

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

CONTRIBUIÇÃO À METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO INDIRETA
DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO DOS ESCOAMENTOS NATURAIS
DA ÁGUA COM EMPREGO DO MÉTODO DA SONDA SOLÚVEL



ORLENE SILVA DA COSTA

Tese apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos, da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do
Título de Doutor em Hidráulica e Saneamento.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcius F. Giorgetti

SÃO CARLOS - SP
1999

Class.	TFCF - FESC
Cutt.	05660.m
Tombo	0098199

311 00006886

S/S 1031953

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

C873c

Costa, Orlene Silva da

Contribuição à metodologia para determinação indireta do coeficiente de reaeração dos escoamentos naturais da água com emprego do método da sonda solúvel / Orlene Silva da Costa. – São Carlos, 1999.

Tese (Doutorado). -- Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 1999.

Orientador: Prof. Dr. Marcius F. Giorgetti

1. Reaeração.
 2. Dissolução.
 3. Ácido oxálico.
 4. Turbulência.
 5. Mistura.
- I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidata: Engenheira **ORLENE SILVA DA COSTA**

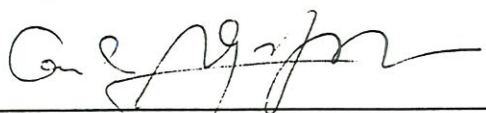
Tese defendida e aprovada em 12-02-1999
pela Comissão Julgadora:



Prof. Titular **MARCIUS FANTOZZI GIORGETTI (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



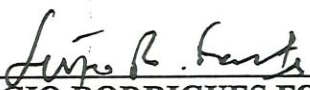
Prof. Associado **EDUARDO CLETO PIRES**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Livre-Docente **CARLOS ALBERTO GASPARETTO**
(Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP)



Prof. Doutor **ANTENOR RODRIGUES BARBOSA JUNIOR**
(Universidade Federal do Ouro Preto - UFOP)



Prof. Doutor **SÉRGIO RODRIGUES FONTES**
(UNESP - Campus de Jaboticabal)



Prof. Titular **FAZAL HUSSAIN CHAUDHRY**
Coordenador da Área de Hidráulica e Saneamento



JOSE CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Ainda que eu falasse as línguas dos homens e dos anjos, e não tivesse amor, seria como o metal que soa ou como o sino que tine.

E ainda que tivesse o dom de profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a ciência, e ainda que tivesse toda a fé, de maneira tal que transportasse os montes, e não tivesse amor, nada seria.

I CORÍNTIOS 13 :1,2

Orlane e Izaias Costa

*A vocês que dão à minha vida um brilho
precioso: agradeço pelos sacrifícios, amparo e
verdadeiro amor, que só vocês pais sabem dar.*

Obrigada por esta conquista.

Amo vocês.

Marcela Costa

Valeu a torcida, mano.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, pelo auxílio financeiro na forma de bolsa de doutorado.

Ao Professor Marcius F. Giorgetti, pela valiosa e segura orientação.

Ao Professor Harry Edmar Schulz pelas sugestões para o aperfeiçoamento deste trabalho e sua esposa Selva Amaral Garcia Schulz, pela sincera amizade.

Aos amigos Antenor Barbosa Jr. - professor da Universidade Federal de Ouro Preto, Alan Cavalcante da Cunha - professor da UFSCar e Eduardo Queija de Siqueira - professor da Universidade Federal de Goiás, pela indispensável ajuda nas realizações de experimentos e durante toda a pesquisa.

Aos técnicos Wagner Lamon, Roberto Bergamo e Luís Musseti, do Laboratório de Fenômenos de Transporte - SHS; Betão, do Laboratório de Meteorologia - CREA; Edson Corneta e Chico, do Laboratório de Hidráulica - SHS; José Antônio, do Laboratório de Madeira - SET; e Rui, da Oficina de Mecânica Fina - SEE, pela montagem e manutenção de determinados equipamentos e aparatos, e pela participação na realização de alguns experimentos.

José Eduardo, Laise, Fernando, Renan e Gustavo, pela amizade e ajuda na realização dos experimentos de campo.

Aos técnicos Waldecir e Sergião, do Departamento de Hidráulica e Saneamento, pelo auxílio na definição das figuras ilustradas na tese.

Às amigas Engenheiras Químicas Isabel Rodrigues e Sônia Zanetti pelas importantes discussões no decorrer do desenvolvimento desta pesquisa.

À família Claudino: Bené, Raimundo, Aurélio, Guto e Lázaro, pela força, carinho e incentivo para finalização deste trabalho.

À Dr^a. Socorro, Dr. Joel, Egle, Aglaê, Abidiel e Bruna Guimarães, minha querida família, pelo apoio, carinho e paciência no término desta pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	i
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	xi
RESUMO	xvii
ABSTRACT	xix
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1	
REAERAÇÃO EM CURSOS D'ÁGUA NATURAIS	4
1. EQUAÇÕES DE PREVISÃO DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO	7
1.1. Modelos Conceituais	8
1.2. Modelos Semi-Empíricos	15
1.3. Modelos Empíricos	18
2. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO	22
2.1. Técnica de Balanço do Oxigênio Dissolvido	22
2.2. Técnica da Perturbação do Equilíbrio	22
2.3. Técnica dos Traçadores Gasosos	23
3. AVALIAÇÃO DAS DETERMINAÇÕES DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO E SUAS EQUAÇÕES DE PREVISÃO	24
CAPÍTULO 2	
MÉTODO DA Sonda Solúvel	25
1. ORIGEM DO MÉTODO DA Sonda Solúvel	25
2. PRIMEIROS ESTUDOS COM SONDAS SOLÚVEIS	26
3. MODELOS DE PREVISÃO DA VELOCIDADE DE DISSOLUÇÃO	27
4. DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE DISSOLUÇÃO	39
5. CORRELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE DE REAERAÇÃO (K_2) E A VELOCIDADE DE DISSOLUÇÃO (V_s)	44

6. MATERIAIS TESTADOS NA CONFEÇÃO DAS SONDAS SÓLIDAS SOLÚVEIS	48
6.1. Processo de Confeção das Sondas	49
6.2. Suportes Flutuadores das Sondas	52

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA	54
1. PLANEJAMENTO TEÓRICO – EXPERIMENTAL	54
2. SONDAS PLANAS DE ÁCIDO OXÁLICO	56
2.1. Matriz para Prensagem de Compactação	56
2.2. Materiais Componentes da Sonda	58
2.3. Determinação da Pressão de Compactação, Massa Específica e Força de Compactação	60
2.4. Procedimento para Confeção das Sondas	62
2.4.1- Materiais	62
2.4.2- Etapas do processamento de prensagem	62
3. SONDAS ESFÉRICAS DE AÇÚCAR	64
4. CONSTRUÇÃO DO SUPORTE FLUTUADOR	65
5. TESTES PRELIMINARES	67
5.1. Testes de Laboratório	67
5.1.1- Materiais	67
5.1.2- Etapas do procedimento de dissolução das sondas	68
5.2. Testes de Campo	70
6. DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE AMOSTRAS	70
7. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA OS TESTES DE CAMPO	72
7.1. Método da Sonda Solúvel. Dissolução das Sondas Planas de Ácido Oxálico	73
7.1.1- Materiais	73
7.1.2- Etapas de coleta dos dados	73
7.2. Método dos Traçadores	74
8. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA OS TESTES DE LABORATÓRIO	74
8.1. Método da Sonda Solúvel. Dissolução das Sondas Planas de Ácido Oxálico	74
8.1.1- Materiais	74

8.1.2- Etapas de coleta dos dados	74
8.2. Método da Sonda Solúvel. Dissolução de Sondas Esféricas de Açúcar	75
8.2.1- Materiais	75
8.2.2- Etapas de coleta dos dados	75
8.3. Método Eletroquímico para Determinação de K_2	76

CAPÍTULO 4

RESULTADOS, ANÁLISES E DISCUSSÕES

1. RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE DISSOLUÇÃO DAS SONDAS PLANAS DE ÁCIDO OXÁLICO

1.1. Resultados dos Testes Experimentais Realizados em Campo

1.1.1- Procedimento para Determinação das Velocidades de Dissolução

1.1.2- Procedimento para Determinação dos Coeficientes de Reaeração

1.1.3- Correlação entre os Coeficientes de Transferência de Massa

1.2. Resultados dos Testes Experimentais Realizados em Laboratório

1.2.1- Procedimento para Determinação das Velocidades de Dissolução

1.2.2- Procedimento para Determinação dos Coeficientes de Reaeração

1.2.3- Correlação entre os Coeficientes de Transferência de Massa

1.2.4- Reaeração/Dissolução do Sólido Solúvel (K_L/V_s) Expressa como uma Função da Potência Dissipada

1.3. Combinação dos Resultados dos Testes de Campo e Laboratório

1.4. Combinação dos Dados dos Testes de Laboratório e Dados de Laboratório de SCHULZ (1989)

2. RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE DISSOLUÇÃO DAS SONDAS ESFÉRICAS DE AÇÚCAR

2.1. Desenvolvimento do Modelo Matemático para Determinação das Velocidades de Dissolução

2.2. Procedimento para Determinação dos Coeficientes de Transferência de Massa

2.3. Procedimento para Determinação dos Coeficientes de Reaeração

2.4. Correlação entre os Coeficientes de Transferência de Massa ...

CONCLUSÕES	103
ANEXOS	106
ANEXO I	107
MÉTODOS DE CONFECÇÃO DA SONDA SÓLIDA SOLÚVEL	108
ANEXO II	111
DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE AMOSTRAS	112
Método da Variância da Média	112
ANEXO III	116
DADOS DA PESQUISA DE CAMPO	117
Sondas de Ácido Oxálico	117
ANEXO IV	138
DADOS DA PESQUISA DE LABORATÓRIO	139
Sondas de Ácido Oxálico	139
ANEXO V	160
DADOS DA PESQUISA DE LABORATÓRIO	161
Sondas de Açúcar	161
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	171

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

a	constante obtida por análise de regressão	adimensional
A	área da interface gás-líquido	L^2
A_s	área superficial instantânea do sólido	L^2
A_0	área superficial inicial do sólido	L^2
α	constante	adimensional
b	constante obtida por análise de regressão	adimensional
β	constante	adimensional
c	constante obtida por análise de regressão	adimensional
C	concentração do gás	ML^{-3}
C_i	concentração do gás na interface	ML^{-3}
C_L	concentração do gás na fase líquida	ML^{-3}
C_s	concentração inicial de OD	ML^{-3}
C_0	concentração de saturação na interface	ML^{-3}
ΔC	variação da concentração	ML^{-3}
D	déficit da concentração de saturação de OD	ML^{-3}
D_a	déficit inicial da concentração de saturação de OD	ML^{-3}
D_e	difusividade efetiva	L^2T^{-1}
D_L	coeficiente de dispersão longitudinal	L^2T^{-1}
D_m	difusividade molecular	L^2T^{-1}
DBO	demanda bioquímica de oxigênio	ML^{-3}
δ	espessura do filme	L
ε_t	coeficiente de difusão turbulenta	L^2T^{-1}
ε_y	coeficiente de difusão turbulenta vertical	L^2T^{-1}
$\bar{\varepsilon}_y$	coeficiente médio de difusão turbulenta vertical	L^2T^{-1}
e	espessura da parede sólida	L
E	taxa de dispersão de energia	L^2T^{-3}
$f(H)$	função da profundidade	-
$f(s)$	função da renovação superficial	-
F	força de compactação	F

g	aceleração da gravidade	LT^2
γ	peso específico	$ML^{-2}T^{-2}$
h	coeficiente de película	$MT^3\theta^{-1}$
H	constante da lei de Henry	L^2T^2
H	altura ou profundidade média do líquido	L
H'	profundidade mínima do líquido para as condições experimentais de STREETER e PHELPS (1925)	L
η	função da velocidade do escoamento	-
J	fluxo de massa ou taxa de transferência gasosa por unidade de área	$ML^{-2}T^{-1}$
φ	média relativa ao aumento de velocidade do escoamento	LT^{-1}
k	constante de proporcionalidade	-
K	constante de von Karman	adimensional
K_o	coeficiente de dissolução	$L^{1/3}T^{-1}$
K_c	coeficiente global de transferência de massa do sólido cilíndrico	LT^{-1}
k_G	coeficiente de transferência de massa na fase gasosa	$L^{-1}T$
K_G	coeficiente global de transferência de massa na fase gasosa	$L^{-1}T$
k_L	coeficiente de transferência de massa na fase líquida	LT^{-1}
K_L	coeficiente global de transferência de massa na fase líquida	LT^{-1}
K_S	taxa de dissolução	T^{-1}
K_T	coeficiente de dessorção do traçador gasoso	T^{-1}
K_1	coeficiente de desoxigenação	T^{-1}
K_2	coeficiente de reaeração	T^{-1}
$K_{2(20)}$	coeficiente de realçarão à temperatura de 20°C	T^{-1}
L_a	demanda bioquímica de oxigênio no primeiro estágio (fase carbonácea)	ML^{-3}
L_o	comprimento característico do sólido	L
L_d	demanda bioquímica de oxigênio	ML^{-3}
L_f	espessura do filme	L
m	massa	M
m_o	massa inicial	M
n	expoente	adimensional

N	velocidade de rotação	T^{-1}
ν	viscosidade cinemática	L^2T^{-1}
OD	oxigênio dissolvido	ML^{-3}
p	pressão	FL^{-2}
p_i	pressão parcial do gás na interface	FL^{-2}
p_G	pressão parcial do gás na fase gasosa	FL^{-2}
p_L	pressão parcial do gás, correspondente ao equilíbrio com a concentração do gás	FL^{-2}
p_s	pressão parcial do gás, correspondente à concentração de saturação na interface	FL^{-2}
θ	coeficiente de temperatura	adimensional
R	raio	L
R	constante dos gases ideais	$ML^2T^{-2}\theta^{-1}$
Re	número de Reynolds	adimensional
R_T	fator de conversão	adimensional
R_0	raio inicial	L
ρ	massa específica	ML^{-3}
s	taxa de renovação superficial	T^{-1}
S	declividade longitudinal da linha d'água	adimensional
t	tempo	T
t_0	tempo médio	T
T	temperatura	θ
τ	pressão de compactação	FL^{-2}
u	energia dissipada	ML^2T^{-3}
u_*	velocidade de cisalhamento ou velocidade de fricção	LT^{-1}
U	velocidade do escoamento	LT^{-1}
g	constante de proporcionalidade	adimensional
V	volume	L^3
V_s	velocidade de dissolução do sólido	LT^{-1}
W	peso instantâneo do sólido	F
W_0	peso inicial do sólido	F
Z	fator de irregularidade, relacionado à declividade do canal	adimensional

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1	a) Diagnóstico Ambiental síntese das atividades de levantamento e classificação do solo e análise das condições atuais de uso e ocupação. (Fonte: PIRES e SANTOS, 1995). b) Prognóstico Ambiental: análise das condições futuras frente às tendências atuais de uso e ocupação do solo e evolução do uso dos recursos naturais. (Fonte: PIRES e SANTOS, 1995)	5
FIGURA 1.2	Zoneamento Ambiental: divisão do território estudado, em forma de lei, conforme sua capacidade de absorver as diversas atividades humanas. (Fonte: PIRES e SANTOS, 1995)	7
FIGURA 1.3	Diagrama esquemático da Teoria dos Dois Filmes (Fonte: LEWIS e WHITMAN, 1924)	10
FIGURA 1.4	Diagrama esquemático da renovação superficial próxima ao filme laminar	13
FIGURA 2.1	Análise gráfica de um ensaio de GIANANTI. (Fonte: SCHULZ, 1985)	28
FIGURA 2.2	Modelos de dissolução. (Fonte: SCHULZ, 1985)	30
FIGURA 2.3	Representação gráfica da variação de massa em função do tempo para os dados experimentais de RODRIGUES (1996)	31
FIGURA 2.4	Representação gráfica da variação de massa em função do tempo para os dados experimentais de SCHULZ (1995)	31
FIGURA 2.5	Ajuste do modelo da equação (2.1) aos de dados experimentais de RODRIGUES (1996)	33
FIGURA 2.6	Ajuste do modelo da equação (2.7) aos de dados experimentais de RODRIGUES (1996)	34
FIGURA 2.7	Ajuste do modelo da equação (2.10) aos dados experimentais de RODRIGUES (1996)	34
FIGURA 2.8	Gráfico da distribuição de erros do modelo da equação (2.1)	35
FIGURA 2.9	Gráfico da distribuição de erros do modelo da equação (2.7)	35

FIGURA 2.10	Gráfico da distribuição de erros do modelo da equação (2.10)	36
FIGURA 2.11	Dissolução unidimensional. (Fonte: SCHULZ, 1985)	37
FIGURA 2.12	Gráfico característico de um teste com sondas cilíndricas de açúcar para diferentes vazões. (Fonte: GIORGETTI e GIANANTI, 1983)	39
FIGURA 2.13	Gráfico característico de um teste com sondas de monocristais de cloreto de sódio. (Fonte: SCHULZ, 1985)	40
FIGURA 2.14	Gráfico característico de um teste com sondas cilíndricas de ácido benzóico com dissolução unidimensional. (Fonte: BICUDO, 1988)	41
FIGURA 2.15	Gráfico característico de um teste com sondas cilíndricas de ácido oxálico com dissolução unidimensional	42
FIGURA 2.16	Gráfico característico de um teste com sondas esféricas de ácido benzóico. (Fonte: RODRIGUES, 1996)	43
FIGURA 2.17	Gráfico de correlação entre K_s e K_2 , característico dos testes com balas de açúcar. (Fonte: GIANANTI, 1986) ..	44
FIGURA 2.18	Gráfico de correlação entre V_s e K_2 , característico dos testes com sondas de ácido benzóico. (Fonte: BICUDO; 1988)	45
FIGURA 2.19	Gráfico de correlação entre V_s e K_L , característico dos testes com sondas de ácido benzóico. (Fonte: BICUDO; 1988)	46
FIGURA 2.20	Gráfico de correlação entre V_s e K_L , característico dos testes com sondas de ácido oxálico. (Fonte: SCHULZ, 1989)	47
FIGURA 2.21	Posição do cristal junto à superfície d'água. (Fonte: SCHULZ, 1985)	50
FIGURA 2.22	Sondas cilíndricas circulares impermeabilizadas com resina. (Fonte: SCHULZ, 1989)	51
FIGURA 2.23	Molde para confecção das sondas esféricas. (Fonte: RODRIGUES, 1996)	51
FIGURA 2.24	Flutuador de isopor esférico. (Fonte: GIORGETTI e GIANANTI, 1983)	52
FIGURA 2.25	Estrutura suporte flutuante (Fonte: SCHULZ, 1989)	52
FIGURA 2.26	Flutuador de poliestireno (Fonte: BICUDO, 1988)	53

FIGURA 2.27	Estrutura suporte flutuante (Fonte: RODRIGUES, 1996) ..	53
FIGURA 3.1	Prensa hidráulica manual e matriz para prensagem de compactação	56
FIGURA 3.2	Corte lateral da matriz para prensagem de compactação, contendo em seu interior: ácido oxálico e cápsula de alumínio	57
FIGURA 3.3	Detalhe em corte da sonda plana de ácido oxálico, impermeabilizada com cápsula de alumínio	57
FIGURA 3.4	Material excedente compactado	59
FIGURA 3.5	Vista superior das sondas solúveis de diâmetros diferentes: pequena, média e grande	60
FIGURA 3.6	Corte lateral da matriz de prensagem e sacador de madeira	63
FIGURA 3.7	Esfera de açúcar obtida comercialmente	64
FIGURA 3.8	Suporte flutuador das sondas solúveis	65
FIGURA 3.9	Haste central do suporte flutuador dotado de ímã para fixação da sonda solúvel	65
FIGURA 3.10	Peças componentes do suporte flutuador	66
FIGURA 3.11	Tanque de agitação hidrodinâmica com impulsor rotativo. (Fonte: SCHULZ, 1989)	67
FIGURA 3.12	Gráfico de m/m_0 em função do tempo	68
FIGURA 3.13	Sonda esférica de açúcar	69
FIGURA 3.14	Determinação do número de amostras	71
FIGURA 4.1	Variação da massa em função do tempo, para as sondas de tamanho pequeno. Experimento realizado no Rio Laranja-Azeda (S. Carlos/SP) com temperatura da água de 20°C	80
FIGURA 4.2	Correlação entre as velocidades de dissolução e os coeficientes de transferência global de oxigênio dos experimentos de campo	83
FIGURA 4.3	Correlação entre as velocidades de dissolução das sondas planas de ácido oxálico e os coeficientes de transferência global de oxigênio dos experimentos de laboratório	86

FIGURA 4.4	Distribuição logarítmica da relação reaeração/dissolução em função da potência dissipada para dados experimentais de laboratório	88
FIGURA 4.5	Correlação entre os coeficientes de transferência de massa V_s e K_L dos experimentos de laboratório e campo para as sondas planas de ácido oxálico	90
FIGURA 4.6	Combinação dos dados de laboratório com os dados de SCHULZ (1989), para as sondas planas de ácido oxálico	91
FIGURA 4.7	Situações de dissolução da sonda sólida solúvel. (Fonte: SCHULZ, 1989).....	92
FIGURA 4.8	Dados de dissolução das sondas planas de ácido oxálico de diferentes tamanhos	92
FIGURA 4.9	Gráfico da massa em função do tempo das sondas esféricas de açúcar, para velocidade de rotação de 206 rpm	95
FIGURA 4.10	Sonda esférica em processo de dissolução	96
FIGURA 4.11	n versus velocidade de rotação e coeficiente de transferência de massa versus velocidade de rotação ...	93
FIGURA 4.12	$ShSc^{-1/3}$ versus Re	100
FIGURA 4.13	$ShSc^{-1/3}$ versus Re para diferentes diâmetros	101
FIGURA 4.14	d/D versus Re	102
FIGURA 4.15	Correlação entre os coeficientes de transferência de massa da sonda esférica de açúcar e os coeficientes de reaeração	102
FIGURA AII.1	Determinação número de amostras para sondas do tamanho médio	113
FIGURA AII.2	Determinação número de amostras para sondas do tamanho pequeno	114
FIGURA AII.3	Determinação número de amostras para sondas do tamanho grande	115
FIGURA AIII.1	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho pequeno, dissolvidas no Ribeirão de Caldas	117
FIGURA AIII.2	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho médio, dissolvidas no Ribeirão de Caldas	118

FIGURA AIII.3	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho grande, dissolvidas no Ribeirão de Caldas	120
FIGURA AIII.4	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho pequeno, dissolvidas no Rio Jacaré-Guaçú	121
FIGURA AIII.5	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho médio, dissolvidas no Rio Jacaré-Guaçú	122
FIGURA AIII.6	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho grande, dissolvidas no Rio Jacaré-Guaçú	123
FIGURA AIII.7	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho pequeno, dissolvidas no Rio Laranja-Azeda	124
FIGURA AIII.8	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho médio, dissolvidas no Rio Laranja-Azeda	125
FIGURA AIII.9	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho grande, dissolvidas no Rio Laranja-Azeda	127
FIGURA AIII.10	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho pequeno, dissolvidas no Ribeirão de Caldas	128
FIGURA AIII.11	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho médio, dissolvidas no Ribeirão de Caldas	129
FIGURA AIII.12	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho grande, dissolvidas no Ribeirão de Caldas	130
FIGURA AIII.13	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho pequeno, dissolvidas no Ribeirão do Feijão	132
FIGURA AIII.14	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho médio, dissolvidas no Ribeirão do Feijão.....	133

FIGURA AIII.15	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho grande, dissolvidas no Ribeirão do Feijão	134
FIGURA AIII.16	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho pequeno, dissolvidas no Ribeirão de Caldas	135
FIGURA AIII.17	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho médio, dissolvidas no Ribeirão de Caldas	136
FIGURA AIV.1	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho pequeno, para velocidade de rotação de 62 rpm	139
FIGURA AIV.2	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho médio, para velocidade de rotação de 62 rpm	140
FIGURA AIV.3	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho grande, para velocidade de rotação de 62 rpm	141
FIGURA AIV.4	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho pequeno, para velocidade de rotação de 255 rpm	143
FIGURA AIV.5	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho médio, para velocidade de rotação de 255 rpm	144
FIGURA AIV.6	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho grande, para velocidade de rotação de 255 rpm	145
FIGURA AIV.7	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho pequeno, para velocidade de rotação de 110 rpm	146
FIGURA AIV.8	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho médio, para velocidade de rotação de 110 rpm	147
FIGURA AIV.9	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho grande, para velocidade de rotação de 110 rpm	148

FIGURA AIV.10	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho pequeno, para velocidade de rotação de 68 rpm	149
FIGURA AIV.11	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho médio, para velocidade de rotação de 68 rpm	150
FIGURA AIV.12	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho grande, para velocidade de rotação de 68 rpm	151
FIGURA AIV.13	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho pequeno, para velocidade de rotação de 158 rpm	153
FIGURA AIV.14	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho médio, para velocidade de rotação de 158 rpm	154
FIGURA AIV.15	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho grande para velocidade de rotação de 158 rpm	155
FIGURA AIV.16	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho pequeno, para velocidade de rotação de 206 rpm	156
FIGURA AIV.17	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho médio, para velocidade de rotação de 206 rpm	157
FIGURA AIV.18	Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho grande, para velocidade de rotação de 206 rpm	159

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	Dados experimentais de GIANANTI e PAIVA. (Fonte: SCHULZ, 1985)	28
TABELA 2.2	Dados experimentais de RODRIGUES (1996)	33
TABELA 2.3	Dados experimentais de SCHULZ (1985)	40
TABELA 2.4	Dados experimentais de SCHULZ (1989)	42
TABELA 2.5	Dados experimentais de RODRIGUES (1996)	43
TABELA 2.6	Dados experimentais de GIANANTI (1986)	44
TABELA 2.7	Dados experimentais de BICUDO (1986)	45
TABELA 3.1	Dimensões das matrizes para prensagem de compactação	58
TABELA 3.2	Dimensões das sondas solúveis	60
TABELA 3.3	Dados de carga e tensão de compactação	61
TABELA 3.4	Força e massa de compactação das sondas pequena, média e grande	62
TABELA 3.5	Dimensões do suporte flutuador	67
TABELA 3.6	Dados experimentais da dissolução de uma sonda cilíndrica de ácido oxálico	68
TABELA 4.1	Dados experimentais do processo de dissolução das sondas de tamanho pequeno, realizado no Rio Laranja-Azeda (São Carlos/SP) com temperatura da água de 20°C	79
TABELA 4.2	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo para as sondas de tamanho pequeno. Experimento realizado no Rio Laranja-Azeda (S. Carlos/SP) com temperatura da água a 20°C.	80
TABELA 4.3	Valores das velocidades de dissolução das sondas planas de ácido oxálico dos experimentos de campo	81
TABELA 4.4	Parâmetros característicos dos testes experimentais realizados em campo	82
TABELA 4.5	Valores das velocidades de dissolução das sondas planas de ácido oxálico dos experimentos de laboratório	84

TABELA 4.6	Resultados dos testes de dissolução das sondas planas de ácido oxálico realizados em laboratório	85
TABELA 4.7	Dados da relação reeração/dissolução de sólidos expressa como uma função da potência dissipada (testes experimentais realizados em laboratório com sondas planas de ácido oxálico)	89
TABELA 4.8	Dados experimentais de SCHULZ (1989, p.528)	91
TABELA 4.9	Dados iniciais característicos das sondas esféricas de açúcar, antes da dissolução (5º Teste - 22/04/97)	93
TABELA 4.10	Dados finais característicos das sondas esféricas de açúcar, após a dissolução em velocidade de rotação de 206 rpm	94
TABELA 4.11	Valores de n estimados através do modelo ajustado aos dados experimentais de dissolução das sondas esféricas	98
TABELA AI.1	Propriedades físicas de compostos orgânicos e inorgânicos. (Fonte: PERRY e CHILTON, 1980)	109
TABELA AII.1	Valores das variâncias da média e números de observações para sondas de tamanho médio	113
TABELA AII.2	Valores das variâncias da média e números de observações para sondas de tamanho pequeno	114
TABELA AII.3	Valores das variâncias da média e números de observações para sondas de tamanho grande	115
TABELA AIII.1	Dados experimentais das sondas de tamanho pequeno	117
TABELA AIII.2	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho pequeno	118
TABELA AIII.3	Dados experimentais das sondas de tamanho médio	118
TABELA AIII.4	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho médio	119
TABELA AIII.5	Dados experimentais das sondas de tamanho grande ..	119
TABELA AIII.6	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho grande	120
TABELA AIII.7	Dados experimentais das sondas de tamanho pequeno	121
TABELA AIII.8	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho pequeno	121
TABELA AIII.9	Dados experimentais das sondas de tamanho médio.	122

TABELA AIII.10	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho médio	122
TABELA AIII.11	Dados experimentais das sondas de tamanho grande ..	123
TABELA AIII.12	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho grande	123
TABELA AIII.13	Dados experimentais das sondas de tamanho pequeno	124
TABELA AIII.14	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho pequeno	125
TABELA AIII.15	Dados experimentais das sondas de tamanho médio	125
TABELA AIII.16	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho médio	126
TABELA AIII.17	Dados experimentais das sondas de tamanho grande ..	126
TABELA AIII.18	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho grande	127
TABELA AIII.19	Dados experimentais das sondas de tamanho pequeno	128
TABELA AIII.20	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho pequeno	128
TABELA AIII.21	Dados experimentais das sondas de tamanho médio	129
TABELA AIII.22	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho médio	129
TABELA AIII.23	Dados experimentais das sondas de tamanho grande ..	130
TABELA AIII.24	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho grande	131
TABELA AIII.25	Dados experimentais das sondas de tamanho pequeno	131
TABELA AIII.26	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho pequeno	132
TABELA AIII.27	Dados experimentais das sondas de tamanho médio	132
TABELA AIII.28	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho médio	133
TABELA AIII.29	Dados experimentais das sondas de tamanho grande ..	134
TABELA AIII.30	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho grande	134
TABELA AIII.31	Dados experimentais das sondas de tamanho pequeno	135

TABELA AIII.32	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho pequeno	136
TABELA AIII.33	Dados experimentais das sondas de tamanho médio	136
TABELA AIII.34	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho médio	137
TABELA AIII.35	Dados experimentais das sondas de tamanho grande ..	137
TABELA AIV.1	Dados experimentais das sondas de tamanho pequeno	139
TABELA AIV.2	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho pequeno	140
TABELA AIV.3	Dados experimentais das sondas de tamanho médio	140
TABELA AIV.4	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho médio	141
TABELA AIV.5	Dados experimentais das sondas de tamanho grande.	141
TABELA AIV.6	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho grande	142
TABELA AIV.7	Dados experimentais das sondas de tamanho pequeno	142
TABELA AIV.8	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho pequeno	143
TABELA AIV.9	Dados experimentais das sondas de tamanho médio	143
TABELA AIV.10	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho médio	144
TABELA AIV.11	Dados experimentais das sondas de tamanho grande ..	144
TABELA AIV.12	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho grande	145
TABELA AIV.13	Dados experimentais das sondas de tamanho pequeno	146
TABELA AIV.14	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho pequeno	146
TABELA AIV.15	Dados experimentais das sondas de tamanho médio	147
TABELA AIV.16	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho médio	147
TABELA AIV.17	Dados experimentais das sondas de tamanho grande ..	148
TABELA AIV.18	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho grande	148
TABELA AIV.19	Dados experimentais das sondas de tamanho pequeno	149

TABELA AIV.20	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho pequeno	150
TABELA AIV.21	Dados experimentais das sondas de tamanho médio	150
TABELA AIV.22	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho médio	151
TABELA AIV.23	Dados experimentais das sondas de tamanho grande ..	151
TABELA AIV.24	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho grande	152
TABELA AIV.25	Dados experimentais das sondas de tamanho pequeno	152
TABELA AIV.26	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho pequeno	153
TABELA AIV.27	Dados experimentais das sondas de tamanho médio	153
TABELA AIV.28	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho médio	154
TABELA AIV.29	Dados experimentais das sondas de tamanho grande ..	155
TABELA AIV.30	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho grande	155
TABELA AIV.31	Dados experimentais das sondas de tamanho pequeno	156
TABELA AIV.32	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho pequeno	157
TABELA AIV.33	Dados experimentais das sondas de tamanho médio	157
TABELA AIV.34	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho médio	158
TABELA AIV.35	Dados experimentais das sondas de tamanho grande ..	158
TABELA AIV.36	Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho grande	159
TABELA AV.1	Dados iniciais característicos das sondas esféricas de açúcar para velocidade de rotação de 255 rpm	161
TABELA AV.2	Dados finais, após a dissolução das sondas esféricas de açúcar para velocidade de rotação de 255 rpm	162
TABELA AV.3	Massa média das sondas esféricas de açúcar para velocidade de rotação de 255 rpm	162
TABELA AV.4	Dados iniciais característicos das sondas esféricas de açúcar para a velocidade de rotação de 110 rpm	163

TABELA AV.5	Dados finais após a dissolução das sondas esféricas de açúcar para velocidade de rotação de 110 rpm	164
TABELA AV.6	Massa média das sondas esféricas de açúcar para velocidade de rotação de 110 rpm	164
TABELA AV.7	Dados iniciais característicos das sondas esféricas de açúcar para 158 rpm	165
TABELA AV.8	Dados finais após a dissolução das sondas esféricas de açúcar para velocidade de rotação de 158 rpm	166
TABELA AV.9	Massa média das sondas esféricas de açúcar para velocidade de rotação de 158 rpm	166
TABELA AV.10	Dados iniciais característicos das sondas esféricas de açúcar para velocidade de rotação de 62 rpm	167
TABELA AV.11	Dados finais após a dissolução das sondas esféricas de açúcar para velocidade de rotação de 62 rpm	168
TABELA AV.12	Massa média das sondas esféricas de açúcar para velocidade de rotação de 62 rpm	168
TABELA AV.13	Dados iniciais característicos das sondas esféricas de açúcar para velocidade de 206 rpm	169
TABELA AV.14	Dados finais após a dissolução das sondas esféricas de açúcar para velocidade de 206 rpm	170
TABELA AV.15	Massa média das sondas esféricas de açúcar para velocidade de rotação de 206 rpm	170

RESUMO

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

Entre os métodos de determinação do coeficiente de reaeração (K_2), destaca-se a técnica concebida por GIORGETTI e GIANANTI (1983), denominada *Método da Sonda Solúvel*.

O Método da Sonda Solúvel está fundamentado em uma metodologia simples e econômica quando comparado com as demais técnicas. O método consiste na estimativa indireta do coeficiente de reaeração através do processo de dissolução de uma sonda sólida solúvel flutuando à deriva em um escoamento d'água natural.

Este estudo foi dividido em duas etapas. A primeira etapa compreendeu ao aperfeiçoamento da confecção de sondas planas de ácido oxálico. Foram construídas sondas de três tamanhos distintos e foi avaliada a sua dissolução unidimensional em testes de laboratório e campo. A segunda etapa teve como objetivo o desenvolvimento de um modelo matemático aplicado ao processo de dissolução de sondas esféricas de açúcar, a partir de dados experimentais obtidos em laboratório.

Na primeira etapa foram realizados experimentos de laboratório e de campo para determinação do coeficiente de reaeração superficial da água e da velocidade de dissolução das sondas planas de ácido oxálico. Os testes de laboratório foram desenvolvidos em um tanque de agitação mecânica; e os experimentos de campo foram realizados no *Ribeirão de Caldas* (Poços de Caldas - MG), *Ribeirão do Feijão* (São Carlos - SP), *Rio Jacaré-Guaçú* (Ribeirão Bonito - SP) e *Rio Laranja-Azeda* (São Carlos - SP).

A correlação dos valores de K_2 e V_s mostrou ser possível obter uma avaliação de K_2 conhecendo-se V_s . Verificou-se, também, que as curvas geradas em gráfico logarítmico de K_L contra V_s são iguais quanto à forma para os resultados dos ensaios de campo e de laboratório, e diferem pela translação. Estas conclusões corroboraram com as previsões de SCHULZ (1989).

Na segunda etapa desta pesquisa, um modelo matemático representativo do fenômeno de transferência de massa foi proposto. Testes de dissolução de sondas esféricas de açúcar foram realizados em tanque de agitação mecânica para determinação da velocidade de dissolução. As velocidades de dissolução foram obtidas através do modelo matemático desenvolvido a partir dos dados de dissolução.

Palavras chave: reaeração, dissolução, ácido oxálico, turbulência, mistura.

ABSTRACT

COSTA, O. S. *Contribution to the methodology for the indirect estimation of the reaeration coefficient in natural flowing waters using the soluble solid probe. I.* São Carlos. 1999 Tese (Doutorado) - SHS - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

An alternate method for the estimation of the reaeration coefficient (K_2) was conceived by GIORGETTI and GIANANTI (1983), the so called Floating Soluble Solid Probe Method - FSSPM.

The FSSPM is based on a simple and economical methodology when compared with other techniques. The method consists in the indirect estimation of the reaeration coefficient through the dissolution of a soluble probe freely floating on the flowing water.

This study was divided into two steps. The first step included the improvement of the flat probe manufacturing method using oxalic acid. Probes of three different sizes were built and evaluated under one-dimensional dissolution laboratory and field tests. The second step had the objective to develop a mathematical model applied to the dissolution process of sugar spherical probes from laboratory experimental data.

In the first step lab and field experiments were made in order to estimate the reaeration coefficient (K_2) and of the dissolution velocity (V_s) of flat oxalic acid probes. The laboratory tests were made in a mechanically agitated tank. The field experiments took place in the Caldas River (Poços de Caldas - MG), Jacaré-Guaçú River (Ribeirão Bonito - SP), Feijão River (São Carlos - SP) and Laranja Azeda River (São Carlos - SP).

The correlation between the values of K_2 and V_s showed it is possible to estimate K_2 knowing V_s . It was also verified that log-curves for the correlation between the values of K_2 and V_s are similarly shaped for laboratory and field tests, differing only by a simple translation. These results corroborate SCHULZ (1989) predictions.

In the second part of this research, a new mathematical model to describe the mass transfer process was proposed. Dissolution tests of spherical sugar probes were made in a mechanically agitated tank to estimate the dissolution velocity using the model thus developed.

Key Words: reaeration, dissolution, oxalic acid, turbulence, mixture.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das civilizações ocorreu, dentre outros fatores, em função da disponibilidade de água. O hábito sedentário do homem o conduziu à evolução de novas habilidades tecnológicas necessárias ao uso do fogo, edificação de casas, manejo do solo, criação de animais, produção de tecidos e vestuários, ferramentas de trabalho, armas para defesa de suas aldeias, etc. As comunidades agrícolas evoluíram dando origem às cidades (SAGAN e colaboradores, 1990). O homem utilizou-se da água como recurso indispensável à agricultura e pecuária, pesca, abastecimento, navegação, diluição de esgotos, recreação, lazer e posteriormente, na Revolução Industrial, à geração de energia elétrica e uso industrial.

De acordo com BRANCO (1983), a poluição generalizada dos rios iniciou-se a partir da introdução dos sistemas de esgotos das cidades. Estes sistemas, de elevado padrão tecnológico para época, eram utilizados para afastamento de dejetos; e datam, pelo menos, desde o século VI antes de Cristo durante o Império Romano. Após esse período, na Idade Média, a humanidade mergulhou em dez séculos de pouco desenvolvimento cultural sob vários aspectos, inclusive os sanitários.

O acúmulo de detritos nos fossos dos castelos feudais, ruas e periferia das cidades criou sérios problemas de saúde pública, propiciando a proliferação de ratos e como grave consequência, o surgimento da peste bubônica (1343 - 1350) que dizimou parte da população da Europa, cerca de 25 milhões de morte aproximadamente, (BRANCO, 1978).

A Revolução Industrial induziu o intenso crescimento das populações. Com o aumento dos resíduos gerados, foi necessária a adoção de medidas saneadoras, como os sistemas de esgotos sanitários e industriais. O destino final dos resíduos eram os rios, que logo tornaram-se poluídos.

A poluição hídrica está diretamente relacionada à capacidade natural do corpo receptor em se autodepurar. A capacidade natural do curso d'água em eliminar impurezas é conhecida como autodepuração, que associa os fenômenos e processos de decantação, decomposições aeróbia e anaeróbia, reaeração, reoxigenação por fotossíntese e depuração biológica. Esses fenômenos e processos foram descritos de forma bastante clara e sucinta em BRANCO (1983).

Em resumo, o corpo d'água em seu processo de autodepuração realiza, principalmente, a oxidação dos compostos biodegradáveis através da atividade respiratória dos microrganismos que se alimentam dessa matéria orgânica, consumindo o oxigênio dissolvido na água.

A diminuição da concentração do oxigênio dissolvido na água pode colocar em risco a existência da vida aquática de seres superiores, como por exemplo os peixes e, por conseguinte, estabelecem-se condições inadequadas ao homem. Por esta razão, a quantidade de oxigênio dissolvido na água constitui um importante fator no controle de qualidade das águas dos rios.

A reposição do oxigênio nos escoamentos de água naturais ocorre, principalmente, através da absorção física do oxigênio contido na atmosfera em função da movimentação turbulenta na superfície livre do escoamento. Este fenômeno é conhecido como *reaeração* ou *reoxigenação*.

O parâmetro que quantifica a velocidade com que o oxigênio atmosférico se dissolve na água é denominado de *coeficiente de reaeração* ou *coeficiente de reoxigenação* (K_2), ou seja, é a taxa para absorção física do oxigênio da atmosfera pela água.

A utilidade dos coeficientes de reaeração (K_2) reside na quantificação do processo de reaeração, parâmetro de entrada nos modelos de simulação de qualidade de água para oxigênio dissolvido (KILPATRICK, RATHBUN, YOTSUKURA e colaboradores, 1989). A partir dele pode-se quantificar, por exemplo, a quantidade de material a ser lançado no rio.

Os modelos matemáticos são empregados para avaliar a capacidade de autodepuração natural dos rios. Este conhecimento permite a harmonização de

usos aparentemente conflitantes, como por exemplo, abastecimento de água (captação) e recepção de efluentes (emissão), como relata DERISIO (1992).

Entre os métodos de determinação de K_2 , GIORGETTI e GIANANTI (1983) conceberam uma técnica muito promissora, posteriormente aperfeiçoada por SCHULZ (1985), GIANANTI (1986) e SCHULZ (1989), denominada **Método da Sonda Solúvel**.

O Método da Sonda Solúvel está fundamentado em uma metodologia mais simples e econômica quando comparado com as demais técnicas. O método consiste na estimativa indireta do coeficiente de reaeração através do processo de dissolução de uma sonda sólida solúvel flutuando em água.

A determinação de K_2 a partir da dissolução de um sólido solúvel flutuando junto à superfície livre do escoamento, baseia-se no princípio de que ambos os processos de reaeração e dissolução do sólido são funções diretas da movimentação turbulenta sofrida pela água em escoamento. Deste modo, especula-se a existência de uma relação entre as *velocidades de reação* dos dois processos, sendo que o segundo processo pode ser empregado para determinação indireta do coeficiente de reaeração, GIORGETTI e SCHULZ (1990).

Os dados obtidos por BICUDO e JAMES (1989) confirmaram as descobertas dos trabalhos citados acima, mostrando a existência de uma correlação entre os processos de reaeração e dissolução do sólido; também demonstraram a importância do entendimento das limitações dessa técnica.

Fatores limitantes dos processos de absorção de oxigênio e dissolução do sólido devem estar relacionados com as condições geométricas e hidrodinâmicas do sistema. Este assunto foi objeto de investigação do presente trabalho.

Esta pesquisa foi dividida em duas etapas. A primeira etapa compreendeu ao aperfeiçoamento da técnica de confecção das sondas planas de ácido oxálico com desgaste unidimensional, em três tamanhos distintos. Nessa fase foram realizados testes experimentais de campo e laboratório.

A segunda etapa teve como objetivo o desenvolvimento de um modelo matemático aplicado ao processo de dissolução de sondas esféricas de açúcar a partir de dados experimentais.

CAPÍTULO 1

REAERAÇÃO EM CURSOS D'ÁGUA NATURAIS

Os dejetos domiciliares e industriais, oriundos das atividades antrópicas, são lançados na água dos rios para serem diluídos. Esses dejetos são compostos em sua maior parte de matéria orgânica, que sofre um processo natural de biodegradação promovida pela ação bacteriana aquática, ocasionando um decréscimo na concentração de oxigênio dissolvido (OD) da água.

A reposição de OD consumido em um curso d'água natural¹ ocorre, principalmente, pela absorção física do oxigênio da atmosfera através da movimentação turbulenta sofrida pela água em escoamento. Este fenômeno natural é conhecido como *reoxigenação* ou *reaeração*.

A capacidade de reaeração está diretamente relacionada com o nível de turbulência na superfície da água, e é quantificada pelo parâmetro conhecido como *coeficiente de reoxigenação* ou *coeficiente de reaeração* (K_2).

