Tamburrino e Gulliver (1992) um canal hidráulico com fundo deslizante, onde o movimento da água se dava por meio da ação de uma esteira transportadora. As dimensões do canal eram: 15,00 m de comprimento, 0,76 m de largura e 0,69 m de profundidade, sendo o fundo em alumínio e as paredes em vidro de 0,013 m, com seção de teste de 10,50 m de comprimento (Figura 2.4).



Fonte: Moog e Jirka (1995).

Figura 2.3 - Vista, em corte, de um canal hidráulico com recirculação da água.



Fonte: Tamburrino e Gulliver (1992).

Figura 2.4 - Vista, em corte, de um canal hidráulico de fundo deslizante.

Os autores avaliaram as características do escoamento e as compararam com as obtidas em canal tradicional, sendo utilizada a técnica *Laser Doppler velocimetry* (LDV) com fibra ótica para medida de duas componentes do vetor velocidade, em ambos os canais.

Os mesmos autores observaram que o movimento da esteira, sob velocidade constante, proporcionou correspondente mudança no referencial inercial, quando comparado com o método tradicional. Como os efeitos de parede foram negligenciados, pois B/H era maior que cinco, então a mudança interferiu somente na cinemática do escoamento e não a sua dinâmica. Assim, a natureza e estrutura do escoamento eram as mesmas em ambos os canais

hidráulicos. Consequentemente, o perfil de velocidade no canal de fundo móvel dependia da tensão cisalhante agindo sobre o perímetro molhado e a rugosidade da parede, similar ao do canal hidráulico tradicional. Usou-se a esteira para funcionar, hidrodinamicamente, como parede lisa, podendo a velocidade ser representada pela lei logarítmica:

$$\frac{U}{u^*} = \frac{1}{k} \ln z^+ + c \quad (2.1)$$

em que U é a média temporal da velocidade longitudinal na profundidade z , em ms^{-1} ; u^* , a velocidade cisalhante, em ms^{-1} ; z^+ , um adimensional definido por $z^+ = z u^* / \nu$; z , a coordenada vertical; e ν , a viscosidade cinemática (m^2s^{-1}). A constante de von Karman (k) e a constante de integração, c , foram assumidas como 0,4 e 5,5, respectivamente.

Várias foram as vantagens apresentadas por Tamburrino e Gulliver (1992) para esse tipo de equipamento como a facilidade de medida de força de arraste sobre corpos submersos, além de reduzido efeito das paredes no escoamento, o que o torna claramente bidimensional. Esses autores reportaram que foram obtidas taxas cisalhantes sem que houvesse propagação do distúrbio para a superfície, quando da ocorrência do escoamento crítico. O comprimento necessário para se ter o completo desenvolvimento na distribuição da velocidade é consideravelmente menor, cerca de 10 H ; num canal hidráulico tradicional, para equivalente turbulência, são necessários 60 H .

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido em Anápolis, GO, no período de julho de 2011 a maio de 2012.

O canal hidráulico de fundo deslizante projetado e executado neste trabalho foi inspirado no estudado por Tamburrino e Gulliver (1992), sendo seguidas as recomendações desses autores no que se refere às relações entre as principais dimensões, ou seja, profundidade (H), comprimento (L) e largura (B) do canal. Para tal, considerou-se que a profundidade máxima da lâmina d'água, a ser utilizada, seria de 0,30 m, acima da esteira e para um fator de

forma, $B/H > 5$, resultou na largura mínima (B) de 1,50 m, sendo adotada largura efetiva, interna, de 1,57 m e, externa, de 1,60 m. O comprimento foi determinado, utilizando-se a informação de que são necessários $10H$, para o completo desenvolvimento do escoamento, somados a 1,5 m, para tomada de dados, e 0,5 m de distância entre a esteira e as paredes, perfazendo 5,0 m. A altura da seção de teste foi definida em 0,80 m, estando esse elevado em 0,20 m acima do solo, tendo altura total de 1,0 m.

A sustentação do canal foi constituída por estrutura metálica composta por cantoneiras, metalon e barra chata. Toda a ferragem foi pintada com tinta antiferrugem e, posteriormente, com tinta à base de lama asfáltica.

As paredes e o fundo do canal eram de compensado naval, com 0,015 m de espessura, pintadas internamente com tinta à base de lama asfáltica e revestidas com lona plástica de polietileno de baixa densidade de 10 μm de gramatura e lona de polietileno com estrutura tramada usada para cobertura de piscinas.

A esteira foi projetada e construída no SENAI Roberto Mange de Anápolis, GO. Os materiais utilizados foram metalon, barra chata de aço, aço trefilado, poliacetal, disco de aço, bucha de aço, barra de ferro, porcas e parafusos, eletrodos e tubos de PVC para água fria de 85 mm de diâmetro. O tapete utilizado para a movimentação da esteira foi feita com borracha natural, sendo comercialmente denominado “lençol de borracha”. A opção por esse material foi definido com base no custo.

O sistema de transmissão de potência adotado nos cinco primeiros testes de reaeração era composto por inversor de frequência, motor de 1,5 kW e polias. Nos demais testes, a polia foi substituída por roda dentada e corrente.

A água utilizada era fornecida pelo sistema de abastecimento local, sendo filtrada, após cada ensaio, em filtro de manta acrílica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O projeto do conjunto canal e esteira transportadora estão apresentados na Figura 2.5.

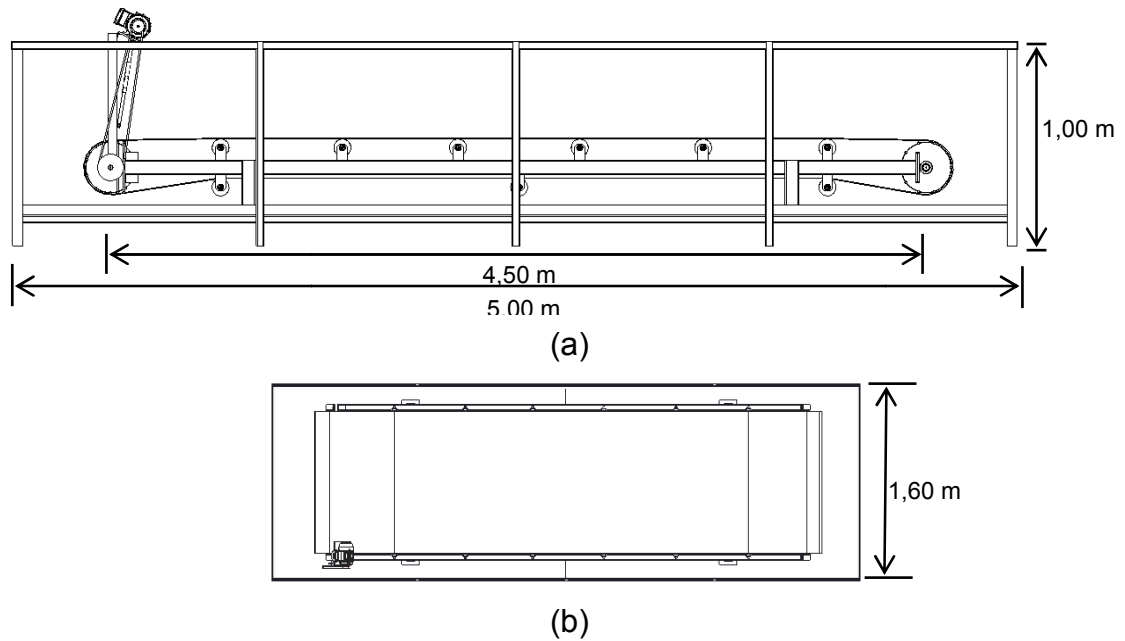


Figura 2.5 - Corte longitudinal (a) e planta baixa (b) do conjunto canal hidráulico e esteira transportadora.

O projeto executado, ou seja, o canal hidráulico com a estrutura metálica pintada, mas sem os fechamentos laterais e com a esteira estão evidenciados na Figura 2.6.



Figura 2.6 - Canal hidráulico sem os fechamentos laterais e com a esteira transportadora.

Para a vedação da junção das lâminas de compensado, que estavam fixadas nas paredes e no fundo do canal, foram testados diversos produtos selantes; entretanto, esses não apresentaram resultados satisfatórios no teste

de estanqueidade. Por isso, revestiu-se a caixa com lona plástica dupla face branca/preta de polietileno de baixa densidade, usada para fazer silagem, da maior gramatura encontrada no mercado local, que foi de 10 μm (Figura 2.7a). A esse material foi sobreposta outra lona de polietileno, utilizada comercialmente para cobertura de piscinas (Figura 2.7b), o que proporcionou adequada estanqueidade ao sistema e, com esse revestimento, todos os testes foram conduzidos.

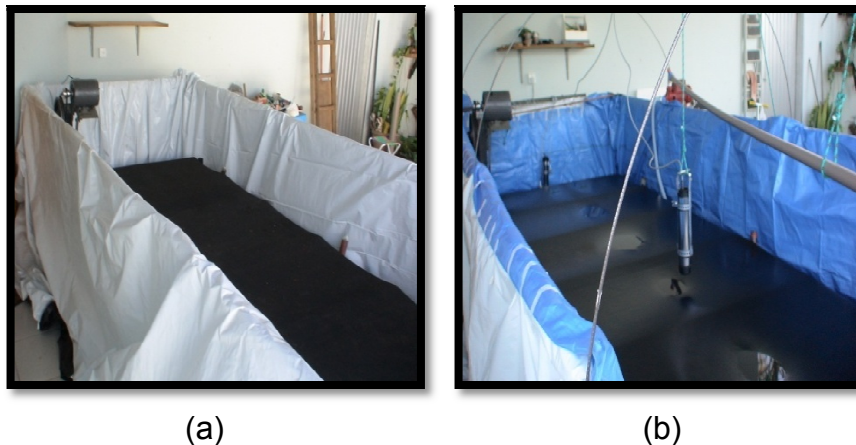
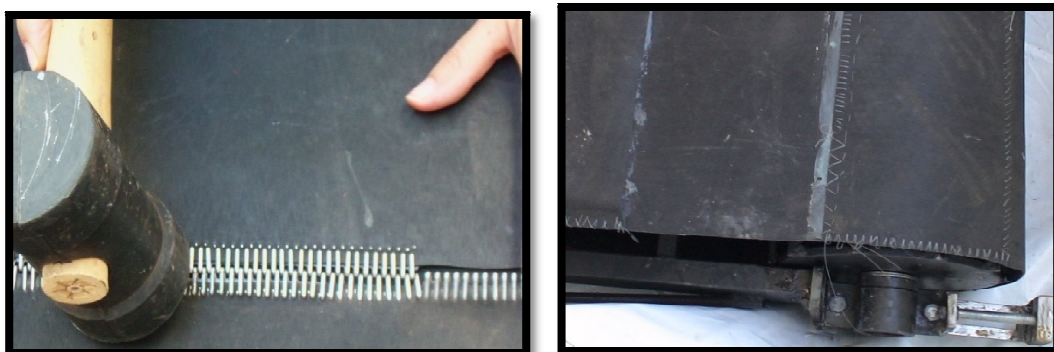


Figura 2.7 - Revestimento do canal com lona dupla face (a) e com lona de polietileno azul (b).

O tapete de borracha usado na esteira, apesar de baixo custo, apresentou alguns inconvenientes como as emendas. Existem, no mercado, três métodos para fechamento de esteira: vulcanização a quente, emenda por grampos e vulcanização a frio. A vulcanização a quente e a emenda por grampos só são possíveis se o material for composto por camadas intercaladas de borracha e lona. Por isso, esses métodos foram descartados. A vulcanização a frio foi ineficaz, após o molhamento da borracha. Por fim, a solução definitiva encontrada foi costurar manualmente o tapete, com linha de náilon. Essas técnicas estão evidenciadas na Figura 2.8 (a e b).



(a)

(b)

Figura 2.8 - Emenda do tapete de borracha com grampos (a) e em costura manual (b).

Outro inconveniente observado foi em relação ao comportamento mecânico da esteira. Com o tempo de uso e os frequentes enchimentos e esvaziamentos do canal hidráulico, o material fragilizou-se, rasgando com facilidade nas emendas, o que ocasionava periódicas manutenções.

Vários ajustes ao projeto original foram necessários ao longo do desenvolvimento dos trabalhos, visando-se adequar o sistema perante uma série de problemas que foi ocorrendo. A primeira modificação foi a instalação de arcos ao longo da caixa, para que essa pudesse ficar coberta durante os testes, evitando assim a ocorrência de tensão cisalhante decorrente do vento. Além disso, decidiu-se por filtrar a água ao final de cada trabalho. Os resultados dessas mudanças estão apresentados na Figura 2.9 (a, b e c).

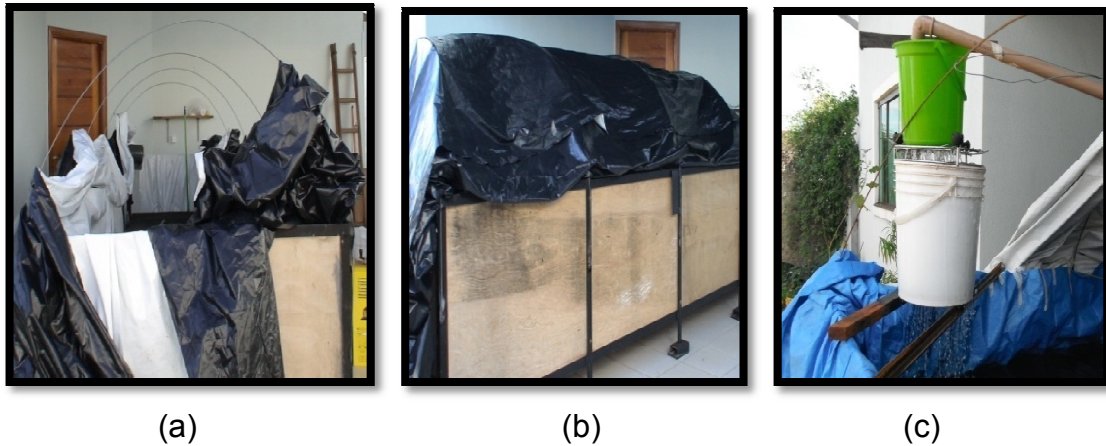


Figura 2.9 - Detalhes das mudanças realizadas no sistema, em decorrência de uma série de problemas que ocorreu durante sua operação.

O sistema de transmissão de potência inicialmente instalado era constituído por uma árvore de polias, motor e inversor de frequência. Nos primeiros cinco testes de reaeração, em que o volume de água dentro do canal hidráulico era pequeno, o sistema funcionou bem, mas, com o aumento da lâmina, a correia passou a deslizar, chegando até a parar. Após várias trocas de correia e de polia, optou-se por usar o sistema de transmissão de moto, composto por pinhão, coroa e corrente.

A velocidade da esteira foi calibrada relacionando-a à frequência estabelecida no inversor de frequência. A relação linear desse ajuste, para o sistema funcionando com polias e com coroa dentada e corrente, está apresentada na Figura 2.10. Nesses dois sistemas, atingiu-se, em nível de confiança de 95%, R^2 de 0,9981 e 0,9991, respectivamente.

Os custos do projeto foram relativamente baixos, se comparados com canais hidráulicos com paredes de vidro e fundo em aço inoxidável, principalmente quando se consideram as dimensões não usuais adotadas. Entretanto, no canal hidráulico ora descrito, os cuidados com manutenção demandaram grande tempo e recurso. Deve-se, no entanto, ressaltar que os baixos custos de construção do sistema (Tabela 2.1) devem-se à parceria com SENAI Roberto Mange, onde se projetou e executou a construção do sistema. Sem esse apoio, no local onde foi construído, o trabalho seria inviabilizado.

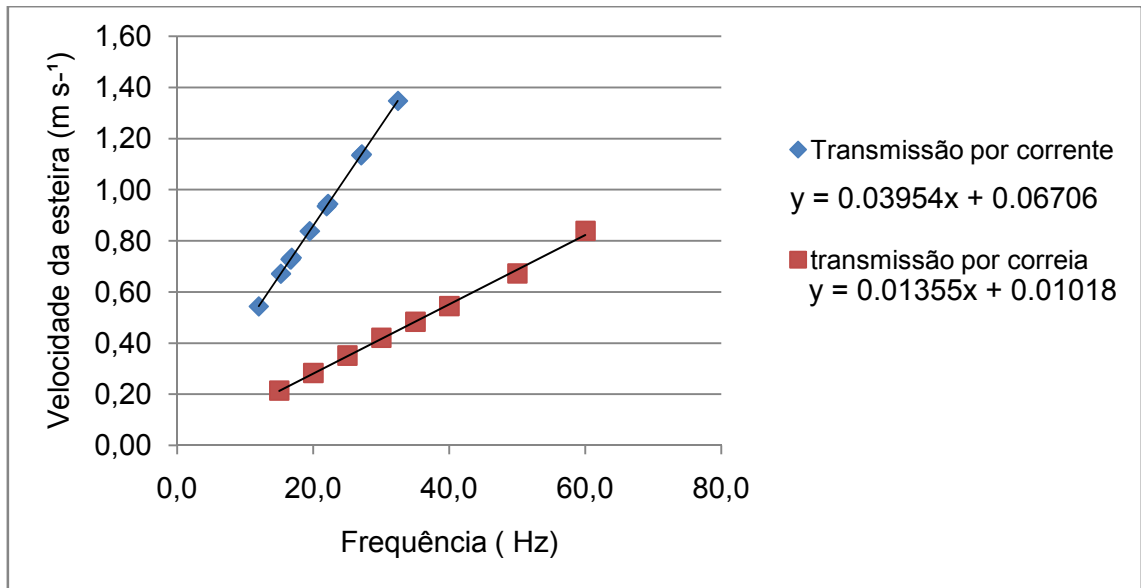


Figura 2.10 - Curva de calibração da velocidade da esteira no canal hidráulico.

Em estudos de trocas gasosas entre o ar e a água, as características geométricas do canal são de grande importância, principalmente largura e profundidade de lâmina de água. A variável profundidade de lâmina de água figura em todas as equações de estimativa disponíveis na literatura, visto que está relacionada às diversas forças que atuam no escoamento da água como forças inerciais, viscosas e outras. De acordo com Melching e Flores (1999), o coeficiente de reaeração parece estar relacionado com taxa de dissipação de energia, que por sua vez depende da escala do escoamento que, em canais hidráulicos, pode ser adequadamente descrito pela razão entre largura (B) e profundidade (H), denominado de fator de forma.

Tabela 2.1 - Custo de execução do projeto do canal hidráulico com fundo deslizante

Descrição	Quantidade	Valor (R\$)	Fonte financiadora
Bomba hidráulica de 0,37 kW	1	150,00	RP**
Cola para borracha	2 L	137,00	RP
Compensado naval	5 folhas	485,20	RP
Conexões		34,43	RP
Ferragem		1.237,68	CNPq/RP
Filtro	1	44,00	RP
Grampo	2 caixas	104,00	RP
Inversor de frequência	1	2.500,00	UEG
Lonas de polietileno	3	286,00	RP
Motor elétrico de 1,5 kW	1	320,00	RP
Pé para bomba e conexões	1	40,00	RP
Poliacetil	1 tarugo	415,00	RP
Selantes	5	60,00	RP
Sistema de transmissão de potência	2 jogos	125,00	RP
Tapete de borracha	11 m	720,00	CNPq/RP
Tinta Neutrol	1 galão	150,00	RP
Tubos de PVC	3	205,26	RP
Outros		173,76	RP
Mão de obra		1.630,00	RP
Total		8.817,33 (U\$ 4.007,87)	

*1 U\$ = R\$ 2,20 em junho 2012

**RP = recurso próprio.

Neste trabalho, algumas limitações foram impostas pelas dimensões do canal como a largura, cujo valor adotado foi de 1,57 m. Entretanto, como a razão entre largura e profundidade máxima permitida para a lâmina de água foi maior do que cinco, isso implicou que, teoricamente, pode-se considerar o canal, de acordo com Araújo (1995), com largura infinita. Em relação ao comprimento, o valor adotado de 5,0 m foi o suficiente para garantir a existência de um trecho de cerca de 1,5 m, onde o escoamento turbulento estaria plenamente desenvolvido. Portanto, ao se conjugar esses dois aspectos, ou seja, largura e comprimento, foi possível delimitar uma região central, onde foram efetuados os estudos de reaeração; nessa região não houve, teoricamente, influência de parede no escoamento. Dos resultados, esperou-se que sejam comparáveis aos de canais naturais.

A profundidade máxima de projeto, de lâmina de água, foi de 0,30 m, considerando o referencial sobre a esteira. Esse valor foi adotado porque se tinha por objetivo o estudo de reaeração em canal raso. Apesar disso, essa profundidade não foi utilizada, pois, por causa do peso da água, havia riscos de rompimento do tapete de borracha, na região da emenda. O limite inferior de profundidade adotado foi de 0,11 m, pois abaixo desse valor a oscilação produzida pelo tapete de borracha em movimento apresentava escoriações na sonda de medição do oxigênio dissolvido na água, com risco de danificá-la. Por isso, estudaram-se somente os escoamentos que ocorriam em profundidades entre 0,11 m e 0,25 m. Pesquisas em canais de laboratório com pequenas profundidades também foram conduzidas por Moog e Jirka (1999), os quais trabalharam na faixa de 0,02 m a 0,10 m. Já Thackston (1966) usou em seus estudos profundidades de 0,011 m a 0,17 m e Krenkel (1960) trabalhou com 0,022 m a 0,06 m.

Entretanto, em estudos de reaeração em canais naturais, alguns pesquisadores, como Vendrame (1982), citam profundidades de 0,15 m a 0,37 m para o Rio Saracuruna, na baixada fluminense. Já no Rio Pomba, afluente do Rio Paraíba do Sul, em diferentes trechos foram verificados por Almeida (2006) valores de 0,36 m a 1,03 m; Matos et al. (2011), de 0,32 a 0,94 m, no período seco do ano; e Guedes (2008), de 1,41 m a 2,22 m. Para o Rio Turvo Sujo, Barros (2008) verificou variação de 0,49 a 0,71 m e Nunes et al. (2011) constataram de 0,69 m a 1,40 m.

Em relação à velocidade de movimentação da esteira, o limite inferior e o superior foi de $0,54 \text{ ms}^{-1}$ e $1,35 \text{ ms}^{-1}$, respectivamente. Esses foram definidos pelas condições de trabalho dos equipamentos que compunham o sistema de transmissão de potência; ou seja, para valores de velocidade abaixo de $0,54 \text{ ms}^{-1}$, o aquecimento excessivo do motor indicava que as condições de operação eram inapropriadas. Para velocidades acima de $1,35 \text{ ms}^{-1}$, intensa vibração produzida pelo sistema propulsor era propagada por todo o aparato experimental, o que denotava a fragilidade da esteira, que necessitaria de maior robustez e sistemas de apoio que absorvesse a vibração, para trabalhar com melhor desempenho nessas condições. Além disso, a instabilidade verificada no canal hidráulico representava forte indício de que a estrutura de sustentação também necessitava de apoio mais adequado, a fim de absorver

as vibrações e aumentar a estabilidade do canal. Essas, entretanto, foram observações efetuadas durante os testes, mas não foram quantificadas. Porém, para que houvesse maior utilização desse tipo de equipamento, em trabalhos sobre reaeração, seria importante que estudos de resistência mecânica e de vibração fossem realizados para que se viabilizasse o uso de maiores velocidades de deslocamento da esteira e maiores profundidades de lâmina de água.

A análise conjunta da profundidade do escoamento e da velocidade de movimentação da esteira proporcionaram velocidade média da água entre $0,05 \text{ ms}^{-1}$ e $0,20 \text{ ms}^{-1}$, que são valores inferiores aos obtidos em canais naturais, que, no período de seca, geralmente estão entre $0,20 \text{ ms}^{-1}$ e $0,7 \text{ ms}^{-1}$, conforme verificaram Almeida (2006), Barros et al. (2011) e Matos et al. (2011), em rios da Zona da Mata mineira.

