

DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE REOXIGENAÇÃO SUPERFICIAL EM LABORATÓRIO UTILIZANDO TANQUES COM AGITAÇÃO MECÂNICA

Alexandre Silveira¹, Marcius F. Giorgetti²

RESUMO --- Neste trabalho é apresentada uma avaliação do tempo de ensaio necessário para a estimativa do coeficiente de reoxigenação superficial em tanques com agitação mecânica, considerando que a redução do tempo de ensaio resulta em redução de custos, sem perda da precisão na estimativa. O tempo de ensaio necessário para a amostra de água em agitação, cuja concentração de oxigênio dissolvido foi previamente reduzida, atingir a concentração de saturação do oxigênio na água foi considerado como o tempo total do ensaio. Os resultados apresentam que este tempo total pode ser reduzido em aproximadamente 15% nos ensaios sob baixas condições de agitação e em aproximadamente 35% nos ensaios sob elevadas condições de agitação.

ABSTRACT --- This work shows an evaluation of the time of necessary assay for the estimate of the coefficient of superficial reoxygentaion in tanks with mechanic agitation, considering that the reduction of the assay time results in reduction of costs, without loss of the precision in the estimate. The time of assay necessary for the water sample in agitation, whose concentration of dissolved oxygen previously was reduced, to reach the concentration of saturation of the oxygen in the water was considered as the total time of the assay. The results present that this total time can approximately be reduced in 15% in the assays under low conditions of agitation and in approximately 35% in the assays under higher agitation conditions.

Palavras-chave: reoxigenação superficial, estimativa de coeficiente de reoxigenação superficial.

¹ Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá-MT, alexandresilveira@ufmt.br

² Professor Titular do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, marciusg@sc.usp.br

1 - INTRODUÇÃO

Adeney e Becker (1919) foram os primeiros pesquisadores a quantificar a reoxigenação em corpos de água e propuseram, com base em dados experimentais, uma forma matemática para descrever a taxa com que gases pouco solúveis dissolvem-se na água. Segundo o modelo, o fluxo de massa ou a taxa de transferência gasosa por unidade de área normal ao fluxo é diretamente proporcional ao déficit relativo à saturação do gás no líquido, ou seja:

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

Em que:

J	=	Fluxo de massa ou taxa de transferência gasosa
A	=	Área de interface gás-líquido
m	=	Massa de gás dissolvido
t	=	Tempo
C_S	=	Concentração de saturação do gás no líquido
C	=	Concentração do gás dissolvido no volume líquido
K_L	=	Coefficiente global de transferência de massa (oxigênio)

Substituindo-se dm/dt por $d(V.C)/dt$, com V representando o volume do líquido no qual a massa do gás se dissolve, a equação (1) pode ser reescrita como:

$$\frac{dC}{dt} = K_L \cdot \frac{A}{V} (C_S - C) \quad (2)$$

Observa-se na equação 2 que o coeficiente K_L possui dimensões LT^{-1} (comprimento por tempo). Portanto, é o parâmetro que indica a velocidade de transferência superficial. No entanto a área de transferência, A , é na maioria dos casos, de difícil obtenção, especialmente em situações de agitação intensa. Nas aplicações, o termo $K_L \cdot (A/V)$ é substituído pela notação K_2 e é denominado coeficiente de reaeração ou de reoxigenação superficial, com dimensão de tempo⁻¹.

$$\frac{dC}{dt} = K_2 \cdot (C_S - C) \quad (3)$$

A solução da equação 3 para uma concentração inicial C_0 , é apresentada na equação 4.

$$C = C_S - (C_S - C_0) \cdot e^{-K_2 \cdot t} \quad (4)$$

Considerando um sistema de mistura completa, K_2 e C são considerados constantes no volume de água em agitação.

Os testes utilizados para quantificar a taxa de transferência de oxigênio para a água limpa, geralmente, consistem em ensaios de reoxigenação realizados em tanques, em regime não-permanente após prévia desoxigenação da água em teste. Os dados coletados nos ensaios permitem estimar o coeficiente de transferência de oxigênio. Esta estimativa é fortemente influenciada tanto pelos procedimentos experimentais quanto pelas técnicas empregadas na análise dos dados dos

ensaios, Brown e Bailod (1982). Um padrão para a determinação da taxa de transferência pode ser encontrado em “A Standard for the Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water” citado em ASCE (1984).

O tempo de ensaio necessário para a estimativa de K_2 é $4/K_2$ e quando praticável $6/K_2$, ASCE (1984) e Brown e Bailod (1982). O tempo de $4/K_2$ corresponde ao tempo necessário para que a concentração de oxigênio dissolvido alcance 98% da concentração de saturação, C_S . Tais valores têm como base os processos de reoxigenação por ar difuso que são, geralmente, processos rápidos. Os valores sugeridos nem sempre são praticáveis, como no caso de ensaios de reoxigenação superficial.

Neste trabalho é apresentada uma avaliação do tempo de ensaio necessário para a estimativa de K_2 considerando a redução do tempo de ensaio e conseqüente redução dos custos, sem perda da precisão na estimativa.

2 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A estimativa dos parâmetros utilizados no modelo clássico (equação 4) deve considerar alguns fatores, a saber; o modelo utilizado está correto? ou seja, descreve o fenômeno físico considerando todos os fatores que interferem direta ou indiretamente no fenômeno? Como o modelo deve ser ajustado aos dados experimentais, qual seria o critério para selecionar a “correta” estimativa dos parâmetros determinados pela análise de regressão?

O método dos mínimos quadrados pode ser utilizado para a análise de regressão. Várias técnicas foram propostas para a análise dos dados, cujos nomes provêm da forma da equação utilizada para a análise.