De acordo com KILPATRICK e colaboradores (1989), a principal utilidade de K_2 é quantificar o processo de reaeração em modelos de qualidade da água para oxigênio dissolvido. Estes modelos permitem determinar a quantidade de

¹Define-se como curso d'água natural: todo corpo de água corrente, no qual são ou podem ser lançados, direta ou indiretamente, quaisquer tipos de efluentes, provenientes de atividades poluidoras ou potencialmente poluidoras (FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE - FEEMA; 1992, p.63), e é representado por regato, ribeirão ou rio (FERREIRA; 1986, p.512).

esgoto a ser lançado no curso d'água (BENNETT e RATHBUN, 1972), sem que as concentrações de OD estejam em desacordo com os padrões ambientais.

Os modelos matemáticos, mencionados acima, representam o funcionamento dos sistemas aquáticos e são empregados para diagnosticar e prognosticar a qualidade ambiental da área da bacia hidrográfica, como ilustrado na Figura 1.1. Esses modelos compõem os Modelos de Simulação, que integram um dos tipos de Métodos de Avaliação de Impacto Ambiental (AIA), MOREIRA (1992).

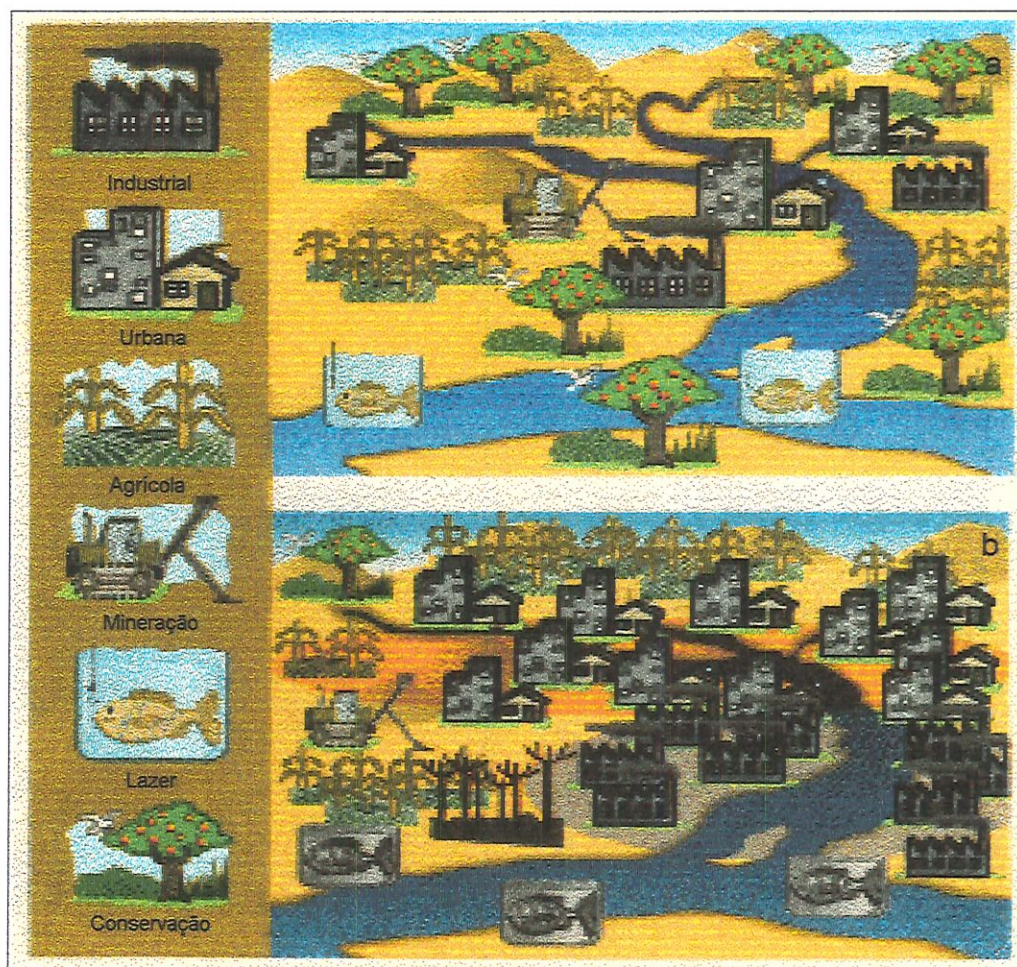


FIGURA 1.1 - a) Diagnóstico Ambiental: síntese das atividades de levantamento e classificação do solo e análise das condições atuais de uso e ocupação. (Fonte: PIRES e SANTOS, 1995).

b) Prognóstico Ambiental: análise das condições futuras frente às tendências atuais de uso e ocupação do solo e evolução do uso dos recursos naturais. (Fonte: PIRES e SANTOS, 1995).

Um exemplo do modelo de qualidade da água é o programa simulador QUAL2E, que emprega K_2 como um dos parâmetros de entrada. Este modelo é utilizado para estudar o impacto de cargas poluidoras em um escoamento, conforme mencionado em BROWN e BARNWELL (1987).

Em 1996 SIQUEIRA empregou o modelo QUAL2E na modelação de oxigênio dissolvido no Rio Meia Ponte, um dos principais recursos hídricos do Estado de Goiás.

Com o intuito de oferecer uma ferramenta técnica para os estudos de impacto ambiental. A modelação foi aplicada em um trecho de 19 km do rio, na região do Município de Inhumas no Estado de Goiás, para um período de baixas vazões. Foram determinados os coeficientes do modelo relativos a reaeração atmosférica e demanda bioquímica de oxigênio. O desenvolvimento metodológico permitiu que o Rio Meia Ponte e os seus nove afluentes do trecho estudado fossem caracterizados sob o ponto de vista hidrológico, hidráulico e sanitário. Além da aplicação do modelo, os estudos permitiram fazer uma caracterização geral da bacia, sugestões de manejo e de continuidade de pesquisas.

SIQUEIRA (1996)

Segundo PIRES e SANTOS (1995), após as etapas de Diagnóstico e Prognóstico Ambientais, segue a última etapa, que consiste na integração das análises ambientais, políticas e econômicas do plano de gerenciamento da bacia hidrográfica, Figura 1.2. Esse plano deverá gerar uma proposta de divisão da área da bacia hidrográfica estudada, de acordo com suas potencialidades ambientais para sustentar os impactos (Zoneamento Ambiental).

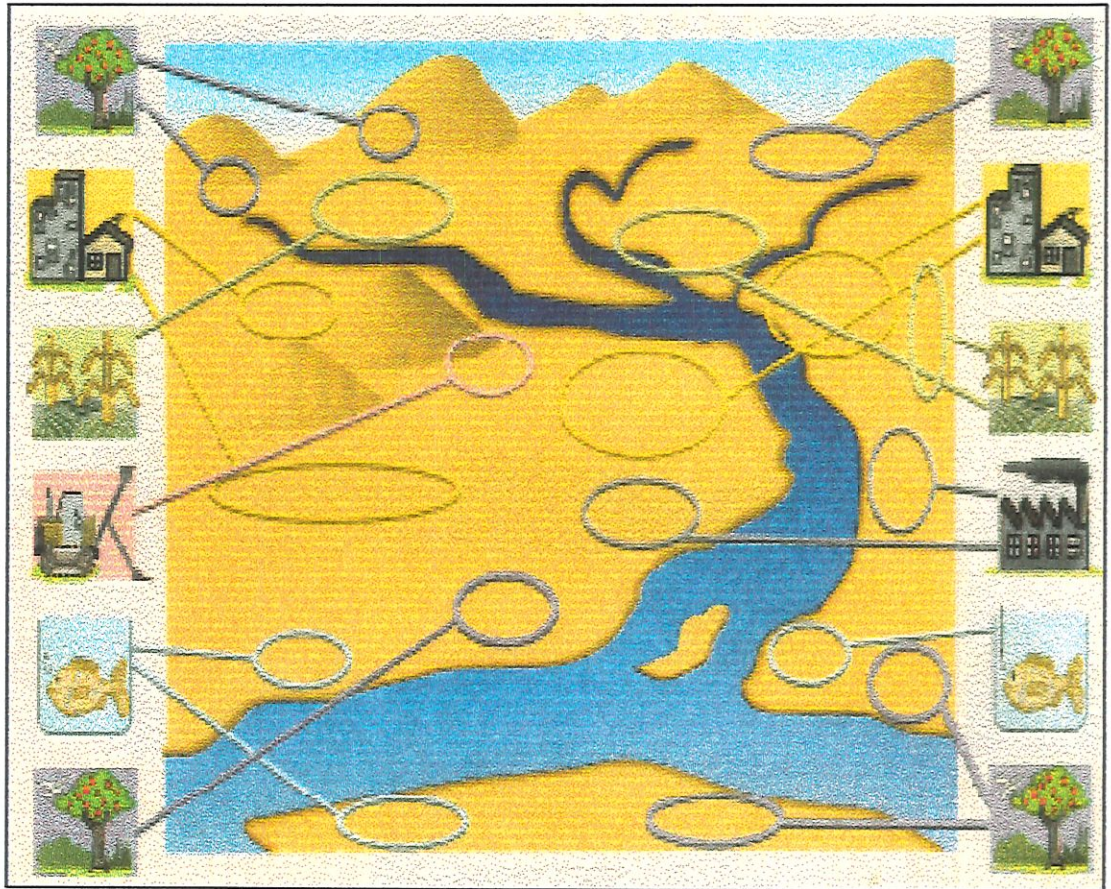


FIGURA 1.2 - Zoneamento Ambiental: divisão do território estudado, em forma de lei, conforme sua capacidade de absorver as diversas atividades humanas. (Fonte: PIRES e SANTOS; 1995, p.45).

1. EQUAÇÕES DE PREVISÃO DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO

De acordo com BENNETT e RATHBUN (1972, p.9-21), três metodologias² são empregadas para fazer a previsão de K_2 . Os métodos³ são fundamentados em teorias ou modelos *conceituais*, *semi-empíricos* e *empíricos*, que descrevem a previsão do coeficiente de reaeração ou coeficiente de transferência de massa na interface gás-líquido.

²Estudo sistemático e lógico dos princípios que dirigem a pesquisa científica, ou estudo científico dos métodos (MOREIRA; 1992, p.2).

³Meio ou processo de se atingir um determinado objetivo, ou procedimentos técnicos, modos de pesquisa e investigação, previamente estabelecidos, próprios de uma ciência ou disciplina, empregados para alcançar um determinado fim (MOREIRA; 1992, p.2).

1.1. Modelos Conceituais

Esses modelos surgem de equações matemáticas que descrevem as condições físicas do processo de transferência de massa através do escoamento. Entre os modelos conceituais pode-se citar os seguintes:

- Modelo do Filme
- Modelo da Renovação
- Modelo da Teoria Cinética
- Modelo da Difusão Turbulenta
- Modelo dos Grandes Turbilhões

O primeiro modelo conceitual, postulado por LEWIS e WHITMAN (1924), foi a *Teoria dos Dois Filmes*, que supõe a existência de dois filmes laminares em ambos os lados da interface gás-líquido.

A transferência de massa nas regiões laminares é realizada perpendicularmente à direção dos filmes, por difusão molecular; e a transferência de massa fora dessas regiões ocorre por difusão turbulenta.

Como o processo de difusão molecular é muito mais lento que o processo de difusão turbulenta, a resistência ao transporte de massa de uma fase para outra é atribuída aos dois filmes.

A solubilidade de um gás em um líquido, a uma dada temperatura, é diretamente proporcional à sua pressão parcial, conforme GETMAN e DANIELS (1931)⁴ citados por HANEY (1954).

O enunciado anteriormente citado refere-se à lei de Henry, equação (1.1), válido para sistemas em equilíbrio. A lei de Henry é aplicada aos gases pouco solúveis e não reativos com o líquido; e também aos gases mais solúveis, porém somente quando estes gases estão presentes em soluções diluídas. O sistema ar-água é um exemplo que se enquadra no primeiro caso, e apresenta particular interesse neste trabalho.

$$p = HC \quad (1.1)$$

sendo,

p = pressão parcial do gás,

⁴GETMAN, F.H.; DANIELS, F. 1931. The rate of absorption of a pure gas into a still liquid during short periods of exposure. Am. Inst. Chem. Eng. Trans, v.64, p.527-50, citado por HANEY, P.D. 1954. Theoretical principles of aeration, Journal American Water Works, v.46, p.355.

H = constante da lei de Henry = $4,06 \cdot 10^9$ Pa/molde O_2 / mol de solução, e
 C = concentração do gás no líquido.

As regiões de gás e líquido, fora dos limites dos filmes laminares, são consideradas de mistura completa. O fluxo de massa por unidade de tempo e unidade de área, através dos filmes, é um processo descrito pela seguinte equação:

$$\frac{1}{A} \frac{dm}{dt} = J = k_G (p_G - p_i) = k_L (C_i - C_L) \quad (1.2)$$

sendo,

A = área da interface gás-líquido,

m = massa de gás dissolvido,

t = tempo,

J = fluxo de massa ou taxa de transferência gasosa por unidade de área na interface,

k_G = coeficiente de transferência de massa no filme gasoso,

p_G = pressão parcial do gás na fase gasosa,

p_i = pressão parcial do gás na interface,

k_L = coeficiente de transferência de massa no filme líquido,

C_i = concentração de gás na interface, e

C_L = concentração de gás na fase líquida.

Ao combinar as equação (1.1) e (1.2), elimina-se p_i e C_i . Então tem-se:

$$J = K_G (p_G - H C_L) = k_G (p_G - p_L) \quad (1.3)$$

sendo,

K_G = coeficiente global de transferência de massa na fase gasosa,

p_L = pressão parcial do gás correspondente ao equilíbrio com a concentração do gás no líquido,

e

$$J = K_L \left(\frac{p_G}{H} - C_L \right) = k_L (C_G - C_L) \quad (1.4)$$

sendo,

K_L = coeficiente global de transferência de massa na fase líquida, e
 C_G = concentração de gás dissolvido no líquido correspondente no equilíbrio à pressão parcial p_G .

O coeficiente global de transferência de massa pode ser expresso como nas equações (1.5) e (1.6), indicando que a resistência total ao processo de transferência é independente da concentração de gás.

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_L} \quad (1.5)$$

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{k_L} + \frac{1}{Hk_G} \quad (1.6)$$

A resistência à transferência de massa nos dois filmes é ilustrada como na Figura 1.3.

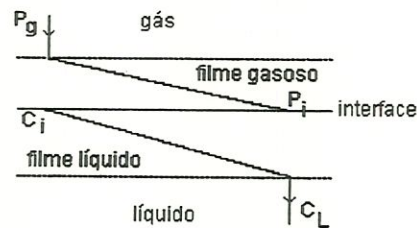


FIGURA 1.3 - Diagrama esquemático da Teoria dos Dois Filmes. (Fonte: LEWIS e WHITMAN, 1924).

Para gases pouco solúveis e não reativos com o líquido, a constante da lei de Henry é muito grande; isto significa que a resistência no filme gasoso é desprezível em relação à resistência no filme líquido (BENNETT e RATHBUN, 1972). Portanto, a equação (1.6) é reduzida a

$$K_L \cong k_L \quad (1.7)$$

Admite-se a existência de um gradiente de concentração linear através do filme líquido, que é expresso pela equação (1.8).

$$J = D_m \frac{(C_s - C_L)}{\delta} \quad (1.8)$$

sendo,

- = difusividade molecular,
- = concentração de saturação do gás na interface,
- = déficit da concentração do gás no líquido, e
- = espessura do filme.

Comparando as equações (1.4) e (1.8), obtém-se:

(1.9)

A transferência global de massa depende das propriedades dos soluto e solvente e das características hidrodinâmicas do escoamento, representadas pelos termos de difusividade molecular e espessura do filme, respectivamente.

Outros modelos foram surgindo a partir da teoria dos dois filmes, como por exemplo:

- Teoria da Penetração,
- Teoria da Renovação Superficial
- Penetração do Filme

A *Teoria da Penetração*, postulada por HIGBIE (1935)⁵ citada por BENNETT e RATHBUN (1972), abandona a hipótese dos filmes laminares na interface gás-líquido e supõe que a superfície do líquido consiste de pequenos elementos de fluido (turbilhões). Esses elementos entram em contato com a fase gasosa por um tempo médio t_c , que posteriormente penetram no interior do líquido. O líquido na interface é continuamente substituído pela emersão dos elementos das camadas inferiores.

O processo de transferência de massa, durante o tempo de contato, é realizado por difusão molecular, como expresso pela equação (1.10).

(1.10)

com,

- = difusividade molecular, e
- = tempo médio.

⁵HIGBIE, R. 1935. The rate of absorption of a pure gas into a still liquid during short periods of exposure. Am. Inst. Chem. Eng. Trans, v.64, p.527-50, citado por BENNETT, J.P.; RATHBUN, R.E. 1972. Reaeration in open-channel flow, Washington, Geological Survey, p.10.

A teoria da penetração mostra que a transferência de massa é proporcional à $D_m^{1/2}$, diferindo do modelo dos dois filmes onde K_L é proporcional à D_m .

O coeficiente de transferência de massa na teoria da penetração aumenta quando o nível da agitação do escoamento aumenta, isto é, maior a agitação, menor será o intervalo de tempo que o turbilhão ficará exposto.

A *Teoria da Renovação Superficial*, postulada por DANCKWERTS (1951) é bastante semelhante à teoria da penetração de HIGBIE (1935), tanto nos aspectos físicos quanto nos aspectos matemáticos. A diferença reside no tempo de exposição à superfície. A teoria da penetração considera um tempo médio de exposição e a teoria da renovação superficial apresenta uma distribuição de idades dos elementos superficiais, constantes no tempo, e uma probabilidade de um elemento ser incorporado ao meio, não dependente de sua idade.

DANCKWERTS (1951) admitiu uma superfície composta de elementos de fluido de diferentes idades; uma concentração na superfície constante e igual à de saturação; e uma taxa de produção de superfície nova, denominada de *taxa de renovação superficial*.

O coeficiente de transferência de massa foi expresso como:

$$K_L = \sqrt{D_m s} \quad (1.11)$$

sendo,

D_m = difusividade molecular, e
 s = taxa de renovação superficial.

Ao postularem a *Teoria da Penetração do Filme*, TOOR e MARCHELLO (1958) admitiram que a transferência de massa na interface gás-líquido assume características ambíguas à teoria dos dois filmes e as teorias de penetração ou renovação superficial. Eles consideraram a existência de uma região laminar próxima à interface, onde ocorre a difusão molecular, limitando a região turbulenta (Figura 1.4).

TOOR e MARCHELLO (1958) admitiram que a transferência de massa nos elementos de maior idade (velhos) na superfície ocorre de acordo com o modelo dos dois filmes e a transferência de massa nos elementos de menor idade (novos) segue conforme a teoria da penetração.

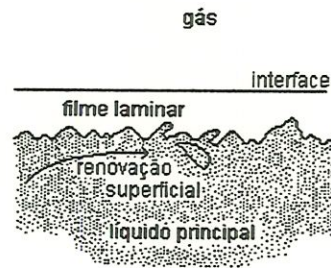


FIGURA 1.4 - Diagrama esquemático da renovação superficial próxima ao filme laminar.

Conforme KRENKEL e ORLOB (1962), MIYAMOTO (1932)⁶ desenvolveu a *Teoria Cinética* baseado no número de moléculas que colide em uma superfície por unidade de tempo e por unidade de área, e na distribuição de velocidade das moléculas em um gás (lei de Maxwell). Essa teoria considera que as limitações do processo de transferência de oxigênio para água ocorrem na fase gasosa da interface ar-água.

Apenas uma parcela das moléculas que colidem com a superfície da água é absorvida. As moléculas que entram no líquido apresentam um valor mínimo para a velocidade normal à superfície. A medida que a concentração de oxigênio aumenta, a quantidade de O₂ que abandona o líquido também aumenta.

KISHINEVSKY (1955) postulou a existência da difusividade efetiva no processo de transferência de massa, que é a ocorrência simultânea das difusividades molecular e turbulenta, *Modelo da Difusão Turbulenta*. Entretanto, a difusividade turbulenta em altas agitações é muito maior que a difusividade molecular, desse modo:

$$K_L = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\varepsilon_t s} \quad (1.12)$$

com,

ε_t = coeficiente de difusão turbulenta, e
 s = taxa de renovação superficial.

⁶MIYAMOTO, S. 1932. A theory of the rate of solution of gas into liquid. Chem. Soc. of Japan, v.7, n.12, Dec., citado por KRENKEL, P.A.; ORLOB, G.T. 1962. Turbulente diffusion and the reaeration coefficient. Journal of the Sanitary Engineering Division, v.88, n.2, Mar., p.57.

Um estudo apresentado por KISHINEVSKY e SEREBRYANSKY (1955), realizado em um tanque contendo água com elevado nível de agitação, mostrou que os coeficientes de transferência de massa dos gases hidrogênio, oxigênio e nitrogênio eram aproximadamente iguais, apesar da difusividade molecular do hidrogênio ser duas vezes maior que as difusividades do oxigênio e nitrogênio.

O efeito da difusividade molecular sobre o processo de absorção é duvidoso, pois muitos pesquisadores sustentam que esse processo é controlado pela difusividade molecular e outros afirmam a inexistência dessa difusividade, segundo KRENKEL e ORLOB (1962).

O *Modelo dos Grandes Turbilhões* foi elaborado por FORTESCUE e PEARSON (1967), que idealizaram a transferência de massa em uma superfície turbulenta através de células convectivas existentes na superfície do escoamento. As células convectivas são produzidas pela macro escala dos turbilhões.

ADENEY e BECKER (1919) empregaram a equação (1.13), forma matemática mais comum, para descrever a taxa com que o oxigênio se dissolve em água.

$$J = \frac{1}{A} \frac{dm}{dt} = K_L (C_s - C_L) \quad (1.13)$$

Se a massa de oxigênio absorvida através da interface ar-água, se dissolve em um volume V do líquido, então a equação (1.13) torna-se:

$$\frac{dC}{dt} = K_L \frac{A}{V} (C_s - C_L) \quad (1.14)$$

sendo $K_L \frac{A}{V}$ denominado de coeficiente volumétrico de transferência de massa.

A solução da equação diferencial (1.14) é:

$$C_s - C_L = (C_s - C_0) e^{-K_L \frac{A}{V} t} \quad (1.15)$$

ou

$$C = C_s - (C_s - C_0) e^{-K_2 t} \quad (1.16)$$

sendo,

C = concentração instantânea do oxigênio na água,
 C_s = concentração de saturação do oxigênio na água,
 C_0 = concentração inicial do oxigênio na água,
 K_2 = coeficiente de reaeração, e
 t = tempo.

1.2. Modelos Semi-Empíricos

Os modelos semi-empíricos relacionam os coeficientes de transferência de massa com propriedades mensuráveis do escoamento e as constantes obtidas dessas relações são determinadas por regressão múltipla. Esses modelos procedem dos seguintes fatores: intuição, conhecimento prévio dos modelos conceituais e resultados prévios de estudos empíricos (BENNETT e RATHBUN; 1972). Geralmente, os modelos semi-empíricos são fundamentados nas hipóteses que deram origem aos seguintes modelos:

- Modelo de KRENKEL (1960), e
- Modelo de THACKSTON-KRENKEL (1969).

O *Modelo de KRENKEL (1960)*⁷ citado por THACKSTON e KRENKEL (1967), idealiza a absorção gasosa na camada interfacial da água como sendo um processo difusivo molecular, e a dissolução no meio líquido principal como sendo um processo difusivo turbulento. De acordo com KRENKEL e ORLOB (1962), a absorção de oxigênio pela água pode se expressa por:

$$K_2 \propto \left[\frac{D_e}{\nu} \right] \left[\frac{\varepsilon_t}{H^2} \right] \quad (1.17)$$

sendo,

D_e = difusividade efetiva (combinação das difusividades molecular e turbulenta na superfície),

ν = viscosidade cinemática,

ε_t = coeficiente de difusão turbulenta, e

H = profundidade média do líquido.

⁷KRENKEL, P.A. 1960. *Turbulent diffusion and the kinetics of oxygen absorption*. California. Thesis (Doctor of Philosophy), University of California at Berkeley, citado por THACKSTON, E.L.; KRENKEL, P.A. 1967. Longitudinal mixing in natural streams. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, v.95, n.1, Feb., p.72.

O primeiro e o segundo termos do lado direito da equação (1.17) expressam a taxa de absorção superficial (ou número de Schmidt) e a taxa de renovação superficial, respectivamente.

THACKSTON e KRENKEL (1967) estudaram o processo de mistura longitudinal em escoamentos naturais e sugeriram a equação (1.18). O mecanismo da dispersão ocorre devido à ação combinada do gradiente de velocidade da seção transversal do escoamento e flutuações turbulentas da velocidade.

$$K_2 \propto D_L^a H^b \quad (1.18)$$

sendo,

D_L = coeficiente de dispersão longitudinal,
 H = profundidade média do líquido, e
 a e b = constantes.

O coeficiente de difusão turbulenta (ε_t), difícil de ser determinado, poderia ser ótimado através do coeficiente de dispersão longitudinal (D_L).

KRENKEL (1960) mostrou através da análise de regressão que D_L , equação (1.19), pode ser relacionado com parâmetros facilmente mensuráveis nas condições específicas daquele escoamento, segundo THACKSTON e KRENKEL (1967).

$$D_L = 6,425E^{0,296} H^{1,243} \quad (1.19)$$

sendo,

E = taxa de dissipação de energia.

A taxa de energia dissipada por unidade de massa fluida em canal aberto, é:

$$E = USg \quad (1.20)$$

sendo,

U = velocidade do escoamento,
 S = declividade do canal, e
 g = aceleração da gravidade.

O Modelo de THACKSTON-KRENKEL (1969) parte da premissa que o coeficiente de reaeração é função direta da renovação superficial e inversamente proporcional a uma função da profundidade, expresso por:

$$K_2 \propto \frac{f(s)}{f(H)} \quad (1.21)$$

sendo,

$f(s) \propto \varepsilon_t$ = função da renovação superficial, e
 $f(H) \propto H^2$ = função da profundidade.

Portanto,

$$K_2 \propto \frac{\varepsilon_t}{H^2} \quad (1.22)$$

O coeficiente de difusão turbulenta (ε_t) é considerado igual ao coeficiente de difusão turbulenta vertical (ε_y). THACKSTON e KRENKEL (1969)⁸ citados por BENNETT e RATHBUN (1972) assumiram que:

$$\varepsilon_y \propto \bar{\varepsilon}_y = \frac{K}{6} Hu_* \quad (1.23)$$

sendo,

$\bar{\varepsilon}_y$ = coeficiente médio de difusão turbulenta vertical,

K = constante de von Karman, e

$u_* = \sqrt{gHS}$ = velocidade de cisalhamento ou velocidade de fricção.

Substituindo a equação (1.23) em (1.22), obtém-se:

$$K_2 = c \frac{u_*}{H} \quad (1.24)$$

sendo,

c = constante determinada por análise de regressão.

⁸ THACKSTON, E.L.; KRENKEL, P.A. 1969. Reaeration prediction in natural streams. Am. Soc. Civil Engineers Jour., v.95, n.1, p.65-94, citado por BENNETT, J.P.; RATHBUN, R.E. 1972. Reaeration in open-channel flow, Washington, Geological Survey, p.19.

De acordo com THACKSTON e KRENKEL (1969) as equações semi-empíricas de previsão de K_2 são mais acuradas e cobrem uma faixa maior na escala de profundidade. Essas equações são mais simples de usar e dependem de parâmetros hidráulicos facilmente mensuráveis. Porém as discrepâncias existentes nos valores de α indicam que essas equações não são gerais e que alguma variável adicional deve ser incluída na equação de previsão.

1.3. Modelos Empíricos

Esses modelos resultam da análise dimensional, cujas constantes obtidas das relações são determinadas por regressão múltipla. A análise dimensional é empregada para justificar a forma da equação usada na análise de regressão, segundo LAU (1972).

As equações de previsão de:

- STREETER e PHELPS (1925),
- O'CONNOR e DOBBINS(1958),
- CHURCHILL, ELMORE e BUCKINGHAM (1962),
- OWENS, EDWARDS e GIBBS (1964),
- LANGBEIN e DURUM (1967),
- ISAACS e GAUDY (1968), e
- NEGULESCU e ROJANSKI (1969).

são clássicas e originárias dos dados de campo e laboratório. Essas equações requerem a determinação dos parâmetros médios do escoamento, conforme informações de BENNETT e RATHBUN (1972).

Segundo CHURCHILL, ELMORE e BUCKINGHAM (1962), os estudos sobre reaeração iniciaram com ADENEY e BECKER (1919)⁹. Eles demonstraram que a taxa de reaeração é diretamente proporcional ao déficit da concentração de oxigênio dissolvido na água. Este princípio foi aplicado, por STREETER e PHELPS (1925)¹⁰, em trabalhos de campo no Rio Ohio (1914 e 1915), com objetivo de reduzir as variáveis envolvidas nas observações.

⁹ADENEY, W.E.; BECKER, H.G. 1919. The determination of rate of solution of atmospheric nitrogen and oxygen in water. Philosophical Magazine, v.38, p.317-38, citado por CHURCHILL, M.A.; ELMORE, H.L.; BUCKINGAM, R.A. 1962. The prediction of stream reaeration rates. Journal of the Sanitary Engineering Division, v.88, n.4, Jul, p.3.

¹⁰STREETER, H.W.; PHELPS, E.B. 1925. A study of pollution and natural purification of Ohio River. U.S. Pub. Health Service, n.146, citado por CHURCHILL, M.A.; ELMORE, H.L.; BUCKINGAM, R.A. 1962. The prediction of stream reaeration rates. Journal of the Sanitary engineering Division, v.88, n.4, Jul., p.3.

STREETER e PHELPS (1925) tomaram duas teorias fundamentais para escrever a seguinte equação:

$$\frac{dD}{dt} = K_1 L_a - K_2 D \quad (1.25)$$

A primeira teoria relaciona a taxa de oxidação bioquímica da matéria orgânica com a concentração remanescente da substância não oxidada, e a segunda teoria relaciona a taxa de reaeração com o déficit da concentração de saturação de OD. A equação diferencial de primeira ordem (1.25) apresenta a seguinte solução:

$$D = \frac{K_1 L_a}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_a e^{-K_2 t} \quad (1.26)$$

sendo,

D = déficit da concentração de saturação de OD,

D_a = déficit inicial da concentração de saturação de OD,

K_1 = coeficiente de desoxigenação,

L_a = demanda bioquímica de oxigênio,

L_a = demanda bioquímica de oxigênio no primeiro estágio (fase carbonácea), e

K_2 = coeficiente de reaeração.

A equação (1.26) é, em geral, empregada na determinação da capacidade de autodepuração dos cursos d'água, de acordo com informações de CHURCHILL, ELMORE e BUCKINGHAM (1962).

A equação de previsão de K_2 sugerida por STREETER e PHELPS (1925), segundo BENNETT e RATHBUN (1972), foi:

$$K_{2(20)} = \frac{ZU^\eta}{(H')^2} \quad (1.27)$$

sendo,

$K_{2(20)}$ = coeficiente de reaeração a temperatura de 20°C,

Z = fator de irregularidade, relacionado à declividade do canal,

U = velocidade média do escoamento,

η = $(\varphi - 0,17) / (\varphi - 1,17)$, sendo φ a média relativa ao aumento da velocidade do escoamento, e

H' = profundidade mínima para as condições experimentais de STREETER e PHELPS (1925).

Modelos mais simples que a equação (1.27) foram desenvolvidos para estimar o coeficiente de reaeração a partir das características hidráulicas do escoamento (NEGULESCO e ROJANSKI, 1969). Porém, esses modelos se enquadram em condições específicas para cada escoamento.

O'CONNOR e DOBBINS (1958) apresentaram as equações (1.28) e (1.29) para escoamentos de altas velocidades e condições anisotrópicas e baixas velocidades e condições isotrópicas, respectivamente.

$$K_2 = \frac{480D_m^{0,5}S^{0,25}}{H^{1,25}} \quad (1.28)$$

$$K_2 = \frac{(D_m U)^{0,5}}{2,31H^{1,5}} \quad (1.29)$$

sendo,

K_2 = coeficiente de reaeração (dia^{-1}), na base logarítmica, a 20°C ,
 D_m = coeficiente de difusão molecular ($\text{pé}^2/\text{dia}$),
 S = declividade do canal (adimensional),
 H = profundidade média do canal (pé), e
 U = velocidade média do escoamento (pé/dia).

CHURCHILL, ELMORE e BUCKINGHAM (1962) desenvolveram a equação (1.30) para trechos de rios a jusante de reservatórios, onde a água apresenta baixa concentração de OD devido ao longo período de estocagem.

$$K_2 = 5,026U^{0,969}H^{-1,673}(1,0241)^{T-20} \quad (1.30)$$

sendo,

K_2 = coeficiente de reaeração (dia^{-1}), na base logarítmica, a 20°C ,
 U = velocidade média do escoamento (m/s),
 H = profundidade média do canal (m), e
 T = temperatura média da água ($^\circ\text{C}$).

RATHBUN (1977) verificou que as equações empíricas de previsão do coeficiente de reaeração, geralmente, apresentam K_2 diretamente proporcional a velocidade média do escoamento elevada a um expoente a , variando de 0,50

a 1,00, e inversamente proporcional a profundidade média do escoamento elevado a uma potência c , variando de 0,85 a 1,85; como na equação (1.31).

$$K_2 \propto U^a H^{-c} \quad (1.31)$$

A seguir, serão apresentadas as equações que obedecem as observações de RATHBUN (1977), em sistema métrico de unidades.

OWENS, EDWARDS e GIBBS (1964)¹¹, citado por RATHBUN (1977), estudaram o processo de reaeração em pequenos rios da Inglaterra e obtiveram a equação (1.32) no Sistema Internacional.

$$K_2 = 5,34U^{0,67}H^{-1,85} \quad (1.32)$$

Sendo,

K_2 = coeficiente de reaeração (dia^{-1}), na base logarítmica e 20°C,

U = velocidade média do escoamento (m/s), e

H = profundidade média do canal (m).

LANGBEIN e DURUM (1967)¹², citado por BENNETT e RATHBUN (1972), propuseram a equação (1.33) no Sistema Internacional, obtida das combinações dos dados de campo de O'CONNOR e DOBBINS (1958) e CHURCHILL, ELMORE e BUCKINGHAM (1962) e dados de laboratório de STREETER, WRIGHT e KERR (1936) e KRENKEL e ORLOB (1963).

$$K_2 = 5,14UH^{-1,33} \quad (1.33)$$

Sendo,

K_2 = coeficiente de reaeração (dia^{-1}), na base logarítmica e 20°C,

U = velocidade média do escoamento (m/s), e

H = profundidade média do canal (m).

SIQUEIRA (1996) relacionou as seis equações preditivas para o coeficiente de reaeração incorporadas ao modelo QUAL2E, reportadas por diversos autores.

¹¹OWENS, M.; EDWARDS, R.W.; GIBBS, J.W. 1964. *Some reaeration studies in streams*. International Journal of Air and Water Pollution, v.8, n.819, p.469-86, citado por RATHBUN, R.E. 1977. Reaeration coefficients of streams - State of the art. Journal of the Hydraulics Division, v.103, n.4, Apr., p.413.

¹²LANGBEIN, W.B.; DURUM, W.H. 1967. *The aeration capacity of streams*. U.S. Geological Survey n.542 p.6, citado por BENNETT, J.P.; RATHBUN, R.E. 1972. Reaeration in open-channel flow. Denver: U.S. Geological Survey n.737 p.21.

2. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO

Balanco de Oxigênio Dissolvido, Perturbação do Equilíbrio e Traçadores Gasosos são as técnicas mais utilizadas na determinação do coeficiente de reaeração. Outras técnicas foram desenvolvidas, porém uma proposta promissora foi idealizada por GIORGETTI e GIANANTI (1983), denominada *Método da Sonda Solúvel*.

2.1. Técnica do Balanco de Oxigênio Dissolvido

Segundo RAINWATER e HOLLEY (1983, p.4), STREETER e PHELPS (1925)¹³ desenvolveram o primeiro método da determinação de K_2 em campo. Eles admitiram que a concentração de OD na água era afetada apenas por uma fonte (reaeração) e um sumidouro (demanda bioquímica do oxigênio - DBO), como expresso na equação (1.25). CAMP (1963)¹⁴ e DOBBINS(1964)¹⁵ modificaram esse modelo incluindo outras fontes e sumidouros, como por exemplo, a reposição de OD através da fotossíntese realizada pelas plantas aquáticas, e o consumo de OD pela respiração de seres aquáticos e através das camadas bentônicas.

A técnica do Balanco de Oxigênio Dissolvido consiste em estimar todas as fontes e sumidouros de OD, exceto a reaeração atmosférica. Essa técnica não é muito eficiente quando empregada em campo, porque as fontes e sumidouros de OD não apresentam distribuição uniforme e sua natureza bioquímica possui comportamento irregular, HOLLEY e YOTSUKURA (1984, p.399). Deste modo, a determinação de K_2 está sujeita a erros significativos.

2.2. Técnica da Perturbação do Equilíbrio

GAMESON, TRUESDALE e DOWNING (1955)¹⁶, citados por HOLLEY e YOTSUKURA (1984, p.389), desenvolveram a técnica da Perturbação do

¹³STREETER, H.W.; PHELPS, E.B. 1925. *A study of pollution and natural purification of Ohio River*. U.S. Pub. Health Service, n.146, citado por RAINWATER, K.A.; HOLLEY, E.R., 1983. *Laboratory studies on the hydrocarbon gas tracer technique for reaeration measurement*. Austin: Center for Research in Water Resources. n.189 , p.4.

¹⁴CAMP, T.R. 1963. *Water and its Impurities*. New York, Reinhold Book, 355 p., citado por RAINWATER, K.A.; HOLLEY, E.R., 1983. *Laboratory studies on the hydrocarbon gas tracer technique for reaeration measurement*. Austin: Center for Research in Water Resources. n.189 , p.4.

¹⁵DOBBINS, W.E. 1964. *BOD and oxygen relationships in stream*. Journal of the Sanitary Engineering Division, v.90, n.3, p.53-78, citado por RAINWATER, K.A.; HOLLEY, E.R., 1983. *Laboratory studies on the hydrocarbon gas tracer technique for reaeration measurement*. Austin: Center for Research in Water Resources. n.189 , p.4.

¹⁶GAMESON, A.L.H.; TRUESDALE, G.A.; DOWNING, A.L. 1955. *Reaeration studies in Lakeland Beck*. Journal Institution Water Engineers, v.9, n.1, p.5713-94, citado por HOLLEY, E.R., 1984. *Field techniques for reaeration measurements in rivers*. In: GAS TRANSFER AT Water SURFACES, New York. *Anais*. Ithaca, Cornell University. p.389.

Equilíbrio para estimativa do K_2 em pequenos rios. Inicialmente, esta técnica consiste em medir as concentrações de OD sob condições naturais, a montante e jusante, de um determinado trecho. Após uma perturbação do equilíbrio natural mediante adição de sulfito de sódio e cobalto como catalisador, as concentrações de OD devem ser medidas novamente nos mesmos pontos a montante e jusante do trecho em estudo. Finalmente, K_2 é calculado pelas diferenças das concentrações medidas antes e depois da adição do sulfito de sódio.

A técnica da Perturbação do Equilíbrio é de aplicação limitada aos escoamentos que não possuem variação temporal da concentração natural de OD; e aos escoamentos que não apresentam nenhuma outra fonte, além da reaeração, e nenhum sumidouro de OD (HOLLEY e YOTSUKURA;1984, p.399).

2.3. Técnica dos Traçadores Gasosos

Com objetivo de minimizar as limitações das técnicas anteriores, TSIVOGLOU e colaboradores (1965)¹⁷ desenvolveram um método para estimar K_2 independente de interferentes químicos e/ou biológicos do OD (BARBOSA; 1989, p.23).

A técnica dos Traçadores Gasosos consiste em dissolver um gás a montante do trecho em estudo, depois determinar o coeficiente de dessorção do traçador gasoso (K_T) e multiplicá-lo por um fator de conversão (R_T) para estimar K_2 . Este fator de correção é obtido a partir de resultados de ensaios em laboratório. O produto entre K_T e o fator de conversão é igual ao coeficiente de reaeração para o trecho observado, como apresentado na equação (1.36). O gás utilizado é, geralmente, um hidrocarboneto de baixo peso molecular.

$$R_T = \frac{K_2}{K_T} \quad (1.36)$$

A técnica dos traçadores gasosos torna-se muito onerosa quando empregada em campo, pois necessita de um grupo de profissionais especializados e utilização de equipamento sofisticado, como o cromatógrafo.

¹⁷TSIVOGLOU, E.C. et al. 1965. *Tracer measurements of atmospheric reaeration - I. Laboratory studies*. Journal Water Pollution Control Federation, v.37, n.10, p.1343-62, citado por BARBOSA JÚNIOR, A.R., 1989. *Desenvolvimento de metodologia para determinação do coeficiente de reaeração dos escoamentos naturais de água com emprego do traçador gasoso*. São Carlos. 187p. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, p.23.

3. AVALIAÇÃO DAS DETERMINAÇÕES DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO E SUAS EQUAÇÕES DE PREVISÃO

Desde o desenvolvimento do primeiro método de quantificação do coeficiente de reaeração para rios, realizado por STREETER e PHELPS (1925), outros métodos foram concebidos. Porém, todos limitaram-se a uma determinada faixa de aplicação, segundo BOWIE e colaboradores (1985)¹⁸, citados por BICUDO e JAMES (1989, p.992).

Mesmo o método mais consagrado, a técnica dos traçadores gasosos, apresenta controvérsias concernentes à acuracidade dos valores de K_2 e reprodutibilidade dos dados de campo, de acordo com HOVIS e colaboradores (1982)¹⁹ citados por BICUDO e JAMES (1989, p.993).

A aplicação da técnica dos traçadores gasosos é muito dispendiosa, porque a quantificação de K_2 é realizada a partir da coleta dos dados *in situ* e para os diferentes casos de interesse. Deste modo, elaboram-se modelos matemáticos de previsão de K_2 , expressos na forma da lei de potências de quantidades físicas facilmente mensuráveis (BARBOSA; 1995, p.1, 11).

Segundo BARBOSA (1995, p.3), ainda não existe um modelo geral que possa ser aplicado a escoamentos, sem estar restrito a pequenos desvios apenas das condições em que a equação foi obtida. Assim, é necessário calibrar o modelo nos trechos de interesse para que este seja confiável.

¹⁸BOWIE, G.L., et al. 1985. Rates, constants, and kinetics formulations in surface water quality modeling. Environmental Research Laboratory, Report n. EPA-600/3-85/40 2.ed. Athens, Ga., citado por BICUDO, R.J.; JAMES, A. 1989. Measurement of reaeration in streams: comparison of techniques. Journal of Environmental Engineering, v.115, n.5, p.992.

¹⁹HOVIS, J.S., et al. 1982. An assessment of the measurement uncertainty in the estimation of stream reaeration coefficients using direct tracer techniques. Stormwater and Water Quality Management Modeling Users Group Meeting, U.S. EPA-600/9-82/15, citado por BICUDO, R.J.; JAMES, A. 1989. Measurement of reaeration in streams: comparison of techniques. Journal of Environmental Engineering, v.115, n.5, p.993.

CAPÍTULO 2

MÉTODO DA Sonda SOLÚVEL

GIORGETTI e GIANANTI (1983), SCHULZ (1985, 1989) e GIORGETTI e SCHULZ (1986) idealizaram um método para determinação do coeficiente de reaeração, denominado de *Método da Sonda Solúvel*. Este método possibilitará a simplificação e minimização dos custos operacionais das medidas de campo.

O *Método da Sonda Solúvel* está fundamentado na proposta de que, colocando um sólido solúvel imerso em água e junto à superfície, os processos de transferência de massa do gás para a água e do sólido para água são dependentes do mesmo estado de agitação turbulenta da água. Portanto, é possível correlacionar os dois fenômenos de transferência. Descrições mais detalhadas sobre o mecanismo de turbulência superficial e o método proposto podem ser encontradas em SCHULZ (1985), SCHULZ (1989) e GIORGETTI (1993, p.143).

1. ORIGEM DO MÉTODO DA Sonda SOLÚVEL

De forma geral, com intuito a aplicações práticas, as equações de previsão de K_2 são expressas em função da velocidade e profundidade do escoamento. As equações que envolvem somente esses dois parâmetros não estimam K_2 de forma satisfatória. Porém, a inclusão de outros parâmetros, como declividade, nas equações de correlação propostas, tende a melhorar os resultados das

previsões, de acordo com as análises de WILSON e MACLEOD (1974)²⁰ citados por RATHBUN (1977, p.415-16).

WILSON e MACLEOD (1974) atribuíram o espalhamento dos resultados a provável ausência de um ou mais parâmetros críticos. O índice de renovação superficial, definido por DANCKWERTS (1951, p.1461), foi o parâmetro crítico ausente apontado por HOLLEY (1977)²¹ citado por GIANANTI (1986, p.13).

Como o índice de renovação superficial é difícil de ser medido, KRENKEL e ORLOB (1962, p.70-72) propuseram o coeficiente de dispersão longitudinal como parâmetro quantificador adicional para K_2 .

As dificuldades encontradas por KRENKEL e ORLOB (1962) para determinar o coeficiente de dispersão longitudinal através de um anemômetro de fio quente, suscitaram a necessidade de desenvolver métodos mais simples, práticos e econômicos.