5. CONCLUSÃO

- Os objetivos foram plenamente atendidos, pois foi possível a execução, com sucesso, do experimento, que foi construído com custos relativamente baixos para um projeto de pesquisa.
- Os limites operacionais do canal hidráulico com fundo deslizante impuseram a profundidade de lâmina de água de trabalho entre 0,11 m e 0,25 m e velocidade de movimentação da esteira na faixa entre 0,54 a $1,35 \text{ ms}^{-1}$.
- A pequena profundidade do escoamento obtido no canal hidráulico é compatível com o escoamento raso em períodos de seca, em que os estudos de reaeração são mais relevantes.
- As velocidades médias do escoamento da água obtidas no canal hidráulico foram inferiores às dos canais naturais, em período de seca.
- Os estudos sobre a resistência mecânica e vibração no aparato experimental são necessários para ampliar as condições de operação do equipamento.

6. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, T.V. **Índice de qualidade da água e coeficiente de autodepuração de trechos do rio Pomba**. 2006. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ARAÚJO, J.C. Lei logarítmica para distribuição unidimensional de velocidade em canais abertos. **Revista Brasileira de Engenharia**, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p. 5-24, 1995.

ARMA, K.V.N.; LAKSHMINARAYANA, P.; RAO, N.S.L. Velocity distribution in smooth rectangular open channels. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 109, n. 2, p. 270-289, 1983.

ÁSSIS, G.R.S. **Estudo experimental do efeito de interferência no escoamento ao redor de cilindros alinhados**. 2005. 302 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

BARROS, F.M. **Dinâmica do nitrogênio e do fósforo e estado trófico nas águas do rio Turvo Sujo**. 2008. 193 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

BARROS, F.M.; MARTINEZ, M.A.; MATOS, A.T.; CECON, P.R.; MOREIRA, D.A. Balanço de oxigênio no Rio Turvo Sujo-MG em diferentes épocas do ano. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 19, n. 1, p. 72-80, 2011.

BENNETT, J.P.; RATHBUN, R.E. **Reaeration in open channel flow**. Washington: United States Department of the Interior, 1972. 86 p.

CHAO, A.C.; CHANG, D.S.; SMALLWOOD JR., C.; GALLER, W.S. Influence of temperature on oxygen transfer. **Journal Environment Engineering**, v. 113, n. 4, p. 722-735, 1987.

CHIU, C.L.; CHIOU, J.D. Structure of 3D flow in rectangular open channels. **Journal Hydraulic Engineering**, v. 112, n. 11, p. 1050-1068, 1986.

GUEDES, H.A.S. **Modelagem da qualidade da água e da capacidade de autodepuração do rio Pomba**. 2009. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

MATOS, A.T.; ALMEIDA, T.V.; SILVA, D.D.; FARAGE, J.A.P. Coeficiente de reaeração em três trechos do Rio Pomba (MG), obtidos nos períodos chuvoso e seco. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 19, n. 4, p. 361-369, 2011.

MEGA, E.A.F. **Estudo experimental do escoamento em cavidades abertas utilizando um canal de superfície livre**. 2006. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP.

MELCHING, C.S.; FLORES, H.E. Reaeration equations derived from U.S. Geological Survey database. **Journal of Environmental Engineering**, v. 125, n. 5, p. 407-414, 1999.

MOOG, D.B.; JIRKA, G.H. Analysis of reaeration equations using mean multiplicative error. **Journal of Environmental Engineering**, v. 124, n. 2, p. 104-110, 1998.

MOOG, D.B.; JIRKA, G.H. Tilting wind-water tunnel. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AIR-WATER GAS TRANSFER, 3, 1995, Heidelberg. **Proceedings...** Heidelberg: AEON Verlag, 1995. p. 495-498.

NEZU, I.; RODI, W. Open-channel flow measurements with a laser doppler anemometer. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 112, n. 5, p. 335-355, 1986.

NEZU, I.; TOMINAGA, A.; NAKAGAWA, H. Field measurements of secondary currents in straight rivers. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 119, n. 5, p. 598-614, 1993.

NUNES, D.G.; SILVA, D.D.; MATOS, A.T. Índice de qualidade da água em trechos do Rio Turvo Sujo, Viçosa-MG. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 19, n. 5, p. 459-468, 2011.

TAMBURRINO, A.; GULLIVER, J.S. Comparative flow characteristics of a moving-bed flume. **Experiments in Fluids**, v. 13, p. 289-298, 1992.

VENDRAME, I.F. **Determinação experimental do coeficiente de reaeração em rios e canais abertos, com emprego de traçadores**. 1982. 200 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

CAPÍTULO 3

CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DO ESCOAMENTO EM CANAL DE FUNDO DESLIZANTE

Resumo: O coeficiente de reaeração, K_2 , é a variável associada à capacidade de autodepuração de um corpo hídrico, cujo valor alcançado depende, entre outros fatores, das características hidráulicas do escoamento, como velocidade média, profundidade, fator de forma, declividade e velocidade cisalhante. Em estudos de reaeração efetuados em canais naturais, a maioria dessas variáveis é determinada diretamente por instrumentos de medida. Porém, em canal hidráulico com fundo deslizante, é necessário que algumas variáveis sejam estimadas matematicamente. Neste trabalho, os objetivos foram avaliar, em canal hidráulico raso de fundo deslizante, as variáveis velocidade média e cisalhante; relacionar essas variáveis às que seriam obtidas em canal com fundo fixo; verificar as relações existentes entre essas variáveis e a velocidade da esteira deslizante e o fator de forma; e quantificar a declividade equivalente a um canal de fundo fixo. Por relações matemáticas, pôde-se verificar que, para as condições de operação do canal de fundo deslizante, a velocidade média máxima foi $0,20 \text{ ms}^{-1}$, tendo crescido em proporção direta com o fator de forma. Além disso, a declividade equivalente ao canal de fundo fixo foi menor que $0,002 \text{ mm}^{-1}$, caracterizando o escoamento como lótico de baixa velocidade. **Palavras-chave:** Hidráulica de canais, canal com fundo móvel, velocidade de escoamento.

Abstract: The reaeration coefficient, K_2 , is the variable associated with the self-purification capacity of a water body, whose reached value depends, among other factors, on the hydraulic characteristics of the flow, such as mean velocity, depth, shape factor, slope and shear velocity. In reaeration studies performed in natural channels, most of these variables are determined directly by measuring instruments. However, in moving-bed channel, it is necessary to estimate some variables mathematically. In this work, the objectives were to evaluate in shallow depth moving-bed channel the mean and shear velocity variables and relate them to what would be obtained in a channel with fixed bed, and also to examine the relationships between these variables and the conveyor belt velocity and shape factor as well as to quantify the equivalent slope to a fixed bed channel. Through mathematical relations it was possible to verify that for the operating conditions of the moving-bed channel, the maximum mean velocity was 0.20 ms^{-1} , having it grown in direct proportion to the shape factor. Furthermore, the equivalent slope to the fixed bed channel was less than 0.002 mm^{-1} , characterizing the flow a slow velocity lotic.

Keywords: Hydraulics of channels, moving-bed channel, flow velocity.

1. INTRODUÇÃO

Em estudos de reaeração, as características hidrodinâmicas do escoamento da água são informações importantes, quando se pretende descrever o fenômeno físico de transferência de massa do oxigênio do ar para a água, em condições de turbulência, que é o fenômeno normalmente observado em escoamentos naturais. Isso se justifica pela analogia que há entre o transporte de quantidade de movimento e de massa, que é utilizada, teoricamente, para estimativa do coeficiente global de transferência de massa (CREMASCO, 2009). Muitos trabalhos, com esse enfoque, foram realizados em canais hidráulicos naturais ou de laboratório, em que as características hidrodinâmicas mais utilizadas, para o desenvolvimento de equações de predição do coeficiente de reaeração, K_2 , foram a profundidade e a velocidade média da água.

Canais hidráulicos são estruturas em que o fluido líquido escoar, permanecendo a sua superfície livre em contato com a atmosfera, como ocorre em cursos de água. Em laboratório, essas estruturas hidráulicas são amplamente utilizadas, principalmente para ensaios e estudos nas áreas de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos, proporcionando melhor compreensão dos fenômenos físicos envolvidos no escoamento e grande avanço dessas ciências.

A grande vantagem do uso de canais em laboratório é possibilitar estudos com variações e controle nas condições hidráulicas, o que seria difícil, senão impossível, em condições de campo. Particularmente nos estudos de reaeração, variações nas características hidráulicas, ainda que limitadas, são possíveis somente se forem avaliados diferentes rios ou trechos e em várias épocas do ano, o que, além de demandar grande tempo e onerar sensivelmente o trabalho, introduz outras variáveis hidráulicas e ambientais, não controláveis no sistema.

Existem muitos tipos de canais hidráulicos instalados em laboratório. Os tradicionais têm a diferença de nível como gradiente de potencial para que ocorra o escoamento do líquido. No canal hidráulico com fundo deslizante, o campo de escoamento é proporcionado pela tensão de cisalhamento

transmitido pelo movimento da esteira, posicionada no fundo do canal, ao fluido (TAMBURRINO; GULLIVER, 1992).

O interesse em se utilizarem canais hidráulicos de fundo deslizante, para estudos de reaeração, reside na possibilidade de se produzir escoamento permanente, com turbulência e longo período de residência, o que permite estudo de fenômenos lentos. Além disso, há a possibilidade de se projetar a estrutura a fim de apresentar comportamento hidráulico semelhante ao de rios rasos. Por isso, os objetivos deste trabalho foram quantificar variáveis médias do escoamento da água como velocidade e velocidade cisalhante em canal hidráulico raso com fundo deslizante; relacionar essas variáveis às que seriam obtidas em canal com fundo fixo; verificar as relações existentes entre essas variáveis e a velocidade da esteira deslizante e o fator de forma; e quantificar a declividade equivalente a um canal de fundo fixo.

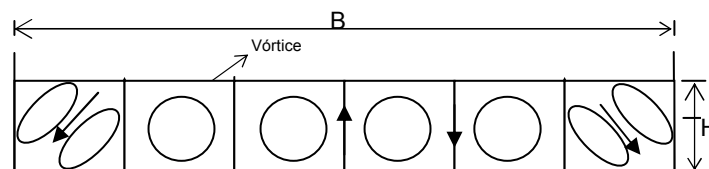
2. CARACTERÍSTICA DA TURBULÊNCIA E FATOR DE FORMADO CANAL HIDRÁULICO

Pesquisas sobre turbulência, na camada limite, em tubulações com escoamento de ar, têm sido conduzidas desde a década de 1950 do século XX; entretanto, em canais abertos, esses trabalhos iniciaram-se apenas na década de 1970, em razão da falta de tecnologia apropriada para se efetuarem medições no meio líquido, dificuldade essa superada completamente na década de 1980, com o desenvolvimento dos anemômetros a laser (NEZU, 2005).

Estudos hidráulicos em canais com esteira deslizante posicionada no fundo não são recentes; o primeiro trabalho a relatar a visualização de estruturas de turbulência de grandes vórtices, com tamanho comparável à profundidade do escoamento e correntes secundárias foi o de Gulliver e Halverson (1987), os quais utilizaram bolhas de hidrogênio e um plano com luz a laser para fazer a visualização. Tamburrino e Gulliver (2007), utilizando traçadores e fotografias, fizeram um estudo visual do escoamento em canal de fundo móvel, em que a profundidade mínima da água sobre a esteira foi 0,1112 m e a máxima, 0,1251 m. Tamburrino (1991) avaliou o campo de velocidade, que foi medido com a técnica da velocimetria a laser sob efeito Doppler (LDA),

em que a velocidade da esteira variou de $0,849 \text{ ms}^{-1}$ a $1,028 \text{ ms}^{-1}$. Nesses estudos, os autores confirmaram a presença de grandes vórtices e de escoamentos secundários, sendo concluído que o número de vórtices na seção transversal estava basicamente relacionado com o fator de forma, ou seja, a razão entre largura (B) e profundidade (H). Além disso, observaram que nas condições do experimento, os grandes vórtices foram os principais agentes de transporte de partículas dentro do escoamento, tendo, algumas vezes, atingido a superfície, sugerindo relação com a teoria da renovação superficial.

A estrutura dos grandes vórtices caracteriza-se por apresentar zonas com trajetória ascendente, alternando com outras descendentes (Figura 3.1), cujas células têm tamanho definido pela profundidade do escoamento. Entretanto, essas não são estáveis no tempo e no espaço, sendo permanentemente instáveis na seção transversal do canal hidráulico, mudando sua largura. Em relação à dimensão longitudinal dos vórtices, Tamburrino (1991), avaliando canal com fundo móvel, verificou que era duas vezes a profundidade e independia da velocidade do fundo.



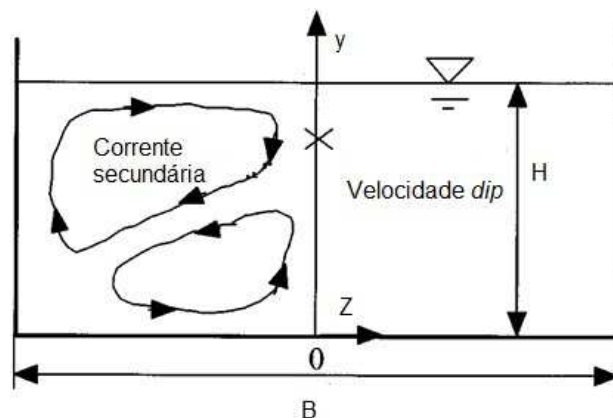
Fonte: Adaptado de Tamburrino (1991).

Figura 3.1 - Esquema representativo da relação entre o número de grandes vórtices formados numa seção transversal de canal hidráulico para o fator de forma (B/H) igual a 6 do sentido de movimentação dos vórtices.

As correntes secundárias são definidas como movimento do fluido que é perpendicular ao escoamento principal, sendo de três tipos, dependendo da origem. O primeiro tipo ocorre em decorrência da atuação das forças que agem sobre o fluido, mudando a direção do movimento da água e está relacionado com o depósito de sedimentos e erosão em canais naturais; o segundo é produzido em canais retos e está intimamente correlacionado à tensão turbulenta em escoamento anisotrópico; e o terceiro refere-se à produção de

pequenas oscilações por causa da presença de sólidos nos fluidos, ou sólidos próximos à borda de canais, no caso de produção de ondas estacionárias (TAMBURRINO, 1991).

Nezu (2005), fazendo uma retrospectiva histórica dos maiores avanços nos estudos sobre turbulência em água, afirmou que um critério importante em canais hidráulicos de fundo fixo ou móvel, na caracterização de escoamentos, é a relação entre largura (B) e profundidade (H). Nezu e Rodi (1985) observaram que quando o fator de forma (B/H) é menor que cinco, a velocidade máxima (U_{max}), na linha central do canal, ocorre abaixo da superfície livre, sendo denominada velocidade-*dip* (Figura 3.2), indicando que, nessa situação, o efeito de correntes secundárias não é negligenciável. Nezu e Nakagawa (1993), ao reexaminarem o valor crítico de B/H , propuseram que, na zona central de canais, cujo fator de forma seja superior a cinco, o efeito de paredes é negligenciável e portanto não interfere nas características médias do escoamento. Nessas condições, segundo Tamburrino (1991), se a tomada de dados for efetuada na região central do canal de fundo deslizante, os resultados são comparáveis aos tomados na região central de um canal hidráulico tradicional. Canais naturais geralmente apresentam $B/H > 10$, o que significa que a velocidade máxima está situada na superfície livre (ARAÚJO, 1995; RODRIGUES, 2003).



Fonte: Adaptado de Nezu (2005).

Figura 3.2 - Esquema representativo da formação de correntes secundárias em canais hidráulicos, cuja relação $B/H < 5$, e, por consequência, a ocorrência da velocidade *dip*, ou seja, velocidade máxima abaixo da superfície livre.

Ao analisar que todos os modelos de transferência de massa do oxigênio do ar para a água foram desenvolvidos para escoamento unidimensional, em que são considerados valores médios de velocidade e de profundidade, e assumindo-se que a concentração do oxigênio é uniformemente distribuída na seção transversal, concluiu-se que os modelos existentes fornecem valores médios do coeficiente de troca gasosa. Assim, não se considera o efeito de ocorrência de correntes secundárias, as quais impossibilitam que o processo seja controlado apenas por variáveis unidimensionais (GUALTIERI; GUALTIERI, 2004). Por essa razão, é desejável que as correntes secundárias tenham sua influência reduzida, ao máximo possível, o que pode ser conseguido ao se utilizar fator de forma apropriado para o canal hidráulico.

3. VELOCIDADE DO ESCOAMENTO DA ÁGUA

O escoamento uniforme da água é verificado em canais longos e retos, onde a profundidade, declividade e área transversal são mantidas constantes e, conseqüentemente, a velocidade média também, o que caracteriza o escoamento como permanente. Segundo Souza et al. (2011), em escoamentos turbulentos, a velocidade instantânea (u) caracteriza-se pela flutuação no tempo e no espaço, sendo, por isso, sugerido por Reynolds que fosse desmembrada em uma componente média (\bar{u}) e outra flutuante (u').

Ao analisar o escoamento turbulento, Prandtl, em 1925, fazendo uma analogia com a teoria cinética dos gases, propôs que a partícula do fluido, ao percorrer uma distância l , transfere sua quantidade de movimento, o que produz as flutuações, sendo essa da mesma ordem de grandeza daquelas que ocorrem num escoamento turbulento real. Essa distância foi denominada de “comprimento de mistura”, que, segundo Prandtl, em região próxima de um sólido é proporcional à distância normal à parede (SOUZA et al., 2011), conforme apresentado na Equação 2.1, em que k é a constante definida por von Kármán, que, em fluidos homogêneos, vale aproximadamente 0,4, independentemente das condições do escoamento (NEZU, 2005).

$$\ell = k y \quad (3.1)$$

Ao desenvolver seus estudos sobre camada limite turbulenta, a partir das hipóteses ora descritas, Prandtl obteve o perfil de velocidade no escoamento, para a região onde os efeitos de inércia dominam $z^+ > 30$, que é dado pela lei logarítmica, Equação 3.2.

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{u^* z}{\nu} \right) + c \quad (3.2)$$

em que z^+ é um adimensional obtido da relação, $\left(\frac{u^* z}{\nu} \right)$; u , a velocidade (LT^{-1}), na posição vertical z (L); u^* , a velocidade cisalhante (LT^{-1}); ν , a viscosidade cinemática (L^2T^{-1}); e c , uma constante de integração, que depende das características médias do escoamento e que, em canal de parede lisa, pode variar de 5,0 a 5,5 (NEZU, 2005).

A lei logarítmica, apesar de ser muito questionada, em razão da sua fragilidade teórica, tem resistido ao tempo pela qualidade de seus resultados e simplicidade, tendo em vista não envolver nenhuma técnica matemática sofisticada (ARAÚJO, 1995; WHITE, 1991), nem variáveis de difícil quantificação. Existem, entretanto, propostas mais recentes, entre essas as que pretendem descrever integralmente o fenômeno, desde a camada limite até a região externa a ela, por meio de lei da potência, como o que foi apresentado por Castro-Orgaz e Dey (2011), os quais desenvolveram nova teoria com base nos conceitos de conservação de massa e atrito dentro da camada limite. A equação foi aplicada a dados experimentais de outros autores, tendo apresentado bom ajustamento. Lassabatere et al. (2013) apresentaram procedimento de integração da equação de Navier-Stokes, no escoamento médio, para obter a distribuição da velocidade na vertical, na região fora da camada limite. Segundo esses autores, o modelo parece ser capaz de representar diferentes condições de escoamento, entretanto, são necessários mais estudos para esclarecer alguns pontos, como a influência do fator de forma do canal hidráulico.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em Anápolis, GO, no período de junho a outubro de 2012.

Utilizou-se, no trabalho, um canal hidráulico com 5,0 m de comprimento; 1,57 m de largura; e 0,80 m de profundidade, que teve apoiado no seu fundo uma esteira transportadora com 4,50 m de comprimento e 1,20 m de largura. As relações de dimensão usadas foram definidas conforme proposições de Tamburrino (1991); por isso, o sistema por ele desenvolvido e o que foi apresentado nesta pesquisa podem ser considerados hidraulicamente semelhantes, o que possibilitou a comparação de resultados. Detalhes construtivos estão apresentados no Capítulo 2 desta tese.

De acordo com Tamburrino e Gulliver (1992), em canal hidráulico com fundo deslizante, é necessário considerar que a esteira, ao se mover com velocidade constante, proporciona escoamento do fluido, cuja velocidade de escoamento está relacionada à da esteira, o que implica que o referencial se move juntamente com ele. Para que as características do escoamento em canais de fundo fixo e deslizante sejam comparáveis, ambos devem estar relacionados a um mesmo referencial inercial. Nesse caso, a natureza e estrutura do escoamento, em ambos os tipos de canais, são os mesmos, sendo os valores obtidos nos diferentes sistemas comparáveis e relacionados pela transformação Galileana:

$$\vec{U} = \vec{U_b} - \vec{U_z} \quad (3.3)$$

em que \vec{U} é a velocidade em relação ao referencial móvel; $\vec{U_b}$, a velocidade da esteira; e $\vec{U_z}$, a velocidade na posição z, em referencial fixo.

O canal hidráulico com fundo deslizante avaliado foi preenchido com água da rede de abastecimento local de forma que a altura da lâmina acima da esteira proporcionasse fator de forma superior a cinco, para que a região central do canal não fosse influenciada por escoamento secundário. Definiu-se, dessa forma, as profundidades de 0,11 m; 0,13 m; 0,15 m; 0,17 m; 0,20 m; e

0,25 m, medidas no centro geométrico do canal, que correspondem, respectivamente, ao fator de forma de 14,27; 12,07; 10,46; 9,23; 7,85; e 6,28.

A lâmina d'água sobre a esteira apresentou declividade de 0,004 m/m, sendo essa determinada por leitura feita com régua com precisão de 0,001m, que era apoiada sobre os roletes intermediários que sustentavam o tapete da esteira. A menor profundidade foi obtida próxima ao motor, que será denominado, neste texto, de “jusante” e a maior, no extremo oposto, de “montante”.

A movimentação da água se deu sempre na mesma direção, ou seja, para jusante; o critério utilizado para definição das velocidades de acionamento estava relacionado com as limitações do sistema, formado pelo conjunto motor, inversor de frequência e sistema de transmissão de potência por correias. A menor velocidade utilizada na esteira foi de $0,54 \text{ ms}^{-1}$, que correspondia à frequência do motor de 12 Hz, e que foi usada em dois testes para as lâminas de 0,11 m e 0,15 m. A mesma velocidade não foi adotada para a realização do testes com as demais lâminas, pois havia risco de queima do motor por superaquecimento, tendo em vista que seu sistema de arrefecimento é natural. A maior velocidade da esteira, que foi de $1,35 \text{ ms}^{-1}$, foi utilizada apenas para medições efetuadas no teste com a lâmina de 0,15 m, tendo em vista que a intensa vibração do motor se propagava para todo o aparato experimental, gerando grande instabilidade física no sistema. Em razão dessas limitações, adotaram-se as velocidades de funcionamento da esteira de 0,54; 0,67; 0,74; 0,84; 0,94; 1,14; e $1,35 \text{ ms}^{-1}$. As velocidades que proporcionaram melhor operação do sistema (0,74; 0,94; e $1,14 \text{ ms}^{-1}$) foram repetidas em todas as lâminas, exceto para a de 0,11 m.