2.1 – Alguns métodos para estimativa do coeficiente de reoxigenação superficial

Método Exponencial: são utilizados diretamente os valores experimentais das concentrações de O.D. medidos em função do tempo para ajustar a equação $C = C_S - (C_S - C_0) \cdot e^{-K_2 \cdot t}$, através do método dos mínimos quadrados não linear. A estimativa dos parâmetros é mais precisa do que em outros métodos. A vantagem do método é que a implementação de uma rotina de cálculo com recursos computacionais possibilita a estimativa de todos os parâmetros, K_2 , C_S e C_0 .

Método do Logaritmo do Déficit: a equação 4 também pode ser escrita na forma logarítmica:

$$\ln\left(\frac{C_S - C}{C_S - C_0}\right) = -K_2 \cdot t \quad (5)$$

Em que $(C_S - C)$ é o déficit de oxigênio que dá nome ao método. O valor de K_2 é determinado como sendo o coeficiente angular da reta apresentada na equação 5. Pode ser utilizado o método dos

mínimos quadrados linear para efetuar a análise de regressão. A principal desvantagem deste método é que este requer o valor da concentração de saturação C_S (calculado ou determinado experimentalmente). A estimativa de K_2 pode ser afetada se a escolha de C_S não for adequada.

Método Direto ou Diferencial: este método aproxima numericamente a taxa de transferência (volumétrica) $\frac{dC}{dt}$ para $\frac{\Delta C}{\Delta t}$ utilizando as variações das concentrações obtidas experimentalmente.

O valor de K_2 é determinado pelo coeficiente angular da equação diferencial $\frac{dC}{dt} = K_2 \cdot (C_S - C)$ (equação 3) utilizando o método dos mínimos quadrados linear. A principal desvantagem do método direto é que ele majora os erros de medida dos dados experimentais. Por este motivo este método não é recomendado, pois o processo de aproximação numérica resulta em erros maiores do que aqueles que se verificam na própria medida da concentração de oxigênio dissolvido.

2.2 – Concentração de Saturação de oxigênio dissolvido em água

A concentração de saturação de oxigênio dissolvido é um parâmetro básico utilizado em grande parte dos modelos de previsão da qualidade da água, o que exige valores precisos de C_S .

Existem diversas equações que são utilizadas para calcular a concentração de saturação cujo valor é reproduzido em tabelas. As equações estimam o valor de C_S em função da temperatura. Algumas equações consideram o efeito da salinidade e pressão local, outras equações foram desenvolvidas a partir de experimentos com água destilada e pressão padrão de 1 atmosfera. Algumas destas equações podem ser encontradas em EPA (1985).

O valor de C_S também pode ser determinado experimentalmente a partir da exposição de um volume de água a uma atmosfera saturada de vapor de água (em equilíbrio). Atmosfera esta, de ar ou de oxigênio puro. Medições da pressão parcial de oxigênio na fase gasosa permitem calcular a solubilidade do gás na água.

Existem divergências entre os resultados obtidos pelos vários métodos utilizados para determinar o valor da concentração de saturação de oxigênio dissolvido. Sobretudo nas equações, a diferença pode ser significativa e pode conduzir a erros na estimativa do coeficiente de reoxigenação superficial. As maiores diferenças são encontradas para condições de alta salinidade, de interesse em estuários e oceanos. Para as águas doces, considerando a faixa de temperatura de 10 a 25°C, a variação percentual em relação à média é de aproximadamente $\pm 2\%$. A Tabela 1 apresenta o valor de C_S calculado a partir de 5 equações juntamente com as respectivas variações.

Tabela 1 – Comparação dos valores de C_S obtidos a partir das equações A, B, C, D e E, pressão = 1 atm, água desalinizada
Adaptado de EPA (1985)

Temperatura (°C)	Equações					Variação (%)
	A	B	C	D	E	
10	11,27	11,36	11,34	11,26	11,27	0,4
11	11,00	11,10	11,08	10,99	11,01	0,5
12	10,75	10,84	10,84	10,73	10,75	0,5
13	10,50	10,60	10,60	10,49	10,50	0,6
14	10,26	10,37	10,38	10,25	10,27	0,6
15	10,03	10,14	10,16	10,02	10,04	0,7
16	9,82	9,93	9,95	9,79	9,83	0,8
17	9,61	9,72	9,75	9,58	9,62	0,9
18	9,40	9,52	9,55	9,38	9,43	0,9
19	9,21	9,33	9,37	9,18	9,25	1,0
20	9,02	9,14	9,19	8,99	9,08	1,1
21	8,84	8,96	9,01	8,81	8,92	1,2
22	8,67	8,79	8,84	8,63	8,77	1,2
23	8,50	8,62	8,68	8,46	8,63	1,3
24	8,33	8,46	8,52	8,29	8,51	1,4
25	8,18	8,31	8,37	8,13	8,39	1,6
26	8,02	8,16	8,22	7,97	8,28	2,0
27	7,87	8,02	8,08	7,81	8,19	2,4
28	7,72	7,87	7,94	7,66	8,11	2,8
29	7,58	7,74	7,80	7,51	8,03	3,4
30	7,44	7,61	7,67	7,36	7,97	4,0
Equações						
A	$C_S = 14,652 - 0,41022 \cdot T + 0,007991 \cdot T^2 - 7,7774 \cdot 10^{-5} \cdot T^3$					Baca e Arnett, 1976
B	$C_S = 14,62 - 0,3898 \cdot T + 0,006969 \cdot T^2 - 5,897 \cdot 10^{-5} \cdot T^3$					Johnson e Duke, 1976
C	$C_S = 14,6 \cdot e^{(-T \cdot (0,027767 - 0,00027 \cdot T + 0,000002 \cdot T^2))}$					U.S Army CDE, 1982
D	$C_S = 14,652 - 0,41022 \cdot T + 0,007910 \cdot T^2 - 7,7774 \cdot 10^{-5} \cdot T^3$					Bauer, 1979
E	$C_S = 14,5532 - 0,38217 \cdot T + 0,0054258 \cdot T^2$					Genet, 1974