GIORGETTI e GIANANTI (1983) e GIANANTI (1986, p.20) propuseram inicialmente a utilização de substâncias solúveis em água como prováveis indicadoras da taxa de renovação superficial. Esta idéia, foi aperfeiçoada posteriormente, e aplicada à determinação do coeficiente de reaeração.

2. PRIMEIROS ESTUDOS COM SONDAS SOLÚVEIS

GIORGETTI e GIANANTI (1983), em seus estudos pioneiros de dissolução de sólidos solúveis, utilizaram balas de açúcar, da marca *Soft*²². Os ensaios, para diferentes níveis de turbulência, foram realizados em um tanque de agitação com recirculação da água.

O processo de dissolução foi descrito por GIORGETTI e GIANANTI (1983) e GIANANTI (1986, p.26), como uma reação de primeira ordem, expresso pela equação (2.1).

$$\frac{W}{W_0} = \frac{m}{m_0} = \exp(-K_s t) \quad (2.1)$$

²⁰WILSON, G.T., MACLEOD. 1974. A critical appraisal of empirical equations and models for the prediction of the coefficient of reaeration of deoxygenated water. *Water Research*, Pergamon Press, Oxford, England, v.8, n.6, Jun., p.341-66, citado por RATHBUN, R.E. 1977. Reaeration coefficients of streams - State of the art. *Journal of the Hydraulics Division*, v.103, n.4, p.409-24, Apr.

²¹HOLLEY, E.R. 1977. Oxygen transfer at the air-water interface. Research Report, University of Illinois at Urbana, Champaign, p.117-150, citado por GIANANTI, A.E. 1986. *A influência do Índice de turbulência no valor do coeficiente de reaeração dos cursos d'água*. São Carlos. 108p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

²²As marcas dos produtos aqui citados não apresentam caráter promocional, visam à didática.

sendo,

W_0 = peso inicial do sólido,

W = peso do sólido após um tempo de desgaste,

m = massa instantânea do sólido solúvel,

m_0 = massa inicial do sólido solúvel,

K_s = coeficiente de dissolução, e

t = tempo de desgaste.

GIORGETTI e GIANANTI (1983) e GIANANTI (1986, p.33) observaram uma forte correlação entre o coeficiente de dissolução (K_s) e o coeficiente de reaeração (K_2). Ambos os coeficientes, K_s e K_2 , apresentam dimensão de tempo elevado à potência menos um (T^{-1}).

GIORGETTI e GIANANTI (1986)²³ citados por BICUDO (1988, p.100) e GIANANTI (1986, p.84) estudaram o comportamento de K_s e K_2 , confirmando as observações dos trabalhos anteriores.

3. MODELOS DE PREVISÃO DA VELOCIDADE DE DISSOLUÇÃO

Em 1931, HIXON e CROWELL descreveram o processo de dissolução de um sólido solúvel para aplicar às áreas de engenharia química e química industrial.

O primeiro modelo, criado para descrever o processo de dissolução de um sólido solúvel aplicado às áreas de hidráulica, sanitária e ambiental, foi concebido por GIORGETTI e GIANANTI (1983). Admitiu-se que a transferência de massa da sonda para o meio poderia ser expressa por uma reação de primeira ordem, equação (2.1), com decaimento exponencial.

SCHULZ (1985) demonstrou que o modelo da equação (2.1) não era apropriado para descrever o processo de dissolução para períodos longos de observação. Os dados experimentais de dissolução das sondas de GIANANTI²⁴ e PAIVA²⁵, apresentados na Tabela 2.1, quando dispostos em gráfico de $\ln(m/m_0)$ versus tempo, deveriam dispor-se de modo a formarem uma reta.

²³ GIANANTI, A.E.; GIORGETTI, M.F. 1986. Contribuição para a determinação do coeficiente de reoxigenação superficial em corpos d'água - II, presented at the 2nd Latin American Congress of Heat and Mass Transfer, São Paulo, Brazil, May, p.12-15, citado por BICUDO, R.J. 1988. *The measurement of reaeration in stream*. Newcastle Upon Tyne, 306p. Doctor of Philosophy - Department of Civil Engineering, University of Newcastle Upon Tyne.

²⁴ GIANANTI, A.E. (USP. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Hidráulica e Saneamento). Comunicação pessoal fornecida a SCHULZ (1985), s.d.

²⁵ PAIVA, E.M.C.D. (USP. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Hidráulica e Saneamento). Comunicação pessoal fornecida a SCHULZ (1985), s.d.

Contudo, visualizou-se uma concavidade que se apresenta no mesmo sentido para ambos os dados experimentais tanto de GIANANTI como de PAIVA, ilustrada na Figura 2.1.

TABELA 2.1 - Dados experimentais de GIANANTI e PAIVA. (Fonte: SCHULZ; 1985).

GIANANTI				PAIVA			
balas cilíndricas				pirulitos esféricos			
t (min)	m/m ₀	t (min)	m/m ₀	t (min)	m/m ₀	m/m ₀	m/m ₀
0	1	0	1	0	1	1	1
2,9	0,76	2,2	0,81	10	0,59	0,56	0,54
5,8	0,58	4,4	0,65	20	0,23	0,19	0,20
8,7	0,38	6,6	0,48	-	-	-	-
11,6	0,24	8,8	0,32	-	-	-	-

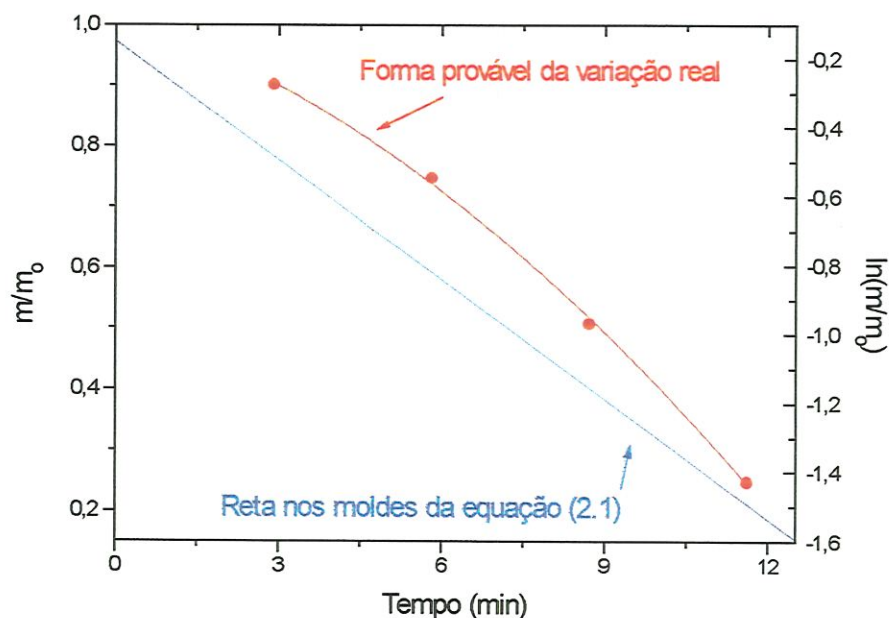


FIGURA 2.1 - Análise gráfica de um ensaio de GIANANTI. (Fonte: SCHULZ; 1985).

O gráfico da Figura 2.1 apresenta somente os pares de valores correspondentes às duas primeiras colunas da Tabela 2.1.

A curvatura se torna mais visível para tempos maiores. Deste modo, a equação (2.1) é válida para pequenos períodos de dissolução, segundo SCHULZ (1985).

SCHULZ (1985) retorna à análise de outro modelo, chamado de *Modelo Cúbico*, desenvolvido para uma forma genérica de sólido, como demonstrado a seguir.

Considerou-se que a transferência de massa do sólido para água era diretamente proporcional à área superficial do sólido.

$$\frac{dM}{dT} \propto -L^2 \quad (2.2)$$

sendo,

M = dimensão de massa = ρL^3 ,
 L = dimensão de comprimento, e
 T = dimensão de tempo.

ou

$$\rho \frac{dL^3}{dT} = -g L^2 \quad (2.3)$$

derivando a equação (2.3), obtém-se:

$$\frac{dL}{dT} = -\frac{g}{3\rho} = -V_s \quad (2.4)$$

e integrando a equação (2.4), consegue-se:

$$L = L_0 - V_s t \quad (2.5)$$

ou, de acordo com SCHULZ (1985), a equação (2.5) pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{M}{\rho} = (L_0 - V_s t)^3 \quad (2.6)$$

ou ainda, conforme BICUDO (1988), a equação (2.5) pode ser escrita na forma:

$$\frac{m}{m_0} = \left(1 - \frac{V_s t}{L_0}\right)^3 \quad (2.7)$$

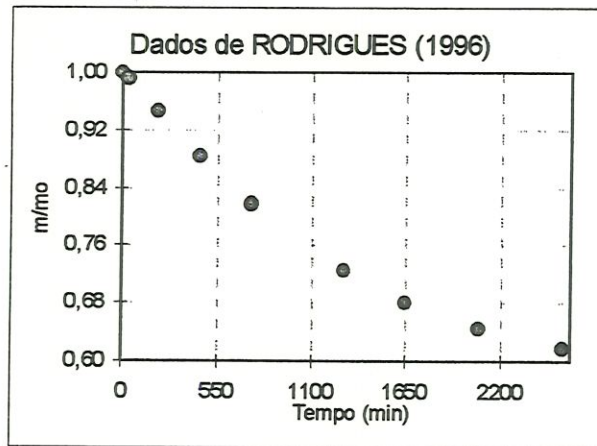


FIGURA 2.3 - Representação gráfica da variação de massa em função do tempo para os dados experimentais de RODRIGUES (1996).

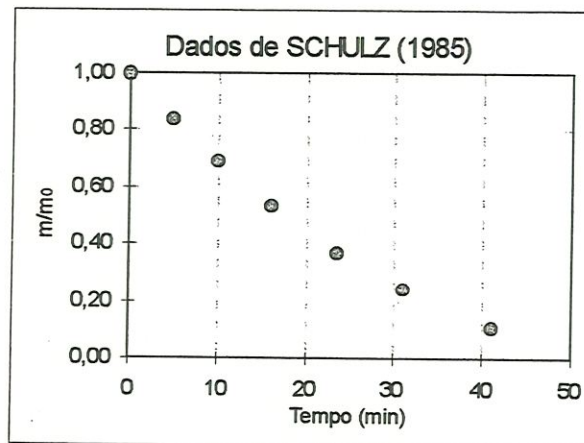


FIGURA 2.4 - Representação gráfica da variação de massa em função do tempo para os dados experimentais de SCHULZ (1985).

As observações anteriores não invalidam o *Modelo Exponencial*. SCHULZ (1985) aponta a utilização desse modelo, para o caso em que a quantidade de massa líquida atinge a condição de saturação do soluto. Tal situação é, entretanto, impraticável em trabalhos de campo.

Em alguns casos, é possível que seja necessário considerar um gradiente de concentração junto ao sólido, para pouca ou nenhuma turbulência (SCHULZ, 1985). Neste caso, é conveniente utilizar a expressão mais geral:

$$\frac{dM}{dt} \propto \Delta C L^2 \quad (2.8)$$

$$\frac{dM}{dt} = h\Delta CL^2 \quad (2.9)$$

sendo,

h = coeficiente de película, e
 ΔC = gradiente médio de concentração.

Segundo SCHULZ (1985), a equação (2.6) vale para altas agitações e ΔC constante, enquanto que a equação (2.9) deve ser usada quando outras situações forem contempladas.

PARMAJ e colaboradores (1989) estudaram a transferência de massa em cilindros de ácidos oxálico, succínico e bórico compactados a frio, localizados em um escoamento paralelo de água corrente. A equação (2.10) foi desenvolvida para calcular o coeficiente de transferência global de massa.

$$\frac{3m_0}{\rho_s A_0} \left\{ 1 - \left(\frac{A_s}{A_0} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} = K_c t \quad (2.10)$$

sendo,

m_0 = massa inicial do sólido,
 ρ_s = massa específica do sólido,
 A_s = área superficial instantânea do sólido,
 A_0 = área superficial inicial do sólido,
 K_c = coeficiente global de transferência de massa do sólido cilíndrico, e
 t = período de dissolução

A equação (2.10) foi proposta porque a área de transferência de massa dos cilindros de ácido oxálico, succínico e bórico varia com o tempo. Em estudos anteriores, a forma geométrica de transferência de massa foi considerada constante para esferas e cilindros formados de materiais pouco solúveis.

RODRIGUES (1996)²⁶ ajustou os modelos das equações (2.1), (2.7) e (2.10) aos seus dados experimentais (Tabela 2.2), como ilustrado nas Figuras 2.5, 2.6 e 2.7, respectivamente. A comparação entre os gráficos de distribuição dos erros, Figuras 2.8, 2.9 e 2.10, demonstra que a equação (2.1) ajustou-se melhor aos

²⁶RODRIGUES, I.C. 1996. (USP. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Hidráulica e Saneamento). Comunicação pessoal. Outubro.

dados experimentais, do que as equação (2.7) e (2.10), por apresentar distribuição aleatória e menores erros.

Entretanto, não houve uma justificativa para o comportamento observado, fundamentada no processo físico de dissolução aliado ao modelo.

TABELA 2.2 - Dados experimentais de RODRIGUES (1996).

Raio (cm)	t (min)	m (g)	A_s (cm ²)
1,5	0	15,5520	28,2732
	30	15,3273	27,9758
	90	14,7588	27,3035
	210	13,6309	25,9833
	510	11,3053	22,8580
	810	9,4380	20,2661
	1310	6,9123	16,4665
	1670	5,4919	14,1254

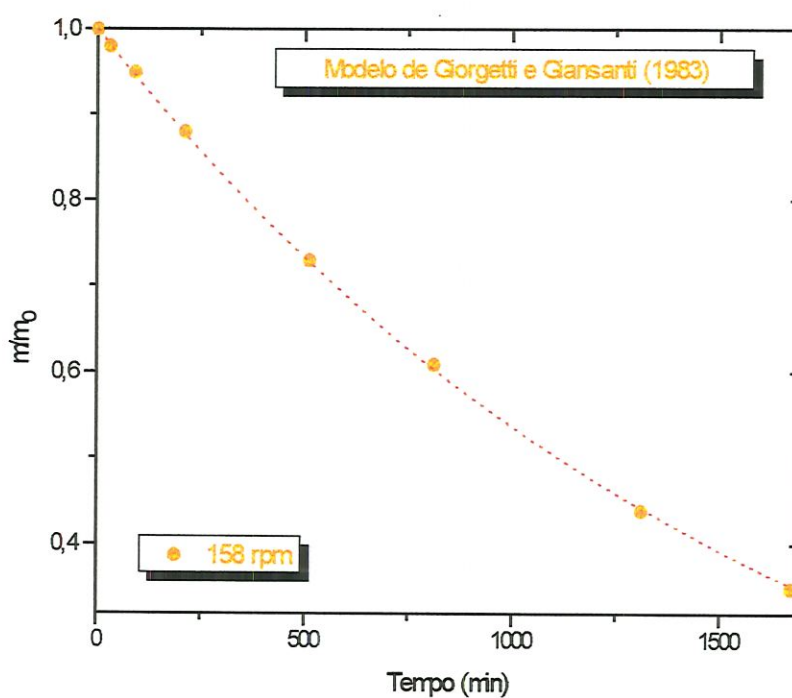


FIGURA 2.5 - Ajuste do modelo da equação (2.1) aos de dados experimentais de RODRIGUES (1996).

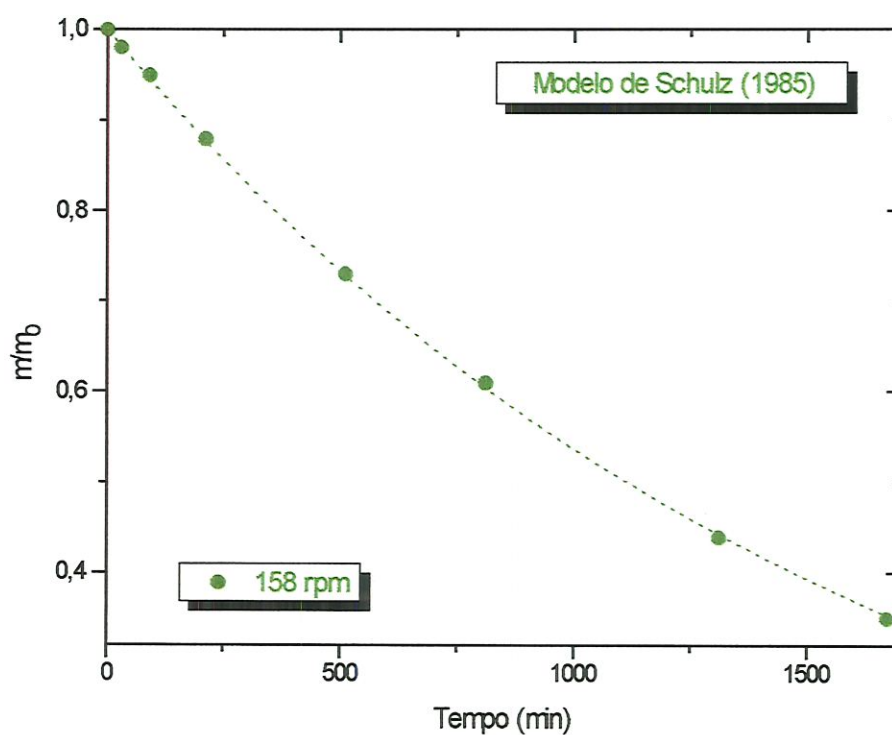


FIGURA 2.6 - Ajuste do modelo da equação (2.7) aos de dados experimentais de RODRIGUES (1996).

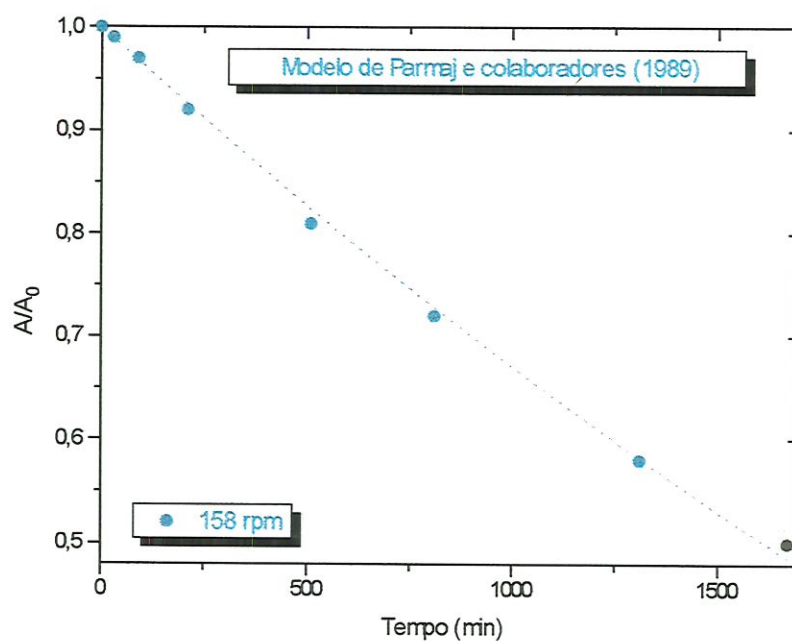


FIGURA 2.7 - Ajuste do modelo da equação (2.10) aos dados experimentais de RODRIGUES (1996).

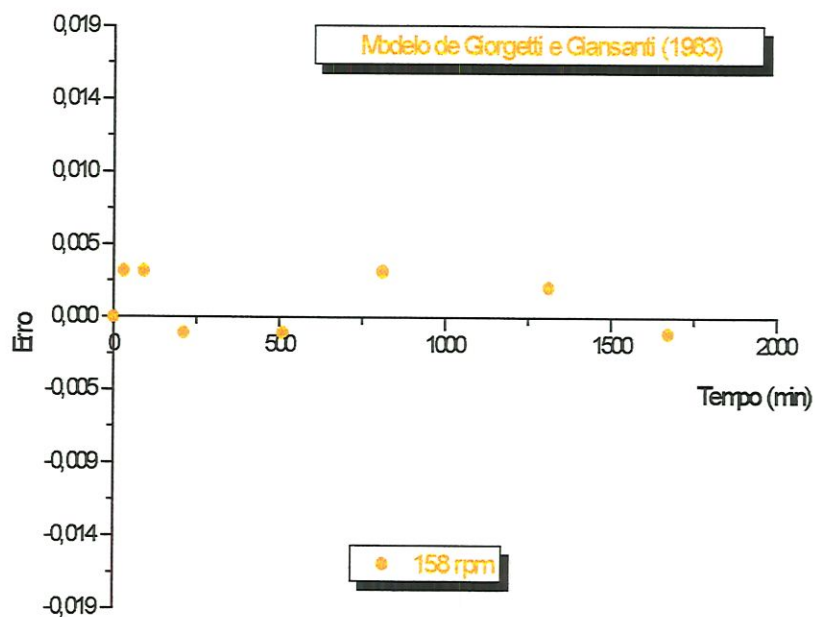


FIGURA 2.8 - Gráfico da distribuição de erros do modelo da equação (2.1).

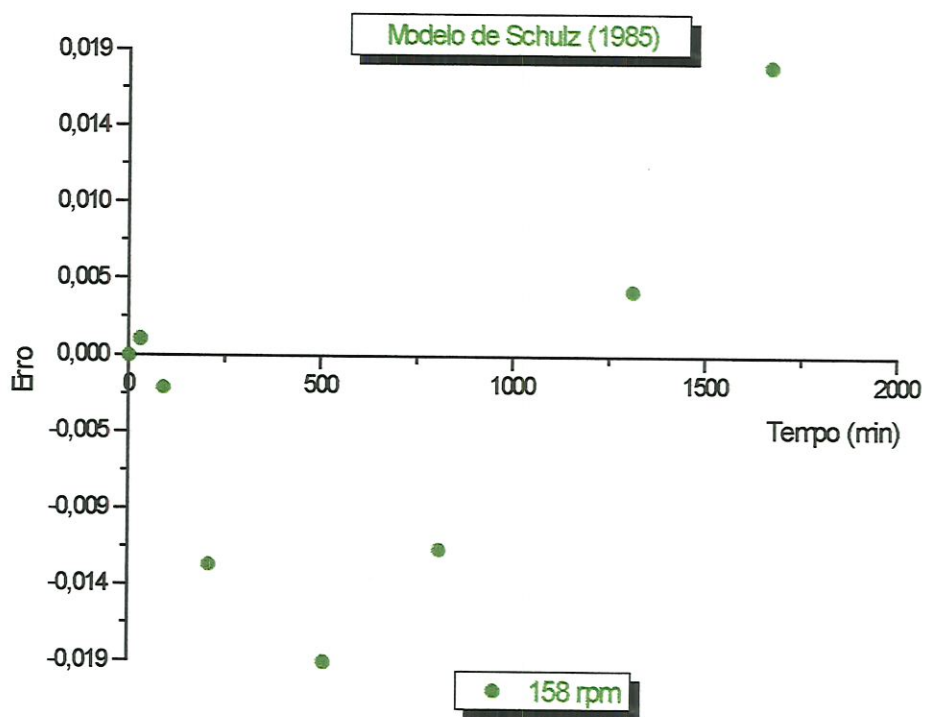


FIGURA 2.9 - Gráfico da distribuição de erros do modelo da equação (2.7).

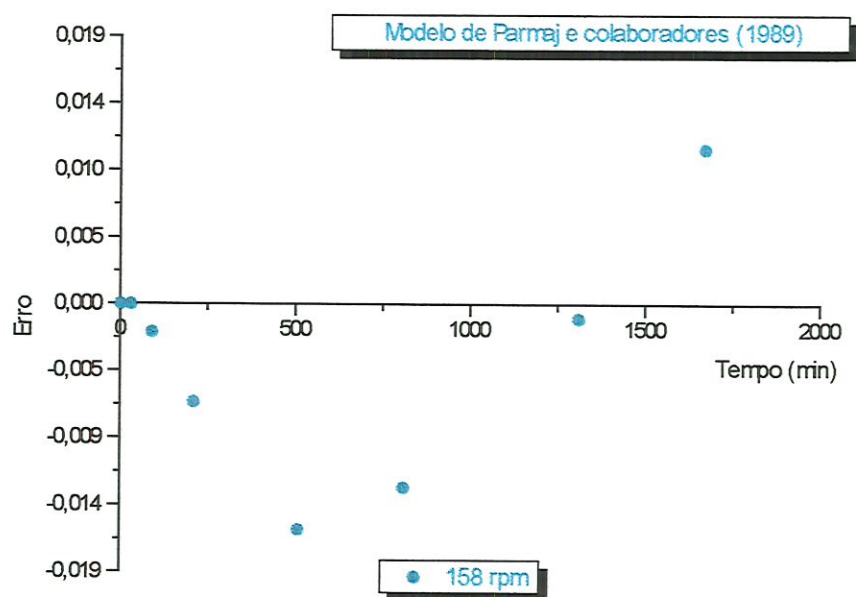


FIGURA 2.10 - Gráfico da distribuição de erros do modelo da equação (2.10).

Observa-se que as distribuições de erros dos modelos das equações (2.7) e (2.10) mostram uma tendência no espalhamento dos resíduos, demonstrando que ambos os modelos necessitam de ajustes para descrever de forma completa o processo de dissolução dos sólidos. Não obstante, os erros são pequenos.

SCHULZ e GIORGETTI (1987)²⁷ citado por SCHULZ (1989), analisando os dados coletados por SCHULZ (1985), observaram que a velocidade de dissolução variava com o tempo para os monocristais de cloreto de sódio. Provavelmente, porque a forma cúbica do cristal de NaCl variava, tendendo à forma esférica (SCHULZ, 1989). Isto permite justificar a tendência observada na Figura 2.9.

Devido às dificuldades de representar o processo de dissolução tridimensional, SCHULZ (1985) sugeriu um modelo de dissolução unidimensional.

²⁷SCHULZ, H.E.; GIORGETTI, M.F. 1987. Medida indireta do coeficiente de reoxigenação de águas naturais - Modelos matemáticos para a velocidade de desgaste de sondas solúveis. *Anais do I Simpósio Brasileiro de Transferência de Calor e Massa*, Campinas, São Paulo, p.179-87, citado por SCHULZ, H.E. 1989. *Investigação do mecanismo de reoxigenação da água em escoamentos e sua correlação com o nível de turbulência junto à superfície*. São Carlos, 865p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Considerou-se que o desgaste de um sólido de superfície plana em contato com um meio solvente em agitação turbulenta estacionária e homogênea pode ser expresso através de uma velocidade de desgaste admitida constante. Esta velocidade pode ser entendida como a variação temporal da espessura do sólido (Figura 2.11).

SCHULZ (1989)

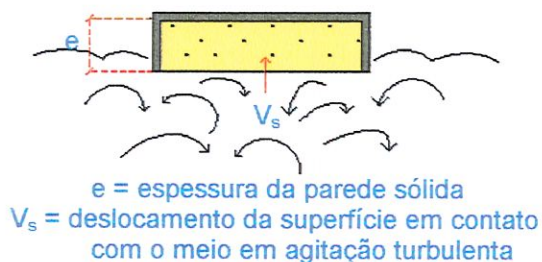


FIGURA 2.11 - Dissolução unidimensional. (Fonte: SCHULZ, 1989).

A citação direta de SCHULZ (1989) é descrita pela seguinte equação:

$$V_s = -\frac{de}{dt} \quad (2.11)$$

sendo,

V_s = velocidade de dissolução do sólido,

e = espessura da parede sólida, e

t = tempo de dissolução.

SCHULZ e GIORGETTI (1987) desenvolveram, a partir da equação (2.11), um modelo de dissolução unidimensional para sólidos solúveis. Assim,

$$de = -V_s dt \quad (2.12)$$

e

$$m = \rho V \quad e \quad e = \frac{m}{\rho A_s} \quad (2.13)$$

sendo,

m = massa do sólido,

ρ = massa específica do sólido,
 A_s = área superficial de contato entre sólido e líquido, e
 V = volume do sólido.

Substituindo a equação (2.13) em (2.12) e integrando, obtém-se

$$m - m_0 = -\rho A_s V_s t \quad (2.14)$$

ou

$$\frac{m}{m_0} = 1 - \frac{V_s}{L_0} t \quad (2.15)$$

De acordo com GIORGETTI (1990)²⁸, a determinação da velocidade de dissolução pode ser realizada em laboratório e/ou em campo, sendo somente necessário os seguintes parâmetros:

- ↳ dimensão característica inicial L_0 ,
- ↳ massa inicial m_0 ,
- ↳ massa instantânea m , e
- ↳ tempo de dissolução do sólido solúvel.

BICUDO (1988) apresentou o mesmo modelo da equação (2.15). Foi considerada uma dimensão linear x de um sólido sendo dissolvido ao longo do tempo t , então:

$$x = x(t) \rightarrow dx = -V_s dt \quad (2.16)$$

$$dW = \gamma A_s dx = -\gamma A_s V_s dt \quad (2.17)$$

$$\int_{W_0}^W dW = -\int_0^t \gamma A_s V_s dt \quad (2.18)$$

A integração da equação (2.18) conduz à forma final do modelo de dissolução que é dado por:

$$W_0 - W = \gamma A_s V_s t \quad (2.19)$$

²⁸ GIORGETTI, M. F. 1990. Reoxigenação natural de cursos de água - Metodologias para a medida de coeficiente de reaeração / Curso ministrado no CRHEA - SHS - EESC -USP (Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo), São Carlos.

sendo,

W_0 = peso inicial do sólido no tempo $t = 0$,

W = peso do sólido após um tempo de exposição t ,

γ = peso específico do sólido,

A_s = área superficial do sólido dado por πr^2 ,

V_s = velocidade de dissolução do sólido, e

t = tempo de exposição.

4. DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE DISSOLUÇÃO

GIORGETTI e GIANANTI, 1983) e GIANANTI (1986) coletaram os valores de massa (m) e tempo (t) de dissolução das balas de açúcar. Os valores de $\ln(m/m_0)$ em função de t foram demonstrados em gráfico, e o coeficiente de dissolução (K_s) foi determinado através do coeficiente angular das retas ajustadas pelo método dos mínimos quadrados, como ilustrado na Figura 2.12.

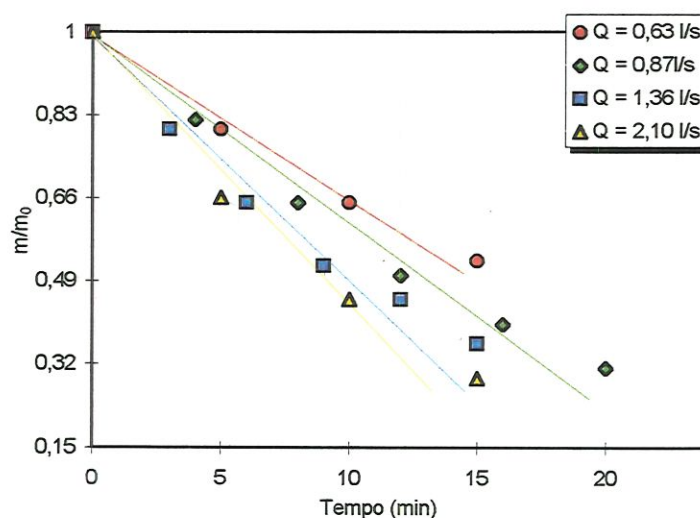


FIGURA 2.12 - Gráfico característico de um teste com sondas cilíndricas de açúcar para diferentes vazões, realizado em tanque de recirculação de água. (Fonte: GIORGETTI e GIANANTI, 1983).

Para estes primeiros estudos sobre dissolução das sondas, determinou-se um coeficiente de dissolução (K_s) com dimensão de T^{-1} , cujo valor foi correlacionado ao coeficiente de reaeração (K_2). Nos estudos posteriores, outros autores determinaram a velocidade de dissolução (V_s) com dimensão de

LT^1 , cujo valor foi correlacionado ao coeficiente global de transferência de massa (K_L).

Apesar do procedimento de determinação do coeficiente de dissolução não ser o mais indicado, a dissolução de sólidos foi sensível à turbulência do meio. Observa-se na Figura 2.12, que o processo de dissolução do sólido aumenta com a vazão.

Constatado o grande potencial do *Método das Sondas Solúveis*, esforços foram dispendidos na busca de modelos matemáticos que melhor representassem o processo da dissolução de sólidos e escolha do material mais apropriado para confecção das sondas.

SCHULZ (1985) determinou a velocidade de dissolução dos monocristais de NaCl, equação (2.6), através do método dos mínimos quadrados. Os valores de massa e tempo do processo de dissolução, Tabela 2.3, foram dispostos em gráfico de $(1/L_0)(\sqrt[3]{m/\rho})$ versus $V_s t/L_0$, como na Figura 2.13, e a expressão V_s/L_0 foi determinada através do coeficiente angular da reta.

TABELA 2.3 - Dados experimentais de SCHULZ (1985).

Tempo (min)	Massa (g)	$(1/L_0)(m/\rho)^{1/3}$	Dimensões do cristal		
			h_1 (cm)	h_2 (cm)	h_3 (cm)
0	18,605	2,047			
8	13,413	-	1,482	2,400	2,432
16	9,142	-	-	-	-
26	5,029	-	-	-	-
36	2,344	-	-	-	-

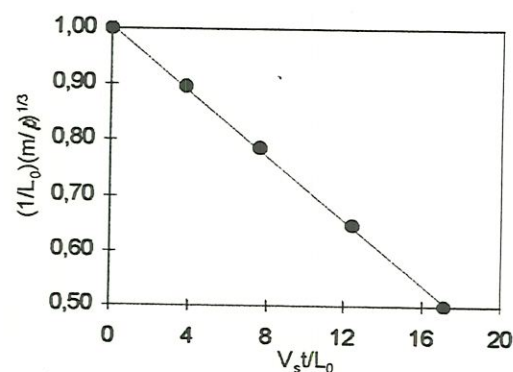


FIGURA 2.13 - Gráfico característico de um teste com sonda de monocristais de cloreto de sódio (Fonte: SCHULZ, 1985).

BICUDO (1988) estudou a dissolução de sondas de ácido benzóico, compactado a frio em latas cilíndricas de metal para induzir dissolução unidimensional, como na Figura 2.11. O modelo unidimensional foi considerado o melhor para essas condições experimentais. Os testes foram realizados em laboratório e campo.

A velocidade de dissolução dos sólidos foi determinada de acordo com o seguinte procedimento:

- ① os sólidos foram inicialmente pesados, depois submetidos à dissolução em água corrente e posteriormente retirados em 6 diferentes tempos de exposição.
- ② os sólidos foram secados em temperatura ambiente e pesados novamente.
- ③ a velocidade de dissolução foi calculada, pelo método dos mínimos quadrados, a partir do gráfico da diferença dos pesos *versus* tempo (Figura 2.14), de acordo com o modelo de dissolução da equação (2.19).

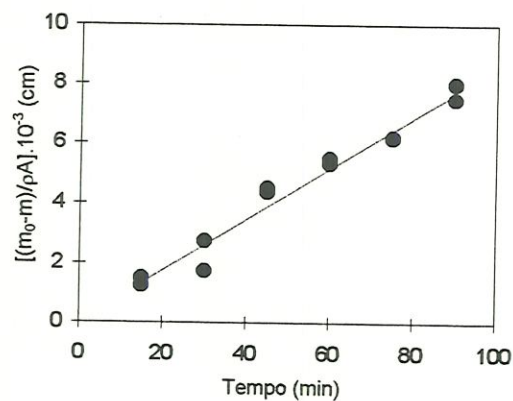


FIGURA 2.14 - Gráfico característico de um teste com sonda cilíndrica de ácido benzóico com dissolução unidimensional. (Fonte: BICUDO; 1988).

Não foi possível fazer análise comparativa com os dados experimentais de BICUDO (1988), porque os valores de massa inicial, massa dissolvida, massa específica, período de dissolução, área superficial inicial e área superficial instantânea não foram fornecidos.

Uma consideração a ser feita ao trabalho de BICUDO (1988), diz respeito aos valores da velocidade de dissolução, que foram mascarados pelo tipo de flutuador utilizado nos experimentos. SCHULZ (1985) já havia considerado o efeito de borda, inibição da turbulência, causado por determinados tipos de flutuadores no entorno das sondas.

SCHULZ (1989) estudou a dissolução de sondas cilíndricas de ácido oxálico compactado a frio, impermeabilizadas nas superfícies lateral e de topo com resina epoxi, para induzir dissolução unidimensional.

SCHULZ (1989) determinou a velocidade de dissolução das sondas de ácido oxálico, equação (2.15), através do método dos mínimos quadrados. Os valores de massa e tempo do processo de dissolução, Tabela 2.4, foram dispostos em gráfico de m/m_0 versus tempo, como na Figura 2.15, e a expressão V_s/L_0 foi determinada pelo coeficiente angular da reta.

TABELA 2.4 - Dados experimentais de SCHULZ (1989).

Tempo (min)	Massa (g)	m/m_0	ρ (g/cm ³)	$T_{\text{água}}$ (°C)	L_0 (cm)
0	8,899	1	1,51	24,5	0,543
10	8,051	0,905	1,49	-	-
25	6,941	0,780	1,50	-	-
40	5,826	0,655	1,52	-	-
50	5,087	0,572	1,54	-	-

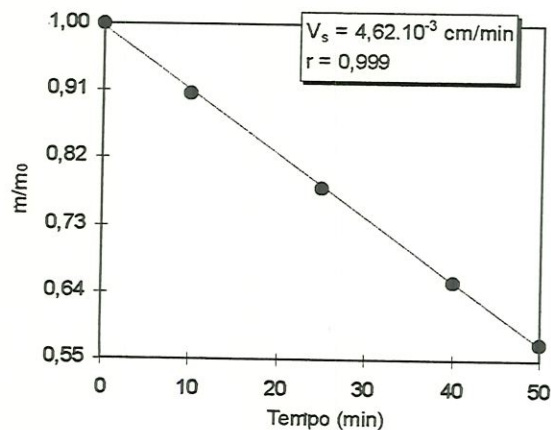


FIGURA 2.15 - Gráfico característico de um teste com sonda cilíndrica de ácido oxálico com dissolução unidimensional.

Diferentes valores da velocidade de dissolução foram determinados para experimentos distintos com as mesmas condições hidrodinâmicas. A causa dessa variação, observada por SCHULZ (1989), foi o efeito da temperatura sobre a taxa de dissolução. Esse efeito foi considerado irrelevante nos estudos de HIXSON e CROWELL (1931). Entretanto, é importante notar que um aumento de temperatura acelera o processo de dissolução e este efeito pode ser mais significativo em substâncias mais solúveis. No estudo efetuado por SCHULZ (1989), o efeito da temperatura foi também quantificado.

RODRIGUES (1996) determinou a velocidade de dissolução através do método dos mínimos quadrados. O modelo de Parmaj e colaboradores (1989), equação (2.10), foi ajustado a partir dos valores de $\frac{3m_0}{\rho_s A_0} \left[1 - \left(\frac{A_t}{A_0} \right)^{1/2} \right]$ em função do tempo

(t) dispostos em gráfico, como demonstrado na Tabela 2.5 e Figura 2.16.

TABELA 2.5 - Dados experimentais de RODRIGUES (1996).

Tempo (min)	Massa (g)	$(3m_0/\rho_s A_0) [1 - (A/A_0)^{1/2}]$	ρ (g/cm ³)	T _{ág. e ar} (°C)	R ₀ (cm)
0	7,0080	0	1,10	25	1,15
30	6,8764	0,0072	-	-	-
90	6,6010	0,0227	-	-	-
210	6,0470	0,0552	-	-	-
510	4,9355	0,1269	-	-	-
810	4,0920	0,1888	-	-	-
1310	3,0601	0,3011	-	-	-
1670	2,5766	0,3264	-	-	-

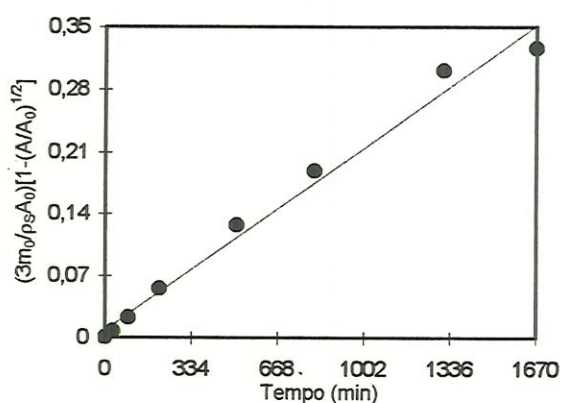


FIGURA 2.16 - Gráfico característico de um teste com sonda esféricas de ácido benzóico. (Fonte: RODRIGUES, 1996).

O coeficiente de transferência global de massa (K_c), da equação (2.10), foi igualado a velocidade de dissolução, V_s .

5. CORRELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE DE REAERAÇÃO (K_2) E A VELOCIDADE DE DISSOLUÇÃO (V_s)

GIANSANTI (1986) relacionou o coeficiente de dissolução (K_s) e o coeficiente de reaeração (K_2) através do gráfico da Figura 2.17, para os experimentos com balas de açúcar em uma caixa com recirculação de água. Os valores de K_s e K_2 , para as diferentes vazões imposta ao sistema, são apresentados na Tabela 2.6.

Os valores de K_s e K_2 foram determinados simultaneamente nas mesmas condições experimentais.

TABELA 2.6 - Dados experimentais de GIANSANTI (1986).

Vazão (l/s)	K_s (dia ⁻¹)	K_2 (dia ⁻¹)
0,95	91	2,4
1,36	112	3,3
1,66	127	4,4
1,80	134	5,3
1,94	141	7,7

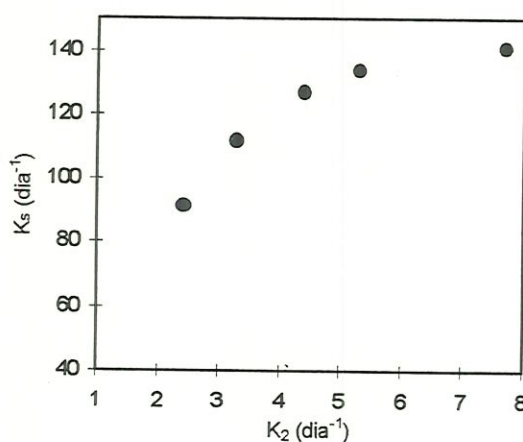


FIGURA 2.17 - Gráfico de correlação entre K_s e K_2 , característico dos testes com balas de açúcar (Fonte: GIANSANTI, 1986).

Em trabalhos com cristais de NaCl, SCHULZ (1985) determinou as equações que descrevem os processos de dissolução dos sólidos e reaeração, em função da vazão imposta ao sistema de recirculação de água no tanque. Uma relação funcional do tipo da equação (2.20) foi obtida entre K_2 e V_s .

$$K_2 = (\alpha V_s - \beta)^a \quad (2.20)$$

sendo,

α, β e $a =$ constantes.

As velocidades de dissolução dos sólidos e o coeficiente de reaeração foram determinados simultaneamente nas mesmas condições experimentais.

Para os dados experimentais de BICUDO (1988), realizados com as sondas de ácido benzóico, os valores de velocidade de dissolução V_s , coeficiente de reaeração K_2 , e coeficiente de transferência global de oxigênio K_L (Tabela 2.6) foram correlacionados como demonstrado nos gráficos das Figuras 2.18 e 2.19. Os valores dos coeficientes de correlação foram iguais a 0,864 e 0,957, respectivamente.

TABELA 2.7 - Dados experimentais de BICUDO (1988).

V_s (cm/min)	K_2 (min^{-1})	K_L (cm/min)
8,80E-05	3,94E-03	0,048
1,17E-04	8,56E-03	0,105
2,09E-04	1,68E-02	0,206
1,44E-04	1,20E-02	0,119
1,35E-04	1,11E-02	0,111
1,03E-04	7,52E-03	0,075
1,67E-04	1,47E-02	0,206
1,18E-04	8,01E-03	0,112
8,90E-05	4,86E-03	0,068
1,77E-04	2,31E-02	0,184
1,42E-04	1,69E-02	0,135
9,50E-05	8,68E-03	0,069

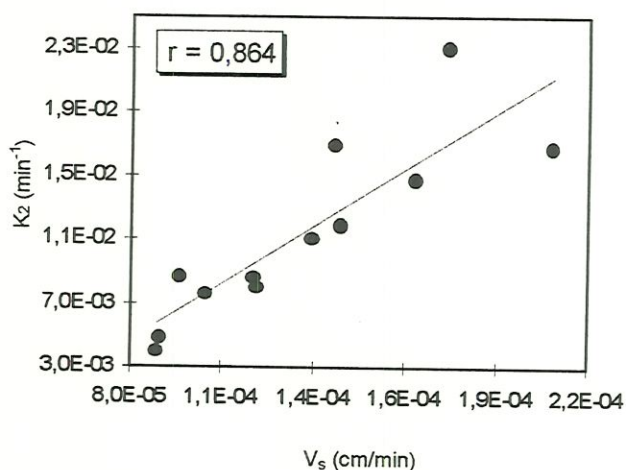


FIGURA 2.18 - Gráfico de correlação entre V_s e K_2 , característico dos testes com sondas de ácido benzóico. (Fonte: BICUDO, 1988).

