**ESTUDO DE PARÂMETROS
TURBULENTOS E SUA RELAÇÃO COM O
COEFICIENTE DE REAERAÇÃO COM O
USO DA TÉCNICA FOTOGRÁFICA**

CARLOS EUGENIO PEREIRA

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

ORIENTADOR: Prof. Titular WOODROW N. L. ROMA

**SÃO CARLOS
2002**

DIANTE DO TRONO

ÁGUAS PURIFICADORAS

Ana Paula Valadão

*Existe um rio, senhor
Que flui do teu grande amor
Águas que correm do trono
Águas que curam, que limpam
Por onde o rio passar
Tudo vai transformar
Pois leva a vida do próprio DEUS
E este rio está neste lugar
Quero beber do teu rio, senhor
Sacia minha sede, lava o meu interior
Eu quero fluir em tuas águas
Eu quero beber da tua fonte
Fonte de águas vivas
Tu és a fonte, senhor*

O CHEIRO DAS ÁGUAS

Ana Paula Valadão

*Há esperança para o ferido
Como árvore cortado, marcado pela dor
Ainda que na terra envelheça a raiz
E no chão, abandonado o seu tronco morrer*

Há esperança pra você

*Ao cheiro das águas brotará
Como planta nova florescerá
Seus ramos se renovação
Não cessarão os seus frutos
E viverá*

À minha grande família,
Ao meu pai Seu Normando e minha amada
mãe Maria. Esse trabalho é o fruto da
dedicação que os dois reservaram a mim, e
não se preocuparam com o sacrifício que
seria feito,
Meus queridos irmãos Normando,
Alexsandro, Fernanda e Magic Chel, meu
muito obrigado à DEUS por eles existirem
ao meu lado,
Dedico este trabalho.

AGRADECIMENTO

Ao Prof. Woodrow N. L. Roma,
Pelos incentivos e orientação, em meu coração
sempre guardarei a pessoa dedicada que és.

AGRADECIMENTOS

À DEUS o autor da minha vida, que me deu nova vida, e me deu alegria, tu és o dono do meu coração, a Ele toda honra, toda glória seja dada

Ao técnico do laboratório de Fenômenos de Transportes, o amigo Roberto Cezar Bergamo pelo companheirismo, amizade e principalmente pelas idéias e pelo apoio na manutenção da bancada de ensaios.

Ao pessoal da 4ª Igreja do Evangelho Quadrangular de São Carlos pelo companheirismo e amizade que me foram dados logo na minha chegada a essa cidade, que foram tempos difíceis.

Ao amigo José Eduardo Alamy Filho, meu companheiro de república, meu muito obrigado pelo apoio dado nos momentos difíceis dessa caminhada

E ao amigo que fala mais que a língua Marcelo Mello Barroso (sem moral), companheiro de república, dos jogos de Basket e das “brocas”, saiba que sempre terá moral comigo, valeu por tudo.

Aos meus professores de Iniciação Científica, Prof. Péricles Alves Medeiros, Prof^a Doralice Ap. Favaro Soares e ao Prof. Osni Pereira, pelos ensinamentos e amizade, quando comecei a dar meus primeiros passos na área da pesquisa, meu muito obrigado.

A minha irmã Rachel Lúcia pelo auxílio na obtenção e análise dos dados.

A todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP pela colaboração.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	.....	pág. i
LISTA DE TABELAS	.....	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	.....	xv
LISTA DE SÍMBOLOS	.....	xvi
RESUMO	.....	xx
ABSTRACT	.....	xxi
 1 – INTRODUÇÃO	.....	1
2 – OBJETIVOS	.....	3
3 – ANÁLISE TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	.....	4
3.1 Fundamentos de Transferência de Massa	.....	4
3.1.1 Lei de Fick da Difusão Molecular	.....	5
3.1.2 Coeficiente de Difusão Molecular	.....	8
3.1.2.1 A Equação de Chapman-Enskog	.....	11
3.1.3 Equação de Advecção-Difusão	.....	12
3.2 Análise Linear para a Transferência de Massa na Superfície	.....	16
3.2.1 Simplificação da Equação de Balanço de Massa	.....	17
3.2.2 Análise para Grandes Frequências	.....	20
3.2.3 Análise para Baixas Frequências	.....	22
3.3 Definição Matemática dos Processos de Absorção	.....	26
3.4 Modelos Clássicos	.....	28
3.4.1 Teoria dos Dois Filmes	.....	29
3.4.2 Teoria da Penetração	.....	31
3.4.3 Teoria da Renovação Superficial	.....	32
3.4.4 Modelo da Penetração do Filme	.....	32
3.4.5 Outros Modelos	.....	34

3.5. Fundamentos de Turbulência	35
3.5.1 Turbulência	35
3.5.2 Caracterização da Turbulência	36
3.5.3 Modelos de Turbulência nas proximidades da Superfície Livre	38
3.5.4 Intensidade Turbulenta	39
3.5.5 Funções de Correlação	40
3.5.6 Ergodicidade	42
3.6. Tanques com Grades Oscilantes	43
3.7 Visualização do Escoamento	45
3.7.1 Definição	45
3.7.2 Resumo da História da Visualização do Escoamento	46
3.7.3 Técnica de Trilhagem de Partículas	47
4 – MATERIAIS E MÉTODOS	50
4.1 Materiais	50
4.1.1 Equipamento de geração da Turbulência	51
4.1.2 Equipamento utilizado para a Desoxigenação da Água	52
4.1.3 Instrumentação de Medida	52
4.1.3.1 Sensor ótico para medida da deformação da superfície líquida	52
4.1.3.2 Aparelho Medidor de Oxigênio Dissolvido	53
4.1.3.3 Datalogger	53
4.1.3.4 Psicrômetro	54
4.1.3.5 Instrumentos utilizados na obtenção de fotografias	54
4.2 Metodologia	55
4.2.1 A Deaeração e a Reoxigenação da Água	56
4.2.2. Método para Determinação do Parâmetro K_2	57
4.2.3. Método para obtenção dos Dados e Medida dos Parâmetros Turbulentos (Sonda Ótica)	59
4.2.4. Técnica Fotográfica e a Metodologia na Obtenção das Fotografias (Método Fotográfico)	60
4.2.5. Digitalização e Interpolação	63
4.2.6. Campo de Velocidade	63
4.2.7. A equação da Continuidade	66

4.2.8. Obtenção dos Parâmetros através da Técnica Fotográfica.....	67
4.2.9. Umidade Relativa	68
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
5.1. Coeficiente de Reaeração K_2	69
5.2. Resultados da Sonda Ótica	76
5.3. Resultados obtidos através do Método Fotográfico	79
5.3.1. Velocidade Horizontal	80
5.3.2. Gradiente de Velocidade na direção z	109
5.3.2.1 Ajuste do valor RMS do gradiente da velocidade vertical em função da rotação.....	123
5.4 Comparação entre a Função de autocorrelação da sonda ótica e do método fotográfico.....	126
5.5 Comparação entre o espectro de frequência da sonda ótica e o espectro do método fotográfico	140
5.6. Relação entre o coeficiente de reaeração K_2 e o valor RMS do método ótico.....	154
5.7. Relação entre o coeficiente de reaeração K_2 e o valor RMS do método fotográfico.....	157
6 – CONCLUSÕES	161
ANEXO 1	164
ANEXO 2	171
ANEXO 3	179
BIBLIOGRAFIA	194

LISTA DE FIGURAS

	pág.
FIGURA 1: Sistema isolado com dois reservatórios separados pela membrana de espessura dz , contendo a espécie química i	5
FIGURA 2: Sistema isolado contendo a espécie química i , após retirada da membrana de espessura dz	5
FIGURA 3: Gráfico de concentração de O. D. em função do tempo.....	58
FIGURA 4: Dados de tensão amplificados.....	60
FIGURA 5: Esquema mostrando o aparato utilizado para obtenção das fotografias.....	61
FIGURA 6: Ilustração da trajetória obtida com o método fotográfico.....	62
FIGURA 7: fotografia da superfície livre.....	64
FIGURA 8: O movimento de uma partícula no campo de escoamento.....	65
FIGURA 9: Gráfico de K_2 em função da frequência de oscilação da grade de 26,5 mm de abertura e barras com 10mm de espessura.....	72
FIGURA 10: Melhor ajuste dos três trabalhos conjuntos (Grade de 26,5 mm de abertura e barras com 10mm de espessura).....	72
FIGURA 11: Gráfico de K_2 em função da frequência de oscilação da grade de 39,0 mm de abertura e barras com 10mm de espessura.....	73
FIGURA 12: Melhor ajuste dos três trabalhos conjuntos (Grade 39,0 mm de abertura e barras com 10mm de espessura).....	74
FIGURA 13: Gráfico de K_2 em função da frequência de oscilação da grade de 64,5 mm de abertura e barras com 10mm de espessura.....	75
FIGURA 14: Melhor ajuste dos três trabalhos conjuntos (Grade 64,5 mm de abertura e barras com 10mm de espessura).....	76
FIGURA 15: Melhor ajuste para RMS sonda <i>versus</i> frequência de oscilação da grade de 26,5 mm de abertura e barras com 10mm de espessura	78
FIGURA 16: Melhor ajuste para RMS sonda <i>versus</i> frequência de oscilação da grade de 39,0 mm de abertura e barras com 10mm de espessura.....	78
FIGURA 17: Melhor ajuste para RMS sonda <i>versus</i> frequência de oscilação da grade de 64,5 mm de abertura e barras com 10mm de espessura.....	79

FIGURA 18: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 2,65cm e rotação de 120 rpm.....	81
FIGURA 19: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 2,65cm e rotação de 120 rpm.....	81
FIGURA 20: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 2,65cm e rotação de 140 rpm.....	82
FIGURA 21: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 2,65cm e rotação de 140 rpm.....	82
FIGURA 22: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 2,65cm e rotação de 160 rpm.....	83
FIGURA 23: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 2,65cm e rotação de 160 rpm.....	83
FIGURA 24: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 2,65cm e rotação de 180 rpm.....	84
FIGURA 25: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 2,65cm e rotação de 180 rpm.....	84
FIGURA 26: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 2,65cm e rotação de 200 rpm.....	85
FIGURA 27: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 2,65cm e rotação de 200 rpm.....	85
FIGURA 28: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 3,90cm e rotação de 140 rpm.....	86
FIGURA 29: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 3,90cm e rotação de 140 rpm.....	86
FIGURA 30: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 3,90cm e rotação de 160 rpm.....	87
FIGURA 31: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 3,90cm e rotação de 160 rpm.....	87

FIGURA 32: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 3,90cm e rotação de 180 rpm.....	88
FIGURA 33: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 3,90cm e rotação de 180 rpm.....	88
FIGURA 34: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 3,90cm e rotação de 210 rpm.....	89
FIGURA 35: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 3,90cm e rotação de 210 rpm.....	89
FIGURA 36: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 3,90cm e rotação de 240 rpm.....	90
FIGURA 37: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 3,90cm e rotação de 240 rpm.....	90
FIGURA 38: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 6,45cm e rotação de 180 rpm.....	91
FIGURA 39: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 6,45cm e rotação de 180 rpm.....	91
FIGURA 40: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 6,45cm e rotação de 200 rpm.....	92
FIGURA 41: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 6,45cm e rotação de 200 rpm.....	92
FIGURA 42: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 6,45cm e rotação de 220 rpm.....	93
FIGURA 43: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 6,45cm e rotação de 220 rpm.....	93
FIGURA 44: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 6,45cm e rotação de 250 rpm.....	94
FIGURA 45: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 6,45cm e rotação de 250 rpm.....	94

FIGURA 46: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 2,65cm e rotação de 120 rpm.....	95
FIGURA 47: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 2,65cm e rotação de 120 rpm.....	95
FIGURA 48: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 2,65cm e rotação de 140 rpm.....	96
FIGURA 49: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 2,65cm e rotação de 140 rpm.....	96
FIGURA 50: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 2,65cm e rotação de 160 rpm.....	97
FIGURA 51: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 2,65cm e rotação de 160 rpm.....	97
FIGURA 52: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 2,65cm e rotação de 180 rpm.....	98
FIGURA 53: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 2,65cm e rotação de 180 rpm.....	98
FIGURA 54: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 2,65cm e rotação de 200 rpm.....	99
FIGURA 55: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 2,65cm e rotação de 200 rpm.....	99
FIGURA 56: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 3,90cm e rotação de 140 rpm.....	100
FIGURA 57: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 3,90cm e rotação de 140 rpm.....	100
FIGURA 58: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 3,90cm e rotação de 160 rpm.....	101
FIGURA 59: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 3,90cm e rotação de 160 rpm.....	101

FIGURA 60: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 3,90cm e rotação de 180 rpm.....	102
FIGURA 61: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 3,90cm e rotação de 180 rpm.....	102
FIGURA 62: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 3,90cm e rotação de 210 rpm.....	103
FIGURA 63: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 3,90cm e rotação de 210 rpm.....	103
FIGURA 64: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 3,90cm e rotação de 240 rpm.....	104
FIGURA 65: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 3,90cm e rotação de 240 rpm.....	104
FIGURA 66: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 6,45cm e rotação de 180 rpm.....	105
FIGURA 67: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 6,45cm e rotação de 180 rpm.....	105
FIGURA 68: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 6,45cm e rotação de 200 rpm.....	106
FIGURA 69: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 6,45cm e rotação de 200 rpm.....	106
FIGURA 70: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 6,45cm e rotação de 220 rpm.....	107
FIGURA 71: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 6,45cm e rotação de 220 rpm.....	107
FIGURA 72: Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 6,45cm e rotação de 250 rpm.....	108
FIGURA 73: Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada 6,45cm e rotação de 250 rpm.....	108

FIGURA 74: Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 120 rpm.....	109
FIGURA 75: Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65cm e rotação de 120 rpm.....	109
FIGURA 76: Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 140 rpm.....	110
FIGURA 77: Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 140 rpm.....	110
FIGURA 78: Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 160 rpm.....	111
FIGURA 79: Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65cm e rotação de 160 rpm.....	111
FIGURA 80: Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 180 rpm.....	112
FIGURA 81: Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65cm e rotação de 180 rpm.....	112
FIGURA 82: Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 200 rpm.....	113
FIGURA 83: Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65cm e rotação de 200 rpm.....	113
FIGURA 84: Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 120 rpm.....	114
FIGURA 85: Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90cm e rotação de 120 rpm.....	114

FIGURA 86: Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 160 rpm.....	115
FIGURA 87: Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90cm e rotação de 160 rpm.....	115
FIGURA 88: Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 180 rpm.....	116
FIGURA 89: Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90cm e rotação de 180 rpm.....	116
FIGURA 90: Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 210 rpm.....	117
FIGURA 91: Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90cm e rotação de 210 rpm.....	117
FIGURA 92: Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 240 rpm.....	118
FIGURA 93: Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90cm e rotação de 240 rpm.....	118
FIGURA 94: Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 180 rpm.....	119
FIGURA 95: Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45cm e rotação de 180 rpm.....	119
FIGURA 96: Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 200 rpm.....	120
FIGURA 97: Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45cm e rotação de 200 rpm.....	120

FIGURA 98: Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 220 rpm.....	121
FIGURA 99: Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45cm e rotação de 220 rpm.....	121
FIGURA 100: Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 250 rpm.....	122
FIGURA 101: Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45cm e rotação de 250 rpm.....	122
FIGURA 102: Melhor ajuste para RMS foto <i>versus</i> frequência de oscilação da grade de 26,5 mm de abertura e 10,0 mm de espessura.....	124
FIGURA 103: Melhor ajuste para RMS foto <i>versus</i> frequência de oscilação da grade de 39,0 mm de abertura e 10,0 mm de espessura.....	124
FIGURA 104: Melhor ajuste para RMS foto <i>versus</i> frequência de oscilação da grade de 64,5 mm de abertura e 10,0 mm de espessura.....	125
FIGURA 105: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 120 rpm).....	126
FIGURA 106: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 120 rpm).....	126
FIGURA 107: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 140 rpm).....	127
FIGURA 108: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 140 rpm).....	127
FIGURA 109: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 160 rpm).....	128
FIGURA 110: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 160 rpm).....	128

FIGURA 111: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 180 rpm).....	129
FIGURA 112: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 180 rpm).....	129
FIGURA 113: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 200 rpm).....	130
FIGURA 114: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 200 rpm).....	130
FIGURA 115: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 140 rpm).....	131
FIGURA 116: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 140 rpm).....	131
FIGURA 117: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 160 rpm).....	132
FIGURA 118: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 160 rpm).....	132
FIGURA 119: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 180 rpm).....	133
FIGURA 120: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 180 rpm).....	133
FIGURA 121: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 210 rpm).....	134
FIGURA 122: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 210 rpm).....	134

FIGURA 123: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 240 rpm).....	135
FIGURA 124: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 240 rpm).....	135
FIGURA 125: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 180 rpm).....	136
FIGURA 126: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 180 rpm).....	136
FIGURA 127: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 200 rpm).....	137
FIGURA 128: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 200 rpm).....	137
FIGURA 129: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 220 rpm).....	138
FIGURA 130: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 220 rpm).....	138
FIGURA 131: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 250 rpm).....	139
FIGURA 132: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 250 rpm).....	139
FIGURA 133: Espectro Sonda: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 120 rpm).....	140
FIGURA 134: Espectro Foto: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 120 rpm).....	140

FIGURA 135: Espectro Sonda: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 140 rpm).....	141
FIGURA 136: Espectro Foto: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 140 rpm).....	141
FIGURA 137: Espectro Sonda: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 160 rpm).....	142
FIGURA 138: Espectro Foto: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 160 rpm).....	142
FIGURA 139: Espectro Sonda: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 180 rpm).....	143
FIGURA 140: Espectro Foto: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 180 rpm).....	143
FIGURA 141: Espectro Sonda: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 200 rpm).....	144
FIGURA 142: Espectro Foto: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 200 rpm).....	144
FIGURA 143: Espectro Sonda: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 140 rpm).....	145
FIGURA 144: Espectro Foto: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 140 rpm).....	145
FIGURA 145: Espectro Sonda: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 160 rpm).....	146
FIGURA 146: Espectro Foto: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 160 rpm).....	146

FIGURA 147: Espectro Sonda: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 180 rpm).....	147
FIGURA 148: Espectro Foto: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 180 rpm).....	147
FIGURA 149: Espectro Sonda: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 210 rpm).....	148
FIGURA 150: Espectro Foto: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 210 rpm).....	148
FIGURA 151: Espectro Sonda: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 240 rpm).....	149
FIGURA 152: Espectro Foto: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 240 rpm).....	149
FIGURA 153: Espectro Sonda: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 180 rpm).....	150
FIGURA 154: Espectro Foto: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 180 rpm).....	150
FIGURA 155: Espectro Sonda: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 200 rpm).....	151
FIGURA 156: Espectro Foto: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 200 rpm).....	151
FIGURA 157: Espectro Sonda: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 220 rpm).....	152
FIGURA 158: Espectro Foto: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 220 rpm).....	152

FIGURA 159: Espectro Sonda: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 250 rpm).....	153
FIGURA 160: Espectro Foto: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 250 rpm).....	153
FIGURA 161: K_2 em função de RMS (Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura)	155
FIGURA 162: K_2 em função de RMS (Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura).....	156
FIGURA 163: K_2 em função de RMS (Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura).....	157
FIGURA 164: RMS Foto em função de K_2 (Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura).....	158
FIGURA 165: RMS Foto em função de K_2 (Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura).....	159
FIGURA 166: RMS Foto em função de K_2 (Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura).....	160

LISTA DE TABELAS

	pág.
TABELA 1: Resultados do coeficiente de reaeração K_2 , medido na temperatura do experimento e a 25 ⁰ C. Coeficiente de transferência de massa K_L e as condições experimentais de cada ensaio (temperaturas e umidade relativa do ar.....	70
TABELA 2: Comparativo entre os valores K_2 para o ensaio da grade fina.....	71
TABELA 3: Comparativo entre os valores K_2 para o ensaio da grade média...	73
TABELA 4: Comparativo entre os valores K_2 para o ensaio da grade larga....	74
TABELA 5: Parâmetros turbulentos obtidos nos ensaios com o método ótico. Comparação dos valores RMS e Macro escala desta pesquisa com os de ROMA (1988).....	77
TABELA 6: Valores de RMS obtidos pelo método fotográfico para o gradiente de velocidade vertical.....	123
TABELA 7: Valores de K_2 e RMS da sonda medidos em laboratório e estimados para a grade de 26,5 mm de abertura e barras com 10mm de espessura.....	154
TABELA 8: Valores de K_2 e RMS da sonda medidos em laboratório e estimados para a grade de 39,0 mm de abertura e barras com 10mm de espessura.....	155
TABELA 9: Valores de K_2 e RMS da sonda medidos em laboratório e estimados para a grade de 64,5 mm de abertura e barras com 10mm de espessura.....	156
TABELA 10: Valores de K_2 e RMS foto medidos em laboratório e estimados para a grade de 26,5 mm de abertura e barras com 10mm de espessura.....	157
TABELA 11 Valores de K_2 e RMS foto medidos em laboratório e estimados para a grade de 39,0 mm de abertura e barras com 10mm de espessura.....	158
TABELA 12: Valores de K_2 e RMS foto medidos em laboratório e estimados para a grade de 64,5 mm de abertura e barras com 10mm de espessura.....	159

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CPU – Unidade Central de Processamento

DPIV - velocimetria por Processamento de Imagens Digitais

FFT – Fast Fourier Transform

PIV - Velocimetria por Processamento de Imagens

RMS – Raiz Média Quadrática

SHS – Setor de Hidráulica e Saneamento

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- área de interface gás- líquido	L^2
A_e	- valor máximo da velocidade no interior da célula	L^2
C	- flutuação da concentração em relação ao valor médio	$M L^{-3}$
C	- concentração do gás dissolvido no líquido	$M L^{-3}$
$\bar{C}$	- concentração média temporal	$M L^{-3}$
C_o	- concentração inicial do gás dissolvido	$M L^{-3}$
C_I	- concentração molar da espécie i	$M L^{-3}$
C_I	- concentração na interface	$M L^{-3}$
C_L	- concentração do gás dissolvido no volume líquido	$M L^{-3}$
C_s	- concentração de saturação do gás no líquido	$M L^{-3}$
D	- diâmetro de colisão	L
D_{AB}	- diâmetro de colisão mútuo de A em B e de B em A	L
D_{ii}	- coeficiente de difusão ou autodifusão	$L^2 T^{-1}$
D_{AB}	- coeficiente de difusão do soluto A no meio B	$L^2 T^{-1}$
D_m	- coeficiente de difusão molecular do soluto	$L^2 T^{-1}$
D_{Ti}	- coeficiente de difusão turbulenta	$L^2 T^{-1}$
e	- exponencial	
f	- frequência de oscilação da grade	t^{-1}
F_c	- somatório de todas as fontes e sumidouros	
H	- coeficiente de solubilidade da lei de Henry	$L^2 M t^{-2}$
H	- profundidade	L
J	- fluxo de massa por unidade de área	$M L^{-2} T^{-1}$
$J_{i,z}$	- fluxo difusivo da espécie i por unidade de área na direção z.	$M L^{-2} T^{-1}$
K	- coeficiente de transferência de massa	
L_f	- espessura do filme	L
k	- energia cinética turbulenta	$M L T^{-1}$
K_2	- coeficiente de reaeração	t^{-1}
K_G	- coeficiente do filme gasoso	$L T^{-1}$

K_G	- coeficiente global de transferência de massa no filme gasoso	$L T^{-1}$
K_L	- coeficiente do filme líquido	$L T^{-1}$
K_L	- coeficiente global de transferência de massa no filme líquido	$L T^{-1}$
K_T	- coeficiente de dessorção	t^{-1}
L	- comprimento de escala integral	L
L_m	- macro escala de turbulência	T
M	- lado da malha da grade	L
M	- massa molecular	$M \text{ mol}^{-1}$
m	- massa de gás dissolvido	M
N_0	- número de Avogrado	
N_n	- fator de associação que define o peso molecular efetivo do solvente	
O_2	- oxigênio	
P	- pressão	$L^{-1} M t^{-2}$
P_G	- pressão parcial no gás	$L^{-1} M t^{-2}$
P_I	- pressão parcial na interface	$L^{-1} M t^{-2}$
P_S	- pressão parcial correspondente a concentração de saturação	$L^{-1} M t^{-2}$
R	- constante universal dos gases	
S	- número de Schmidt	
S	- amplitude de oscilação da grade	L
s	- razão média de renovação superficial por unidade total de área da superfície da teoria da penetração	t^{-1}
S_β	- espectro da flutuação do gradiente de velocidade vertical	$L^2 T^2$

T	- temperatura	T
t	- tempo	T
T_e	- tempo médio para a teoria da penetração	T
V_b	- volume molar do soluto na temperatura normal de ebulição	$L^3 \text{ mol}^{-1}$
V	- flutuação da componente da velocidade	$L T^2$
V_I	- componente da velocidade do líquido segundo a direção xi	$L T^2$
$\overline{V}_i$	- valor médio no tempo da componente da velocidade na direção xi	$L T^2$
V	- volume líquido	L^3
$\overline{V}$	- valor medido médio	
$\overline{u'}$	- intensidade turbulenta longitudinal	
u'	- RMS horizontal da velocidade	
w_I	- fração mássica	
X	- coordenada longitudinal	L
Y	- coordenada transversal	L
Y	- distância aproximada do centro do movimento da grade	L
Z	- coordenada normal a superfície	L
α	- velocidade longitudinal	
β	- gradiente da velocidade vertical	
γ	- velocidade transversal	
$\overline{\beta^2}$	- valor médio do quadrado do gradiente de velocidade vertical	
δ	- espessura característica da concentração na camada limite	L
δ_c	- espessura característica crítica	L
ε	- dissipação turbulenta	
ε_I	- coeficiente de difusão total	$L^2 T^{-1}$
Λ	- dimensão da célula do modelo de Fortescue & Pearson	L
λ	- caminho livre médio	L
π	- função pi	

μ	- viscosidade dinâmica da água	$L^{-1} M T^{-1}$
ν_t	- viscosidade turbulenta	$L^2 T^{-1}$
ρ	- densidade do fluido	$M L^{-3}$
$\rho(dx)$	- coeficiente da função de autocorrelação espacial	
$\rho(dt)$	- coeficiente da função de autocorrelação temporal	
σ_{AB}	- diâmetro médio de colisão para a mistura (A+B)	L
ϕ	- função de distribuição das idades dos elementos líquidos superficiais	
Ω	- velocidade média molecular	$L T^{-1}$
Ω_D	- integral de colisão	
σ	- fator de forma	
ω_C	- frequência crítica	T^{-1}
ω_m	- frequência média	T^{-1}
∂	- símbolo de derivada parcial	

RESUMO

PEREIRA, C. E. (2002). *Estudo de parâmetros turbulentos e sua relação com o coeficiente de reaeração com o uso da técnica fotográfica*. São Carlos, 2002. 162 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A importância dada aos parâmetros de qualidade da água, principalmente nas últimas décadas justifica a realização desse trabalho, que investiga a relação de alguns parâmetros turbulentos com o coeficiente de reaeração, K_2 , através de duas técnicas distintas de medida: o método ótico e a técnica fotográfica.