2.3 – Recomendações na análise de dados experimentais

Brown e Baillod (1982), fazem algumas recomendações para o procedimento de estimativa dos parâmetros. Inicialmente deve ser feita uma análise dos dados experimentais. Devem ser eliminados os dados que apresentem “ruídos” com relação à tendência da curva de reoxigenação. O método exponencial é recomendado para análise de regressão do modelo aos dados experimentais. Devem ser estimados os parâmetros K_2 , C_S e C_0 com seus respectivos desvios-padrões, que refletem

o grau de dispersão dos dados observados. O valor do desvio padrão deve ser no máximo 5% para K_2 , 3% para C_S e 0,3 mg/l para C_0 .

Chern (2001) utilizou um modelo exponencial análogo à equação 5, já que a reoxigenação foi feita por ar submerso. Para estimar o coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio, K_{La} , o pesquisador realizou a análise de regressão não linear, através do método de Gauss-Newton, determinando os parâmetros, K_{La} , C_S e C_0 .

Paralelamente a estrutura de erros dos dados deve ser avaliada com relação aos resíduos (diferença entre a concentração observada e calculada). A distribuição dos resíduos deve ser necessariamente aleatória, ou seja, não-tendenciosa. Além disso, os valores (absolutos ou relativos) dos resíduos devem possuir pequena magnitude. Outro fator importante a ser observado é a somatória dos resíduos aproxima-se de zero ou de um percentual pequeno com relação aos resíduos, Barros Neto (2002).

2.4 – Estimativa dos parâmetros e tempo de ensaio

Como base nos resultados obtidos por Barbosa (1989) para $K_{2,25}$ (K_2 corrigido para a temperatura padrão de 25°C), o tempo de ensaio necessário é dado de acordo com a tabela 2.

Tabela 2 – Tempo de ensaio sugerido

$K_{2,25}$ (h^{-1})	Tempo de ensaio (h)	
	$4/K_2$	$6/K_2$
0,08	45	67
0,14	28	42
0,21	19	29
0,34	12	18
0,68	6	9
1,26	3	5

A tabela 2 mostra a inviabilidade prática de realizar alguns ensaios durante o intervalo de $6/K_2$ ou mesmo $4/K_2$. Deste modo, este trabalho faz uma análise metodológica para determinar a possível redução no tempo de duração dos ensaios, sempre visando o menor tempo possível, sem perda da qualidade dos dados.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

O equipamento utilizado para a realização dos ensaios é constituído de um tanque cilíndrico contendo água em agitação exposta, na sua superfície, ao ar. O esquema geral pode ser visualizado na Figura 1.

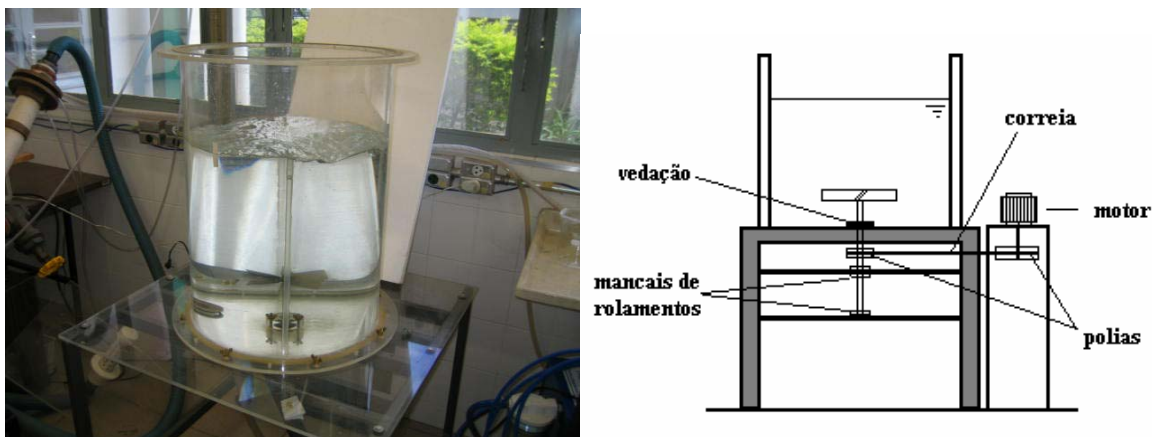


Figura 1 – Aparato experimental

Os ensaios consistiram em retirar parte do oxigênio dissolvido da água e monitorar a subsequente curva de reoxigenação da água em agitação, resultante da transferência de oxigênio da atmosfera para a água através da superfície livre.

Uma série de 6 ensaios foi realizada, para diversos níveis de agitação quantificados pela velocidade de rotação, considerando-se como limite prático, o tempo máximo de ensaio. A tabela 3 apresenta o limite prático considerado neste trabalho

Tabela 3 – Tempo de ensaio (limite prático)

Ensaio	Velocidade de rotação (rpm)	Tempo máximo de ensaio (h)
1	50	15
2	100	12
3	150	7
4	200	7
5	250	6
6	300	4

Para cada ensaio (1 a 6) é feita uma análise para verificar a influência do tempo dos ensaios (da Tabela) sobre a qualidade dos parâmetros estimados K_2 e C_s , já que a estimativa de C_0 se aproxima da medida experimental. Porém são estimados todos os parâmetros: C_0 , K_2 e C_s .