Ao final dos testes de reaeração, realizou-se a tomada de dados da componente do vetor velocidade, na direção do escoamento, sobre a superfície da água. Para isso, utilizou-se o princípio do método do flutuador, que é uma técnica aplicada em pequenos cursos d'água para estimativa da vazão. Delimitaram-se 2 m na região central do canal, na direção longitudinal, e na montante da região delimitada era colocada pequena partícula circular de aproximadamente 0,005 m de diâmetro feita de etileno de acetato de vinila. O tempo necessário para o percurso foi medido por cronômetro digital. A relação

entre espaço percorrido e tempo, repetidos em 50 vezes, resultou na velocidade média da água na superfície.

Com os valores medidos da velocidade da esteira (U_b) e da superfície da água (U_s), estimou-se a velocidade cisalhante global (u^*), que age sobre as paredes e a esteira, por meio da equação logarítmica (Equação 3.6); a velocidade média (U) na posição vertical z foi substituída pela diferença $U_b - U_s$, em ms^{-1} , fazendo-se, assim, a mudança de referencial, de móvel para fixo. Os fatores constantes de von Karman (k) e B tiveram seus valores adotados em 0,4 e 5,5, respectivamente, seguindo as recomendações de Tamburrino (1991). A viscosidade cinemática foi obtida pela relação entre viscosidade dinâmica (μ), Equação 3.4 (a e b) e a massa específica (ρ), em kg m^{-3} , utilizando-se a Equação 2.5, conforme apresentado por Haynes (2012).

Para $0^\circ\text{C} \leq T \leq 20^\circ\text{C}$:

$$\text{Log}_{10}(\mu_T) = \frac{1301}{998,333 + 8,1855(T-20) + 0,00585(T-20)^2} - 1,30233 \quad (3.4a)$$

Para $20^\circ\text{C} < T \leq 100^\circ\text{C}$

$$\text{Log}_{10}\left(\frac{\mu_T}{\mu_{20}}\right) = \frac{1,3272(20-T) - 0,001053(T-20)^2}{T+105} \quad (3.4b)$$

$$\rho = (999,83952 + 16,945176 T - 7,9870401 \times 10^{-3} T^2 - 46,170461 \times 10^{-6} T^3 + 105,56302 \times 10^{-9} T^4 - 280,54253 \times 10^{-12} T^5) / (1 + 16,879850 \times 10^{-3} T) \quad (3.5)$$

Em canais naturais, a velocidade cisalhante, que é expressa pela raiz quadrada do quociente entre a tensão cisalhante e a massa específica do fluido, geralmente é aproximada pela relação $u^* = \sqrt{g R_H S}$, em que g é a aceleração da gravidade, L T^{-2} ; R_H , o raio hidráulico, L ; e S , a declividade, L L^{-1} . Ao se estimar a velocidade cisalhante global, pôde-se igualmente estimar a declividade equivalente a um canal hidráulico de fundo fixo, por meio da fórmula citada anteriormente.

Por considerar hidraulicamente semelhantes os sistemas de canal com fundo fixo e móvel (TAMBURRINO; GULLIVER, 1992), a velocidade média

(U_m) foi estimada de forma análoga aos que seriam feitos em um de fundo fixo, ou seja, pela integração da equação logarítmica, ao longo da profundidade, conforme White (1991), Equação 2.6; entretanto, houve a necessidade de fazer a substituição de U por $U_b - U_m$, para a mudança de referencial.

$$U = \frac{1}{H} \int_0^H U dz = u^* \left(\frac{1}{k} \ln \left(\frac{Hu^*}{v} \right) + B - \frac{1}{k} \right) \quad (3.6)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Velocidade cisalhante da água e declividade do canal hidráulico

A velocidade cisalhante global da água, ou seja, considerando a influência das paredes laterais e do fundo, estimada durante a condução dos diversos testes, apresentou comportamento linear em relação à velocidade da esteira, conforme pode ser verificado na Figura 3.3, cuja linha reta contínua corresponde à curva ajustada aos dados estimados que teve R^2 de 0,99.

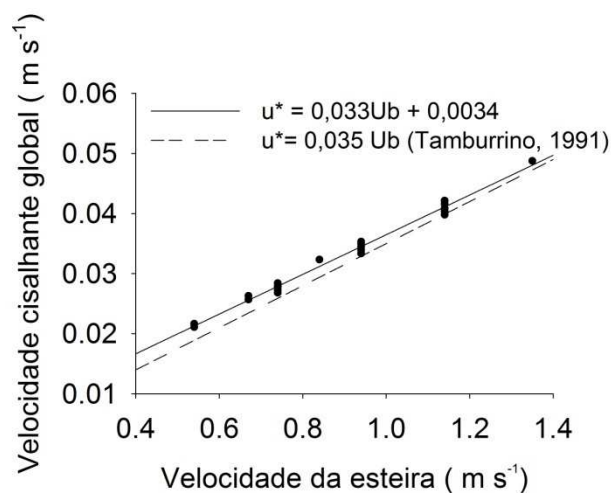


Figura 3.3 - Curva ajustada aos dados estimados da velocidade cisalhante global da água, como função da velocidade da esteira no canal hidráulico com fundo deslizante, comparada com a equação de estimativa da velocidade cisalhante obtida por Tamburrino (1991).

Tamburrino (1991) não usou a equação logarítmica para estimar u^* ; em vez disso, com os dados de velocidade coletados em diferentes profundidades na seção transversal, estimou o seu valor médio por integração gráfica e, aplicando a equação de momento em um volume-controle, obteve a velocidade cisalhante da água. A equação ajustada pelo autor foi: $u^* = 0,035 Ub$, representada na Figura 3.3 pela linha reta tracejada.

Ao comparar os ajustes obtidos, utilizando-se as duas equações, verificou-se que a apresentada neste trabalho forneceu valores 5,88% superiores aos obtidos pela equação do Tamburrino, para a faixa de velocidade da esteira de $0,54 \text{ ms}^{-1}$ a $1,35 \text{ ms}^{-1}$ (Figura 3.3). Essa maior velocidade cisalhante da água era esperada, visto que o cisalhamento está relacionado com o movimento da esteira e com a declividade do canal, que neste trabalho foi aproximadamente quatro vezes maior que a obtida no canal hidráulico utilizado por esse autor, que foi de $0,001 \text{ mm}^{-1}$.

Estimando a velocidade cisalhante global na ausência da esteira, usando a relação $u^* = \sqrt{gR_H S}$, sendo g a aceleração da gravidade (ms^{-2}), R_H o raio hidráulico e S a declividade da superfície líquida igual a $0,004 \text{ mm}^{-1}$ e comparando com a estimativa em que essa estava presente, verificou-se que a velocidade cisalhante foi mais fortemente influenciada pelo efeito que o movimento da esteira causou no fluido adjacente a ela (Figura 3.4) do que em relação ao efeito da declividade.

Considerando-se que em projetos de engenharia são aceitáveis variações de até 10%, então, pode-se afirmar que o sistema proposto por Tamburrino (1991) e o apresentado neste trabalho tiveram comportamento semelhantes, pois a diferença entre esses foi de apenas 5,88%.

A estimativa da velocidade cisalhante global permitiu obtenção da declividade equivalente para um canal hidráulico de fundo fixo. Para isso, foi utilizada a relação $u^* = \sqrt{gR_H S}$; os valores obtidos variaram de $0,00035 \text{ m m}^{-1}$ a $0,0017 \text{ m m}^{-1}$ (Tabela 3.1). Segundo Moog e Jirka (1998), valores superiores a $0,002 \text{ m m}^{-1}$ são considerados pelos hidrologistas como alta declividade em rios.

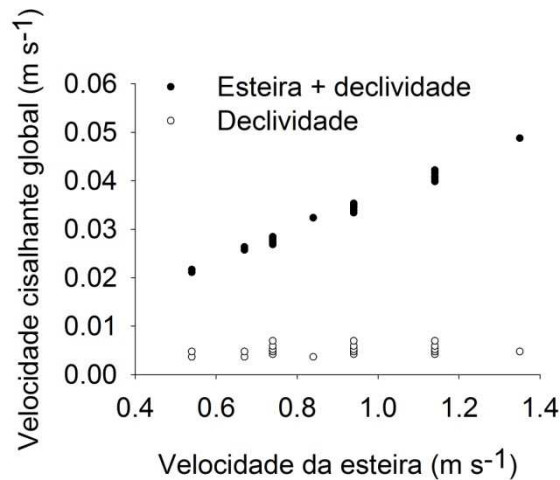


Figura 3.4 - Comparação entre velocidade cisalhante global da água estimada, utilizando-se a equação logarítmica que engloba os efeitos combinados do movimento da esteira e da declividade do canal com a estimativa, promovida por equação, que a relaciona somente com a declividade do fundo do canal.

5.1.1. Velocidade média da água

Em canal hidráulico de fundo deslizante, tem-se uma particular distribuição de velocidade do fluido, visto que seu movimento é proporcionado pela tensão cisalhante, que aparece em decorrência do movimento da esteira, quando sob velocidade constante.

Pelo princípio de não deslizamento, o fluido em contato com a parede adquire a velocidade dela (WHITE, 2011). Assim, em relação à esteira, a máxima velocidade do escoamento da água, na direção longitudinal (eixo y), ocorrerá no seu contato com essa, que é um referencial móvel (Figura 3.5a). À medida que se distancia da placa móvel, por efeito da viscosidade dinâmica e da inércia, há retardamento na velocidade do fluido.

Se o escoamento fosse laminar, a partir de determinada distância da placa móvel, o escoamento não seria influenciado pelo movimento da placa e desse ponto em diante a velocidade seria nula. Com a turbulência, os vórtices transferem sua energia e no movimento ascensional há perda de energia, que implica em redução de velocidade e ganho na descida (Figura 3.1). A esse movimento dos vórtices vem sendo atribuído, por diversos autores, como Moog

e Jirka (1999) e Gualtieri e Gualtieri (2004), a “varredura” do oxigênio na proximidade da região interfacial, denominada de renovação superficial. Nessa região, a transferência de massa é controlada pela camada limite de concentração da fase líquida (JANZEN et al., 2006). Dessa forma, a absorção do oxigênio do ar pela água, que ocorre pelo processo de difusão molecular, e, portanto, é a responsável pela transferência de massa entre os meios (CREMASCO, 2002), é favorecida pelo déficit de concentração promovido pelo movimento dos vórtices. Portanto, ainda que a velocidade na superfície da lâmina de água no canal hidráulico com fundo deslizante, na direção longitudinal, não seja a máxima, a estrutura turbulenta é equivalente a de um canal de fundo fixo (TAMBURRINO, 1991), sendo, por isso, esperado que a frequência de renovação superficial, promovida pelos vórtices, seja equivalente àquela que ocorreria em canal, para determinada velocidade média da água.

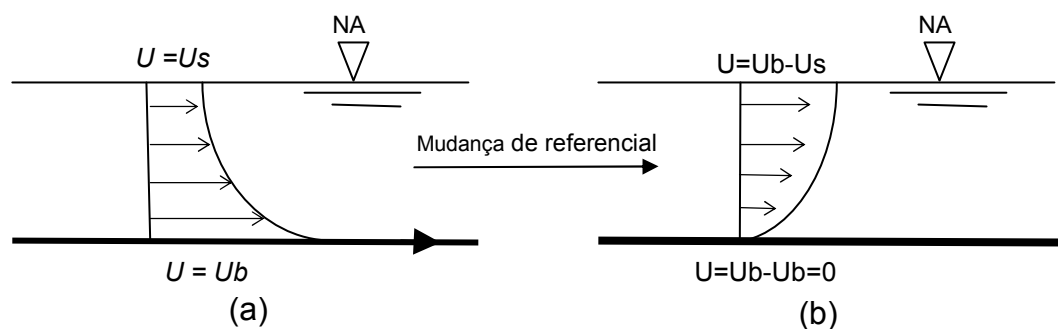


Figura 3.5 - Esquema representativo da distribuição de velocidade do fluido em escoamento, em canal de fundo deslizante, com referencial inercial móvel (a), comparado com a distribuição de velocidade do fluido em canal fixo (b) e a relação entre eles.

Os efeitos combinados da viscosidade dinâmica e da vorticidade produzem a distribuição de velocidade apresentada na Figura 3.5a. Entretanto, a distribuição logarítmica, que ocorre em canais naturais, pode ser obtida ao mudar os valores de velocidade para o referencial fixo (TAMBURRINO, 1992); nesse caso, o canal se comporta como se fosse de fundo fixo, sendo a correspondência entre a velocidade dos sistemas, biunívoca. Assim, a velocidade no fundo torna-se a mínima e na superfície, a máxima, representada pela diferença ($U_b - U_s$) (Figura 3.5b). Tal procedimento é possível por serem, ambos, referenciais inerciais.

Em estudos de reaeração, grande importância é atribuída à velocidade média da água, estando presente, direta ou indiretamente, na maioria das equações preditoras do coeficiente de reaeração. Neste trabalho, essa variável foi estimada por meio da integração da lei logarítmica (Equação 3.6), após a mudança de referencial.

A velocidade média da água nos diferentes testes seguiu a tendência de quanto maior o valor do fator de forma, maior a velocidade média e vice-versa. Esse comportamento é explicado em razão de o fator de forma estar relacionado à profundidade do escoamento, o que equivale a relatar que, sob menores profundidades, ocorrerão maiores velocidades, como pode ser visualizado na Figura 3.6.

Consultando a Tabela 3.1, verificou-se que o menor valor de velocidade média de escoamento da água obtido foi de $0,05 \text{ ms}^{-1}$, quando a esteira foi acionada com a velocidade de $0,54 \text{ ms}^{-1}$ e a profundidade da água no canal era de $0,15 \text{ m}$. A maior velocidade média ($0,20 \text{ ms}^{-1}$) ocorreu quando as profundidades de água no canal eram de $0,13 \text{ m}$ e $0,15 \text{ m}$, com operação da esteira nas velocidades de $0,94 \text{ ms}^{-1}$ e a $1,35 \text{ ms}^{-1}$, respectivamente.

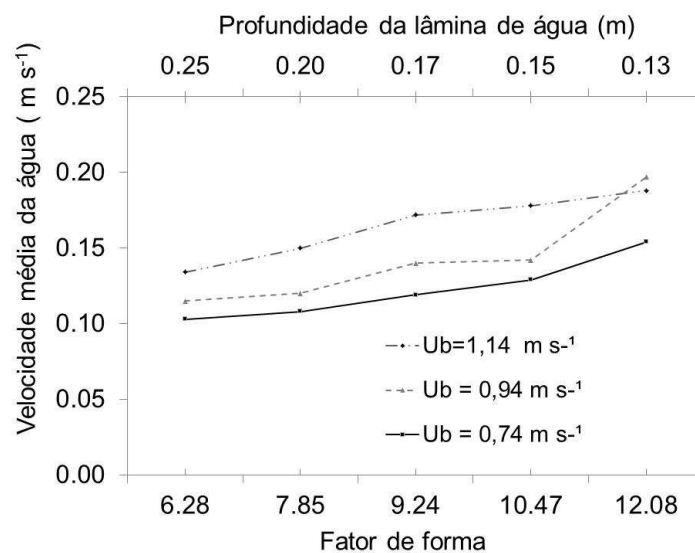


Figura 3.6 - Variação da velocidade média da água em razão da profundidade da lâmina de água e do fator de forma do canal hidráulico de fundo deslizante, para diferentes velocidades de deslocamento da esteira.

Analisando ainda a Tabela 3.1, notou-se que a razão entre a velocidade média da água e a da esteira variou entre 10 e 20%. Tamburrino (1991) encontrou relação de 15,7% ao trabalhar com velocidade da esteira de $1,028 \text{ ms}^{-1}$.

Tabela 3.1 - Velocidade média do escoamento da água em canal hidráulico de fundo deslizante e do deslocamento da esteira, considerando diferentes profundidades de lâmina d'água, bem como a relação entre a velocidade média e a da esteira e a declividade do fundo do canal

Profundidade (m)	Velocidade (ms^{-1})		Um/Ub	Declividade do fundo do canal (mm^{-1})
	Esteira (Ub)	Média (Um)		
0,11	0,54	0,11	0,20	0,0003980
0,15	0,54	0,05	0,10	0,0003597
0,11	0,67	0,14	0,21	0,0005692
0,15	0,67	0,06	0,10	0,0005335
0,13	0,74	0,15	0,21	0,0005801
0,15	0,74	0,13	0,17	0,0005367
0,17	0,74	0,12	0,16	0,0004853
0,20	0,74	0,11	0,15	0,0004238
0,25	0,74	0,10	0,14	0,0003494
0,11	0,84	0,17	0,20	0,0008796
0,13	0,94	0,20	0,21	0,0008902
0,15	0,94	0,14	0,15	0,0008782
0,17	0,94	0,14	0,15	0,0007702
0,20	0,94	0,12	0,13	0,0006801
0,25	0,94	0,11	0,12	0,0005585
0,13	1,14	0,19	0,17	0,0013939
0,15	1,14	0,18	0,16	0,0012223
0,17	1,14	0,17	0,15	0,0010725
0,20	1,14	0,15	0,13	0,0009539
0,25	1,14	0,13	0,12	0,0007999
0,15	1,35	0,20	0,15	0,0017113

Em rios, a velocidade média varia ao longo do tempo, em razão do volume de água, mas, para uma dada condição, a declividade exerce papel importante. Soares (2011), estudando a dispersão longitudinal em rios da Bacia Concórdia, encontrou velocidade média variando entre $0,09$ e $0,52 \text{ ms}^{-1}$. No Rio

Pomba, Almeida (2006) encontrou velocidades de 0,21 a 0,40 ms^{-1} , o que foi corroborado por Matos et al. (2011), os quais obtiveram, nesse mesmo rio, variações de 0,19 a 0,37 ms^{-1} , no período de seca. No Rio Turvo Sujo, Barros et al. (2011) encontraram velocidades de 0,33 a 0,57 ms^{-1} . Dessa forma, pode-se afirmar que a faixa de velocidade média da água, avaliada neste trabalho, esteve abaixo das medidas em rios, no período de seca, devendo representar rios de drenagem em bacias, cujo terreno tenha menor declividade na calha, ou seja, ambientes lóticos de baixa velocidade.

6. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que:

- Os limites operacionais do canal hidráulico de fundo deslizante impossibilitaram o deslocamento da esteira em velocidade superior a 1,35 ms^{-1} ; dessa forma, só foi viável o estudo de reaeração com velocidade média da água até 0,20 ms^{-1} .
- A velocidade cisalhante global da água variou linearmente com a velocidade de deslocamento da esteira, de acordo com a equação: $u^* = 0,033 Ub + 0,0034$.
- A velocidade média de escoamento da água aumentou com o aumento do fator de forma do canal hidráulico.
- As tensões desenvolvidas nas condições de operação do canal hidráulico de fundo deslizante são equivalentes àsquelas proporcionadas por canais de baixa declividade, ou seja, inferior a 0,002 m m^{-1} .

7. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, T.V. **Índice de qualidade da água e coeficiente de autodepuração de trechos do rio Pomba**. 2006. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ARAÚJO, J.C. Lei logarítmica para distribuição unidimensional de velocidade em canais abertos. **Revista Brasileira de Engenharia**, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p. 5-24, 1995.

BARROS, F.M.; MARTINEZ, M.A.; MATOS, A.T.; CECON, P.R.; MOREIRA, D.A. Balanço de oxigênio no Rio Turvo Sujo-MG em diferentes épocas do ano. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 19, n. 1, p. 72-80, 2011.

CASTRO-ORGAZ, O.; DEY, S. Power-law velocity profile in turbulent boundary layers: an integral reynolds-number dependent solution. **Acta Geophysica**, v. 59, n. 5, p. 993-1012, 2011.

CREMASCO, M.A. **Fundamentos de transferência de massa**. Campinas: UNICAMP, 2002. 728 p.

GUALTIERI, C.; GUALTIERI, P. Turbulence based models for gas transfer analysis with channel shape factor influence. **Environmental Fluid Mechanics**, n. 4, p. 249-271, 2004.

HAYNES, W.M.; LIDE, D.R.; BRUNO, T.J. **Handbook of chemistry and physics**. 93.ed. CRC Press/W.M. Haynes, 2012. 2664 p.

JANZEN, J.G.; SCHULZ, H.E.; JIRKA, G. Detalhes da transferência de gases na interface ar-água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 11, n. 4, p. 153-161, 2006.

LASSABATERE, L.; PU, J.H.; BONAKDARI, H.; JOANNIS, C.; LARRARTE, F. Velocity distribution in open channel flows: analytical approach for the outer region. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 139, n. 1, p. 37-43, 2013.

MATOS, A.T.; ALMEIDA, T.V.; SILVA, D.D.; FARAGE, J.A.P. Coeficiente de reaeração em três trechos do Rio Pomba (MG), obtidos nos períodos chuvoso e seco. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 19, n. 4, p. 361-369, 2011.

MOOG, D.B.; JIRKA, G.H. Analysis of reaeration equations using mean multiplicative error. **Journal of Environmental Engineering**, v. 124, n. 2, p. 104-110, 1998.

NEZU, I. Open-channel flow turbulence and its research prospect in the 21st century. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 131, n. 4, p. 229-246, 2005.

SOARES, P.A. **Estimativa e aplicação dos coeficientes de dispersão longitudinal e de reaeração em corpos de água naturais**. 2011. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, SC.

SOUZA, J.F.A.; OLIVEIRA, L.R.; AZEVEDO, J.L.L.; SOARES, I.D.; MATA, M.M. Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, n. 1, p. 21-41, 2011.

TAMBURRINO, A.; GULLIVER, J.S. Comparative flow characteristics of a moving-bed flume. **Experiments in Fluids**, n. 13, p. 289-298, 1992.

TAMBURRINO, A.; GULLIVER, J.S. Free-surface visualization of streamwise vortices in a channel flow. **Water Resources Research**, v. 43, n. 11, 2007.

TAMBURRINO, A. **Flow characteristics in the moving-bed flume**. Minneapolis: University of Minnesota, 1991. 276 p.

WHITE, F.M. **Mecânica dos fluidos**. 6.ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 880 p.

WHITE, F.M. **Viscous fluid flow**. 2.ed. New York: McGraw-Hill, 1991. 612 p.

CAPÍTULO 4

ESTUDO DA REAERAÇÃO EM ÁGUA LIMPA SOB OS ASPECTOS EXPERIMENTAL E DE PREDIÇÃO

Resumo: O coeficiente de reaeração, K_2 , é a variável de maior influência na autodepuração de corpos hídricos; portanto, estimativas confiáveis são de suma importância. A determinação de K_2 em condições de campo é trabalhosa, cara e sem a possibilidade de controle das condições hidrodinâmicas. As previsões de K_2 , por meio de equações, em condições de escoamento raso, geralmente, são superestimadas. Por isso, neste trabalho, os objetivos foram estudar a reoxigenação da água limpa em canal hidráulico de fundo deslizante, com pequenas profundidades de água e diferentes velocidades de escoamento; inferir sobre as principais variáveis hidrodinâmicas e sobre as quais estruturas turbulentas que mais interferem no processo; e, com base nelas, propor a equação de estimativa de K_2 . A concentração de oxigênio dissolvido na água ao longo do tempo foi determinada pelo método luminescente LDO, o que permitiu estimar o K_2 . Inferiu-se, dos resultados, que as variáveis hidrodinâmicas, as velocidades média e cisalhante, a profundidade, a declividade, o fator de forma, os números de Reynolds e de Froude interferiram K_2 ; a melhor equação preditiva foi a que incluiu as três últimas variáveis. Quanto às estruturas turbulentas, concluiu-se que os grandes vórtices tiveram maior influência no processo de reaeração, o que permitiu que fosse deduzida outra equação de estimativa, com base no fenômeno da renovação superficial e na turbulência, que parece representar adequadamente o fenômeno das trocas gasosas para a presente condição experimental.

Palavras-chave: Coeficiente de reaeração, equação preditiva, canais hidráulicos, autodepuração.