O método ótico relaciona a intensidade de luz recebida por um diodo imerso na água com a velocidade vertical no ponto onde é realizada a medida; os dados coletados pelo método ótico constituem um sinal elétrico que contém a informação da deformação da superfície. A partir desse sinal determinam-se os seguintes parâmetros: Valor RMS da tensão, função de autocorrelação, macroescala e espectro. Os resultados obtidos por esse método são funções temporais.

O método fotográfico consiste em obter fotografias de partículas iluminadas sobre a superfície livre da água, com tempo de exposição conhecido. O método foi melhorado pela adição de dois disparos de flash, para permitir a determinação da variação da velocidade. As fotos são digitalizadas em um software gráfico e os valores obtidos são interpolados através do método Kriging de interpolação. O método fotográfico é uma função espacial.

A partir do método fotográfico são determinados os seguintes parâmetros: Valor RMS, função de autocorrelação e espectro. Os resultados obtidos permitem a comparação quantitativa entre as funções de autocorrelação e espectros, e a relação entre o coeficiente de reaeração, K_2 e o valor RMS obtidos pela sonda e pela foto.

Palavras-chave: reoxigenação; coeficiente de reaeração; método fotográfico; parâmetros turbulentos; visualização do escoamento.

ABSTRACT

PEREIRA, C. E. *Study of turbulent parameters and your relation with the coefficient reaeration with the use of the photographic technique*. São Carlos, 2002. 162 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The importance given to the parameters of quality of the water, mainly in the last decades, it justifies the accomplishment of this work, that it investigates the relation of some turbulent parameters with the re-aeration coefficient, K_2 , through two different techniques of measure: the optic method and the photographic technique.

The optic method relates the intensity of the light received by a immersed diode in the water with the vertical speed at the point where the measure is accomplished; the data collected by the optic method are electric signs that contains the information of the deformation of the surface. Thereafter this signs, the following parameters are determined: RMS value of tension, self-correlation function, macro-scale and spectrum. The results obtained for this method they are temporal functions.

The photographic method consists of obtaining pictures of illuminated particles on the free surface of the water, with time of exhibition known. The method was improved by addition of two shots of flashes, to allow the determination of the variation of the speed. The pictures, then, are digitized in a graphic software and the values obtained are interpolated through the Kriging interpolation method. The photographic method is a spatial function.

With the photographic method may be determined the following parameters: RMS value, self-correlation function and spectrum. The results obtained may provide the quantitative comparison between the self-correlation function and spectrum; and also the relation between the re-aeration coefficient, K_2 , and the RMS value, that are obtained through the probe and the picture.

Keywords: re-oxygenation; re-aeration coefficient; photographic method; turbulent parameters; visualization of the drainage.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento industrial dos últimos dois séculos foi acompanhado pelo crescimento populacional urbano, verificado mais fortemente no último século, no qual, principalmente a atmosfera terrestre e os rios acabaram recebendo grandes cargas de poluentes, decorrentes de despejos domésticos e industriais. A cada dia o problema torna-se mais crescente nos grandes centros urbanos. Como consequência, os processos naturais sofrem grande alteração, acarretando em rios poluídos, no efeito estufa e outras consequências geradas pelos processos de degradação.

Todos os processos naturais, como a reaeração em rios e oceanos e os ciclos térmicos e de massa do meio ambiente, são afetados pelas ações antrópicas.

No estudo de tratamento de corpos d'água um dos processos envolvidos é o transporte de massa na interface líquido/gás. Um dos gases relevantes nesses processos é o oxigênio, geralmente incorporado no líquido a partir da atmosfera. Este processo é conhecido como reaeração e vem ganhando importância devido à preocupação com o tratamento das águas de abastecimento e residuárias.

Um dos parâmetros de grande importância na qualidade da água é o oxigênio dissolvido, e dentre os despejos lançados nos rios está a matéria orgânica. Esse composto serve de alimento para as bactérias, que consomem no seu metabolismo o oxigênio dissolvido, acarretando um déficit de oxigênio na água.

O processo conhecido como autodepuração dos rios é a resposta que a natureza dá à ação da contaminação deles. Dentro desse processo existe a recuperação da carga de oxigênio dissolvido, através da absorção de oxigênio pela água.

A absorção de gás por um líquido é influenciada fortemente pelo campo de velocidade. Em um corpo de água parada o processo de transferência de massa se dá através de um processo lento, a difusão molecular. E em águas agitadas o fenômeno

é acelerado e passa a ser estudado com ferramentas mais complexas vinculadas aos escoamentos turbulentos.

O parâmetro que é utilizado para representar a absorção de oxigênio pela água é o coeficiente de reaeração (K_2). Diversos pesquisadores desenvolveram fórmulas de natureza teóricas, empíricas ou semi-empíricas, bem como equipamentos e métodos para realizar essas medidas, tanto em laboratório quanto diretamente nos próprios rios.

Vê-se que o movimento turbulento na superfície livre na interface entre dois meios é de grande importância nos processos de transferência de massa e calor. Grande atenção tem sido dada à absorção de gases em escoamentos turbulentos. O tema é de entendimento complexo, com poucos estudos direcionados aos detalhes da interface.

Os lançamentos de despejos domésticos e industriais em rios poluem a água utilizada para consumo humano. Este motivo simples aponta para a necessidade de maiores estudos nesta área, uma vez que a oxigenação é uma das formas de recuperar águas poluídas.

Através de observações da própria natureza, e pela utilização do fenômeno da refração, ROMA (1988) desenvolveu uma sonda ótica, instrumento capaz de detectar a deformação da superfície através de um sinal luminoso e produzir um sinal elétrico que contém informações da deformação. A sonda ótica foi desenvolvida para ser utilizada em medidas de turbulência superficial em água, e assim caracterizar escoamentos turbulentos. Com o sinal gerado pela sonda é possível determinar parâmetros turbulentos, como o valor RMS, a função de auto correlação, a macro escala e o espectro, caracterizando o escoamento.

Outro método presente na literatura é o método de trilhagem de partículas, um método fotográfico que consiste basicamente na trilhagem de partículas iluminadas sobre a superfície livre. Pelos traços que as partículas deixam impressas na imagem e pelo tempo de exposição da tomada fotográfica, o campo de velocidade instantâneo pode ser calculado.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é comparar os resultados obtidos pelo método ótico desenvolvido por ROMA (1988), com os resultados do método fotográfico por trilhagem de partículas, na obtenção de uma relação com o coeficiente de reaeração, K_2 .

Os resultados dos parâmetros obtidos pelo método ótico serão comparados com os parâmetros do método fotográfico, buscando-se uma relação entre os dois resultados, que permita avaliar a qualidade dos dados obtidos pelo sensor ótico.

Avaliação dos parâmetros obtidos pelos dois métodos, identificando os que apresentam melhor correlação com o coeficiente de reaeração superficial.

3 ANÁLISE TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Fundamentos de Transferência de Massa

O fenômeno da transferência de massa nasce da “diferença” de concentração entre espécies químicas ou constituintes em dois meios ou duas regiões distintas em um único meio. Se em uma região qualquer do espaço uma determinada espécie química se encontra em grande número de moléculas por unidade de volume (concentração) e, em contrapartida, em uma outra região próxima, o número de moléculas por unidade de massa dessa mesma espécie é mais reduzido, a tendência das moléculas seria a de migrarem da região de maior para a de menor concentração e, se não houver nenhum efeito neutralizador, buscarem o equilíbrio.

No estudo de tratamento de corpos d’água, um dos processos importantes é o transporte de massa na interface líquido/gás. Este processo é conhecido como reaeração e vem ganhando importância devido à preocupação com o tratamento das águas de abastecimento e residuárias. Na absorção de gás por um líquido é nítida a relação entre a taxa de absorção e o campo de velocidades existente no líquido. Em um corpo com água praticamente parada, o processo de transferência de massa se dá, unicamente, pela difusão, que é caracterizada por ser um processo lento e se deve às interações moleculares sendo descrita pela Lei de Fick. Já em águas agitadas o fenômeno é acelerado e passa a ser estudado pela equação do balanço de massa.

Os principais mecanismos para o transporte de massa são a difusão, já mencionada, e a advecção. Na advecção, o transporte de massa ocorre principalmente devido ao movimento do fluido.

Inicialmente, a fim de que se descreva a difusão, será estudada a lei de Fick e, e em seguida a equação de balanço de massa, que apresenta a variação da concentração no tempo em função do campo de velocidades.

3.1.1 Lei de Fick da Difusão Molecular

A princípio, tomam-se dois reservatórios A e B com a mesma temperatura e separados por uma membrana impermeável e fixa de espessura dz . No início, o reservatório A contém uma quantidade maior da espécie química i do que em B,

FIGURA 1: Sistema isolado com dois reservatórios separados pela membrana de espessura dz , contendo a espécie química i

Retirando-se a membrana, a tendência é de homogeneização da espécie química i por todo o volume.

FIGURA 2: Sistema isolado contendo a espécie química i , após retirada da membrana de espessura dz .

Observa-se, dessa forma, que o fenômeno surgiu de uma “diferença” e a tendência foi a de homogeneização.

Vale ressaltar, ainda, que este processo ocorre se houver alguma modificação no sistema e aparece como decorrência da diferença de potencial químico da espécie i .

Segundo CREMASCO (1998) e de acordo com a segunda lei da termodinâmica, haverá fluxo de matéria de uma região de maior a outra de menor concentração de uma dada espécie química. A espécie transferida chama-se soluto e designa-se de solvente a população de uma ou mais espécies químicas distintas do soluto, as quais podem estar abrigadas nas regiões que contêm o soluto. O conjunto soluto/solvente constitui o meio onde estará ocorrendo o fenômeno da transferência de massa.

A diferença de concentração de soluto é a causa da transferência de massa e, por conseguinte, do efeito movimento. Essa diferença seria a “força motriz” necessária ao movimento da espécie *i*.

CREMASCO (1998, p.24) define da seguinte maneira o movimento da matéria, que seria a base para o entendimento da 1ª lei de Fick:

$$(\text{movimento da matéria}) = 1 / \text{Resistência} \cdot (\text{Força motriz}) \quad (1)$$

A resistência seria a reação a esse movimento e estaria relacionada à interação soluto/meio (difusão) e soluto/meio mais ação externa (convecção).

Na contribuição difusiva, o transporte da espécie *i* se dá devido às interações moleculares e pode ser entendido da seguinte maneira:

Um barco a remo em uma lagoa calma.

Soluto : barco (é a que se movimenta)

Difusão Meio : lagoa (onde o barco se movimenta)

Elemento gerador do movimento: remo

Um tanque com água sem agitação.

Soluto : O₂

Difusão Meio : água

Elemento gerador do movimento: a interação a nível molecular entre soluto/meio.

A nível molecular haverá colisões entre as moléculas, que, tomarão rumos aleatórios, migrando para qualquer sentido e direção e tendendo, porém, a ocupar lugares onde a sua população seja menor. Assim, como já foi visto, a “diferença” possibilita o fluxo da matéria.

Pelo que foi analisado na equação (1), temos:

$$J_{i,z} = -\frac{1}{3} \cdot \Omega \cdot \lambda \cdot \frac{dC_i}{dz} \quad (2)$$

em que,

$J_{i,z}$: indica o fluxo difusivo da matéria na direção z ($M/L^2 \cdot T$),

Ω : é a velocidade média molecular (L/T),

λ : é o caminho livre médio, definido como a distância média entre duas moléculas na iminência de colisão (L).

Com base na equação (1), pode-se definir o coeficiente de difusão por:

$$D_{ii} = \frac{1}{3} \cdot \Omega \cdot \lambda \quad (3)$$

Substituindo a eq. (3) na eq. (2), tem-se:

$$J_{i,z} = -D_{ii} \cdot \frac{dC_i}{dz} \quad (4)$$

efeito ← causa

O efeito citado na eq. (4) é o movimento da espécie i , causado pela diferença de concentração e o sinal negativo indica decréscimo da concentração da espécie i com o sentido do fluxo. Essa é a lei de Fick, que também é definida por ser a taxa

com que uma substância se difunde através de uma seção de área unitária e é proporcional ao gradiente de concentração normal a esta seção, e pode também ser expressa em termos de fração mássica, como:

$$J_{i,z} = -\rho \cdot D_{ii} \cdot \frac{dw_i}{dz} \quad (5)$$

em que,

$J_{i,z}$: fluxo de massa por unidade de área ($M/L^2 \cdot T$),

ρ : densidade do fluido (M/L^3),

w_i : fração mássica (adim.),

D_{ii} : coeficiente de difusão ou autodifusão (L^2/T),

dw_i/dz : gradiente de concentração na direção z em termos de fração mássica ($1/L$),

dC/dz : gradiente de concentração na direção z em termos de massa (M/L^4).

3.1.2 Coeficiente de Difusão Molecular

O coeficiente de difusão está relacionado com a resistência à difusão:

$$D_{ii} = \frac{1}{\text{Resistência à difusão}} \quad (6)$$

“A importância do entendimento da difusividade ou do coeficiente de difusão reside no fato de que ao se procurar compreendê-lo, a difusão, em si, estará apreendida” (CREMASCO, 1998,p.43). Ela representa a interação soluto/meio na difusão em gases e está caracterizada na velocidade média molecular e no caminho livre médio, melhor entendido na teoria cinética dos gases.

Pela teoria cinética dos gases, o coeficiente de difusão fica definido da seguinte maneira:

$$D_{ii} = \frac{2}{3 \cdot N_0 \cdot P \cdot d^2} \left(\frac{R \cdot T}{\pi} \right)^{3/2} \left(\frac{1}{M} \right)^{1/2} \quad (7)$$

em que,

N_0 : é o número de Avogrado,

P : é a pressão (M/L.T²),

d : é o diâmetro de colisão (L),

R : é a constante universal dos gases,

T : é a temperatura (t)

M : é a massa molar (M.mol⁻¹).

A equação (7) relaciona a difusividade às propriedades do gás e ao efeito da energia cinética ($R \cdot T$), ou seja, quanto mais agitado melhor a mobilidade.

O coeficiente de difusão em gases pode ser definido para o par apolar A/B , onde D_{AB} é o coeficiente de difusão mútua, pois A se difunde no meio B , assim como B se difunde no meio A .

$$D_{AB} = \frac{2}{3 \sqrt{2} N_0 \cdot P \cdot d_{AB}^2} \left(\frac{R \cdot T}{\pi} \right)^{3/2} \left[\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right]^{1/2} \quad (8)$$

Substituindo-se $N_0 = 6.023 \times 10^{23}$ moléculas/(g.mol) e $R = 8.3144 \times 10^7$ (g.cm²/(g.mol.s².K)) na equação (8), obtém-se o seguinte resultado:

$$D_{AB} = 1.066 \times 10^{-13} \frac{T^{3/2}}{P \cdot d_{AB}^2} \left[\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right]^{1/2} \quad (9)$$

em que,

D_{AB} : é o coeficiente de difusão (cm^2/s),

T é a temperatura dada em K,

P é a pressão (g.cm/s^2),

d_{AB} é o diâmetro de colisão (cm).

Segundo CREMASCO (1998) essa equação pode ser rearranjada em termos de atm e Å conservando, contudo, as outras unidades. Assim tem-se:

$$D_{AB} = 1.053 \times 10^{-3} \frac{T^{3/2}}{P \cdot d_{AB}^2} \left[\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right]^{1/2} \quad (10)$$

O coeficiente de difusão (D_{AB}) para um sistema binário recebe a influência do meio, caracterizando-se como função da temperatura e da pressão e apresentando características moleculares próprias das espécies químicas A e B.

Vale ressaltar que o coeficiente de difusão binária em gases para o sistema ar/água a temperatura de 298 K (25°C) é dado da seguinte maneira: $D_{AB} \cdot P$ é igual a $0.260 \text{ cm}^2 \cdot \text{atm/s}$ ou, aproximadamente, D_{AB} igual a $0.20 \text{ cm}^2/\text{s}$ à pressão de 1 atm, podendo também ser obtido experimentalmente através da Lei de Fick.

As moléculas detêm cargas elétricas; estas geram forças atrativas e repulsivas entre o par soluto/solvente, e as forças passam a governar o fenômeno das colisões moleculares por meio da energia potencial de atração/repulsão, conhecida como o potencial de Lennard-Jones.

A energia potencial de atração/repulsão é conhecida como o potencial de Lennard-Jones e, de posse desse potencial, é possível reescrever a equação (10).

$$D_{AB} = 1.053 \times 10^{-3} \frac{T^{3/2}}{P \cdot \sigma_{AB}^2} \left[\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right]^{1/2} \quad (11)$$

em que σ_{AB}^2 é o diâmetro médio de colisão para a mistura (A+B).

3.1.2.1 A Equação de Chapman-Enskog

$$D_{AB} = b \times 10^{-3} \frac{T^{3/2}}{P \cdot \sigma_{AB}^2 \cdot \Omega_D} \left[\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right]^{1/2} \quad (12)$$

Essa equação é baseada na teoria cinética dos gases e o coeficiente de transporte, na energia potencial. O valor de b é igual a 1,858.

Wilke e Lee (1955), citados por CREMASCO (1998), propuseram uma expressão para a constante b :

$$b = 2,17 - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{1/2} \quad (13)$$

Segundo MOMESSO (1996), existe grande escassez de dados experimentais para o coeficiente de difusão. Assim, várias expressões semi-empíricas foram desenvolvidas, considerando cada estado da matéria, contendo estes diferentes forças intermoleculares.

A Correlação empírica de Fuller, Schetter e Giddings (1966), mencionados por CREMASCO (1998, p.57) remete à formulação original, equação (10), sendo corrigida no termo da temperatura de acordo com a equação a seguir.

$$D_{AB} = 1.0 \times 10^{-3} \frac{T^{1.75}}{P \cdot d_{AB}^2} \left[\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right]^{1/2} \quad (14)$$

A temperatura é dada em Kelvin e a pressão em atm. O coeficiente D_{AB} é definido em função de uma grandeza (Σv), que é um volume associado à difusão da molécula A.

Wilke citado, por BIRD (1976), desenvolveu uma correlação para o coeficiente de difusão com base na equação de Stokes–Einstein. Seus resultados podem ser resumidos em uma relação analítica aproximada. Um dos modelos para

previsão da difusividade em transferência de massa gás/líquido foi apresentado por Wilke e Chang, citados por BIRD (1976), sendo:

$$D_m = 7,4 \times 10^{-8} \frac{(N_n \cdot M_n)^{1/2} \cdot T}{\mu \cdot V_b^{0,6}} \quad (15)$$

em que,

D_m : difusividade molecular do soluto em cm^2/s ,

M_n : peso molecular do solvente (g/mole),

N_n : fator de associação que define o peso molecular efetivo do solvente, para a água vale 2,6,

μ : viscosidade dinâmica da água, em centipoise,

T : temperatura absoluta, em Kelvin,

V_b : volume molar do soluto em seu ponto normal de ebulição em $\text{cm}^3/\text{g mol}$.

Alguns modelos para o coeficiente de difusão para sólidos, líquidos e gases são encontrados em CREMASCO (1998), HINES e MADOX (1985), BIRD (1976), entre outros estudiosos.

3.1.3 Equação de Advecção-Difusão

Aplicando-se a equação do balanço de massa a um volume infinitesimal de um líquido incompressível em escoamento permanente, obtém-se a equação (16) em termos da concentração do gás dissolvido, conforme apresentado por Bird et al. citado por BARBOSA (1989).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[D_m \frac{\partial C}{\partial x_i} \right] + Fc \quad (16)$$

em que,

C : concentração do gás dissolvido (soluto) no líquido (solvente) (M/L^3),

V_i : componente da velocidade do líquido segundo a direção xi (L/T^2),

D_m : coeficiente de difusão molecular do gás no líquido (L^2/T),

F_c : somatório de todas as fontes e sumidouros.

Considerando as variações médias no tempo, proporcionadas pelo efeito da turbulência do escoamento, as expressões para a concentração e as velocidades são consideradas como valores médios.

$$\begin{aligned} v_i &= V_i - \bar{V}_i \\ c &= C - \bar{C} \end{aligned} \quad (17)$$

V_i : componente da velocidade do líquido segundo a direção xi (L/T^2),

v_i : flutuação da velocidade segundo a direção xi (L/T^2),

$\bar{V}_i$: velocidade média segundo a direção xi (L/T^2),

C : concentração do soluto dissolvido no líquido (M/L^3),

c : flutuação da concentração relativa ao seu valor médio $\bar{C}$ (M/L^3),

$\bar{C}$: concentração média (M/L^3).

Substituindo as equações (17) na equação (16), tem-se a equação resultante

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{V}_i \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[D_m \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_i} - \overline{v_i c} \right] + \bar{F}_c \quad (18)$$

O termo $\overline{v_i c}$ indica média relativa ao tempo.

A massa pode ser transportada pelo movimento de parcelas finitas de fluido. É possível expressar a velocidade desse transporte em vários termos, entre eles a difusividade turbilhonar, que também pode ser relacionada a um comprimento de mistura.

A taxa de difusão turbulenta é representada por

$$-\overline{v_i c} = D_{Ti} \frac{\partial \overline{C}}{\partial x_j} \quad (19)$$

em que,

D_{Ti} : coeficiente de difusão turbulenta (L^2/T),

$\overline{u_i c}$: taxa de difusão turbulenta, na direção xi ($M/T.L^2$)

Assim, pode-se reescrever a equação de advecção-difusão como:

$$\frac{\partial \overline{C}}{\partial t} + \overline{V_i} \frac{\partial \overline{C}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\varepsilon_i \frac{\partial \overline{C}}{\partial x_i} \right] + \overline{F_c} \quad (20)$$

sendo

$$\varepsilon_i = D_m + D_{Ti} \quad (21)$$

ε_i é o coeficiente de difusão total, correspondendo à soma entre a difusão molecular e a turbulenta.

Considerando uma profundidade h , de um canal ou tanque d'água, define-se concentração média da seguinte maneira:

$$\overline{C} = \frac{1}{h} \int_0^h C.dz \quad (22)$$

Nota-se que a transferência de massa através do fundo, abaixo da camada de escoamento, é nulo. Logo,

$$\varepsilon_z \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (23)$$

Pode-se aplicar a média sobre a profundidade h , considerando a concentração da substância dissolvida constante na direção vertical, e obter a seguinte equação:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{V}_i \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = \bar{\varepsilon}_x \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + \frac{1}{h} \left(\varepsilon_z \frac{\partial C}{\partial z} \right)_{z=h} + \bar{F}_C \quad (24)$$

BENNETT & RATHBUN (1972) argumentam que, por conveniência e tradição, o segundo termo do lado direito da equação é geralmente expresso usando um dos dois coeficientes de transferência de massa, K_L ou K_2 . O coeficiente geralmente utilizado, para o filme líquido, é o coeficiente de transferência de massa, e é possível defini-lo por

$$K_L = \frac{1}{(C_s - \bar{C})} \left(\varepsilon_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \right)_{z=h} \quad (25)$$

Em que C_L é a concentração de oxigênio dissolvido no volume da fase líquida.

O coeficiente de reaeração pode ser expresso em função do coeficiente de transferência de massa, segundo descrito em BENNETT e RATHBUN (1972, p.8)

$$K_2 = \frac{K_L}{H} \quad (26)$$

BARBOSA (1989, p.11) reescreve a equação (25) da seguinte maneira:

$$K_2 = \frac{1}{(C_s - \bar{C})} \frac{1}{h} \left(-\varepsilon_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \right)_{z=0} \quad (27)$$

A equação (24) pode ser reescrita em termos do coeficiente de reaeração, alcançando-se o seguinte resultado:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{V}_i \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = \bar{\varepsilon}_x \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + K_2 \cdot (C_s - \bar{C}) + \bar{F}c \quad (28)$$

Segundo BARBOSA (1989), o termo de difusão longitudinal, por ser pequeno quando comparado ao termo advectivo, é, freqüentemente, desprezado e esse fato simplifica a equação (28), como se pode notar a seguir:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{V}_i \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = K_2 \cdot (C_s - \bar{C}) + \bar{F}c \quad (29)$$

BARBOSA (1989) afirma que o uso da equação (20) para obter uma relação mais completa a fim de descrever o balanço de massa, requer a quantificação do campo de velocidades. Este pode ser conseguido através da solução simultânea das equações, ou por meio da conservação da quantidade de movimento, da continuidade e do estado, nas três dimensões. Há, com certeza, grande dificuldade para obtenção de tais resultados e isso se explica pelo uso de modelos hidrodinâmicos ainda muito sofisticados. O autor diz, ainda, que, devido a diversos fatores, a aplicação de tais modelos fica restrita, e recorre-se, desse modo, a simplificações do campo de velocidades.