Considerando-se que o tempo da Tabela 3, seja o limite prático, o valor “correto” de C_s e K_2 será considerado como o obtido para 100% dos dados. Por sua vez, 100% dos dados é considerado

o tempo necessário para atingir a concentração de saturação conforme ilustra uma curva típica de reoxigenação apresentada na figura 2.

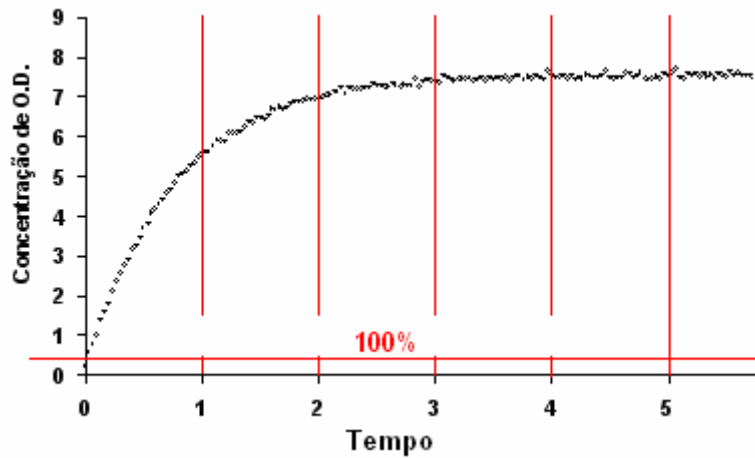


Figura 2 – Curva de reoxigenação

Através da análise a seguir, será mostrado que podem ser encontrados os valores de C_S e K_2 , utilizando-se apenas uma determinada porcentagem dos dados dos ensaios. A figura 3 ilustra a redução do tempo de ensaio.

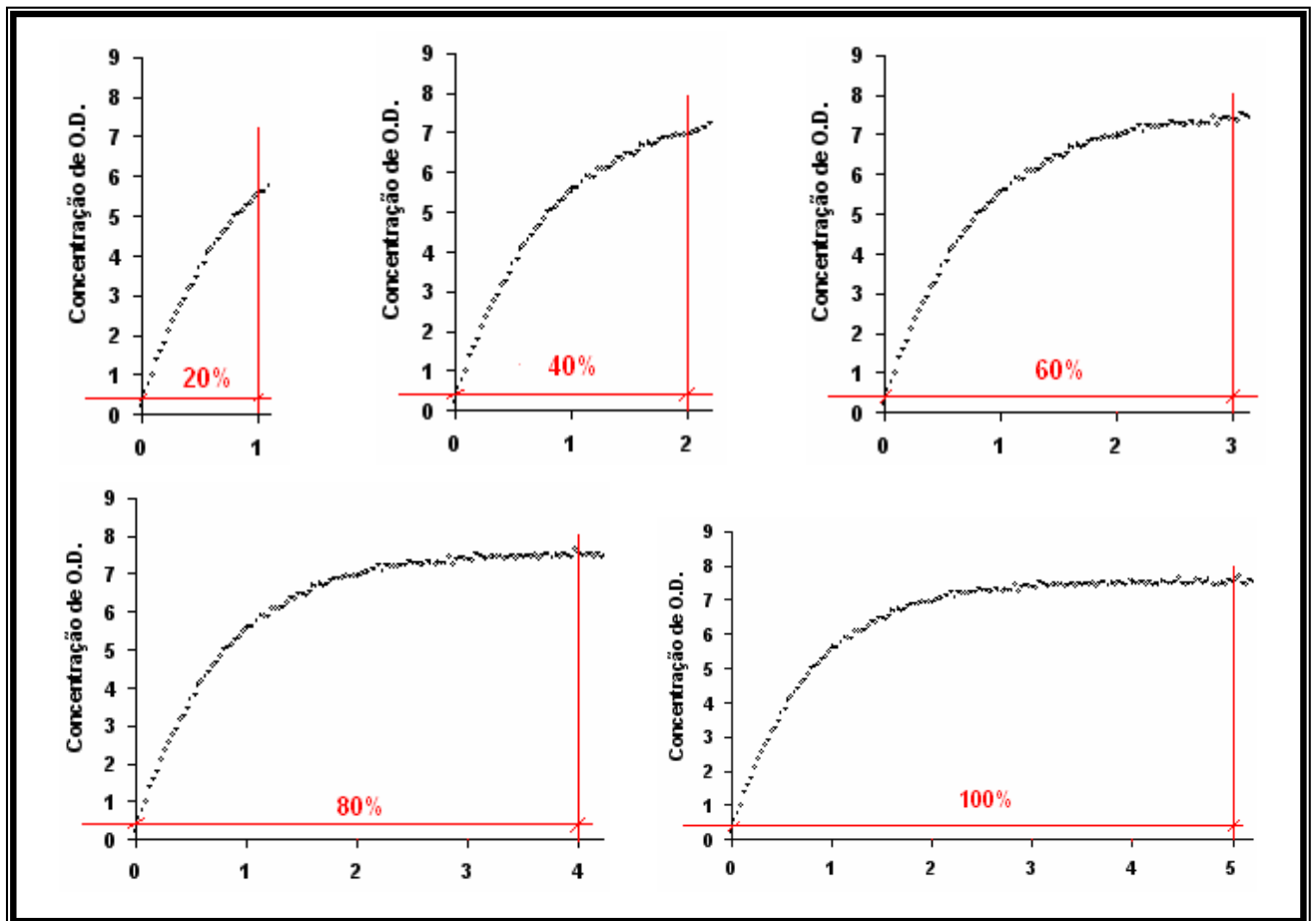


Figura 3 – Redução do tempo de ensaio

Neste trabalho, o erro considerado na estimativa dos parâmetros C_S e K_2 em relação aos obtidos com 100% dos dados é de 3%. Como conclusão desta análise, resulta o tempo de ensaio necessário para determinação dos parâmetros.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os ensaios são apresentados na forma de gráficos de K_2 e C_S em função da porcentagem dos dados. A faixa de 3% de erros em relação a 100% dos dados é evidenciada pelas linhas contínuas.