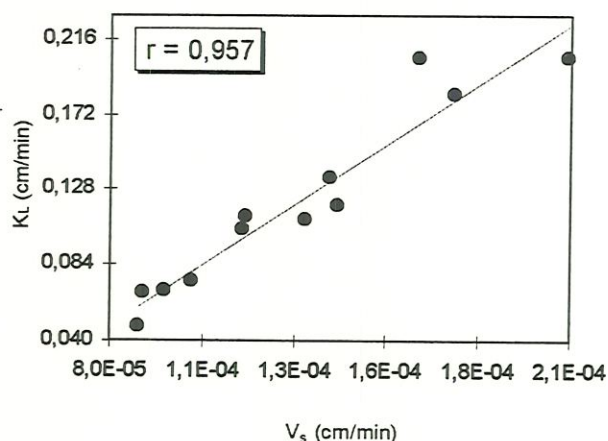


FIGURA 2.19 - Gráfico de correlação entre V_s e K_L , característico dos testes com sondas de ácido benzóico. (Fonte: BICUDO, 1988).

Segundo BICUDO (1988), ambos os coeficientes V_s e K_L são dimensionalmente compatíveis, LT^{-1} , e suas respostas às variações de velocidade e profundidade parecem ser similares. Os coeficientes V_s e K_2 são incompatíveis dimensionalmente, LT^{-1} e T^{-1} , respectivamente, e suas respostas às variações de velocidade e profundidade parecem não ser similares.

BICUDO (1988) também relacionou V_s/K_L em função do nível de turbulência, descrito pelo número de Reynolds (Re). Uma correlação de tendência linear, entre V_s/K_L e Re , foi sugerida por BICUDO (1988).

BICUDO (1988) aponta como fator limitante no Método das Sondas Solúveis, a diferença entre as áreas de contato entre sólido-líquido e gás-líquido.

SCHULZ (1989) fez uma análise conjunta dos dados de reaeração e dissolução das sondas. Os coeficientes de dissolução foram determinados por SCHULZ (1989), sendo que os coeficientes de reaeração foram utilizados de BARBOSA (1989) para as mesmas condições experimentais de rotação e temperatura, no mesmo equipamento experimental.

Através de uma elegante análise, SCHULZ (1989) demonstra que a razão V_s/K_L é uma função da temperatura, pressão e agitação para uma geometria mantida inalterada, como descrito pela equação (2.21).

$$\frac{V_s}{K_L} = f(T, p) g(\text{agitação}) \quad (2.21)$$

ou

$$\log V_s = \log K_L + \log f(T, p) + \log g(\text{agitação}) \quad (2.22)$$

Nota-se que foi possível separar, em funções distintas, a influência das grandezas pressão e temperatura (f) e da grandeza agitação (g).

Como resultado desta análise, as funções de temperatura e pressão e de agitação aparecem como parcelas adicionais ao termo $\log K_L$ da equação (2.22). A curva de correlação entre $\log V_s$ e $\log K_L$, como ilustrado na Figura 2.20, é função apenas da agitação quando a temperatura e pressão permanecem constantes, conforme SCHULZ (1989). Quando a temperatura e/ou pressão variam, a curva de correlação da Figura 2.20 sofre uma translação.

SCHULZ (1989) verificou que os pontos correspondentes às maiores temperaturas se encontram na parte superior da curva da Figura 2.20. Este fato sugere que um aumento de temperatura causa um deslocamento no sentido positivo do eixo $\log V_s$. O gráfico abaixo demonstra que o método de dissolução de sondas permitiu à avaliação do coeficiente de reeração para as condições experimentais em questão.

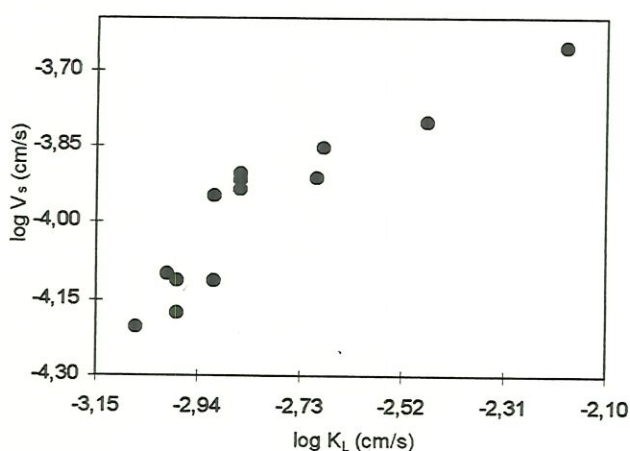


FIGURA 2.20 - Gráfico de correlação entre V_s e K_L , característico dos testes com sondas de ácido oxálico (Fonte: SCHULZ, 1989).

RODRIGUES (1996) obteve a mesma configuração dos resultados de SCHULZ (1989) para correlação entre V_s e K_L , para seus ensaios com sondas esféricas de ácido benzóico.

6. MATERIAIS TESTADOS NA CONFECÇÃO DAS SONDAS SÓLIDAS SOLÚVEIS

O primeiro material testado, por GIORGETTI e GIANANTI (1983), foi açúcar fundido na forma de balas. As balas de açúcar utilizadas nos experimentos foram do tipo comercial (industrializadas), portanto sem controle de qualidade conhecido. O açúcar possui alta solubilidade em água e apresentou resultados promissores.

SCHULZ (1985) e SCHULZ e GIORGETTI (1986) testaram monocristais de cloreto de sódio na forma cúbica. O sal de cloreto de sódio foi escolhido pelo baixo custo e sua solubilidade, que permitiu a realização de experimentos suficientemente longos e obtenção de dados significativos. Apesar dos resultados não terem sido satisfatórios para todas as condições experimentais ensaiadas, o uso de NaCl é viável.

BICUDO (1988) testou 4 substâncias diferentes: mentol, ácido salicílico, ácido benzóico e monocristais de cloreto de sódio. As duas primeiras substâncias foram descartadas pois apresentaram uma baixa taxa de dissolução. O ácido benzóico provou ter uma solubilidade razoável na faixa de temperatura entre 5 e 25°C.

Como o ácido benzóico é pouco solúvel, seu emprego em campo torna-se problemático, pois a sonda flutuante deverá percorrer longas distâncias para que a dissolução seja significativa.

SCHULZ (1989) testou pastilhas de ácido bórico, ácido benzóico, carbonato de sódio anidro e ácido oxálico. Os ácidos bórico e benzóico são muito e pouco solúveis, respectivamente, por isso foram descartados. O carbonato de sódio também foi descartado porque as características de dissolução não puderam ser controladas pela agitação. O ácido oxálico apresentou dissolução homogênea para as condições experimentais impostas ao sistema.

PARMAJ e colaboradores (1989) testaram a dissolução dos ácidos oxálico, succínico e bórico, esses três materiais são muito solúveis em água e foram testados na faixa de temperatura de 20 a 30°C. Os ácidos foram compactados a frio, individualmente, na forma de cilindros.

STAMATO (1992)²⁹ estudou o desenvolvimento de uma metodologia para confecção de pastilhas homogêneas, sem porosidade ou bolhas de ar, a partir dos processos de:

- a) fusão, moldagem e resfriamento, ou
- b) dissolução, moldagem e evaporação/solidificação.

Nove substâncias foram selecionadas de acordo com os critérios de solubilidade e ponto de fusão. O critério de solubilidade ficou restrito à faixa de 0,2 partes ponderais da substância por 100 partes ponderais do solvente a completamente solúvel e o critério de fusão ficou estabelecido para temperaturas acima de 50°C, considerando a utilização prática das sondas.

STAMATO (1992) confeccionou pastilhas cilíndricas de ácido benzóico, ácido oxálico, hidróxido de bário, nitrato de bário, nitrato de cromo, acetato cúprico, alume de potássio, iodato de potássio e tetraborato de sódio. O procedimento de confecção das sondas está descrito no Anexo I.

RODRIGUES (1996, p.109-11) testou sondas de ácido benzóico compactadas a frio no formato esférico. O processo de dissolução foi satisfatório, em que a forma esférica se fez presente até 50% de desgaste do seu volume inicial.

6.1. Processo de Confecção das Sondas

As balas de açúcar, utilizadas nos experimentos de GIORGETTI e GIANANTI (1983), são normalmente comercializadas; portanto, de fácil obtenção. Observa-se visualmente que, algumas dessas balas possuem pequenos vazios com bolhas de ar, essas bolhas surgem, provavelmente, durante a fabricação. O problema neste caso, é a falta de conhecimento das características físico-químicas da bala, que impossibilitam uma avaliação precisa.

Os processos de crescimento e clivagem dos monocristais de cloreto de sódio, empregados nos testes de SCHULZ (1985), foram realizados no Instituto de Física e Química de São Carlos. A forma das sondas resultou em um prisma de base quadrada de dimensões: 1,5 cm de altura e 2,5 cm de aresta.

Uma haste metálica foi fixada à sonda de NaCl através de massa adesiva (massa para vedação), como ilustrado na Figura 2.21. Esta haste, por sua vez, foi fixada à estrutura-suporte da Figura 2.25.

²⁹STAMATO, G.C. 1992. (USP. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Hidráulica e Saneamento). Relatório de monitoria.

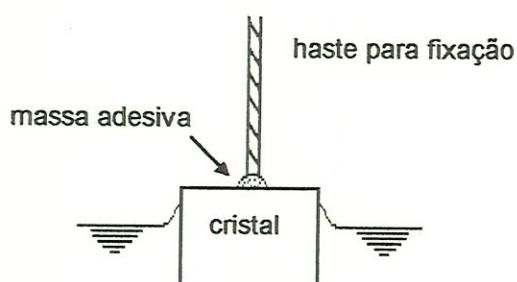


FIGURA 2.21 - Posição do cristal junto à superfície d'água. (Fonte: SCHULZ; 1985).

As sondas de ácido benzóico, usadas por BICUDO (1988), foram compactadas a frio em latas de metal (6,5 cm de diâmetro e 0,5 cm de altura) para induzir dissolução unidimensional. A carga de compactação aplicada foi de 100 kN/min (10.000 kgf/min). O excesso de material que ficava para fora do invólucro foi lixado rente a borda da lata de metal. A quantidade de massa compactada não foi fornecida, impossibilitando o cálculo da massa específica da sonda.

É importante alertar que o pó resultante do processo de lixação, por se tratar de um ácido, deve ser manuseado com cuidado, se necessário com utilização de pinças ou garras, máscara, luvas e no interior de uma capela.

PARMAJ e colaboradores (1989) compactaram a frio os ácidos oxálico, succínico e bórico, puros e individualmente, na forma de cilindros. A pressão de compactação empregada foi de 206,98 kgf/cm² (3.000 lbf/in²), e as dimensões do cilindro foram de 12,75 mm de diâmetro e 17,21-26,78 mm de comprimento. A quantidade de massa compactada não foi fornecida, impossibilitando o cálculo da massa específica da sonda.

SCHULZ (1989) compactou as sondas de ácido oxálico a frio utilizando um molde de aço. O molde era composto de um cilindro vazado com um pistão maciço em seu interior. A prensagem das sondas foi efetuada com uma carga de compactação de aproximadamente 45 kN (4.500 kgf). Obtendo-se pastilhas cilíndricas de 2,85 cm de diâmetro, 0,50 cm de altura, 5 g de massa e 1,56 g/cm³ de massa específica.

Um prego, de aproximadamente 2,5 cm de comprimento, foi colado no centro da pastilha e esse conjunto foi impermeabilizado com resina epoxi (cola da marca *Araldite*), como ilustrado na Figura 2.22.



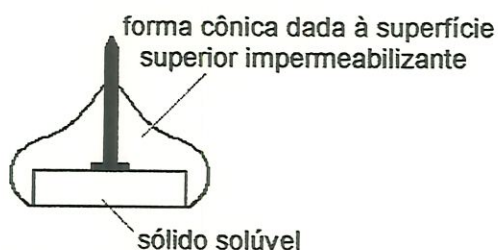


FIGURA 2.22 - Sondas cilíndricas circulares impermeabilizadas com resina (Fonte: SCHULZ, 1989).

O prego foi utilizado como haste de fixação no flutuador da Figura 2.25.

RODRIGUES (1996) confeccionou as sondas esféricas de ácido benzóico fundamentada no trabalho de GARIM (1994)³⁰. Três esferas de $1,10 \text{ g/cm}^3$ de massa específica foram produzidas com os seguintes diâmetros: 1,6 cm, 2,3 cm e 3,0 cm.

As esferas de ácido benzóico foram compactadas a frio com uma carga de 2.500 kgf (25 kN), em moldes como demonstrado na Figura 2.23.

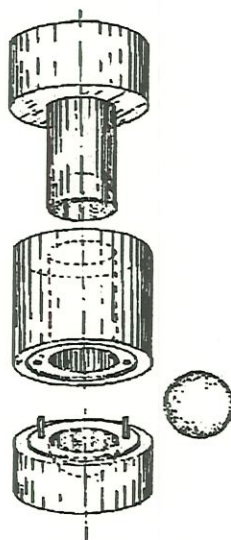


FIGURA 2.23 - Molde para confecção das sondas esféricas (Fonte: RODRIGUES, 1996).

As esferas foram perfuradas na superfície e a ponta de uma haste metálica, envolvida com cola, foi introduzida no orifício a fim de fixá-la em um conjunto de bóias (Figura 2.27).

³⁰ GARIM, M.M. 1994. Coeficiente de transferência de massa de um corpo submerso para um leito vibro fluidizado. Dissertação (mestrado) - São Carlos, Universidade Federal de São Carlos, citado por RODRIGUES, I.C. 1996. Determinação do coeficiente de reaeração superficial de um corpo d'água com o uso de sondas solúveis esféricas. São Carlos. 157p. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

6.2. Suportes Flutuadores das Sondas

De acordo com GIORGETTI e GIANANTI (1983), as balas de açúcar foram postas em flutuação na água através de uma bóia de isopor, como demonstrado na Figura 2.24. A esfera de isopor foi estabilizada, em posição submersa, por um pequeno contrapeso de chumbo, à profundidade média de 1 cm próximo à superfície.

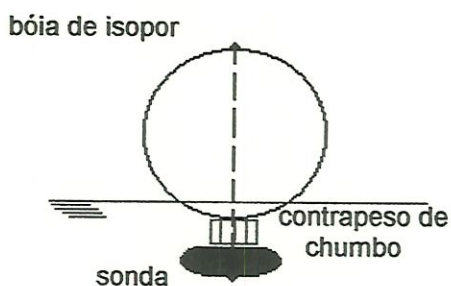


FIGURA 2.24 - Flutuador de isopor esférico (Fonte: GIORGETTI e GIANANTI; 1983).

Observa-se a existência de um efeito de borda da bóia, a turbulência em torno da sonda tende a ser modificada pelo tipo do flutuador.

Os monocristais de cloreto de sódio, dos experimentos de SCHULZ (1985), foram fixados à estrutura flutuante da Figura 2.25. O cristal foi imerso em água com sua superfície superior exposta ao ar, como ilustrado na Figura 2.21.

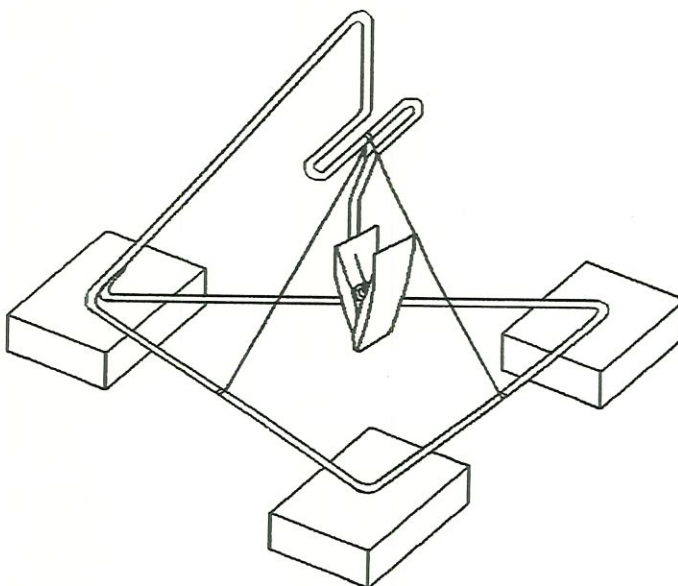


FIGURA 2.25 - Estrutura suporte flutuante (Fonte: SCHULZ, 1989).

Os flutuadores produzidos para conduzir as cápsulas metálicas contendo ácido benzóico compactado, dos experimentos de BICUDO (1988), foram confeccionados com poliestireno, como demonstrado na Figura 2.26.

Esses tipos de flutuadores interferem nas características turbulentas do meio, ocasionando um efeito de borda em torno da sonda, amortecendo o nível de agitação.

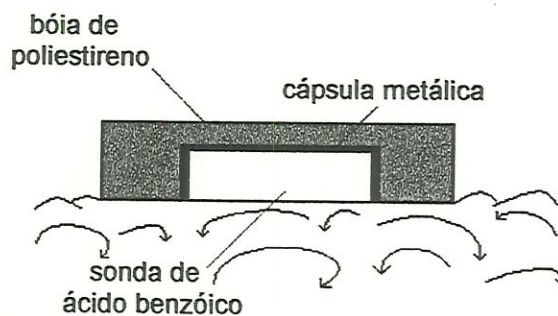


FIGURA 2.26 - Flutuador de poliestireno (Fonte: BICUDO, 1988).

As sondas cilíndricas circulares, dos experimentos de SCHULZ (1989), foram suspensas em água por um flutuador do tipo demonstrado na Figura 2.25.

RODRIGUES (1996) utilizou um sistema flutuador com bóias plásticas e hastes metálicas, como ilustrado na Figura 2.27.

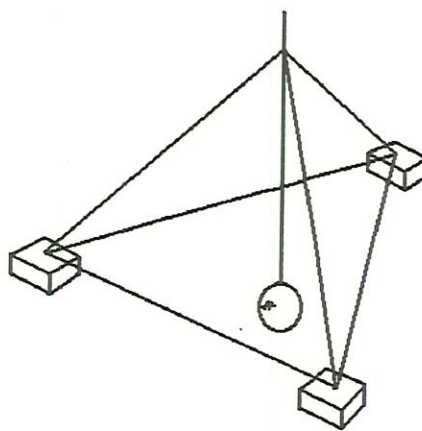


FIGURA 2.27 - Estrutura suporte flutuante (Fonte: RODRIGUES, 1996).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Esta pesquisa foi dividida em duas etapas. A primeira etapa compreendeu ao aperfeiçoamento da metodologia de dissolução unidimensional das sondas planas de ácido oxálico. Nesta fase, foram realizados testes experimentais de campo e laboratório com três tamanhos diferentes de sondas planas para ambos os casos. E a segunda etapa compreendeu à modelação matemática da dissolução de sondas esféricas de açúcar.

1. PLANEJAMENTO TEÓRICO - EXPERIMENTAL

Seguindo a linha de raciocínio de SCHULZ (1985), BICUDO (1988), SCHULZ (1989) e RODRIGUES (1996) optou-se pela realização simultânea dos processos:

- dissolução das sondas solúveis, e
- reaeração

Testes preliminares de laboratório e de campo foram realizados para o desenvolvimento da metodologia dessa pesquisa.

A partir da análise dos resultados preliminares, foram previstos:

- ↗ tamanho da amostra
- ↗ acuracidade dos resultados
- ↗ ordem de realização dos experimentos
- ↗ outros fatores considerados relevantes, que serão mencionados no decorrer deste trabalho.

Não foi possível planejar experimentos de campo para longos períodos de dissolução, porque a existência de obstáculos, meandros, altas velocidades do rio, trechos de corredeiras e outros fatores interferentes, impossibilitaram a realização dos ensaios.

Os testes de laboratório foram conduzidos em um tanque de agitação hidrodinâmica com impulsor rotativo, equipamento projetado por BARBOSA (1989) em seu estudo sobre técnica dos traçadores gasosos na avaliação do coeficiente de reaeração.

Os experimentos de campo foram realizados nos cursos d'água: *Ribeirão de Caldas* locado no município de Poços de Caldas (Estado de Minas Gerais), *Rio Jacaré-Guaçú* em Ribeirão Bonito (Estado de São Paulo), *Rio Laranja-Azeda* e *Ribeirão do Feijão* localizados em São Carlos (Estado de São Paulo).

Os testes de campo foram realizados em função dos trabalhos de pesquisa de BARBOSA (1997). Nestes testes, foram determinados simultaneamente os coeficientes de reaeração e as velocidades de dissolução das sondas planas de ácido oxálico.

A metodologia experimental empregada em laboratório foi fundamentada nas equações de reoxigenação e dissolução do sólido solúvel, equações (3.1) e (3.2), respectivamente. A primeira equação forneceu a variável K_2 , que foi convertida a K_L , e a segunda equação forneceu a variável V_s . Ambos os parâmetros K_L e V_s são dependentes do nível de turbulência do líquido e dos movimentos de macro-escala responsável pela taxa de renovação superficial. A correlação entre estes dois coeficientes foi o objetivo principal dessa pesquisa.

$$C = C_s - (C_s - C_0) \exp(-K_2 t) \quad (3.1)$$

$$\frac{m}{m_0} = 1 - \frac{V_s}{L_0} t \quad (3.2)$$

2. SONDAS PLANAS DE ÁCIDO OXÁLICO

O método empregado para confecção das sondas foi a compactação por pressão, utilizando-se uma prensa de moldagem. Esse método foi usado por BICUDO (1988) e SCHULZ (1989).

2.1. Matriz para Prensagem de Compactação

Com a finalidade de aperfeiçoar as idéias lançadas por SCHULZ (1989), optou-se por confeccionar as sondas em forma cilíndrica circular com superfície de dissolução plana para induzir desgaste unidimensional. O ácido oxálico foi prensado no interior de uma cápsula de alumínio.

Um prensa de moldagem foi empregada para garantir a criação de corpos compactados uniformes. Este equipamento consistiu em um conjunto de peças operado hidráulicamente por prensa manual, como ilustrado na Figura 3.1.



FIGURA 3.1 - Prensa hidráulica manual e matriz para prensagem de compactação.

A matriz para prensagem de compactação foi composta de três partes moduladas: superior, inferior e base, denominadas respectivamente de macho, fêmea e calço. Estas peças ficavam encaixadas, como ilustrado na Figura 3.2, contendo o material a ser prensado no interior da cápsula de alumínio. O sistema foi submetido à transmissão da força externa da prensa hidráulica manual.

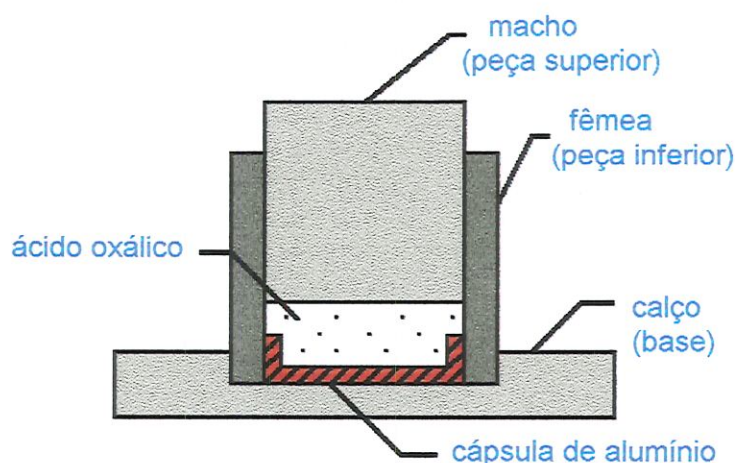


FIGURA 3.2 - Corte lateral da matriz para prensagem de compactação, contendo em seu interior: ácido oxálico e cápsula de alumínio.

A matriz foi construída em aço inoxidável para garantir maior durabilidade em função do contato com ácido oxálico, substância oxidante.

As laterais externa e interna das peças *macho* e *fêmea*, respectivamente, foram retificadas para assegurar perfeito encaixe e deslizamento das peças. Este procedimento evitou o vazamento do material durante a prensagem.

A cápsula de alumínio teve por finalidade impermeabilizar as superfícies de topo e lateral, para induzir um desgaste unidimensional das sondas quando expostas à ação da turbulência do meio. Somente a superfície da base ficou submetida à dissolução, Figura 3.3.

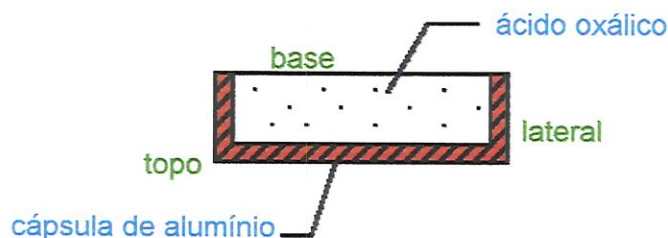


FIGURA 3.3 - Detalhe em corte lateral da sonda plana de ácido oxálico, impermeabilizada com cápsula de alumínio.

O procedimento de impermeabilização eliminou o trabalho artesanal de revestimento das superfícies de topo e lateral da sonda plana com cola *Araldite*, realizado por SCHULZ (1989), possibilitando uma produção padronizada em série com reuso do invólucro. A reutilização da cápsula de alumínio foi realizada através da remoção do material remanescente por imersão em água.

As cápsulas de alumínio foram confeccionadas mediante processo de repuxo das lâminas de alumínio em equipamento de torno, para obtenção das cápsulas com exato encaixe na parte inferior (fêmea) da matriz, Figura 3.2. As cápsulas foram repuxadas na *Oficina de Mecânica Fina do Departamento de Engenharia Elétrica (EESC-USP)*.

Três matrizes de tamanhos diferentes foram construídas na *Oficina Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos - USP* e suas dimensões médias estão descritas na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 - Dimensões das matrizes para prensagem de compactação.

Dimensões (mm)	PEQUENA	MEDIA	GRANDE
diâmetro da peça superior	25	34	50
altura da peça superior (pistão)	66	72	82
diâmetro da peça inferior	30	39	55
altura da peça inferior (cilindro vazado)	65,5	75	65
comprimento, largura e espessura da base	120x90x19	120x90x19	120x90x19
rebaixo da base	10	10	10

2.2. Materiais Componentes da Sonda

Os materiais escolhidos para confecção das sondas foram o ácido oxálico, lâmina de alumínio metálico e moeda de aço. O ácido oxálico para análise química foi adquirido na forma de partículas granuladas (pó) com diâmetro médio aproximado de 0,5 mm. A lâmina de alumínio metálico foi adquirida em forma de discos chapeados, próprio para repuxar e produzir as cápsulas. A moeda de aço constituiu dispositivo de fixação da sonda no suporte flutuador. O ácido oxálico constituiu a substância solúvel e a cápsula de alumínio compôs o invólucro impermeável da sonda.

A aglomeração das partículas de ácido oxálico ocorreu no interior da cápsula de alumínio quando se aplicou uma força na peça superior da matriz de prensagem de compactação.

A ação da pressão e do calor sobre a carga granulada produziu um fluxo para o interior da cápsula de alumínio e ela assumiu a forma da cavidade do molde, como demonstrado na Figura 3.4.

A prensagem de compactação da substância foi realizada propositadamente com um pequeno excesso de ácido oxálico. Esse excedente de material assegurou a integridade da cápsula de alumínio. O êmbolo (*macho*) da matriz, após receber a carga pré-estabelecida, não alcançou a cápsula, pois o material excedente compactado atingiu aproximadamente 1 mm de altura, como ilustrado na Figura 3.4.

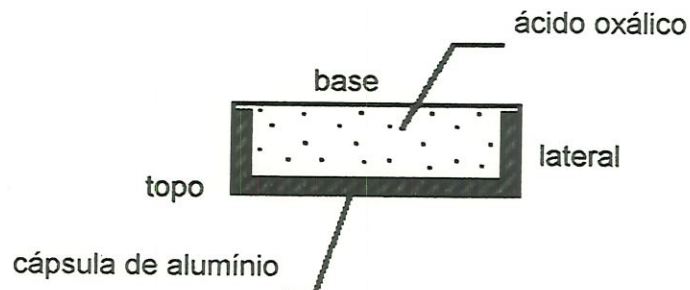


FIGURA 3.4 - Material excedente compactado.

O material em excesso foi desgastado rente à borda da cápsula de alumínio, através de dois tipos de lixas d'água, uma grossa e uma fina, de números 100 e 500, respectivamente. A lixa grossa foi utilizada para desgaste rápido e a lixa fina para dar acabamento liso e homogêneo à superfície. O material remanescente das lixações foi descartado.

Três tipos de sondas de diâmetros diferentes, designadas de pequena, média e grande, como ilustrado na Figuras 3.5, foram confeccionadas para avaliar e comparar o efeito da estrutura e escala de turbulência do meio sobre a dissolução das sondas.

As dimensões médias das sondas estão descritas na Tabela 3.2.

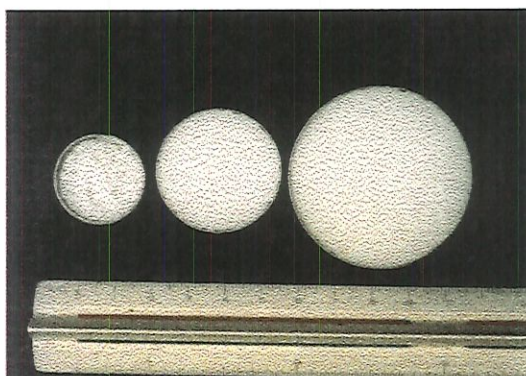


FIGURA 3.5 - Vista superior das sondas sólidas solúveis de diâmetros diferentes: pequena, média e grande.

TABELA 3.2 - Dimensões das sondas solúveis.

Dimensões	PEQUENA	MÉDIA	GRANDE
diâmetro interno (mm)	24,90	33,90	49,70
espessura da cápsula (mm)	0,60	0,70	1,50
altura interna (mm)	9,17	8,97	8,41
área interna (mm ²)	486,95	902,59	1 940,00

2.3. Determinação da Pressão de Compactação, Massa Específica e Força de Compactação

A pressão de compactação (τ) e a massa específica (ρ) foram mantidas constantes, para efetuar a comparação entre os processos de dissolução das sondas de tamanhos diferentes.

Por definição, a pressão de compactação e a massa específica são:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (3.3)$$

e

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.4)$$

respectivamente, sendo

τ = pressão de compactação,

F = força ou carga de compactação,

A = área interna da cápsula, onde atua a força de compactação,

ρ = massa específica,

m = massa da substância de compactação, e

V = volume interna da cápsula, onde a substância de compactação foi moldada.

Sabendo-se que, $V = AH$, sendo H igual a altura interna da cápsula de alumínio, as equações (3.3) e (3.4) podem ser comparadas, resultando na equação (3.5).

$$\frac{F}{m}H = \frac{\tau}{\rho} = \text{constante} \quad (3.5)$$

Observou-se que a força de compactação (F) é diretamente proporcional à variação da massa (m), para que as propriedades de pressão de compactação (τ) e massa específica (ρ) permanecessem constantes.

Para produzir sondas de tamanhos diferentes com as propriedades de τ e ρ iguais, foi necessário determinar as quantidades de massa e força de compactação.

A partir dos dados da Tabela 3.3, estabeleceu-se os valores das seguintes propriedades:

$\tau = 257,82 \text{ kgf/cm}^2$, e

$\rho = 1,45 \text{ g/cm}^3$.

TABELA 3.3 - Dados de carga e pressão de compactação.

Referência	BICUDO (1988)	PARMAJ (1989)	SCHULZ (1989)	RODRIGUES (1996)
substância	ácido benzóico	ácido oxálico	ácido oxálico	ácido benzóico
carga de compactação (kN)	100	-	45	25
pressão de compactação (kgf/cm ²)	301,39	206,98	703,95	-
massa específica (g/cm ³)	-	-	1,56	1,10

As cargas de compactação e massas de ácido oxálico foram determinadas através das equações (3.6) e (3.7), respectivamente, como demonstrado na Tabela 3.4

$$F_i = \tau A_i \quad (3.6)$$

$$m = \rho A_i H_i \quad (3.7)$$

sendo,

i = tamanho da sonda (pequena, média ou grande).

TABELA 3.4 - Força e massa de compactação das sondas pequena, média e grande.

Dimensões	PEQUENA	MÉDIA	GRANDE
área interna da cápsula de alumínio (cm ²)	4,87	9,03	19,40
altura interna da cápsula de alumínio (cm)	0,92	0,90	0,84
massa de ácido oxálico (g)	6,50	11,78	23,63
força de compactação (kgf)	1 255,58	2 328,11	5 001,78

2.4. Procedimento para Prensagem

2.4.1- Materiais

- ☒ Prensa hidráulica manual
- ☒ Matrizes para prensagem de compactação
- ☒ Cápsulas de alumínio
- ☒ Ácido oxálico
- ☒ Balança
- ☒ Espátula
- ☒ Papel de alumínio
- ☒ Funil de plástico
- ☒ Sacadores de madeira
- ☒ Luva de borracha
- ☒ Óleo lubrificante

2.4.2. Etapas para processamento de prensagem

- 1ª Montar a matriz com a cápsula de alumínio, como ilustrado na Figura 3.2, sem o macho.
- 2ª Colocar um pedaço de papel de alumínio no prato da balança.
- 3ª Tarar a balança.
- 4ª Pesar o ácido oxálico (massa correspondente ao tamanho da cápsula de alumínio), sobre o papel de alumínio, com auxílio da espátula.
- 5ª Introduzir o ácido oxálico na matriz com auxílio do funil.
- 6ª Introduzir peça superior na matriz.
- 7ª Posicionar matriz na prensa.
- 8ª Imprimir carga de compactação (correspondente à massa).
- 9ª Retirar o calço da matriz.
- 10ª Retirar a sonda da peça inferior com auxílio do sacador de madeira (peça cilíndrica vazada), como demonstrado na Figura 3.6, imprimindo força à peça superior.

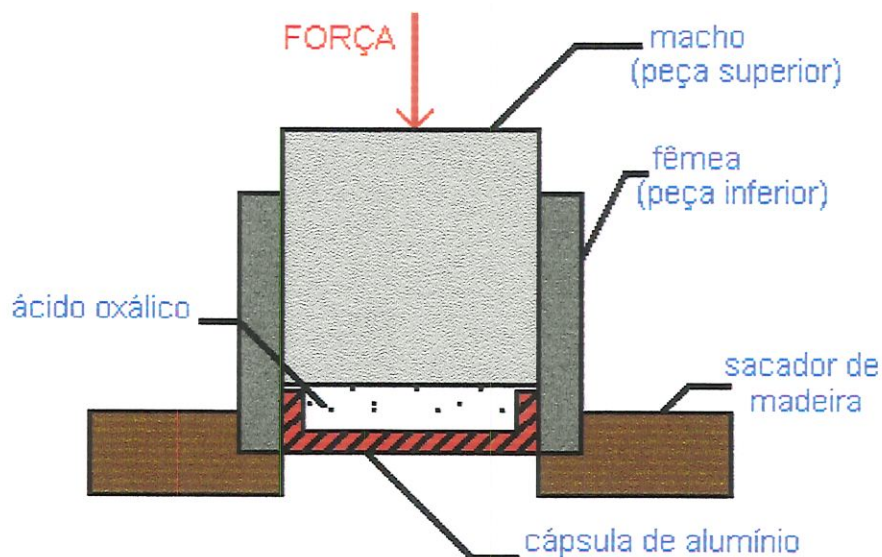


FIGURA 3.6 - Corte lateral da matriz de prensagem e sacador de madeira.

- 11ª Untar todas as peças da matriz com óleo lubrificante, após prensagem, para evitar oxidação.

Observação: deve-se evitar contato direto das mãos com o ácido (substância tóxica), utilizando a luva de borracha durante as etapas de prensagem.

3. SONDAS ESFÉRICA DE AÇÚCAR

Para realização dos testes de dissolução, optou-se por utilizar balas de açúcar comercial, vulgarmente conhecidas como *pirulitos*. As sondas esféricas de açúcar são confeccionadas industrialmente através de moldes e seus componentes básicos são: glicose, açúcar e água, segundo MIGUEL (1996)³¹.

As sondas esféricas de açúcar foram preparadas antes de cada teste de dissolução. Inicialmente elas foram submetidas a uma seleção, sendo que as sondas defeituosas (quebradas ou apresentando bolhas de ar em seu interior) foram eliminadas. Em seguida, as sondas foram lixadas para retirar a borda saliente resultante da moldagem durante a industrialização, como ilustrado na Figura 3.7. O processo de lixamento foi feito em um esmeril e depois com lixas d'água para dar um fino acabamento. A finalidade desta operação foi tornar a área superficial da esfera homogênea e seus diâmetros aproximadamente iguais ($D_0 = 23,81$ mm).

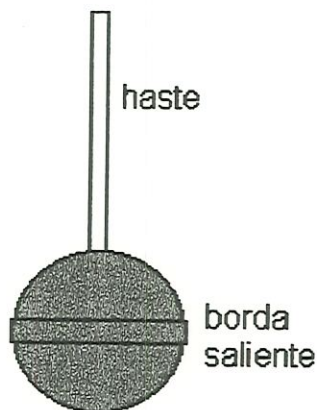


FIGURA 3.7 - Esfera de açúcar obtida comercialmente.

Após o lixamento, o diâmetro das sondas foi medido com auxílio de um paquímetro. Posteriormente, as esferas de açúcar, que são higroscópicas, foram envoltas com papel laminado para armazenamento.

³¹ MIGUEL. 1996. Comunicação pessoal. Telefone comercial (indústria de doces - Campinas/SP): (019) 241.2313 / 242.0512.

4. CONSTRUÇÃO DO SUPORTE FLUTUADOR

A base da sonda sólida solúvel, Figura 3.3, foi colocada em contato com a água próximo à superfície livre, através de um suporte flutuador. O suporte flutuador, demonstrado na Figura 3.8, consistiu em uma estrutura de ferro em forma de tripé com bases de isopor, na qual uma haste centrada suspendeu a sonda junto à superfície da água.

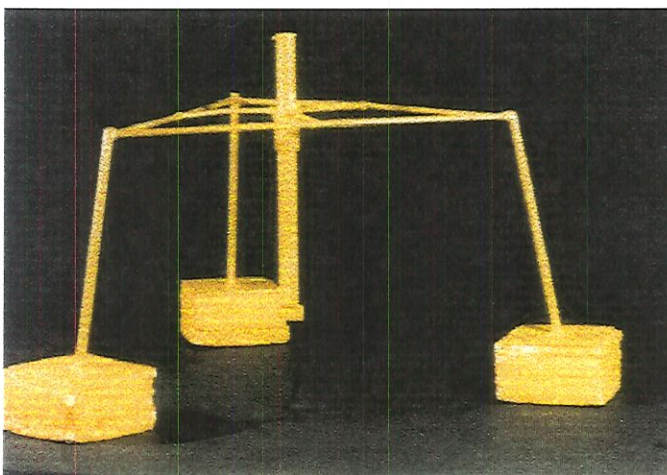


FIGURA 3.8 - Suporte flutuador das sondas solúveis.

A haste central do suporte foi construída com um tubo de pvc. A extremidade da haste foi dotada de um acessório regulador de altura, cuja mobilidade permitiu ajustar a sonda solúvel próximo a superfície da água. A extremidade inferior da haste foi dotado de um ímã para fixar a sonda, como ilustrado na Figura 3.9.

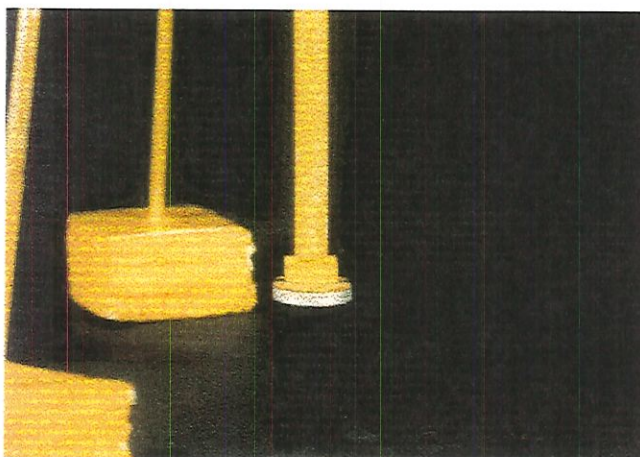


FIGURA 3.9 - Haste central do suporte flutuador dotado de ímã para fixação da sonda solúvel.

Para fixar o topo da sonda ao ímã, colou-se uma chapa metálica cilíndrica de ferro do tamanho proporcional a superfície do topo. Esta medida foi adotada porque o invólucro da sonda era de material (alumínio) não aderente ao ímã. Duas placas de ferro foram coladas em cada lateral da barra imantada, para direcionar e aumentar o fluxo magnético do ímã. Esse procedimento impediu que as sondas se desprendessem do suporte devido aos obstáculos durante os ensaios de campo.

As bases flutuadoras de isopor guardaram uma certa distância das sondas, para não mascarar o nível de turbulência que chegavam até as sondas. As bases de isopor também serviram de proteção às sondas, fixadas ao centro da estrutura, para eventuais barreiras.

O flutuador foi construído em forma de tripé para produzir movimento de rotação e desvio de obstáculos.

Três estruturas flutuadoras, de mesmo tamanho, foram construídas para que os ensaios de campo fossem realizados simultaneamente com os três diferentes tamanhos de sondas.

As peças componentes do suporte flutuador estão indicadas na Figura 3.10 e as dimensões médias das peças estão descritas na Tabela 3.5.

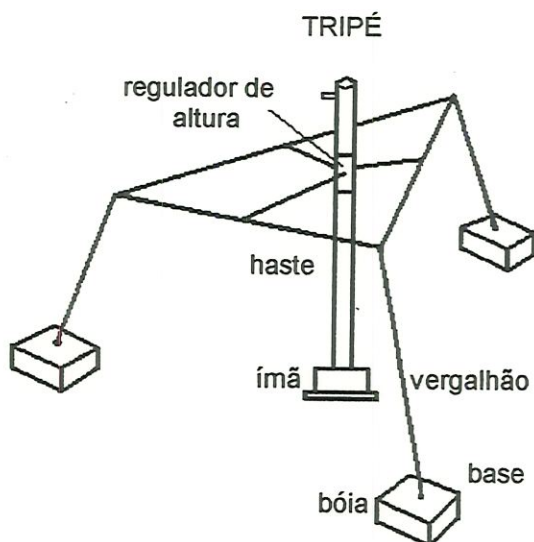


FIGURA 3.10 - Peças componentes do suporte flutuador.

TABELA 3.5 - Dimensões do suporte flutuador.

PEÇAS	Altura (cm)	Diâmetro ou Largura (cm)	Material	Massa (kg)
tripe	28	43	aço 1020	1,6
vergalhão	-	1,7	aço 1020	-
haste	30,6	1,27	pvc	-
regulador de altura	4,5	1,67	aço 1020	-
base	0,2	10	aço 1020	-
bóia	6,5	11	isopor	-
ímã	1,5	3,3	ferrite	-

5. TESTES PRELIMINARES

5.1. Testes de Laboratório

Testou-se a linearidade da taxa de dissolução das sondas de ácido oxálico, como previsto no modelo matemático (equação 2.15) e testou-se o comportamento de dissolução das sondas esféricas de açúcar.

5.1.1- Materiais

- ☒ Sondas de ácido oxálico e sondas esféricas de açúcar
- ☒ Balança
- ☒ Papel absorvente
- ☒ Tanque de agitação hidrodinâmica (Figura 3.11)

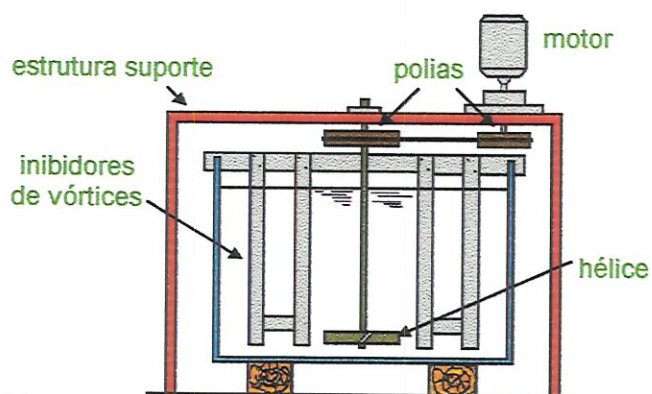


FIGURA 3.11 - Tanque de agitação hidrodinâmica com impulsor rotativo. (Adaptado de SCHULZ; 1989, p.480).

5.1.2- Etapas do procedimento de dissolução da sonda sólida

☒ SONDAS DE ÁCIDO OXÁLICO

- 1ª Umedecer a sonda, conjunto de cápsula de alumínio e ácido oxálico prensado (Figura 3.3).
- 2ª Secar, cuidadosamente, a sonda com papel absorvente.
- 3ª Determinar a massa inicial (m_0) da sonda,
- 4ª Colocar a sonda solúvel em contato com a superfície turbulenta da água contida em um tanque de agitação hidrodinâmica, suspensa por um suporte fixo.
- 5ª Registrar o intervalo de tempo de dissolução (t).
- 6ª Retirar a sonda do tanque e secá-la cuidadosamente.
- 7ª Pesar novamente a sonda (m - massa instantânea).

Esse procedimento foi repetido algumas vezes, com a mesma sonda, para avaliar a linearidade do gráfico de m/m_0 versus t , com exemplificado na Tabela 3.6 e Figura 3.12.