Abstract: There aeration coefficient, K_2 , is the most influential variable in the self-purification of water bodies, therefore, reliable estimates are of extremely importance. The determination of K_2 in field conditions is laborious, expensive, and without the control possibility of the hydrodynamic conditions. The predictions of K_2 through equations, in shallow depth flow conditions are usually over estimated. Therefore, in this work, the objectives were to study the reoxygenation of clean water in moving-bed channel with small water depths and different flow velocities; to infer about the main hydrodynamic variables and about which turbulent structures most interfere in the process, and based on them, to propose a prediction equation to estimate K_2 . The concentration of dissolved oxygen in the water over time was determined by LDO luminescent method, which allowed to estimate K_2 . From the results, it was inferred that the hydrodynamic variables, mean and shear velocity, depth, slope, shape factor, Reynolds and Froude numbers affected K_2 and the best predictive equation was the one that included the last three variables. As for the turbulent structures, it was concluded that the large vortices had greater influence in the process of reaeration, which allowed another prediction equation to be deduced, based on the surface renewal phenomenon and on the turbulence, which seems to

represent adequately the phenomenon of gas exchange to this experimental condition.

Keywords: Reaeration coefficient, predictive equation, hydraulic channel, self-purification.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento industrial e o aumento da população urbana, observados no último século, trouxeram como consequência sérios problemas ambientais; dentre esses, a poluição de corpos hídricos, que passaram a receber o lançamento de grandes cargas orgânicas, repercutindo negativamente na concentração de oxigênio dissolvido disponível no meio, cuja depleção está associada à degradação da qualidade de suas águas.

A capacidade de recuperação da qualidade da água em rios, após o recebimento de águas residuárias ricas em material orgânico, é denominada autodepuração, sendo um processo natural influenciado pela carga lançada e capacidade de incorporação do oxigênio no meio líquido, a partir da atmosfera. Essa incorporação se dá por transporte de massa que, por sua vez, depende de propriedades do ar, da água e do próprio escoamento hídrico (CREMASCO, 2002).

Os mecanismos físicos envolvidos no transporte de massa são a difusão e a convecção; este último ocorre em razão do campo de velocidade existente no fluido (PEREIRA, 2002).

A força motriz para o transporte de massa é a diferença de concentração de espécies químicas (solutos), em dois meios ou duas regiões distintas num mesmo meio, sendo esse denominado solvente. A maior ou menor facilidade do transporte depende do coeficiente de difusão, que é uma grandeza que traduz a interação soluto-solvente, quando se considera apenas o mecanismo da difusão. Em condições de diluição, ou seja, quando a massa do soluto não é expressiva, se comparada à do solvente, a difusão é governada basicamente pelas características do solvente (CREMASCO, 2002). Esse é o fenômeno observado no transporte do oxigênio do ar para água, em que a transferência de massa se dá por difusão molecular, sendo governado pelas Leis de Fick (PEREIRA, 2002).

Segundo Talukdar et al. (2008), a transferência de massa, dentro de um mesmo meio, ocorre também por causa da convecção natural ou forçada; em escoamentos internos, ou seja, dentro de calhas, tubulações ou canais, ambos são importantes. Os promotores da convecção natural são os gradientes de temperatura ou de concentração, ou ambos. Quando ambos os gradientes agem em conjunto e na mesma direção, as taxas de transferências de calor e massa são aumentadas, caso contrário há redução nessas taxas.

Em águas agitadas, a turbulência do escoamento favorece a mais rápida introdução de oxigênio no meio (COSTA; SIQUEIRA, 1998). Nesse caso, a força motriz ao fluxo mássico é a diferença de concentração e a resistência ao transporte é representada pelo coeficiente convectivo de transferência de massa, que é uma variável cinemática que depende das características do meio e da interação molecular soluto-meio (CREMASCO, 2002). Segundo Moog e Jirka (1999), em ambos os lados da interface ar-água, convecção e mistura turbulenta aumentam muito a taxa de transporte, mas esses mecanismos não atravessam a interface. Com isso, a difusão de gases na água é molecular; na região adjacente à interface, ocorre forte resistência a esse transporte, que parece ser controlado pelo movimento turbulento (MOOG; JIRKA, 1999).

Segundo Wu e Trupp (1994), dentro do meio líquido, na região externa à camada limite, sob condições normais de operação e considerando o escoamento completamente desenvolvido, três mecanismos contribuem no processo de mistura, que são a difusão turbulenta, a convecção por movimento médio e a convecção turbulenta.

A difusão turbulenta refere-se à difusão causada pelas pequenas escalas de turbulência, que são da ordem da viscosidade; a convecção por movimento médio relaciona-se com o transporte das quantidades turbulentas por escoamentos secundários; e, finalmente, a convecção turbulenta origina-se das estruturas de grande escala, ou macroscópicas, do escoamento, responsável pela transferência de massa, energia e quantidade de movimento (GOULART, 2009). Entretanto, esses mecanismos físicos ainda não são completamente entendidos (GUELLOUZ; TAVOULARIS, 2000).

O estudo de convecção de massa se resume na determinação do coeficiente de transferência. No caso da introdução do oxigênio atmosférico na água, esse é denominado coeficiente de reaeração (K_2).

A determinação experimental desse coeficiente pode ser realizada por diferentes técnicas; entretanto, todas essas envolvem árduo trabalho de campo, com necessidade de equipe técnica bem-treinada que, além das amostragens da água, façam determinações de várias características hidráulicas do escoamento. Por isso, constitui-se em trabalho complexo, demorado e caro. Diante dessas dificuldades, grande esforço vem sendo empreendido, desde o início do século XX, para se definirem equações preditivas confiáveis para estimativa do valor de K_2 . No entanto, as trocas gasosas entre o ar e água envolvem fenômenos físicos parcialmente compreendidos e, talvez, seja essa a razão pela qual ainda não tenha sido formulada uma equação universal, definitivamente aceita.

Muitas das equações preditoras de K_2 disponíveis na literatura relacionam as variáveis hidráulicas velocidade média e profundidade do escoamento, sendo marcadamente importante a influência deste último fator na estimativa do coeficiente de reaeração. Como, geralmente, essa variável figura nas equações com expoente negativo, isso implica que, em baixas profundidades, o coeficiente de reaeração cresce a altas taxas, o que nem sempre é verificado em campo. Por isso, em rios rasos, as estimativas por equações têm baixa confiabilidade, não raro, superestimando os valores reais.

Em estudos de alocação de cargas poluidoras, o período crítico ocorre na seca, em que o volume de água dos rios, em alguns casos, reduz-se consideravelmente. Daí a relevância do estudo deste tema para condições de escoamento com lâminas de pequena profundidade, como ocorreria em rios rasos. Além disso, considerando que o processo de autodepuração está fortemente relacionado ao coeficiente de reaeração, torna-se essencial a determinação experimental de K_2 , para pequenas profundidades, para se obterem equações preditoras e, ou, se fizerem novas proposições, direcionadas para essas condições, visto que as estimativas realizadas por meio das equações preditoras, disponíveis na literatura, fornecem valores muito elevados de K_2 , o que sugere terem sido obtidas para situações particulares.

Em vista do exposto, neste trabalho, teve-se por objetivos: obter o coeficiente de reaeração em água limpa para diferentes profundidades de lâminas e velocidades de escoamento; avaliar a capacidade preditora de algumas equações de estimativa do coeficiente de reaeração, disponíveis na literatura, para condições de escoamento raso, por meio da estatística do erro-padrão de estimativa (SE), do erro médio normalizado (NME); e do erro médio multiplicativo (MME); identificar as variáveis hidrodinâmicas mais fortemente relacionadas ao processo de transferência do oxigênio do ar para a água, propondo a equação preditora do coeficiente de reaeração; e identificar a estrutura turbulenta de maior influência no fenômeno de transferência do oxigênio do ar para a água, e apresentando a equação preditora para estimativa do coeficiente de reaeração.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido em Anápolis, GO, no período de junho a outubro de 2012.

Para a execução do experimento, construiu-se um canal hidráulico com fundo deslizante, cujo formato era prismático, de seção retangular, nas dimensões de 1,57 m de largura, 5,00 m de comprimento e 0,80 m de altura, com elevação de 0,20 m acima do solo. As paredes e o fundo do canal eram de compensado naval, de 0,015 m de espessura, revestido com lona de polietileno.

Sobre o fundo do canal, foi instalada esteira transportadora, especialmente desenvolvida para este trabalho, que era acionada por motor elétrico de 1,5 kW e a velocidade de rotação controlada por inversor de frequência e árvore de transmissão. Detalhes do equipamento estão apresentados no Capítulo 1.

Foram realizados 27 testes de reaeração com seis lâminas de água 0,11 m; 0,13 m; 0,15 m; 0,17 m; 0,20 m; e 0,25 m e sete velocidades de movimentação da esteira que foram: 0,54; 0,67; 0,74; 0,84; 0,94; 1,14; e 1,35 ms^{-1} . Somente as velocidades de 0,74; 0,94 e 1,14 ms^{-1} foram testadas em todas as lâminas.

A água utilizada era da rede de abastecimento e o volume gasto era quantificado por hidrômetro. As alturas de lâminas previamente definidas, acima do tapete da esteira, foram controladas com régua graduada com precisão de 0,01 m.

A desoxigenação da água ocorreu por meio químico, dissolvendo-se sulfito de sódio na proporção de 7,9 mg L⁻¹ de Na₂SO₃ para cada 1 mg L⁻¹ de oxigênio dissolvido presente nesse meio. Para homogeneização do reagente na água, a esteira era acionada antes de se proceder a mistura e permanecia funcionando por cerca de 10 min. O tempo de desoxigenação variou de duas a seis horas e as concentrações de oxigênio foram reduzidas, em média, a 1,0 mg L⁻¹.

Durante os testes de reaeração, a concentração de oxigênio dissolvido foi medida a cada minuto, por meio de sondalúminescente de oxigênio dissolvido (LDO), que possui sensor integrado de temperatura. O sensor LDO utiliza o método ótico para medição, sendo composto por uma cápsula de revestimento em polímero fotoluminescente sobre o material transparente e o corpo do sensor, que contém LED azul, que desencadeia o fenômeno da luminescência, e um LED vermelho, que funciona como elemento de referência. O princípio de funcionamento do sensor consiste na emissão da luz azul pulsada, sendo essa absorvida pela cápsula. Parte dessa energia é perdida na forma de luz vermelha. O oxigênio em contato com a cápsula absorve essa energia. Por isso, quanto maior a concentração de oxigênio menor a intensidade de luz vermelha emitida. O tempo de vida da luz vermelha é avaliado para determinar a concentração de oxigênio no meio (HACH, 2006).

As duas sondas, que foram calibradas utilizando, por referência, o método titulométrico de Winkler (APHA et al., 2005), estavam conectadas a um controlador que possibilitava leituras da concentração de oxigênio em mV, as quais eram transformadas para a unidade de mg L⁻¹. As leituras eram gravadas na memória do controlador que registrava, também, o dia e a hora de coleta de cada dado.

As sondas foram posicionadas, longitudinalmente ao canal, uma no centro geométrico e outra próxima ao motor. Em relação à largura do canal, ambas foram instaladas na zona central, ou seja, região do espaço onde pode-se considerar que a largura seja infinita.

Ao final de cada teste, a água do canal era bombeada, por meio de bomba centrífuga de 0,37 kW e vazão máxima de $2,1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, para um filtro de manta acrílica, e retornava ao canal. O tempo de filtragem adotado foi de quatro a oito horas, para que todo o volume de água passasse no mínimo duas vezes pelo filtro.

Os dados de concentração de oxigênio, obtidos nos testes de reaeração, a cada minuto, foram condensados por meio da média aritmética, aplicada a cada conjunto de 10 pontos, que equivale a 10 min, reduzindo-se, assim, e na mesma proporção, o número total de pontos de coleta em cada teste.

Ao modelo cinético de primeira ordem integrado (Equação 4.1), ajustou-se o conjunto de valores, formado pela diferença entre a concentração de saturação (Equação 4.2) e a de oxigênio dissolvido, em relação ao tempo, permitindo, assim, a determinação dos parâmetros, do déficit inicial de oxigênio dissolvido (D_0) e do coeficiente de reaeração (K_2), por regressão não linear.

$$D = D_0 e^{-K_2 t} \quad (4.1)$$

em que D e D_0 são os déficits de oxigênio dissolvido no tempo t e $t = 0$, respectivamente, em relação à saturação, M L^{-3} ; K_2 é o coeficiente de reaeração, T^{-1} ; e t é o tempo, T .

A concentração de saturação de oxigênio dissolvido, que é dependente da temperatura do fluido e da altitude local, foi calculada, utilizando-se a Equação 4.2, conforme apresentada por von Sperling (2005). Entretanto, o dado de temperatura usado nessa equação foi obtido de forma análoga à concentração de oxigênio dissolvido, ou seja, a média de cada 10 min de medição.

$$C_s = (14,652 - 0,3898T + 0,006969T^2 - 0,00005896T^3)(1 - 0,000022867A5,167) \quad (4.2)$$

em que T é a temperatura do fluido, t ; e A , a altitude local, L .

A temperatura do fluido influencia a transferência de massa do oxigênio do ar para a água de duas formas opostas, ou seja, temperaturas mais altas

aumentam a taxa de difusão molecular do gás O₂ na camada superficial da água e, conseqüentemente, o K₂; entretanto, diminui sua solubilidade, provocando diminuição na taxa de reaeração. Como os modelos ajustados foram obtidos em testes cuja temperatura da água variou, no instante da coleta de dados, de 19,5 a 25,4°C, para que os resultados sejam comparáveis, fez-se a correção dos valores de K₂ para a temperatura de 20°C (K₂₍₂₀₎), utilizando-se a equação de Arrhenius modificada por Streeter e Phelps (1925):

$$K_{2(T)} = K_{2(20)} \theta^{(T-20)} \quad (4.3)$$

em que T é a temperatura média da água para cada teste, em graus Celsius; e θ , o coeficiente de correção cujo valor adotado foi de 1,0241, conforme sugerido por Elmore e West (1961).

Os dados meteorológicos do período dos testes foram obtidos da estação automática situada na Universidade Estadual de Goiás, na cidade de Anápolis, GO, Campus UnUCET, e estão apresentados na Tabela 4.1.

Os dados observados do coeficiente de reaeração (K_M) foram alcançados em base decimal e transformados para base e , para serem comparados com os preditos (K_p). Esses foram logrados por equações de estimativa escolhidas dentre as mais citadas pela literatura técnica e por outras mais recentes e que representam os modelos conceitual, semiempírico e empírico, relacionados na Tabela 4.2.

Tabela 4.1 - Dados meteorológicos médios da cidade de Anápolis, GO, de junho a outubro de 2012

Data	Temperatura média do ar (°C)	Umidade relativa do ar (%)	Radiação solar (MJ m ⁻²)
29/06/2012	19,6	57,5	19,2
03/07/2012	18,4	63,0	19,7
04/07/2012	19,0	59,5	19,6
07/07/2012	20,7	55,0	19,2
08/07/2012	18,4	72,2	17,3
09/07/2012	19,1	63,5	19,6
10/07/2012	19,4	61,7	18,6
11/07/2012	21,2	55,2	17,9
25/08/2012	19,9	53,2	22,6
01/09/2012	24,8	27,2	26,0
02/09/2012	25,3	27,5	26,6
04/09/2012	25,5	26,5	26,9
05/09/2012	23,1	33,0	24,0
06/09/2012	21,5	40,5	27,0
07/09/2012	22,3	35,2	26,5
14/09/2012	28,1	34,7	20,1
15/09/2012	25,4	38,5	22,3
17/09/2012	25,6	43,0	17,9
19/09/2012	26,7	42,2	13,3
06/10/2012	23,8	36,2	31,1
07/10/2012	24,0	39,7	30,1
08/10/2012	23,3	61,5	25,3
09/10/2012	22,6	66,2	21,7
18/10/2012	24,4	55,5	26,1
19/10/2012	25,3	52,2	25,6
20/10/2012	20,8	82,2	20,9
25/10/2012	25,4	47,2	23,3
26/10/2012	26,5	33,2	28,3

Fonte: Rede meteorológica da Secretaria de Ciência e Tecnologia do Estado de Goiás.

Tabela 4.2 - Equações para estimativa do coeficiente de reaeração desenvolvidas por diferentes autores, utilizando modelo conceitual, semiempírico e empírico

Equação*	Faixa de aplicação	Autor
Modelo conceitual		
$K_2 = 3,93(U)^{0,5}H^{-1,5}$	0,30 < H < 9,14 0,15 < U < 0,48	O' Connor e Dobbins, 1958
Modelos semiempíricos		
$K_2 = 173,45(US)^{0,408}H^{-0,66}$	0,02 < H < 0,06 0,07 < U < 0,65	Krenkel e Orlob, 1962
$K_2 = 24,9(1 + Fr^{0,5})u^*H^{-1}$	0,015 < H < 0,07	Thackston e Krenkel, 1969
$K_2 = 185,5(US)^{0,5}H^{-1}$	-	Cadwallader e McDonnell, 1969
$K_2 = 23,04(10,17Fr^2)(SU)^{0,375}H^{-1}$	-	Parkhurst e Pomeroy, 1972
$K_2 = 2506,7 (u^{*3}U^{-2}H^{-1})$	-	Lau, 1972
$K_2 = 517(US)^{0,524}Q^{-0,242}$	Q < 0,556	Melching e Flores, 1999
Modelos empíricos		
$K_2 = 5,014U^{0,969}H^{-1,673}$	0,60 < H < 3,35 0,54 < U < 1,52	Churchill et al., 1962
$K_2 = 5,34U^{0,67}H^{-1,85}$	0,12 < H < 3,35 0,03 < U < 1,52	Owens et al., 1964
$K_2 = 5,1349UH^{-1,33}$	-	Langbein e Durum, 1967
$K_2 = 31200SU$	Q < 0,28	Tsivoglou e Wallace, 1972
$K_2 = 5,5773U^{0,607}H^{-1,689}$	-	Bennett e Rathbun, 1972
$K_2 = 543 S^{0,6236}U^{0,5325}H^{-0,7258}$	-	Smoot, 1988
$K_2 = 1740U^{0,46}S^{0,79}H^{0,74}$	S > 0,0004	Moog e Jirka, 1998
$K_2 = 5,792U^{0,5}H^{-0,25}$	-	Jha et al., 2001
$K_2 = 0,603286U^{0,4}H^{0,154}S^{-1}$	Fr < 1	Jha et al., 2004
$K_2 = 866,307U^{1,393}H^{0,8}S^{-0,173}$	Fr > 1	Jha et al., 2004

* K_2 = coeficiente de reaeração, base e, para a temperatura de 20°C, d⁻¹; U = velocidade média do escoamento, ms⁻¹; H = profundidade média do escoamento, m; Fr = número de Froude, adimensional; u* = velocidade cisalhante, ms⁻¹; S = declividade da lâmina de água, mm⁻¹; e Q = vazão, m³s⁻¹.

A comparação entre os dados do coeficiente de reaeração observados (K_M) e preditos (K_P) foi feita plotando-os em gráfico, que possibilitou verificação visual do ajustamento, conforme proposto por Jha et al. (2001). Além disso, foram utilizadas as estatísticas do erro-padrão de estimativa, SE (Equação 4.4) e do erro médio normalizado, NME (Equação 4.5), que são metodologias amplamente usadas, em que N representa o número de medidas de K_2 . Entretanto, Moog e Jirka (1998b) e Jha et al. (2001) consideraram essas análises tendenciosas, avaliando, como o maior defeito desses métodos, que esses estão com base no erro diferencial, visto que grandes variações na predição de K_2 são comuns, criando indesejadas distorções. No caso do SE,

essas distorções ocorrem por falta de escala, ou seja, $K_p - K_M$, produz pequeno erro para valores grandes de K_2 , e relativamente grande para pequenos valores K_2 . Esse método também foi criticado por Wilson e MacLeod (1974, citados por MOOG; JIRKA, 1998), por ser o quadrado do erro, que causa a eliminação dos erros maiores. Já com NME, podem ocorrer superestimativas ilimitadas para $K_p > K_M$, geralmente muito superior a 100%. Entretanto, quando há subestimativa, é limitada a 100%; com isso, a distribuição dos resíduos é tendenciosa e erros positivos e negativos se cancelam. Por isso, foi utilizado também o erro médio multiplicativo, MME (Equação 4.6), que, de acordo com Moog e Jirka (1998), por ser em base logaritmica, proporciona melhor avaliação do impacto da imprecisão nos dados de K_2 .

$$SE = \left(\sum_{i=1}^N \frac{(K_p - K_M)_i^2}{N} \right)^{0,5} \quad (4.4)$$

$$NME = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{K_p - K_M}{K_M} \right) \quad (4.5)$$

$$MME = \text{EXP} \left[\frac{\sum_{i=1}^N \ln \left(\frac{K_p}{K_M} \right)_i}{N} \right] \quad (4.6)$$

Para o desenvolvimento de equação de estimativa do coeficiente de reaeração, avaliaram-se, dentre as preditoras (Tabela 4.2) que apresentaram melhor ajuste, as variáveis que, necessariamente, deveriam estar incluídas na formulação. Juntamente com isso, considerou-se a proposta de Gualtieri et al. (2002), que, por meio de análise dimensional, definiram as variáveis mais importantes no processo de reaeração. Dessa forma, para definir os fatores que iriam compor a equação, fixaram-se velocidade média (U) e profundidade (H), considerando que todas as equações deveriam contê-las, fazendo-se a combinação linear dos demais fatores, como declividade (S), fator de forma (ff), velocidade de fricção (u^*), número de Froude (Fr), número de Reynolds (R) e vazão (Q), resultando em 20 equações de regressão, todas essas contendo cinco variáveis. A análise do ajuste dessas equações permitiu que fossem reavaliados os fatores que mais influenciaram no coeficiente de reaeração, sendo propostas outras cinco equações, com apenas três variáveis independentes. A matriz com as 25 combinações de variáveis independentes

que foram testadas, para composição de equações preditoras de K_2 , estão apresentadas na Tabela 4.3.

Para a estimativa dos parâmetros, integrante das equações, procedeu-se à calibração. Para tal, às variáveis, aplicou-se o logaritmo natural e procedeu-se à análise de regressão linear múltipla.

A significância dos parâmetros das equações foi avaliada pelo teste t e pela probabilidade p e a análise de variância da regressão pelo teste F, em nível de 5% de probabilidade.

A seleção do melhor modelo ajustado foi realizada pela análise conjunta do coeficiente de determinação, R^2 , da estimativa do erro (Equações 4.4 a 4.6) e pela análise de sensibilidade.

A análise de sensibilidade, que consiste na verificação da influência das variáveis independentes sobre a variável dependente (K_2), permite avaliar a magnitude da influência do dado de entrada sobre o resultado final, sendo, por isso, utilizada para definir para quais variáveis independentes devem ser dirigidos os esforços, para que a obtenção de K_2 seja a mais acurada possível.

Neste trabalho, utilizou-se a análise de erro de primeira ordem (VON SPERLING, 2007), em que, a um conjunto básico de dados das variáveis independentes, atribuiu-se uma porcentagem de variação e calculou-se o valor da variável dependente por meio da equação preditora ajustada. Assim, determinou-se a porcentagem de variação em K_2 , em razão da variação de até 50% em cada variável de entrada, isoladamente.

Foi testado, também, um modelo com base em conceitos de turbulência, que remonta à teoria da renovação superficial.

Nesse modelo, teve-se a possibilidade de avaliar qual estrutura de turbulência está mais fortemente relacionada ao processo da transferência de oxigênio do ar para a água, na região próxima à interface. Para isso, considerou-se válida a teoria da renovação superficial e aplicou-se o modelo de penetração, a partir do qual Moog e Jirka (1999) deduziram o modelo para grandes e pequenos vórtices (Equação 4.7). A diferença matemática desses modelos reside no valor atribuído ao expoente de R^* , que está associado aos fenômenos dos grandes ou dos pequenos vórtices para $n = -0,5$ ou $n = -0,25$, respectivamente.