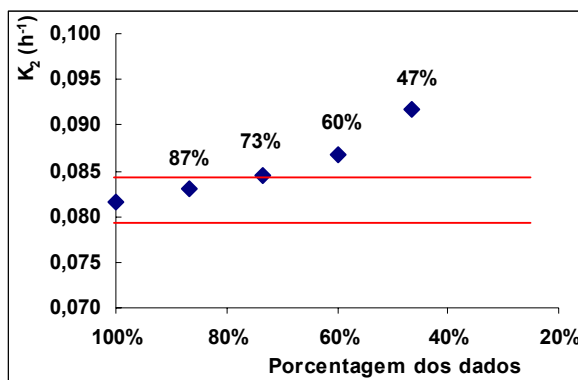


Figura 4 – K_2 em função da % de dados utilizados, 50 rpm

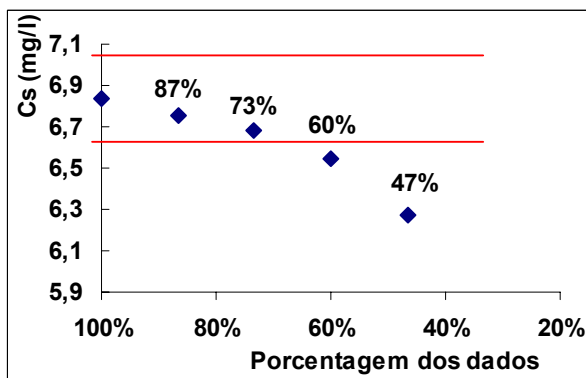


Figura 5 – C_S em função da % de dados utilizados, 50 rpm

Considerando K_2 e C_S , observa-se que 87% dos dados fornecem dados suficientes para o ajuste dos parâmetros dentro do erro imposto. Portanto os ensaios realizados sob a velocidade de rotação de 50 rpm devem ter duração de 13 horas. Comparando-se os valores de K_2 e C_S obtidos utilizando 15 horas (limite prático) e 13 horas (tempo definido para este ensaio), observam-se as seguintes variações na tabela 4.

Tabela 4 – Variação de parâmetros, 50 rpm

	15 horas	13 horas	Variação
C_0 (mg/l)	0,51	0,51	0
C_S (mg/l)	6,98	6,92	0,87 %
K_2 (h^{-1})	0,082	0,084	-2,38 %
% C_S	70	67	

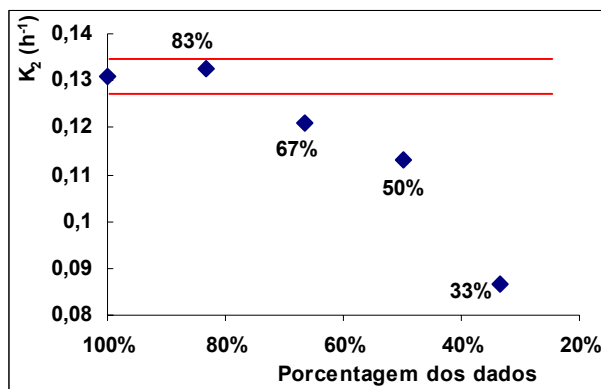


Figura 5 – K_2 em função da % de dados utilizados, 100 rpm

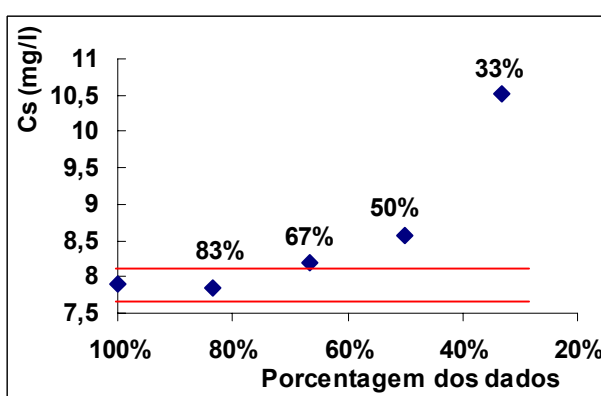


Figura 6 – C_S em função da % de dados utilizados, 100 rpm

Observa-se para esta velocidade de rotação que os valores de K_2 e C_S não são afetados (considerando-se o erro de 3%) utilizando-se até 83% dos dados experimentais. Como o tempo total do ensaio é de 12 horas, utilizando-se 10 horas os resultados são satisfatórios. Comparando-se os valores de K_2 e C_S obtidos utilizando 12 horas (limite prático) e 10 horas (tempo definido para este ensaio), observam-se as seguintes variações na tabela 5.