3.2 Análise Linear para a Transferência de Massa na Superfície

A transferência de massa pode ser estudada em superfícies móveis (interface ar/água) ou em superfícies imóveis (um sólido). MC. CREADY ET AL. (1986) afirmam que os dois processos são fundamentalmente diferentes, e que a flutuação das velocidades em todas as freqüências é apresentada como tendo um papel importante; isso se reflete nas equações para o coeficiente de transferência de massa.

Nas superfícies móveis, a velocidade normal é dada por $v = \beta(x,y,t).z$ e, para as superfícies imóveis, $v = \beta(x,y,t) z^2$, em que todos os termos são adimensionalizados usando a velocidade de atrito e a viscosidade cinemática.

A expansão de Taylor descreve a velocidade em termos da distância em uma interface, como se percebe abaixo.

$$\begin{aligned} V &= \bar{V}(z) + \alpha(x, y, t) \\ v &= \beta(x, y, t).z \\ w &= \gamma(x, y, t) \end{aligned} \tag{30}$$

Essas equações satisfazem a equação da continuidade.

3.2.1 Simplificação da Equação de Balanço de Massa

É possível escrever uma equação similar a apresentada acima, considerando $S = \nu/D_m$, onde S é o número de Schmidt.

Como já foi descrito, o campo de concentração é praticamente homogêneo na direção do escoamento, e a variação de concentração na direção z (normal a superfície) é maior do que em relação as direções x e y . Sirkar e Hanratty, aos quais CAMPBELL & HANRATTY (1983) fazem menção, argumentam que pode ser usada a equação de balanço de massa da forma simplificada, para escoamentos plenamente desenvolvidos em altos números de Schmidt, conforme se mostra a seguir:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v \frac{\partial C}{\partial z} + w \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{1}{S} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \tag{31}$$

Todas as outras quantidades estão adimensionalizadas usando a velocidade de atrito, a viscosidade cinemática e a diferença de concentração $C_L - C_I$.

A equação deve ser resolvida usando as condições limites $C = 0$ em $z = 0$ e $C = 1$ em grandes z .

Para a interface móvel ar/água, pode-se descrever a equação (31) por duas maneiras: considerando as flutuações da concentração, conhecidas como decomposição de Reynolds $c = C - \bar{C}$ ou desprezando-se a variação de concentração na direção do escoamento e os termos não lineares dentro das quantidades flutuantes (MC. CREADY ET AL (1986)), tem-se

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \beta \cdot z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} = \frac{1}{S} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (32)$$

Assim é obtida, portanto, a equação de balanço de massa, que relata o campo de concentração variando com o tempo $C(x,y,z,t)$ e relaciona-se ao campo de velocidades.

TAMBURRINO (1994) apresenta a adimensionalização das expressões para o coeficiente de transferência de massa. Igualmente ao campo de velocidade e concentração, o coeficiente pode ser expresso como uma composição de uma média temporal e sua parte flutuante, se o fluxo de massa através de uma interface for dada por

$$J = K_L \cdot (C_S - C_L) = D_{A,Z} \cdot \left. \frac{d\bar{C}}{dz} \right|_{z=0} \quad (33)$$

Pode-se escrever

$$K_L = \frac{D_{A,Z}}{(C_S - C_L)} \cdot \left. \frac{d\bar{C}}{dz} \right|_{z=0} \quad (34)$$

Até aqui, considerou-se o coeficiente de transferência de massa tendo dimensão (L / T^{-1}) . Agora, ele será adimensionalizado, como segue:

$$K = \frac{K_L}{u^*} = \frac{D}{\nu} \frac{1}{(C_S - C_L)} \left. \frac{d\bar{C}}{dz} \right|_{z=0} \quad (35)$$

como

$$\frac{d}{dz} \left(\frac{\bar{C}}{(C_s - C_L)} \right) = \frac{d\bar{C}}{dz} \quad (36)$$

então,

$$k = \frac{1}{S} \frac{d\bar{C}}{dz} \Big|_{z=0} \quad (37)$$

TAMBURRINO (1994) afirma que se δ for definido como espessura característica da concentração na camada limite, tem-se C médio próximo ao valor 1, e z próximo a esta espessura, reduzindo a equação (37) a

$$K \approx (S.\delta)^{-1} \quad (38)$$

A flutuação do coeficiente de transferência de massa recebe a mesma análise, obtendo-se:

$$K = \frac{1}{S} \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (39)$$

De acordo com MC. CREADY ET AL (1986), as frequências predominantes são as menores e o coeficiente de transferência de massa depende basicamente do espectro de β na frequência zero.

3.2.2 Análise para Grandes Freqüências

Para a região próxima a superfície $y > \delta_c$, exceto para a região $y < \delta_c$, é valido que

$$\frac{\partial c}{\partial t} \gg \frac{1}{S} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (40)$$

O que implica em

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \beta \cdot z \cdot \frac{d\bar{C}}{dz} \approx 0 \quad (41)$$

Define-se a espessura característica da concentração da camada limite como:

$$\frac{1}{\delta} = \frac{d\bar{C}}{dy} \quad (42)$$

Espera-se que a flutuação da concentração, c possa ser máxima em $y \approx \delta$ e ser igual a zero em $y=0$ e em grandes y . No que diz respeito as equações acima, pode-se escrever:

$$c \approx \beta/\omega \quad (43)$$

Aproximadamente em $y = \delta$, é esperado que o termo que caracteriza o transporte turbulento seja máximo. A magnitude de vc' é dada como:

$$v \cdot c' = \frac{\beta^2 \delta}{w} \quad (44)$$

A difusão molecular passa a ser importante em $y = \delta_c$, afetando o campo de flutuação da concentração.

$$\frac{\partial c}{\partial t} \approx \frac{1}{S} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (45)$$

Essa equação implicará em:

$$\delta_c^2 = \frac{1}{w.S} \quad (46)$$

em $y = \delta_c$

$$c' = \frac{\beta \delta_c}{w} \frac{d\bar{C}}{dy} \quad (47)$$

Infere-se que:

$$\frac{k}{K} \approx \frac{\beta}{\omega} \quad (48)$$

TAMBURRINO (1994) afirma que, se a equação acima for multiplicada pelo seu complexo conjugado, a relação entre o espectro de k e β para grandes frequências é obtida. Assim, tem-se:

$$\frac{S_K(\omega)}{K^2} \approx \frac{S_\beta(\omega)}{\omega^2} \quad (49)$$

Essa equação está de acordo com o proposto por MC. CREADY & HANRATTY (1984 a).

3.2.3 Análise para Baixas Frequências

Para baixas frequências deve-se observar que:

$$\frac{\partial c}{\partial t} \ll \frac{1}{S} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (50)$$

Então, a flutuação da concentração é estimada como segue

$$\frac{1}{S} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \approx v \frac{d\bar{C}}{dz} \quad (51)$$

Das equações (51) e (42) obtém-se uma relação entre as flutuações da velocidade e da concentração, e é dada por

$$c' = \beta \cdot \delta^2 \cdot S \quad (52)$$

Das equações (43) e (48) e (52), tem-se

$$\frac{k}{K} \approx \beta \cdot \delta^2 \cdot S \quad (53)$$

e

$$v \cdot c' = \beta^2 \cdot \delta^3 \cdot S \quad (54)$$

para a flutuação da velocidade em baixas frequências.

Considerando para as diferentes frequências (altas e baixas), pode-se assumir que a equação (44) é válida para $w < w_C$ e que a equação (54) é válida para $w > w_C$, onde w_C é estimado pela relação em que $z = w_C$.

$$\frac{\partial c}{\partial t} \approx \frac{1}{S} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (55)$$

ou que

$$w_C = \frac{1}{\delta^2 \cdot S} \quad (56)$$

Assim, as escalas dos termos para o transporte de Reynolds podem ser representadas como se segue:

$$v.c' = \int_0^{w_C} \delta^3 \cdot S \cdot S_\beta(\omega) d\omega + \int_{\omega_R}^{\infty} \delta \frac{S_\beta(\omega)}{\omega} d\omega \quad (57)$$

Podendo ser reescrito como

$$v.c' = \int_0^1 \delta \cdot S_\beta(\omega) \cdot d \frac{\omega}{\omega_C} + \int_1^{\infty} \delta \frac{S_\beta(\omega)}{(\omega / \omega_C)} d \left(\frac{\omega}{\omega_C} \right) \quad (58)$$

Desde que $z = \delta$, o transporte turbulento é aproximadamente igual ao transporte molecular

$$v.c' \approx \frac{1}{S} \frac{d\bar{C}}{dz} \quad (59)$$

Pelas equações (58) e (59), a relação seguinte para δ é obtida:

$$\delta^2 = S^{-1} \cdot \left[\int_0^1 S_\beta(\omega) \cdot d \frac{\omega}{\omega_c} + \int_1^\infty \frac{S_\beta(\omega)}{(\omega / \omega_c)} d \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right) \right]^{-1} \quad (60)$$

Vassiliadou (1985), citado por MC. CREADY ET AL (1986), apresenta a função de espectro, assumida para ser da seguinte forma:

$$S_\beta(\omega) = \frac{S_\beta(0)}{1 + \left(\frac{\omega \cdot \sigma}{\omega_m} \right)^2} \quad (61)$$

em que ω_m é a frequência média

$$\omega_m = \frac{\int_0^\infty \omega \cdot S_\beta(\omega) \cdot d\omega}{\int_0^\infty S_\beta(\omega) d\omega} \quad (62)$$

e σ é um fator de forma

$$\sigma = \omega_m \pi \frac{S_\beta(0)}{\beta^2} \quad (63)$$

Substituindo a equação (61) em (60) tem-se:

$$\delta \approx S^{-1/2} \cdot S_\beta^{-1/2}(0) \left\{ \frac{\tan^{-1} \left(\frac{\sigma \cdot \omega_c}{\omega_m} \right)}{\left(\frac{\sigma \omega_c}{\omega_m} \right)} + \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{\omega_m}{\sigma \cdot \omega_c} \right)^2 \right\}^{-1/2} \quad (64)$$

É visto que essa escala depende da razão de ω_C e ω_m ,

$$\frac{\sigma.\omega_C}{\omega_m} = \frac{\pi.S_\beta(0).\omega_C}{\overline{\beta^2}} \quad (65)$$

Assumindo que

$$\overline{K} = \frac{1}{\delta.S} \quad (66)$$

Substituindo (66) em (56), tem-se:

$$\omega_C = \overline{K^2} S \quad (67)$$

e substituindo (67) em (65), segue:

$$\frac{\sigma.\omega_C}{\omega_m} = \frac{\pi.S_\beta(0).\overline{K^2}.S}{\overline{\beta^2}} \quad (68)$$

Para grandes $\sigma.\omega_C / \omega_m$, a equação (64) fica simplificada para

$$\delta \approx S^{-1/2} . (\overline{\beta^2})^{-1/4} \quad (69)$$

e das equações (68) e (66), segue:

$$\overline{K} \approx S^{-1/2} (\overline{\beta^2})^{1/4} \quad (70)$$

para grandes $\sigma.\omega_C / \omega_m$.

Pode-se apresentar para pequenos $\sigma.\omega_C / \omega_m$, que K médio depende unicamente de $S_\beta(0)$,

$$\overline{K} \approx S^{-1/2} . S_\beta^{1/2}(0) \quad (71)$$

Para valores intermediários $\sigma.\omega_C / \omega_m$, o coeficiente de transferência de massa dependerá de ambos $\overline{\beta^2}$ e $S_\beta(0)$.

3.3 Definição Matemática dos Processos de Absorção

Adeney e Becker, entre outros citados por CUNHA (1993), propuseram, através de dados experimentais, um modelo matemático geral para descrever o processo de absorção gasosa. Tal modelo sugere que o fluxo de massa por unidade de área nominal é diretamente proporcional ao déficit relativo à saturação do gás no líquido, como se pode notar na equação a seguir:

$$J = \frac{1}{A} \frac{dm}{dt} = K_L . (C_s - C_L) \quad (72)$$

em que:

J : fluxo de massa por unidade de área ($M/L^2.T$),

A : área de interface gás- líquido (L^2),

m : massa de gás dissolvido (M),

t : representa o tempo de processo (t),

K_L : coeficiente de transferência de massa (coeficiente global de transferência gasosa) (L/T),

C_s : concentração de saturação do gás no líquido (M/L^3)

C_L : concentração do gás dissolvido no volume líquido (M/L^3)

Sabendo-se que m representa a massa gasosa absorvida através da interface gás/líquido, V o volume líquido onde a massa se dissolve e contando, ainda, com a fórmula da concentração dada por $m = C_L.V$, pode-se reescrever a equação (72), substituindo m por $C_L.V$.

$$J = \frac{dC_L.V}{dt} = K_L.A.(C_s - C_L) \quad (73)$$

$$J = \frac{dC_L}{dt} = K_L \frac{A}{V}.(C_s - C_L) \quad (74)$$

Geralmente, ao se tratar de processos com interface ar-água, a relação $(A/V)^{-1}$ é igualada à profundidade média do escoamento H , como se nota abaixo.

$$\left(\frac{A}{V}\right)^{-1} = \text{profundidade } h \quad (75)$$

Assim, a equação é escrita da seguinte forma:

$$J = \frac{dC_L}{dt} = \frac{K_L}{H}(C_s - C_L) \quad (76)$$

K_2 é o coeficiente de reaeração, definido em unidade de inverso do tempo nos processos de absorção de oxigênio e depende de três fatores: do volume líquido onde a massa é dissolvida, da área interfacial e do coeficiente K_L .

$$K_2 = \frac{K_L.A}{V} \quad (77)$$

Assim, pode-se escrever:

$$J = \frac{dC_L}{dt} = K_2 (C_s - C_L) \quad (78)$$

A integração definida de C_o a C_L da equação (78) resulta na seguinte função exponencial para a absorção:

$$(C_s - C_L) = (C_s - C_o) \cdot e^{(-K_2 \cdot T)} \quad (79)$$

O processo inverso ao da absorção de qualquer gás é o chamado processo de dessorção. Na dessorção gasosa, a concentração na superfície do líquido (C_s) é, geralmente, zero. Isto simplifica a equação (79) e o coeficiente K_2 é substituído por K_T .

Assim, a equação (79) é representada por:

$$C = C_o \cdot e^{(-K_T \cdot t)} \quad (80)$$

Os coeficientes de absorção K_2 e dessorção K_T dependem das características hidráulicas do corpo d'água, da temperatura do ar e da água, e da velocidade do vento ou de qualquer outro distúrbio existente na superfície.

3.4 Modelos Clássicos

O fenômeno de transferência de massa interfacial em um escoamento turbulento foi quantificado pela primeira vez por Nernst, mencionado por GULLIVER (1991) em 1904. Esta teoria propõe que a transferência de massa ocorra através de filmes estagnados, constantes no tempo, não transportáveis e existindo em cada lado da interface. Lewis & Whitman (1924) descreveram o modelo dos dois filmes, que detalha as características acima mencionadas.

3.4.1 Teoria dos Dois Filmes

Lewis e Whitman (1924) citados em BENNETT e RATHBUN (1972) e COULSON e RICHARDSON (1985), postularam que, na interface entre dois fluidos, a transferência de massa é regida por duas camadas laminares: uma gasosa (na fase gasosa) e outra líquida (na fase líquida). Essas camadas laminares foram chamadas de filmes e a transferência entre esses filmes se dá unicamente, por difusão molecular, processo muito lento se comparado à difusão turbulenta. Conforme este modelo, as zonas de resistência à transferência de massa se concentram nestes dois filmes.

Nos locais não pertencentes aos filmes, as massas líquidas e gasosas são bem misturadas, devido à turbulência. A interface parece não apresentar nenhuma resistência ao transporte de massa. No caso de uma interface O_2 / água, o fluxo de oxigênio é dado por

$$J = k_L \cdot (C_I - C_L) = k_G \cdot (p_G - p_I) \quad (81)$$

em que C_L é a concentração na fase líquida, C_I é a concentração na interface, p_G é pressão parcial no gás, p_I é a pressão parcial na interface k_L e k_G são os coeficientes dos filmes líquido e gasoso.

Condições de equilíbrio são assumidas na interface, assim a pressão p_I e a concentração C_I estão relacionados pela lei de Henry, dada como $p_I = H \cdot C_I$, onde H é a constante de Henry. Os coeficientes dos filmes não dependem da concentração do gás dissolvido no líquido.

BENNETT e RATHBUN (1972) descrevem a dificuldade em medir a concentração e a pressão parcial, o que prejudica, assim, a obtenção dos coeficientes dos filmes individuais. E a equação (81) usualmente é escrita em termos dos coeficientes globais dos filmes gasoso e líquido.

$$J = K_L \cdot (C_S - C_L) = K_G \cdot (p_G - p_S) \quad (82)$$

em que p_s é a pressão parcial correspondente a concentração de saturação, C_s , e K_L e K_G são respectivamente os coeficientes globais do filme líquido e gasoso.

O coeficiente global de transferência de massa pode ser escrito pela seguinte expressão:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_L} + \frac{1}{H.K_g} \quad (83)$$

O gradiente de concentração foi admitido linear em cada camada e o transporte de massa dentro do filme ocorre somente por difusão molecular; pode-se escrever, portanto:

$$J = D_m \frac{(C_s - C_L)}{L_f} \quad (84)$$

em que L_f é a espessura do filme.

Considerando,

$$J = K_L \cdot (C_s - C_L) \quad (85)$$

Então,

$$K_L = J / (C_s - C_L) = D_m / L_f \quad (86)$$

O que implica em:

$$K_L = D_m / L_f \quad (87)$$

em que,

D_m : coeficiente de difusão molecular;

L_f : espessura do filme;

K : Coeficiente global de transferência de massa .

Finalmente, observa-se que as propriedades do soluto e do solvente estão descritas pelo coeficiente de difusão molecular e as condições hidrodinâmicas do escoamento, pela espessura do filme.

3.4.2 Teoria da Penetração

Higbe (1935) citado por COULSON e RICHARDSON (1985), durante a investigação da existência ou não de resistência ao deslocamento de massa na interface no momento da absorção de um gás por um líquido, considera a existência de um filme laminar na superfície desse líquido. Esse pesquisador defende, ainda, que cada elemento fluido da superfície estava exposto ao gás por um determinado tempo médio t_e . Esse é o tempo de vida do filme, que é também o tempo entre a formação do filme sob a superfície e sua reposição pelo novo líquido, vindo do volume do escoamento, onde se processa a transferência de massa.

Todos os elementos da superfície são considerados como possuidores de uma mesma idade e todos sendo substituídos no mesmo tempo t_e .

O gradiente de velocidade no fluido é ignorado e o fluido se movimenta igualmente, inclusive na interface. Durante o tempo de contato, a transferência de massa se dá puramente por difusão molecular e não estacionária.

Dessa forma, a nova avaliação sugerida para o coeficiente de absorção pode ser representada por:

$$K_L = 2 \cdot \sqrt{\frac{D_m}{\pi \cdot t_e}} \quad (88)$$

3.4.3 Teoria da Renovação Superficial

Essa teoria pode ser considerada uma expansão conceitual da teoria da penetração de Higbie (1935).

Danckwerts (1951), citado por COULSON e RICHARDSON (1985), sugeriu que cada elemento da superfície não fosse exposto para o mesmo tempo, considerando uma distribuição aleatória de idades, dada por:

$$\phi(t) = s.e^{-s.t} \quad (89)$$

em que s é a razão média de renovação superficial por unidade total de área da superfície. Ele assume que a probabilidade de qualquer elemento da superfície de se incorporar no meio líquido é independente do tempo de permanência nesta superfície. Assim, Danckwerts calculou a distribuição de idades dos elementos superficiais.

O autor admite que a concentração constante na superfície é igual à de saturação, e a taxa de produção da superfície por unidade total de área (s) independe da idade do elemento em questão.

O coeficiente de transferência de massa para a teoria da Renovação Superficial é dado por:

$$K_L = \sqrt{D_m \cdot s} \quad (90)$$

3.4.4 Modelo da Penetração do Filme

TOOR & MARCHELLO (1958) fizeram uma composição entre a teoria dos Dois Filmes e a teoria da Penetração dos Filmes. A base da teoria consiste em considerar uma zona laminar limitada pela região turbulenta, de espessura L_f , como na teoria dos dois filmes, e localizada ao nível da superfície de um líquido turbulento que se encontra uniforme, e na concentração do soluto C_L . A transferência de massa

ocorre somente por difusão molecular e a idade dos elementos superficiais é assumida para se ter a distribuição, conforme proposto por Danckwerts.

A equação que governa o processo de difusão é a seguinte:

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (91)$$

e as condições limites para essa teoria são:

$$\begin{array}{lll} C=C_L & t=0 & 0 < y < L_f \\ C=C_S & t>0 & y=0 \\ C=C_L & t>0 & y=L_f \end{array} \quad (92)$$

A solução obtida para essa teoria foi dividida para tempos de exposição curtos (teoria da penetração) e longos (teoria do filme), conforme descrito abaixo.

Para tempos curtos:

$$J = \Delta C \sqrt{\frac{D_m}{\pi \cdot t}} \cdot \left[1 + 2 \sum \exp \left\{ \frac{-n^2 \cdot \delta^2}{D_m \cdot t} \right\} \right] \quad (93)$$

Válida para $t \ll (\delta^2/D_m)$.

Para tempos longos:

$$J = \Delta C \frac{D_m}{\delta} \cdot \left[1 + 2 \sum \exp \left\{ -n^2 \pi^2 \frac{D_m \cdot t}{\delta^2} \right\} \right] \quad (94)$$

Válida para $t \gg (\delta^2/D_m)$

3.4.5 Outros Modelos

Kishinevsky (1955), mencionado por BENNETT e RATHBUN (1972), apresentou um modelo baseado na difusão turbulenta. Para líquidos altamente agitados, a difusividade turbulenta ε_y , é muito maior do que a difusividade molecular, mesmo na superfície. Assim, para um processo de absorção totalmente controlado pela difusão turbulenta, tem-se a relação

$$K_L = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\varepsilon_y} \cdot s \quad (95)$$

Em seguida, KISHINEVSKY & SEREBRIANSKY (1956) determinaram, por meio de estudos experimentais em um tanque com água altamente agitada, a taxa de absorção pela água de diferentes gases (hidrogênio, nitrogênio e oxigênio), constatando que eram todos aproximadamente iguais e verificando, ainda, a hipótese da independência de K_L com a difusividade molecular. Contudo, em baixas velocidades, a difusividade molecular passa a influenciar na medida do coeficiente.

FORTESCUE & PEARSON (1967), apresentaram um modelo denominado modelo dos grandes vórtices, fizeram a suposição de que as propriedades médias da transferência de massa podem ser modeladas pela média de uma série de células quadradas ao nível da superfície. As células tocam a superfície do escoamento e são lançadas para baixo do fluxo, com velocidade igual à velocidade média do escoamento na superfície. Cada célula apresenta uma vorticidade dentro dos turbilhões e o campo de velocidade de cada célula é dada por:

$$u_e = A_e \sin \frac{\pi \cdot x}{\Lambda} \cdot \cos \frac{\pi \cdot y}{\Lambda} \quad (96)$$

$$v_e = -A_e \cos \frac{\pi \cdot x}{\Lambda} \cdot \sin \frac{\pi \cdot y}{\Lambda} \quad (97)$$

$$\omega = 0 \quad (98)$$

onde Λ é a dimensão da célula, tomada como seção quadrada e A_e é o valor máximo da velocidade no interior da célula, ou escala de velocidade Λ , usando os parâmetros obtidos das medidas das grandezas cinemáticas características do escoamento turbulento. O modelo dos grandes vórtices fornece, para o coeficiente médio de transferência de massa, a seguinte equação:

$$K_L = 1.46 \cdot \sqrt{\frac{D_m \cdot \overline{u'}}{\Lambda}} \quad (99)$$

onde $\overline{u'}$ médio é a intensidade turbulenta longitudinal e D_m é o coeficiente de difusão molecular.

3.5. Fundamentos de Turbulência

3.5.1 Turbulência

“O predomínio das forças de inércia sobre as de viscosidade rompe a estabilidade do escoamento, dando lugar a um regime complexo de movimento, no qual as grandezas físicas em todos os pontos da massa fluida variam a cada instante. Este fenômeno, denominado turbulência, acarreta um intercâmbio contínuo de matéria em zonas contíguas do escoamento, como foi demonstrado pela difusão do corante na experiência de Reynolds” (FEGHALI, 1974, p.229).