Tabela 4.3 - Diferentes combinações das variáveis independentes (U , H , S , u^* , ff , Fr , R e Q) testadas na composição da equação preditora de K_2

Eq.	K_2	U	H	S	u^*	ff	Q	R	Fr
1	1	1	1	1	1	1			
2	1	1	1	1	1		1		
3	1	1	1	1	1			1	
4	1	1	1	1	1				1
5	1	1	1	1		1	1		
6	1	1	1	1		1		1	
7	1	1	1	1		1			1
8	1	1	1		1	1	1		
9	1	1	1		1	1		1	
10	1	1	1		1	1			1
11	1	1	1			1	1	1	
12	1	1	1			1	1		1
13	1	1	1	1			1	1	
14	1	1	1	1			1		1
15	1	1	1		1		1	1	
16	1	1	1		1		1		1
17	1	1	1	1				1	1
18	1	1	1		1			1	1
19	1	1	1			1		1	1
20	1	1	1				1	1	1
21	1				1			1	1
22	1				1	1		1	
23	1			1				1	1
24	1			1		1		1	
25	1	1	1	1					

U é a velocidade média da água; H , a profundidade da água; S , a declividade da lâmina de água; u^* , a velocidade de fricção; ff , o fator de forma do canal hidráulica; Fr , o número de Froude; R , o número de Reynolds; e Q , a vazão da água.

Além desses, é possível também avaliar a ocorrência ou não do fenômeno denominado de *burst*, que são movimentos de grandes escalas que levam o fluido da parede em direção à superfície, promovendo uma varredura na superfície líquida.

$$K_L^+ \propto Sc^{-0,5} R^{*n} \quad (4.7)$$

$$K_L^+ = \frac{K_2 H}{u^*} \quad (4.8)$$

em que K_L^+ é o coeficiente de transferência de massa adimensionalizado; Sc , o número de Schmidt (ϑ/D_m); ϑ , a viscosidade cinemática ($L^2 T^{-1}$); D_m , o coeficiente de difusão molecular ($L^2 T^{-1}$); e R^* , o número de Reynolds cisalhante.

Para desenvolver tal análise, o coeficiente de reaeração não sofreu correção de temperatura, visto que as variáveis ϑ e D_m são dependentes desse fator e foram calculadas para as condições do experimento.

A viscosidade cinemática foi estimada como sendo a razão entre a viscosidade dinâmica (Equação 4.9 a e b) e massa específica da água (Equação 4.10). O coeficiente de difusão foi estimado, utilizando-se a equação de Wilke e Chang (1955, citada por CREMASCO, 2002), cuja fórmula está apresentada na Equação 4.11.

Para $0^\circ\text{C} \leq T \leq 20^\circ\text{C}$:

$$\text{Log}_{10}(\mu_T) = \frac{1301}{998,333+8,1855(T-20)+0,00585(T-20)^2} - 1,30233 \quad (4.9a)$$

Para $20^\circ\text{C} < T \leq 100^\circ\text{C}$:

$$\text{Log}_{10} \left(\frac{\mu_T}{\mu_{20}} \right) = \frac{1,3272(20-T) - 0,001053(T-20)^2}{T+105} \quad (4.9b)$$

$$\rho = (999,83952 + 16,945176 T - 7,9870401 \times 10^{-3} T^2 - 46,170461 \times 10^{-6} T^3 + 105,56302 \times 10^{-9} T^4 - 280,54253 \times 10^{-12} T^5) / (1 + 16,879850 \times 10^{-3} T) \quad (4.10)$$

$$\frac{D_m \mu}{T} = \frac{7,4 \times 10^{-8} (\phi M)^{0,5}}{V^{0,6}} \quad (4.11)$$

em que μ é a viscosidade dinâmica da água em cP; T , a temperatura em Kelvin; ϕ , o parâmetro de associação do solvente, igual a 2,6 para a água; M , a massa molar da água; e V , o volume molar do oxigênio.

As variáveis K_L^+ , Sc e R^* foram linearizadas e, por regressão linear, calculou-se o coeficiente n , conforme metodologia proposta por Moog e Jirka (1999).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Reoxigenação da água

Os resultados dos testes de reaeração conduzidos com lâminas de água que variaram de 0,11 m a 0,25 m e velocidades média da água de 0,05 ms^{-1} a 0,20 ms^{-1} estão apresentados, na íntegra, nas Figuras 1A, 2A e 3A do Apêndice A. Na Figura 4.1, estão retratados quatro testes representativos das lâminas de 0,13 m (A), 0,15 m (B), 0,20 m (C) e 0,25 m (D), para a velocidade média da água de 0,15 ms^{-1} ; 0,13 ms^{-1} ; 0,11 ms^{-1} ; e 0,10 ms^{-1} , respectivamente, que foram obtidas com a velocidade da esteira de 0,74 ms^{-1} .

Como pode ser verificado na Figura 4.1, dois fenômenos se repetiram em praticamente todos os testes de reoxigenação. O primeiro deles se refere à lenta reintrodução de oxigênio no meio líquido (Figura 4.1a), representado graficamente por um patamar no início dos testes, ou seja, primeiros 60 a 120 min, após os quais a reoxigenação passou a ocorrer em taxas mais altas e, em termos gráficos, representa o trecho crescente da curva.

Esse fato, possivelmente, ocorreu por ter coincido o início da coleta de dados com o do funcionamento da esteira que movimentava a água. Nesse período inicial, quando as características hidrodinâmicas do escoamento não estavam plenamente desenvolvidas, houve maior resistência física às trocas gasosas, caracterizando o período transiente. Tal acontecimento é de relevante importância ao se considerar que a estimativa de K_2 é altamente sensível aos dados iniciais (COSTA; SIQUEIRA, 1998) e, por isso, em todos os testes, houve a necessidade de desconsiderar os primeiros registros efetuados.

O segundo fenômeno é referente ao espalhamento dos dados. Considerando-se que a sonda estava posicionada no meio líquido, pode-se inferir que a flutuação na concentração de oxigênio no fluido foi captada pelo sensor em razão da alta frequência da coleta de dados, que ocorreu a cada minuto e que, possivelmente, estava relacionada com as variações de velocidade no escoamento, na direção vertical (z), visto que o transporte de massa em um meio é influenciado pelos parâmetros cinemáticos desse meio e, como havia turbulência, que é um fenômeno aleatório e tridimensional, essas flutuações ocorriam com maior intensidade.

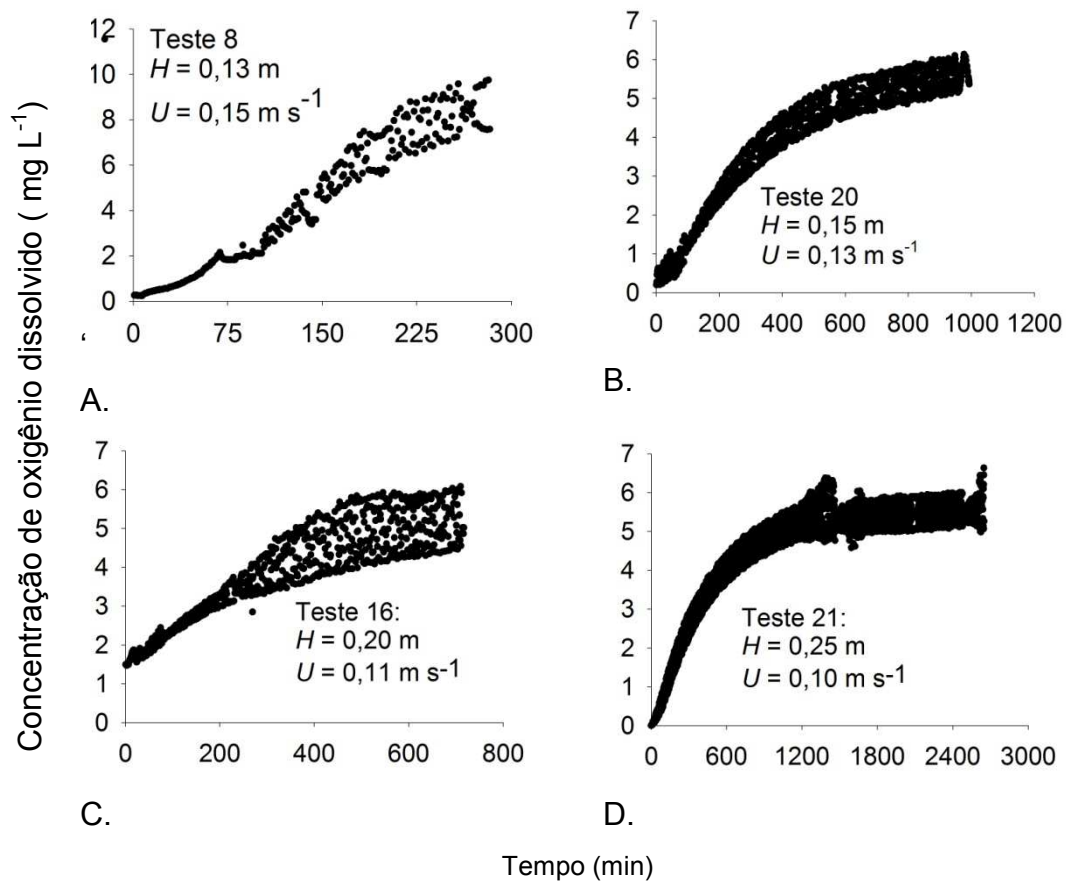


Figura 4.1 - Dados experimentais brutos de concentração de oxigênio dissolvido na água, em razão do tempo, em testes de reaeração realizados em canal hidráulico com fundo deslizante, com diferentes lâminas (H) e velocidade média (U) da água variando de $0,10 \text{ ms}^{-1}$ a $0,15 \text{ ms}^{-1}$.

O espalhamento dos dados pode ser creditado, também, ao escoamento oscilatório (WHITE, 2011), que pode ocorrer mesmo que, aparentemente, o escoamento tenha sido permanente. Dois fatores físicos têm potencial de serem geradores desse fenômeno; um deles é a fixação do motor à estrutura da esteira. Embora todos os pés da esteira estivessem apoiados em borracha, ao acionar o motor houve propagação da vibração em todo o equipamento. Além disso, os roletes da esteira distavam de aproximadamente $0,60 \text{ m}$; como o tapete era de borracha, esse cedeu com o peso e com a temperatura da água, que variou entre testes de 19 e 25°C . Observou-se um abaulamento e, com a velocidade de movimentação, talvez tenha produzido oscilação. Entretanto, esses efeitos não foram quantificados. Em razão desses

fatores, os dados experimentais brutos foram previamente tratados, ou seja, foi realizada a média da concentração de oxigênio a cada 10 min. Os valores calculados de déficit de oxigênio dissolvido na água, obtidos a partir das concentrações de oxigênio dissolvido, assim alcançadas, foram utilizados para determinar o coeficiente de reaeração.

3.2. Análise do coeficiente de reaeração

O modelo cinético de primeira ordem, Equação 4.1, descreve, matematicamente, o déficit de oxigênio em relação à saturação (D), ao longo do tempo (t); sendo assim, para cada t , calculou-se o correspondente déficit. A esse conjunto de dados, ajustou-se esse modelo de decaimento, sendo determinados os parâmetros D_0 e K_2 , cujos resultados de 15 testes estão apresentados, graficamente, na Figura 4.2, para profundidades de lâmina de água de 0,13 m a 0,25 m e velocidades média da água na faixa de $0,07 \text{ ms}^{-1}$ a $0,20 \text{ ms}^{-1}$.

Os resultados completos, com as equações ajustadas, para todos os testes, com seus respectivos coeficientes de determinação e a correspondente representação gráfica, daqueles que não compõem a Figura 4.2, estão apresentados, respectivamente, na Tabela 1B e na Figura 1B, do Apêndice B.

Os resultados apresentados na Figura 4.2, juntamente com os da Tabela 4.4, confirmaram a expectativa de que os maiores valores de K_2 sejam obtidos para a menor lâmina d'água, associada com a maior velocidade ($H = 0,13 \text{ m}$ e $U = 0,19 \text{ ms}^{-1}$). O oposto também foi verdadeiro, ou seja, para a maior lâmina (0,25 m) e menor velocidade ($U = 0,10 \text{ ms}^{-1}$), obteve-se o menor coeficiente de reaeração, que, corrigido para 20°C , e, em base e, foi igual a $3,127 \text{ d}^{-1}$. Esses resultados corroboram com a afirmação de von Sperling (2007), de que corpos d'água rasos e velozes tendem a possuir maior K_2 , em razão da maior facilidade de mistura na seção transversal do canal e da criação de maiores turbulências na superfície.

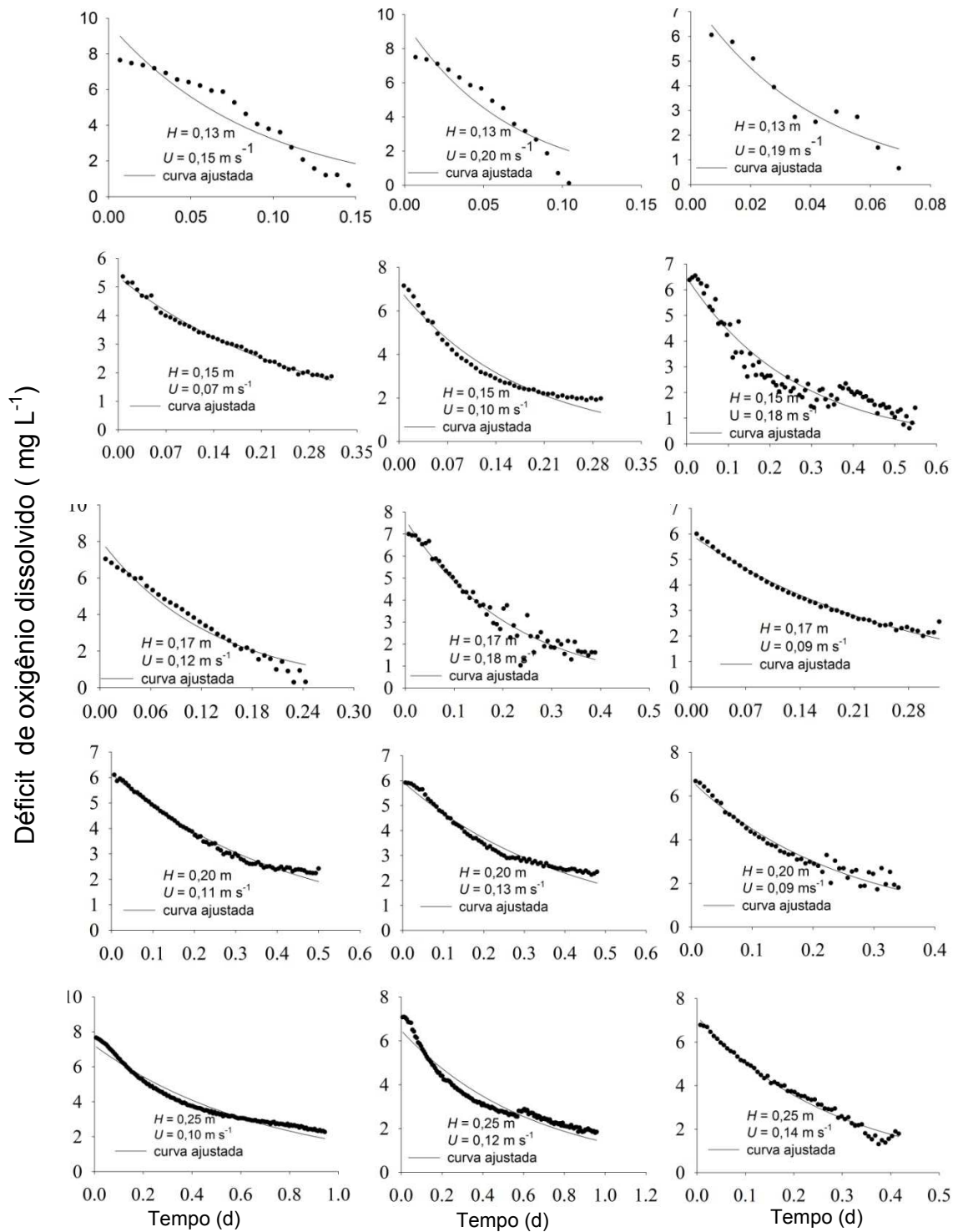


Figura 4.2 - Curva ajustada aos dados experimentais de déficit de concentração de oxigênio dissolvido em razão do tempo, para diferentes profundidades e velocidades médias da água.

Tabela 4.4 - Coeficiente de reaeração (K_2) obtido em testes conduzidos em canal hidráulico de fundo deslizante com diferentes profundidades de lâmina de água e velocidades de escoamento

Testes	Profundidade (m)	Velocidade (ms^{-1})		$*K_{2(20)}$ (d^{-1})
		Esteira	Média da água	
T1	0,11	0,84	0,17	11,932
T3	0,11	0,67	0,14	13,143
T2	0,11	0,54	0,11	10,355
T10	0,13	1,14	0,19	53,871
T9	0,13	0,94	0,20	33,334
T8	0,13	0,74	0,15	24,743
T19	0,15	1,14	0,18	8,429
T23	0,15	0,94	0,18	11,839
T25	0,15	0,94	0,18	10,642
T22	0,15	0,74	0,15	7,379
T24	0,15	0,74	0,15	9,544
T5	0,15	0,67	0,06	8,690
T4	0,15	0,54	0,05	8,354
T13	0,17	1,14	0,17	9,260
T12	0,17	0,94	0,14	38,674
T26	0,17	0,94	0,17	7,615
T11	0,17	0,74	0,12	16,912
T27	0,20	1,14	0,19	8,399
T14	0,20	1,14	0,15	9,696
T15	0,20	0,94	0,12	5,054
T16	0,20	0,74	0,11	4,989
T17	0,25	1,14	0,13	7,591
T18	0,25	0,94	0,11	3,398
T21	0,25	0,74	0,10	3,127

* Dados em base e corrigidos para 20°C, com θ igual a 1,024.

Na análise visual dos gráficos, observaram-se que para as velocidades de movimentação da água maiores ou iguais a $0,18 \text{ ms}^{-1}$, há maior dispersão dos dados em torno da curva ajustada. Esse fato, possivelmente, está relacionado à maior intensidade da turbulência produzida, que se reflete nas grandes flutuações na velocidade vertical (z) do escoamento; entretanto, esse fator não foi quantificado. Porém, considerando a analogia entre o transporte de quantidade de movimento e o de massa (CREMASCO, 2002) e que o oxigênio dissolvido comporta-se como se fosse uma partícula, pode-se inferir

que esse se movimentava na mesma frequência dos vórtices e, por isso, apresentou comportamento aleatório.

O modelo matemático ajustado aos dados experimentais dos diferentes testes apresentou, em 92,59% dos casos, coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,83; em dois testes, o sete (T7) e o 14 (T14), obtiveram-se 0,73 e 0,75, respectivamente.

Apesar dos elevados coeficientes de determinação obtidos na maioria dos casos, observaram-se discrepâncias entre os resultados de K_2 . Por causa da suspeita de se tratarem de *outliers*, fez-se uma análise exploratória dos dados experimentais, plotando-se os valores de K_2 em razão da velocidade média do escoamento.

A partir dessa análise, ajustou-se uma equação linear, por meio de regressão, para cada profundidade estudada, cujas curvas ajustadas para duas profundidades estão apresentadas na Figura 4.3. Verificou-se, pelo teste t, não apresentado, que alguns pontos estavam fora do intervalo de confiança de 95%, que consideraram-se *outliers*; por isso, foram desconsiderados na análise dos dados.

Na análise exploratória, verificou-se também que o efeito do aumento da velocidade média da água no valor de K_2 foi mais pronunciado em maiores profundidades. Isso pode ser constatado na Figura 4.3, em que se observa que a inclinação da reta é menor na profundidade de 0,11 m em relação à de 0,20 m. Esse comportamento é indicativo de que o coeficiente de reaeração é pouco influenciado pelo aumento da velocidade do escoamento em baixas profundidades. Entretanto, em maiores profundidades, a variável velocidade passa a ter maior importância para o K_2 .

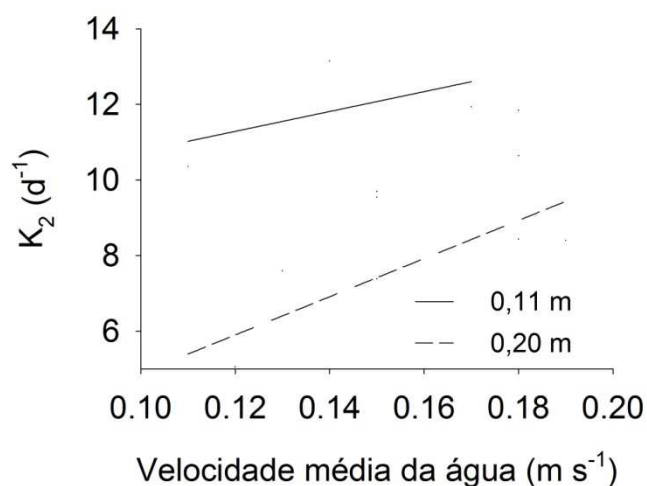


Figura 4.3 - Curva ajustada aos valores experimentais de K_2 , obtidos em canal hidráulico com fundo deslizante, em razão de diferentes velocidades de escoamento da água, para as profundidades de 0,11 m e 0,20 m.

Ao comparar os dados deste trabalho com os de outros autores que também utilizaram canais hidráulicos em laboratório, verificou-se que na maioria das vezes esses estudiosos trabalharam com lâminas muito inferiores às desta pesquisa, e velocidades muito superiores, como Moog e Jirka (1999), cuja profundidade esteve entre 0,02 m e 0,10 m e velocidade média de 0,30 ms⁻¹ a 1,03 ms⁻¹. Porém, ao se analisar a profundidade de 0,10 m, os autores obtiveram K_2 de 9,60 d⁻¹; 16,40 d⁻¹; e 30,70 d⁻¹, para as velocidades de 0,35 ms⁻¹; 0,66 ms⁻¹; e 1,03 ms⁻¹, respectivamente. Neste trabalho, alcançaram-se $H = 0,11$ m e a metade da menor velocidade utilizada por Moog e Jirka (1999), os quais obtiveram K_2 igual 11,90 d⁻¹. Krenkel e Orlob (1966) conseguiram $H = 0,06$ m e $U = 0,22$ ms⁻¹, com $K_2 = 16,46$ d⁻¹. Apesar de o resultado deste trabalho ter sido superior ao de Moog e Jirka (1999), isso não configurou superestimativa, visto que normalmente são encontradas variações nos valores de K_2 , obtidas em trabalhos experimentais, sejam esses de campo ou de laboratório, visto que nem todas as variáveis que interferiram no processo foram passíveis de controle. Em repetições dos testes efetuados neste trabalho, foram obtidas variações entre leituras, de 10% a 23%; entretanto, esses valores estiveram dentro do intervalo de confiança de 95% de probabilidade. Talvez houve essas variações em razão do efeito da turbulência no escoamento, cujo

comportamento aleatório e tridimensional (JANZEN et al., 2010), como observado, parece ter influenciado nas leituras de concentração de oxigênio dissolvido, que foram realizadas com alta frequência. Costa e Siqueira (1998) verificaram, em condições de laboratório, que a baixa umidade relativa do ar (UR) está associada a elevado K_2 e, neste trabalho, a UR média, dos diferentes testes, foi de 48%. Portanto, pode-se considerar que os resultados, são condizentes com os de outros autores, em condições de laboratório.

3.3. Comparação entre os valores medidos e estimados por diferentes modelos de predição de K_2

Com os dados das características hidráulicas do escoamento estudado, apresentados na Tabela 4.4, e outras variáveis, que foram calculadas como o número de Froude, a velocidade cisalhante e a vazão, testou-se a aplicabilidade de equações de estimativa, sendo escolhidas, para comparação, algumas das mais citadas pela literatura e outras mais recentes.