Tabela 5 – Variação de parâmetros, 100 rpm

	12 horas	10 horas	Variação
C_0 (mg/l)	0,99	0,99	0
C_S (mg/l)	7,89	7,84	0,64%
K_2 (h^{-1})	0,130	0,132	-1,51%
% C_S	87	77	

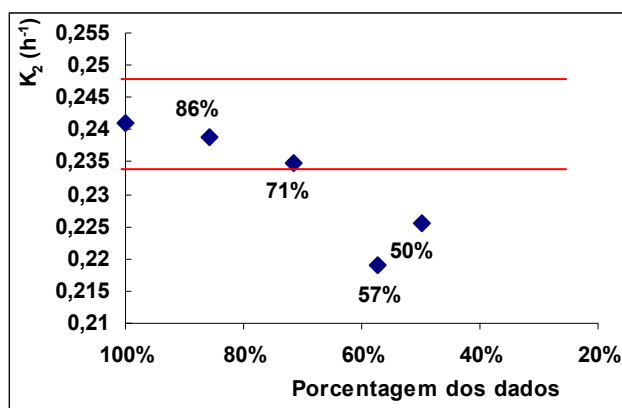


Figura 7 – K_2 em função da % de dados utilizados, 150 rpm

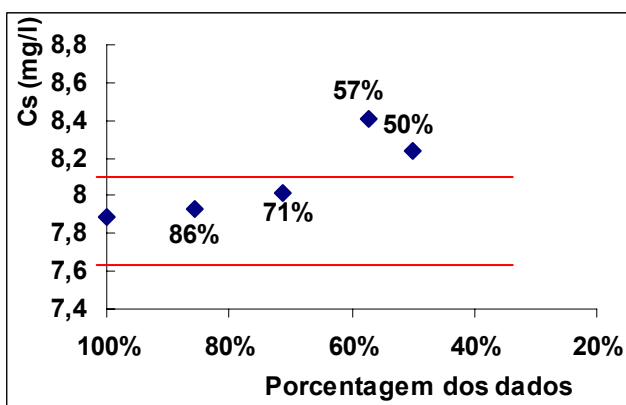


Figura 8 – C_s em função da % de dados utilizados, 150 rpm

Utilizando-se 71% do tempo total, obtém-se o resultado esperado. A tabela 6 mostra as variações.

Tabela 6 – Variação de parâmetros, 150 rpm

	7 horas	5 horas	Variação
C_0 (mg/l)	0,62	0,62	0
C_s (mg/l)	7,78	7,79	-0,13 %
K_2 (h^{-1})	0,240	0,238	0,84 %
% C_s	86	75	

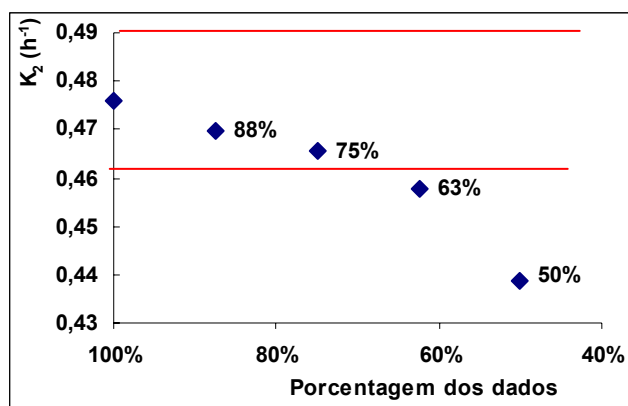


Figura 9 – K_2 em função da % de dados utilizados, 200 rpm

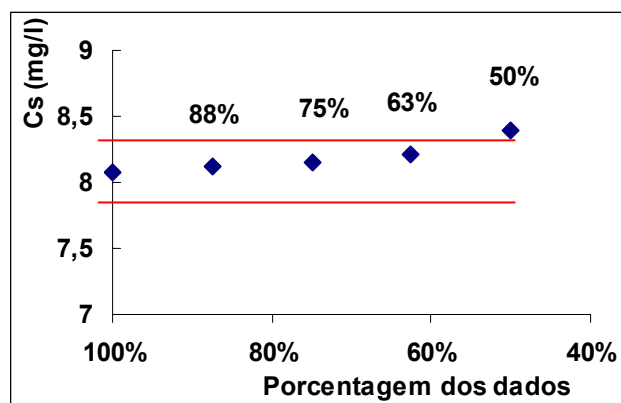


Figura 10– C_S em função da % de dados utilizados, 200 rpm

Utilizando-se 75% do tempo total do ensaio, obtém-se o resultado esperado.

Tabela 7 – Variação de parâmetros, 200 rpm

	7 horas	6 horas	Varição
C_0 (mg/l)	0,65	0,66	-1,5%
C_S (mg/l)	8,02	8,04	-0,25%
K_2 (h^{-1})	0,476	0,471	1,06 %
% C_S	99	92	