TABELA 3.6 - Dados experimentais da dissolução de uma sonda cilíndrica de ácido oxálico.

Tempo (min)	m/m_0
0	1
1,22	0,990
2,01	0,984
3,04	0,979

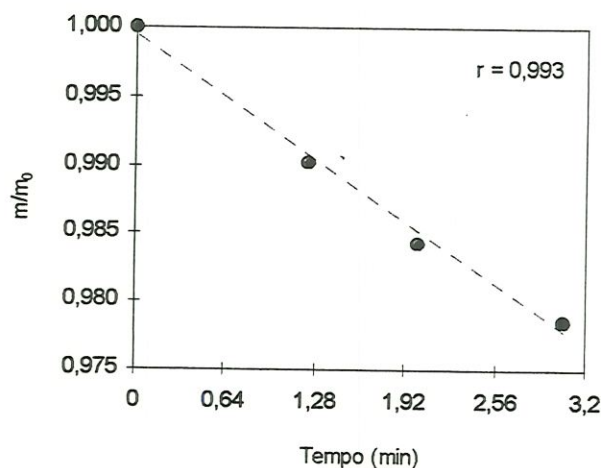


FIGURA 3.12 - Gráfico de m/m_0 em função do tempo.

A sonda apresentou um limite de solubilidade, dependente do nível de agitação. Após um período de exposição ao meio turbulento, ocorreu um descolamento completo do material prensado da cápsula de alumínio.

O período de descolamento foi previsível em testes de laboratório. Entretanto, esse período de descolamento não pode de ser quantificado nos ensaios de campo, devido às condições adversas. Uma alternativa para contornar esse problema, foi usar bom senso e a experiência adquirida nos testes de laboratório para evitar perdas dos dados de campo.

⊗ SONDAS ESFÉRICAS DE AÇÚCAR

1ª Umedecer a sonda, somente a esfera (Figura 3.13).

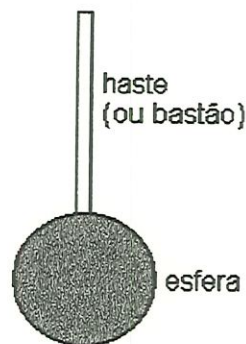


FIGURA 3.13 - Sonda esférica de açúcar.

2ª Secar, cuidadosamente, a sonda com papel absorvente.

3ª Determinar a massa inicial (m_0) da sonda,

4ª Colocar a sonda solúvel em contato com a superfície turbulenta da água contida em um tanque de agitação hidrodinâmica, suspensa por um suporte fixo.

5ª Registrar o intervalo de tempo de dissolução (t).

6ª Retirar a sonda do tanque e secá-la cuidadosamente.

7ª Pesar novamente a sonda (m - massa instantânea).

A mesma sonda foi submetida ao processo de dissolução até atingir um intervalo de tempo de 15 min aproximadamente. Esse intervalo máximo de tempo foi estabelecido em função da forma esférica da sonda, que permaneceu inalterada. Os dados experimentais de massa *versus* tempo dispostos em gráfico apresentaram baixo grau de dispersão.

5.2. Testes de Campo

A taxa de dissolução das sondas de ácido oxálico em testes de campo apresentou o mesmo comportamento linear verificado nos ensaios de laboratório.

As sondas esféricas de açúcar não foram testadas em campo devido à inexistência de um modelo matemático que descrevesse o fenômeno de dissolução.

6. DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE AMOSTRAS

A determinação do número de amostras mínimo deu-se em função das condições econômicas e operacionais.

A dificuldade para realização dos trabalhos de campo foi fator preponderante para otimização dos ensaios. Os trabalhos de campo iniciavam-se a partir da reunião de uma equipe qualificada. Os materiais e equipamentos preparados para os experimentos eram transportados desde o laboratório até o local à beira do rio. Em alguns casos, a distância percorrida foi superior a 150 km, sendo necessário alojamentos, refeições e disponibilidade de tempo. O acesso até a margem do rio muitas vezes era íngreme, tornando-se difícil o carregamento dos materiais e equipamentos.

De acordo com VERANI (1993)³¹, a determinação do número mínimo de amostras implicou na utilização das seguintes equações:

$$s_{\bar{x}}^2 = \frac{s^2}{n} \quad (3.8)$$

e

$$s^2 = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (3.9)$$

Substituindo a equação (3.2) em (3.1), obtém-se:

$$s_{\bar{x}}^2 = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n(n - 1)} \quad (3.10)$$

³¹ VERANI, J.R. *Estatística aplicada à ecologia*. Curso ministrado na UFSCar (Universidade Federal de São Carlos), São Carlos, no período de junho - julho, 1993.

sendo,

$s_{\bar{x}}^2$ = variância da média da amostra,

s^2 = variância da amostra,

n = número de amostras, e

\bar{x} = média da amostra.

No *Método da Variância da Média* indicado por VERANI (1993), a variância da média tende a diminuir quando se aumenta o número de amostras. Esta diminuição é assintótica e verifica-se que um n amostral muito elevado apresenta basicamente a mesma variância da média de um n amostral menor.

☒ SONDAS PLANAS DE ÁCIDO OXÁLICO

O número de amostras para o processo de dissolução das sondas de ácido oxálico foi determinado através do *Método da Variância da Média* como demonstrado no Anexo II.

A Figura 3.14 sugeriu um número mínimo de sete amostras, sondas de tamanho médio, para que os dados fossem representativos. Os números de 11 a 12 e de 10 a 11 amostras foram observados para os tamanhos de sonda pequeno e grande, respectivamente.

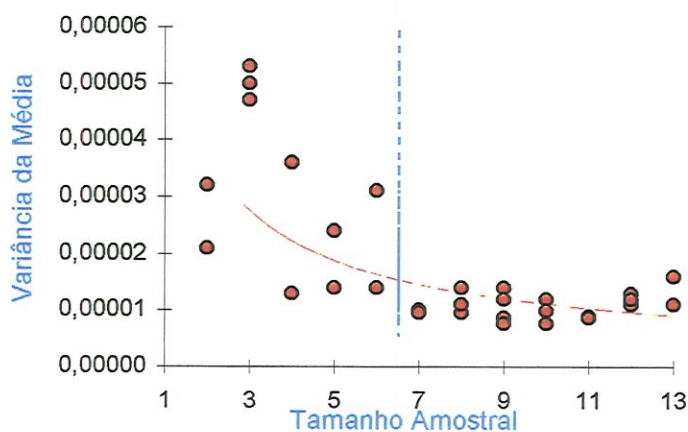


FIGURA 3.14 - Determinação do número de amostras.

⊗ SONDAS ESFÉRICAS DE AÇÚCAR

O número de amostras para o processo de dissolução das sondas esféricas de açúcar foi determinado em função do tempo em que a forma da sonda permaneceu inalterada (item 5.1.2).

O tempo médio de dissolução, para cada nível de agitação, foi aproximadamente 15 min. Desta forma, 15 sondas esféricas de açúcar foram dissolvidas. A primeira sonda sofreu um desgaste de 1 min, a segunda sonda foi solubilizada durante 2 min e assim sucessivamente.

7. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA OS TRABALHOS DE CAMPO

O Método da Sonda Solúvel foi conduzido em conjunto com o Método dos Traçadores, pesquisa de doutoramento desenvolvida por BARBOSA. Ambos os métodos foram empregados na determinação da velocidade de dissolução (V_s) e coeficiente de reaeração (K_2), respectivamente. O Método dos Traçadores foi escolhido como método comparativo.

Uma equipe de nove pessoas, três técnicos e seis estudantes de pós-graduação do Departamento de Hidráulica e Saneamento (EESC - USP), foi mobilizada para realização dos dois métodos, com uma duração média dos trabalhos de campo de aproximadamente oito horas.

Um dia antes de cada trabalho de campo, as seguintes atividades eram realizadas: reconhecimento do rio, seleção das seções para tomada de dados e determinação dos parâmetros velocidade, vazão, profundidade e largura de cada seção.

Os experimentos de campo foram realizados no *Ribeirão de Caldas* (Poços de Caldas - MG), *Rio Jacaré-Guaçú* (Ribeirão Bonito - SP), *Ribeirão do Feijão* (São Carlos - SP) e *Rio Laranja-Azeda* (São Carlos - SP).

Os testes de campo foram realizados antes dos experimentos de laboratório, porque havia necessidade de se acompanhar os trabalhos de campo de determinação do K_2 desenvolvidos por BARBOSA, citado anteriormente.

Cada ponto da curva experimental de m/m_0 em função do tempo, como demonstrado na Figura 3.12, correspondeu a uma sonda de ácido oxálico dissolvida. Esse procedimento foi adotado porque não foi possível realizar a pesagem da sonda imediatamente após a sua dissolução, devido à falta de disponibilidade em se utilizar uma balança analítica nos ensaios de campo.

Portanto, optou-se determinar cada ponto da curva m/m_0 versus tempo com uma sonda dissolvida para cada intervalo de tempo.

7.1. Método da Sonda Solúvel. Dissolução das Sondas Planas de Ácido Oxálico

7.1.1- Materiais

- ☒ Sondas: pequena, média e grande
- ☒ Balança
- ☒ Suportes flutuadores
- ☒ Cronômetro

7.1.2- Etapas da coleta de dados

- 1ª Determinar as massas iniciais das sondas de tamanhos pequeno, médio e grande.
- 2ª Realizar a Técnica dos Traçadores.
- 3ª Deixar a deriva, simultaneamente, os três flutuadores com uma sonda de cada tamanho.
- 4ª Retirar as sondas do rio, registrando os períodos de dissolução de cada sonda.
- 5ª Secar as sondas ao ar livre.
- 6ª Determinar as massas das sondas, após secagem.
- 7ª Dissolver completamente o material remanescente por imersão em água, para reutilização das cápsulas de alumínio.

Observações:

- o processo de secagem não pode ser realizado em estufa, porque a substância é um ácido.
- o processo de secagem ocorreu em uma semana aproximadamente.
- as massas finais só foram consideradas após sucessivas pesagens, quando o peso ficou constante.

7.2. Método dos Traçadores

O Método dos Traçadores não faz parte do escopo desse trabalho.

Os valores dos coeficientes de reaeração dos trechos estudados e a vazão, velocidade, profundidade, largura e número de Reynolds das seções dos rios foram gentilmente fornecidos por BARBOSA.

8. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA LABORATÓRIO

As velocidades de dissolução das sondas (V_s) foram determinadas pelo Método da Sonda Solúvel, empregando a equação (3.2) e os coeficientes de reaeração (K_2) foram estimados através da coleta dos dados de concentração instantânea de OD (C) e tempo (t), empregando a equação (3.1).

8.1. Método da Sonda Solúvel. Dissolução das Sondas Planas de Ácido Oxálico

8.1.1- Materiais

- ☒ Sondas: pequena, média e grande
- ☒ Balança
- ☒ Suporte flutuador
- ☒ Cronômetro

8.1.2- Etapas da coleta de dados

- 1^a Umedecer a sonda, conjunto de cápsula de alumínio e ácido oxálico prensado (Figura 3.3).
- 2^a Secar, cuidadosamente, a sonda com papel absorvente.
- 3^a Determinar a massa inicial (m_0) da sonda,
- 4^a Colocar a sonda solúvel em contato com a superfície turbulenta da água contida em um tanque de agitação hidrodinâmica, suspensa pelo suporte da Figura 3.8.
- 5^a Registrar o tempo de dissolução (t) com o cronômetro.
- 6^a Retirar a sonda do tanque e secá-la cuidadosamente.
- 7^a Pesar novamente a sonda (m - massa instantânea).

Observações:

- uma única sonda foi empregada em apenas um processo de dissolução.
- o nível de agitação do tanque foi determinado pela velocidade de rotação imposta ao sistema. As velocidades de rotação utilizadas nos experimentos foram: 62, 110, 158, 206 e 255 rpm.

8.2. Método da Sonda Solúvel. Dissolução de Sondas Esféricas de Açúcar**8.2.1- Materiais**

- ☒ Sondas esféricas de açúcar
- ☒ Balança
- ☒ Suporte flutuador
- ☒ Cronômetro
- ☒ Papel absorvente

8.2.2- Etapas de coleta dos dados

- 1ª Umedecer a sonda, somente a esfera (Figura 3.13).
- 2ª Secar, cuidadosamente, a sonda com papel absorvente.
- 3ª Determinar a massa inicial (m_0) da sonda,
- 4ª Colocar a sonda solúvel em contato com a superfície turbulenta da água contida em um tanque de agitação hidrodinâmica, suspensa pelo suporte da Figura 2.27, o mesmo suporte utilizado por RODRIGUES (1996).
- 5ª Registrar o tempo de dissolução (t) com o cronômetro.
- 6ª Retirar a sonda do tanque e secá-la cuidadosamente.
- 7ª Pesar novamente a sonda (m - massa instantânea).

Observações:

- uma única sonda foi empregada em mais de um processo de dissolução.
- o nível de agitação do tanque foi determinado pela velocidade de rotação imposta ao sistema. As velocidades de rotação utilizadas nos experimentos foram: 62, 110, 158, 206 e 255 rpm, as mesmas velocidades de rotação empregadas por RODRIGUES (1996).

8.3. Método Eletroquímico para Determinação de K_2

Como as velocidades de rotação empregadas nos experimentos foram as mesmas utilizadas por RODRIGUES (1996) e BARBOSA (1989), então os coeficientes de reaeração considerados foram os mesmos obtidos por RODRIGUES (1996) para as velocidades de rotação: 62, 110, 158, 206 e 255 rpm, e BARBOSA (1989) para a velocidade de rotação: 68 rpm. Os coeficientes de reaeração obtidos por RODRIGUES e BARBOSA foram corrigidos para a temperatura de 25°C.

A determinação dos coeficientes de reaeração (K_2) foi estimada através da concentração instantânea de OD (C) e tempo (t), empregando a equação (3.1).

A concentração de OD presente na água do tanque da Figura 3.11 foi obtida com um medidor do tipo eletroquímico da marca *Sauerstoffmeßgerät* - modelo AM 221, com incerteza de $\pm 0,10$ mg/L. O medidor consistia de uma sonda contendo eletrodos submersos em um líquido eletrolítico separado por uma membrana permeável ao oxigênio. O oxigênio dissolvido difunde-se através da membrana, indo em direção a um cátodo de potencial elétrico constante, sendo então reduzido eletroquimicamente com geração de uma corrente elétrica de intensidade proporcional à concentração de OD, RODRIGUES (1996).

O medidor eletroquímico foi calibrado por comparação com o método titulométrico de determinação de OD, denominado *Método de Winkler*. A calibração apresentou um comportamento linear quando ambos os métodos foram comparados. Este procedimento consta nas normas da ASCE (1984).

Um experimento para determinação de K_2 consistiu em definir, inicialmente, a velocidade de rotação que seria imposta ao sistema. Uma vez escolhida a velocidade de rotação, o sistema de polias do tanque de agitação mecânica era ajustado e o tanque era preenchido com água até completar 100 L. Em seguida, a água era deaerada até que a concentração de OD atingisse aproximadamente 2 mg/L. A água era então aerada até que não houvesse mudança significativa nas concentrações de OD.

O processo físico de deaeração foi efetuado de acordo com o método da cavitação forçada, descrito por MAXWELL e HOLLEY (1969). Esse método consiste em bombear a água em circuito fechado passando por uma placa de orifício, produzindo uma região de baixa pressão e alta velocidade na linha de sucção da bomba. A baixa pressão causa cavitação e a formação de bolhas de vapor de água retiram os gases dissolvidos na água. As bolhas são descarregadas no tanque e posteriormente se desprendem da água através da

superfície livre. A aeração se dava na superfície através da agitação da água com hélices em movimento giratório dentro do tanque.

Uma descrição mais detalhada do procedimento de determinação do coeficiente de reaeração encontra-se em COSTA (1992).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS, ANÁLISES E DISCUSSÕES

Os resultados da primeira etapa dos experimentos correspondem às dissoluções unidimensionais das sondas planas de ácido oxálico. Nesta fase, foram realizados testes experimentais com 3 tamanhos diferentes de sondas em laboratório e em campo. O modelo matemático empregado para descrever o processo de dissolução das sondas planas foi o mesmo modelo empregado por SCHULZ e GIORGETTI (1987), equação (2.15) apresentada no *Capítulo 2*.

A segunda etapa dos experimentos compreendeu às dissoluções das sondas esféricas de açúcar. Todas as sondas esféricas de açúcar apresentavam diâmetros aproximadamente iguais. Um modelo matemático, fundamentado na *Lei da Raiz Cúbica*, foi desenvolvido para descrever o processo de dissolução.

A apresentação dos resultados obtidos nos testes de campo e de laboratório foi dividida em:

- Determinação das velocidades de dissolução da sonda (V_s)
- Determinação dos coeficientes de reaeração (K_2)
- Correlação entre os coeficientes de transferência de massa
- Comparação dos resultados

1. RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE DISSOLUÇÃO DAS SONDAS PLANAS DE ÁCIDO OXÁLICO

Um total de 351 sondas planas de ácido oxálico foram induzidas à dissolução unidimensional em testes de campo e de laboratório. 171 sondas planas foram utilizadas nos experimentos de campo e 180 sondas foram utilizadas nos experimento de laboratório.

1.1. Resultados dos Testes Experimentais Realizados em Campo

Em função das dificuldades para realização dos trabalhos de campo, citadas no item 6 do *Capítulo 3*, foram dissolvidas em cada experimento: 11 sondas de tamanho pequeno, 8 sondas de tamanho médio e 11 sondas de tamanho grande.

Cada conjunto de sondas de tamanhos pequeno, médio e grande foi definido de acordo com a determinação do número de amostras mínimo para realização de cada experimento, como descrito no item 5 do *Capítulo 3*.

Os experimentos de dissolução nos testes de campo forneceram os dados de variação da massa das sondas em função do tempo. Esses dados se mostraram lineares para todas as situações de agitação ensaiadas nos rios, como demonstrado no exemplo da Tabela 4.1 e Figura 4.1.

TABELA 4.1 - Dados experimentais do processo de dissolução das sondas de tamanho pequeno, realizado no Rio Laranja-Azeda (São Carlos/SP) com temperatura da água de 20°C.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,0000
1	10,485	10,260	0,41	0,9785
2	11,881	11,074	6,18	0,9321
3	11,681	11,510	1,02	0,9854
4	11,938	11,790	0,79	0,9876
5	12,136	11,859	2,03	0,9772
6	12,206	11,930	1,17	0,9774
7	12,523	11,434	7,05	0,9130
8	12,357	11,523	5,32	0,9325
9	13,104	11,291	11,57	0,8616
10	12,007	11,502	2,99	0,9579
11	12,601	11,084	9,41	0,8796

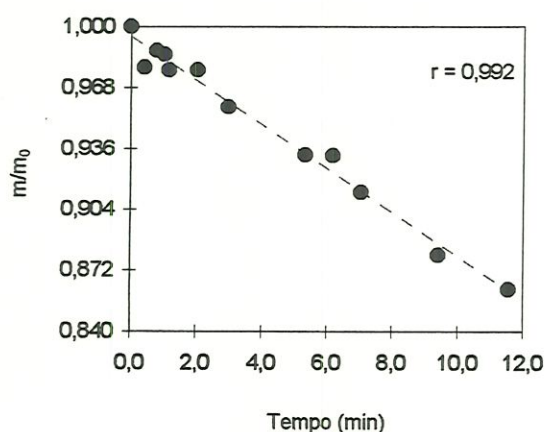


FIGURA 4.1 - Variação da massa em função do tempo, para as sondas de tamanho pequeno. Experimento realizado no Rio Laranja-Azeda (S. Carlos/SP) com temperatura da água de 20°C.

Todos os dados de variação da massa com o tempo, para cada experimento de campo, foram apresentados em Anexo III.

1.1.1- Procedimento para Determinação das Velocidades de Dissolução

As velocidades de dissolução (V_s) foram determinadas pelo ajuste do modelo matemático proposto por SCHULZ e GIORGETTI (1987), equação (2.15), aos valores de m/m_0 em função do tempo (t), como demonstrado nas Tabelas 4.1 e 4.2 e Figura 4.1.

TABELA 4.2 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo para as sondas de tamanho pequeno. Experimento realizado no Rio Laranja-Azeda (S. Carlos/SP) com temperatura da água a 20°C.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,994851
Erro Padrão da Estatística m/m_0	0,005844
R ao Quadrado	0,984659
Núm. de observações	12
Graus de Liberdade	10
Coefficiente(s) V_s/L_0	-0,01158
Erro Padrão do Coeficiente	0,000457

Deste modo, obteve-se $V_s = 10,7 \cdot 10^{-3}$ cm/min para $L_0 = 9,17$ mm.

A Tabela 4.3 apresenta os valores das velocidades de dissolução das sondas planas de ácido oxálico para cada experimento.

TABELA 4.3 - Valores das velocidades de dissolução das sondas planas de ácido oxálico dos experimentos de campo.

Rio	T_{aq} (°C)	L_0 (mm)	V_s/L_0 (min ⁻¹)	$V_s \cdot 10^3$ (cm/min)
Rib. de Caldas	21,0	9,17	0,00185	1,70
		8,97	0,00511	4,58
		8,41	0,00569	4,79
Jacaré-Guaçú	20,0	9,17	0,010272	9,42
		8,97	0,008986	8,06
		8,41	0,007665	6,45
Laranja-Azeda	20,0	9,17	0,01158	10,62
		8,97	0,02002	17,96
		8,41	0,01160	9,76
Rib. de Caldas	21,0	9,17	0,01813	16,63
		8,97	0,00593	5,32
		8,41	0,00462	3,89
Rib. do Feijão	22,3	9,17	0,03100	28,43
		8,97	0,02778	24,92
		8,41	0,01488	12,51
Rib. de Caldas	17,8	9,17	0,00589	5,40
		8,97	0,00469	4,21
		8,41	0,00425	3,57

1.1.2- Procedimento para Determinação dos Coeficientes de Reaeração

Os coeficientes de reaeração (K_2) foram determinados pela Técnica dos Traçadores Gasosos cujos valores foram gentilmente fornecidos por BARBOSA (1996). Os coeficientes de reaeração foram apresentados na Tabela 4.4.

1.1.3- Correlação entre os Coeficientes de Transferência de Massa

Uma análise conjunta dos coeficientes de transferência de massa, V_s e K_L , foi realizada de acordo com a linha de raciocínio de SCHULZ (1989, p.658), equações (2.21) e (2.22), como descrito no *Capítulo 2* item 5.

A Tabela 4.4 e Figura 4.2 apresentam os parâmetros característicos de cada teste experimental de campo e a correlação entre V_s e K_L , respectivamente.

TABELA 4.4 - Parâmetros característicos dos testes experimentais realizados em campo.

Nº do Teste	Data do Teste	Nome do Rio	T _{ág.} (°C)	H (m)	v (m/s)	Q (m ³ /s)	V _s . 10 ³ (cm/min)	V _s . 10 ⁴ (cm/s)	K _{2,20} (dia ⁻¹)	K _{L,20} . 10 ³ (cm/s)
1	30/08/94	Rib. de Caldas	21	0,12	0,45	0,45	1,70	0,28	10,1	1,58
							4,58	0,76		
							4,79	0,80		
2	20/09/94	Jacaré-Guaçú	20	1,10	0,41	8,70	9,42	1,57	4,0	5,74
							8,06	1,34		
							6,45	1,07		
3	06/03/95	Laranja-Azeda	20	0,81	0,33	1,20	10,62	1,77	11,3	10,59
							17,96	2,99		
							9,76	1,63		
4	22/03/95	Rib. de Caldas	21	0,41	0,75	3,05	16,63	2,77	8,25	4,41
							5,32	0,89		
							3,89	0,65		
5	11/04/95	Rib. do Feijão	22,3	0,67	0,58	4,30	28,43	4,74	29,7	23,03
							24,92	4,15		
							12,51	2,09		
6	27/06/95	Rib. de Caldas	17,8	0,75	0,44	8,00	5,40	0,90	4,33	3,76
							4,21	0,70		
							3,57	0,60		

sendo H, U, Q e K_L os parâmetros médios do trecho de escoamento em estudo, que correspondem à profundidade, velocidade, vazão e coeficiente de transferência global de oxigênio, respectivamente.

Os coeficientes de transferência global de oxigênio foram obtidos a partir da equação (4.1).

$$K_L = H.K_2 \quad (4.1)$$

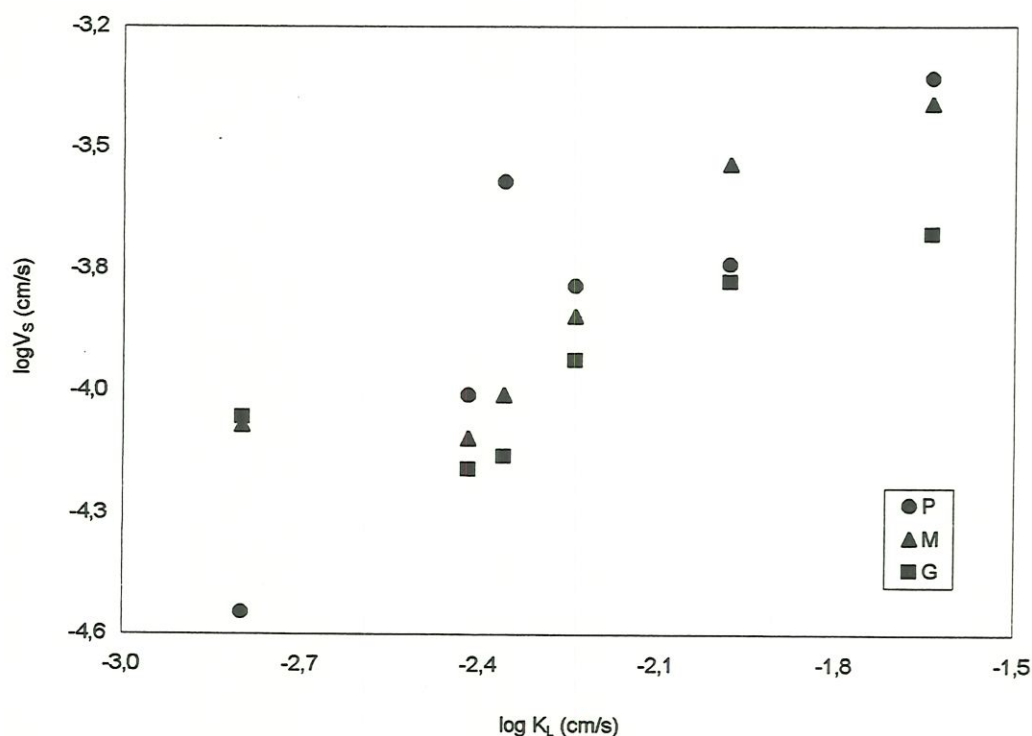


FIGURA 4.2 - Correlação entre as velocidades de dissolução e os coeficientes de transferência global de oxigênio dos experimentos de campo.

O presente estudo corroborou com os trabalhos de GIORGETTI e GIANANTI (1983), SCHULZ (1985, 1989), BICUDO (1988) e RODRIGUES (1996), mostrando a existência de uma correlação positiva, clara e definitiva entre os coeficientes de transferência de massa dos processos de reaeração e dissolução de sólidos solúveis em água.

1.2. Resultados dos Testes Experimentais Realizados em Laboratório

Os testes de laboratório foram realizados posteriormente aos experimentos de campo, porque já havia um cronograma para realização dos testes de campo programado por BARBOSA.

Seis condições experimentais de diferentes níveis de turbulência foram produzidas nas seguintes velocidades de rotação: 62, 68, 110, 158, 206 e 255 rpm. Para cada condição experimental foi realizado um conjunto de dissoluções de modo semelhante as condições experimentais dos testes de campo.

Os experimentos de dissolução nos testes de laboratório forneceram os dados de variação da massa das sondas em função do tempo. Esses dados se mostraram lineares para todos os níveis de turbulência ensaiadas no tanque de agitação hidrodinâmica (Figuras 3.11 e 3.12).

Todos os dados de variação da massa com o tempo para cada experimento de laboratório foram apresentados em Anexo IV.

1.2.1- Procedimento para Determinação das Velocidades de Dissolução

As velocidades de dissolução foram determinadas do mesmo modo como descrito no item 1.1.1 deste capítulo.

A Tabela 4.5 apresenta os valores das velocidades de dissolução das sondas planas de ácido oxálico obtidos nos seis experimentos de laboratório.

TABELA 4.5 - Valores das velocidades de dissolução das sondas planas de ácido oxálico dos experimentos de laboratório.

rpm	$T_{\text{aq. e ar}} (^{\circ}\text{C})$	L_0 (mm)	V_0/L_0 (min^{-1})	$V_s \cdot 10^3$ (cm/min)
62	25	9,17	0,004584	4,20
		8,97	0,004273	3,83
		8,41	0,003704	3,12
255	25,5	9,17	0,0284661	26,10
		8,97	0,0399255	35,81
		8,41	0,019228	16,17
110	25	9,17	0,008500	7,80
		8,97	0,006070	5,44
		8,41	0,007040	5,92
206	25	9,17	0,02359	21,63
		8,97	0,01103	9,89
		8,41	0,01072	9,02
158	25	9,17	0,00580	5,32
		8,97	0,00970	8,70
		8,41	0,00496	4,17
68	25	9,17	0,00618	5,67
		8,97	0,00559	5,00
		8,41	0,00631	5,31

1.2.2- Procedimento para Determinação dos Coeficientes de Reaeração

Os coeficientes de reaeração considerados para as rotações de 62, 110, 158, 206 e 255 rpm foram obtidos por RODRIGUES (1996). O coeficiente de reaeração adotado para a rotação de 68 rpm foi obtido por BARBOSA (1989). Esses coeficientes foram corrigidos para a temperatura de 25°C pela equação (4.2), cujo valor adotado para coeficiente de temperatura (θ) foi 1,0241, valor amplamente utilizado em sistemas líquidos na faixa entre 10°C e 30°C e em níveis comparáveis aos dos escoamentos naturais.

$$K_2(T) = K_2(25)\theta^{T-25} \quad (4.2)$$

Os valores dos coeficientes de reaeração foram apresentados na Tabela 4.6.

TABELA 4.6 - Resultados dos testes de dissolução das sondas planas de ácido oxálico realizados em laboratório.

Nº do Teste	Data do Teste	rpm	T _{ag, e.ar} (°C)	V _s .10 ³ (cm/min)	V _s .10 ⁴ (cm/s)	K _{2,25} (dia ⁻¹)	K _{L,25} .10 ³ (cm/s)
1	19/10/94	62	25	4.20	0.70	2.38	0.96
				3.83	0.64		
				3.12	0.52		
2	25/05/95	255	25.5	26.10	4.35	29.09	11.78
				35.81	5.97		
				16.17	2.70		
3	07/08/95	110	25	7.80	1.30	4.09	1.66
				5.44	0.91		
				5.92	0.99		
4	25/10/95	206	25	21.63	3.61	17.57	7.12
				9.89	1.65		
				9.02	1.50		
5	18/01/96	158	25	5.32	0.89	7.72	3.13
				8.70	1.45		
				4.17	0.70		
6	28/03/97	68	25	5.67	0.94	2.83	1.15
				5.00	0.84		
				5.31	0.88		

1.2.3- Correlação entre os Coeficientes de Transferência de Massa

Uma análise conjunta dos coeficientes de transferência de massa, V_s e K_L, foi realizada como descrito no item 1.1.3 deste capítulo.

A Tabela 4.6 e a Figura 4.3 apresentam os resultados dos testes de laboratório e a correlação entre V_s e K_L, respectivamente.

Os coeficientes de transferência global de oxigênio foram obtidos a partir da equação (4.1) para $H = 35$ cm.

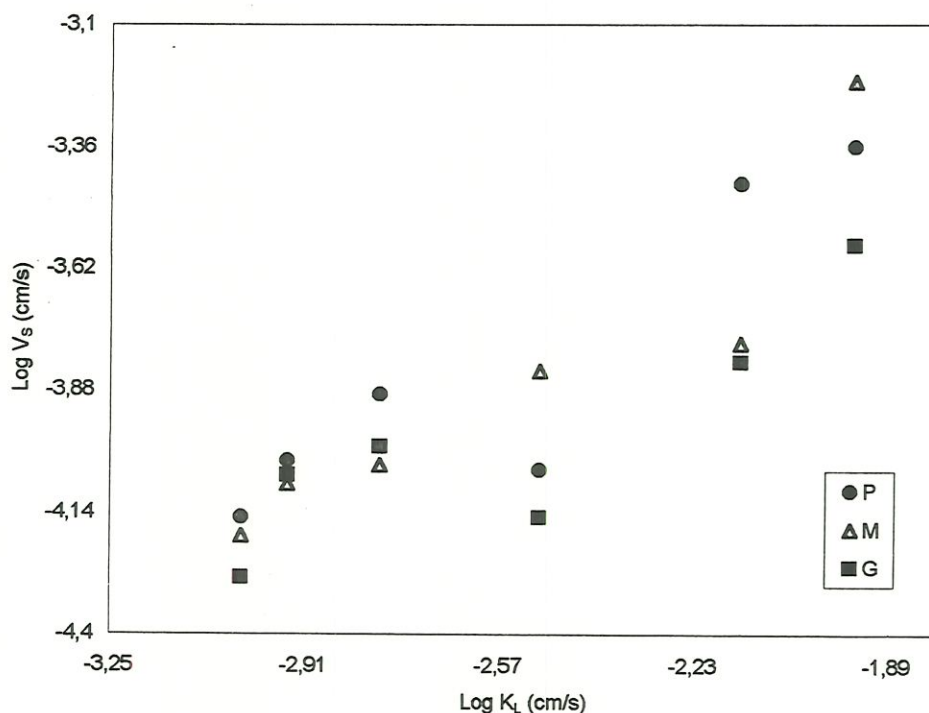


FIGURA 4.3 - Correlação entre as velocidades de dissolução das sondas planas de ácido oxálico e os coeficientes de transferência global de oxigênio dos experimentos de laboratório.

1.2.4- Relação entre os Processos de Reaeração e Dissolução do Sólido Solúvel (K_L/V_s) Expressa como uma Função da Potência Dissipada

As considerações feitas por SCHULZ, em 1989, acerca dos equacionamentos de troca de massa levaram-no a buscar uma relação funcional entre a velocidade de dissolução do sólido solúvel e as características de agitação do meio.

SCHULZ (1989) fez especulações entorno de analogias com transferência de calor e massa por convecção em paredes planas e com inferências e aproximações acerca da dependência das escalas de velocidade e comprimento em relação à potência dissipada por unidade de volume (ou massa).

As equações (4.3), (4.4), (4.5) e (4.6) mostraram as tendências dos resultados obtidos, por SCHULZ (1989), para as dissoluções das sondas e reaeração do corpo d'água em situações de alta e baixa agitação, respectivamente.

↳ Altas Agitações

$$V_s \propto u^{.1/4} \quad (4.3)$$

$$K_2 \propto u^{.1/2} \quad (4.4)$$

↳ Baixas Agitações

$$V_s \propto u^{.1/8} \quad (4.5)$$

$$K_2 \propto u^{.1/3} \quad (4.6)$$

sendo,

V_s = velocidade de dissolução,

K_2 = coeficiente de reaeração, e

u = dissipação de energia.

Os resultados mostraram que o coeficiente de reaeração é mais sensível às variações na dissipação de energia que a velocidade de dissolução do sólido.

SCHULZ (1989) sugeriu que a proporção K_L/V_s deve apresentar um comportamento em relação à potência dissipada para maiores agitações da seguinte forma:

$$\frac{K_L}{V_s} \propto u^{.1/4} \propto u^{.0,25} \quad (4.7)$$

- Para os dados coletados no tanque de agitação hidrodinâmica, SCHULZ (1989) obteve:

$$\frac{K_L}{V_s} \propto u^{.0,288-0,580} \quad (4.8)$$

- Para os dados coletados no canal de recirculação, SCHULZ (1989) obteve:

$$\frac{K_L}{V_s} \propto u^{0,245-0,490} \quad (4.9)$$

O presente estudo foi submetido a uma análise similar àquela realizada por SCHULZ (1989) quando correlacionou K_L/V_s como uma função da potência dissipada.

Uma estimativa da potência dissipada para o sistema de agitação utilizado nos experimentos de laboratório, constituído de um tanque de agitação hidrodinâmica com impulsor rotativo (Figura 3.11), foi obtida por SCHULZ (1989) como expresso na equação (4.10).

$$u = 0,663n^3 \quad (4.10)$$

sendo,

u = potência dissipada, em (watts/m³), e
 n = velocidade de rotação, em (s⁻¹)

A correlação entre $\log(K_L/V_s)$ e $\log(\text{potência dissipada})$ apresentou a equação de proporcionalidade (4.11), como demonstrada na Figura 4.4 e Tabela 4.7.

$$\frac{K_L}{V_s} \propto u^{0,138-0,383} \cong u^{0,245} \quad (4.11)$$

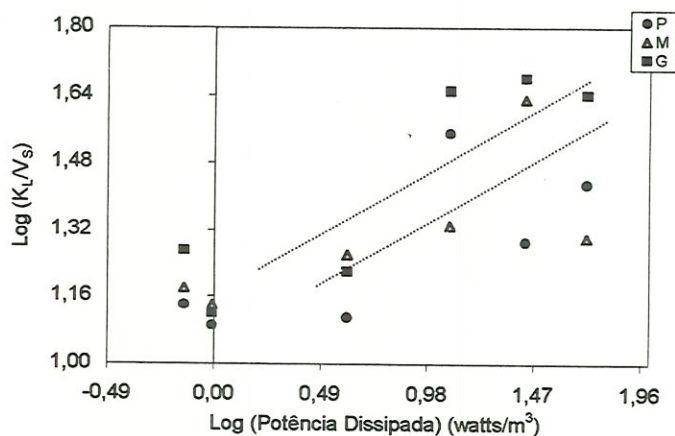


FIGURA 4.4 - Distribuição logarítmica da relação reeração/dissolução em função da potência dissipada para dados experimentais de laboratório.

TABELA 4.7 - Dados da relação reaeração/dissolução expressa como uma função da potência dissipada (testes experimentais realizados em laboratório com sondas planas de ácido oxálico).

Nº do Teste	rpm	K_L/V_s	Pot. Dissipada (W/m^3)	$\text{Log}(K_L/V_s)$	$\text{Log}(\text{Pot. Dissip.})$ (W/m^3)
1	62	13,71	0,73	1,14	-0,14
		15,00		1,18	
		18,46		1,27	
2	255	27,08	50,9	1,43	1,71
		19,73		1,30	
		43,63		1,64	
3	110	12,77	4,09	1,11	0,61
		18,24		1,26	
		16,77		1,22	
4	206	19,72	26,83	1,29	1,43
		43,15		1,63	
		47,47		1,68	
5	158	35,17	12,11	1,55	1,08
		21,59		1,33	
		44,71		1,65	
6	68	12,23	0,97	1,09	-0,01
		13,69		1,14	
		13,07		1,12	

O resultado da relação entre a velocidade de dissolução e o coeficiente de reaeração (K_L/V_s) envolvendo a dissipação de energia foi razoavelmente bem verificado nos experimentos efetuados no tanque de agitação mecânica, corroborando com a previsão de SCHULZ (1989).

1.3. Combinação dos Dados dos Testes de Campo e de Laboratório

Os dados de K_L , corrigidos para a temperatura de 25°C, e os valores correspondentes de V_s , determinados simultaneamente em testes de campo (rios da região do Município de S. Carlos-SP), assim como os valores de K_L e os correspondentes valores de V_s obtidos em testes de laboratório à temperatura controlada em 25°C, foram ilustrados na Figura 4.5.

O conjunto dos dados obtidos em laboratório é similar ao conjunto dos dados obtidos em campo, diferindo apenas pela translação desse conjunto. Isto significa a existência de um coeficiente multiplicativo nos valores de V_s quando

determinados em campo (Figura 4.5). Esse comportamento já havia sido previsto por SCHULZ e GIORGETTI (1991).

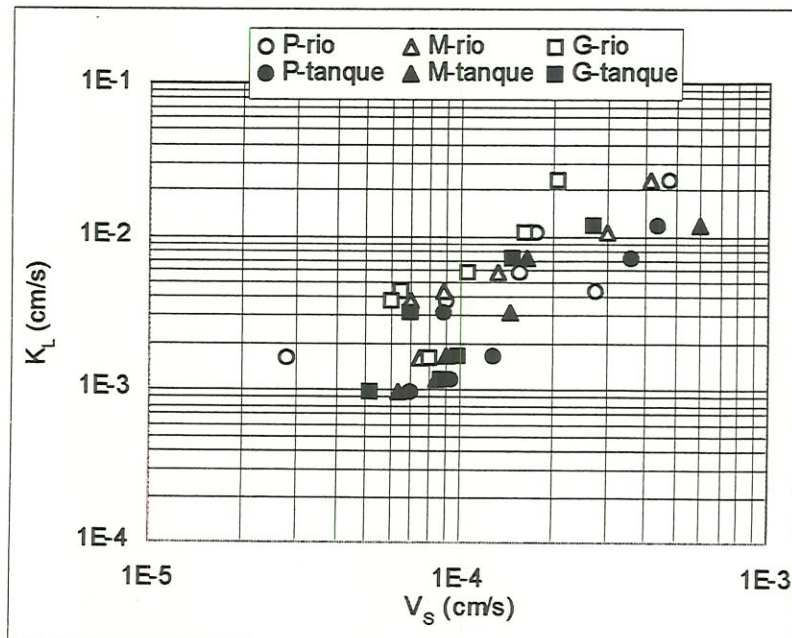


FIGURA 4.5 - Correlação entre os coeficientes de transferência de massa V_s e K_L dos experimentos de laboratório e campo para as sondas planas de ácido oxálico.

Especula-se que o aumento da escala física e conseqüente mudança na estrutura da turbulência e na macro estrutura do escoamento (turbilhões e estrutura correlatas), os dois processos de transferência de massa (reaeração e dissolução do sólido) sofrem influências diferentes.

1.4. Combinação dos Dados dos Testes de Laboratório e Dados de Laboratório de SCHULZ (1989)

Os dados dos testes de laboratório foram combinados com os dados de laboratório de SCHULZ (1989). Ambos os experimentos foram realizados em tanque de agitação hidrodinâmica com impulsor rotativo (Figura 3.11). Os dados tomados de SCHULZ (1989) foram aqueles cujas temperaturas da água do tanque estavam próximas de 25°C (Tabela 4.8).

TABELA 4.8 - Dados experimentais de SCHULZ (1989).

Velocidade de Rotação (rpm)	Temperatura (°C)	$V_s \cdot 10^4$ (cm/s)
60	24,9	1,04
80	24,3	1,13
100	24,6	1,33
100	24,2	1,42
145	24,8	1,89
180	25,2	2,31
250	25,1	3,04

A dispersão dos dados da Figura 4.6 parecem corroborar com as hipóteses de SCHULZ (1989), quando o pesquisador sugere duas situações para a dissolução da sonda. Uma situação é verificada para altas agitações, onde a sonda de dimensão L é submetida ao processo de dissolução por turbilhões menores que a dimensão L do sólido, e outra situação é observada para baixas agitações, em que a mesma sonda de dimensão L é submetida ao processo de dissolução por turbilhões maiores que a dimensão L do sólido, como demonstrado na Figura 4.7.

As duas situações consideram a troca de massa e o volume dos turbilhões envolvidos no processo de troca.

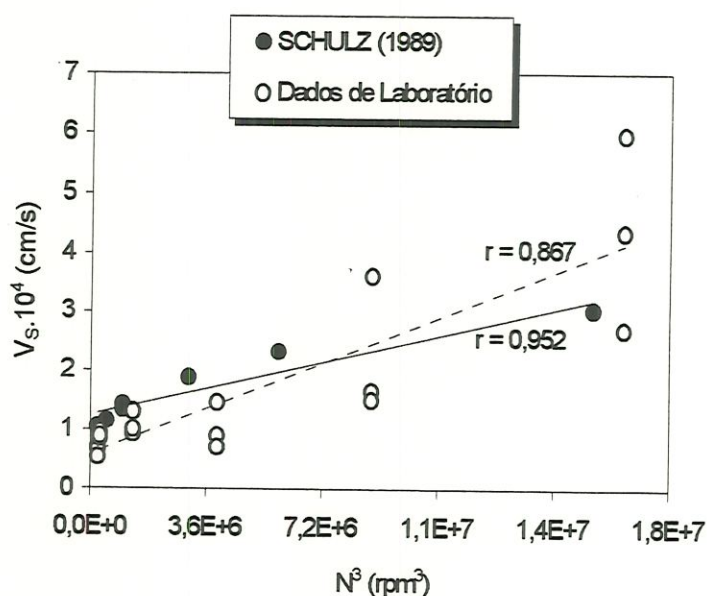


FIGURA 4.6 – Combinação dos dados de laboratório com os dados de SCHULZ (1989), para as sondas planas de ácido oxálico.

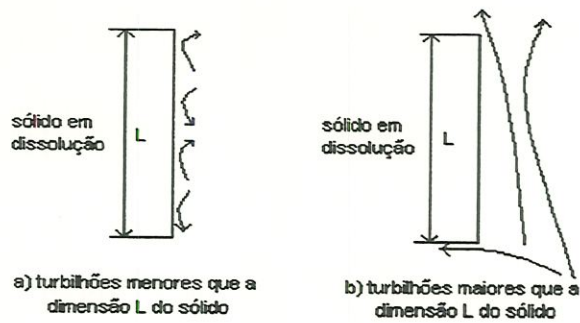


FIGURA 4.7 – Situações de dissolução da sonda sólida solúvel. (Fonte: SCHULZ, 1989).