Muitos escoamentos que ocorrem na natureza e têm aplicação na engenharia são turbulentos. Como exemplo pode-se citar: A camada limite na atmosfera terrestre (exceto possíveis condições muito estacionárias); jatos de fluxo acima da troposfera, nuvens de cumulus; as correntes de água sobre a superfície dos oceanos; a fotosfera do sol e as fotosferas de estrelas similares e as nuvens de gases interestelares. O rastro na terra dos ventos solares é, possivelmente, um rastro de turbulência. Muitos

processos de combustão envolvem turbulência e muitas vezes de igual dependência sob isso; o fluxo natural do gás e óleo dentro de linhas de tubos é turbulento. Engenheiros químicos usam turbulência para misturar e homogeneizar misturas de fluidos e para acelerar reações químicas dentro de líquidos ou gases. O fluxo de água dentro de rios e canais é turbulento; o rastro deixado por navios, carros, submarinos, estão dentro dos movimentos turbulentos. O estudo para esclarecer a turbulência é uma atividade interdisciplinar, e a aplicação desse estudo é muito ampla. A exceção está na dinâmica dos fluidos no fluxo laminar onde pequenas dimensões e grande viscosidade são as principais características. O fluxo de óleo lubrificante dentro de um conduto é um típico exemplo.

3.5.2 Caracterização da Turbulência

Taylor e Von Karmàn (1937), citados em HINZE (1959), afirmam que a turbulência é um movimento irregular que geralmente ocorre nos fluidos, líquidos ou gases, quando eles escoam passando por uma superfície sólida ou por outro fluido. RODI (1980) descreve a turbulência como sendo um movimento do fluido altamente randômico, não permanente e tridimensional. Markatos (1986), citado em SOUZA FILHO (1995), somou a esta série de atributos a não-linearidade e ainda qualificou o movimento de rotacional, intermitente, com grande desordem, difuso e dissipativo.

TANNEKES e LUMLEY (1972) listam as seguintes características da turbulência:

Irregularidade: essa característica aparece em todos os escoamentos turbulentos, sendo estimada somente através de métodos estatísticos para a turbulência.

Difusividade: causa rápida mistura e acréscimo na razão de momento, calor e transferência de massa.

Altos números de Reynolds: a turbulência freqüentemente se origina de uma instabilidade do escoamento laminar, quando o número de Reynolds torna-se muito alto.

Flutuações tridimensionais da vorticidade: a turbulência é rotacional e tridimensional.

Dissipação: os escoamentos turbulentos são sempre dissipativos.

Continuum: é um fenômeno contínuo, governado pelas equações da mecânica dos fluidos.

Os trabalhos de Reynolds e Bussinesq descrevem a irregularidade da turbulência a partir de modelos estatísticos. Reynolds foi quem fundou a teoria da turbulência, e usou unicamente a forma mais simples de média em um intervalo de tempo e, ao mesmo tempo, ele indicou a natureza das condições gerais a qual qualquer aplicação da média na fluidodinâmica deve obedecer. De acordo com o refinamento de seu postulado, cinco relações devem ser satisfeita:

$$\overline{f + g} = \overline{f} + \overline{g} \quad (100)$$

$$\overline{a \cdot f} = \overline{a} \cdot \overline{f} \quad \text{se } a = \text{constante} \quad (101)$$

$$\overline{a} = a \quad \text{se } a = \text{constante} \quad (102)$$

$$\frac{\partial \overline{f}}{\partial s} = \overline{\frac{\partial f}{\partial s}} \quad , \text{quando } s \text{ é } x, y, z \text{ ou } t \quad (103)$$

$$\overline{\overline{f g}} = \overline{\overline{f}} \cdot \overline{\overline{g}} \quad (104)$$

Vale ressaltar, que essas relações são conhecidas como as condições de Reynolds. SOUZA FILHO (1995) cita o recente desenvolvimento da abordagem dos sistemas dinâmicos não-lineares, partindo da noção do caos determinístico.

ROMA (1988) descreve o escoamento turbulento como a sobreposição de um escoamento principal, que dá a noção de direção, a um escoamento secundário, que fornece a idéia de não uniformidade e é caracterizado por uma velocidade de perturbação bem menor do que a velocidade média do escoamento principal.

3.5.3 Modelos de Turbulência nas proximidades da Superfície Livre

Hunt (1984), citado por TAMBURRINO (1994), afirma que as características gerais da estrutura turbulenta e a transferência de massa na interface gás/líquido quando os efeitos devido à tensão superficial e da gravidade são relativamente grandes para evitar deformação significativa na superfície livre. Embora os efeitos da superfície livre sob a turbulência sejam similares aos efeitos próximos de uma parede no sentido em que ambos, tanto no caso da superfície livre quanto no caso da parede, o comprimento de escala e intensidade turbulenta se reduzem. Em contrapartida existem algumas diferenças importantes entre os dois casos. Por exemplo, numa superfície sem agitação, a tensão de cisalhamento é zero e a componente da flutuação da velocidade vertical decresce quando se aproxima da superfície livre. Simultaneamente, a flutuação das componentes horizontais da velocidade (V_x e V_y) aumentam, conduzindo a uma distribuição não uniforme da energia turbulenta. Com o atrito muito próximo à superfície, a turbulência produzida é pequena e o transporte turbulento torna-se mais importante. Próxima a uma parede sólida, a produção, devido ao cisalhamento, é importante e a restrição imposta pelas condições da camada laminar limitam a difusão turbulenta.

k - ϵ é um modelo de viscosidade turbulenta (ν_t) aplicada para o escoamento de energia, que é relatado pela viscosidade turbulenta por meio da relação de Kolmogorov-Prandtl, $\nu_t \cong k^{1/2} \cdot L$, onde L é o comprimento de escala integral. O modelo k - ϵ utiliza como escala das flutuações turbulentas de velocidade a raiz quadrada da energia cinética turbulenta e, na equação de transporte da escala de comprimento, faz uso da dissipação turbulenta. Tem-se, para a razão de dissipação da energia turbulenta, a seguinte equação:

$$\epsilon = \frac{k^{3/2}}{L} \quad (105)$$

rearranjando,

$$L = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (106)$$

e substituindo em

$$\nu_t \cong k^{1/2}.L \quad (107)$$

tem-se:

$$\nu_t = \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (108)$$

Segundo SOUZA FILHO (1995), o modelo k- ε é construído a partir de três preceitos: da equação para a viscosidade turbulenta, pelas equações de transporte de energia cinética turbulenta (k) e pela equação de transporte da dissipação turbulenta (ε).

3.5.4 Intensidade Turbulenta

A flutuação turbulenta tem valor médio nulo, e a quantificação de seu valor deve ser feita pelo valor RMS (raiz da média quadrática), que tem as mesmas unidades da grandeza original.

O valor RMS, é uma intensidade de turbulência e representa o grau de oscilação ou flutuação da variável em questão.

A intensidade da flutuação turbulenta é calculada como segue:

$$V_{RMS} = \left(\int_0^T (V - \bar{V})^2 dt \right)^{1/2} \quad (109)$$

em que,

V_{RMS} : é a intensidade turbulenta;

V : valor instantâneo;

$V_{médio}$: valor médio;

T : é o tempo de integração da medida.

3.5.5 Funções de Correlação

O escoamento turbulento pode ser representado por dois movimentos (escoamentos) distintos:

- a) um escoamento bem comportado, responsável pelas características médias (velocidade média do escoamento).
- b) e outro composto por turbilhões de diversos tamanhos, formas e velocidade de rotação (movimento aleatório).

O tamanho dos turbilhões pode ser representado pela escala de turbulência, e o coeficiente de correlação é o que permite avaliar o grau de dependência entre duas variáveis; analisar se existe uma certa associação entre a velocidade em dois pontos distintos é um exercício que exemplifica bem esta questão.

ROMA (1988) afirma que a caracterização de um escoamento turbulento apenas pelo valor médio e pelo valor RMS das flutuações leva à perda de informações importantes, como, por exemplo, o fato de não considerar as diversas frequências existentes e que estão diretamente relacionadas ao tamanho dos turbilhões.

Para descrever a flutuação de uma certa variável (como por exemplo a velocidade) $u(t)$, é necessário conhecer como se comportam os valores da velocidade (u) em diferentes tempos. A partir da formação de um conjunto de dados para $u(t)$ e $u(t+dt)$, pode-se definir a correlação $\overline{u(t).u(t+dt)}$ entre os valores de u em dois diferentes tempos. Essa correlação é chamada de autocorrelação e define-se o

coeficiente de correlação entre a velocidade medida na posição x e a velocidade medida na posição $x + dx$, da seguinte maneira:

$$\rho(dx) = \frac{1}{X} \int_0^x \frac{(V_x - \bar{V}) \cdot (V_{x+dx} - \bar{V})}{V_{RMS}^2} \cdot dx \quad (110)$$

A equação acima mostra que, quando a distância dx entre os pontos de medida tende a zero, o coeficiente de correlação tende ao valor 1. Quando dx aumenta em um campo aleatório, deixa de haver correlação entre as medidas, indicando que os pontos não mais estão no mesmo turbilhão (ROMA 1988, p.24).

Com os dados coletados em um mesmo ponto fixo x , as flutuações da velocidade são coletadas em um tempo t e, posteriormente, em um tempo $t + dt$; define-se, assim, o coeficiente de correlação da seguinte forma:

$$\rho(dt) = \frac{1}{T} \int_0^t \frac{(V_t - \bar{V}) \cdot (V_{t+dt} - \bar{V})}{V_{RMS}^2} \cdot dt \quad (111)$$

O segmento negativo de $\rho(dx)$ ou $\rho(dt)$ está associado a uma correlação negativa que deve existir entre as velocidades em lados opostos de um turbilhão.

Taylor (1935), citado em ROMA (1988), introduziu as escalas de turbulência (macro escala e micro escala), que são calculadas a partir do coeficiente de correlação. A macroescala de turbulência é obtida pela integração da função de correlação:

$$L_m = \int_0^\infty \rho(x, t) dx \quad (112)$$

Essa escala relaciona-se ao tamanho médio dos turbilhões.

3.5.6 Ergodicidade

Na mecânica estatística assume-se que quando o intervalo de tempo torna-se muito grande, a média temporal converge para a média do sistema. Em alguns casos, a hipótese torna-se válida pelo teorema da ergodicidade, assumindo o resultado como exato, já em outros casos o teorema é adaptado como uma hipótese adicional.

ROMA (1988) afirma que como a função de correlação das flutuações turbulentas pode ser assumida como tendendo a zero, quando t tende ao infinito, a teoria de turbulência parte do princípio que, para escoamentos turbulentos, as grandezas médias de qualquer campo fluidodinâmico podem ser determinadas de um registro sobre um intervalo de tempo suficientemente grande.

SCHULZ (1985) afirma que para a maioria dos dados estacionários, os valores médios obtidos tanto pela forma espacial quanto pela forma temporal são iguais. Sendo justificado pelo teorema da ergodicidade de G.D. Birkhoff, que pode ser enunciado assim: Para dados estacionários, as propriedades obtidas através de médias temporais sobre registros individuais são as mesmas para quaisquer registros e são ainda iguais às propriedades obtidas através de médias sobre o conjunto num tempo específico.

Teorema geral: Para que um processo aleatório estacionário seja ergódico é necessário e suficiente que a função de correlação satisfaça a condição:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \rho(t) dt = 0 \quad (113)$$

Slutskyi (1938) citado em MONIN & YAGLOM (1979) foi quem provou primeiramente este teorema, que normalmente é chamado de Lei dos Grandes Números ou teorema da Ergodicidade, para dados estacionários aleatórios.

Em conceitos gerais a ergodicidade considera a existência de uma relação entre a descrição espacial e a descrição temporal de um fenômeno físico. Que está relacionada com a estabilidade probabilística, em que os cálculos estatísticos são equivalentes para os dois sistemas, ou seja, nos sistemas temporal e espacial.

3.6. Tanques com Grades Oscilantes

A influência da turbulência nas proximidades da superfície líquida e a relação com a transferência de massa vêm sendo pesquisadas desde 1955, utilizando-se a técnica de grades oscilantes para produção de turbulência.

Rouse e Dodu, citados por THOMPSON e TURNER (1975), foram os primeiros a utilizar um tanque com grades oscilantes a fim de examinar o movimento entre dois meios de diferentes densidades. As grades geravam a turbulência em uma interface líquido-líquido.

Cromwell (1960), Turner e Kraus (1967) e Turner (1968), entre outros citados por THOMPSON e TURNER (1975), utilizaram grades oscilantes e, em todos esses trabalhos, as taxas de mistura foram interpretadas usando-se medidas das escalas de comprimento e velocidade, baseadas na geometria e frequência da grade oscilante.

THOMPSON e TURNER (1975) sugerem o uso de grades, utilizadas no estudo da estrutura turbulenta, pelo fato de ser um sistema no qual se obtém um maior controle da turbulência e maior confiança na generalização dos resultados. Com base em experimentos de outros pesquisadores, esses autores, usando três formas de grades oscilantes dentro de um tanque, relatam o valor RMS da velocidade turbulenta e a macro escala para alguns parâmetros externos, como a frequência e amplitude.

HOPFINGER e TOLY (1976) afirmam que uma grade oscilante gera uma turbulência horizontal homogênea e que o valor RMS horizontal da velocidade u' , dentro do tanque, pode ser descrito por parâmetros medidos externamente. Desta forma, se as grades movimentam-se em uma amplitude S e oscilam com frequência f , sendo o lado da malha M , tem-se:

$$u' = 0,25.f.S^{1,5}.M^{0,5}.y^{-1} \quad (114)$$

em que y é a distância aproximada do centro do movimento da grade.

BRUMLEY (1984) utilizou um tanque de 0,50 m de lado, cuja profundidade era de 0,40 m com grades cujas barras eram de 13 mm espaçadas de 64mm, operadas pela parte inferior do tanque. Nas medidas de turbulência, usou um anemômetro de filme quente, com o qual foi possível medir as flutuações de velocidade em duas direções, horizontal e vertical na profundidade de 0,4 mm da superfície. A proposta principal era dar uma idéia melhor da superfície hidrodinâmica para, em seguida, conduzir ao desenvolvimento de algum modelo de transferência de gás.

DICKEY ET AL.(1984) realizaram, por meio de digitalização das linhas deixadas em fotografias, medidas simultâneas das flutuações de velocidade nas direções vertical e horizontal, com origem na direção média do comprimento de escala integral. Esses estudiosos desenharam o campo de velocidades na superfície, assumindo a turbulência isotrópica dentro do plano horizontal. Com os resultados de parâmetros turbulentos, caracterizados pela velocidade turbulenta e pelo comprimento de escala integral, concluíram o trabalho, desenvolvendo um coeficiente através de análise dimensional e comparando-o ao coeficiente de transferência de gás.

BRUMLEY e JIRKA (1987) realizaram medidas turbulentas em um tanque de grades oscilantes, com o objetivo de esclarecer a estrutura turbulenta, elucidando os detalhes da transferência mecânica na interface gás/líquido e a existência de variáveis hidrodinâmicas e da difusão na camada limite. As velocidades vertical e horizontal foram medidas usando o anemômetro de filme quente. Os resultados experimentais foram comparados com outras pesquisas.

ROMA (1988) desenvolveu o sensor ótico para estudar a interface ar/água. Trata-se de uma sonda baseada no fenômeno da refração ótica. Em seu trabalho utilizou um tanque com grades oscilantes para obter uma correlação entre os parâmetros turbulentos gerados pela sonda ótica (RMS e macro escala) e o coeficiente de transferência de massa K_L em cada ensaio realizado.

CHU e JIRKA (1991) realizaram experimentos para estudar o mecanismo de transferência de massa na interface ar-água. A turbulência nas proximidades da superfície líquida e a concentração de oxigênio foram medidas em um tanque com

grades oscilantes. Eles afirmam que a grande escala do movimento turbilhonar é dominante dentro do processo de transferência de massa interfacial.

Dentro da região interfacial, o movimento turbulento é fortemente afetado pelo efeito cinético da superfície livre. Desta forma, o transporte turbulento fica limitado, e a difusão molecular acaba tendo igual importância.

DE SILVA e FERNANDO (1994) utilizaram grades oscilantes a fim de estudar certas propriedades da turbulência isotrópica. Os dados obtidos foram usados para avaliar o espectro de frequência Euleriano. As observações experimentais foram comparadas com a formulação teórica, bem como, com experimentos realizados anteriormente.

ORLINS e GULLIVER (2000) utilizaram um tanque com grelhas oscilantes para investigar a relação entre turbulência na superfície livre e o transporte de massa. A técnica utilizada para observar as variações temporais foi a Velocimetria por Processamento de Imagens (PIV). Os autores obtiveram dados de oito sub regiões da superfície da água, e a velocidade, a vorticidade e o divergente bi-dimensional eram calculados como função do espaço e do tempo em cada região.

CHENG e LAW (2001) investigaram a turbulência gerada por uma grelha vertical, usando a técnica da velocimetria por Processamento de Imagens Digitais (DPIV). Em sua análise comparativa, seus resultados concordaram bem com os resultados presentes na literatura.

3.7 Visualização do Escoamento

3.7.1 Definição

Segundo FREYMUTH (1993), a visualização do escoamento é a arte e a ciência de se obter imagens claras de um campo de escoamento físico e a habilidade para capturar um esboço, uma fotografia ou um vídeo, utilizando diversos processos.

A velocidade e a vorticidade são os parâmetros de maior interesse no campo de escoamento e, devido à dificuldade em visualizá-los, torna-se necessário a utilização de traçadores para marcar o escoamento.

A visualização do escoamento explora o campo de escoamento físico global, contrastando com as sondas locais, como o tubo de Pitot e a anemometria.

3.7.2 Resumo da História da Visualização do Escoamento

Esta seção foi extraída do artigo de FREYMUTH (1993) e tem ênfase no método de rastreamento de partículas obtidas por fotografias.

Na pré-história, já apareciam espirais e ondas na arte visual do homem, sendo que as espirais representavam os vórtices. Leonardo da Vinci é geralmente considerado o pai da visualização do escoamento; fez esboços de escoamentos com vórtices ao redor de vários objetos, com considerável realismo e sempre no regime turbulento.

A comunicação por rascunhos descreve, em 1883, a transição para o regime turbulento em tubos por meio de sinais deixados por traços e esboçando vórtices que arrebentam dentro de cano d'água nos séculos 18 e 19 e também dentro do laboratório, todos produzidos por Lugt.

A primeira fotografia da mecânica dos fluidos, com certa relevância para visualização do escoamento, foi a fotografia de um jato d'água que era lançado, tirada por Raleigh em 1879. O tempo de exposição foi obtido por uma faísca elétrica.

A introdução da fotografia na visualização do escoamento se deve especialmente a Mach e Salcher que visualizaram ondas de descarga, fotografando com um tempo de exposição de 0.8×10^{-6} segundos através de faísca elétrica.

A visualização de linhas de fluxo foi obtida fotografando um traço curto, utilizando-se de um grupo de partículas visíveis individualmente e geradas pelo seu movimento durante um curto tempo de exposição foi, primeiramente, adaptado por Marey. As partículas neutras flutuantes têm sido colocadas sob um onda de água, espaçadas para obter melhor visualização das linhas de corrente. Esse método foi aperfeiçoado por Ahlborn em 1902, utilizando Lycopodium lançado sobre a

superfície de um tanque d'água. A iluminação foi obtida por meio de uma cortina de luz na direção do escoamento, proveniente de um flash de magnésio de duração finita. Suas fotos detalham bem o escoamento dos vórtices.

O método do uso de flocos suspensos em líquidos foi visto por Prandtl; este utilizou flocos de mica em um túnel de água em 1904 para visualização dos vórtices. É interessante dizer que a visualização do escoamento na superfície iniciou-se com a observação do fenômeno em uma xícara, e muitos outros investigaram (ex. Riabouchinsky, Hinderks). O método dos flocos vem sendo utilizado ao longo do tempo, especialmente em líquidos (Prandtl e Tietjens 1934, Clayton e Massey 1967, Werle 1973, Merzkchz 1974, Sommerscales 1980 e Emrich 1981). A tradição de visualizar novos fenômenos de escoamento continua com a adição de novas descobertas para a mecânica dos fluidos.

Nos últimos cinquenta anos, muitas técnicas foram desenvolvidas como, por exemplo, a técnica da folha de luz utilizada conjuntamente com a técnica de “streamline”, o recente método ótico e a utilização de flocos.

Reznicek, mencionado em FREYMUTH (1993), cita uma expressiva lista de resultados específicos, que podem ser obtidos pela visualização do escoamento, como segue: campo de velocidade, imagem do escoamento nas proximidades de um corpo, perfis de velocidade, mecanismos de formação de vórtices, suas variedades e propriedades, áreas de escoamento laminar, entre outros.

3.7.3. Técnica de Trilhagem de Partículas

O método dos traçadores está subdividido em: “Streamline” e “Streakline”. Será apresentado aqui somente o primeiro método.

Partículas pequenas, porém visíveis individualmente são lançadas no escoamento. Essas partículas são rastreadas durante um curto e controlado tempo de exposição, com o comprimento do traço proporcional a velocidade.

O método consiste, basicamente, na obtenção de fotografias tiradas com uma câmara fotográfica, na qual é possível conhecer o tempo de exposição do objeto

observado, e a iluminação é obtida através de lâmpada apropriada arranjada ao lado do elemento a ser visualizado. Desta maneira, fica um traço impresso na foto que define o movimento da partícula, com um ponto forte seguido de rabicho.

Segundo AGÜI & JIMÉNEZ (1987), a técnica de trilhagem de partículas é um método simples e muito poderoso de quantificar a visualização de um fluxo, e um dos poucos métodos capazes de prover instantaneamente mapas de magnitudes, tanto de velocidade quanto de vorticidade, sobre extensas áreas. Os autores afirmam que o estudo dos problemas associados à extração de informações quantitativas obtidas experimentalmente com o uso de uma imagem fotográfica é recente. E, provavelmente, esse estudo é uma obrigação pela falta de avaliação da computação digital, de métodos práticos para lidar com grandes quantias de informações geradas por esse método.

Nas formas modernas desse método, os traços são obtidos semeando o fluxo a ser estudado com partículas, que são aderidas pelo movimento do fluido. Medindo o comprimento dos traços e conhecendo-se o período de tempo, torna-se possível o estudo de um ou outro traço deixado pelas partículas nas diferentes fotografias. O resultando obtido são velocidades associadas a algumas posições da área estudada.

“A interpolação, tanto para uma grade regular como para uma série de contornos de linhas, requer o processamento dos dados por digitalização das figuras, que pode ser manual, como fizeram Imaichi e Ohmi (1983); Utami e Ueno (1984), (1987) ou, automaticamente, como fizeram Dimotakis, Debussy e Koochesfahani (1981); Jian e Schmitt (1982), processando em um computador” (AGÜI e JIMÉNEZ (1987)).

AGÜI e JIMÉNEZ (1987) afirmam que os passos citados no parágrafo anterior introduzem erros no final da estimação das velocidades. E que alguns dos autores citados acima têm considerável atenção para com os erros introduzidos por essa técnica de visualização, porém, são poucos que têm considerado o erro cometido durante o processo de interpolação. Considerando tal fato, os autores testaram vários métodos de interpolação e concluíram que os melhores resultados são obtidos usando o método de Kriging.

A influência da concentração de partículas sob um maior poder de resolução; é preciso dizer, ainda, que uma validação do método pela correlação com outras medidas simultâneas e por outros meios estabelecidos é, geralmente, ausente.

A descrição do experimento dentro daquele trabalho foi conduzido objetivando estimar os erros introduzidos pelo método de trilhagem de partículas, dentro de medidas da velocidade bidimensional e da estimação de quantificação de alguns vórtices.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para cumprir o objetivo do presente trabalho, que é encontrar uma relação entre o coeficiente de reaeração e os parâmetros turbulentos obtidos por dois métodos de medida: a sonda ótica (sinal elétrico proporcional à deformação da superfície, em um ponto, em função do tempo) e o método fotográfico (campo de velocidade), foi utilizado um tanque com grades oscilantes, construído no SHS-EESC, para a produção de turbulência.

4.1. MATERIAIS

A bancada de ensaios experimentais foi composta pelos seguintes instrumentos e equipamentos:

- A) equipamento para produção de turbulência constituído por um tanque com grades oscilantes, já existente no Laboratório de Fenômenos dos Transportes, composto de um tanque confeccionado em chapa de aço, três grades de alumínio de diferentes malhas e sistema mecânico de oscilação da grade;
- B) equipamento para deaeração da água composto de uma bomba e tubulação para recirculação da água do tanque através de um orifício;
- C) equipamento de controle da temperatura ambiente, constituído por um aparelho de ar condicionado de 12000 Btu;
- D) equipamento de aquisição e armazenamento de dado composto de microcomputador e datalogger de oito canais diferenciais;

- E) equipamento fotográfico composto de máquina fotográfica, dois flash e um tripé para o suporte da máquina;
- F) instrumento de medida de concentração de Oxigênio Dissolvido da água do tipo eletroquímico;
- G) instrumento ótico de medida da deformação da superfície da água com base no fenômeno da refração.

4.1.1. Equipamento de geração da Turbulência

O equipamento foi montado com base nas diversas experiências encontradas na literatura, e consiste em um tanque contendo água e apresentando superfície livre. A água é agitada através de grades oscilantes, acionadas por um motor elétrico através de um sistema biela-manivela, que movimenta um eixo instalado na parte inferior do tanque. O movimento oscilatório da grade gera movimento turbulento nessa região, que é transmitida até a superfície.

A utilização das grades oscilantes se justifica pelo fato desta forma de produção de turbulência ser muito citada na literatura por apresentar turbulência com características bastante reproduzíveis. Em planos paralelos horizontais a turbulência é homogênea, havendo decaimento apenas na direção vertical.

O tanque, construído em chapas de aço, tem formato prismático com base quadrada de $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ e altura de 0,70 m. No fundo foram instalados: o sistema biela-manivela de raio variável, responsável por promover a oscilação vertical das grades e o dispositivo de esgotamento da água ao fim de cada ensaio.