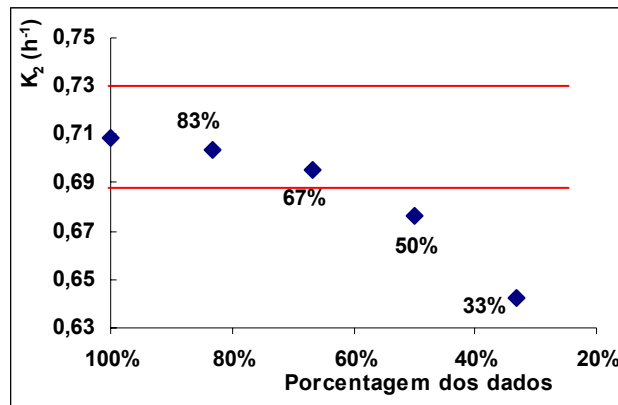


Figura 11 – K_2 em função da % de dados utilizados, 250 rpm

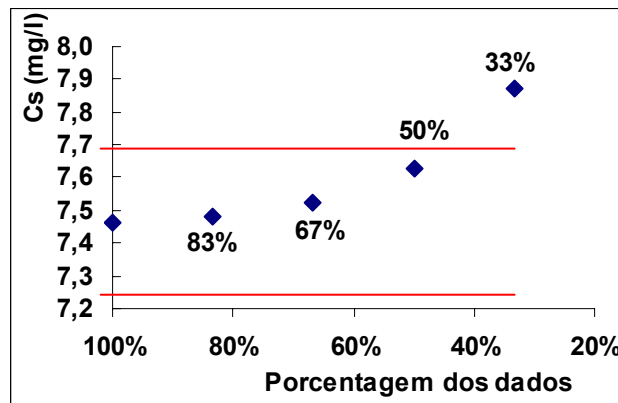


Figura 12 – C_s em função da % de dados utilizados, 250 rpm

Utilizando-se 67% do tempo total do ensaio, obtém-se o resultado esperado

Tabela 8 – Variação de parâmetros, 250 rpm

	6 horas	4 horas	Variação
C_0 (mg/l)	0,51	0,52	-1,9 %
C_s (mg/l)	7,44	7,47	-0,4 %
K_2 (h^{-1})	0,71	0,698	1,72 %
% C_s	99	94	

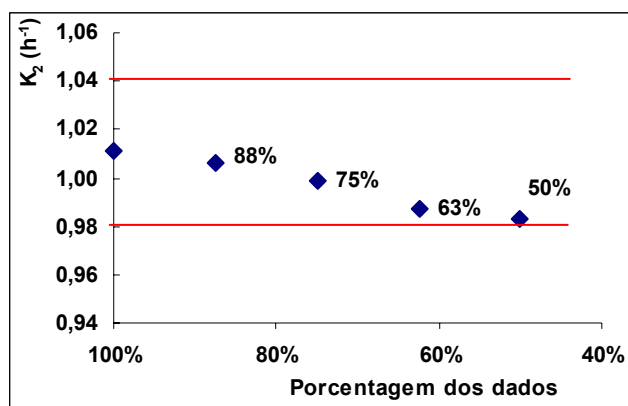


Figura 13 – K_2 em função da % de dados utilizados, 300 rpm

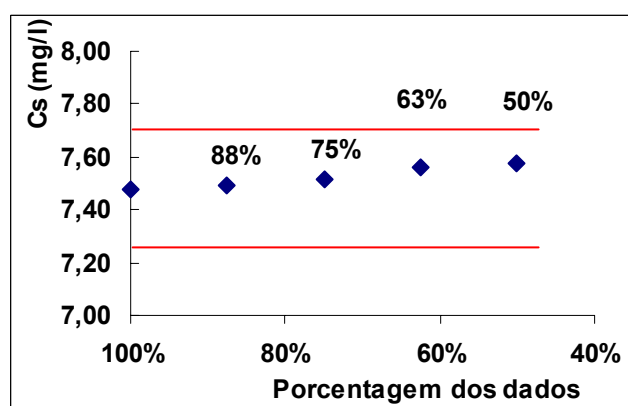


Figura 24– C_s em função da % de dados utilizados, 300 rpm

Utilizando-se 63% do tempo total do ensaio, obtém-se o resultado esperado.

Tabela 9– Variação de parâmetros, 300 rpm

	4 horas	2,5 horas	Variação
C_0 (mg/l)	0,78	0,80	-2,5%
C_s (mg/l)	7,47	7,53	-0,79%
K_2 (h^{-1})	1,013	1,005	0,8%
% C_s	98	93	

Não foram observadas variações significativas para a estimativa dos parâmetros nos ensaios com tempo reduzido. A fim de padronizar o tempo de ensaio e evitar ensaios muito curtos, são sugeridos os valores da tabela 10 para a realização de ensaios com a configuração experimental descrita.

Tabela 10 – Tempo de duração dos ensaios

Ensaio	Velocidade de rotação (rpm)	Tempo de ensaio (h)
1	50	13
2	100	10
3	150	6
4	200	6
5	250	4
6	300	4

5 – CONCLUSÕES

A otimização de ensaios experimentais permite a redução de tempo e recursos despendidos nos projetos de pesquisa. Neste trabalho verificou-se que os ensaios de reoxigenação superficial realizados em laboratório, utilizando tanques com agitação hidrodinâmica podem ser realizados sem a necessidade de atingir a concentração de saturação de oxigênio dissolvido.

Observou-se em todos os ensaios realizados a possibilidade de redução no tempo do ensaio considerando a metodologia apresentada e erro na estimativa de K_2 e C_s de no máximo 3%. Para o ensaio realizado com velocidade de rotação de 50rpm, o tempo de ensaio pode ser reduzido de 15 para 13 horas, resultando em uma redução de 13,3% no tempo do ensaio. Para o ensaio realizado com velocidade de rotação de 100rpm, o tempo de ensaio pode ser reduzido de 12 para 10 horas, resultando em uma redução de 16,6% no tempo do ensaio. No ensaio com velocidade de rotação de 150rpm, o tempo de ensaio pode ser reduzido de 7 para 5 horas, resultando em uma redução de 28,5% no tempo do ensaio. Para o ensaio realizado com velocidade de rotação de 200rpm, o tempo de ensaio pode ser reduzido de 7 para 6 horas, resultando em uma redução de 14,3% no tempo do ensaio. Para o ensaio realizado com velocidade de rotação de 250rpm, o tempo de ensaio pode ser reduzido de 6 para 4 horas, resultando em uma redução de 33,3% no tempo do ensaio. Para o ensaio realizado com velocidade de rotação de 300rpm, o tempo de ensaio pode ser reduzido de 4 para 2,5 horas, resultando em uma redução de 37,5% no tempo do ensaio.

BIBLIOGRAFIA

ADENEY, W. E. & BECKER, H. G. – *The Determination of the Rate of Solution of Atmospheric Nitrogen and Oxygen by Water*. Part I. Philosophical Magazine S.6, v.38 n.225 p.317-337, September 1919.