Nesse sentido, optou-se por equações que representem os três modelos preditivos, ou seja, o conceitual, semiempírico e empírico. O modelo conceitual foi representado pela equação de O'Connor e Dobbins (1958); o semiempírico, pelas equações de Krenkel e Orlob (1962), Thackston e Krenkel (1969), Cadwallader e McDonnell (1969), Parkhurst e Pomeroy (1972) e Lau (1972); e o empírico, pelas de Churchill et al. (1962), Owens et al. (1964), Langbein e Durum (1967), Tsivoglou e Wallace (1972), Bennett e Rathbun (1972), Smoot, (1988), Melching e Flores (1999), Moog e Jirka (1998), Jha et al. (2001) e Jha et al. (2004). Dessas equações, somente a de Owens et al. (1964) tem a faixa de aplicabilidade, referente à profundidade e velocidade média da água, correspondente aos dados obtidos neste trabalho.

Na Figura 4.4, pode-se verificar que o perfeito ajustamento entre os dados observados e os preditos ocorre na reta correspondente a 45°. Nesse caso, o posicionamento dos dados preditos acima da curva indica a superestimativa produzida pela equação conceitual. Esse fato é corroborado pela análise do erro que indica SE, NME e MME respectivamente iguais a 15,26 d⁻¹, 131,67% e 1,93; para indicar bom ajustamento, os dois primeiros indicadores devem estar próximos a 0, enquanto o MME, próximo a 1. A

superestimativa dessa equação também foi verificada por Jha et al. (2001), para o Rio Kali, na Índia; por Vendrame (1982), para o Rio Saracuruna, na Baixada Fluminense; e por Gleizer (1992), para o Rio Paraíba do Sul, no trecho entre os municípios de Volta Redonda e Barra do Piraí. Entretanto, o erro-padrão de estimativa (SE) que Jha et al. (2001) e Vendrame (1982) obtiveram foi menor que $1,00 \text{ d}^{-1}$ e o erro médio normalizado (NME) encontrado por Gleizer (1992) foi de 11,1%.

Equação conceitual implica em que todos os parâmetros e expoentes foram obtidos por análise estrita do fenômeno; portanto, sem limites teóricos para sua aplicação. Apesar disso, a literatura técnica (EPA, 1985) considera que a equação de O'Connor e Dobbins (1958) deva ser utilizada para canais de profundidade moderada, ou seja, de 0,30 m a 9,14 m, com velocidade entre $0,15 \text{ ms}^{-1}$ e $0,49 \text{ ms}^{-1}$ e K_2 entre 0,05 e $12,2 \text{ d}^{-1}$. Essa recomendação foi respaldada pela validação da equação preditora; para isso, foram reanalisados 30 dados de campo de Streeter-Phelps (1925) e 10 de outros autores. Nesse caso, K_2 medido variou de $0,14 \text{ d}^{-1}$ a $5,80 \text{ d}^{-1}$, com profundidade da lâmina d'água variando de 1,22 m a 7,37 m e a velocidade média da água de $0,057 \text{ ms}^{-1}$ a $1,28 \text{ ms}^{-1}$ (BENNET; RATHBUN, 1972). Entretanto, cabe ressaltar que, dos 40 dados utilizados, somente três tinham valor de K_2 acima de 1.

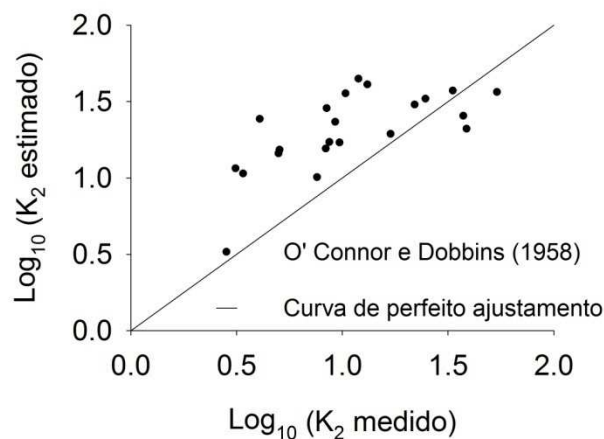


Figura 4.4 - Comparação gráfica entre dados de K_2 obtidos experimentalmente, em canal hidráulico com fundo deslizante, e os estimados por equação preditora conceitual de O'Connor e Dobbins.

Haider et al. (2012), ao compararem os valores de K_2 obtidos em rio largo e com alta variação de vazão, com o alcançado por equações de estimativa, verificaram que a de O'Connor e Dobbins (1958) teve satisfatória capacidade preditiva.

Das equações semiempíricas, a de Lau (1972), que se fundamentou, exclusivamente, em modelo de difusão molecular, superestimou a maioria dos dados experimentais. A fraca capacidade de predição foi confirmada pela estimativa dos erros, apresentando SE, NME e MME iguais a 24,43 d⁻¹, 193,54% e 2,15, respectivamente.

A teoria da renovação fundamentou a equação de Thackston e Krenkel (1969), mas essa subestimou os dados experimentais, conforme pode ser visualizado na Figura 4.5. Entretanto, os pontos que mais se distanciaram da reta, correspondiam aos valores de K_2 , que eram superiores à dezena. Isso ocorreu nas profundidades de 0,13 m e 0,17 m e velocidade média de 0,14 ms⁻¹ a 0,20 ms⁻¹. Caso esses dados sejam retirados da base de informações, essa equação teria erros NME e MME iguais a 11,16% e 0,84%, respectivamente, contra os 35,66% e 0,54% obtidos com a utilização, na íntegra, dos dados.

As demais equações tiveram sua formulação com base no modelo de dissipação de energia, ou seja, no fenômeno da turbulência, apresentando estimativas que podem ser consideradas adequadas, visto que o erro SE variou de 11,49 a 14,44 d⁻¹; NME, em módulo, de 0,92 a 38,29%; e MME, de 0,74 a 1,18. Destaca-se que Melching e Flores (1999), ao analisar equações de predição, verificaram que os erros de estimativa do coeficiente de reaeração podem atingir de 40% a 78%. Jha (2001) também obteve bom ajustamento da equação de Cawallader e McDonnell (1969), aos dados experimentais por ele obtidos.

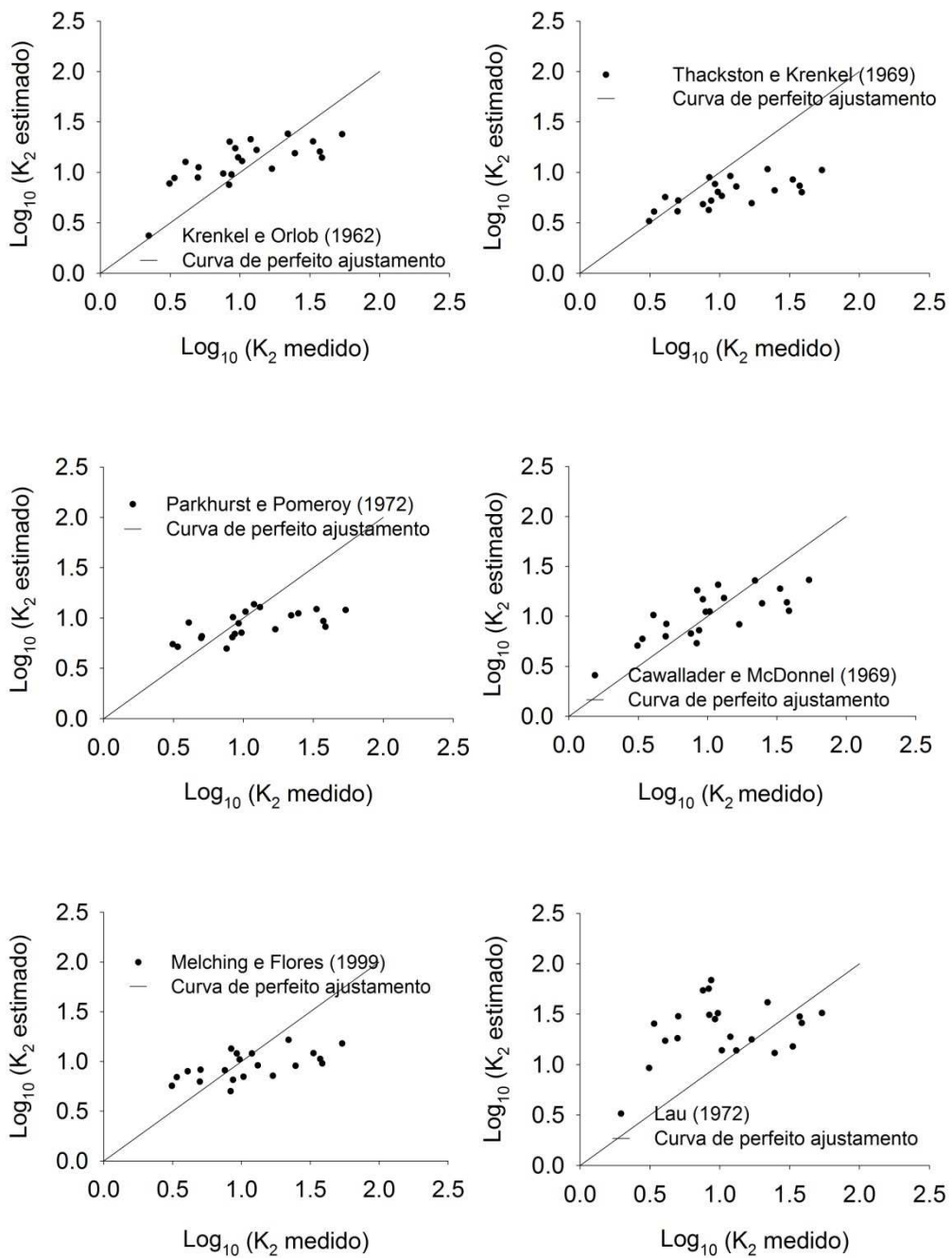


Figura 4.5 - Comparação dos dados de K_2 obtidos experimentalmente, em canal hidráulico com fundo deslizante, com os estimados por diferentes equações preditoras semiempíricas.

A partir da teoria da dissipação de energia, que está intrinsecamente relacionada ao estudo do fenômeno da turbulência, se desenvolveram as equações de Krenkel e Orlob, Cawallader e McDonnell, Parkhurst e Pomeroy e Melching e Flores. Essa teoria vem sendo defendida por vários pesquisadores, como Melching e Flores (1999), Moog e Jirka (1999), Gualtieri e Gualtieri (2004) e Chao et al. (2007), por considerarem ser uma das mais importantes no esclarecimento do processo de transferência de massa do oxigênio do ar para a água. Segundo esses autores, há forte relação entre a energia de dissipação e K_2 e de acordo com Melching e Flores (1999), do ponto de vista conceitual, as relações entre essas variáveis indicam que elas sejam reguladas pela escala do escoamento. Para condições de canal hidráulico, essa escala é adequadamente descrita pela largura e profundidade da água em escoamento e, para canais naturais, a vazão serve como substituto dessa escala. Corroborando com as análises feitas pelos pesquisadores citados anteriormente, neste trabalho, também se observou que os melhores ajustamentos de equações semiempíricas ocorreram naquelas que se basearam na energia de dissipação.

Moog e Jirka (1999), relacionando a taxa de dissipação da energia turbulenta próxima à superfície, com a teoria da renovação superficial, obtiveram a conhecida expressão do modelo de pequenos vórtices (Equação 4.7). Ao se compararem as estimativas obtidas utilizando tais modelos com dados experimentais alcançados em diferentes estudos, esses autores verificaram forte relação entre esses fenômenos e o coeficiente de reaeração. Gualtieri e Gualtieri (2004), avaliando quatro modelos com base em turbulência, concluíram que todos oferecem boa estimativa de K_2 ; a escala desses modelos suportam ambos, a teoria dos pequenos vórtices e a da comparação da camada limite na interface ar-água e a subcamada laminar no fundo do canal, proposta pelos autores. Os erros associados aos modelos variaram de 0,34% a 16%.

Das equações empíricas, as de Owens et al. (1964), Tsvoglou e Wallace (1972), Moog e Jirka (1998) e Jha et al. (2001 e 2004) apresentaram baixa capacidade de predição do coeficiente de reaeração, para as condições deste trabalho, conforme pode ser visualizado na Figura 4.6 e confirmado na análise dos erros apresentados na Tabela 4.5.

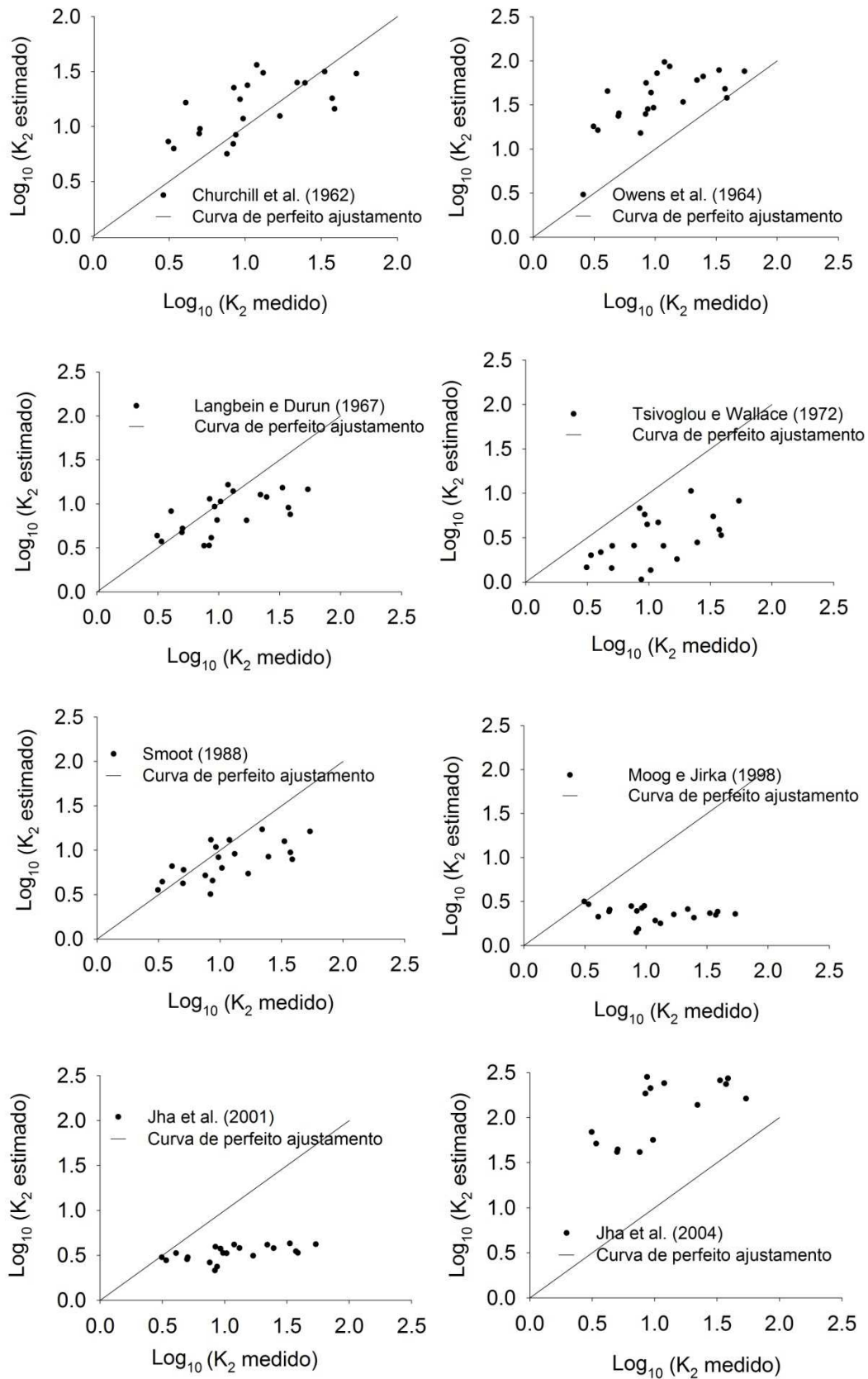


Figura 4.6 - Comparação entre dados de K_2 obtidos experimentalmente, em canal hidráulico com fundo deslizante e os estimados por diferentes equações predictoras empíricas.

Tabela 4.5 – Erros-padrão de estimativa (SE), médio normalizado (NME) e médio multiplicativo (MME), calculados ao comparar o valor de K_2 , determinado em canal hidráulico de fundo deslizante, com o predito, utilizando diferentes equações disponíveis na literatura, representativas dos modelos conceitual, semiempírico e empírico

N.	Equação*	SE (d^{-1})	NME (%)	MME
Modelo conceitual				
1	$K_2 = 3,93(U)^{0,5}H^{-1,5}$	15,26	131,67	1,93
Modelos semiempíricos				
2	$K_2 = 173,45(US)^{0,408}H^{-0,66}$	11,49	38,29	1,18
3	$K_2 = 24,9(1 + Fr^{0,5})u^*H^{-1}$	15,67	-35,66	0,54
4	$K_2 = 185,5(US)^{0,5}H^{-1}$	11,83	13,17	0,96
5	$K_2 = 23,04(10,17Fr^2)(SU)^{0,375}H^{-1}$	14,44	-10,47	0,74
6	$K_2 = 2506,7(u^{*3}U^{-2}H^{-1})$	24,43	193,54	2,15
7	$K_2 = 517(US)^{0,524}Q^{-0,242}$	13,82	-0,92	0,79
Modelos empíricos				
8	$K_2 = 5,014U^{0,969}H^{-1,673}$	12,19	54,51	1,30
9	$K_2 = 5,34U^{0,67}H^{-1,85}$	37,76	314,28	3,53
10	$K_2 = 5,1349UH^{-1,33}$	14,00	-19,57	0,67
11	$K_2 = 31200SU$	17,63	-67,46	0,25
12	$K_2 = 5,5773U^{0,607}H^{-1,689}$	30,22	291,08	3,12
13	$K_2 = 543S^{0,6236}U^{0,5325}H^{-0,7258}$	13,99	-23,44	0,65
14	$K_2 = 1740U^{0,46}S^{0,79}H^{0,74}$	19,36	-71,72	0,18
15	$K_2 = 5,792U^{0,5}H^{-0,25}$	18,32	-62,47	0,29
16	$K_2 = 0,603286U^{0,4}H^{0,154}S^{-1}$	241,04	2011,21	14,56

Importante salientar que a faixa de variação da velocidade média da água e a da profundidade, avaliadas nesta pesquisa, são englobadas somente pela faixa de aplicação da equação de Owens et al. (1964).

As equações de Owens et al. (1964) e Bennett e Rathbun (1972), esta última não foi apresentada na forma gráfica, proporcionaram superestimativas do efeito da profundidade da água em escoamento no valor de K_2 , apresentando expoentes desse fator de -1,85 e -1,689, respectivamente. A possível causa dessa superestimativa pode ser melhor compreendida ao avaliar, na Figura 4.7, a análise de sensibilidade feita com as equações de Owens et al. (1964), Langbein e Durm (1967) e Bennett e Rathbun (1972), que apresentam configuração semelhante e cujos dados de origem estão

disponíveis na literatura. Para essa análise, considerou-se valor médio de velocidade e o de profundidade da água em escoamento, variando-os em $\pm 50\%$, para verificar o efeito da variação de cada um deles, em separado, sobre o K_2 . Como pode ser verificada, a influência da velocidade no coeficiente de reaeração foi linear. Entretanto, a profundidade da água tem o comportamento semelhante a uma exponencial de decaimento, cuja mais alta inclinação é verificada abaixo de 0,8 m de profundidade, para a equação de Owens (Figura 4.7a), e abaixo de 1,20 m, para as demais, o que implica em maior potencialidade de superestimativa nessa faixa.

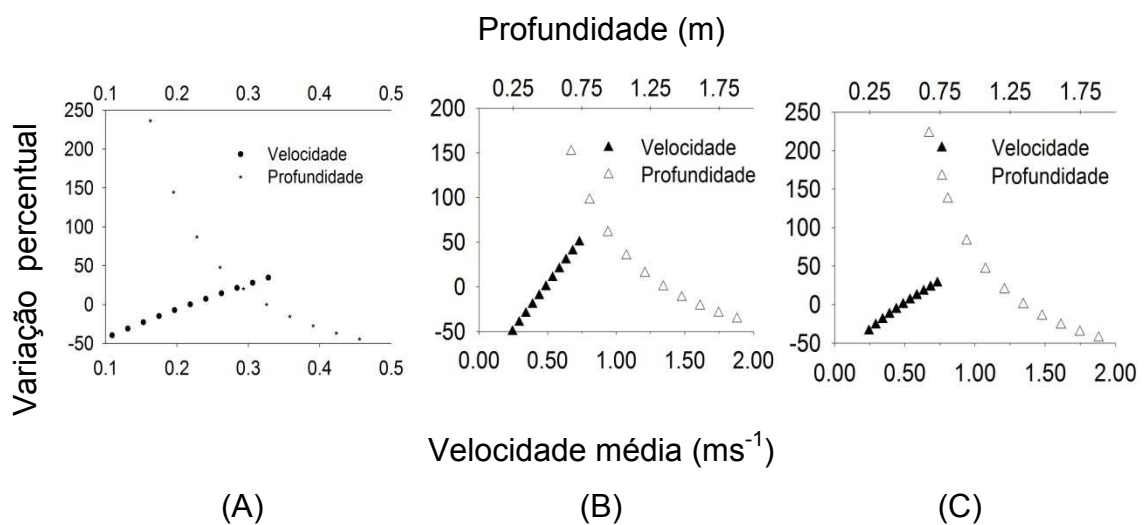


Figura 4.7 - Análise de sensibilidade das equações de: A - Owens et al. (1964), B - Langbein e Durum (1967) e C - Bennet e Rathbun (1972) com visualização gráfica do efeito porcentual em K_2 , das variações de velocidade e profundidade da água, dentro do espectro em que as equações foram obtidas.

Esse é um comportamento característico das equações que têm como variáveis de entrada somente a velocidade média e a profundidade; quanto maior, em módulo, o valor do expoente da profundidade, mais acentuada é a curva de decaimento. Isso provavelmente acontece por causa das diversas forças envolvidas no escoamento em canais, como forças inerciais, viscosas, gravitacionais e outras, cujas formulações envolvem predominantemente os fatores profundidade e velocidade. Assim, ao se proporem equações que apresentam exclusivamente essas variáveis, os expoentes nelas contidas

tenderão sintetizar todos os processos envolvidos no escoamento e aquele que está relacionado a maior número de fenômenos tenderá a ter maior importância.

As equações que envolvem declividade na sua formulação como as de Tsvolgov e Wallace (1972), Moog e Jirka (1999) e Jha (2004) também não proporcionaram estimativa adequada do coeficiente de reaeração, para as condições avaliadas neste trabalho. As duas primeiras equações citadas proporcionaram subestimativa e a última superestimativa de K_2 . Entretanto, Omole et al. (2013), ao comparar dados experimentais de K_2 obtidos no Rio Atuwara, na Nigéria, com valores estimados por diferentes equações preditoras, concluíram que o melhor ajuste foi alcançado pelo modelo de Jha, atribuindo esse resultado à semelhança climática entre as regiões do Rio Atuwara e do Rio Kali, na Índia, de onde se originaram os dados que resultaram na equação de Jha.

As melhores estimativas, dentre os modelos empíricos, foram obtidas com a utilização das equações de Churchill et al. (1962), de Langbein e Durum (1967) e de Smoot (1988), que estão apresentadas na Tabela 4.5, sob os números 8, 10 e 13, respectivamente. Ao analisar os erros associados a essas equações, verificou-se que o SE esteve entre $12,19 \text{ d}^{-1}$ e $14,00 \text{ d}^{-1}$; o NME, em módulo, esteve entre 19,57% e 54,51%; e MME variou de 0,65 a 1,30. Os erros obtidos, que refletem o ajustamento entre valores estimados e medidos, foram ligeiramente superiores aos melhores resultados alcançados nas equações semiempíricas.