Observa-se na Figura 4.6, que para baixos níveis de agitação os dados de laboratório e SCHULZ (1989) estão muito próximos e que ocorre uma dispersão dos dados para altos níveis de agitação. Este mesmo comportamento de dispersão dos dados, para altas agitações, foi verificado nos dados de BICUDO (1988).

Os gráficos da Figura 4.8 apresentam a combinação dos dados de dissolução de SCHULZ (1989) e os dados de dissolução desta pesquisa. Os dados de dissolução de SCHULZ (1989) são referentes às sondas planas de ácido oxálico de seção circular igual a $6,16 \text{ cm}^2$ e densidade de $1,56 \text{ g/cm}^3$. Os dados desta pesquisa são referentes às sondas planas de ácido oxálico de tamanhos pequeno, médio e grande, de seções circulares iguais a $5,31 \text{ cm}^2$, $9,08 \text{ cm}^2$ e $19,63 \text{ cm}^2$, consecutivamente, e densidade de $1,45 \text{ g/cm}^3$.

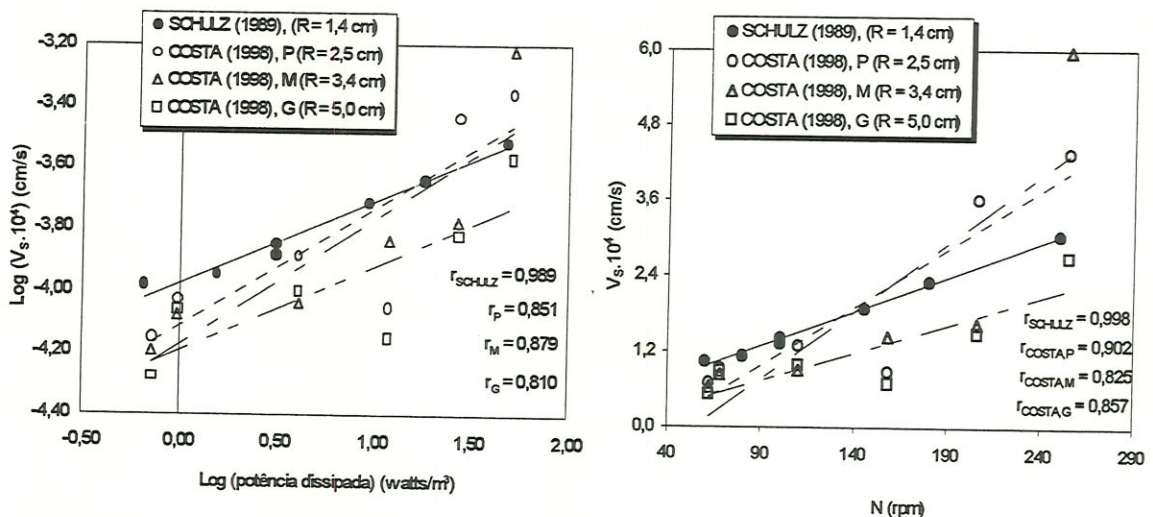


FIGURA 4.8 – Dados de dissolução das sondas planas de ácido oxálico de diferentes tamanhos.

Verifica-se que as sondas de tamanhos pequeno e médio e as sondas de SCHULZ (1989) apresentam um comportamento de dissolução muito próximo.

2. RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE DISSOLUÇÃO DAS SONDAS ESFÉRICAS DE AÇÚCAR

Cinco condições experimentais de diferentes níveis de turbulência foram produzidas nas seguintes velocidades de rotação: 62, 110, 158, 206 e 255 rpm. Para cada condição experimental foi realizado um conjunto de 45 dissoluções, sendo efetuadas 15 dissoluções com réplicas. Um total de 225 sondas esféricas de açúcar foi dissolvido em tanque de agitação hidrodinâmica.

Os experimentos de dissolução forneceram os dados de variações médias das massas das sondas em função do tempo, a partir do qual foi desenvolvido um modelo matemático para descrever o processo de dissolução.

Cada sonda esférica de açúcar constituiu-se num conjunto de massa da esfera de açúcar (m_{ei}) e massa do bastão (m_{bi}), como ilustrado na Figura 3.13. A massa total da sonda (m_{Ti}) foi tomada como sendo o somatório da massa da esfera de açúcar e massa do bastão. O subíndice i corresponde ao número da série de 3 sondas dissolvidas simultaneamente. Para cada intervalo de tempo de dissolução foram utilizadas três sondas virgens.

Os experimentos de dissolução das sondas esféricas de açúcar forneceram os dados de variação média das massas em função do tempo como demonstrado no exemplo das Tabelas 4.9 e 4.10 e Figura 4.9.

TABELA 4.9 - Dados iniciais característicos das sondas esféricas de açúcar, antes da dissolução (5º Teste - 22/04/97).

t (min)	m_{0T1} (g)	m_{b1} (g)	m_{0T2} (g)	m_{b2} (g)	m_{0T3} (g)	m_{b3} (g)
1,02	11,769	0,950	10,738	0,912	11,840	0,875
2,02	11,875	0,953	11,731	0,964	11,656	0,972
3,01	11,775	0,962	10,718	0,967	11,536	0,871
4,01	11,642	0,929	11,527	0,928	10,998	0,916
5,02	11,258	0,916	12,312	0,893	11,303	0,927
6,03	11,134	0,949	11,295	0,865	11,576	0,913
7,03	11,373	0,966	11,094	0,949	11,497	0,880
8,01	10,927	0,964	11,458	0,962	12,001	0,887
9,01	10,014	0,913	11,535	0,886	10,923	0,948
10,20	11,165	0,951	10,233	0,882	10,857	0,946
11,01	10,818	0,922	10,806	0,881	10,778	0,923
12,01	11,131	0,905	10,097	1,019	11,876	0,931
13,01	11,158	0,948	11,279	0,851	11,827	0,982
14,00	11,514	0,847	11,331	0,912	11,748	0,923
15,01	11,233	0,916	11,065	0,893	9,882	0,942

sendo,

$$m_{0Ti} = m_{ei} + m_{bi} \quad (4.12)$$

m_{0Ti} = massa inicial da sonda,

m_{ei} = massa da esfera de açúcar, e

m_{bi} = massa do bastão.

TABELA 4.10 - Dados finais característicos das sondas esféricas de açúcar, após a dissolução em velocidade de rotação de 206 rpm.

t (min)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m (g)
0,00	10,32	10,23	10,43	10,33
1,02	9,980	9,030	10,105	9,71
2,02	9,425	9,280	9,428	9,38
3,01	8,586	8,958	8,973	8,84
4,01	7,523	7,706	7,016	7,42
5,02	7,317	8,468	7,424	7,74
6,03	6,967	6,874	7,260	7,03
7,03	6,232	5,797	6,003	6,01
8,01	4,830	6,259	6,495	5,86
9,01	4,287	5,906	5,172	5,12
10,20	5,299	4,143	4,520	4,65
11,01	3,883	4,488	4,022	4,13
12,01	3,610	3,045	4,582	3,75
13,01	3,953	3,716	3,913	3,86
14,00	3,391	3,429	3,601	3,47
15,01	3,058	2,716	2,631	2,80

sendo,

m_i = massa da esfera de açúcar i após dissolução,

m = massa média das esferas dissolvidas, e

t = tempo de dissolução.

Os dados de dissolução das sondas esféricas de açúcar, para cada experimento, foram apresentados em Anexo V.

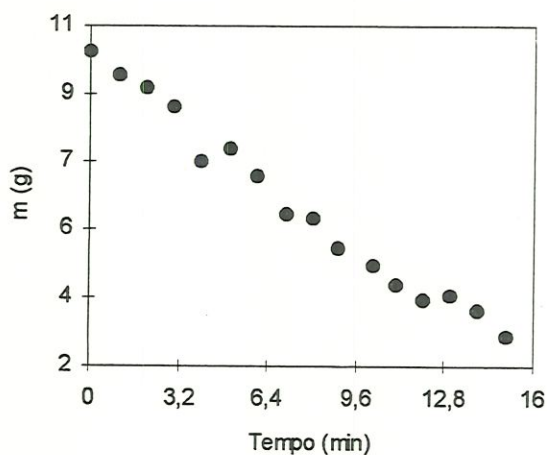


FIGURA 4.9 - Gráfico da massa em função do tempo das sondas esféricas de açúcar, para velocidade de rotação de 206 rpm.

2.1. Desenvolvimento do Modelo Matemático para Determinação das Velocidades de Dissolução

A literatura pertinente à dissolução de sólidos em sua própria solução apresentou três fatores fundamentais para análise deste fenômeno, que são os seguintes:

- ⇒ área de contato
- ⇒ agitação do meio
- ⇒ concentração de sólido no líquido

Sobre a área de contato do sólido exposta à ação do líquido, HIXSON e CROWELL (1931) afirmaram:

Exceto onde a superfície do sólido exposta à ação do líquido é um plano, existe uma variação constante na sua área e, conseqüentemente, uma diminuição na taxa de dissolução, isto é quase um axioma da filosofia química que a taxa da ação química é, *ceteris paribus*, diretamente proporcional à área exposta a esta ação.

HIXSON e CROWELL (1931)

HIXSON e CROWELL (1931) propuseram um modelo chamado *Lei da Raiz Cúbica*, originária de considerações teóricas em que a velocidade de dissolução de um sólido no líquido é expressa como uma função da superfície e da concentração:

No desenvolvimento do modelo de dissolução para os dados obtidos nesta pesquisa, foram admitidas as seguintes grandezas:

A_s = área superficial (de contato) da sonda esférica,

m_0 = massa inicial,

m = massa instantânea no tempo t ,

R = raio da sonda esférica,

ΔC = variação da concentração,

Δm = variação da massa,

Δt = variação do tempo,

ρ = massa específica da sonda esférica, e

K_e = coeficiente de dissolução da esfera.

Considerou-se uma esfera sólida solúvel de raio R em um meio líquido agitado, como ilustrado na Figura 4.10. A_s é a área de contato e ΔC , a variação da concentração no meio líquido, foi considerada desprezível.

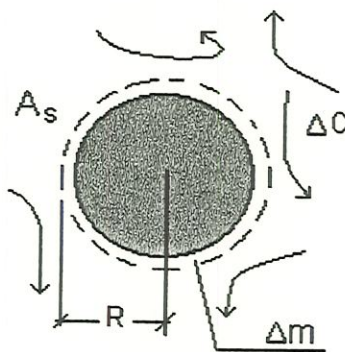


FIGURA 4.10 - Sonda esférica em processo de dissolução.

$$\Delta m \propto A_s \propto R^2 \quad (4.13)$$

E propõe-se a seguinte formulação:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = -k\rho R^2 \quad (4.14)$$

ou

$$\frac{dm}{dt} = -k\rho R^2 \quad (4.15)$$

sendo,

$$m = \frac{4}{3}\pi\rho R^3 \quad (4.16)$$

Substituindo a equação (4.16) em (4.15) e integrando, têm-se:

$$R = R_0 - K_e t \quad (4.17)$$

sendo,

$$K_e = \frac{k}{4\pi} \quad (4.18)$$

e como,

$$R \approx \sqrt[3]{m} \quad (2.19)$$

a equação (4.17) torna-se:

$$m^{1/3} = m_0^{1/3} - K_e t \quad (4.20)$$

A equação (4.20) é semelhante a expressão desenvolvida por HIXSON e CROWELL (1931, p.929).

O coeficiente de proporcionalidade k , na equação (4.15), foi considerado como uma constante. Se admite-se k como uma função do raio da esfera a ser dissolvida, obtém-se:

$$k = CR^n \quad (4.21)$$

sendo,

C = constante,

R = raio da esfera, e

n = potência genérica do raio da esfera.

Desta forma, um novo modelo foi obtido quando se fez a substituição da equação (4.21) em (4.15).

$$R = \left[R_0^{1-n} - (1-n) \frac{V_s}{R_0^n} t \right]^{\frac{1}{1-n}} \quad (4.22)$$

ou

$$m = \left[m_0^{\frac{1-n}{3}} - (1-n) \frac{K_e}{m_0^{n/3}} t \right]^{\frac{3}{1-n}} \quad (4.23)$$

A equação (4.23) foi ajustada aos dados experimentais de dissolução. O valor de n foi determinado para cada uma das 5 diferentes condições de agitação, como demonstrado na Tabela 4.11 e Figura 4.11.

TABELA 4.11 – Valores de n estimados através do modelo ajustado aos dados experimentais de dissolução das sondas esféricas.

Nº Teste	N (rpm)	n	K_e (cm/min)
4	62	-0,35	0,02812
2	110	-0,93	0,02873
3	158	-0,90	0,03478
5	206	-0,91	0,04221
1	255	-0,98	0,04758

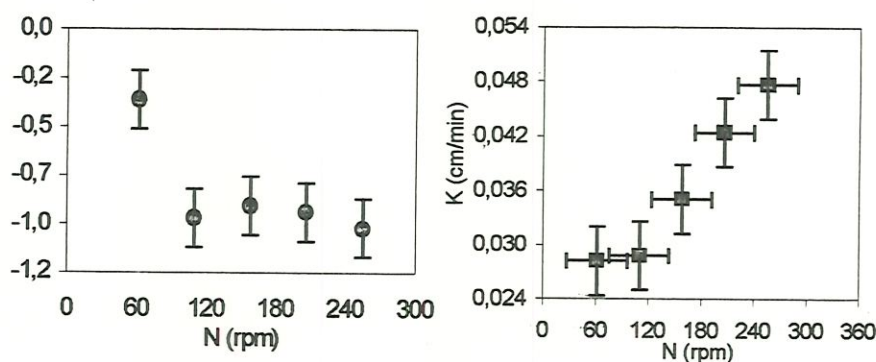


FIGURA 4.11 – n versus velocidade de rotação e coeficiente de transferência de massa versus velocidade de rotação.

Adotou-se como critério para o ajuste do modelo da equação (4.23), o valor da massa inicial (m_0) como parâmetro fixo e os valores do coeficiente de transferência de massa (K) e do expoente n como parâmetros livres. Durante o ajuste a convergência dos parâmetros livres foi observada através dos valores do qui-quadrado e desvio padrão do parâmetro n .

A hipótese de k em função do raio da esfera a ser dissolvida (R), considerada na equação (4.21), gerou valores crescentes do coeficiente de dissolução da esfera (K) com a variação crescente da velocidade de rotação (N). Os valores de n tendem a ser aproximadamente igual a -1 para escoamentos altamente turbulentos. Este comportamento está condizente com alguns parâmetros clássicos, como por exemplo o perfil da curva do coeficiente de atrito f no Diagrama de Moody, que tende para uma constante quando a turbulência aumenta; coeficiente de arrasto e número de potência.

Desde que a área de transferência de massa varia com o tempo, a massa da esfera em dissolução pode ser correlacionada com a área superficial correspondente, de acordo com a lei da raiz cúbica (HIXSON e CROWELL, 1931). Esta correlação se baseia na propriedade de sólidos geometricamente similares contanto que a não haja variação na forma do sólido.

Assim, supondo n igual a -1 , a equação (4.23) para escoamentos altamente turbulentos torna-se:

$$A = A_0 - d_0 K t \quad (4.24)$$

sendo,

A = área superficial da esfera no instante t ,
 A_0 = área superficial da esfera no instante $t = 0$,
 d_0 = diâmetro inicial da esfera,
 K = coeficiente de transferência de massa, e
 t = tempo de dissolução.

2.2. Procedimento para Determinação dos Coeficientes de Transferência de Massa

Os coeficientes de transferência de massa ou dissolução (K) foram obtidos a partir da equação (4.24) e correlacionados como um produto dos números adimensionais Sherwood (Sh) e Schmidt (Sc) em função do número de Reynolds (Re).

Os valores de K obtidos para as diferentes áreas superficiais e condições de agitação foram demonstrados na Figura 4.12 como $ShSc^{1/3}$ versus Re . Os números de Sherwood, Schmidt e Reynolds foram calculados como expresso nas equações (4.25), (4.26) e (4.27).

$$Sh = \frac{Kd}{D_{AB}} \quad (4.25)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad (4.26)$$

$$Re = \frac{NdD}{\nu} \quad (4.27)$$

sendo,

K = coeficiente de transferência de massa,
 d = diâmetro instantâneo da esfera,
 D_{AB} = difusividade,
 ν = viscosidade cinemática da água,
 N = velocidade de rotação, e
 D = diâmetro do rotor.

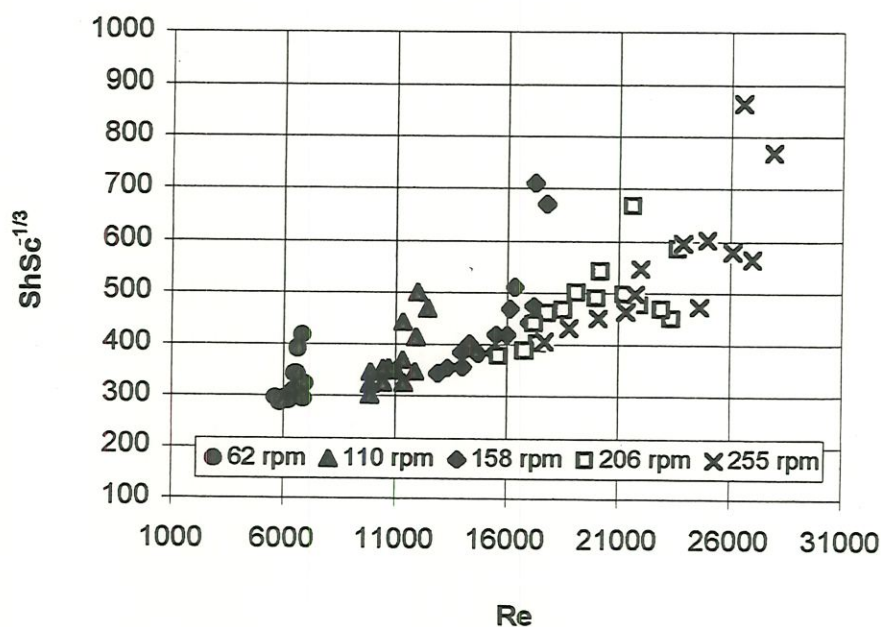


FIGURA 4.12 – $ShSc^{1/3}$ versus Re .



O número de Sherwood é igual ao gradiente de concentração na superfície da esfera em processo de dissolução e determina a transferência de massa convectiva que ocorre na superfície da esfera, conforme INCROPERA e DEWITT (1981).

O gráfico da Figura 4.12 foi refeito utilizando-se os valores instantâneos dos diâmetros médios de cada ponto durante o processo de dissolução, independentemente da velocidade de rotação de cada experimento. Esta medida foi adotada para verificar a existência de uma distribuição regular dos valores selecionados do diâmetro (d).

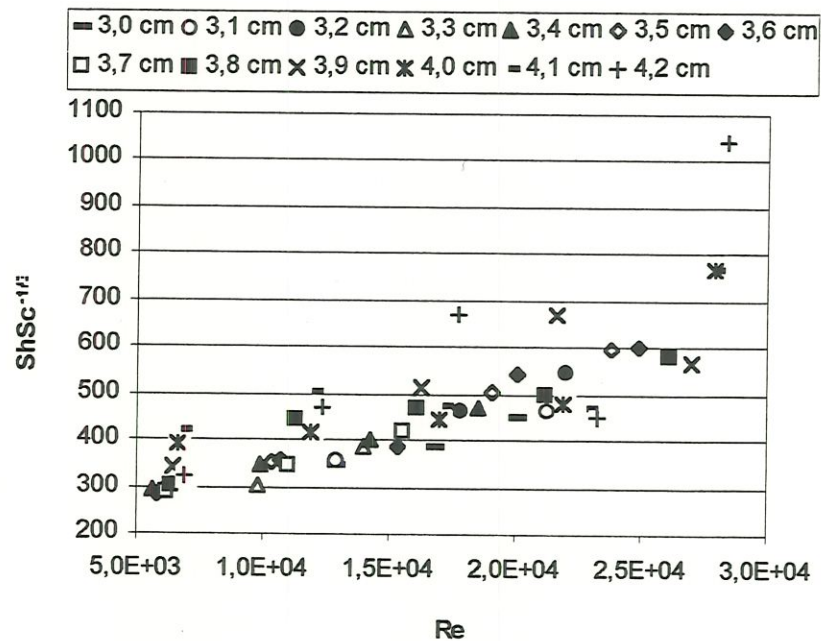


FIGURA 4.13 - $ShSc^{-1/2}$ versus Re para diferentes diâmetros.

Verifica-se que a transferência de massa é diretamente proporcional ao número de Reynolds e ao diâmetro da partícula.

A Figura 4.14 ilustra a variação do adimensional d/D em função do número de Reynolds.

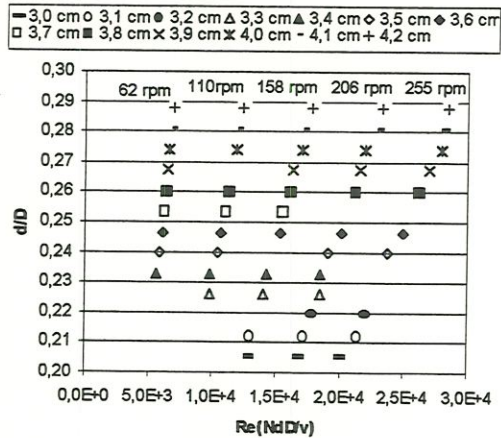


FIGURA 4.14 – d/D versus Re .

2.3. Procedimento para Determinação dos Coeficientes de Reaeração

Os valores dos coeficientes de reaeração utilizados, nesta seção, são os mesmos apresentados na Tabela 4.6 (p.85).

2.4. Correlação entre os Coeficientes de Transferência de Massa

Os coeficientes de transferência de massa (V_s) da sonda esférica solúvel foram correlacionados com os coeficientes globais de reaeração (K_L), como demonstrado na Figura 4.15.

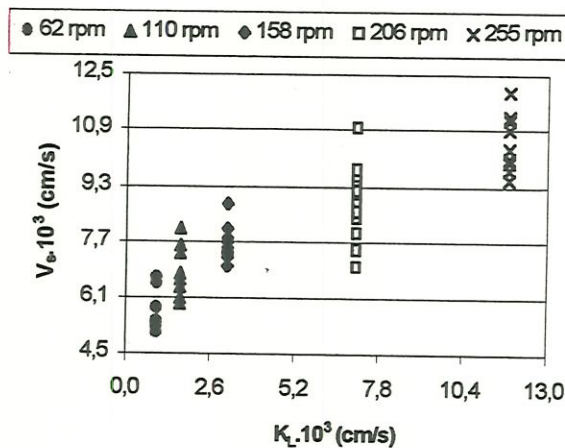


FIGURA 4.15 – Correlação entre os coeficientes de transferência de massa da sonda esférica de açúcar e os coeficientes de reaeração.

Observou-se a existência de uma correlação entre os parâmetros V_s e K_L . Entretanto, nota-se uma dispersão vertical, que pode estar relacionada com a variação do diâmetro durante o processo de dissolução da sonda sólida solúvel.

CONCLUSÕES

Na primeira etapa desta pesquisa, foram desenvolvidas metodologias para a confecção de três diferentes tamanhos de sondas sólidas (de ácido oxálico) em formato cilíndrico circular, com superfície de dissolução planas para induzir desgaste unidimensional. As sondas produzidas mostraram boa qualidade e boa capacidade de resposta quando testadas em diferentes condições hidrodinâmicas. As velocidades de dissolução apresentaram a mesma ordem de grandeza quando comparadas aos resultados de estudos anteriores com sondas de ácido oxálico com as mesmas características geométricas.

A viabilização da metodologia para confecção das sondas de ácido oxálico foi alcançada com a fabricação de equipamentos próprios. Esta metodologia possibilitou uma produção padronizada em série das sondas, com reuso do invólucro.

Três suportes flutuadores foram projetados igualmente para conduzir simultaneamente as sondas junto à superfície livre do escoamento. A facilidade de reposição das sondas no suporte flutuador e ajustamento das sondas próximo à superfície da água foi obtido através da haste móvel provida de um dispositivo imantado em sua extremidade inferior. O flutuador mostrou-se prático e resistente para suportar as condições adversas dos ensaios de campo.

Metodologias foram desenvolvidas para a realização dos experimentos de campo e de laboratório. Em função das dificuldades para realização dos trabalhos de campo, condições operacionais e econômicas, os testes foram

otimizados calculando-se estatisticamente um número mínimo de amostras necessárias para garantir resultados confiáveis.

Observou-se um comportamento distinto no processo de dissolução das sondas planas nas condições de alta e baixa agitações para os testes de laboratório. As nuvens de pontos geradas para as condições de alta e baixa apresentaram a mesma configuração, porém transladadas entre si.

A sonda de menor diâmetro sofreu um desgaste maior nas condições de baixa e alta agitação, este fenômeno pode se justificado pela observação visual do efeito de borda produzido pela cápsula de alumínio (ocorrência em todas as sondas desse tamanho). O efeito de borda nas sondas de tamanhos médio e grande foi minimizado em face das dimensões maiores dessas sondas.

Os dados de dissolução das sondas planas parecem confirmar as hipóteses lançadas por SCHULZ em 1989. O pesquisador sugeriu que, para altas agitações, a sonda é submetida ao processo de dissolução por turbilhões menores que a dimensão da sonda, e para baixas agitações, a mesma sonda é submetida à dissolução por turbilhões maiores que a dimensão da sonda. As duas situações consideram a troca de massa e o volume dos turbilhões envolvidos.

Verificou-se também, que para baixos níveis de agitação os dados desta pesquisa e os dados de SCHULZ (1989) estão muito próximos e que, para altos níveis de agitação ocorre uma dispersão nos dados (Figura 4.6). Este mesmo comportamento foi verificado ao se comparar com os dados de BICUDO (1988).

Os dados de dissolução obtidos nos experimentos de campo exibiram o mesmo comportamento dos dados de laboratório. Os valores de velocidade de dissolução e coeficientes de reaeração relativos aos ensaios no tanque de agitação hidrodinâmica e relativos aos ensaios em rios, quando apresentados em gráfico logarítmico, geraram nuvens de pontos que apresentam a mesma configuração, porém transladadas entre si devido às diferenças geométricas existentes entre as duas condições. Este comportamento foi verificado por SCHULZ (1989).

Verificou-se mais uma vez, que os dois processos de transferência de massa (reaeração e dissolução do sólido) sofrem influências diferentes a partir do aumento da escala física e conseqüente mudança na estrutura da turbulência e na macro estrutura do escoamento (turbilhões e estrutura correlatas).

Na segunda etapa desta pesquisa, foram desenvolvidas novas metodologias para a realização dos experimentos de laboratório. Em função das dificuldades para confecção das sondas esféricas de açúcar, optou-se pela aquisição de confeitos comerciais.

Um modelo matemático aplicado ao processo de dissolução das sondas esféricas de açúcar foi desenvolvido a partir de dados experimentais. Os testes de dissolução das sondas esféricas foram realizados em um tanque de agitação mecânica para determinação das velocidades de dissolução. As sondas esféricas de açúcar, confeitos comerciais, foram selecionadas e preparadas para os testes de dissolução e apresentaram boa qualidade e boa capacidade de resposta quando testadas em diferentes condições hidrodinâmicas.

As velocidades de dissolução (V_s) das sondas esféricas de açúcar, obtidas através do modelo matemático, foram correlacionadas com o número de Reynolds na forma de um produto dos números adimensionais Sherwood (Sh) e Schmidt (Sc). A correlação destes números adimensionais mostrou que a transferência de massa convectiva que ocorre na superfície da esfera é crescente com o nível de turbulência e com o diâmetro da partícula.

As velocidades de dissolução (V_s) das sondas esféricas de açúcar também foram correlacionadas com os coeficientes globais de reaeração (K_L). Esta correlação apresentou uma tendência crescente entre os parâmetros V_s e K_L . Entretanto, foi observada uma dispersão nos valores das velocidades de dissolução, que provavelmente deve estar relacionada à variação do diâmetro da partícula que ocorre durante o processo de dissolução.

Recomenda-se, em futuros trabalhos, avaliar o efeito da porosidade do material da sonda solúvel durante o processo de dissolução. Comparar os valores dos coeficientes de reaeração estimados em testes de campo - K_L (obtidos em extensos trechos de rio) e os valores das velocidades de dissolução - V_s (obtidas em curtos trechos de rio) com a correlação dos valores de V_s e K_L previsto por um modelo de regressão que considere as características da declividade, velocidade e altura médias do trecho de escoamento utilizado no processo de dissolução.

ANNEXOS

ANEXO II

MÉTODOS DE CONFECÇÃO DA SONDA SÓLIDA SOLÚVEL

STAMATO (1992) desenvolveu metodologia para confecção de sondas solúveis. Os materiais estudados são apresentados a seguir, com os seus respectivos métodos de preparação.

- ↪ Ácido benzóico: fusão em chapa elétrica no interior de uma cápsula de alumínio e resfriada a 0°C. Obteve-se uma pastilha homogênea.
- ↪ Ácido oxálico: fusão em chapa elétrica no interior de uma cápsula de alumínio e em seguida solidificado à temperatura ambiente, lentamente e a 0°C. O processo de solidificação foi bastante irregular com grandes vazios. Tentou-se as dissoluções do ácido oxálico em álcool e éter, seguido da evaporação do solvente, porém esse procedimento também não foi satisfatório. É importante lembrar que o ácido oxálico sublima em alta temperatura e seu gás é bastante corrosivo, portanto, deve ser manuseado em capela.
- ↪ Hidróxido de bário: fusão em chapa elétrica no interior de uma cápsula de alumínio, apenas o material no fundo do recipiente fundiu e em seguida entrou em ebulição. Não foi possível a confecção das pastilhas.
- ↪ Nitrato de bário: dissolução em água seguido da evaporação do solvente. Esse não apresentou resultado satisfatório.
- ↪ Nitrato de cromo: fusão em estufa no interior de cápsula de alumínio. O nitrato de cromo ficou dissolvido na água liberada pela fusão, não ocorrendo solidificação após resfriamento. Não foi possível a confecção das pastilhas.
- ↪ Acetato cúprico: o processo de fusão não foi possível. Optou-se pelo processo de dissolução em água seguido de evaporação do solvente. As pastilhas apresentaram forma coesa e regular, porém com certa porosidade.
- ↪ Alume de potássio: fusão em estufa no interior de cápsula metálica. As pastilhas apresentaram forma homogênea, coesa e sem porosidade.

↪ Iodato de potássio: dissolução em água seguido da evaporação do solvente. As pastilhas apresentaram baixa coesão e grande porosidade.

↪ Tetraborato de sódio: fusão foi realizada em chapa elétrica no interior de uma cápsula de alumínio. A fusão foi irregular, apenas no fundo do recipiente, e em seguida entrou em ebulição. Não foi possível a confecção da partilha.

A Tabela Al.1 contém as propriedades físicas dos materiais empregados na confecção das sondas.

TABELA Al.1 - Propriedades físicas de compostos orgânicos e inorgânicos.
(Fonte: PERRY e CHILTON; 1980, p.3/6).

Nome	Fórmula	Massa molec.	Forma e cor	Dens. g/cm ³	Ponto de fusão, °C	Ponto de ebul., °C	Solubil. em água
Ácido benzóico	C ₆ H ₅ CO ₂ H	122,12	mon. prism.	1,3 ^{15/4}	121,7	249,2	0,2 ¹⁷
Ácido oxálico	H ₂ O ₂ C ₂ O ₂ .H ₂ O	126,07	mon. incol.	1,7 ^{19/4}	101,5	subl.	sol.
Hidróxido de bário	Ba(OH ₂) ₂ .8H ₂ O	315,50	mon. incol.	2,18	77,9	-8H ₂ O, 550	5,6 ¹⁵
Nitrato de bário	Ba(NO ₃) ₂	261,38	incol. cúb.	3,2 ²³	592	d	5,0°
Nitrato de Cromo	Cr(NO ₃) ₃ .9H ₂ O	400,18	prism. púrpura	-	36,5	d.100	sol.
Acetato cúprico	Cu(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ .H ₂ O	199,67	verd. mon.	1,9	115	240d.	7,2
Alume de potássio (calinita)	Al ₂ (SO ₄) ₃ .K ₂ SO ₄ .24H ₂ O	948,76	incol. mon.	1,8 ^{26/4}	92	-18H ₂ O, 64,5	5,7°
Iodato de potássio	KIO ₃	214,02	incol. mon.	3,9	560	-	4,73°
Tetra borato sódio (bórax)	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	381,43	br. mon.	1,7	75	-10H ₂ O	1,3 ^{4,5}

Abreviaturas usadas na tabela:

br. - branco

cúb. - cúbico

d. - decompõe-se

incol. - incolor

mon. - monoclinico

prism. - prismático

sol. - solúvel

subl. - sublima

verd. - verde

O índice da densidade indica a temperatura em relação à água; por exemplo, $1,3^{15/4}$ indica a densidade da substância 1,3 a 15°C em relação à água a 4°C.

O ponto de ebulição é as vezes designado como *100d.* ou *d.100*; a primeira forma indica um ponto de ebulição com decomposição a 100°C e não antes. A anotação como *-2H₂O,82*, isto significa que há perda de 2 moles de água por mol da substância na temperatura de 82°C.

A solubilidade é dada em partes ponderais da substância por 100 partes ponderais do solvente. O índice superior indica a temperatura.

ANEXO III

DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE AMOSTRAS Método da Variância da Média

Esse método permitiu uma tomada de decisão razoavelmente objetiva quanto ao número de amostras, e isso foi preferível a uma escolha subjetiva e intuitiva.

Por exemplo, 5 dissoluções foram realizadas no 4^o teste de laboratório.

n	m/m ₀	(x - \bar{x}) ²
1	1,0000	7,23.10 ⁻⁵
2	0,9979	4,10.10 ⁻⁵
3	0,9917	4,00.10 ⁻⁸
4	0,9885	9,00.10 ⁻⁶
5	0,9793	1,49.10 ⁻⁴

Os seguintes parâmetros estatísticos foram obtidos:

$$\bar{x} = 0,9915 \text{ (média aritmética)}$$

$$\sum (x - \bar{x})^2 = 2,71 \cdot 10^{-4}$$

$$s^2 = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1} = 6,78 \cdot 10^{-5} \text{ (variância)}$$

$$s = \sqrt{s^2} = 0,00823 \text{ (desvio padrão)}$$

$$s_{\bar{x}}^2 = \frac{s^2}{n} = 1,36 \cdot 10^{-5} \text{ (variância da média)}$$

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{s_{\bar{x}}^2} = 0,00369 \text{ (desvio padrão da média)}$$

$$t = 2,776 \text{ (valor da Distribuição t de Student - 95\%)}$$

$$I.C. = \pm t s_{\bar{x}} = 0,010 \text{ (intervalo de confiança)}$$

como,

$$\begin{aligned} 0,9915 & \text{ — } 100\% \\ 0,0100 & \text{ — } I.C. \% \\ I.C. & = 1,009\% \end{aligned}$$

ou seja,

$$\begin{aligned} 0,9915 & \text{ — } 100\% \\ \text{erro} & \text{ — } 1,009\% \\ e & = 0,010 \end{aligned}$$

$$e = t \frac{s}{\sqrt{n}} \tag{All.1}$$

ou

$$n = \left(\frac{ts}{e} \right)^2 \quad (\text{AII.2})$$

Portanto, o valor do número de amostras (n) correspondente à variância da média ($s_{\bar{x}}^2$) foi igual a $5,22 \approx 5$.

O procedimento descrito acima foi empregado em outros testes de laboratório, como demonstrado na Tabela AII.1 e Figura AII.1.

TABELA AII.1 - Valores das variâncias da média e números de observações para sondas de tamanho médio.

n	$s_{\bar{x}}^2$	n	$s_{\bar{x}}^2$
2	0,000021	8	0,000014
2	0,000032	9	0,000009
3	0,000047	9	0,000014
3	0,000053	9	0,000012
3	0,000050	9	0,000008
4	0,000036	10	0,000008
4	0,000013	10	0,000012
5	0,000014	10	0,000010
5	0,000024	11	0,000009
6	0,000014	11	0,000009
6	0,000031	12	0,000013
7	0,000010	12	0,000011
7	0,000010	12	0,000012
8	0,000010	13	0,000016
8	0,000011	13	0,000011

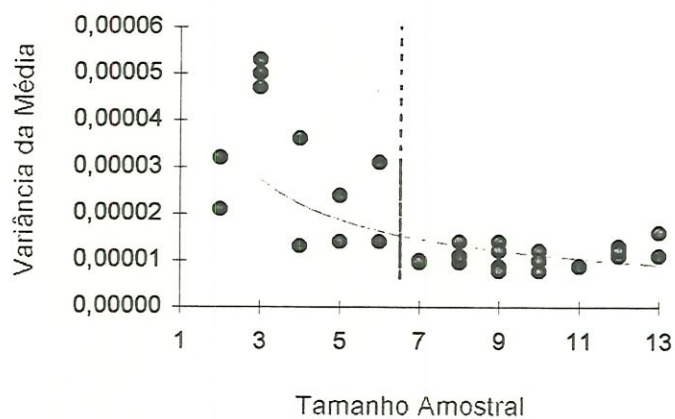


FIGURA AII.1 - Determinação número de mostras para sondas do tamanho médio.

Observa-se que a Figura AII.1 sugeriu um número de sete amostras aproximadamente.

As Tabelas AII.2 e AII.3 e as Figuras AII.2 e AII.3 ilustram as respostas das análises das sondas de tamanho pequeno e grande, respectivamente.

TABELA AII.2 - Valores das variâncias da média e números de observações para sondas de tamanho pequeno.

n	$s_{\bar{x}}^2$	n	$s_{\bar{x}}^2$
2	0,00022	8	0,000038
2	0,00011	9	0,000028
3	0,00014	9	0,00002
3	0,00025	9	0,000032
3	0,00012	9	0,000031
4	0,000076	10	0,000027
4	0,000072	10	0,000023
5	0,000083	10	0,000031
5	0,000037	11	0,000026
6	0,000038	11	0,000028
6	0,000036	12	0,000023
7	0,000028	12	0,000022
7	0,000043	12	0,000022
8	0,000027	13	0,000021
8	0,000035	13	0,000022

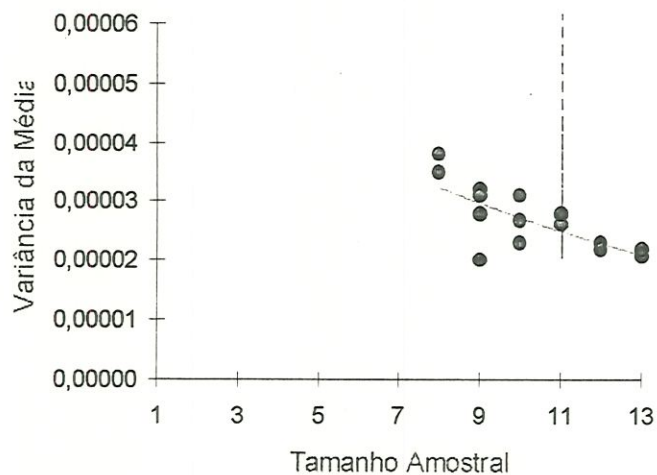


FIGURA AII.2 - Determinação número de amostras para sondas do tamanho pequeno.

A Figura AII.2 sugeriu um número de 11 a 12 amostras.

TABELA AII.3 - Valores das variâncias da média e números de observações para sondas de tamanho grande.

n	$s_{\bar{x}}^2$	n	$s_{\bar{x}}^2$
2	0,000100	8	0,000032
2	0,000082	9	0,000009
3	0,000019	9	0,000025
3	0,000059	9	0,000007
3	0,000060	9	0,000008
4	0,000021	10	0,000023
4	0,000015	10	0,000008
5	0,000035	10	0,000007
5	0,000006	11	0,000006
6	0,000002	11	0,000006
6	0,000012	12	0,000006
7	0,000006	12	0,000005
7	0,000003	12	0,000006
8	0,000011	13	0,000006
8	0,000007	13	0,000005

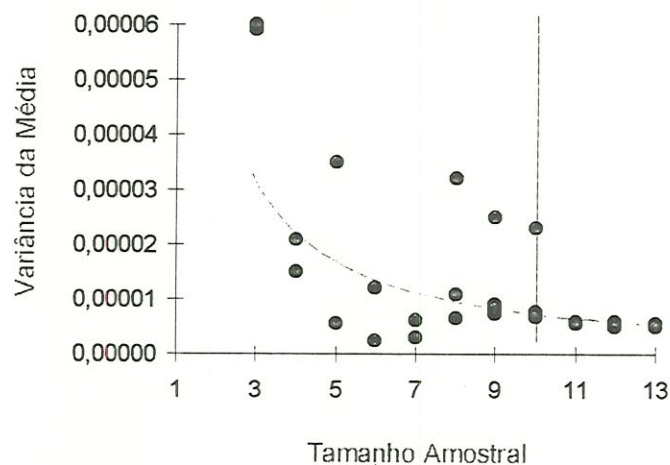


FIGURA AII.3 - Determinação número de amostras para sondas do tamanho grande.

A Figura AII.3 sugeriu um número de 10 a 11 amostras.

Observação: em outra abordagem desse método, dependendo das condições experimentais, pode-se duplicar o erro e calcular novo valor para n . O que implicará em uma redução da amostragem.

ANEXO III

DADOS DA PESQUISA DE CAMPO SONDAS CILÍNDRICAS DE ÁCIDO OXÁLICO

1º Teste - 30/08/94

Teste realizado no Ribeirão de Caldas - Poços de Caldas/MG.

Temperatura da água = 21°C.

Sondas Pequenas

As Tabelas AIII.1 e AIII.2 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho pequeno e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIII.1 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIII.1 - Dados experimentais das sondas de tamanho pequeno.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
1	13,618	13,463	1,70	0,989
2	12,473	12,130	3,03	0,973
3	12,745	12,503	2,47	0,981
4	12,525	12,296	2,13	0,982
5	12,194	11,938	2,95	0,979
6	12,236	11,736	4,07	0,959
7	12,258	11,493	6,09	0,938
8	12,622	11,932	5,14	0,945
9	12,307	10,801	11,03	0,878
10	12,548	11,287	9,17	0,899
11	12,624	11,073	10,65	0,877

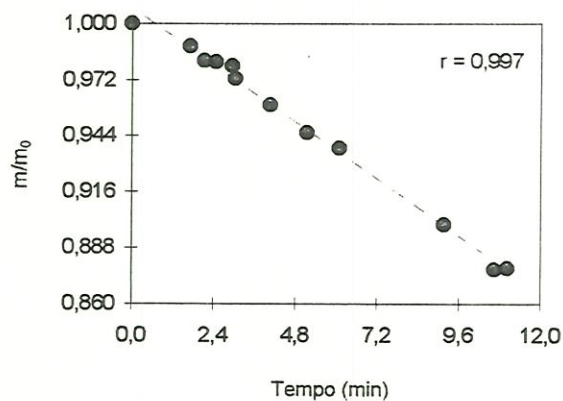


FIGURA AIII.1 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho pequeno, dissolvidas no Ribeirão de Caldas.

TABELA AIII.2 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho pequeno.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	1,00764
Erro Padrão da Estatística Y	0,003653
R ao Quadrado	0,993543
Núm. de observações	12
Graus de Liberdade	10
Coefficiente(s) X	-0,01186
Erro Padrão do Coeficiente	0,000302

Sondas Médias

As Tabelas AIII.3 e AIII.4 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho grande e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIII.2 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIII.3 - Dados experimentais das sondas de tamanho médio.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
	-	-	0,00	1,000
1	22,605	22,180	2,22	0,981
2	22,648	22,256	2,17	0,983
3	23,014	22,344	5,92	0,971
4	23,281	23,021	1,00	0,989
5	23,714	23,202	2,60	0,978
6	23,455	22,846	3,95	0,974
7	23,537	22,387	7,02	0,951
8	22,784	21,603	9,79	0,948

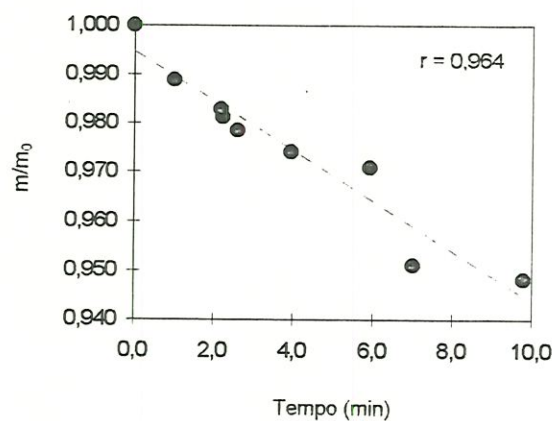


FIGURA AIII.2 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho médio, dissolvidas no Ribeirão de Caldas.