Como já foi mencionado, para estabelecer o nível de turbulência em cada ensaio serão empregadas grades oscilantes. As grades são quadradas, constituídas por barras de seção medindo $10 \times 10 \text{ mm}^2$, montadas segundo malhas quadradas com espaçamento entre barras de 6,45 cm, 3,9 cm e 2,65 cm. As medidas externas das grades são de $46,0 \times 46,0 \text{ cm}^2$.

As grades estão conectadas a um eixo de aço inóx polido, que desliza axialmente em um mancal de bronze, movimentado pelo mecanismo biela-manivela. Esse sistema para movimentação das grades é acionado por um motor de corrente contínua, que transfere sua potência através de um sistema de transmissão com

correias e polias. O motor, de potência nominal igual a 1,0 HP, bem como todo o sistema foi montado na base do tanque de reaeração.

Para obter a variação da frequência de oscilação, o motor é alimentado por fonte com regulação eletrônica da tensão da corrente contínua. A velocidade de rotação da grade é medida por um dispositivo contador eletrônico, que mede o número de revoluções da polia no intervalo de 1(um) minuto, fornecendo portanto a rotação em Rotações por Minuto, rpm.

4.1.2. Equipamento utilizado para a Desoxigenação da Água

A desoxigenação da água foi feita através da evaporação à temperatura ambiente, provocada por abaixamento da pressão em uma placa de orifício. Para conseguir o efeito uma placa de orifício foi conectada a um circuito fechado de tubos de PVC, alimentado por uma bomba hidráulica Mark, modelo XD2 com potência de 1 HP. A circulação da água do tanque através desse circuito hidráulica provoca a cavitação imediatamente a jusante da placa de orifício causando o aparecimento de bolhas de vapor d'água, que devido a diferença de concentração de oxigênio capturam o oxigênio dissolvido na água liberando-o para a atmosfera.

4.1.3. Instrumentação de Medida

4.1.3.1. Sensor ótico para medida da deformação da superfície líquida

O sensor ótico para estudar a turbulência na superfície de um líquido foi proposto por ROMA (1988), e seu funcionamento é baseado na refração ótica da luz. Com o movimento da interface ar/água, a sonda capta a variação da luz causada pela refração e produz um sinal elétrico proporcional à deformação.

O sensor ótico é constituído por duas partes rigidamente conectadas: uma delas é o emissor de luz, composto por uma lâmpada incandescente e refletor parabólico, localizado no ar, alimentado por voltagem variável (0 a 6 Volts) de corrente contínua, e a outra parte é o receptor de luz constituído por um foto-diodo, ou um foto-transistor, submerso na água e que funciona com um foto detetor. As

deformações da superfície da água e o fenômeno da refração da luz ao atravessar a superfície líquida provocam um sinal elétrico que passa a conter informações relativas a deformação da superfície d'água imposta pela ascensão do sistema de turbilhões.

O sinal elétrico produzido pelo foto-receptor é digitalizado e coletado por um Datalogger.

4.1.3.2. Aparelho Medidor de Oxigênio Dissolvido

As medidas de concentração de Oxigênio Dissolvido (OD) no meio líquido para cada experimento foram realizadas por processo eletroquímico, utilizando-se um oxímetro MWM, modelo OXI 127, de procedência alemã. A calibração do aparelho foi conferida por comparação com a concentração de Oxigênio Dissolvido obtida por análise química pelo método de Winkler.

O oxímetro fornece leitura digital em porcentagem (%) e/ou concentração de O.D. em miligramas por litro (mg/l). Colocando o sensor diretamente dentro d'água, ele realiza medidas instantâneas de concentração de oxigênio dissolvido, permitindo um monitoramento contínuo desse dado.

4.1.3.3. Datalogger

O Datalogger é um aparelho para aquisição de dados e foi utilizado na coleta e armazenamento dos dados da sonda ótica. O Datalogger modelo CR10, fabricado pela Campbell Scientific, Inc (1993), é basicamente constituído de uma CPU (Unidade Central de Processamento), de uma memória de armazenamento de dados, e de canais de entrada e saída analógicos e digitais.

A principal vantagem de se utilizar um Datalogger, reside na possibilidade de sua programação que permite seu funcionamento sem a necessidade de estar conectado a um computador. A programação permite estipular diversas funções durante a coleta de dados, podendo ser citadas: tipo de medida, o número de medidas a serem registradas, o intervalo de tempo entre cada uma delas, cálculo de médias, desvio padrão e outras.

Os dados coletados ficam armazenados no Datalogger e sua recuperação é feita ligando-o a um micro computador por meio de um cabo serial. Os dados recuperados do Datalogger podem ser lidos por uma planilha eletrônica para seu tratamento e análise.

4.1.3.4. Psicrômetro

Na medida da umidade atmosférica da sala onde foram conduzidos os ensaios, utilizou-se um psicrômetro de aspiração. Sua composição é basicamente um tubo de PVC de 4", por onde o ar, devido a um ventilador elétrico instalado em uma das extremidades do tubo, é forçado a passar.

No tubo de PVC foram montados dois termômetros graduados para medir as temperaturas do bulbo úmido e do bulbo seco. Os termômetros foram colocados no tubo da seguinte maneira: um bulbo permaneceu seco (em contato com o ar) e o outro esteve envolvido por uma mecha de algodão umedecida constantemente com água.

A umidade relativa do ar foi obtida realizando-se medidas simultâneas de temperatura, tanto no termômetro de bulbo úmido, quanto no termômetro de bulbo seco. Desta forma, obtidos os valores dessas temperaturas e, de posse de uma carta psicrométrica, foi possível obter a umidade relativa do ar.

4.1.3.5. Instrumentos utilizados na obtenção de fotografias

Uma câmera marca PENTAX, modelo K1000, foi utilizada na obtenção das fotografias tiradas da superfície livre da água. Essa câmera permite o ajuste manual da abertura da velocidade do obturador para as condições de luz ambiente. Após alguns ensaios preliminares, optou-se por um filme de 35 mm, ISO 400/27°. A velocidade do obturador foi medida através de um calibrador especialmente construído para esse fim.

A superfície livre continha partículas utilizadas como traçadores e estas foram iluminadas por uma lâmpada halógena de 600 W, em um "spot" fixado ao lado do tanque.

Nas laterais do tanque, foram ajustados dois flashes; cujas posições foram definidas de forma a impedir que seus reflexos na superfície da água, atingissem a objetiva da câmera.

4.2. METODOLOGIA

Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Fenômeno dos Transportes do Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS), mais especificamente, em uma sala com dimensões de aproximadamente 12m² e altura de 2,70 m, climatizada por meio de um aparelho de ar condicionado, que foi utilizado para que a temperatura não sofresse variações maiores que 1^o C, obtendo-se, assim, um bom controle da temperatura do ambiente.

Os procedimentos seguidos em cada ensaio foram:

- A) inicialmente procedia-se à desoxigenação da água, realizada a partir do sistema de recirculação d'água através de uma bomba e por meio da introdução de gás nitrogênio na tubulação de entrada do tanque.
- B) em seguida, iniciava-se a reaeração do meio líquido através da produção de turbulência pelas grades oscilantes.
- C) durante o procedimento de reaeração, realizaram-se as medidas de: concentração de O.D., coleta de dados provenientes da sonda ótica e, ao final de cada ensaio de reaeração, procedeu-se à obtenção dos dados para o método fotográfico de trilhagem de partículas.

4.2.1. A Deaeração e a Reoxigenação da Água

O processo de deaeração ou desoxigenação do meio líquido, como se sabe, consiste em diminuir a concentração de oxigênio dissolvido presente na água, para possibilitar a realização dos experimentos de reoxigenação.

A deaeração da água seguiu o método proposto por Maxwell e Holley citados em MELLO (1996). Este modelo consiste em gerar um escoamento forçado, através

de uma placa de orifício, criando uma região de alta velocidade e produzindo, portanto, uma região de baixa pressão, que acaba causando a cavitação.

Este processo físico é obtido em um sistema de canalização em circuito fechado, com uma bomba de recirculação e uma placa de orifício calculada para produzir baixa pressão no interior do tubo, próximo à sucção da bomba. As bolhas de vapor são formadas ao se atingir a pressão de vapor e como não apresentam oxigênio em seu interior provocam a migração do oxigênio dissolvido no meio líquido para as bolhas devido à diferença de pressão parcial ou de concentração (Lei de Henry). Esse efeito foi reforçado pela introdução de gás nitrogênio na tubulação de recirculação. A diferença de pressão parcial de oxigênio entre as bolhas de nitrogênio e a água, gera a migração do oxigênio para as bolhas. Assim, o oxigênio presente nas bolhas escapa para a atmosfera através da superfície livre.

A água utilizada nos ensaios (137,5 litros por ensaio) foi coletada da rede pública do Campus, proveniente de um poço profundo que apresentava a taxa de Oxigênio Dissolvido em um nível próximo ou igual ao de saturação.

O nível de água no tanque foi estabelecido conforme duas condições observadas em ensaios preliminares: o valor mínimo de duas vezes a largura da malha da grade utilizada, e o melhor nível para a obtenção das fotografias, observando uma melhor dimensão das fotos e do ajuste do foco. Esse valor foi mantido em aproximadamente 0,55 m (metros), desde a base do tanque até a superfície livre. A distância entre a posição média de oscilação da grade até a superfície foi de 0,455 m (metro).

O término da desoxigenação é estabelecido de acordo com Boyle et al., citado em COSTA (1992); que recomenda como concentração mínima de O.D., um valor próximo a 20% da concentração de saturação, e permite, assim, que o período de desoxigenação não se estenda por muito tempo. Considera-se também que os dados do início do teste menores que 10 ou 30 % da concentração de saturação teriam pouco efeito sobre a estimativa de C_s e K_2 .

O teor de Oxigênio Dissolvido para o início do processo de reaeração ficou na faixa de 2 a 2,5 mg/l.

Após completar a deaeração da água, dá-se início aos procedimentos de reoxigenação:

- a) a bomba para recirculação é desligada;
- b) o motor que aciona o sistema biela-manivela e as grades são acionados;
- c) através de regulação eletrônica obtém-se a frequência de oscilação da grade;
- d) a contagem da frequência de oscilação da grade é realizada com um dispositivo contador digital.

Estabelecida a frequência, inicia-se o processo de reoxigenação da água, sendo o O.D. medido durante as três primeiras horas a cada 3 (três) minutos e, em seguida, até o final do ensaio de reoxigenação, a cada 5 (cinco) minutos.

Os dados coletados são analisados plotando os valores em um gráfico de concentração de Oxigênio Dissolvido em função do tempo, para a determinação do coeficiente de reaeração.

4.2.2. Método para Determinação do Parâmetro K_2

O parâmetro K_2 é determinado através da aplicação de um modelo matemático aos dados de reaeração obtidos experimentalmente em função do tempo. Como o modelo aproxima perfeitamente a curva experimental através do ajuste do parâmetro K_2 este método oferece excelente aproximação do valor de K_2 .

Os valores de concentração de Oxigênio Dissolvido foram plotados em função do tempo fornecendo uma curva do tipo exponencial; como o comportamento dos diversos gráficos é similar para todos os ensaios, a apresentação de um deles, como exemplo, é suficiente para ilustrar o método utilizado. Assim, a **FIGURA 3** representa a curva de reoxigenação do ensaio **egl220**. No **ANEXO 1** encontram-se as curvas de todos os ensaios.

FIGURA 3: Gráfico de concentração de O. D. em função do tempo

O modelo utilizado para avaliação do coeficiente de reaeração é representado pela equação (115).

$$C = C_S - (C_S - C_0).exp(-K_2.t) \quad (115)$$

em que:

C_S : é a concentração de saturação de Oxigênio Dissolvido do meio líquido;

C_0 : concentração inicial de Oxigênio Dissolvido na água;

C : concentração de Oxigênio Dissolvido na água em um certo tempo;

K_2 : coeficiente de reaeração para o oxigênio;

t : tempo em que o dado é coletado.

Para a análise dos dados dos ensaios de reoxigenação do meio líquido adotou-se o método exponencial. Neste método, os valores de O.D. são usados de forma

direta, e a equação (115) é utilizada no ajuste dos dados experimentais através do método dos mínimos quadrados não linear.

Observou-se como vantagem principal deste método, o fato de permitir com o auxílio de recursos computacionais, estimar os parâmetros K_2 , C_S e C_0 deixando-os livres para a verificação da adequabilidade do modelo utilizado.

A opção pelo método exponencial é justificada, pois é recomendada por BOYLE (1974) e segundo BROWN & BAILLOD (1982), os erros observados nos valores de concentração próximos da saturação tendem a ser menores do que aqueles observados na fase inicial do experimento, onde a taxa de transferência de oxigênio é alta.

4.2.3. Método para obtenção dos Dados e Medida dos Parâmetros Turbulentos (Sonda Ótica)

A tomada de dados pelo método da sonda ótica foi realizada simultaneamente ao processo de reoxigenação da água. A série numérica coletada e armazenada no Datalogger é uma representação digital do sinal elétrico produzido pela sonda. Como trata-se de um sinal representando a turbulência em um ponto na superfície da água em função do tempo, obtém-se um gráfico característico de um sinal aleatório, com muita semelhança entre os diversos ensaios. Assim nesta seção será apresentado apenas o gráfico de um ensaio a título de exemplo.

Para ilustrar a forma do sinal coletado, foi escolhido o ensaio **egm210**. O gráfico mostrado na **FIGURA 4** representa o sinal de tensão elétrica em função do tempo.

O sensor ótico foi mantido durante todos os ensaios em um dos cantos internos do tanque, objetivando manter um mesmo padrão de medida em todos os ensaios.

Um osciloscópio conectado na entrada do Datalogger, foi utilizado para visualizar qualitativamente o sinal proveniente do sensor. Ele mostra, em tempo real, as intensidades do sinal em função do tempo.

FIGURA 4: Dados de tensão amplificados

Os dados adquiridos pela sonda ótica foram tratados em planilha eletrônica, para calcular as características turbulentas do sinal. Permitindo, assim, o cálculo do valor RMS da tensão, da função de autocorrelação e do valor da macro escala de turbulência, obtida por integração da função de autocorrelação.

Programou-se os cálculos do valor RMS, da função de autocorrelação, da função de autocovariância e da FFT em uma planilha eletrônica, utilizando os 4096 pontos que foram obtidos em cada ensaio. Todos os valores calculados estão apresentados no capítulo 5, **Resultados e Discussões**.

4.2.4. Técnica Fotográfica e a Metodologia na Obtenção das Fotografias (Método Fotográfico)

A técnica fotográfica aqui utilizada inclui uma modificação importante no método de trilhagem de partículas, com melhora significativa na qualidade da obtenção da derivada das componentes da velocidade. A principal modificação consiste na introdução de um segundo disparo de flash na metade do intervalo de tempo de exposição, obtendo-se uma imagem da partícula que mostra sua trajetória

durante a exposição e dois pontos mais brilhantes, um indicando o início do movimento e o outro um ponto no meio da trajetória.

Na obtenção das trajetórias são usadas partículas de granulometria fina, com densidade inferior a da água. É importante lembrar que a iluminação, aliada aos disparos de flash, permite definir perfeitamente a trajetória e a direção do movimento das partículas.

O aparato para obtenção das fotografias era montado imediatamente após o término do processo de reaeração da água. Esse procedimento foi adotado para evitar que o pó utilizado como traçador atrapalhasse o fenômeno da reaeração. Foram evitados, assim, erros nas medidas da concentração de O.D.

Nos experimentos, a montagem do aparato para obtenção das fotos foi baseada em um tripé que mantinha a câmera a uma distância aproximada de 20 cm da superfície da água, tomando o cuidado de manter o filme da máquina paralelo à superfície livre, evitando erros nas medidas dos traços.

FIGURA 5: Esquema mostrando o aparato utilizado para obtenção das fotografias.

As fotos foram tomadas com velocidade de exposição de $\frac{1}{4}$ de segundo (250 ms), com o primeiro disparo de flash na abertura do diafragma e o segundo disparo após um tempo de 130 ms.

Para obter o tempo exato de exposição em cada experimento foi construído um dispositivo para calibração da máquina fotográfica a partir de um fotodiodo que acionava um contador de milissegundos enquanto o obturador estava aberto. Diversas medidas do tempo de exposição de $\frac{1}{4}$ de segundo permitiram definir o tempo de abertura do obturador em 270ms (milissegundos).

Para emitir o segundo disparo de flash foi também construído um dispositivo de disparo com retardo de tempo controlado. O dispositivo foi montado juntamente com o calibrador de velocidade do obturador, e o tempo de retardo pode ser ajustado com auxílio do contador de milissegundos. O retardo foi acertado para acionar o segundo flash 130ms (milissegundo) após receber o sinal elétrico proveniente do disparo do primeiro flash. Assim o intervalo de tempo entre o segundo flash e o final da trajetória ficou definido em 140ms. Esses tempos foram utilizados no cálculo das componentes da velocidade nas direções x e y.

A iluminação permanente, responsável pela definição da trajetória do traçador sobre o filme, foi obtida por meio de uma lâmpada de iluminação fotográfica convenientemente ajustada ao lado do tanque.

Convém lembrar que a trajetória de um ponto traçador, observada nas fotografias, é mostrada como uma linha com dois pontos mais brilhantes, devido à incidência dos flashes, como ilustrado no desenho da figura **FIGURA 6**.

A direção do movimento das partículas é definida pelos pontos fortes deixados pela emissão da luz dos flashes, que indica o ponto de início do movimento.

FIGURA 6: Ilustração da trajetória obtida com o método fotográfico

4.2.5. Digitalização e Interpolação

As figuras foram ampliadas e digitalizadas para calcular o campo de vetores na superfície livre.

As fotos, após devidamente processadas por um “scanner”, foram transportadas para um software gráfico onde foram digitalizadas para a obtenção do comprimento dos traços. As fotografias tiradas nos ensaios estão no **ANEXO 2** e um exemplo pode ser observado na **FIGURA 7**.

A digitalização foi conduzida manualmente, usando diretamente a tela do computador. Os dados obtidos ficam distribuídos aleatoriamente na foto.

Para favorecer o processamento, é necessário que os dados fiquem espaçados igualmente tanto ao longo do eixo transversal quanto no eixo longitudinal. A interpolação foi conduzida através de um Software que ajustava valores da velocidade para os nós de uma grade previamente estabelecida.

Para a interpolação dos dados, existem tipos de métodos de interpolação, classificados em métodos estatísticos e não estatísticos.

Os métodos não estatísticos utilizam-se de interpolação comum por meio de polinômios. Entre os métodos estatísticos destaca-se a técnica de interpolação conhecida como método de Kriging que é a única que mantém os parâmetros estatísticos dos dados originais e responde bem nas regiões com baixa densidade de informação.

4.2.6. Campo de Velocidade

Podemos analisar o movimento de uma partícula pelo conhecimento do vetor posição (R) da partícula em função do tempo; para isso, devemos imaginar um sistema de coordenadas cartesianas xyz e um ponto P no sistema.

FIGURA 7: Fotografia da superfície livre.

FIGURA 8: O movimento de uma partícula no campo de escoamento

$$\mathbf{R} = \mathbf{r}(t) = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k} \quad (116)$$

que pode ser representada pelas suas componentes:

$$X = x(t); \quad Y = y(t); \quad Z = z(t) \quad (117)$$

Consideremos uma partícula movendo-se num campo de velocidades. No instante t , a partícula está na posição x, y, z e tem uma velocidade correspondente à velocidade naquele ponto no espaço, em t .

$$\mathbf{V}_p|_t = \mathbf{V}(x, y, z, t) \quad (118)$$

Em $t + dt$, a partícula moveu-se para uma nova posição, com as coordenadas $x + dx, y + dy, z + dz$, e a velocidade pode ser dada por:

$$\vec{V}_t = \frac{\vec{R}(t + dt) - \vec{R}(t)}{dt} \quad (119)$$

ou, calculando-se as componentes:

$$V_{x_t} = dx/dt, \quad V_{y_t} = dy/dt \quad e \quad V_{z_t} = dz/dt \quad (120)$$

As velocidades podem ser calculadas da mesma forma para o instante $t + dt$.

A diferença entre as velocidades nos instantes $t + dt$ e t correspondem à variação da velocidade entre dois instantes distintos. Se forem conhecidas as coordenadas espaciais do vetor posição no sistema cartesiano para os dois instantes, torna-se possível conhecer as diferenciais da velocidade em relação ao espaço para as três dimensões, sendo elas, portanto: $\partial V/\partial x$, $\partial V/\partial y$, $\partial V/\partial z$.

4.2.7. A equação da Continuidade

Para o caso particular de um fluido incompressível, ou seja, ρ constante, a massa específica não é função das coordenadas espaciais nem do tempo sendo, assim, a equação da continuidade simplificada para:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (121)$$

Então, o campo de velocidade deve satisfazer a $\nabla \cdot V = 0$.

Das fotos obtém-se o comprimento dos traços, deixados pelas partículas, através de digitalização e, conhecendo-se o tempo de exposição de cada experimento, pode-se calcular a velocidade nos pontos de início da trajetória marcadas na fotografia. Realizando-se as digitalizações de forma a obter as componentes x e y da distância percorrida pelo ponto, é possível determinar as velocidades horizontais V_x e V_y . Pela digitalização da segunda parte da trajetória obtém-se novos valores da velocidade, através de suas coordenadas, para um ponto deslocado do ponto inicial de uma distância definida pelo tempo de exposição dt (entre o primeiro e o segundo disparo de flash). Tendo obtido dois valores da velocidade defasados de uma distância conhecida pode-se avaliar com razoável precisão a derivada de cada componente obtida. Pelo uso da equação da continuidade obtém-se a derivada da componente vertical, $\partial w/\partial z$, utilizando-se a equação 122, obtendo-se desta forma o gradiente da componente vertical da velocidade.

$$\partial w / \partial z = -(\partial u / \partial x + \partial v / \partial y) \quad (122)$$

A planilha montada para a determinação das velocidades horizontais e do gradiente da componente vertical da velocidade pode ser encontrada no anexo xx.

A importância dessa componente consiste no fato de que a literatura cita que entre as variáveis cinemáticas que afetam o fenômeno da transferência de massa através da superfície livre o gradiente da componente vertical da velocidade é a mais importante.

4.2.8. Obtenção dos Parâmetros através da Técnica Fotográfica

O campo de velocidade obtido com a interpolação pelo método de Kriging, no software utilizado é apresentado na forma de malhas, onde cada nó apresenta o valor da velocidade (horizontal ou o gradiente de velocidade vertical) em um ponto, e que pode ser extraído através de uma janela do software. Os dados nas malhas ficam espaçados igualmente em ambas as direções, nos eixos transversais e longitudinais.

Adotou-se quatro linhas por fotografia e os valores foram obtidos na direção x, e os dados conseguidos foram copiados manualmente para uma planilha eletrônica.

Os dados das linhas retirados das fotos são utilizados na obtenção do valor RMS e dos coeficientes de autocorrelação e autocovariância espaciais.

Aplicando-se o algoritmo FFT na função de autocovariância obtém-se o espectro, que para as fotografias é uma função espacial. Assim, obtiveram-se os espectros em cada ensaio, plotados em um gráfico log-log.

Nos catorze ensaios foram obtidos os espectros da velocidade vertical na superfície livre. Os valores plotados em gráfico log-log, são comparados de forma qualitativa com os obtidos nos ensaios da sonda ótica.

Nos ensaios da sonda ótica seguiu-se a mesma metodologia aqui apresentada para se obter os espectros de frequência.

4.2.9. Umidade Relativa

A umidade relativa do ar foi monitorada com um psicrômetro localizado nas proximidades do tanque d'água.

As medidas no bulbo úmido e no bulbo seco eram realizadas a cada 30 minutos. Optou-se por calcular a média aritmética das temperaturas e através de carta psicrométrica obtinha-se a umidade relativa em porcentagem.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Devido à quantidade de dados obtidos, a apresentação dos resultados será dividida da seguinte maneira:

- A) coeficiente de Reaeração, K_2 ;
- B) resultados obtidos por meio do Método Fotográfico, sendo este item dividido em: Velocidade Horizontal, Gradiente de Velocidade na direção z (determinação dos parâmetros RMS, Função de Autocorrelação e Espectro);
- C) resultados da Sonda Ótica (Sinal, RMS, Função de autocorrelação, Macro escala e Espectro de Frequência);
- D) comparação entre a Função de autocorrelação da sonda ótica e do método fotográfico;
- E) comparação entre o Espectro de frequência da sonda ótica com o Espectro do método fotográfico;
- F) relação entre K_2 e RMS do método ótico;
- G) relação entre K_2 e RMS do método fotográfico.

5.1. Coeficiente de Reaeração K_2

A determinação de K_2 para cada ensaio segue o item 4.2.2, apresentado no **capítulo 4**.

Na **TABELA 1**, encontram-se os resultados do coeficiente de reaeração K_2 , medido na temperatura do experimento, bem como, o valor corrigido para a temperatura de 25°C. As condições experimentais de cada ensaio também são apresentadas nesta tabela (temperatura, umidade relativa do ar e outros).

TABELA 1: Coeficiente de reaeração K_2 , medido na temperatura do experimento e a 25°C. Coeficiente de transferência de massa K_L e as condições experimentais de cada ensaio (temperaturas e umidade relativa do ar).