3.4. Proposição de equação de estimativa

Ao serem analisadas as primeiras 20 equações propostas, observou-se que as variáveis fator de forma e número de Reynolds eram colineares à profundidade e velocidade, respectivamente; por isso, os ajustes obtidos para as equações em que esses fatores estavam incluídos não foram significativos.

As equações que tiveram por componentes a vazão e o número de Froude apresentaram, para os parâmetros desses fatores, baixa significância, com probabilidade de erro em sua estimativa superior a 30%. Por essa razão, essas formulações foram desconsideradas. Interessante observar que os

resultados confirmaram a afirmativa de Melching e Flores (1999) de que a escala do escoamento interfere em K_2 , bem como refere-se ao fator de forma para canais hidráulicos e à vazão, para canais naturais.

A partir da análise das equações inicialmente propostas e avaliação daquelas que apresentaram maior número de parâmetros significativos, verificou-se que seriam suficientes três variáveis independentes para estimar K_2 . Além disso, analisou-se que os adimensionais número de Reynolds e fator de forma não deveriam compor equações em que velocidade e profundidade da água estivessem explicitamente presentes. Várias combinações foram testadas e cinco delas tiveram todos os parâmetros significativos e os maiores coeficientes de determinação, sendo por isso selecionadas e estão apresentadas na Tabela 4.6.

Verificou-se, nas equações 4.13 e 4.15, da Tabela 4.6, que as variáveis independentes são adimensionais. Essa é uma característica desejável, visto que equações dimensionalmente homogêneas têm potencial de maior aplicabilidade (GUALTIERI et al., 2002). Além disso, nessas equações, o intercepto tem, necessariamente, a unidade d^{-1} , que é a unidade correspondente a UH^{-1} . Considerando que Gualtieri et al. (2002), por meio de análise dimensional, concluíram que a equação de estimativa do coeficiente de reaeração deveria ser da forma: $K_2 = UH^{-1}f(S, Fr, R)$, pode-se considerar que a Equação 4.15 tem semelhança com a proposta desse referido autor. Além disso, todos os parâmetros obtidos foram altamente significativos.

Ao analisar a Tabela 4.6, observou-se que apesar das Equações 4.12 a 4.16 terem R^2 diferentes, o erro calculado por três metodologias não apresentou grandes discrepâncias. Embora o ideal seja que o NME esteja próximo a zero, é considerado aceitável, para uso em engenharia, valores de até 10% (MOHAPATRA; RAO, 2005). Além disso, para o MME, quanto mais próximo a 1, melhor a estimativa. Sob esses critérios, todas as equações podem ser consideradas satisfatórias. Entretanto, verificou-se que as equações adimensionais (4.13 e 4.15) proporcionaram os menores erros.

Tabela 4.6 - Equações propostas de predição de K_2 com seus respectivos parâmetros: coeficiente de determinação R^2 e erros-padrão de estimativa (SE), médio normalizado (NME) e o médio multiplicativo (MME), calculados para verificação do ajuste dos modelos aos dados experimentais

Equação*	(4.12)	(4.13)	(4.14)	(4.15)	(4.16)
Parâmetro	$K_2 = a U^b H^c S^d$	$K_2 = a S^b ff^c R^d$	$K_2 = a u^{*b} ff^c R^d$	$K_2 = a S^b Fr^c R^d$	$K_2 = a u^{*b} Fr^c R^d$
a	111,76*	11682,16*	2018,06*	56609082,58*	224640072,15*
b	-0,36 ⁺	0,76*	1,51*	0,95*	1,66*
c	-1,23*	0,86*	1,49*	0,15*	0,26*
d	0,76*	-0,36 ⁺	-0,36 ⁺	-0,87 ⁺	-1,08 ⁺
R^2	0,820	0,820	0,820	0,780	0,570
SE (d^{-1})	2,214	2,070	2,075	2,268	3,385
NME (%)	7,913	1,799	4,793	2,227	7,783
MME	1,058	1,000	1,030	1,001	1,033

* U é a velocidade média (ms^{-1}); H , profundidade da lâmina de água (m); S , declividade do fundo do canal (mm^{-1}); ff , fator de forma (adimensional); R , número de Reynolds (adimensional); u^* , velocidade cisalhante (ms^{-1}); Fr , número de Froude (adimensional); *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; e + Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

3.5. Análise de sensibilidade das equações propostas

O resultado gráfico da análise de sensibilidade realizada para as equações preditoras propostas (Tabela 4.6) está apresentado na Figura 4.8.

Verificou-se na Figura 4.8a, correspondente à Equação 4.12, que a variável que mais influenciou o coeficiente de reaeração foi a profundidade da água em escoamento, sendo notado aumento de 87,28% em K_2 ao se reduzi-la de 0,17 m para 0,10 m. Entretanto, como pode ser visualizado, essa variação não é linear, o que implica que, caso se utilize essa equação para profundidades inferiores a 0,17 m, eventuais erros de medição poderão resultar em expressivo erro na estimativa de K_2 . No entanto, o aumento da profundidade de 0,17 m para 0,25 m resultou em correspondente redução de 39,22% no valor de K_2 .

A velocidade média da água e a declividade da lâmina de água apresentaram comportamentos opostos, no que se refere à análise de sensibilidade, ou seja, os aumentos na velocidade média produziram redução e na declividade, aumento em K_2 . Entretanto, a influência da declividade é mais expressiva e apresenta comportamento linear.

Os aspectos positivos de equações desse tipo, como a Equação 4.12, são a simplicidade e facilidade de aplicação prática. Entretanto, os aspectos negativos dizem respeito à exagerada importância dada a uma única variável, cuja imprecisão de medida pode produzir erros importantes. Além disso, outros fatores relacionados ao fenômeno, não contemplados claramente pelas equações, são imperfeitamente representados pela constante. E, ainda, por não terem homogeneidade dimensional, conforme afirmaram Gualtieri et al. (2002), essas equações são de aplicação mais restrita.

A Equação 4.13, que é dimensionalmente homogênea, teve na análise de sensibilidade influência equilibrada das diferentes variáveis, ou seja, o aumento na declividade e fator de forma produziram aumento linear em K_2 (Figura 4.8b); em contrapartida, o aumento no número de Reynolds proporcionou decréscimo de K_2 . Isso pode ser explicado pelo fato de os maiores valores de Reynolds terem ocorrido nos testes em que foram utilizadas as maiores profundidades de lâminas de água (acima de 0,17 m). O oposto, ou

seja, os mais baixos números de Reynolds ocorreram em profundidade de 0,11 m; a velocidade, em ambos os casos, esteve entre $0,11 \text{ ms}^{-1}$ e $0,17 \text{ ms}^{-1}$.

Na Equação 4.14 (Figura 4.8c), o comportamento foi semelhante, exceto no que se refere ao fator de forma e à velocidade cisalhante, os quais influenciaram mais fortemente que o número de Reynolds. Nas equações 4.15 e 4.16, representadas na Figura 4.8 (d e e), o destaque foi o número de Froude, cujo impacto no coeficiente de reaeração foi o menor, dentre as variáveis avaliadas. Isso talvez seja explicado pelo fato de todos os testes terem sido conduzidos em regime subcrítico, em que as forças gravitacionais superam as de inércia, o que sugere que aquela não tem supremacia no processo de reaeração.

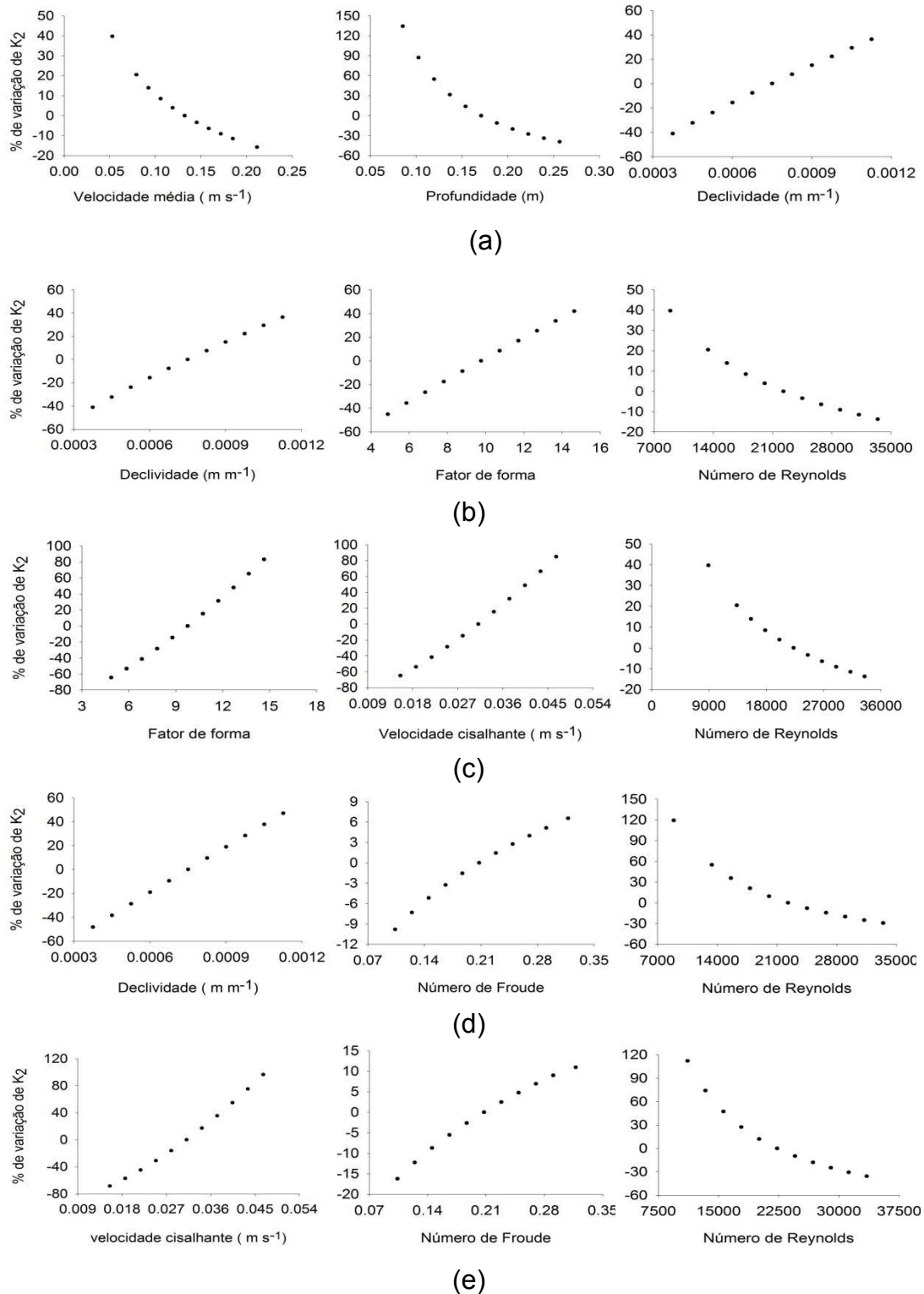


Figura 4.8 - Apresentação gráfica da análise de sensibilidade das cinco equações predictoras de K_2 com base em características hidrodinâmicas do escoamento, proposta neste trabalho, em que (a) refere-se a $K_2 = a U^b H^c S^d$; (b), a $K_2 = a S^b ff^c R^d$; (c), a $K_2 = a u_*^b ff^c R^d$; (d), a $K_2 = a S^b Fr^c R^d$; e (e), $K_2 = a u_*^b Fr^c R^d$.

Considerando-se as análises estatísticas e de sensibilidade, verificou-se que dentre as equações propostas, aquela que se destacou sob ambas as perspectivas foi a Equação 4.13, que é adimensional. Além disso, essa apresenta em suas variáveis a declividade que está relacionada com a velocidade do escoamento da água e também com a taxa de dissipação de energia por unidade de massa, que para canais é representada por $E = U i g$, em que g é a aceleração da gravidade. A outra variável é o fator de forma, que, segundo Melching e Flores (1999), para canais, representa adequadamente as escalas do escoamento. E, por fim, o número de Reynolds, que, ao relacionar as forças inerciais com as viscosas, insere na equação algumas propriedades do fluido.

3.6. Modelo matemático com base em turbulência

A teoria da renovação superficial preconiza que o movimento dos vórtices promoveria uma varredura na camada próxima à superfície, transportando o oxigênio dessa região para o meio líquido, produzindo na camada superficial um déficit de oxigênio. Dessa forma, quanto menor a periodicidade de renovação, mais acelerado seria o processo de difusão. Apoiado nessa teoria, para se obter o modelo de penetração foi incluída a frequência de renovação randômica.

Moog e Jirka (1999), relacionando esse último modelo com as teorias de turbulência, chegaram à formulação adimensional (Equação 4.17), em que K_L^+ é o coeficiente de transferência de massa entre o ar e a água, adimensionalizado; Sc , o número de Schmidt; e R^* , o número de Reynolds cisalhante.

Essa equação possibilita a inferência sobre os fenômenos físicos de maior importância na transferência de massa, que passam a ser definidos, matematicamente, pelo expoente, n , do número de Reynolds cisalhante. Em razão disso, considera-se que a taxa de absorção do oxigênio do ar pela água seja influenciada mais fortemente pelo fenômeno dos grandes vórtices ou dos pequenos vórtices, caso o valor de n seja de -0,50 ou -0,25, respectivamente.

$$K_L^+ = aSc^{-0,5}R^{*n} \quad (4.17)$$

No estudo de reaeração efetuado, a temperatura da água variou de 19,5°C a 25,4°C, o número de Schmidt esteve entre 361,09 e 486,47 e o número de Reynolds cisalhante variou de 2.131 a 10.235. Para essas condições, as variáveis K_L^+ , Sc e R^* foram linearizadas e por análise de regressão encontrou-se o valor de n , da Equação 4.17, igual a -0,30, com 95% de confiança. Dessa forma, o modelo de grandes vórtices pode ser descartado, para explicar o processo de transferência de oxigênio do ar para a água, visto que, se fosse considerado verdadeiro, o valor de n teria de se aproximar de -0,50. O fenômeno de *burst* também pode ser descartado, já que ele ocorreria em $n = 0$. Portanto, para as condições experimentais deste trabalho, os dados são, aparentemente, compatíveis com o modelo de pequenos vórtices, em que considera-se que a taxa da renovação superficial é controlada pela escala de Kolmogorov, que é proporcional a $(\varepsilon/\vartheta)^{0,5}$, em que ε representa a taxa de dissipação de energia próxima à superfície, que para canais suaves é definida como $\varepsilon = u^{*3}/H$.

Resultados semelhantes foram obtidos por outros autores, como Moog e Jirka (1999), os quais, trabalhando com profundidade do escoamento de 0,025 m a 0,10 m e R^* de 357 a 4220, obtiveram $n = -0,29$. Os autores concluíram que, para R^* acima 400, parece ser invariante o efeito dos pequenos vórtices. A relação de resultados alcançados por diversos autores está apresentada na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Valor de n obtido a partir de dados experimentais de diferentes autores com o respectivo intervalo de confiança para 95% de probabilidade

Autores	n	Intervalo de confiança
Moog e Jirka (1999)*	-0,29	-0,45 a -0,13
Lau (1975)*	-0,19	-0,33 a -0,05
Gulliver e Halverson (1989)*	-0,23	-0,32 a -0,14
Thackston e Krenkel (1969)*	-0,04	-0,19 a +0,11
Gualtieri e Gualtieri (2004)	-0,33	-
Obtido neste trabalho	-0,30	-0,56 a -0,016

*Fonte: Moog e Jirka (1999).

Moog e Jirka (1999) afirmaram que, considerando que as pequenas escalas são independentes de detalhes de produção da turbulência, pode-se, então, obter uma formulação universal para escoamento de água limpa, desde que ε represente a taxa de dissipação de energia próxima à superfície. Dessa forma, assumido o expoente $n = -0,25$, por regressão não linear, os autores obtiveram a seguinte equação, na forma dimensional em que ν é viscosidade cinemática.

$$K_L = 0,161Sc^{-0,5}(\varepsilon \nu)^{0,25} \quad (4.18)$$

Entretanto, ao se realizar o procedimento proposto por Moog e Jirka (1999), com os dados gerados neste trabalho, obteve-se a constante para a Equação 4.17 igual a 0,099, o que pode ser explicado pelo fato de se ter trabalhado com faixa de Reynolds cisalhante superior (2.131 e 10.235) ao desse autor. Já o modelo proposto por Atkinson, citado por Gualtieri e Gualtieri (2004), que também foi compatível com o modelo de pequenos vórtices, apresentou constante igual a 0,179. Entretanto, como pode ser visualizada na Figura 4.9a, as equações propostas por Moog e Jirka (1999), Atkinson e a deste trabalho são paralelas e, portanto, nenhuma delas atenderia a todo o conjunto de dados.

Gualtieri e Gualtieri (2004), ao submeterem os dados experimentais ao modelo proposto na Equação 4.17, encontraram $n = -0,33$ e interpretaram esse resultado como sendo uma escala intermediária entre grandes e pequenos vórtices, recomendando a utilização da seguinte equação adimensional.

$$K_L^+ Sc^{0,5} = 0,293R^{*-0,33} \quad (4.19)$$

Segundo Souza et al. (2011), o espectro de energia da turbulência é análogo ao de cores que aparece quando uma luz branca atravessa um prisma, ou seja, com vários comprimentos de onda ou frequências superpostas. Então, em relação à turbulência, pode-se desenvolver análise similar, em que dentro do campo turbulento há vórtices de diferentes tamanhos que contribuem para a energia total.

Considerando que o raciocínio de Souza et al. (2011) esteja correto, e avaliando o resultado apresentado neste trabalho, em que se obteve $n = -0,30$, com intervalo de confiança entre $-0,57$ e $-0,016$, concluiu-se que, nesse intervalo, há sobreposição com o espectro de grandes vórtices, passando pela espectro dos pequenos vórtices e que se aproximou inclusive do *burst* ($n = 0$), o que permitiu concluir que avaliar utilizando somente o valor de n não é adequado.

Ao analisar conjuntamente os dados de Moog e Jirka (1999) e os obtidos neste trabalho, verificou-se graficamente que esses são, de certo modo, complementares. Ao se avaliarem os dados, percebeu-se pequena interface de valores de número de Reynolds cisalhante de 2.100 a 4.000. Nessa análise conjunta, chegou-se a $n = -0,52$, com intervalo de confiança com 95% de significância, entre $-0,55$ e $-0,49$. Esse novo resultado se aproximou fortemente de $n = -0,50$, caracterizando, assim, o fenômeno dos grandes vórtices. Desta forma, adotando-se $n = -0,50$, estimou-se o parâmetro, a , obtendo-se a Equação 4.20, cujo gráfico está apresentado na Figura 4.9b.

$$K_L^+ Sc^{0,5} = 0,9821 R^{*-0,50} \quad (4.20)$$

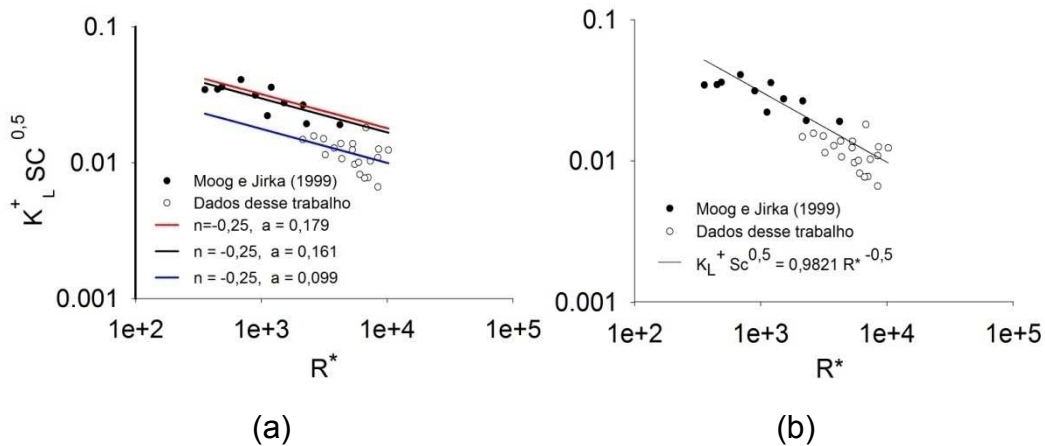


Figura 4.9 - Coeficiente de reaeração adimensionalizado, estimado a partir de dados experimentais obtidos em canais hidráulicos, comparado com os alcançados por equações preditoras que representam os fenômenos de pequenos vórtices (a) e de grandes vórtices (b).

A Equação 4.20 obtida para R^* , variando de 357 a 10.225 e Sc de 443 a 819, pode ser representada também na forma dimensional:

$$K_L = 0,9821 Sc^{-0,5} (\varepsilon \vartheta)^{0,5} (u^*)^{-1} \quad (4.21)$$

É relevante a obtenção de equações com esse formato, por ser inseridos, em sua estrutura, fatores referentes aos fenômenos de transferência de massa, representado pelo número de Schmidt (Sc) e de transferência de quantidade de movimento, ao passo que as equações empíricas se relacionam, quase sempre, estritamente com esse último fator.

Visando a aplicação prática da Equação 4.21, essa pode ser decomposta em suas variáveis primárias, admitindo-se $u^* = \sqrt{gR_H S}$ e adotando-se $R_H \approx H$, que é aceitável para a hipótese de canal largo (ARAÚJO, 1995). Assim, desenvolvendo algebricamente a equação, tem-se:

$$K_2 = 1,74 Sc^{0,5} \vartheta^{0,5} S^{0,5} H^{-1,25} \quad (4.22)$$

Na estimativa do coeficiente de reaeração por meio da Equação 4.22, estão aliadas as propriedades do fluido, representadas pelo número de Schmidt e pela viscosidade cinemática, que são dependentes da temperatura, com as características hidráulicas do escoamento, declividade e profundidade.

4. CONCLUSÃO

Com base nos resultados, pode-se concluir que:

- Os valores obtidos de K_2 , no canal hidráulico com fundo deslizante, foram compatíveis com os alcançados por outros autores em canais hidráulicos.
- As equações preditoras que apresentaram melhor ajustamento aos dados experimentais e menores erros foram as semiempíricas de Krenkel e Orlob (1962), Cawallader e McDonnell (1969), Parkhurst e Pomeroy (1972), dentre as disponíveis na literatura.
- As características hidrodinâmicas do escoamento que mais influenciaram o coeficiente de reaeração foram velocidade média, velocidade cisalhante e

profundidade da água, declividade da lâmina de água, fator de forma, número de Froude e número de Reynolds.

- A profundidade do escoamento é a variável relacionada com grande número de fenômenos físicos que interferem no fenômeno da reaeração; por isso, sua determinação acurada é essencial.
- A equação preditora que apresentou melhor desempenho foi a $K_2 = 11682,16S^{0,76}ff^{0,86}R^{-0,36}$, em relação das que envolveram somente variáveis hidráulicas.
- Os grandes vórtices relacionaram-se fortemente com o coeficiente de reaeração, com base no modelo de turbulência.
- A equação preditora com base no fenômeno da turbulência tem potencial de mais ampla aplicação por estar fundamentada em fenômenos físicos de transferência de massa e de quantidade de movimento e a formulação obtida foi: $K_L = 0,9821 Sc^{-0,5}(\varepsilon \vartheta)^{0,5}(u^*)^{-1}$.

5. REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21.ed. Washington, DC: APHA, 2005. 1268 p.

ARAÚJO, J.C. Lei logarítmica para distribuição unidimensional de velocidade em canais abertos. **Revista Brasileira de Engenharia**, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p. 5-24, 1995.

BENNETT, J.P.; RATHBUN, R.E. **Reaeration in open channel flow**. Washington: United States Department of the Interior, 1972. 86 p.