TABELA AIII.4 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho médio.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,994714
Erro Padrão da Estatística Y	0,004723
R ao Quadrado	0,930061
Núm. de observações	9
Graus de Liberdade	7
Coefficiente(s) X	-0,00511
Erro Padrão do Coeficiente	0,000529

Sondas Grandes

As Tabelas AIII.5 e AIII.6 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho grande e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIII.3 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIII.5 - Dados experimentais das sondas de tamanho grande.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
1	52,508	52,143	1,28	0,993
2	52,161	50,787	3,35	0,974
3	51,517	50,103	4,95	0,973
4	51,391	50,363	1,13	0,980
5	50,310	49,448	1,93	0,983
6	53,909	51,173	6,88	0,949
7	52,227	48,702	11,47	0,933
8	51,839	50,743	5,20	0,979
9	52,102	49,049	7,98	0,941
10	52,451	48,472	12,05	0,924
11	50,583	46,247	13,55	0,914

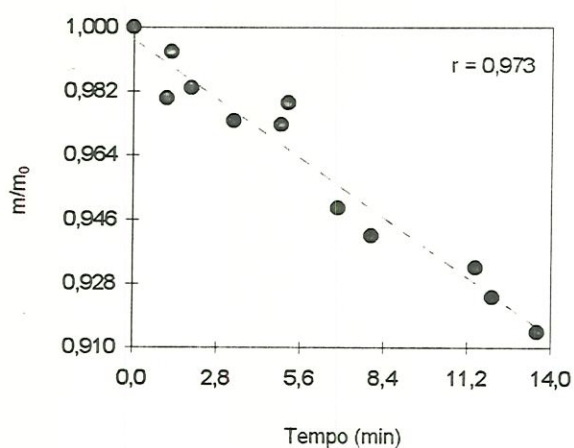


FIGURA AIII.3 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho grande, dissolvidas no Ribeirão de Caldas.

TABELA AIII.6 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho grande.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,995905
Erro Padrão da Estatística Y	0,007382
R ao Quadrado	0,933157
Núm. de observações	12
Graus de Liberdade	10
Coefficiente(s) X	-0,00569
Erro Padrão do Coeficiente	0,000481

2º Teste - 20/09/94

Teste realizado no Rio Jacaré-Guaçú - Ribeirão Bonito/SP.

Temperatura da água = 20°C.

Sondas Pequenas

As Tabelas AIII.7 e AIII.8 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho pequeno e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIII.4 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIII.7 - Dados experimentais das sondas de tamanho pequeno.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
1	12,179	12,094	0,63	0,993
2	12,374	12,304	0,30	0,994
3	11,862	11,719	0,89	0,988
4	12,114	11,979	1,07	0,989
5	11,910	11,740	1,20	0,986
6	12,052	11,970	0,71	0,993
7	12,548	11,364	9,43	0,906
8	12,627	11,595	7,45	0,918
9	13,295	11,508	12,67	0,866
10	12,261	11,861	3,21	0,967
11	12,439	11,933	5,27	0,959

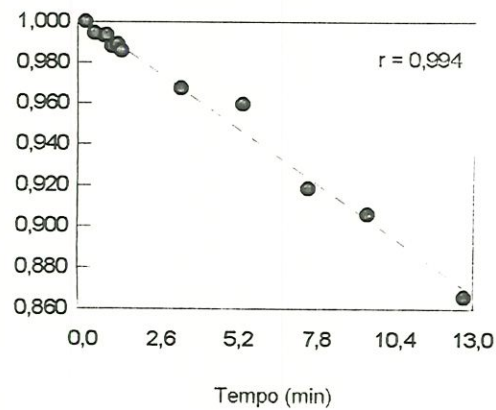


FIGURA AIII.4 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho pequeno, dissolvidas no Rio Jacaré-Guaçu.

TABELA AIII.8 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho pequeno.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,9999243
Erro Padrão da Estatística Y	0,0050223
R ao Quadrado	0,9878635
Núm. de observações	12
Graus de Liberdade	10
Coefficiente(s) X	-0,010272
Erro Padrão do Coeficiente	0,00036

Sondas Médias

As Tabelas AIII.9 e AIII.10 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho grande e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIII.5 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIII.9 - Dados experimentais das sondas de tamanho médio.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,000	1,000
1	22,194	22,011	0,800	0,992
2	22,244	22,128	0,468	0,995
3	22,977	22,800	0,808	0,992
4	22,583	22,377	1,063	0,991
5	22,786	22,658	0,402	0,994
6	22,009	21,891	0,348	0,995
7	22,873	22,409	2,67	0,980
8	23,008	21,865	5,23	0,950

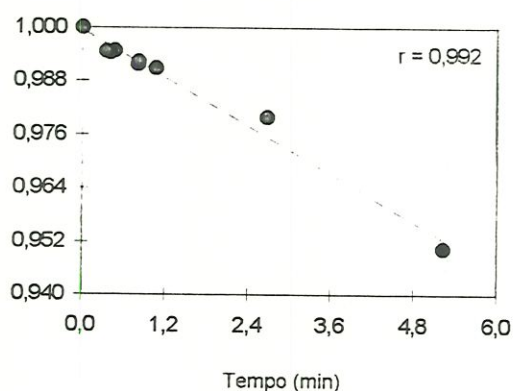


FIGURA AIII.5 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho médio, dissolvidas no Rio Jacaré-Guaçu.

TABELA AIII.10 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho médio.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,9994117
Erro Padrão da Estatística Y	0,0020475
R ao Quadrado	0,9837218
Núm. de observações	9
Graus de Liberdade	7
Coefficiente(s) X	-0,008986
Erro Padrão do Coeficiente	0,0004369

Sondas Grandes

As Tabelas AIII.11 e AIII.12 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho grande e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIII.6 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIII.11 - Dados experimentais das sondas de tamanho grande.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
1	51,050	50,613	0,75	0,991
2	51,366	50,965	0,63	0,992
3	51,364	50,921	1,04	0,991
4	50,681	50,494	0,33	0,996
5	50,121	49,829	0,58	0,994
6	52,326	51,993	0,33	0,994
7	52,254	51,329	3,56	0,982
8	50,542	48,104	5,70	0,952
9	51,252	48,401	7,04	0,944
10	52,112	49,502	6,51	0,950
11	52,578	50,302	4,89	0,957

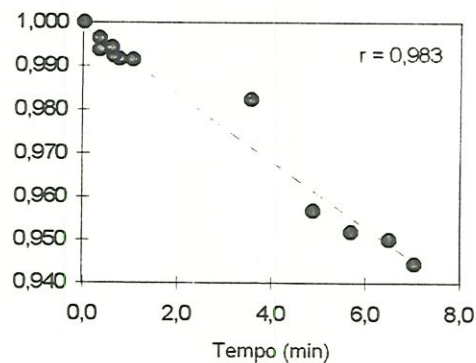


FIGURA AIII.6 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho grande, dissolvidas no Rio Jacaré-Guaçú.

TABELA AIII.12 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho grande.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,9987177
Erro Padrão da Estatística Y	0,004052
R ao Quadrado	0,9669004
Núm. de observações	12
Graus de Liberdade	10
Coefficiente(s) X	-0,007665
Erro Padrão do Coeficiente	0,0004485

3º Teste - 06/03/95

Teste realizado no Rio Laranja-Azeda - São Carlos/SP.

Temperatura da água = 20°C.

Sondas Pequenas

As Tabelas AIII.13 e AIII.14 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho pequeno e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIII.7 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIII.13 - Dados experimentais das sondas de tamanho pequeno.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
1	10,485	10,260	0,41	0,979
2	11,881	11,074	6,18	0,932
3	11,681	11,510	1,02	0,985
4	11,938	11,790	0,79	0,988
5	12,136	11,859	2,03	0,977
6	12,206	11,930	1,17	0,977
7	12,523	11,434	7,05	0,913
8	12,357	11,523	5,32	0,933
9	13,104	11,291	11,57	0,861
10	12,007	11,502	2,99	0,958
11	12,601	11,084	9,41	0,880

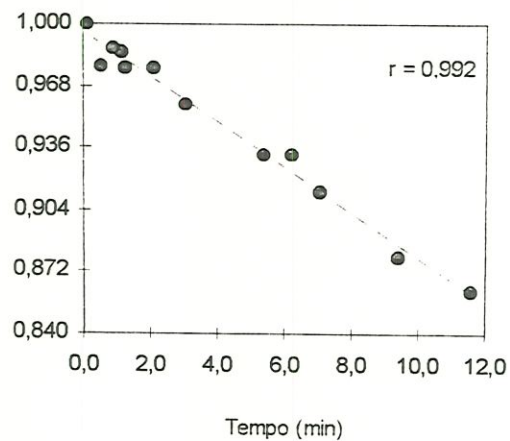


FIGURA AIII.7 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho pequeno, dissolvidas no Rio Laranja-Azeda.

TABELA AIII.14 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho pequeno.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,994851
Erro Padrão da Estatística Y	0,005844
R ao Quadrado	0,984659
Núm. de observações	12
Graus de Liberdade	10
Coefficiente(s) X	-0,01158
Erro Padrão do Coeficiente	0,000457

Sondas Médias

As Tabelas AIII.15 e AIII.16 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho grande e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIII.8 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIII.15 - Dados experimentais das sondas de tamanho médio.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
1	21,493	21,300	0,32	0,991
2	22,254	21,354	1,32	0,960
3	22,278	20,101	5,38	0,902
4	21,622	15,902	12,24	0,736
5	22,200	20,105	3,46	0,906
6	21,854	18,423	7,44	0,843
7	22,171	17,008	11,52	0,767
8	22,904	19,203	8,62	0,838

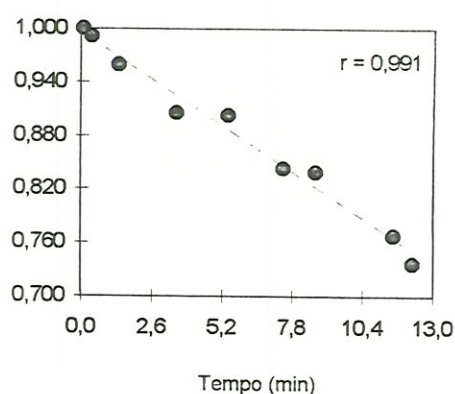


FIGURA AIII.8 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho médio, dissolvidas no Rio Laranja-Azeda.

TABELA AIII.16 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho médio.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,994384
Erro Padrão da Estatística Y	0,013202
R ao Quadrado	0,982787
Núm. de observações	9
Graus de Liberdade	7
Coefficiente(s) X	-0,02002
Erro Padrão do Coeficiente	0,001001

Sondas Grandes

As Tabelas AIII.17 e AIII.18 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho grande e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIII.9 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIII.17 - Dados experimentais das sondas de tamanho grande.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
1	49,240	48,140	2,20	0,978
2	50,491	45,703	9,31	0,905
3	50,523	48,509	3,65	0,960
4	48,440	45,564	5,77	0,941
5	51,032	47,202	7,37	0,925
6	51,010	50,420	1,08	0,988
7	50,374	43,204	11,56	0,858
8	50,109	46,204	6,42	0,922
9	52,236	44,903	13,48	0,860
10	51,311	42,105	14,79	0,821
11	50,458	45,605	8,03	0,904

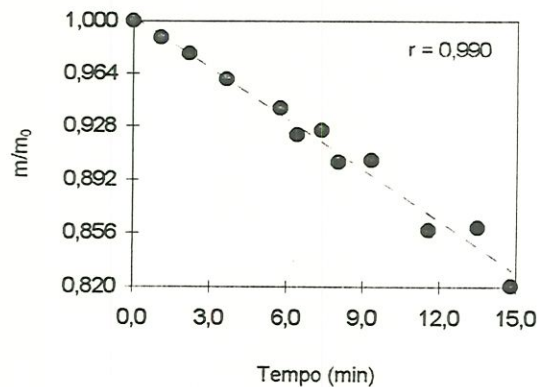


FIGURA AIII.9 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho grande, dissolvidas no Rio Laranja-Azeda.

TABELA AIII.18 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho grande.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	1,00259
Erro Padrão da Estatística Y	0,008257
R ao Quadrado	0,98014
Núm. de observações	12
Graus de Liberdade	10
Coefficiente(s) X	-0,0116
Erro Padrão do Coeficiente	0,000522

4º Teste - 22/03/95

Teste realizado no Ribeirão de Caldas - Poços de Caldas/MG.

Temperatura da água = 21°C.

Sondas Pequenas

As Tabelas AIII.19 e AIII.20 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho pequeno e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIII.10 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIII.19 - Dados experimentais das sondas de tamanho pequeno.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
1	7,006	6,515	3,55	0,930
2	6,676	6,300	2,38	0,944
3	7,211	7,103	1,24	0,985
4	6,141	5,976	0,72	0,973
5	6,250	5,393	7,08	0,863
6	6,577	5,903	4,53	0,898
7	6,329	5,602	6,87	0,885
8	7,102	5,707	10,42	0,804
9	6,747	5,294	11,05	0,785
10	6,336	5,230	9,68	0,825
11	7,304	5,491	13,03	0,752

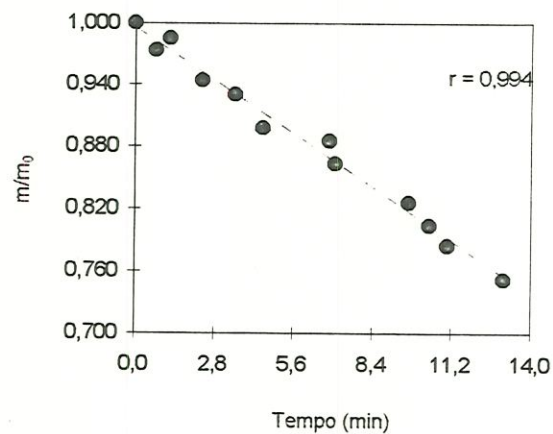


FIGURA AIII.10 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho pequeno, dissolvidas no Ribeirão de Caldas.

TABELA AIII.20 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho pequeno.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,996227
Erro Padrão da Estatística Y	0,00861
R ao Quadrado	0,989737
Núm. de observações	12
Graus de Liberdade	10
Coefficiente(s) X	-0,01813
Erro Padrão do Coeficiente	0,000584

Sondas Médias

As Tabelas AIII.21 e AIII.22 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho grande e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIII.11 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIII.21 - Dados experimentais das sondas de tamanho médio.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
1	13,032	12,747	1,04	0,978
2	21,904	21,652	0,93	0,989
3	22,428	21,809	4,23	0,972
4	12,427	12,016	2,41	0,967
5	21,855	21,009	5,33	0,961
6	12,177	11,740	3,48	0,964
7	22,160	20,703	10,04	0,934
8	21,573	20,406	6,79	0,946

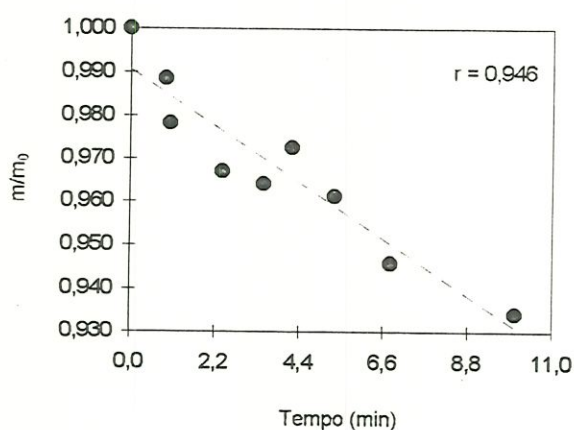


FIGURA AIII.11 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho médio, dissolvidas no Ribeirão de Caldas.

TABELA AIII.22 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho médio.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,990513
Erro Padrão da Estatística Y	0,007015
R ao Quadrado	0,894145
Núm. de observações	9
Graus de Liberdade	7
Coefficiente(s) X	-0,00593
Erro Padrão do Coeficiente	0,000771

Sondas Grandes

As Tabelas AIII.23 e AIII.24 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho grande e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIII.12 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIII.23 - Dados experimentais das sondas de tamanho grande.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
1	49,983	48,600	5,23	0,972
2	51,377	51,081	3,39	0,994
3	49,482	48,006	5,37	0,970
4	51,271	50,270	0,50	0,981
5	24,422	23,383	4,63	0,958
7	51,057	49,702	7,42	0,974
8	51,177	48,692	10,05	0,951
9	50,374	46,301	13,45	0,919
10	50,531	47,245	11,07	0,935
11	49,583	47,092	12,86	0,950
6	51,4590	perdeu-se	-	-

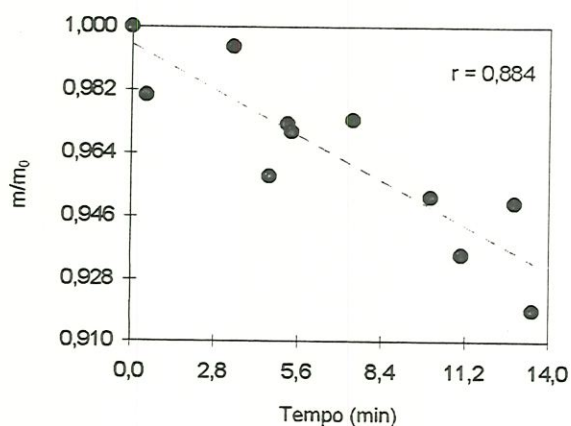


FIGURA AIII.12 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho grande, dissolvidas no Ribeirão de Caldas.

TABELA AIII.24 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho grande.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,99505
Erro Padrão da Estatística Y	0,012008
R ao Quadrado	0,781374
Núm. de observações	11
Graus de Liberdade	9
Coefficiente(s) X	-0,00462
Erro Padrão do Coeficiente	0,000815

5º Teste - 11/04/95

Teste realizado no Ribeirão do Feijão - São Carlos/SP.

Temperatura da água = 22,3°C.

Sondas Pequenas

As Tabelas AIII.25 e AIII.26 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho pequeno e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIII.13 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIII.25 - Dados experimentais das sondas de tamanho pequeno.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
1	6,440	6,120	1,28	0,950
2	7,126	6,949	0,89	0,975
3	6,830	6,001	4,19	0,879
4	6,539	6,290	0,97	0,962
5	6,493	6,214	1,33	0,957
6	-	perdeu-se	-	-
7	7,037	6,084	5,63	0,865
8	6,283	5,902	3,27	0,939
9	6,698	4,598	9,87	0,686
10	6,910	5,342	7,36	0,773
11	6,314	4,308	10,04	0,682

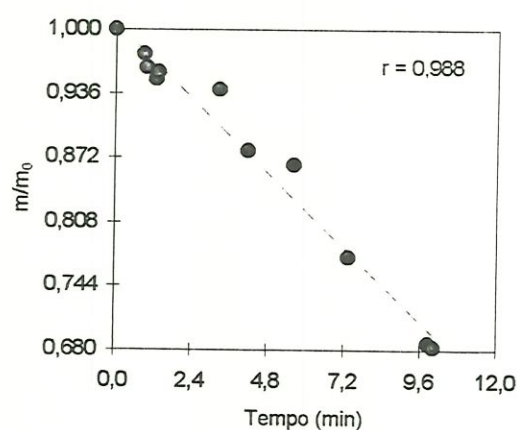


FIGURA AIII.13 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho pequeno, dissolvidas no Ribeirão do Feijão.

TABELA AIII.26 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho pequeno.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	1,005337
Erro Padrão da Estatística Y	0,018927
R ao Quadrado	0,975716
Núm. de observações	11
Graus de Liberdade	9
Coefficiente(s) X	-0,031
Erro Padrão do Coeficiente	0,00163

Sondas Médias

As Tabelas AIII.27 e AIII.28 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho grande e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIII.14 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIII.27 - Dados experimentais das sondas de tamanho médio.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m ₀ (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m ₀
-	-	-	0,00	1,000
1	21,244	16,004	8,90	0,753
2	21,879	20,101	3,86	0,919
3	22,029	21,012	1,45	0,954
4	21,734	17,309	7,04	0,796
5	21,637	perdeu-se	-	-
6	21,208	perdeu-se	-	-
7	22,135	19,405	5,07	0,877
8	21,542	19,002	4,03	0,882

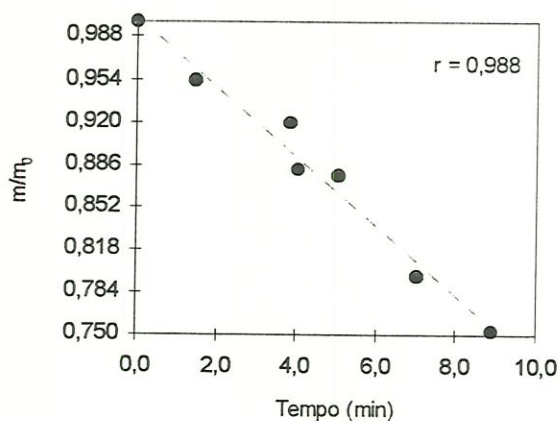


FIGURA AIII.14 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho médio, dissolvidas no Ribeirão do Feijão.

TABELA AIII.28 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho médio.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	1,003435
Erro Padrão da Estatística Y	0,014367
R ao Quadrado	0,97672
Núm. de observações	7
Graus de Liberdade	5
Coefficiente(s) X	-0,02778
Erro Padrão do Coeficiente	0,001918

Sondas Grandes

As Tabelas AIII.29 e AIII.30 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho grande e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIII.15 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIII.29 - Dados experimentais das sondas de tamanho grande.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
3	50,491	48,219	2,71	0,955
4	50,317	46,823	3,57	0,931
5	48,835	47,231	1,02	0,967
7	50,304	46,611	5,45	0,927
8	48,621	43,005	8,22	0,885
9	49,796	41,371	10,18	0,831
10	48,503	41,401	9,06	0,854
11	50,289	44,502	7,53	0,885
1	49,320	perdeu-se	-	-
2	48,400	perdeu-se	-	-
6	50,067	perdeu-se	-	-

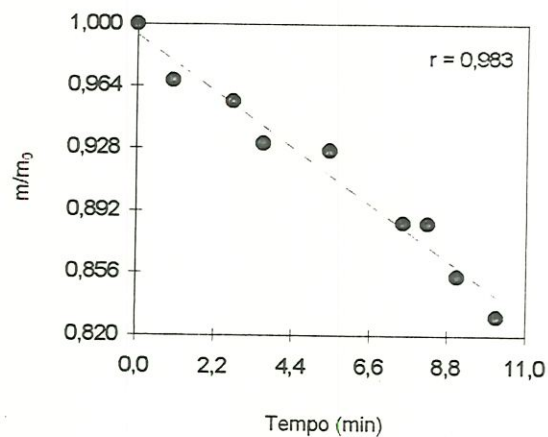


FIGURA AIII.15 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho grande, dissolvidas no Ribeirão do Feijão.

TABELA AIII.30 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho grande.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,993701
Erro Padrão da Estatística Y	0,010746
R ao Quadrado	0,967162
Núm. de observações	9
Graus de Liberdade	7
Coefficiente(s) X	-0,01488
Erro Padrão do Coeficiente	0,001036

6º Teste - 27/06/95

Teste realizado no Ribeirão de Caldas - Poços de Caldas/MG.

Temperatura da água = 17,8°C.

Sondas Pequenas

As Tabelas AIII.31 e AIII.32 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho pequeno e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIII.16 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIII.31 - Dados experimentais das sondas de tamanho pequeno.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
1	12,121	12,039	0,63	0,993
2	11,717	11,531	2,60	0,984
3	11,482	11,133	5,11	0,970
4	11,935	11,633	4,08	0,975
5	10,871	10,527	5,13	0,968
6	6,383	6,168	5,18	0,966
7	12,010	11,434	7,89	0,952
8	10,905	10,247	10,35	0,940
9	11,587	10,692	13,52	0,923
10	11,648	10,583	14,97	0,909
11	11,362	10,254	16,08	0,903

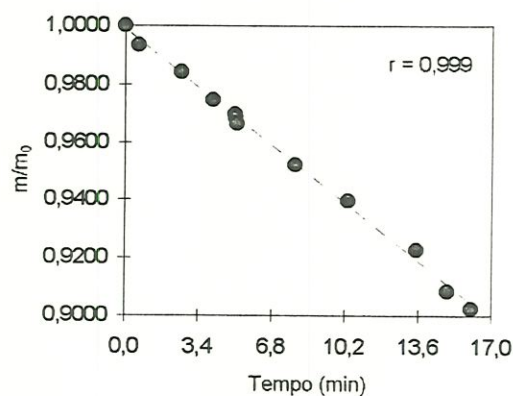


FIGURA AIII.16 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho pequeno, dissolvidas no Ribeirão de Caldas.

TABELA AIII.32 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho pequeno.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,998779
Erro Padrão da Estatística Y	0,001821
R ao Quadrado	0,997091
Núm. de observações	12
Graus de Liberdade	10
Coefficiente(s) X	-0,00589
Erro Padrão do Coeficiente	0,000101

Sondas Médias

As Tabelas AIII.33 e AIII.34 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho grande e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIII.17 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIII.33 - Dados experimentais das sondas de tamanho médio.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
1	20,992	20,312	4,93	0,968
2	21,290	21,126	0,63	0,992
3	12,230	11,858	5,08	0,970
4	21,282	20,761	4,12	0,976
5	21,846	21,648	1,53	0,991
6	12,382	12,138	2,47	0,980
7	21,734	20,893	6,99	0,961
8	20,871	19,894	10,04	0,953

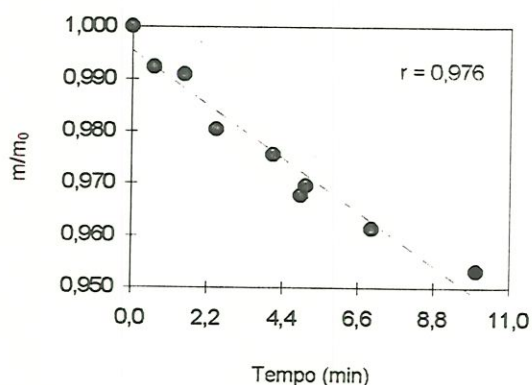


FIGURA AIII.17 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho médio, dissolvidas no Ribeirão de Caldas.

TABELA AIII.34 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho médio.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,99541
Erro Padrão da Estatística Y	0,003636
R ao Quadrado	0,951958
Núm. de observações	9
Graus de Liberdade	7
Coefficiente(s) X	-0,00469
Erro Padrão do Coeficiente	0,000398

Sondas Grandes

As Tabelas AIII.35 e AIII.36 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho grande e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIII.18 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIII.35 - Dados experimentais das sondas de tamanho grande.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
1	50,553	49,766	2,63	0,984
2	26,564	26,276	1,63	0,989
3	50,691	49,914	3,35	0,985
4	49,701	48,619	4,48	0,978
5	48,891	perdeu-se	-	-
6	23,854	perdeu-se	-	-
7	26,038	25,405	4,89	0,976
8	50,386	47,719	12,74	0,947
9	48,639	46,422	9,49	0,954
10	27,035	25,947	7,92	0,960
11	26,218	25,482	5,89	0,972

ANEXO IV

DADOS DA PESQUISA DE LABORATÓRIO SONDAS PLANAS DE ÁCIDO OXÁLICO

1º Teste - 19/10/94

Velocidade de Rotação = 62 rpm.

Temperatura da água e do ar = 25°C.

Sondas Pequenas

As Tabelas AIV.1 e AIV.2 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho pequeno e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIV.1 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIV.1 - Dados experimentais das sondas de tamanho pequeno.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,000	1,0000
1	12,049	12,015	0,402	0,9972
2	12,265	12,145	1,220	0,9902
3	11,665	11,482	2,005	0,9843
4	11,919	11,703	2,753	0,9819
5	11,650	11,400	3,401	0,9785
6	11,877	11,493	5,519	0,9677
7	11,732	11,262	7,862	0,9599
8	11,412	10,918	8,350	0,9567
9	12,086	11,502	9,957	0,9517
10	12,146	11,491	11,567	0,9461
11	11,774	11,049	12,503	0,9384

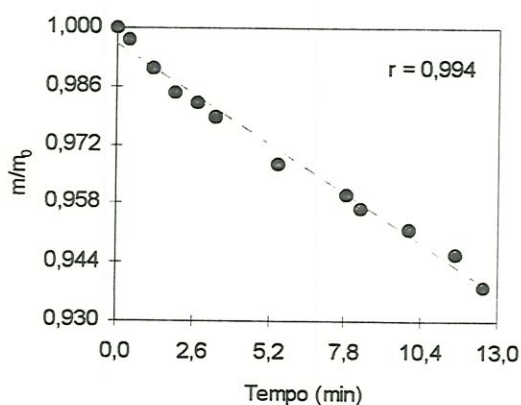


FIGURA AIV.1 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho pequeno, para velocidade de rotação de 62 rpm.

TABELA AIV.2 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho pequeno.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,9960854
Erro Padrão da Estatística Y	0,0024224
R ao Quadrado	0,9873569
Núm. de observações	12
Graus de Liberdade	10
Coefficiente(s) X	-0,004584
Erro Padrão do Coeficiente	0,000164

Sondas Médias

As Tabelas AIV.3 e AIV.4 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho grande e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIII.2 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIV.3 - Dados experimentais das sondas de tamanho médio.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,000	1,0000
1	21,967	21,921	0,353	0,9979
2	22,065	21,882	1,222	0,9917
3	22,705	22,443	2,006	0,9885
4	22,267	21,882	2,758	0,9827
5	22,476	22,011	3,491	0,9793
6	21,727	21,150	5,268	0,9734
7	22,014	21,206	7,80	0,9633
8	22,123	21,171	10,075	0,9570

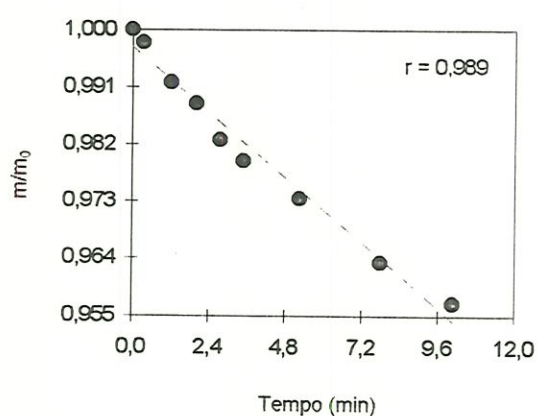


FIGURA AIV.2 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho médio, para velocidade de rotação de 62 rpm.

TABELA AIV.4 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho médio.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,9971878
Erro Padrão da Estatística Y	0,0023548
R ao Quadrado	0,9780502
Núm. de observações	9
Graus de Liberdade	7
Coefficiente(s) X	-0,004273
Erro Padrão do Coeficiente	0,0002419

Sondas Grandes

As Tabelas AIV.5 e AIV.6 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho grande e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIV.3 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIV.5 - Dados experimentais das sondas de tamanho grande.

Numero da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,000	1,0000
1	50,451	50,171	0,352	0,9945
2	50,700	50,275	1,218	0,9916
3	50,675	50,212	2,006	0,9909
4	50,207	49,516	2,757	0,9862
5	49,762	49,105	3,489	0,9868
6	51,813	50,307	5,440	0,9709
7	50,572	48,701	7,89	0,9630
8	50,334	48,222	9,45	0,9580
9	51,107	48,653	11,62	0,9520
10	50,211	47,613	13,59	0,9483
11	50,528	47,601	15,780	0,9421

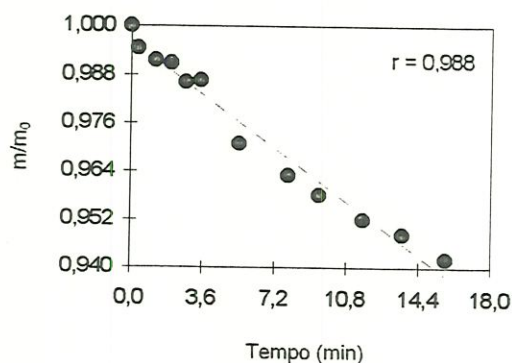


FIGURA AIV.3 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho grande, para velocidade de rotação de 62 rpm.

TABELA AIV.6 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho grande.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,9964029
Erro Padrão da Estatística Y	0,003297
R ao Quadrado	0,976126
Núm. de observações	12
Graus de Liberdade	10
Coefficiente(s) X	-0,003704
Erro Padrão do Coeficiente	0,0001832

2º Teste - 25/05/95

Velocidade de Rotação = 255 rpm.

Temperatura da água e do ar = 25,5°C.

Sondas Pequenas

As Tabelas AIV.7 e AIV.8 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho pequeno e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIV.4 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIV.7 - Dados experimentais das sondas de tamanho pequeno.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
1	12,557	12,251	1,04	0,976
2	12,687	11,888	2,09	0,937
3	12,763	11,637	3,30	0,912
4	13,125	10,943	5,11	0,834
5	12,583	9,837	8,09	0,782
6	13,125	9,708	9,07	0,740
7	11,512	8,303	10,04	0,721
8	12,751	8,894	11,01	0,698
9	13,053	8,501	12,07	0,651
10	11,742	7,387	13,08	0,629
11	12,693	7,509	14,05	0,592

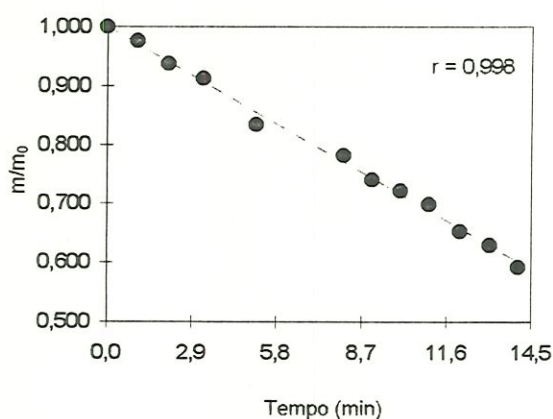


FIGURA AIV.4 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho pequeno, para velocidade de rotação de 255 rpm.

TABELA AIV.8 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho pequeno.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	1,000199
Erro Padrão da Estatística Y	0,009608
R ao Quadrado	0,9957517
Núm. de observações	12
Graus de Liberdade	10
Coefficiente(s) X	-0,0284661
Erro Padrão do Coeficiente	0,0005880

Sondas Médias

As Tabelas AIV.9 e AIV.10 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho grande e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIV.5 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIV.9 - Dados experimentais das sondas de tamanho médio.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
1	12,827	12,313	1,06	0,960
2	11,972	11,187	2,01	0,934
3	13,727	11,877	3,07	0,865
4	12,581	10,393	4,03	0,826
5	13,709	10,448	5,27	0,762
6	12,727	9,251	6,98	0,727
7	11,867	8,24	7,54	0,694
8	13,709	8,799	9,21	0,642

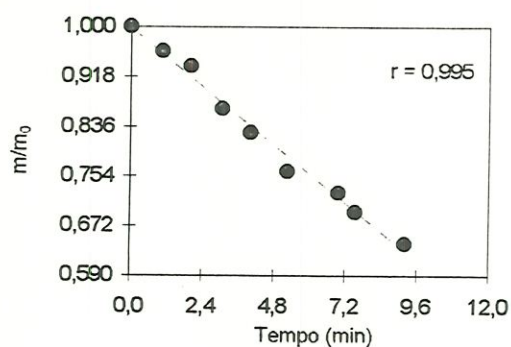


FIGURA AIV.5 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho médio, para velocidade de rotação de 255 rpm.

TABELA AIV.10 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho médio.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,9971528
Erro Padrão da Estatística Y	0,0139528
R ao Quadrado	0,9892353
Núm. de observações	9
Graus de Liberdade	7
Coefficiente(s) X	-0,0399255
Erro Padrão do Coeficiente	0,0015742

Sondas Grandes

As Tabelas AIV.11 e AIV.12 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho grande e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIV.6 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIV.11 - Dados experimentais das sondas de tamanho grande.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m ₀ (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m ₀
-	-	-	0,00	1,000
1	48,832	48,187	1,09	0,987
2	45,546	43,588	2,05	0,957
3	46,846	44,125	3,03	0,942
4	29,872	27,493	4,02	0,920
5	48,846	44,016	5,07	0,901
6	44,328	39,162	6,03	0,883
7	30,102	26,045	7,02	0,865
8	45,629	38,861	8,01	0,852
9	29,962	24,796	9,16	0,828
10	30,245	24,345	10,05	0,805
11	44,471	35,022	11,04	0,788

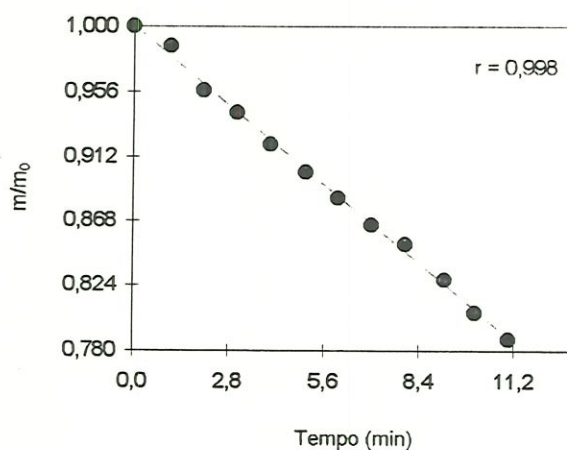


FIGURA AIV.6 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho grande, para velocidade de rotação de 255 rpm.

TABELA AIV.12 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho grande.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	1,00063
Erro Padrão da Estatística Y	0,00354
R ao Quadrado	0,99765
Núm. de observações	12
Graus de Liberdade	10
Coefficiente(s) X	-0,019228
Erro Padrão do Coeficiente	0,0002951

3º Teste - 07/08/95

Velocidade de Rotação = 110 rpm.

Temperatura da água e do ar = 25°C.

Sondas Pequenas

As Tabelas AIV.13 e AIV.14 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho pequeno e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIV.7 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIV.13 - Dados experimentais das sondas de tamanho pequeno.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
1	11,327	11,194	1,02	0,988
2	10,546	10,302	2,34	0,977
3	11,169	10,788	3,84	0,966
4	12,802	12,271	4,67	0,959
5	10,946	10,406	5,14	0,951
6	11,209	10,573	6,04	0,943
7	11,345	10,567	7,51	0,931
8	10,658	9,884	8,03	0,927
9	12,737	11,705	9,13	0,919
10	11,049	10,086	10,20	0,913
11	10,740	9,703	11,33	0,903

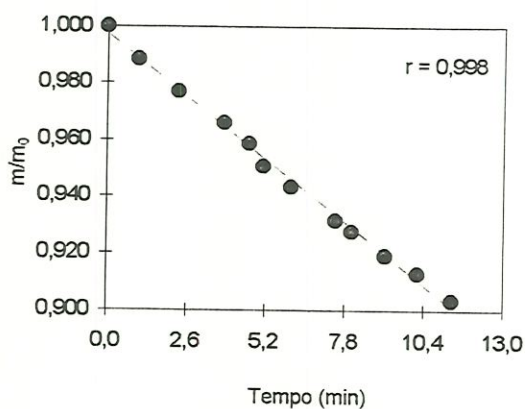


FIGURA AIV.7 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho pequeno, para velocidade de rotação de 110 rpm.

TABELA AIV.14 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho pequeno.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,997194
Erro Padrão da Estatística Y	0,002106
R ao Quadrado	0,995728
Núm. de observações	12
Graus de Liberdade	10
Coefficiente(s) X	-0,0085
Erro Padrão do Coeficiente	0,000176

Sondas Médias

As Tabelas AIV.15 e AIV.16 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho grande e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIV.8 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIV.15 - Dados experimentais das sondas de tamanho médio.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
1	22,976	22,825	1,02	0,993
2	23,412	23,063	2,05	0,985
3	9,989	9,809	3,10	0,982
4	22,904	22,238	4,65	0,971
5	9,711	9,389	5,13	0,967
6	9,807	9,332	7,85	0,952
7	22,899	21,579	9,03	0,942
8	23,529	22,098	10,27	0,939

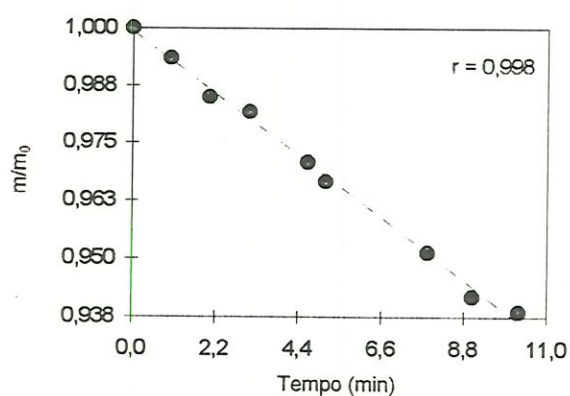


FIGURA AIV.8 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho médio, para velocidade de rotação de 110 rpm.

TABELA AIV.16 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho médio.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,99921
Erro Padrão da Estatística Y	0,001565
R ao Quadrado	0,99559
Núm. de observações	9
Graus de Liberdade	7
Coeficiente(s) X	-0,00607
Erro Padrão do Coeficiente	0,000153

Sondas Grandes

As Tabelas AIV.17 e AIV.18 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho grande e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIV.9 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIV.17 - Dados experimentais das sondas de tamanho grande.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
1	49,838	49,262	1,08	0,988
2	55,020	54,089	2,22	0,983
3	22,219	21,587	3,08	0,972
4	56,194	54,266	4,02	0,966
5	21,207	20,347	5,13	0,959
6	55,139	52,381	6,01	0,950
7	21,131	19,940	7,24	0,944
8	22,233	20,901	8,15	0,940
9	49,872	46,554	9,05	0,933
10	22,328	20,713	10,01	0,928
11	56,310	51,789	11,05	0,920

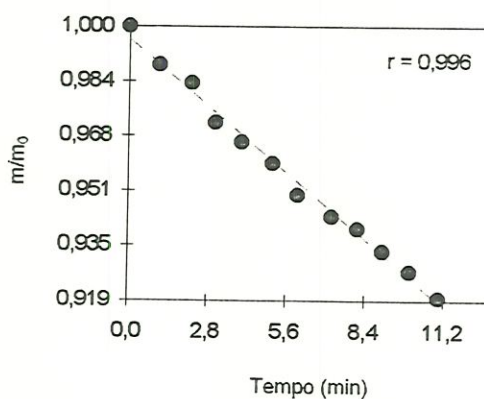


FIGURA AIV.9 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho grande, para velocidade de rotação de 110 rpm.

TABELA AIV.18 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho grande.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,996218
Erro Padrão da Estatística Y	0,002463
R ao Quadrado	0,991494
Núm. de observações	12
Graus de Liberdade	10
Coefficiente(s) X	-0,00704
Erro Padrão do Coeficiente	0,000206

4º Teste - 25/10/95

Velocidade de Rotação = 206 rpm.

Temperatura da água e do ar = 25°C.

Sondas Pequenas

As Tabelas AIV.19 e AIV.20 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho pequeno e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIV.10 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIV.19 - Dados experimentais das sondas de tamanho pequeno.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
1	6,697	6,537	1,24	0,976
2	7,203	6,638	3,49	0,922
3	7,179	6,737	2,68	0,938
4	6,819	6,115	5,05	0,897
5	6,694	5,203	9,34	0,777
6	7,073	5,847	7,72	0,827
7	7,037	5,194	11,18	0,738
8	6,450	5,823	4,65	0,903
9	6,513	5,261	8,55	0,808
10	6,424	4,906	10,20	0,764
11	6,422	5,648	6,03	0,879

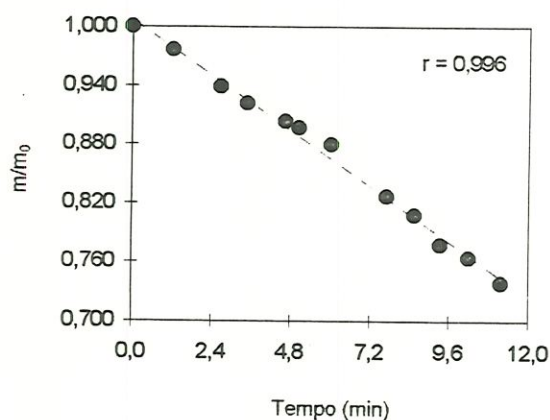


FIGURA AIV.10 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho pequeno, para velocidade de rotação de 68 rpm.

TABELA AIV.20 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho pequeno.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	1,006914 2
Erro Padrão da Estatística Y	0,007364
R ao Quadrado	0,993258
Núm. de observações	12
Graus de Liberdade	10
Coefficiente(s) X	-0,02359
Erro Padrão do Coeficiente	0,000615

Sondas Médias

As Tabelas AIV.21 e AIV.22 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho grande e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIV.11 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIV.21 - Dados experimentais das sondas de tamanho médio.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
1	21,575	20,935	2,65	0,970
2	21,518	21,174	1,35	0,984
3	21,242	19,661	6,83	0,926
4	21,678	20,563	4,52	0,949
5	22,332	20,194	8,72	0,904
6	22,054	20,809	5,08	0,944
7	21,363	19,542	7,42	0,915
8	21,663	20,883	3,07	0,964

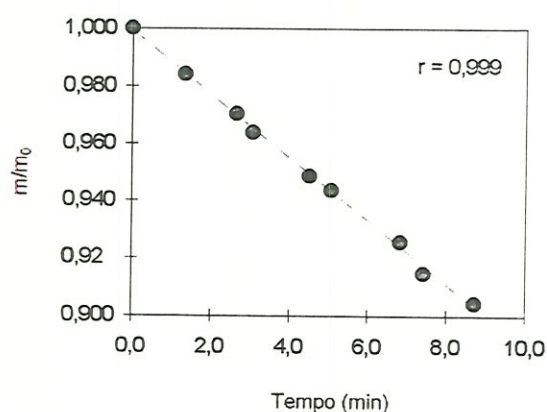


FIGURA AIV.11 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho médio, pa a velocidade de rotação de 68 rpm.