ASCE – *A standard for the Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water*, American Society of Civil Engineers, New York, 1984.

BARBOSA J, A. R. - *Desenvolvimento de metodologia para a determinação de coeficiente de reaeração dos escoamentos naturais da água com o emprego de traçador gasoso*. Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP, 1989.

BARBOSA J, A. R. - *Uso de traçadores na determinação de parâmetros de qualidade em escoamentos naturais de água*. Tese de doutorado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP, 1997.

BROWN, L. C.; BAILLOD, C. R. – *Modeling and Interpreting Oxygen Transfer Data*. Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, v. 108 n.4, p 607-628, Aug, 1982.

BRUMLEY, B. – *Turbulence Measurements Near the Free Surface in Stirred Grid Experiments*, Cornell University, in Gas Transfer at Water Surfaces, D. Reidel Publishing Company, Holland,

1984.

CHERN, J.M.; CHOU, S.R.; SHANG C.S.- *Effects of Impurities on Oxygen Transfer Rates in Diffused Aeration Systems*, Wat. Res. Vol. 35, No. 13, pp. 3041–3048, Taiwan, 2001

CHUDACEK, M. W. – *Does your tank bottom have the right shape?*, Chemical Engineering, Oct. 1, pg 79-83, 1984.

DANCKWERTS, P.V. – *Significance of Liquid-film Coefficients in gas Absorption*. Industrial and Engineering Chemistry, v.43, n.6, p.1460-67, 1951.

DEWULF,J., HEIREMAN, B., LANGENHOVE, H. V. - *The air/water exchange of volatile organic compounds from water in the transient and turbulent regime*. Water Resources Vol. 32 No. 7 pp 2106-2112. Belgium,1997.

DOEBELIN, E.O. - *Measurement Systems: Application and Design*. McGraw-Hill. ,1990

GIANSANTI, A. E. – *A influência do índice de turbulência no valor do coeficiente de reaeração dos cursos d'água*. Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP,1986.

GULLIVER, J. S. – *Introduction to Air-Water Mass Transfer*. Second International Symposium on Gas Transfer at Water Surfaces. American Society of Civil Engineering. Minneapolis, 1991.

HIGBIE, R. – *The Rate of Absorption of Pure Gas into Still Liquid during Short Periods of Exposure*. Trans. Am. Inst. Chem. Eng., v. 31 p365

HOLLEY, E. R. – *Oxygen transfer at the air-water interface*. University of Illinois at Urbana-Champaign, Research Report, , p. 117-150, 1977

HOLLEY, E. R. & YOTSUKURA, N. – *Field Techniques for Reaeration Measurements in Rivers*. In: BRUTSAERT, W & JIRKS, G. H., ed. Gas Transfer at water surfaces. D Reidel Publishing Company, p.381-401, 1984.

KRENKEL,P. A. & ORLOB, G. T. – *Turbulent diffusion and the Reaeration Coefficient*. Journal of the Sanitary Engineering Division, New York, v.88, part 1, n.2, p.53-83, Mar. 1962.

LEWIS, W. K. & WHITMAN, W. E – *Principles of Gas Absorption*. Absorption Symposium. Industrial and Engineering Chemistry, v. 16 n. 12 p. 1215-20, December, 1924

MAIA, G.D.N. – *Análise dos parâmetros cinéticos no fenômeno de reoxigenação e desoxigenação na água*. Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, EESC-USP, 2003.

ORLOB, GERALD T. - *Mathematical Modeling of Water Quality* : Streams, Lakes, and Reservoirs, 1983.

RAINWATER, K. A. & HOLLEY, E. R. – *Laboratory Studies on the Hydrocarbon Gas Tracer Technique for Reaeration Measurements*. Center for Research in Water Resources, Bureau of Engineering Research – University of Texas at Austin, p.114, Dec., 1983.

- SAWYER, C. N.; McCARTY, P. L.; PARKIN, G. F. – *Chemistry for Environmental Engineering*, 4th edition, McGraw-Hill 1994.
- SILVEIRA, A. – *Desenvolvimento de Metodologia para Determinação do Coeficiente de Transferência Térmica na Interface Ar-Água*. Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, EESC-USP, 1999.
- SILVEIRA, A. – *Influência da Umidade Atmosférica sobre o Mecanismo de Transferência de Gases através da Interface Água-Atmosfera*. Tese de Doutorado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, EESC-USP, 2004..
- STREETER, H.W. & PHELPS, E. B. – *A study of the Pollution and Natural Purification of the Ohio River*. – Public Health Bulletin, n.46, U.S. Public Health Service, Washington, D. C. p. 75, 1925.
- TERRON L. R. – *Conceitos Fundamentais de Agitação de Líquidos*, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Química, Apostila de curso de Pós-Graduação, 1994.
- UHL V. W.; GRAY J.B. – *Mixing: theory and practice*. Vol. 1, 2 e 3. New York, Academic Press, 1966.
- ULBRECHT, J. J.; PATTERSON, G. K. - *Mixing of Liquids by Mechanical Agitation*, Gordon and Breach Sci. Pub., New York, 1985.
- WHITMAN, W. E. – *The Two-Film Theory of Gas Absorption*. Chemical and Metallurgical Engineering. V.29,n.4, pp 146-148, 1923.
- YOTSUKURA, N.; STEDFAST D. A.; DRAPER R. E.; BRUTSAERT, W.H. – *An Assesment of Steady-State Propane Gas Tracer Method for Reaeration, Tehe Cowaselon Creek*. USGS Water Investigations Report, 83-4183, New York, 1983.