ENSAIO DA GRADE FINA (EGF)							
Ensaio da Grade de abertura 26,5 mm e espessura 10mm							
EXP.	N	Coeficiente Reaeração	Coeficiente Reaeração	coef. Transf. de Massa	Temperatura Ambiente	Temperat. Água	UR
n°	Rpm	K_2, T (h-1)	$K_2, 25$ (h-1)	$K_L, 25$ (m/s)	Graus Celsius	Graus Celsius	%
	98	0.0679	0.0708	1.07970E-05	23.2	24.5	51.8
egf120	120	0.1069	0.1113	1.69733E-05	23.3	25.4	44.5
egf140	138	0.1022	0.1074	1.63785E-05	22.9	25.6	44
egf160	158	0.1227	0.1308	1.99470E-05	22.3	24.6	44.4
egf180	180	0.2598	0.2712	4.13580E-05	23.2	21.9	73.1
	180	0.2784	0.2919	4.45148E-05	23	24.9	57.6
egf200	200	0.2863	0.2939	4.48198E-05	23.9	26.6	51.8

ENSAIO DA GRADE MÉDIA (EGM)							
Ensaio da Grade de abertura 39,0 mm e espessura 10mm							
egm140	138	0.0808	0.0859	1.30998E-05	22.4	24.5	50
egm160	158	0.0921	0.0982	1.49755E-05	22.3	24.3	44.9
	178	0.0874	0.0914	1.39385E-05	23.1	25.2	sem
egm180	180	0.0889	0.0948	1.44570E-05	22.3	24.5	45.8
	198	0.0996	0.1049	1.59973E-05	22.8	25.4	sem
egm210	208	0.1429	0.1495	2.27988E-05	23.1	25	58.5
egm240	238	0.1049	0.1095	1.66988E-05	23.2	25.7	45.5

ENSAIO DA GRADE LARGA (EGL)							
Ensaio da Grade de abertura 64,5 mm e espessura 10mm							
egl180	180	0.0745	0.0802	1.22305E-05	21.9	23.6	39.8
egl200	200	0.0738	0.0781	1.19103E-05	22.6	24.8	44.9
egl220	220	0.0814	0.0868	1.32370E-05	22.3	23.7	55.4
egl250	250	0.0951	0.1007	1.53568E-05	22.6	24.4	43.4

O coeficiente de reaeração K_2 , dos trabalhos de ROMA (1988) e de MIRANDA (2000) é comparado aos valores de K_2 do presente trabalho. Vale lembrar, que as grades utilizadas para geração de turbulência são aqui chamadas de grade fina, grade média e grade larga. As **TABELAS 2, 3, 4** apresentam os resultados comparativos para as três grades.

Os dados dessas tabelas foram plotados em gráficos (K_2 versus Rotação), onde se buscou o melhor ajuste através de regressão. Esses resultados são apresentados nas **FIGURAS 9, 11, 13**.

Com o objetivo de obter-se uma relação entre K_2 e o valor RMS, tanto para o método da sonda ótica, como para o método fotográfico, foram plotados todos os valores de K_2 obtidos nos três trabalhos, comparados em função da rotação e, por meio de regressão, buscou-se a equação com o melhor ajuste. Esta equação foi programada em planilha eletrônica para se obter valores de K_2 estimado. Os resultados podem ser observados nas **FIGURAS 10, 12, 14**.

TABELA 2: Comparativo entre os valores K_2 para o ensaio da grade fina

Rotação (rpm)	Valores de K_2 de ROMA (1988)	Valores de K_2 de MIRANDA (2000)	Valores de K_2 deste Trabalho
69	0.0468		
84	0.0510		
108	0.0778		
115	0.0822		
120			0.1069
138			0.1022
150	0.1425	0.1182	
158			0.1227
165		0.1162	
175		0.1399	
180		0.1845	0.2598
198		0.2056	
200			0.2863
208		0.2793	
218		0.2157

FIGURA 9: Gráfico de K_2 em função da frequência de oscilação da grade de 26,5 mm de abertura e barras com 10mm de espessura

FIGURA 10: Melhor ajuste dos três trabalhos conjuntos (Grade de 26,5 mm de abertura e barras com 10mm de espessura)

TABELA 3: Comparativo entre os valores K₂ para o ensaio da grade média

Rotação (rpm)	Valores de K ₂ de ROMA (1988)	Valores de K ₂ de MIRANDA (2000)	Valores de K ₂ deste Trabalho
90	0.0509		
116	0.0645		
138			0.0808
155		0.0859	
158			0.0921
168		0.0757	
178		0.0999	
180			0.0889
185		0.1046	
188	0.1032		
195		0.0987	
198	0.1279		
208			0.1429
218		0.1336	
238		0.1313	0.1049

Comparação de Valores de K₂ para o Ensaio da Grade Média **FIGURA 11:** Gráfico de K₂ em função da frequência de oscilação da grade de 39,0 mm de abertura e barras com 10mm de espessura

FIGURA 12: Melhor ajuste dos três trabalhos Conjuntos (Grade de 39,0 mm de abertura e barras com 10mm de espessura)

TABELA 4: Comparativo entre os valores K_2 para o ensaio da grade larga

Rotação (rpm)	Valores de K_2 de ROMA (1988)	Valores de K_2 de MIRANDA (2000)	Valores de K_2 deste Trabalho
115	0.0526		
165		0.0730	
172	0.0782		
180		0.0405	0.0745
196		0.0632	
198	0.0845		
200	0.0831		0.0738
206		0.0706	
218		0.0898	
220			0.0814
235		0.0938	
238	0.1065		
250		0.1568	0.0951

FIGURA 13: Gráfico de K_2 em função da frequência de oscilação da grade de 64,5 mm de abertura e barras com 10mm de espessura

A **FIGURA 13** apresenta o gráfico de K_2 em função da frequência de oscilação da grade (rotação), os dados dos trabalhos utilizados foram organizados de forma separada, para se obter uma equação distinta para cada um dos trabalhos. Desta maneira com os dados de cada trabalho obteve-se uma equação de K_2 em função da rotação. Esse gráfico representa um comparativo, que pode servir como uma calibração do equipamento utilizado, já que os três trabalhos, aqui apresentados utilizaram o mesmo tanque com grades que oscilam através do motor rotativo.

Na **FIGURA 14** juntou-se todos os valores de K_2 dos três trabalhos e, montou-se o gráfico em função da rotação, alcançando-se o melhor ajuste para os três trabalhos conjuntos. Por meio de regressão, a equação obtida será utilizada para obter os valores de K_2 estimado.

Em altas rotações observa-se um maior espalhamento dos pontos, que pode ser justificado pela quebra da superfície livre.

FIGURA 14: Melhor ajuste dos três trabalhos Conjuntos (Grade de 64,5 mm de abertura e barras com 10mm de espessura)

5.2. Resultados da Sonda Ótica

Os valores RMS são comparados aos de ROMA (1988) através da **TABELA 5**.

As **FIGURAS 15, 16 e 17** apresentam os melhores ajustes dos valores de RMS do sinal da sonda obtidos em laboratório. A equação resultante foi utilizada a fim de estimar os valores de RMS para a mesma faixa de rotação em que K_2 foi estimado.

Na análise qualitativa observa-se que a função de autocorrelação para os dois diferentes métodos, apesar de a forma das duas funções serem bem distintas, apresenta um comportamento similar no que diz respeito a “rapidez” com que perdem a correlação.

O valor da macro escala de turbulência foi obtido em um software gráfico e foi também comparado aos valores do trabalho de ROMA (1988), na **TABELA 5**.

O espectro de frequência foi conseguido a partir da transformada de Fourier (FFT) da função de autocovariância, e será utilizado de forma qualitativa na comparação com o espectro espacial ao longo do eixo x, do método fotográfico, no item 5.5..

TABELA 5: Parâmetros turbulentos obtidos nos ensaios com o método ótico. Comparação dos valores RMS e Macro escala desta pesquisa com os de ROMA (1988).

Ensaio	Valor RMS de ROMA (1988)	Valor RMS deste Trabalho	Macro escala de ROMA (1988)	Macro escala deste trabalho
Egf 69	0.118		0.002	
Egf 84	0.176		0.004	
Egf 108	0.348		0.006	
Egf 115	0.359		0.007	
Egf 120		0.067		0.023
Egf 140		0.132		0.018
Egf 150	0.610		0.010	
Egf 160		0.197		0.016
Egf 180		0.238		0.015
Egf 200		0.264		0.015
Egm 90	0.106		0.001	
Egm 116	0.171		0.003	
Egm 140		0.055		0.026
Egm 160		0.060		0.020
Egm 180		0.088		0.021
Egm 188	0.520		0.010	
Egm 198	0.366		0.005	
Egm 210		0.101		0.017
Egm 240		0.169		0.015
Egl 115	0.071		0.0009	
Egl 172	0.108		0.003	
Egl 180		0.041		0.048
Egl 198	0.287		0.006	
Egl 200	0.344		0.007	
Egl 200		0.078		0.017
Egl 220		0.096		0.016
Egl 238	0.189		0.006	
Egl 250		0.139		0.015

FIGURA 15: Melhor ajuste do valor de RMS sonda *versus* frequência de oscilação da grade de 26,5 mm de abertura e barras com 10mm de espessura

FIGURA 16: Melhor ajuste do valor de RMS sonda *versus* frequência de oscilação da grade de 39,0 mm de abertura e barras com 10mm de espessura

FIGURA 17: Melhor ajuste do valor de RMS sonda *versus* da frequência de oscilação da grade de 64,5 mm de abertura e barras com 10 mm de espessura

5.3. Resultados obtidos através do Método Fotográfico

Em cada experimento, foi obtida uma fotografia de onde foram tirados o campo de velocidade e, após posterior análise, determinaram-se os parâmetros turbulentos. A região da superfície livre na qual foram conseguidas as imagens é a mesma região em que se localizou a sonda ótica na coleta dos dados por meio do método ótico.

A apresentação dos campos de velocidade encontrados nos ensaios será realizada de duas formas, sendo a primeira em gráficos espaciais, onde a velocidade é indicada no eixo vertical (z), e a segunda maneira é na forma de isolinhas, cujo intuito foi o de indicar os locais com mesma velocidade.

5.3.1. Velocidade Horizontal

O campo de velocidade nas direções x (longitudinal) e y (transversal) é apresentado neste item. As **FIGURAS 18 a 73** mostram os resultados para os 14 ensaios realizados, sendo as figuras de números pares as isolinhas dos gráficos espaciais.

Em muitos ensaios, observa-se um contraste entre regiões que apresentam velocidades mais suaves e locais onde há forte variação de velocidade, como é o caso dos ensaios egf120; egf160; egf180; egm140; egm180; egm240 e egl220. Também são identificadas regiões de máxima e mínima velocidades, como se pode observar no egf200; egl250.

Alguns ensaios apresentaram regiões com alta velocidade, como ocorreu em egl180 e egl200 e, em egf140, houve uma grande região com baixa velocidade. Verificou-se, por exemplo, que no ensaio da grade média, rotação de 160 rpm (egm160), $x = 200\text{mm}$, existem duas ou três regiões com alta velocidade (picos), contrastando com locais de baixa velocidade; note-se que isso ocorre em todas as figuras.

Nas fotografias existem regiões com poucas informações, e o resultado após a interpolação desses locais apresenta-se muito suave, como pode ser observado, por exemplo, na **FIGURA 20**.

Faz-se interessante observar as **FIGURAS 34 e 62** onde existe o contraste entre uma região com alta velocidade, uma região de baixa velocidade e outra região com velocidade aproximadamente constante.

FIGURA 18. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 120 rpm

FIGURA 19. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 120 rpm

FIGURA 20. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 140 rpm

FIGURA 21. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 140 rpm

FIGURA 22. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 160 rpm

FIGURA 23. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 160 rpm

FIGURA 24. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 180 rpm

FIGURA 25. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 180 rpm.

FIGURA 26. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 200 rpm

FIGURA 27. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 200 rpm

FIGURA 28. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 140 rpm.

FIGURA 29. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 140 rpm

FIGURA 30. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 160 rpm

FIGURA 31. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 160 rpm

FIGURA 32. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 180 rpm

FIGURA 33. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 180 rpm

FIGURA 34. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 210 rpm

FIGURA 35. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 210 rpm

FIGURA 36. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 240 rpm

FIGURA 37. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 240 rpm

FIGURA 38. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 180 rpm

FIGURA 39. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 180 rpm

FIGURA 40. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 200 rpm

FIGURA 41. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 200 rpm

FIGURA 42. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 220 rpm

FIGURA 43. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 220 rpm.

FIGURA 44. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 250 rpm

FIGURA 45. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção X com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 250 rpm

FIGURA 46. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 120 rpm

FIGURA 47. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 120 rpm.

FIGURA 48. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 140 rpm

FIGURA 49. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 140 rpm

FIGURA 50. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 160 rpm

FIGURA 51. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 160 rpm

FIGURA 52. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 180 rpm

FIGURA 53. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 180 rpm

FIGURA 54. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 200 rpm

FIGURA 55. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 200 rpm.

FIGURA 56. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 140 rpm

FIGURA 57. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 140 rpm

FIGURA 58. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 160 rpm

FIGURA 59. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 160 rpm.

FIGURA 60. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 180 rpm

FIGURA 61. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 180 rpm

FIGURA 62. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 210 rpm

FIGURA 63. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 210 rpm

FIGURA 64. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 240 rpm

FIGURA 65. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 240 rpm

FIGURA 66. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 180 rpm.

FIGURA 67. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 180 rpm

FIGURA 68. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 200 rpm

FIGURA 69. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 200 rpm

FIGURA 70. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 220 rpm

FIGURA 71. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 220 rpm

FIGURA 72. Visualização da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 250 rpm

FIGURA 73. Visualização das Isolinhas da Componente da Velocidade Horizontal na direção Y com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 250 rpm

5.3.2. Gradiente de Velocidade na direção z

No capítulo 4 foi apresentada a metodologia para a obtenção do gradiente de velocidade vertical por meio da computação da equação (121), e os resultados interpolados serão apresentados nesta seção.

FIGURA 74. Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 120 rpm.

FIGURA 75. Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 120 rpm.

FIGURA 76. Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 140 rpm.

FIGURA 77. Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 140 rpm.

FIGURA 78. Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 160 rpm.

FIGURA 79. Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 160 rpm.

FIGURA 80. Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 180 rpm.

FIGURA 81. Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 180 rpm.

FIGURA 82. Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 200 rpm.

FIGURA 83. Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 2,65 cm e rotação de 200 rpm.

FIGURA 84. Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 140 rpm.

FIGURA 85. Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 1400 rpm.

FIGURA 86. Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 160 rpm.

FIGURA 87. Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 160 rpm.

FIGURA 88. Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 180 rpm.

FIGURA 89. Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 180 rpm.

FIGURA 90. Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 210 rpm.

FIGURA 91. Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 210 rpm.

FIGURA 92. Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 240 rpm.

FIGURA 93. Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 3,90 cm e rotação de 240 rpm.

FIGURA 94. Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 180 rpm.

FIGURA 95. Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 180 rpm.

FIGURA 96. Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 200 rpm.

FIGURA 97. Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 200 rpm.

FIGURA 98. Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 220 rpm.

FIGURA 99. Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 220 rpm.

FIGURA 100. Visualização do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 250 rpm.

FIGURA 101. Visualização das Isolinhas do Gradiente da Velocidade Vertical (direção Z) com a grade de malha quadrada de espaçamento entre barras de 6,45 cm e rotação de 250 rpm.

5.3.2.1 Ajuste do valor RMS do gradiente da velocidade vertical em função da rotação

O valor RMS espacial ao longo do eixo x foi obtido a partir da equação (109) para dados espaciais e os resultados são apresentados aqui por meio de tabela e de gráficos. Objetivou-se, nos gráficos abaixo, um melhor ajuste através de regressão; assim, a equação obtida foi utilizada na estimativa de uma faixa de valores para rotação, que não foi ensaiada e que está dentro da faixa de K_2 estimado.

TABELA 6: Valores de RMS obtidos pelo método fotográfico para o gradiente de velocidade vertical

ENSAIO	Valor RMS
Egf120	10.405
Egf140	13.298
Egf160	11.042
Egf180	13.633
Egf200	20.821
Egm140	6.873
Egm160	6.867
Egm180	5.731
Egm210	6.241
Egm240	6.796
Egl180	5.799
Egl200	7.555
Egl220	9.347
Egl250	12.048

FIGURA 102: Melhor ajuste para RMS foto *versus* frequência de oscilação da grade de 26,5 mm de abertura e barras com 10,0 mm de espessura

FIGURA 103: Melhor ajuste para RMS foto *versus* frequência de oscilação da grade de 39,0 mm de abertura e barras com 10,0 mm de espessura

FIGURA 104: Melhor ajuste para RMS foto *versus* frequência de oscilação da grade de 64,5 mm de abertura e barras com 10,0 mm de espessura

Nota-se que o valor RMS obtido pelo método fotográfico em função da rotação (frequência de oscilação da grade), apresentou como melhor ajuste à função de segundo grau, similar ao que foi observado nos gráficos das **FIGURAS 15, 16, 17**, dos resultados referentes aos valores de RMS do método da sonda ótica. Vale ressaltar, que tal constatação citada acima justifica a opção pela função de segundo grau.

A função de autocorrelação espacial ao longo do eixo x e o espectro foram obtidos e analisados nesta seção e ambos foram conseguidos por meio do gradiente da velocidade vertical (2 D divergente), com o objetivo de se conseguir uma idéia quantitativa dos dados da superfície livre.

Os resultados alcançados serão apresentados no item 5.4. e 5.5. e comparados aos resultados do método da sonda ótica.

5.4. Comparação entre a Função de autocorrelação da sonda ótica e do método fotográfico

FIGURA 105: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 120 rpm)

FIGURA 106: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 120 rpm)

FIGURA 107: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 140 rpm)

FIGURA 108: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 140 rpm)

FIGURA 109: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 160 rpm)

FIGURA 110: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 160 rpm)

FIGURA 111: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 180 rpm)

FIGURA 112: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 180 rpm)

FIGURA 113: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 200 rpm)

FIGURA 114: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 200 rpm)

FIGURA 115: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 140 rpm)

FIGURA 116: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 140 rpm)

FIGURA 117: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 160 rpm)

FIGURA 118: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 160 rpm)

FIGURA 119: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 180 rpm)

FIGURA 120: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 180 rpm)

FIGURA 121: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 210 rpm)

FIGURA 122: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 210 rpm)

FIGURA 123: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 240 rpm)

FIGURA 124: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 240 rpm)

FIGURA 125: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 180 rpm)

FIGURA 126: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 180 rpm)

FIGURA 127: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 200 rpm)

FIGURA 128: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 200 rpm)

FIGURA 129: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 220 rpm)

FIGURA 130: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 220 rpm)

FIGURA 131: Autocorrelação da Sonda: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 250 rpm)

FIGURA 132: Autocorrelação da Foto: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 250 rpm)

5.5. Comparação entre o Espectro de frequência da sonda ótica e o Espectro do método fotográfico

FIGURA 133: Espectro da Sonda: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 120 rpm)

FIGURA 134: Espectro da Foto: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 120 rpm)

FIGURA 135: Espectro da Sonda: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 140 rpm)

FIGURA 136: Espectro da Foto: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 140 rpm)

FIGURA 137: Espectro da Sonda: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 160 rpm)

FIGURA 138: Espectro da Foto: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 160 rpm)

FIGURA 139: Espectro da Sonda: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 180 rpm)

FIGURA 140: Espectro da Foto: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 180 rpm)

FIGURA 141: Espectro da Sonda: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 200 rpm)

FIGURA 142: Espectro da Foto: Ensaio da Grade de 26,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 200 rpm)

FIGURA 143: Espectro da Sonda: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 140 rpm)

FIGURA 144: Espectro da Foto: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 140 rpm)

FIGURA 145: Espectro da Sonda: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 160 rpm)

FIGURA 146: Espectro da Foto: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 160 rpm)

FIGURA 147: Espectro da Sonda: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 180 rpm)

FIGURA 148: Espectro da Foto: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 180 rpm)

FIGURA 149: Espectro da Sonda: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 210 rpm)

FIGURA 150: Espectro da Foto: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 210 rpm)

FIGURA 151: Espectro da Sonda: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 240 rpm)

FIGURA 152: Espectro da Foto: Ensaio da Grade de 39,0mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 240 rpm)

FIGURA 153: Espectro da Sonda: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 180 rpm)

FIGURA 154: Espectro da Foto: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 180 rpm)

FIGURA 155: Espectro da Sonda: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 200 rpm)

FIGURA 156: Espectro da Foto: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 200 rpm)

FIGURA 157: Espectro da Sonda: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 220 rpm)

FIGURA 158: Espectro da Foto: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 220 rpm)

FIGURA 159: Espectro da Sonda: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 250 rpm)

FIGURA 160: Espectro da Foto: Ensaio da Grade de 64,5mm de abertura e barras com 10,0mm de espessura (Frequência de oscilação da grade de 250 rpm)

Em todos os catorze ensaios, foram obtidos os espectros do gradiente da velocidade vertical na superfície livre. Os gráficos destes espectros, plotados em papel log-log, apresentam inclinações similares para a envoltória dos picos, quando comparados aos encontrados nos espectros obtidos com os dados da sonda ótica. O espectro segue uma inclinação de -1 para baixos valores de $\log(1/dx)$, similares ao espectro apresentado por MC CREADY, ET AL. (1986) e TAMBURRINO (1994).

5.6. Relação entre o coeficiente de reaeração K_2 e o valor RMS do método ótico

Nesta seção são apresentados os resultados finais, onde plotou-se o valor RMS *versus* K_2 estimado e RMS *versus* K_2 obtido em laboratório.

TABELA 7: Valores de K_2 e RMS da sonda medidos em laboratório e estimados para a grade de 26,5 mm de abertura e barras com 10,0 mm de espessura

Rotação Rpm	LABORATÓRIO		ESTIMADO	
	K_2 h^{-1}	RMS sonda V	K_2 h^{-1}	RMS sonda V
115	0.082		0.081963	0.0172
120	0.107	0.066	0.086945	0.0352
140	0.102	0.132	0.110087	0.0972
150	0.143		0.123875	0.1222
150	0.118		0.123875	0.1222
160	0.112	0.197	0.13939	0.1432
165	0.116		0.147861	0.1522
175	0.140		0.16638	0.1672
180	0.278	0.254	0.176492	0.1732
180	0.184		0.176492	0.1732
198	0.206		0.218257	0.18652
200	0.286	0.264	0.223469	0.1872
218	0.216		0.276351	0.18612

FIGURA 161: K₂ em função de RMS (Grade de 26,5 mm de abertura e barras com 10 mm de espessura).

TABELA 8: Valores de K₂ e RMS da sonda medidos em laboratório e estimados para a grade de 39,0 mm de abertura e barras com 10,0 mm de espessura

Rotação Rpm	LABORATÓRIO		ESTIMADO	
	K ₂ h-1	RMS sonda V	K ₂ h-1	RMS sonda V
90	0.051		0.056966	0.0685
116	0.065		0.066238	0.04406
140	0.081	0.05465	0.076131	0.0335
155	0.086		0.083051	0.03275
160	0.092	0.05251	0.085495	0.0335
168	0.076		0.089556	0.03574
178	0.100		0.094904	0.04034
180	0.089	0.08517	0.096011	0.0415
185	0.105		0.098836	0.04475
188	0.103		0.100571	0.04694
195	0.099		0.104738	0.05275
198	0.128		0.106576	0.05554
210	0.143	0.101	0.114258	0.0685
218	0.134		0.119685	0.07874
238			0.134405	0.10994
240		0.16855	0.135974	0.1135

FIGURA 162: K₂ em função de RMS (Grade de 39,0 mm de abertura e barras com 10,0 mm de espessura).

TABELA 9: Valores de K₂ e RMS da sonda medidos em laboratório e estimados para a grade de 64,5 mm de abertura e barras com 10,0 mm de espessura

LABORATÓRIO			ESTIMADO	
Rotação Rpm	K ₂ h ⁻¹	RMS sonda V	K ₂ h ⁻¹	RMS sonda V
165	0.073		0.072365	0.008625
172	0.0782		0.074264	0.019048
180	0.074	0.04111	0.076495	0.0306
196			0.08116	0.052552
198	0.0845		0.081763	0.055188
200	0.074	0.0779	0.08237	0.0578
200	0.0831		0.08237	0.0578
206			0.084219	0.065492
218	0.0898		0.088043	0.080228
220	0.081	0.09595	0.088697	0.0826
235	0.0938		0.093759	0.099625
238	0.1065		0.094805	0.102868
250	0.095	0.13857	0.099109	0.1153

FIGURA 163: K₂ em função de RMS (Grade de 64,5 mm de abertura e barras com 10,0 mm de espessura).

5.7. Relação entre o coeficiente de reaeração K₂ e o valor RMS do método fotográfico

TABELA 10: Valores de K₂ e RMS foto medidos em laboratório e estimados para a grade de 26,5 mm de abertura e barras com 10,0 mm de espessura

Rotação Rpm	LABORATÓRIO		ESTIMADO	
	K ₂ h ⁻¹	RMS foto mm/s	K ₂ h ⁻¹	RMS foto mm/s
115	0.082		0.08196	12.023
120	0.107	10.405	0.08694	11.533
140	0.102	13.298	0.11009	10.773
150	0.143		0.12388	11.113
150	0.118		0.12388	11.113
160	0.112	11.042	0.13939	11.933
165	0.116		0.14786	12.523
175	0.140		0.16638	14.063
180	0.278	13.633	0.17649	15.013
180	0.184		0.17649	15.013
198	0.206		0.21826	19.4266
200	0.286	20.821	0.22347	20.013
218	0.216		0.27635	26.1546

FIGURA 164: RMS Foto em função de K₂ (Grade de 26,5 mm de abertura e barras com 10,0 mm de espessura).