TABELA AIV.22 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho médio.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,999150
Erro Padrão da Estatística Y	0,001421
R ao Quadrado	0,998285
Núm. de observações	9
Graus de Liberdade	7
Coefficiente(s) X	-0,01103
Erro Padrão do Coeficiente	0,000173

Sondas Grandes

As Tabelas AIV.23 e AIV.24 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho grande e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIV.12 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIV.23 - Dados experimentais das sondas de tamanho grande.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
1	50,846	48,017	3,82	0,944
2	51,360	48,014	5,65	0,935
3	49,655	47,857	2,50	0,964
4	50,684	47,392	4,91	0,935
5	50,297	43,002	13,02	0,855
6	48,757	45,041	6,49	0,924
7	50,116	46,004	7,73	0,918
8	50,292	45,064	9,60	0,896
9	48,694	42,308	11,11	0,869
10	46,208	45,053	1,72	0,975
11	49,364	44,206	8,91	0,896

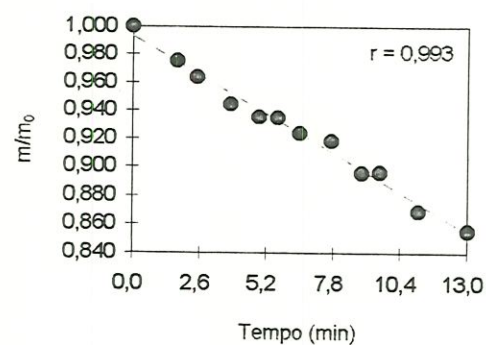


FIGURA AIV.12 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho grande, para velocidade de rotação de 68 rpm.

TABELA AIV.24 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho grande.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,993268
Erro Padrão da Estatística Y	0,005262
R ao Quadrado	0,986166
Núm. de observações	12
Graus de Liberdade	10
Coefficiente(s) X	-0,01072
Erro Padrão do Coeficiente	0,000402

5º Teste - 18/01/96

Velocidade de Rotação = 158 rpm.

Temperatura da água e do ar = 25°C.

Sondas Pequenas

As Tabelas AIV.25 e AIV.26 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho pequeno e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIV.13 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIV.25 - Dados experimentais das sondas de tamanho pequeno.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
1	9,805	9,751	1,04	0,994
2	11,521	11,396	2,03	0,989
3	10,885	10,692	3,07	0,982
4	12,289	12,007	4,05	0,977
5	12,155	11,788	5,14	0,970
6	11,480	11,083	6,20	0,965
7	12,233	11,711	7,11	0,957
8	10,974	10,458	8,01	0,953
9	11,642	11,018	9,02	0,946
10	9,738	9,181	10,03	0,943
11	12,309	11,542	11,02	0,938

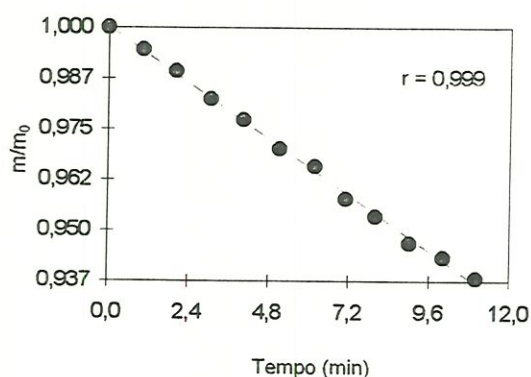


FIGURA AIV.13 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho pequeno, para velocidade de rotação de 158 rpm.

TABELA AIV.26 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho pequeno.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	1,000217
Erro Padrão da Estatística Y	0,001027
R ao Quadrado	0,997816
Núm. de observações	12
Graus de Liberdade	10
Coefficiente(s) X	-0,0058
Erro Padrão do Coeficiente	8,59E-05

Sondas Médias

As Tabelas AIV.27 e AIV.28 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho grande e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIV.14 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIV.27 - Dados experimentais das sondas de tamanho médio.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
1	12,513	12,422	1,02	0,993
2	22,646	22,044	2,65	0,973
3	13,875	13,402	3,41	0,966
4	21,977	21,117	4,05	0,961
5	12,508	11,835	5,44	0,946
6	22,549	21,197	6,12	0,940
7	12,623	11,704	7,09	0,927
8	13,880	12,508	10,51	0,901

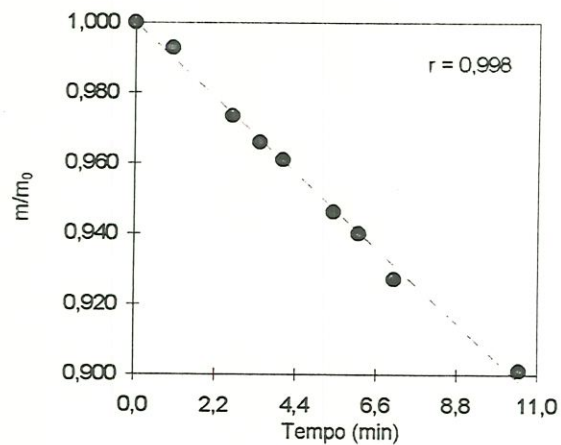


FIGURA AIV.14 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho médio, para velocidade de rotação de 158 rpm.

TABELA AIV.28 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho médio.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,999827
Erro Padrão da Estatística Y	0,002257
R ao Quadrado	0,995484
Núm. de observações	9
Graus de Liberdade	7
Coefficiente(s) X	-0,0097
Erro Padrão do Coeficiente	0,000247

Sondas Grandes

As Tabelas AIV.29 e AIV.30 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho grande e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIV.15 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIV.29 - Dados experimentais das sondas de tamanho grande.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,00	1,000
1	51,296	50,692	1,20	0,988
2	56,558	55,708	2,58	0,985
3	57,018	55,876	3,41	0,980
4	56,642	55,184	4,05	0,974
5	51,307	50,017	5,15	0,975
6	53,410	51,666	6,08	0,967
7	56,505	54,341	7,89	0,962
8	55,984	53,479	9,03	0,955
9	51,317	48,612	10,06	0,947
10	51,223	48,296	11,01	0,943
11	57,159	53,410	12,15	0,934

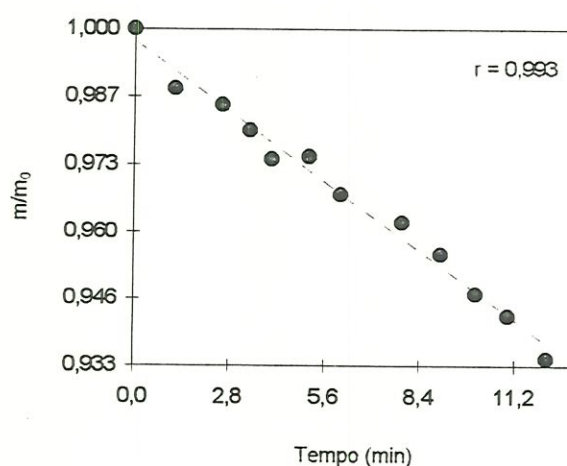


FIGURA AIV.15 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho grande para velocidade de rotação de 158 rpm.

TABELA AIV.30 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho grande.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,997592
Erro Padrão da Estatística Y	0,002483
R ao Quadrado	0,985798
Núm. de observações	12
Graus de Liberdade	10
Coefficiente(s) X	-0,00496
Erro Padrão do Coeficiente	0,000188

6º Teste - 28/03/97

Velocidade de Rotação = 68 rpm.

Temperatura da água e do ar = 25°C.

Sondas Pequenas

As Tabelas AIV.31 e AIV.32 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho pequeno e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIV.16 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIV.31 - Dados experimentais das sondas de tamanho pequeno.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,000	1,000
1	11,205	11,094	1,447	0,990
2	11,358	11,182	2,520	0,985
3	12,378	12,157	3,104	0,982
4	12,012	11,682	4,736	0,973
5	10,895	10,542	5,328	0,968
6	11,934	11,457	6,070	0,960
7	11,601	11,095	7,110	0,956
8	12,007	11,357	8,422	0,946
9	11,155	10,536	9,090	0,945
10	12,503	11,688	10,683	0,935
11	11,445	10,594	12,048	0,926

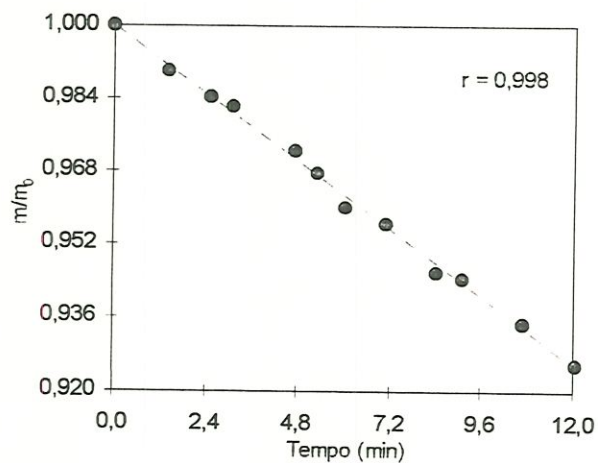


FIGURA AIV.16 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho pequeno, para velocidade de rotação de 206 rpm.

TABELA AIV.32 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho pequeno.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	1,000032
Erro Padrão da Estatística Y	0,001334
R ao Quadrado	0,996993
Núm. de observações	12
Graus de Liberdade	10
Coefficiente(s) X	-0,00618
Erro Padrão do Coeficiente	0,000107

Sondas Médias

As Tabelas AIV.33 e AIV.34 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho grande e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIV.17 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIV.33 - Dados experimentais das sondas de tamanho médio.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,000	1,000
1	22,068	21,826	1,572	0,989
2	21,934	21,519	2,930	0,981
3	22,576	21,932	5,022	0,971
4	22,612	21,671	7,419	0,958
5	22,569	21,471	8,374	0,951
6	21,726	20,557	9,106	0,946
7	21,855	20,603	10,038	0,943
8	21,962	20,532	11,597	0,935

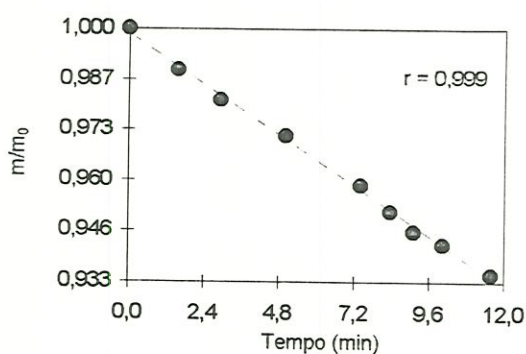


FIGURA AIV.17 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho médio, para velocidade de rotação de 206 rpm.

TABELA AIV.34 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho médio.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,998695
Erro Padrão da Estatística Y	0,001192
R ao Quadrado	0,997562
Núm. de observações	9
Graus de Liberdade	7
Coefficiente(s) X	-0,00559
Erro Padrão do Coeficiente	0,000104

Sondas Grandes

As Tabelas AIV.35 e AIV.36 apresentam os dados experimentais das sondas de tamanho grande e o resultado da regressão linear, respectivamente, e a Figura AIV.18 ilustra a variação da massa com o tempo.

TABELA AIV.35 - Dados experimentais das sondas de tamanho grande.

Número da Sonda	Massa Inicial da Sonda - m_0 (g)	Massa Final da Sonda - m (g)	Tempo (min)	m/m_0
-	-	-	0,000	1,000
1	50,345	49,898	1,050	0,991
2	50,754	50,028	2,033	0,986
3	50,218	49,106	3,518	0,978
4	50,407	49,042	4,109	0,973
5	51,085	49,405	5,021	0,967
6	51,101	49,003	6,327	0,959
7	50,366	48,014	7,105	0,953
8	50,824	48,201	8,467	0,948
9	50,561	47,409	9,763	0,938
10	50,542	46,915	10,953	0,928
11	51,033	47,114	12,045	0,923

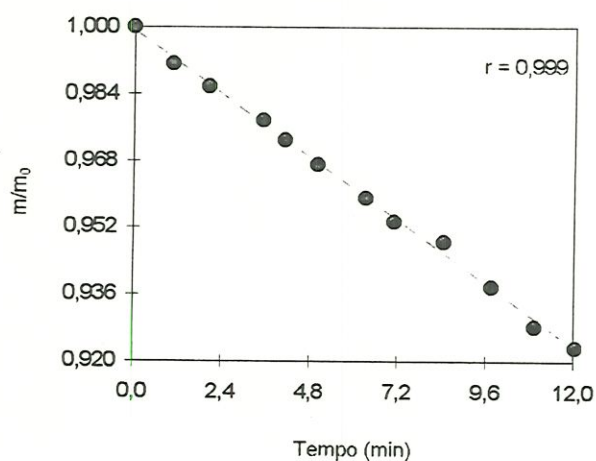


FIGURA AIV.18 - Gráfico da variação de massa em função do tempo das sondas de tamanho grande, para velocidade de rotação de 206 rpm.

TABELA AIV.36 - Resultado da regressão linear da variação de massa com o tempo das sondas de tamanho grande.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Constante	0,999049
Erro Padrão da Estatística Y	0,001244
R ao Quadrado	0,99771
Núm. de observações	12
Graus de Liberdade	10
Coefficiente(s) X	-0,00631
Erro Padrão do Coeficiente	9,56E-05

ANEXO V

DADOS DA PESQUISA DE LABORATÓRIO SONDAS ESFÉRICAS DE AÇÚCAR

1º Teste - 12/04/97

Velocidade de Rotação = 255 rpm.

Temperatura da água e do ar = 25°C.

As Tabelas AV.1, AV.2 e AV.3 apresentam os dados iniciais característicos das sondas esféricas de açúcar, os dados após a dissolução das sondas esféricas de açúcar e a massa média das sondas esféricas de açúcar.

TABELA AV.1 – Dados iniciais característicos das sondas esféricas de açúcar para velocidade de rotação de 255 rpm.

t (min)	m_{OT1} (g)	m_{b1} (g)	m_{OT2} (g)	m_{b2} (g)	m_{OT3} (g)	m_{b3} (g)
1,01	10,918	0,938	10,940	0,893	10,522	0,905
2,01	10,655	0,882	10,715	0,917	10,831	0,951
3,01	10,263	0,945	10,529	0,943	10,732	1,008
4,01	11,529	0,858	11,309	0,950	11,177	1,031
5,01	11,248	0,941	10,984	0,999	10,445	1,019
6,01	10,653	0,880	11,088	0,855	10,610	0,852
7,01	10,469	0,848	10,720	0,985	10,515	0,954
8,01	13,759	0,855	11,398	0,840	10,929	0,964
9,01	10,528	0,995	10,813	0,903	11,360	0,996
10,05	10,258	0,855	11,042	0,981	10,820	0,842
11,04	11,767	0,949	11,069	0,873	11,502	1,007
12,01	11,205	0,981	11,112	0,992	11,339	0,843
13,01	10,607	0,887	10,862	0,850	11,176	0,919
14,01	10,968	0,989	10,600	0,984	11,145	0,855
15,16	11,139	0,865	10,824	0,956	11,001	0,965

sendo,

m_{OTi} = massa inicial total da sonda = m_{bi} + m_{ei} ;

m_{bi} = massa do bastão;

m_{ei} = massa da esfera de açúcar antes da dissolução;

m_i = massa da esfera de açúcar após dissolução;

D_0 = diâmetro médio da esfera de açúcar, $D_0 \approx 23,75$ mm; e

R_0 = raio médio da esfera de açúcar, $R_0 \approx 11,88$ mm.

TABELA AV.2 - Dados finais, após a dissolução das sondas esféricas de açúcar para velocidade de rotação de 255 rpm.

t (min)	m _{e1} (g)	m ₁ (g)	m _{e2} (g)	m ₂ (g)	m _{e3} (g)	m ₃ (g)
1,01	9,98	9,09	10,05	9,05	9,62	8,74
2,01	9,77	8,55	9,80	8,33	9,88	8,42
3,01	9,32	6,83	9,59	7,36	9,72	7,57
4,01	10,67	8,00	10,36	7,53	10,15	7,37
5,01	10,31	7,20	9,99	6,76	9,43	6,72
6,01	9,77	5,68	10,23	6,40	9,76	5,97
7,01	9,62	5,37	9,74	5,37	9,56	5,08
8,01	12,90	7,39	10,56	5,21	9,97	4,76
9,01	9,53	4,39	9,91	4,18	10,36	3,79
10,05	9,40	3,63	10,06	4,13	9,98	4,17
11,04	10,82	3,70	10,20	3,64	10,50	3,93
12,01	10,22	3,42	10,12	2,56	10,50	3,48
13,01	9,72	2,22	10,01	2,88	10,26	2,60
14,01	9,98	2,41	9,62	1,67	10,29	2,36
15,16	10,27	2,22	9,87	1,48	10,04	2,03

TABELA AV.3 - Massa média das sondas esféricas de açúcar para velocidade de rotação de 255 rpm.

T (min)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m (g)
0,00	-	-	-	10,05
1,01	9,09	9,05	8,74	8,96
2,01	8,55	8,33	8,42	8,43
3,01	6,83	7,36	7,57	7,25
4,01	8,00	7,53	7,37	7,63
5,01	7,20	6,76	6,72	6,89
6,01	5,68	6,40	5,97	6,02
7,01	5,37	5,37	5,08	5,27
8,01	7,39	5,21	4,76	5,79
9,01	4,39	4,18	3,79	4,12
10,05	3,63	4,13	4,17	3,98
11,04	3,70	3,64	3,93	3,76
12,01	3,42	2,56	3,48	3,15
13,01	2,22	2,88	2,60	2,57
14,01	2,41	1,67	2,36	2,15
15,16	2,22	1,48	2,03	1,91

2º Teste - 14/04/97

Velocidade de Rotação = 110 rpm.

Temperatura da água e do ar = 25°C.

As Tabelas AV.4, AV.5 e AV.6 apresentam os dados iniciais característicos das sondas esféricas de açúcar, os dados após a dissolução das sondas esféricas de açúcar e a massa média das sondas esféricas de açúcar.

TABELA AV.4 - Dados iniciais característicos das sondas esféricas de açúcar para a velocidade de rotação de 110 rpm.

t (min)	m_{OT1} (g)	m_{b1} (g)	m_{OT2} (g)	m_{b2} (g)	m_{OT3} (g)	m_{b3} (g)
1,25	11,210	0,929	11,000	0,897	10,451	0,884
2,02	10,795	0,882	10,348	0,917	8,693	0,962
3,03	10,528	0,984	9,456	0,985	11,665	0,976
4,01	10,918	0,919	10,399	0,956	11,037	1,005
4,84	11,069	0,852	11,226	0,918	11,123	0,959
6,05	10,528	1,005	10,862	0,965	10,225	1,022
7,19	10,792	0,856	11,279	0,855	10,814	1,003
8,01	11,209	1,035	11,303	1,029	11,387	0,914
9,01	11,428	0,877	10,302	0,965	10,927	0,953
10,01	10,672	0,935	10,841	1,012	11,089	0,861
11,04	10,668	0,958	10,997	0,936	10,467	0,964
12,00	11,485	0,866	10,631	0,909	10,875	0,983
13,01	10,500	0,929	10,781	1,015	10,392	0,943
14,01	10,178	0,888	10,928	0,932	10,947	0,923
15,01	11,316	0,878	11,443	0,955	11,399	0,870

sendo,

m_{OTi} = massa inicial total da sonda = m_{bi} + m_{oi} ;

m_{bi} = massa do bastão;

m_{ei} = massa inicial da esfera de açúcar antes da dissolução;

m_i = massa da esfera de açúcar após dissolução;

D_0 = diâmetro médio da esfera de açúcar, $D_0 \approx 23,82$ mm; e

R_0 = raio médio da esfera de açúcar, $R_0 \approx 11,91$ mm.

TABELA AV.5 - Dados finais após a dissolução das sondas esféricas de açúcar para velocidade de rotação de 110 rpm.

t (min)	m _{e1} (g)	m ₁ (g)	m _{e2} (g)	m ₂ (g)	m _{e3} (g)	m ₃ (g)
1,25	10,28	9,61	10,10	9,41	9,57	8,79
2,02	9,91	8,96	9,43	8,30	7,73	6,86
3,03	9,54	8,29	8,47	7,11	10,69	9,48
4,01	10,00	8,23	9,44	7,86	10,03	8,33
4,84	10,22	8,06	10,31	8,11	10,16	8,20
6,05	9,52	6,99	9,90	7,42	9,20	6,60
7,19	9,94	7,28	10,42	7,08	9,81	6,72
8,01	10,17	7,09	10,27	7,21	10,47	6,96
9,01	10,55	7,32	9,34	5,70	9,97	6,35
10,01	9,74	5,53	9,83	5,96	10,23	6,33
11,04	9,71	5,65	10,06	5,39	9,50	5,44
12,00	10,62	6,19	9,72	5,29	9,89	4,98
13,01	9,57	4,06	9,77	5,33	9,45	4,62
14,01	9,29	4,31	10,00	4,89	10,02	4,74
15,01	10,44	5,07	10,49	3,89	10,53	4,90

TABELA AV.6 - Massa média das sondas esféricas de açúcar para velocidade de rotação de 110 rpm.

t (min)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m (g)
0,00	-	-	-	9,87
1,25	9,61	9,41	8,79	9,27
2,02	8,96	8,30	6,86	8,04
3,03	8,29	7,11	9,48	8,29
4,01	8,23	7,86	8,33	8,14
4,84	8,06	8,11	8,20	8,12
6,05	6,99	7,42	6,60	7,00
7,19	7,28	7,08	6,72	7,03
8,01	7,09	7,21	6,96	7,09
9,01	7,32	5,70	6,35	6,46
10,01	5,53	5,96	6,33	5,94
11,04	5,65	5,39	5,44	5,49
12,00	6,19	5,29	4,98	5,49
13,01	4,06	5,33	4,62	4,67
14,01	4,31	4,89	4,74	4,65
15,01	5,07	3,89	4,90	4,62

3º Teste - 15/04/97

Velocidade de Rotação = 158 rpm.

Temperatura da água e do ar = 25°C.

As Tabelas AV.7, AV.8 e AV.9 apresentam os dados iniciais característicos das sondas esféricas de açúcar, os dados após dissolução das sondas esféricas de açúcar e a massa média das sondas esféricas de açúcar.

TABELA AV.7 – Dados iniciais característicos das sondas esféricas de açúcar para velocidade de rotação de 158 rpm.

t (min)	m _{OT1} (g)	m _{bi} (g)	m _{OT2} (g)	m _{bz} (g)	m _{OT3} (g)	m _{bz} (g)
1,15	10,749	1,015	10,548	0,995	11,350	0,856
2,11	10,327	0,969	11,061	0,920	10,570	0,987
3,23	10,732	0,980	11,015	0,986	11,262	0,842
4,05	11,312	0,965	10,852	1,008	11,113	0,980
5,01	11,184	0,884	10,602	0,920	10,492	0,938
6,01	10,580	0,855	10,718	1,017	11,127	1,063
7,06	11,234	0,990	10,893	0,915	10,726	0,917
8,23	10,509	0,882	10,263	0,888	11,210	0,897
9,06	10,683	0,850	10,684	0,854	11,263	0,875
10,82	11,272	0,901	10,687	0,919	11,110	0,885
11,03	10,497	0,981	10,100	0,836	11,244	0,916
12,01	10,347	1,053	10,592	0,981	10,272	0,985
13,01	10,578	0,948	11,858	0,898	10,482	0,948
14,04	10,359	0,997	10,760	0,986	10,976	0,908
15,02	10,829	0,848	10,666	0,882	10,832	0,893

sendo,

m_{OTi} = massa inicial total da sonda = $m_{bi} + m_{oi}$;

m_{bi} = massa do bastão;

m_{ei} = massa da esfera de açúcar antes da dissolução;

m_i = massa da esfera de açúcar após a dissolução;

D_0 = diâmetro médio da esfera de açúcar, $D_0 \approx 23,70$ mm; e

R_0 = raio médio da esfera de açúcar, $R_0 \approx 11,85$ mm.

TABELA AV.8 - Dados finais após a dissolução das sondas esféricas de açúcar para velocidade de rotação de 158 rpm.

t (min)	m _{e1} (g)	m ₁ (g)	m _{e2} (g)	m ₂ (g)	m _{e3} (g)	m ₃ (g)
1,15	9,73	9,07	9,55	8,80	10,49	9,43
2,11	9,36	8,26	10,14	8,47	9,58	8,26
3,23	9,75	7,90	10,03	8,42	10,42	8,56
4,05	10,35	8,19	9,84	7,72	10,13	8,12
5,01	10,30	7,58	9,68	6,93	9,55	6,92
6,01	9,73	6,79	9,70	6,62	10,06	7,15
7,06	10,24	7,02	9,98	6,70	9,81	6,35
8,23	9,63	6,12	10,11	5,79	10,31	6,35
9,06	9,83	5,73	9,83	5,73	10,39	6,64
10,82	10,37	5,38	9,77	4,63	10,23	5,54
11,03	9,52	4,65	9,26	4,33	10,33	5,32
12,01	9,29	4,19	9,61	4,83	9,29	4,35
13,01	9,63	3,94	10,96	5,55	9,53	3,92
14,04	9,36	3,57	9,77	3,64	10,07	4,49
15,02	9,98	3,01	9,78	3,74	9,94	3,80

TABELA AV.9 - Massa média das sondas esféricas de açúcar para velocidade de rotação de 158 rpm.

t (min)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m (g)
0,00	-	-	-	9,89
1,15	9,07	8,8	9,43	9,10
2,11	8,26	8,47	8,26	8,33
3,23	7,9	8,42	8,56	8,29
4,05	8,19	7,72	8,12	8,01
5,01	7,58	6,93	6,92	7,14
6,01	6,79	6,62	7,15	6,85
7,06	7,02	6,7	6,35	6,69
8,23	6,12	5,79	6,35	6,09
9,06	5,73	5,73	6,64	6,03
10,82	5,38	4,63	5,54	5,18
11,03	4,65	4,33	5,32	4,77
12,01	4,19	4,83	4,35	4,46
13,01	3,94	5,55	3,92	4,47
14,04	3,57	3,64	4,49	3,90
15,02	3,01	3,74	3,8	3,52

4º Teste - 18/04/97

Velocidade de Rotação = 62 rpm.

Temperatura da água e do ar = 25°C.

As Tabelas AV.10, AV.11 e AV.12 apresentam os dados iniciais característicos das sondas esféricas de açúcar, os dados após dissolução das sondas esféricas de açúcar e a massa média das sondas esféricas de açúcar.

TABELA AV.10 – Dados iniciais característicos das sondas esféricas de açúcar para velocidade de rotação de 62 rpm.

t (min)	m_{0T1} (g)	m_{b1} (g)	m_{0T2} (g)	m_{b2} (g)	m_{0T3} (g)	m_{b3} (g)
1,02	10,200	0,926	11,953	0,864	11,824	0,992
2,71	10,638	1,021	10,928	0,937	11,464	0,850
3,02	10,499	0,917	10,326	0,890	11,136	0,952
4,01	10,863	0,912	10,961	0,909	11,522	1,027
5,03	10,276	1,004	10,713	1,009	10,681	0,960
6,08	10,724	0,972	11,217	0,930	10,660	0,923
7,17	11,145	0,924	10,352	0,965	10,782	0,973
8,03	10,617	0,889	11,015	0,924	11,351	0,936
9,55	10,464	0,960	11,127	0,981	11,642	0,964
10,17	10,642	0,880	10,447	0,914	10,993	0,960
11,01	10,684	0,913	10,995	0,962	10,739	0,913
12,02	11,296	1,020	10,623	0,912	11,306	0,875
13,01	11,269	0,995	11,048	0,925	11,001	0,998
14,08	10,597	0,962	10,912	0,881	10,800	0,948
15,07	10,700	0,997	10,755	1,005	10,727	0,887

sendo,

m_{0Ti} = massa inicial total da sonda = $m_{bi} + m_{oi}$;

m_{bi} = massa do bastão;

m_{ei} = massa da esfera de açúcar antes da dissolução;

m_i = massa da esfera de açúcar após da dissolução;

D_0 = diâmetro médio da esfera de açúcar, $D_0 \approx 23,83$ mm; e

R_0 = raio médio da esfera de açúcar, $R_0 \approx 11,92$ mm.

TABELA AV.11 - Dados finais após a dissolução das sondas esféricas de açúcar para velocidade de rotação de 62 rpm.

t (min)	m _{e1} (g)	m ₁ (g)	m _{e2} (g)	m ₂ (g)	m _{e3} (g)	m ₃ (g)
1,02	9,274	8,917	11,089	10,555	10,832	10,185
2,71	9,617	8,577	9,991	8,972	10,614	9,641
3,02	9,582	8,496	9,436	8,398	10,184	9,055
4,01	9,951	8,599	10,052	8,631	10,495	8,988
5,03	9,272	7,518	9,704	7,979	9,721	8,139
6,08	9,752	7,633	10,287	8,090	9,737	7,551
7,17	10,221	7,768	9,387	7,049	9,809	7,193
8,03	9,728	7,247	10,091	7,036	10,415	7,651
9,55	9,504	6,419	10,146	6,631	10,678	7,449
10,17	9,762	6,218	9,533	5,828	10,033	6,353
11,01	9,771	6,396	10,033	6,515	9,826	6,507
12,02	10,276	6,300	9,711	5,515	10,431	6,266
13,01	10,274	5,598	10,123	5,910	10,003	5,756
14,08	9,635	4,941	10,031	5,535	9,852	5,754
15,07	9,703	4,689	9,750	4,473	9,840	5,280

TABELA AV.12 – Massa média das sondas esféricas de açúcar para velocidade de rotação de 62 rpm.

t (min)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m (g)
0,00	-	-	-	9,96
1,02	8,917	10,555	10,185	9,89
2,71	8,577	8,972	9,641	9,06
3,02	8,496	8,398	9,055	8,65
4,01	8,599	8,631	8,988	8,74
5,03	7,518	7,979	8,139	7,88
6,08	7,633	8,090	7,551	7,76
7,17	7,768	7,049	7,193	7,34
8,03	7,247	7,036	7,651	7,31
9,55	6,419	6,631	7,449	6,83
10,17	6,218	5,828	6,353	6,13
11,01	6,396	6,515	6,507	6,47
12,02	6,300	5,515	6,266	6,03
13,01	5,598	5,910	5,756	5,75
14,08	4,941	5,535	5,754	5,41
15,07	4,689	4,473	5,28	4,81

5º Teste - 22/04/97

Velocidade de Rotação = 206 rpm.

Temperatura da água e do ar = 25°C.

As Tabelas AV.13, AV.14 e AV.15 apresentam os dados iniciais característicos das sondas esféricas de açúcar, os parâmetros após dissolução das sondas esféricas de açúcar e a massa média das sondas esféricas de açúcar.

TABELA AV.13 - Dados iniciais característicos das sondas esféricas de açúcar para velocidade de 206 rpm.

t (min)	m _{OT1} (g)	m _{b1} (g)	m _{OT2} (g)	m _{b2} (g)	m _{OT3} (g)	m _{b3} (g)
1,02	11,769	0,950	10,738	0,912	11,840	0,875
2,02	11,875	0,953	11,731	0,964	11,656	0,972
3,01	11,775	0,962	10,718	0,967	11,536	0,871
4,01	11,642	0,929	11,527	0,928	10,998	0,916
5,02	11,258	0,916	12,312	0,893	11,303	0,927
6,03	11,134	0,949	11,295	0,865	11,576	0,913
7,03	11,373	0,966	11,094	0,949	11,497	0,880
8,01	10,927	0,964	11,458	0,962	12,001	0,887
9,01	10,014	0,913	11,535	0,886	10,923	0,948
10,20	11,165	0,951	10,233	0,882	10,857	0,946
11,01	10,818	0,922	10,806	0,881	10,778	0,923
12,01	11,131	0,905	10,097	1,019	11,876	0,931
13,01	11,158	0,948	11,279	0,851	11,827	0,982
14,00	11,514	0,847	11,331	0,912	11,748	0,923
15,01	11,233	0,916	11,065	0,893	9,882	0,942

sendo,

m_{OTi} = massa inicial total da sonda = $m_{bi} + m_{oi}$;

m_{bi} = massa do bastão;

m_{ei} = massa inicial da esfera de açúcar antes da dissolução;

m_i = massa final da esfera de açúcar após dissolução;

D_0 = diâmetro médio da esfera de açúcar, $D_0 \approx 23,94$ mm; e

R_0 = raio médio da esfera de açúcar, $R_0 \approx 11,97$ mm.

TABELA AV.14 - Dados finais após a dissolução das sondas esféricas de açúcar para velocidade de 206 rpm.

t (min)	m _{e1} (g)	m ₁ (g)	m _{e2} (g)	m ₂ (g)	m _{e3} (g)	m ₃ (g)
1,02	10,819	9,980	9,826	9,030	10,965	10,105
2,02	10,922	9,425	10,767	9,280	10,684	9,428
3,01	10,813	8,586	9,751	8,958	10,665	8,973
4,01	10,713	7,523	10,599	7,706	10,082	7,016
5,02	10,342	7,317	11,419	8,468	10,376	7,424
6,03	10,185	6,967	10,430	6,874	10,663	7,260
7,03	10,407	6,232	10,145	5,797	10,617	6,003
8,01	9,963	4,830	10,496	6,259	11,114	6,495
9,01	9,101	4,287	10,649	5,906	9,975	5,172
10,20	10,214	5,299	9,351	4,143	9,911	4,520
11,01	9,896	3,883	9,925	4,488	9,855	4,022
12,01	10,226	3,610	9,078	3,045	10,945	4,582
13,01	10,210	3,953	10,428	3,716	10,845	3,913
14,00	10,667	3,391	10,419	3,429	10,825	3,601
15,01	10,317	3,058	10,172	2,716	8,940	2,631

TABELA AV.15 - Massa média das sondas esféricas de açúcar para velocidade de rotação de 206 rpm.

t (min)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m (g)
0,00	-	-	-	10,33
1,02	9,98	9,030	10,105	9,710
2,02	9,425	9,280	9,428	9,38
3,01	8,586	8,958	8,973	8,84
4,01	7,523	7,706	7,016	7,42
5,02	7,317	8,468	7,424	7,74
6,03	6,967	6,874	7,260	7,03
7,03	6,232	5,797	6,003	6,01
8,01	4,830	6,259	6,495	5,86
8,91	4,287	5,906	5,172	5,12
10,2	5,299	4,143	4,520	4,65
11,01	3,883	4,488	4,022	4,13
12,01	3,610	3,045	4,582	3,75
13,01	3,953	3,716	3,913	3,86
14,00	3,391	3,429	3,601	3,47
15,01	3,058	2,716	2,631	2,80

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADENEY, W.E.; BECKER, H.G. 1919. The determination of the rate of solution of atmospheric nitrogen and oxygen by water. *Philosophical Magazine*, v.38, n.225, p.317-37, Sept.
- BARBOSA JÚNIOR, A.R. 1989. *Desenvolvimento de metodologia para determinação do coeficiente de reaeração dos escoamentos naturais de água com emprego do traçador gasoso*. São Carlos. 187p. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- BARBOSA JÚNIOR, A.R.; GIORGETTI, M.F. 1995. Reaeração de corpos de água naturais: uma metodologia para quantificação com o uso de traçadores (disquete). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 18. Salvador. *Anais*.
- BENNETT, J.P.; RATHBUN, R.E. 1972. Reaeration in open-channel flow. Denver: U.S. *Geological Survey*, n.737, p.1-75.
- BICUDO, R.J. 1988. *The measurement of reaeration in stream*. Newcastle Upon Tyne, 306p. Doctor of Philosophy - Department of Civil Engineering, University of Newcastle Upon Tyne.
- BICUDO, R.J.; JAMES, A. 1989. Measurement of reaeration in streams: comparison of techniques. *Journal of Environmental Engineering*, v.115, n.5, p.992-1010.

- BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S. 1978. *Comparing more than two treatments*. New York, John Wiley & Sons. Part II, p.165-244: Statistics for experimenters. An introduction to desing, data analysis, and model building.
- BRANCO, S.M. 1978. A expansão demográfica e o impacto tecnológico. *Ecologia*. São Paulo, CETESB. Cap.1, p.1-12.
- BRANCO, S.M. 1983. História e geografia da poluição. *Poluição: a morte de nossos rios*. São Paulo, CETESB. Cap.5, p.69-82.
- BROWN, L.C.; BARNWELL JUNIOR, T.O. 1987. Introduction. In: ENVIRONMENTAL RESEARCH LABORATORY OFFICE OF RESEARCH AND DEVELOPMENT. The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: documentation and user manual. Georgia, U.S. environmental protection, p.1.
- COSTA, O.S. 1992. *Análise do efeito da umidade atmosférica sobre o coeficiente de reoxigenação*. São Carlos. 187p. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- DANCKWERTS, P.V. 1951. Significance of liquid-film coefficients in gas absorption. *Industrial and Engineering Chemistry*, v.43, n.6, p.1460-67.
- DERISIO, J. C. 1992. *Introdução ao controle de poluição ambiental*. São Paulo, CETESB.
- FERREIRA, A.B.H. 1986. *Novo dicionário da língua portuguesa*. 2.ed. Rio de Janeiro, Nova Fronteira.
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE. 1992. *Vocabulário básico de meio ambiente*. 4.ed. Rio de Janeiro, RJ.
- GIANSANTI, A.E. 1986. *A influência do índice de turbulência no valor do coeficiente de reaeração dos cursos d'água*. São Carlos. 108p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- GIORGETTI, M.F.; GIANSANTI, A.E. 1983. Avaliação do nível de turbulência em águas correntes e sua correlação com o coeficiente de reaeração superficial. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE TRANSFERÊNCIA GASOSA EM SUPERFÍCIES DE ÁGUA. Itaca, NY, p.133-38.

- GIORGETTI, M.F.; GIANANTI, A.E. 1983. Avaliação do nível de turbulência em águas correntes e sua correlação com o coeficiente de reaeração superficial. In: XII CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA AMBIENTAL, Camboriú.
- GIORGETTI, M.F.; SCHULZ, H.E. 1986. Contribuição para determinação do coeficiente de reoxigenação superficial em corpos d'água - I. In: II CONGRESSO LATINOAMERICANO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MATÉRIA, São Paulo. *Anais*. São Paulo, p.1687-97.
- GIORGETTI, M.F.; SCHULZ, H.E. 1990. Sobre o método da sonda solúvel flutuante para a determinação indireta do coeficiente de reoxigenação superficial em corpos de água. In: ENCONTRO NACIONAL DE CIÊNCIAS TÉRMICAS, 3., Itapema, 1990. *Anais*. Itapema, p.1079-84.
- GOMES, F.P. 1985. *Curso de estatística experimental*. 11 ed. Piracicaba, Nobel.
- HANEY, P. D. 1954. Theoretical principles of aeration. *Journal American Water Works*, v.46, p.353-76.
- HIXSON, A W.; BAUM, S.J. 1941. Agitation - Mass transfer coefficients in liquid-solid agitation systems. *Industrial and engineering chemistry*, v.33, n.4, p.478-85.
- HIXSON, A W.; CROWELL, J.H. 1931. Dependence of reaction velocity upon surface and agitation. I - Theoretical consideration. *Industrial and engineering chemistry*, v.23, n.9, p.923-31.
- HIXSON, A W.; CROWELL, J.H. 1931. Dependence of reaction velocity upon surface and agitation. II - Experimental procedure in study of surface. *Industrial and engineering chemistry*, v.23, n.9, p.1002-09.
- HIXSON, A W.; CROWELL, J.H. 1931. Dependence of reaction velocity upon surface and agitation. III - Experimental procedure in study of agitation. *Industrial and engineering chemistry*, v.23, n.9, p.1160-69.
- HOLLEY, R.E.; YOTSUKURA, N. 1984. Field techniques for reaeration measurements in rivers. In: GAS TRANSFER AT WATER SURFACES, New York. *Anais*. Ithaca, Cornell University. p.381-401.
- INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. 1981. *Fundamental of heat transfer*. John Wiley, N. Y.

- ISAACS, W.P.; GAUDY, A.F. 1968. Atmospheric oxygenation in a simulated stream. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, v.94, n.2, p.319-44, Apr.
- KILPATRICK, F.A.; RATHBUN, R.E.; YOTSUKURA, N. et al. 1989. *Determination of stream reaeration coefficients by use of traceis*. Denver: U.S. Geological Survey. v.3 chap.A18 p.1-52.
- KISHINEVSKY, M.K.; SEREBRYANSKY, V.T. 1955. The mechanism of mass transfer at the gas - liquid interface with vigorous stirring. *Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE*, v.88, n.2, p.53-83.
- KOZINSKI, A.A.; KING, C.J. 1966. The influence of diffusivity on liquid phase mass transfer to the free interface in a stirred vessel. *A Industrial Chemistry Engineering Journal*, v.12, n.1, p.109-16, Jan.
- KRENKEL, P.A.; ORLOB, G.T. 1962. Turbulente diffusion and the reaeration coefficient. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, v.88, n.2, p.53-83, Mar.
- LAU, Y.L. 1972. Prediction equation for reaeration in open-channel flow. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, v.98, n.6, p.1063-68, Dec.
- LEWIS, W.K.; WHITMAN, W.G. 1924. Principles of gas absorption. *Industrial and Engineering Chemistry*, v.16, n.12, p.1215-20, Nov.
- MOREIRA, I.V.D. 1992. Origem e síntese dos principais métodos de avaliação de impacto ambiental (AIA). In: . *Manual de avaliação de impactos ambientais - MAIA*. 1.ed. Curitiba, SEMAIAP/GTZ. Cap.3100, p.1-20.
- NEGULESCU, M.; ROJANSKI, V. 1969. Recent research to determine reaeration coefficient. *Water Research*, v.3, p.189-202.
- NETTO, A.; MARTINIANO, J. 1991. *Manula de hidráulica*. 7.ed. S. Paulo, Ed. Edgard Blücher, Cap.1, p.11: Noções introdutórias.
- O'CONNOR, D.J.; DOBBINS, W. 1958. Mechanism of reaeration in natural streams. *ASCE Transactions*, v.123, n.2934, p.641-84.
- PARMAJ, N.B.; CHAABRA, R.P.; NARAYAN, K.A. 1989. Mass transfer from a highly soluble single cylinder in parallel flow. *The Chemical Engineering Journal*, v.40, p.139-49.

- PERRY, R.H.; CHILTON, C.H. 1980. *Manual de engenharia química*. 5.ed. Rio de Janeiro, Ed. Guanabara Dois, Cap.8, p.56: Moagem e aglomeração.
- PIRES, J.S.R.; DOS SANTOS, J.E. 1995. Bacias hidrográficas: integração entre meio ambiente e desenvolvimento. v.19, n.110. *Ciência Hoje*.
- RAINWATER, K.A.; HOLLEY, E.R. 1983. *Laboratory studies on the hydrocarbon gas tracer technique for reaeration measurement*. Austin: Center for Research in Water Resources. n.189 p.1-114.
- RATHBUN, R.E. 1977. Reaeration coefficients of streams - State of the art. *Journal of the Hydraulics Division*, v.103, n.4, p.409-24, Apr.
- RODRIGUES, I.C. 1996. *Determinação do coeficiente de reaeração superficial de um corpo d'água com uso de sondas solúveis esféricas*. São Carlos. 157p. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- SAGAN, C.; DRUYAN, A.; SOTER, S. 1990. *Cosmos* (filme-vídeo) Estados Unidos. 1 cassete VHS, 45 min. color.
- SCHULZ, H.E. 1985. *Investigação do mecanismo de reoxigenação da água em escoamentos e sua correlação com o nível de turbulência junto à superfície*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SCHULZ, H.E. 1989. *Investigação do mecanismo de reoxigenação da água em escoamentos e sua correlação com o nível de turbulência junto à superfície*. São Carlos, 865p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SCHULZ, H.E.; GIORGETTI, M.F. 1987. Medida indireta do coeficiente de reoxigenação de águas naturais - Modelos matemáticos para a velocidade de desgaste de sondas solúveis. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MATÉRIA, 1., Campinas, São Paulo. *Anais*. p.179-87.
- SIQUEIRA, E.Q. 1996. *Aplicação do modelo de qualidade de água (QUAL2E) na modelação de oxigênio dissolvido no Rio Meia Ponte (GO)*. São Carlos, 90p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- STEVENSON, W.J. 1981. *Estatística aplicada à administração*. São Paulo, Harper & Row, 495 p.
- THACKSTON, E.L.; KRENKEL, P.A. 1967. Longitudinal mixing in natural streams. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, v.95, n.1, p.65-94, Feb.
- THACKSTON, E.L.; KRENKEL, P.A. 1969. Reaeration prediction in natural streams. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, v.93, n.5, p.67-90, Oct.
- TOOR, H.L.; MARCHELLO, J.M. 1958. Film-penetration model mass and heat transfer. *A. Industrial Chemistry Engineering Journal*, v.4, n.1, p.97-101, Mar.