CHAO, X.; JIA, Y.; WANG, S.S.Y. Atmospheric reaeration in open channel flow. In: WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS: RESTORING OUR NATURAL HABITAT, 2007. **Proceedings...** 2007. 10 p.

COSTA, O.S.; SIQUEIRA, E.Q. Efeito da umidade na transferência de oxigênio na interface ar-água. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 26, 1998, Lima. **Anales...** Lima: AIDIS, 1998. p. 12.

CREMASCO, M.A. **Fundamentos de transferência de massa**. Campinas: UNICAMP, 2002. 728 p.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **Rates, constants and kinetics formulations in surface water quality modeling**. 2.ed. Athens, 1985. 455 p.

GOULART, J.N.V. **Análise experimental de escoamentos cisalhantes em canais compostos fechados**. 2009. 105 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

GUALTIERI, C.; GUALTIERI, P. Turbulence based model for gas transfer analysis with channel shape factor influence. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 4, p. 249-271, 2004.

GUALTIERI, C.; GUALTIERI, P.; DORIA, G.P. Dimensional analysis of reaeration rate in stream. **Journal of Environmental Engineering**, v. 128, n. 1, p. 12-18, 2002.

GUELLOUZ, M.S.; TAVOULARIS, S. The structure of the turbulent flow in a rectangular channel containing a single rod: Reynolds-average measurements. **Experience in Thermal and Fluid Science**, v. 23, p. 59-73, 2000.

HACH, A. **Relatório de aplicação**: análise do processo LDO. Carnaxide: Hach-Lange, 2006. 8 p.

HAIDER, H.; ALI, W.; HAYDAR, S. Evaluation of various relationships of reaeration rate coefficient for modeling dissolved oxygen in a river with extreme flow variations in Pakistan. **Hydrological Process**, p. 15, 2012.

JANZEN, J.G.; SCHULZ, H.E.; JIRKA, G. Estimation of mass transfer velocity based on measured turbulence parameters. **AIChE Journal**, v. 56, n. 8, p. 2005-2017, 2010.

JANZEN, J.G.; SCHULZ, H.E.; JIRKA, G. Detalhes da transferência de gases na interface ar-água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 11, n. 4, p. 153-161, 2006.

JHA, R.; OJHA, C.S.P.; BHARIA, K.K.S. A supplementary approach for estimating reaeration rate coefficients. **Hydrological Processes**, n. 18, p. 65-79, 2004.

JHA, R.; OJHA, C.S.P.; BHATIA, K.K.S. Refinement of predictive reaeration equations for a typical Indian river. **Hydrological Processes**, n. 15, p. 1047-1060, 2001.

LEWIS, W.K.; WHITMAN, W.G. Principles of gas absorption. **Absorption Symposium**, v. 16, n. 12, p. 1215-1220, 1924.

MELCHING, C.S.; FLORES, H.E. Reaeration equations derived from U.S. Geological Survey database. **Journal of Environmental Engineering**, Reston, v. 125, n. 5, p. 407-414, 1999.

MOHAPATRA, D.; RAO, P.S.A. Thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66, p. 513-518, 2005.

MOOG, D.B.; JIRKA, G.H. Air-water gas transfer in uniform channel flow. **Journal of Hydraulic Engineering**, Reston, v. 125, n. 1, p. 3-10, 1998.

MOOG, D.B.; JIRKA, G.H. Analysis of reaeration equations using mean multiplicative error. **Journal of Environmental Engineering**, Reston, v. 124, n. 2, p. 104-110, 1998.

MOOG, D.B.; JIRKA, G.H. Stream reaeration in nonuniform flow: macroroughness enhancement. **Journal of Hydraulic Engineering**, Reston, v. 125, n. 1, p. 11-16, 1999.

MOOG, D.B.; JIRKA, G.H. Tilting wind-water tunnel. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AIR-WATER GAS TRANSFER, 3, 1995, Heidelberg. **Proceedings...** Heidelberg: AEON Verlag, 1995. p. 495-498.

OMOLE, D.O.; LONGE, E.O.; MUSA, A.G. An approach to reaeration coefficient modeling in local surface water quality monitoring. **Environ. Model Assess.**, v. 18, p. 85-94, 2013.

PEREIRA, C.E. **Estudo de parâmetros turbulentos e a sua correlação com o coeficiente de reaeração com o uso da técnica fotográfica**. 2002. 226 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

SOUZA, J.F.A.; OLIVEIRA, L.R.; AZEVEDO, J.L.L.; SOARES, I.D.; MATA, M.M. Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, n. 1, p. 21-41, 2011.

STREETER, H.W.; PHELPS, E.B. **A study of the pollution and natural purification of the Ohio river**. Washington: U.S. Public Health Service, 1925. 75 p. (Public Health Service, 146).

TALUKDAR, P.; ISKRA, C.R.; SIMONSON, C.J. Combined heat and mass transfer for laminar flow of moist air in a 3D rectangular duct: CFD simulation and validation with experimental data. **International Journal of Heat and Mass Transfer.**, v. 51, p. 3091-3102, 2008.

TAMBURRINO, A.; GULLIVER, J.S. Free-surface turbulence and mass transfer in a channel flow. **AIChE Journal**, v. 48, n. 12, p. 2732-2743, 2002.

TAMBURRINO, A. Scaling-up of gas transfer coefficient from agitated tank measurements to open channel flow. In: IAHR CONGRESS, 30, 2003, Thessaloniki, Greece. **Proceedings...** Thessaloniki, Greece, 2003. p. 8.

TSIVOGLU, E.C.; WALLACE, J.R. **Characterization of stream reaeration capacity**. Washington: Environmental Protection Agency, 1972. (Report EPA, 12).

VENDRAME, I.F. **Determinação experimental do coeficiente de reaeração, em rios e canais abertos, com uso de traçadores**. 1982. 200 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

VON SPERLING, M. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG, 2007. 588 p.

WHITE, F.M. **Mecânica dos fluidos**. 6.ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 880 p.

WU, X.; TRUPP, A.C. Spectral measurement and mixing correlations in a simulated rod bundle subchannels. **International Journal Heat Transfer**, v. 37, p. 1277-1281, 1994.

CONCLUSÃO GERAL

De acordo com os resultados, conclui-se que:

- O estudo da transferência do oxigênio do ar para a água limpa em canal hidráulico com fundo deslizante foi satisfatório, dentro dos limites impostos pelas condições operacionais do equipamento.
- As variáveis hidrodinâmicas mais fortemente relacionadas com o coeficiente de reaeração e que proporcionaram equações preditoras significativas foram: declividade do fundo do canal, fator de forma e número de Reynolds.
- A equação que apresentou melhor resultado, dentre das propostas, foi $K_2 = 11682,16S^{0,76}ff^{0,86}R^{-0,36}$, para declividade entre 0,0003 e 0,0017 mm^{-1} , fator de forma de 6,28 a 14,27 e número de Reynolds entre 7875 e 33416.
- As escalas dos grandes vórtices relacionaram-se fortemente com o coeficiente de reaeração.
- A equação preditora com base no modelo da turbulência teve maior potencial de aplicação por ser fundamentada em fenômenos físicos. Para a água limpa, a equação calibrada foi: $K_L = 0,9821 Sc^{-0,5}(\varepsilon \vartheta)^{0,5}(u^*)^{-1}$.

RECOMENDAÇÕES PARA OUTROS TRABALHOS

Recomendam-se, para futuros trabalhos, manter constante a temperatura da água durante os ensaios de reaeração; ampliar a faixa de velocidade do escoamento até $0,50 \text{ ms}^{-1}$, para que essa se aproxime dos valores obtidos em campo; e aumentar a profundidade do escoamento. Para essa última indicação, é importante que haja controle preciso, pois a profundidade está relacionada com vários fenômenos físicos, que interferem no coeficiente de reaeração.

APÊNDICE A

TESTES DE REAERAÇÃO

Nos testes de reaeração, conduzidos em canal de laboratório com fundo deslizante, a concentração do oxigênio dissolvido foi determinada ao longo do tempo para diferentes profundidades de lâmina d'água e velocidade de escoamento. Os resultados brutos desses testes estão apresentados nas Figuras 1A, 2A e 3^a, que se referem respectivamente aos resultados com as lâminas de água de 0,11 m a 0,13 m; 0,15 m a 0,17 m; e 0,20 a 0,25 m.

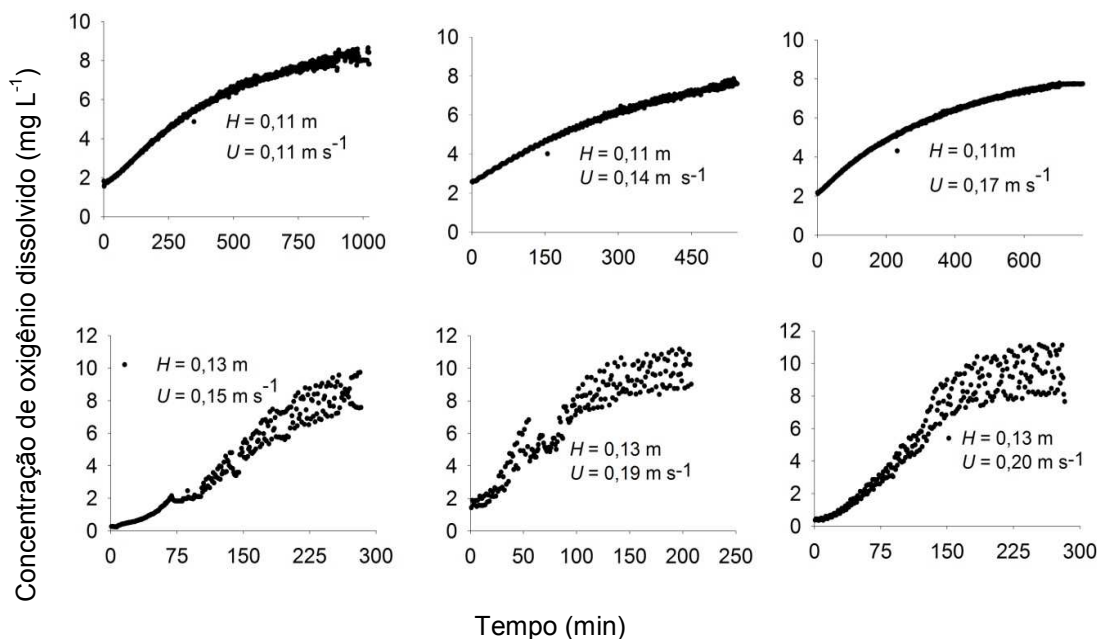


Figura 10A - Dados experimentais brutos de concentração de oxigênio dissolvido na água, em razão do tempo, em testes de reaeração realizados em canal hidráulico com fundo deslizante e com lâminas de 0,11 m e 0,13 m e diferentes velocidades de escoamento.

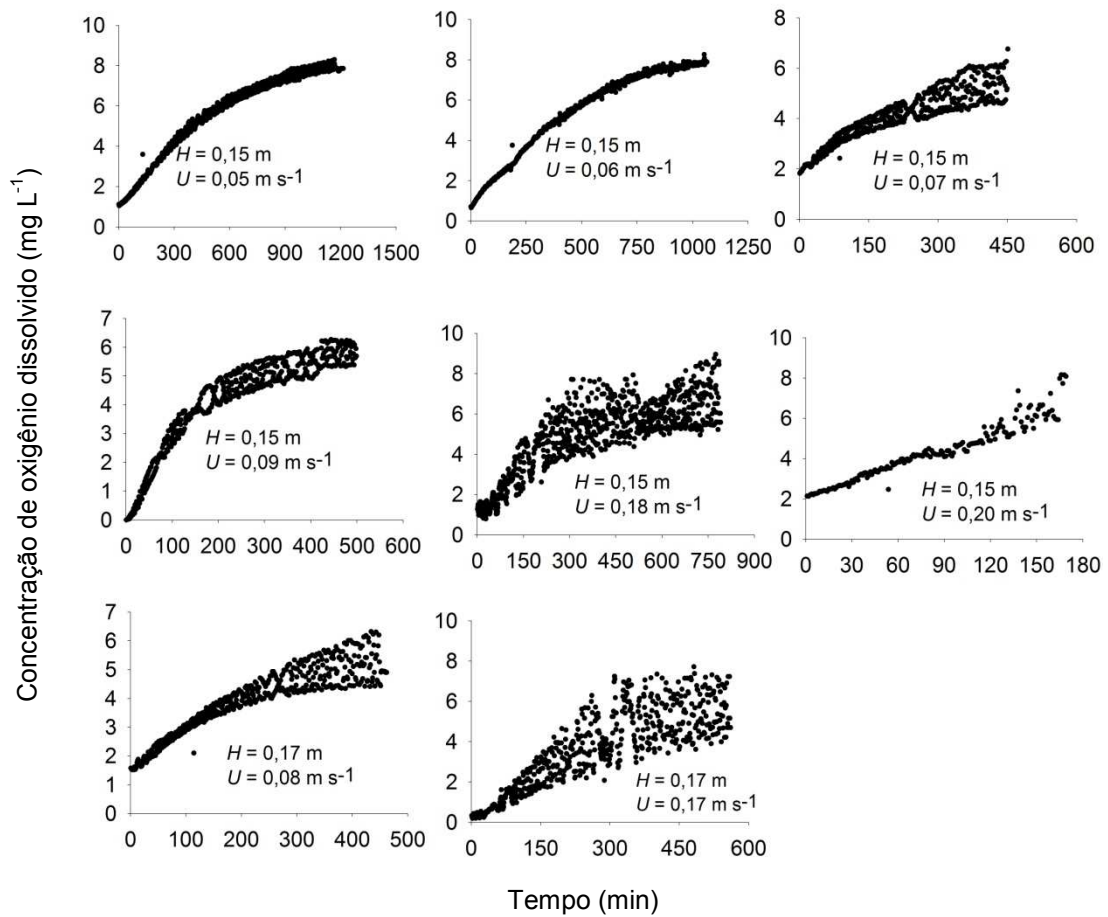


Figura 11A - Dados experimentais brutos de concentração de oxigênio dissolvido na água, em razão do tempo, em testes de reeração realizados em canal hidráulico com fundo deslizante e com lâminas de 0,15 m e 0,17 m e diferentes velocidades de escoamento.

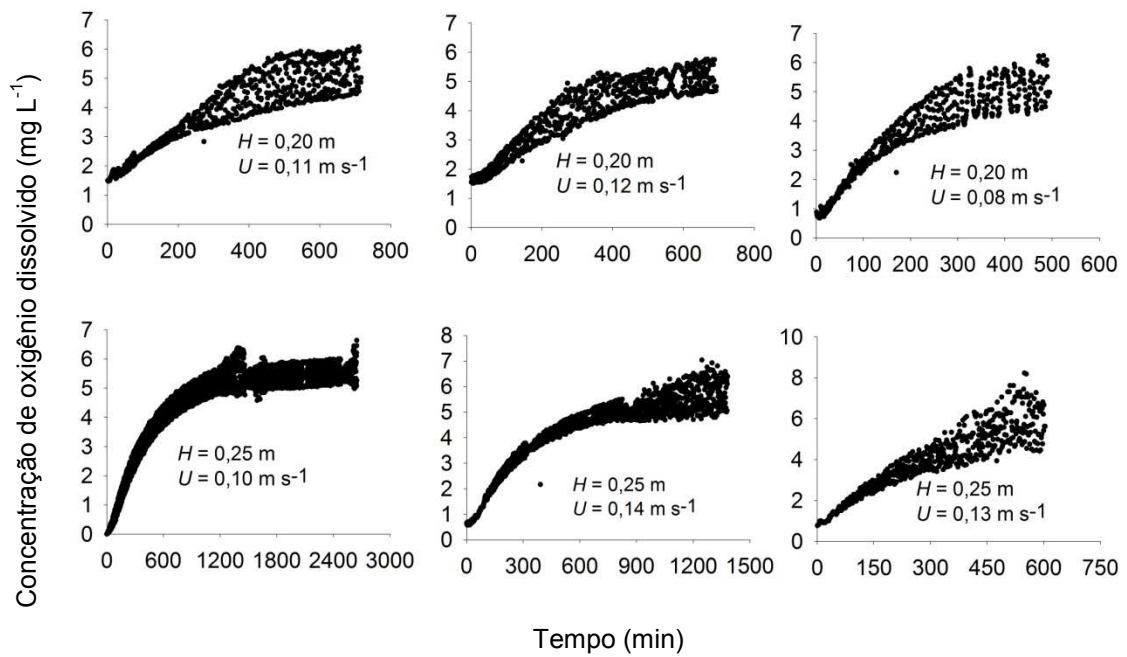


Figura 12A - Dados experimentais brutos de concentração de oxigênio dissolvido na água, em razão do tempo, em testes de reaeração realizados em canal hidráulico com fundo deslizante e com lâminas de 0,20 m e 0,25 m e diferentes velocidades de escoamento.

APÊNDICE B

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO

Nos testes de reaeração, determinou-se a concentração de oxigênio ao longo do tempo. A diferença entre a concentração de saturação calculada e os valores medidos representa o déficit de oxigênio. Ao conjunto de dados formado pelo déficit (D) e tempo (t), ajustou-se a equação cinética, cujos gráficos resultantes estão apresentados na Figura 1B, para diferentes profundidades e velocidades; as equações ajustadas estão na Tabela 1B.

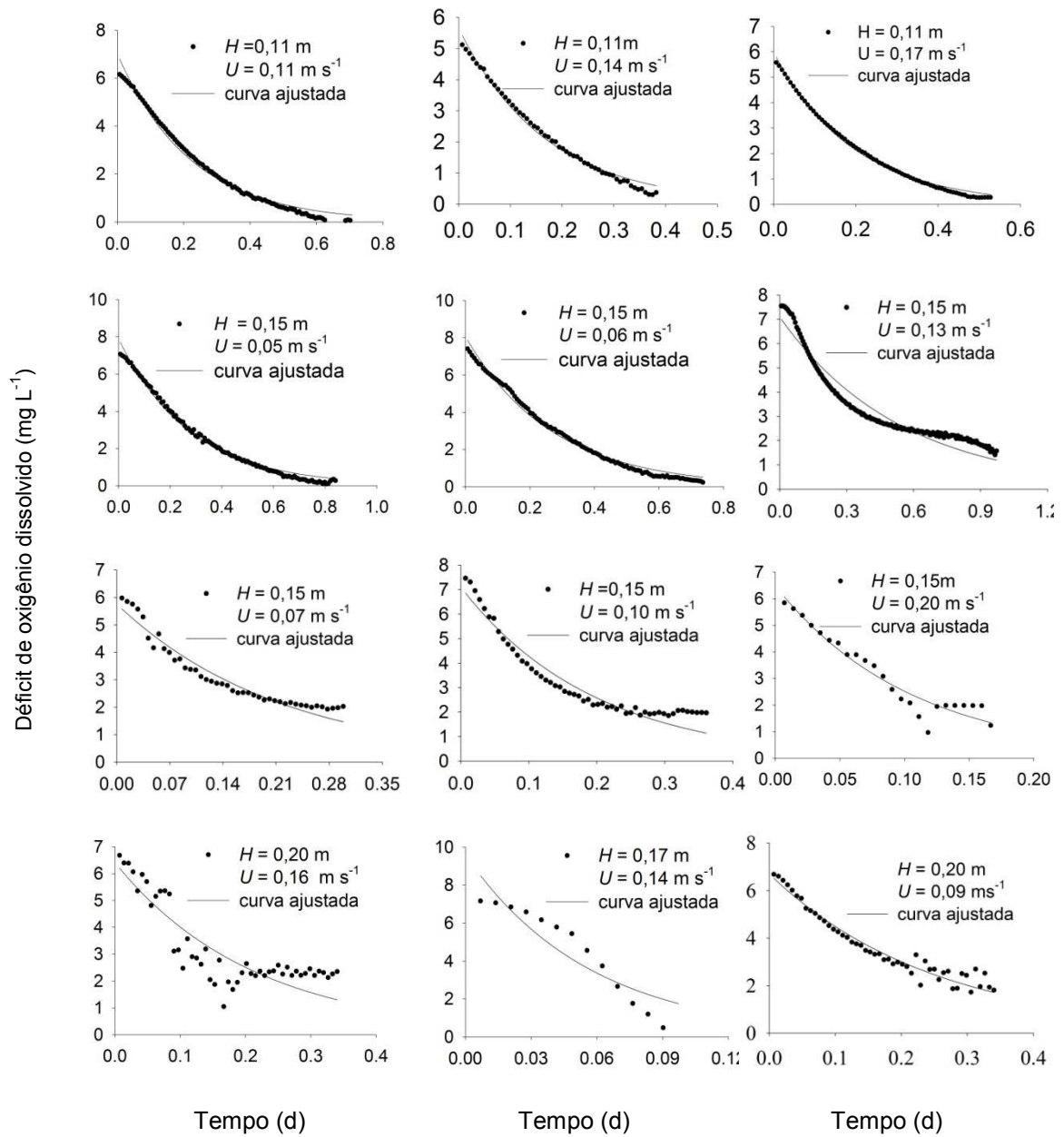


Figura 13B - Curva ajustada aos dados experimentais de déficit de concentração de oxigênio dissolvido, em razão do tempo, obtidos em canal hidráulico com fundo deslizante, para diferentes velocidades da água e profundidades de escoamento.

Tabela 8B - Equação cinética de primeira ordem ajustada aos dados experimentais de déficit de oxigênio dissolvido, em razão do tempo, obtidos em canal hidráulico com fundo deslizante

Teste	Lâmina (m)	Velocidade (ms ⁻¹)	Equações ajustadas	R ²
1	0,11	0,84	D = 6,0034 exp(-5,1747 t)	0,9933
2	0,11	0,54	D = 7,0179 exp(-4,5078 t)	0,9933
3	0,11	0,67	D = 5,6431 exp(-5,8938 t)	0,9877
4	0,15	0,54	D = 7,9054 exp(-3,6054 t)	0,9913
5	0,15	0,67	D = 8,0723 exp(-3,7299 t)	0,9887
6	0,16	1,35	D = 6,4810 exp(-9,4519 t)	0,9352
7	0,15	0,94	D = 8,1030 exp(-16,4226 t)	0,7383
8	0,13	0,74	D = 9,7230 exp(-11,0529 t)	0,8669
9	0,13	0,94	D = 9,5862 exp(-14,9298 t)	0,8641
10	0,13	1,14	D = 7,6238 exp(-23,9431 t)	0,9169
11	0,17	0,74	D = 8,1274 exp(-7,6748 t)	0,9598
12	0,17	0,94	D = 9,5905 exp(-17,4535 t)	0,8312
13	0,17	1,14	D = 7,6563 exp(-4,5741 t)	0,9487
14	0,20	1,14	D = 6,4114 exp(-4,6892 t)	0,7580
15	0,20	0,94	D = 5,9579 exp(-2,3884 t)	0,9687
16	0,20	0,74	D = 6,1469 exp(-2,3353 t)	0,9844
17	0,25	1,14	D = 7,1677 exp(-3,5126 t)	0,9853
18	0,25	0,94	D = 6,4655 exp(-1,5518 t)	0,9368
19	0,15	1,14	D = 6,4855 exp(-3,8261 t)	0,9107
20	0,15	0,74	D = 7,0940 exp(-1,8338 t)	0,9328
21	0,25	0,74	D = 7,2084 exp(-1,4160 t)	0,9591
22	0,15	0,74	D = 5,3499 exp(-3,6052 t)	0,9925
23	0,15	0,94	D = 6,9940 exp(-5,6793 t)	0,9589
24	0,15	0,74	D = 5,7634 exp(-4,5924 t)	0,9396
25	0,15	0,94	D = 7,1022 exp(-5,0698 t)	0,9321
26	0,17	0,94	D = 5,9660 exp(-3,5904 t)	0,9865
27	0,20	1,14	D = 6,6991 exp(-4,0071 t)	0,9591