TABELA 11: Valores de K₂ e RMS foto medidos em laboratório e estimados para a grade de 39 mm de abertura e barras com 10 mm de espessura

LABORATÓRIO			ESTIMADO	
Rotação Rpm	K ₂ h ⁻¹	RMS foto mm/s	K ₂ h ⁻¹	RMS foto mm/s
90	0.051		0.056966	9.363
116	0.065		0.066238	7.504
140	0.081	6.8728	0.076131	6.148
155	0.086		0.083051	5.476
160	0.092	6.8673	0.085495	5.282
168	0.076		0.089556	5.0028
178	0.100		0.094904	4.7078
180	0.089	5.7311	0.096011	4.656
185	0.105		0.098836	4.537
188	0.103		0.100571	4.4728
195	0.099		0.104738	4.344
198	0.128		0.106576	4.2978
210	0.143	6.241	0.114258	4.167
218	0.134		0.119685	4.1278
238			0.134405	4.1978
240		6.7956	0.135974	4.218

FIGURA 165: RMS Foto em função de K₂ (Grade de 39 mm de abertura e barras com 10mm de espessura)

TABELA 12: Valores de K₂ e RMS da sonda medidos em laboratório e estimados para a grade de 64,5 mm de abertura e barras com 10mm de espessura

Rotação Rpm	LABORATÓRIO		ESTIMADO	
	K ₂ h ⁻¹	RMS foto mm/s	K ₂ h ⁻¹	RMS foto mm/s
165	0.073		0.072365	4.4365
172	0.0782		0.074264	5.0616
180	0.074	5.7986	0.076495	5.776
196			0.08116	7.2048
198	0.0845		0.081763	7.3834
200	0.074	7.5553	0.08237	7.562
200	0.0831		0.08237	7.562
206			0.084219	8.0978
218	0.0898		0.088043	9.1694
220	0.081	9.3466	0.088697	9.348
235	0.0938		0.093759	10.6875
238	0.1065		0.094805	10.9554
250	0.095	12.0475	0.099109	12.027

FIGURA 166: RMS Foto em função de K_2 (Grade de 64,5 mm de abertura e barras com 10mm de espessura)

6 CONCLUSÕES

A pesquisa aqui apresentada, pôde verificar algumas hipóteses básicas e concluir a validade da importância do campo de velocidade na transferência de massa, representada pelo coeficiente de reaeração.

Nesta pesquisa buscou-se, como objetivo, incluir um melhoramento no método fotográfico, através da introdução de um segundo disparo de flash na metade do tempo de exposição. Esta nova forma de tomada da fotografia tornou mais fácil e mais preciso o cálculo das derivadas das componentes da velocidade e acrescentou às características descritas na literatura, ou seja, o método mais poderoso de quantificar a visualização de um escoamento e um dos poucos capazes de dar instantaneamente mapas de magnitude das velocidades, a simplicidade de cálculo e aumento na precisão.

Esse método mostrou-se também ser um meio muito rápido, e de muito baixo custo, quando se deseja obter campos de velocidade na superfície livre. Isso justifica-se pelo pouco tempo gasto para se obter as fotos e, após digitalização e interpolação, conseguir os gráficos representativos dos campos de velocidade, com grande número de vetores velocidade.

Outro objetivo do presente trabalho era medir o campo de velocidade na superfície livre, pelo método fotográfico, e por meio dos parâmetros turbulentos obter-se uma avaliação qualitativa do método ótico.

A autocorrelação do gradiente da velocidade vertical comparado com a autocorrelação obtida a partir do sinal elétrico da sonda ótica apresenta uma boa resposta quanto a “rapidez” com que perdem a correlação, permitindo assim, justificar uma relação entre os dois métodos.

O espectro do gradiente de velocidade é descrito pela teoria linear apresentada na literatura como de grande importância na caracterização da transferência de massa na interface ar/água, justificando sua obtenção. Porém não foi possível a comparação com o espectro do coeficiente de transferência de massa, devido a não se ter dados das flutuações de K_L .

Na comparação dos espectros pelos dois métodos (método ótico e método fotográfico), observou-se inclinações similares para ambos os espectros.

Por intuição imagina-se que quanto maior a rotação maior deve ser o valor de K_2 , para uma mesma grade oscilante. Porém, em alguns valores de K_2 , como ocorre para a grade larga entre os ensaios egl180 e egl200, houve um decréscimo em seu valor, tal fato se justifica pelo conceito de instabilidade superficial citado em COSTA (1992), que supõe a ocorrência de um abaixamento de temperatura devido à evaporação da camada líquida interfacial. A teoria da instabilidade superficial supõe que para baixa umidade, ou seja, ar mais seco, os valores de K_2 são mais elevados.

O valor RMS em função da rotação, tanto para os valores obtidos pelo método ótico quanto pelo método fotográfico, apresentaram o melhor ajuste para a função do segundo grau, sendo este o parâmetro turbulento que apresentou melhor correlação com o coeficiente de reaeração.

Este trabalho ganha importância na área de transporte de massa em meios turbulentos pois, apesar de se encontrar boas bibliografias sobre o tema, dificilmente há publicações que relacionam o campo de velocidade na superfície livre à transferência de massa interfacial.

Sugere-se como continuidade o estudo da relação entre os espectros de turbulência tomados em função do espaço, método fotográfico, e os tomados em função do tempo, método ótico.

ANEXOS

ANEXO I

ensaio da grade fina 120

ensaio da grade fina 140

Ensaio da Grade Fina 160

Ensaio da Grade Fina 180

Ensaio da Grade Fina 200

Ensaio da Grade Média 140

Ensaio da Grade Média 160

Ensaio da Grade Média 180

Ensaio da Grade Média 210

Ensaio da Grade Média 240

Ensaio da Grade Larga 180

♦ OD vs tempo

Ensaio da Grade Larga 200

♦ OD vs tempo

Ensaio da Grade Larga 220

Ensaio da Grade Larga 250

ANEXOS II

ENSAIO DA GRADE FINA 120 RPM

ENSAIO DA GRADE FINA 140 RPM

ENSAIO DA GRADE FINA 160 RPM

ENSAIO DA GRADE FINA 180 RPM

ENSAIO DA GRADE FINA 200 RPM

ENSAIO DA GRADE MÉDIA 140 RPM

ENSAIO DA GRADE MÉDIA 160 RPM

ENSAIO DA GRADE MÉDIA 180 RPM

ENSAIO DA GRADE MÉDIA 210 RPM

ENSAIO DA GRADE MÉDIA 240 RPM

ENSAIO DA GRADE LARGA 180 RPM

ENSAIO DA GRADE LARGA 200 RPM

ENSAIO DA GRADE LARGA 220 RPM

ENSAIO DA GRADE LARGA 250 RPM

ANEXOS III

ENSAIO DA GRADE FINA 120 RPM																
X1	Y1	X2	Y2	X3	Y3	X'	Y'	X''	Y''	Vx1	Vx2	Vy1	Vy2	DVx/dx	DVy/dy	DVz/dz
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	1/s	1/s	1/s
78,08	158,78	75,007	160,54	73,141	162,07	-3,073	-1,866	1,755	1,5356	-23,64	-13,3279	13,5	10,96857	-3,35551	-1,44241	4,797916
76,763	157,47	74,129	159	72,153	161,08	-2,634	-1,976	1,5356	2,0841	-20,26	-14,1114	11,81231	14,88643	-2,3353	2,001902	0,333398
81,373	152,86	79,946	154,83	79,177	156,15	-1,427	-0,768	1,9744	1,3162	-10,98	-5,48786	15,18769	9,401429	-3,84631	-2,93064	6,776952
77,531	150,55	76,324	153,52	75,994	156,37	-1,207	-0,329	2,9616	2,8519	-9,287	-2,35214	22,78154	20,37071	0	-0,81403	0,814028
97,946	155,38	95,422	155,82	93,666	156,59	-2,524	-1,756	0,4388	0,7678	-19,42	-12,5436	3,375385	5,484286	-2,72338	4,806064	-2,08269
96,19	146,83	96,08	149,46	96,739	151,32	-0,11	0,6586	2,6325	1,8647	-0,845	4,704286	20,25	13,31929	-50,5364	2,63275	53,16919
100,14	149,35	100,03	151,65	101,46	153,63	-0,11	1,4268	2,3035	1,9744	-0,844	10,19143	17,71923	14,10286	-100,595	-1,56995	102,165
74,129	141,89	74,238	145,4	74,568	149,24	0,1098	0,3293	3,5101	3,8391	0,8446	2,352143	27,00077	27,42214	13,72976	0,120046	-13,8498
71,933	141,23	72,153	145,4	72,702	149,02	0,2195	0,5488	4,1682	3,6197	1,6885	3,92	32,06308	25,855	10,16646	-1,48939	-8,67707
66,555	137,5	66,885	140,13	67,324	143,64	0,3293	0,439	2,6325	3,51	2,5331	3,135714	20,25	25,07143	1,830056	1,831502	-3,66156
69,848	135,42	67,982	136,62	64,909	139,59	-1,866	-3,073	1,2066	2,9616	-14,35	-21,9521	9,281538	21,15429	4,073231	9,839837	-13,9131
90,153	153,96	87,3	154,94	85,214	156,26	-2,854	-2,086	0,9872	1,3162	-21,95	-14,8964	7,593846	9,401429	-2,47227	1,831019	0,641248
90,044	151,98	87,739	151,87	85,434	152,31	-2,305	-2,305	-0,11	0,4387	-17,73	-16,4636	-0,84385	3,133571	-0,54945	-36,2572	36,80668
85,653	149,46	84,117	150,12	82,8	150,66	-1,537	-1,317	0,6582	0,5484	-11,82	-9,40786	5,063077	3,917143	-1,56979	-1,74101	3,310804
65,567	145,18	63,592	146,72	61,506	148,36	-1,976	-2,085	1,5356	1,6453	-15,2	-14,8957	11,81231	11,75214	-0,15285	-0,03918	0,192026
62,275	137,94	61,287	140,24	60,958	142,66	-0,988	-0,329	2,3035	2,4131	-7,598	-2,35214	17,71923	17,23643	-5,31111	-0,2096	0,520209
61,616	143,1	59,531	144,63	57,994	146,17	-2,086	-1,537	1,5356	1,5357	-16,04	-10,9757	11,81231	10,96929	0	-0,54899	0,548985
48,555	158,45	46,36	157,47	45,043	157,03	-2,195	-1,317	-0,987	-0,439	-16,89	-9,40786	-7,59385	-3,13357	-3,40666	-4,51811	7,924765
48,116	156,04	44,384	153,96	42,189	152,75	-3,732	-2,195	-2,084	-1,207	-28,71	-15,68	-16,0315	-8,61857	-3,49047	-3,55692	7,047385
47,347	154,06	43,396	152,09	41,091	151,54	-3,951	-2,305	-1,974	-0,548	-30,39	-16,4636	-15,1877	-3,91786	-3,52569	-5,70798	9,233666
48,335	150,01	44,933	148,36	42,518	147,48	-3,403	-2,415	-1,645	-0,877	-26,17	-17,2479	-12,6569	-6,26786	-2,62314	-3,88299	6,506122
41,421	153,52	39,335	154,83	37,908	155,71	-2,085	-1,427	1,3163	0,8775	-16,04	-10,1921	10,12538	6,267857	-2,80493	-2,93058	5,735511
59,421	141,01	57,336	142,33	55,909	143,97	-2,085	-1,427	1,3163	1,6453	-16,04	-10,1921	10,12538	11,75214	-2,80493	1,235857	1,569071
87,409	145,51	85,104	145,73	83,239	146,5	-2,305	-1,866	0,2194	0,7678	-17,73	-13,3279	1,687692	5,484286	-1,90991	17,30444	-15,3945
80,165	147,37	79,397	149,46	78,519	151,43	-0,768	-0,878	2,084	1,9744	-5,911	-6,27143	16,03077	14,10286	0,469364	-0,9251	0,455738
78,519	144,52	77,531	146,72	76,763	148,58	-0,988	-0,768	2,1938	1,8647	-7,599	-5,48786	16,87538	13,31929	-2,13723	-1,62098	3,758211
97,946	141,01	94,544	140,79	92,239	140,46	-3,403	-2,305	-0,219	-0,329	-26,17	-16,4636	-1,68769	-2,35	-2,85364	3,018722	-0,16508
95,202	138,93	92,019	139,37	89,714	139,91	-3,183	-2,305	0,4388	0,5484	-24,48	-16,4636	3,375385	3,917143	-2,51996	1,234636	1,285328
97,617	166,57	96,958	167,45	97,397	169,2	-0,659	0,4391	0,8775	1,755	-5,066	3,136429	6,75	12,53571	-12,4546	6,593407	5,861167
95,422	166,57	95,202	167,67	95,751	169,09	-0,219	0,5488	1,0969	1,4259	-1,688	3,92	8,437692	10,185	-25,5511	1,592951	23,95813
90,044	182,69	91,47	183,9	92,239	185	1,4269	0,7683	1,2066	1,0969	10,976	5,487857	9,281538	7,835	-3,84631	-1,19886	5,045163
16,066	185,98	16,615	184,01	17,493	181,71	0,5488	0,8781	-1,074	-2,304	4,2215	6,272143	-15,1877	-16,4536	3,736524	0,641146	-4,37767

ENSAIO DA GRADE FINA 140 RPM																
X1	Y1	X2	Y2	X3	Y3	X'	X"	Y'	Y"	Vx1	Vx2	Vy1	Vy2	DVx/dx	Dvy/dy	DVz/dz
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	1/s	1/s	1/s
12,5696	180,827	18,3805	182,72	23,3071	184,867	5,8109	4,9266	1,8937	2,1461	44,6992	35,19	14,5669	15,3293	-1,6364	0,40258	1,23387
15,7277	178,049	19,5174	179,943	23,5598	180,827	3,7897	4,0424	1,8937	0,8836	29,1515	28,8743	14,5669	6,31143	-0,0732	-4,3595	4,43261
27,2232	181,458	29,876	183,225	33,1604	184,614	2,6528	3,2844	1,7674	1,3887	20,4062	23,46	13,5954	9,91929	1,15118	-2,0799	0,92877
30,3813	188,401	35,4342	188,654	38,2134	188,654	5,0529	2,7792	0,2525	0	38,8685	19,8514	1,94231	0	-3,7636	-7,6923	11,4559
33,6657	187,896	38,2134	187,391	41,8768	187,896	4,5477	3,6634	-0,5049	0,5049	34,9823	26,1671	-3,8838	3,60643	-1,9384	-14,835	16,7735
36,5712	181,332	38,9713	181,71	43,0137	182,973	2,4001	4,0424	0,3787	1,2624	18,4623	28,8743	2,91308	9,01714	4,33814	16,1185	-20,457
27,0968	181,332	30,0023	183,225	32,9078	184,488	2,9055	2,9055	1,8936	1,2624	22,35	20,7536	14,5662	9,01714	-0,5495	-2,9304	3,47985
32,7814	183,352	36,0659	183,478	39,4766	184,109	3,2845	3,4107	0,1262	0,6312	25,2654	24,3621	0,97077	4,50857	-0,275	28,0333	-27,758
28,8654	167,319	32,1498	167,698	34,8026	167,824	3,2844	2,6528	0,3788	0,1262	25,2646	18,9486	2,91385	0,90143	-1,923	-5,3126	7,23566
28,8654	150,276	26,2126	151,16	23,9387	151,413	-2,6528	-2,2739	0,8837	0,2525	-20,406	-16,242	6,79769	1,80357	-1,5697	-5,6514	7,22104
26,2126	154,442	24,6967	155,957	23,1808	157,093	-1,5159	-1,5159	1,5149	1,1362	-11,661	-10,828	11,6531	8,11571	-0,5495	-2,335	2,8845
23,0545	165,299	25,9599	166,309	29,876	165,804	2,9054	3,9161	1,0099	-0,505	22,3492	27,9721	7,76846	-3,6071	1,93533	-11,264	9,32876
37,5817	157,093	36,4448	158,482	35,4342	159,113	-1,1369	-1,0106	1,3887	0,6312	-8,7454	-7,2186	10,6823	4,50857	-1,343	-4,4457	5,78866
36,5712	161,133	35,0553	161,638	34,171	161,638	-1,5159	-0,8843	0,505	0	-11,661	-6,3164	3,88462	0	-3,5255	-7,6923	11,2178
33,2867	160,754	31,5182	161,891	30,8866	162,648	-1,7685	-0,6316	1,1362	0,7574	-13,604	-4,5114	8,74	5,41	-5,1413	-2,9308	8,07214
30,5076	166,435	34,55	166,814	37,2028	166,814	4,0424	2,6528	0,3787	0	31,0954	18,9486	2,91308	0	-3,0049	-7,6923	10,6972
43,0137	170,98	44,6559	172,369	45,5402	173,884	1,6422	0,8843	1,3887	1,5149	12,6323	6,31643	10,6823	10,8207	-3,846	0,09967	3,74632
48,8246	170,475	50,0878	172,242	51,4774	174,515	1,2632	1,3896	1,7673	2,2724	9,71692	9,92571	13,5946	16,2314	0,16529	1,492	-1,6573
33,9183	140,43	35,5606	143,586	37,0764	146,363	1,6423	1,5158	3,156	2,7773	12,6331	10,8271	24,2769	19,8379	-1,0996	-1,4065	2,50619
32,5288	144,974	33,0341	147,752	33,5394	149,771	0,5053	0,5053	2,7773	2,0198	3,88692	3,60929	21,3638	14,4271	-0,5495	-2,4976	3,04709
48,5719	149,393	48,4456	152,675	47,6877	154,947	-0,1263	-0,7579	3,2823	2,2723	-0,9715	-5,4136	25,2485	16,2307	35,1705	-2,7474	-32,423
46,4244	162,143	47,6877	164,542	50,0878	166,94	1,2633	2,4001	2,3985	2,3986	9,71769	17,1436	18,45	17,1329	5,87816	-0,5492	-5,329
48,6983	167,824	50,2141	169,591	51,8564	171,737	1,5158	1,6423	1,7674	2,1461	11,66	11,7307	13,5954	15,3293	0,04665	0,98105	-1,0277
56,2777	163,532	57,9199	165,804	59,9411	168,203	1,6422	2,0212	2,2723	2,3986	12,6323	14,4371	17,4792	17,1329	1,09903	-0,1524	-0,9466
57,0356	159,366	57,4146	162,017	59,0568	164,542	0,379	1,6422	2,651	2,5248	2,91538	11,73	20,3923	18,0343	23,2576	-0,8895	-22,368
58,2989	161,512	59,8148	164,415	61,7096	166,688	1,5159	1,8948	2,9035	2,2723	11,6608	13,5343	22,3346	16,2307	1,23591	-2,1023	0,86635
62,0886	172,747	62,9729	175,398	63,7308	178,428	0,8843	0,7579	2,6511	3,0298	6,80231	5,41357	20,3931	21,6414	-1,5704	0,47088	1,09956
66,7626	170,223	67,1416	172,874	68,0258	175,398	0,379	0,8842	2,6511	2,5248	2,91538	6,31571	20,3931	18,0343	8,97185	-0,8897	-8,0821
72,0682	159,492	73,2051	163,658	75,6053	167,571	1,1369	2,4002	4,1659	3,9135	8,74538	17,1443	32,0454	27,9536	7,38755	-0,9822	-6,4053
67,1416	163,784	69,2891	167,319	71,3103	171,232	2,1475	2,0212	3,5347	3,9135	16,5192	14,4371	27,19	27,9536	-0,9695	0,21602	0,75352
67,8995	150,15	67,7732	153,432	68,5311	156,715	-0,1263	0,7579	3,2823	3,2823	-0,9715	5,41357	25,2485	23,445	-50,555	-0,5495	51,1046
67,0152	174,641	66,2573	177,797	66,6363	181,079	-0,7579	0,379	3,1561	3,2822	-5,83	2,70714	24,2777	23,4443	-11,264	-0,2641	11,5283
67,6469	184,488	69,0364	187,013	69,9207	189,411	1,3895	0,8843	2,5249	2,3985	10,6885	6,31643	19,4223	17,1321	-3,1465	-0,907	4,05351

ENSAIO DA GRADE FINA 160 RPM																
X1	Y1	X2	Y2	X3	Y3	X'	Y'	X''	Y''	Vx1	Vx2	Vy1	Vy2	DVx/dx	DVy/dy	DVz/dz
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	1/s	1/s	1/s
-1,4063	38,9484	1,1369	43,2181	3,2732	46,9796	2,5432	2,1363	4,2697	3,7615	19,5631	15,2593	32,8438	26,8679	-1,6923	-1,3996	3,0919
4,3922	46,6746	8,2578	50,0294	11,8183	53,6892	3,8656	3,5605	3,3548	3,6598	29,7354	25,4321	25,8062	26,1414	-1,1132	0,09994	1,01328
-0,0838	37,1185	3,6801	40,27	6,9354	44,9463	3,7639	3,2553	3,1515	4,6763	28,9531	23,2521	24,2423	33,4021	-1,5146	2,9065	-1,3919
10,3941	40,6766	11,3097	44,2347	12,3269	47,4879	0,9156	1,0172	3,5581	3,2532	7,04308	7,26571	27,37	23,2371	0,24316	-1,1615	0,91837
3,1715	38,6806	5,5112	30,7139	6,5285	32,2388	2,3397	1,0173	-7,9667	1,5249	17,9977	7,26643	-61,282	10,8921	-4,5866	-9,0595	13,6461
17,3116	31,9338	18,5323	34,4753	19,9565	36,8135	1,2207	1,4242	2,5415	2,3382	9,39	10,1729	19,55	16,7014	0,64132	-1,1208	0,4795
17,6168	45,353	18,1254	48,8095	18,4306	51,2493	0,5086	0,3052	3,4565	2,4398	3,91231	2,18	26,5885	17,4271	-3,406	-2,6505	6,05649
22,2962	39,66	22,6014	44,0314	23,3135	46,7762	0,3052	0,7121	4,3714	2,7448	2,34769	5,08643	33,6262	19,6057	8,97358	-3,2073	-5,7663
21,4824	40,7783	21,6859	44,6414	22,7031	47,0812	0,2035	1,0172	3,8631	2,4398	1,56538	7,26571	29,7162	17,4271	28,0114	-3,1811	-24,83
5,6129	13,5332	8,8682	17,7013	10,5976	20,3445	3,2553	1,7294	4,1681	2,6432	25,0408	12,3529	32,0623	18,88	-3,8976	-3,1627	7,06028
6,6302	12,2116	8,4613	15,0581	9,4786	17,193	1,8311	1,0173	2,8465	2,1349	14,0854	7,26643	21,8962	15,2493	-3,724	-2,3351	6,05907
9,682	14,4481	11,4114	17,2946	12,8356	20,3445	1,7294	1,4242	2,8465	3,0499	13,3031	10,1729	21,8962	21,785	-1,81	-0,039	1,84905
19,3461	19,8362	21,8893	23,8009	24,3308	26,0375	2,5432	2,4415	3,9647	2,2366	19,5631	17,4393	30,4977	15,9757	-0,8351	-3,6628	4,49791
18,5323	13,9398	20,4651	18,1079	23,0083	21,0561	1,9328	2,5432	4,1681	2,9482	14,8677	18,1657	32,0623	21,0586	1,70634	-2,64	0,93364
27,7895	27,2574	29,2137	29,9006	31,6551	31,4255	1,4242	2,4414	2,6432	1,5249	10,9554	17,4386	20,3323	10,8921	4,55216	-3,5715	-0,9807
30,5361	18,6162	32,1638	19,4295	34,707	19,7345	1,6277	2,5432	0,8133	0,305	12,5208	18,1657	6,25615	2,17857	3,46805	-5,0136	1,54558
35,6225	20,3445	39,4882	22,3777	41,8279	23,0893	3,8657	2,3397	2,0332	0,7116	29,7362	16,7121	15,64	5,08286	-3,3691	-5,1924	8,5615
16,2943	7,5352	14,3615	10,3817	11,7166	14,0415	-1,9328	-2,6449	2,8465	3,6598	-14,868	-18,892	21,8962	26,1414	2,08219	1,4914	-3,5736
22,6014	7,5352	21,4824	10,0767	18,8375	12,8216	-1,119	-2,6449	2,5415	2,7449	-8,6077	-18,892	19,55	19,6064	9,19075	0,0222	-9,213
26,6705	37,4235	28,1964	41,0832	29,2137	44,438	1,5259	1,0173	3,6597	3,3548	11,7377	7,26643	28,1515	23,9629	-2,9302	-1,1445	4,07479
31,0448	46,9796	32,2655	50,8427	34,8087	54,4008	1,2207	2,5432	3,8631	3,5581	9,39	18,1657	29,7162	25,415	7,18908	-1,1134	-6,0757
25,4498	45,353	25,6532	47,4879	26,467	49,4194	0,2034	0,8138	2,1349	1,9315	1,56462	5,81286	16,4223	13,7964	20,8861	-1,23	-19,656
20,9738	46,9796	19,8548	48,8095	19,3461	50,436	-1,119	-0,5087	1,8299	1,6265	-8,6077	-3,6336	14,0762	11,6179	-4,4451	-1,3434	5,78855
10,1906	22,4793	11,5131	24,3092	13,6494	25,8341	1,3225	2,1363	1,8299	1,5249	10,1731	15,2593	14,0762	10,8921	3,8459	-1,74	-2,1059
12,9373	25,7325	13,5477	27,4607	14,7684	29,0873	0,6104	1,2207	1,7282	1,6266	4,69538	8,71929	13,2938	11,6186	6,59224	-0,9694	-5,6229
11,0045	28,579	12,2252	29,6972	13,2425	30,6122	1,2207	1,0173	1,1182	0,915	9,39	7,26643	8,60154	6,53571	-1,7396	-1,8475	3,58709
50,7799	24,2076	53,6283	24,8175	55,6628	23,5976	2,8484	2,0345	0,6099	-1,2199	21,9108	14,5321	4,69154	-8,7136	-2,5904	-21,979	24,5696
52,7127	23,191	54,7473	22,6827	57,2905	21,7677	2,0346	2,5432	-0,5083	-0,915	15,6508	18,1657	-3,91	-6,5357	1,23609	5,16568	-6,4018
58,6129	14,5498	57,3922	12,7199	54,849	10,9917	-1,2207	-2,5432	-1,8299	-1,7282	-9,39	-18,166	-14,076	-12,344	7,18908	-0,9464	-6,2427
71,3288	31,3238	71,634	29,1889	71,5323	27,4607	0,3052	-0,1017	-2,1349	-1,7282	2,34769	-0,7264	-16,422	-24,689	-10,072	-1,9102	11,9826
79,3653	22,4793	78,5515	19,3279	77,4325	15,8714	-0,8138	-1,119	-3,1514	-3,4565	-6,26	-7,9929	-24,242	-24,689	2,12934	0,14208	-2,2714
64,7166	10,0767	62,9872	7,9419	61,0544	5,6037	-1,7294	-1,9328	-2,1348	-2,3382	-13,303	-13,806	-16,422	-16,701	0,29064	0,1311	-0,4218
77,229	43,8281	75,0928	42,9131	74,0755	42,6082	-2,1362	-1,0173	-0,915	-0,3049	-16,432	-7,2664	-7,0385	-2,1779	-4,2907	-5,3121	9,60288

ENSAIO DA GRADE FINA 180 RPM																
X1	Y1	X2	Y2	X3	Y3	X'	X''	Y'	Y''	Vx1	Vx2	Vy1	Vy2	DVx/dx	DVy/dy	DVz/dz
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	1/s	1/s	1/s
4,3577	181,529	4,9247	183,553	3,7906	184,605	0,567	-1,1341	2,0238	1,0524	4,36154	-8,1007	15,5677	7,51714	-21,979	-3,9779	25,9572
8,0028	182,662	8,4889	183,958	6,3828	184,686	0,4861	-2,1061	1,2952	0,7285	3,73923	-15,044	9,96308	5,20357	-38,64	-3,6747	42,3145
10,1089	172,301	9,0559	173,434	7,2738	173,839	-1,053	-1,7821	1,1333	0,4047	-8,1	-12,729	8,71769	2,89071	4,39828	-5,1416	0,74532
12,8631	168,82	12,8631	170,196	11,972	171,086	0	-0,8911	1,3761	0,8905	0	-6,365	10,5854	6,36071	0	-3,07	3,07003
26,6338	172,867	25,1757	173,677	23,7176	173,92	-1,4581	-1,4581	0,8095	0,2429	-11,216	-10,415	6,22692	1,735	-0,5495	-5,549	6,09846
22,6646	174,486	22,2595	176,51	20,3964	177,481	-0,4051	-1,8631	2,0238	0,9714	-3,1162	-13,308	15,5677	6,93857	25,1585	-4,2638	-20,895
25,4997	177,077	24,5277	179,505	22,5836	181,448	-0,972	-1,9441	2,4285	1,9428	-7,4769	-13,886	18,6808	13,8771	6,59414	-1,978	-4,6161
42,8346	173,11	39,9994	173,272	38,5413	173,191	-2,8352	-1,4581	0,1619	-0,081	-21,809	-10,415	1,24538	-0,5786	-4,0188	-11,266	15,2848
37,3263	172,867	34,2481	173,758	32,547	172,948	-3,0782	-1,7011	0,8905	-0,8095	-23,678	-12,151	6,85	-5,7821	-3,745	-14,185	17,9304
44,2926	174,324	42,1865	174,81	40,5664	175,215	-2,1061	-1,6201	0,4857	0,4048	-16,201	-11,572	3,73615	2,89143	-2,1977	-1,7392	3,93692
10,0279	172,301	8,9749	173,353	7,3548	173,758	-1,053	-1,6201	1,0523	0,4048	-8,1	-11,572	8,09462	2,89143	3,29738	-4,9446	1,6472
46,9658	158,296	47,6948	156,677	47,5328	154,491	0,729	-0,162	-1,6191	-2,1856	5,60769	-1,1571	-12,455	-15,611	-9,2796	1,94973	7,32988
38,6223	151,415	35,2202	150,444	33,9241	149,149	-3,4021	-1,2961	-0,9714	-1,2952	-26,17	-9,2579	-7,4723	-9,2514	-4,9711	1,8315	3,13959
23,7176	170,52	22,6646	171,41	21,4495	171,653	-1,053	-1,2151	0,8905	0,2428	-8,1	-8,6793	6,85	1,73429	0,55013	-5,7448	5,19464
60,3314	153,601	60,2504	151,658	60,3314	148,015	-0,081	0,081	-1,9428	-3,6428	-0,6231	0,57857	-14,945	-26,02	-14,835	5,70073	9,13443
59,1164	156,434	58,8733	154,734	57,9013	150,444	-0,2431	-0,972	-1,7	-4,2904	-1,87	-6,9429	-13,077	-30,646	20,8674	10,3346	-31,202
57,6583	155,949	57,6583	154,734	57,5773	152,711	0	-0,081	-1,2143	-2,0237	0	-0,5786	-9,3408	-14,455	0	4,21167	-4,2117
48,2618	151,496	47,4518	150,444	46,8037	147,692	-0,81	-0,6481	-1,0524	-2,7523	-6,2308	-4,6293	-8,0954	-19,659	-1,9771	10,9881	-9,011
31,008	167,363	28,9829	167,201	27,1198	167,12	-2,0251	-1,8631	-0,1619	-0,081	-15,578	-13,308	-1,2454	-0,5786	-1,1209	-4,1187	5,23952
65,4101	181,529	67,2732	182,743	69,5413	183,715	1,8631	2,2681	1,2142	0,9714	14,3315	16,2007	9,34	6,93857	1,00326	-1,9778	0,97453
65,7341	178,21	68,1642	179,667	71,4854	180,962	2,4301	3,3212	1,4571	1,2952	18,6931	23,7229	11,2085	9,25143	2,06978	-1,3431	-0,7267
70,8374	182,177	72,9435	181,286	76,9127	180,962	2,1061	3,9692	-0,8905	-0,3238	16,2008	28,3514	-6,85	-2,3129	5,76927	-5,0951	-0,6742
77,9657	173,434	81,2869	172,624	85,5801	173,515	3,3212	4,2932	-0,8095	0,8904	25,5477	30,6657	-6,2269	6,36	1,54102	-15,549	14,008
85,9041	147,044	85,3371	148,663	85,1751	152,872	-0,567	-0,162	1,619	4,2095	-4,3615	-1,1571	12,4538	30,0679	-5,6515	10,8796	-5,2281
81,0439	151,577	81,2059	154,41	82,1779	155,949	0,162	0,972	2,8333	1,5381	1,24615	6,94286	21,7946	10,9864	35,1648	-3,8147	-31,35
80,4768	156,434	82,0969	157,891	85,4181	158,701	1,6201	3,3212	1,4571	0,8095	12,4623	23,7229	11,2085	5,78214	6,95053	-3,7241	-3,2265
74,8066	170,924	76,5887	170,52	80,3958	170,601	1,7821	3,8071	-0,4048	0,081	13,7085	27,1936	-3,1138	0,57857	7,56698	-9,1216	1,55461
72,1334	164,934	73,3485	165,986	75,3736	166,796	1,2151	2,0251	1,0524	0,8095	9,34692	14,465	8,09538	5,78214	4,21206	-2,1981	-2,014
68,2452	164,125	70,1893	164,691	73,4295	164,044	1,9441	3,2402	0,5667	-0,6476	14,9546	23,1443	4,35923	-4,6257	4,21258	-15,855	11,6423
70,7564	161,534	72,5385	161,939	74,0775	161,21	1,7821	1,539	0,4048	-0,7286	13,7085	10,9929	3,11385	-5,2043	-1,5238	-20,549	22,0726
75,0496	160,158	76,7507	160,806	79,2618	160,967	1,7011	2,5111	0,6476	0,1619	13,0854	17,9364	4,98154	1,5643	2,85171	-5,9066	3,05488
77,1557	157,81	78,5328	158,863	80,7199	158,782	1,3771	2,1871	1,0523	-0,0809	10,5931	15,6221	8,09462	-0,5779	3,65193	-8,2414	4,58952
87,6052	172,543	91,7364	173,92	97,0017	174,81	4,1312	5,2653	1,3762	0,8904	31,7785	37,6093	10,5862	6,36	1,41141	-3,0709	1,65947

ENSAIO DA GRADE FINA 200 RPM															
X1	Y1	X2	Y2	X3	Y3	X'	Y'	Y"	Vx1	Vx2	Vy1	Vy2	DVx/dx	Dvy/dy	DVz/dz
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	1/s	1/s	1/s
26,9553	153,3	30,3379	150,724	31,1433	147,505	3,3826	0,8054	-3,2195	26,02	5,75286	-19,812	-22,996	-5,9916	1,23661	4,75498
32,5929	147,183	35,9755	145,09	39,358	142,193	3,3826	3,3825	-2,0927	26,02	24,1607	-16,098	-20,696	-0,5497	2,19717	-1,6475
30,1768	145,573	32,1097	144,125	34,6869	141,549	1,9329	2,5772	-1,4488	14,8685	18,4086	-11,145	-18,396	1,8315	5,00539	-6,8369
9,5593	177,929	11,6533	177,929	13,5862	177,607	2,094	1,9329	0	-0,322	16,1077	13,8064	0	-2,3	0	0
15,8412	176,641	19,0627	176,802	21,962	177,285	3,2215	2,8993	0,161	0,4829	24,7808	20,7093	1,23846	-1,2638	13,7318	-12,468
20,5124	169,719	20,6734	168,431	17,613	167,304	0,161	-3,0604	-1,2878	1,23846	-21,86	-9,9062	-8,0486	-143,47	-1,4424	144,911
40,9688	155,875	38,5527	154,427	36,6198	153,3	-2,4161	-1,9329	-1,4487	-1,268	-18,585	-11,144	-8,0486	-1,978	-2,1366	4,11455
35,1701	154,91	35,009	153,3	33,3983	151,368	-0,1611	-1,6107	-1,6097	-1,2392	-11,505	-12,382	-13,798	63,723	0,87939	-64,602
38,7138	179,377	41,6131	177,768	44,5124	176,158	2,8993	2,8993	-1,6097	22,3023	20,7093	-12,382	-11,498	-0,5495	-0,5495	1,0989
36,1366	177,768	38,2305	176,48	40,4856	174,548	2,0939	2,2551	-1,2878	16,1069	16,1079	-9,9062	-13,797	0,00045	3,02142	-3,0219
45,1567	142,032	49,1836	139,778	54,338	137,847	4,0269	5,1544	-2,2536	30,9762	36,8171	-17,335	-13,798	1,45049	-1,5697	0,11923
53,0494	142,032	56,7541	140,583	61,1031	140,261	3,7047	4,349	-1,4488	28,4977	31,0643	-11,145	-2,2993	0,69279	-6,1053	5,41249
47,9423	151,05	50,7179	150,455	53,5927	150,158	2,7756	2,8748	-0,5944	21,3508	20,5343	-4,5723	-2,1229	-0,2942	-4,1209	4,41504
44,8692	150,257	46,7527	149,366	48,3388	149,068	1,8835	1,5861	-0,8916	14,4885	11,3293	-6,8585	-2,1229	-1,6773	-5,3114	6,98865
55,9719	159,966	56,6658	157,687	59,3423	156,994	0,6939	2,6765	-2,2785	5,33769	19,1179	-17,527	-4,9536	19,859	-5,5183	-14,341
41,7961	170,17	45,464	169,179	48,2397	166,802	3,6679	2,7757	-0,9906	28,2146	19,8264	-7,62	-16,984	-2,2869	9,45242	-7,1655
46,5544	171,854	49,3301	170,368	52,2049	168,089	2,7757	2,8748	-1,486	-2,2786	21,3515	20,5343	-11,431	-16,276	0	3,26039
51,9075	164,226	49,6275	163,235	46,257	161,254	-2,28	-3,3705	-0,9907	-1,9814	-17,538	-24,075	-7,6208	-14,153	2,8669	6,59341
45,6623	157,489	43,6796	155,31	40,5074	152,932	-1,9827	-3,1722	-2,1795	-2,3776	-15,252	-22,659	-16,765	-16,983	3,73583	0,09978
8,9837	149,474	8,8846	151,159	10,3716	152,347	-0,0991	1,487	1,6842	-0,7623	10,6214	12,9554	8,49143	-114,87	-2,6505	117,522
12,7507	153,734	16,3194	153,635	18,5994	153,041	3,5687	2,28	-0,0991	-0,5944	27,4515	16,2857	-0,7623	-3,1288	35,1504	-32,022
18,0047	154,923	17,4099	156,607	19,0951	157,202	-0,5948	1,6852	1,6841	0,5944	-4,5754	12,0371	12,9546	4,24571	-27,93	-5,1712
33,0726	184,842	33,7665	183,059	33,8656	180,582	0,6939	0,0991	-1,7832	-2,4767	5,33769	0,70786	-13,717	-17,691	-6,6722	2,22846
35,9474	176,322	37,3352	175,232	38,3265	173,152	1,3878	0,9913	-1,0898	-2,0804	10,6754	7,08071	-8,3831	-14,86	-2,5902	5,94322
48,3388	177,313	50,5197	174,539	50,6188	171,468	2,1809	0,0991	-2,7739	-3,0711	16,7762	0,70786	-21,338	-21,936	-7,3677	0,21585
45,8605	177,313	48,7353	175,133	48,1405	171,864	2,8748	-0,5948	-2,1795	-3,2692	22,1138	-4,2486	-16,765	-23,351	-9,1702	3,02181
40,4083	176,322	43,3822	175,43	45,3649	172,755	2,9739	1,9827	-0,8917	-2,6748	22,8762	14,1621	-6,8592	-19,106	-2,9302	13,7339
30,6934	172,458	34,3613	172,26	37,0378	170,675	3,6679	2,6765	-0,1981	-1,5851	28,2146	19,1179	-1,5238	-11,322	-2,4801	49,4614
35,1543	168,991	36,7404	167,703	38,8222	165,821	1,5861	2,0818	-1,2879	-1,8822	12,2008	14,87	-9,9069	-13,444	1,68289	2,74661
1,7472	171,369	1,7472	177,015	7,9924	176,421	0	6,2452	-0,5944	0	44,6086	43,4369	-4,2457	0	-8,4442	8,44419
6,2081	173,152	5,7124	174,539	7,9924	174,043	-0,4957	2,28	1,3869	-3,8131	16,2857	10,6685	-3,5379	-40,546	-10,243	50,7895
3,6306	180,582	5,2167	181,275	6,8028	181,87	1,5861	1,5861	0,6935	0,5944	12,2008	11,3293	5,33462	4,24571	-0,5495	-1,5702
55,9719	177,61	53,791	179,294	50,4205	181,473	-2,1809	-3,3705	1,6842	-16,776	-24,075	12,9554	15,5679	3,34671	1,55117	-4,8979

ENSAIO DA GRADE MÉDIA 140 RPM																		
X1	Y1	X2	Y2	X3	Y3	X'	Y'	Y"	Vx1	Vx2	Vy1	Vy2	DVx/dx	Dvy/dy	DVz/dz	Vx		
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	1/s	1/s	1/s	mm/s		
22,8946	39,3134	21,6549	38,525	20,8661	37,3988	-1,2397	-0,7888	-0,7884	-1,1262	-9,5362	-5,6343	-6,0646	-8,0443	-3,1474	2,511	0,63643	-7,513	
19,6264	37,1735	18,9502	36,4978	18,1614	35,4842	-0,6762	-0,7888	-0,6757	-1,0136	-5,2015	-5,6343	-5,1977	-7,24	0,63997	3,02251	-3,6625	-5,4259	
23,0073	37,7366	21,7676	37,3988	20,7534	36,1599	-1,2397	-1,0142	-0,3378	-1,2389	-9,5362	-7,2443	-2,5985	-8,8493	-1,8487	18,5045	-16,656	-8,3478	
17,3725	35,3716	16,809	34,6958	16,2456	33,7948	-0,5635	-0,5634	-0,6758	-0,901	-4,3346	-4,0243	-5,1985	-6,4357	-0,5507	1,8308	-1,2801	-4,1737	
1,5951	13,7478	3,511	14,7614	5,6522	14,7614	1,9159	2,1412	1,0136	0	14,7377	15,2943	7,79692	0	0,29051	-7,6923	7,40179	15,0263	
7,9061	13,6352	9,1457	14,4235	11,0616	14,1983	1,2396	1,9159	0,7883	-0,2252	9,53538	13,685	6,06385	-1,6086	3,34754	-9,7329	6,38532	11,687	
14,3297	17,1265	15,9075	17,4644	17,0344	16,676	1,5778	1,1269	0,3379	-0,7884	12,1369	8,04929	2,59923	-5,6314	-2,5907	-24,358	26,949	10,0174	
12,4139	17,577	14,217	18,3654	16,1329	18,0275	1,8031	1,9159	0,7884	-0,3379	13,87	13,685	6,06462	-2,4136	-0,1026	-10,754	10,8563	13,7741	
76,3122	25,6859	74,5091	25,1228	73,3821	23,7713	-1,8031	-1,127	-0,5631	-1,3515	-13,87	-8,05	-4,3315	-9,6536	-3,2278	9,45131	-6,2235	-10,852	
73,0441	26,1364	71,1282	26,249	69,4378	25,7985	-1,9159	-1,6904	0,1126	-0,4505	-14,738	-12,074	0,86615	-3,2179	-1,3902	-36,27	37,6602	-13,357	
64,4792	27,0374	63,0142	27,8258	61,0983	27,7131	-1,465	-1,9159	0,7884	-0,1127	-11,269	-13,685	6,06462	-0,805	1,64899	-8,7134	7,06437	-12,522	
54,3366	34,4706	53,9985	35,7094	53,3224	36,4978	-0,3381	-0,6761	1,2388	0,7884	-2,6008	-4,8293	9,52923	5,63143	6,59129	-3,1464	-3,4449	-3,7563	
51,8573	37,8493	51,1811	39,2008	50,1669	40,1017	-0,6762	-1,0142	1,3515	0,9009	-5,2015	-7,2443	10,3962	6,435	3,02092	-2,9309	-0,09	-6,2607	
50,7304	36,1599	50,1669	37,3988	49,6034	38,0745	-0,5635	-0,5635	1,2389	0,6757	-4,3346	-4,025	9,53	4,82643	-0,5495	-3,7966	4,34602	-4,1741	
90,5119	55,5312	88,3706	55,0807	86,6802	54,0671	-2,1413	-1,6904	-0,4505	-1,0136	-16,472	-12,074	-3,4654	-7,24	-2,0535	8,37872	-6,3252	-14,191	
84,6517	53,7292	81,6089	52,603	78,7915	51,0262	-3,0428	-2,8174	-1,1262	-1,5768	-23,406	-20,124	-8,6631	-11,263	-1,0786	2,30845	-1,2299	-21,704	
83,5247	50,801	81,6089	50,4631	79,9185	49,6748	-1,9158	-1,6904	-0,3379	-0,7883	-14,737	-12,074	-2,5992	-5,6307	-1,3898	8,97154	-7,5817	-13,356	
42,8417	20,9557	43,4052	22,7577	44,0813	23,8839	0,5635	0,6761	1,802	1,1262	4,33462	4,82929	13,8615	8,04429	0,87785	-3,2282	2,35037	4,59111	
38,6719	25,2354	38,5593	27,2626	37,8831	28,7268	-0,1126	-0,6762	2,0272	1,4642	-0,8662	-4,83	15,5938	10,4586	35,2029	-2,5332	-32,67	-2,9215	
36,7561	23,0956	36,7561	24,5597	36,7561	25,7985	0	0	1,4641	1,2388	0	0	11,2623	8,84857	0	-1,6486	1,64861	0	
78,7915	16,4508	75,8614	16,4508	73,6075	15,5498	-2,9301	-2,2539	0	-0,901	-22,539	-16,099	0	-6,4357	-2,1979	0	2,19786	-19,2	
79,8058	10,5943	78,9042	12,0585	77,5519	12,6216	-0,9016	-1,3523	1,4642	0,5631	-6,9354	-9,6593	11,2631	4,02214	3,02119	-4,9453	1,92413	-8,3478	
71,9171	15,8877	70,114	15,775	68,4235	15,0993	-1,8031	-1,6905	-0,1127	-0,6757	-13,87	-12,075	-0,8669	-4,8264	-0,9955	35,1331	-34,138	-12,939	
66,9585	12,0585	65,6062	12,0585	64,0284	11,4953	-1,3523	-1,5778	0	-0,5632	-10,402	-11,27	0	-4,0229	0,64164	0	-0,6416	-10,852	
25,9374	9,4229	26,8389	10,5943	27,177	12,7342	0,9015	0,3381	1,3514	2,1399	6,93462	2,415	10,3954	15,285	-5,0134	3,61819	1,39525	4,59111	
7,6807	13,5226	9,2584	14,1983	11,287	13,8604	1,5777	2,0286	0,6757	-0,3379	12,1362	14,49	5,19769	-2,4136	1,49195	-11,264	9,77232	13,3567	
42,0528	32,6686	41,8274	34,2453	41,3766	35,0337	-0,2254	-0,4508	1,5767	0,7884	-1,7338	-3,22	12,1285	5,63143	6,59341	-4,1207	-2,4728	-2,5044	
40,137	36,2725	39,01	37,5114	38,1085	38,1871	-1,127	-0,9015	1,2389	0,6757	-8,6692	-6,4393	9,53	4,82643	-1,9787	-3,7966	5,77523	-7,513	
44,1544	16,4392	43,012	17,795	41,5839	18,3658	-1,1424	-1,4281	1,3558	0,5708	-8,7877	-10,201	10,4292	4,07714	1,23689	-4,6851	3,44823	-9,5204	
40,4414	17,2955	39,9416	18,6513	39,656	19,0794	-0,4998	-0,2856	1,3558	0,4281	-3,8446	-2,04	10,4292	3,05786	-3,6107	-5,4369	9,04759	-2,9089	
37,6567	17,5095	38,0851	19,5075	38,5849	20,2211	0,4284	0,4998	1,998	0,7136	3,29538	3,57	15,3692	5,09714	0,64103	-5,1412	4,50016	3,43778	
38,1565	14,4411	37,3711	15,6542	36,3	15,7969	-0,7854	-1,0711	1,2131	0,1427	-6,0415	-7,6507	9,33154	1,01929	2,04886	-6,8521	4,80321	-6,8759	

ENSAIO DA GRADE MÉDIA 160 RPM																
X1	Y1	X2	Y2	X3	Y3	X'	Y'	X''	Y''	Vx1	Vx2	Vy1	Vy2	DVx/dx	Dvy/dy	DVz/dz
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	1/s	1/s	1/s
4,7386	182,966	3,9403	183,604	2,9823	184,322	-0,7983	0,6382	0,718	-6,1408	-6,8429	4,90923	5,12857	0,87948	0,34369	-1,2232	
4,9781	185,997	3,7806	186,635	2,663	187,274	-1,1975	0,6382	0,6382	-9,2115	-7,9829	4,90923	4,55857	-1,026	-0,5495	1,57549	
6,8141	179,934	6,415	180,891	5,7763	181,689	-0,3991	0,9573	0,7978	-3,07	-4,5621	7,36385	5,69857	3,73877	-1,7396	-1,9992	
4,9781	178,737	4,2596	179,854	3,8605	180,652	-0,7185	1,1169	0,7978	-5,5269	-2,8507	8,59154	5,69857	-3,7247	-2,5902	6,31489	
15,1162	188,079	13,5995	189,356	11,9231	190,632	-1,5167	1,2764	1,2764	-11,667	-11,974	9,81846	9,11786	0,20265	-0,5489	0,34624	
8,5703	189,755	7,2132	190,552	6,3351	191,589	-1,3571	0,7978	1,0371	-10,439	-6,2721	6,13692	7,40786	-3,0706	1,59305	1,47753	
10,2467	186,324	8,9695	187,601	7,9317	188,558	-1,2772	1,2764	0,9573	-9,8246	-7,4129	9,81846	6,83786	-1,8883	-2,3352	4,22348	
9,4484	183,612	8,4905	184,569	7,5326	185,526	-0,9579	0,9574	0,9573	-7,3685	-6,8421	7,36462	6,83786	-0,5495	-0,5502	1,09965	
58,6227	158,721	57,984	161,354	57,2656	163,189	-0,6387	2,6326	1,8349	-4,9131	-5,1314	20,2508	13,1064	0,34187	-2,7138	2,37193	
56,8664	158,562	56,0682	161,434	55,2699	163,428	-0,7982	2,872	1,9944	-6,14	-5,7021	22,0923	14,2457	-0,5486	-2,7321	3,28066	
55,4295	160,077	54,3918	162,55	53,2742	164,385	-1,0377	2,4731	1,8349	-7,9823	-7,9829	19,0238	13,1064	0,00053	-2,3927	2,39218	
52,7154	158,96	51,8373	161,354	50,081	163,428	-0,8781	2,3933	2,0742	-6,7546	-12,545	18,41	14,8157	6,59422	-1,5018	-5,0924	
57,984	164,226	56,8664	166,3	55,9085	168,135	-1,1176	0,9579	2,0742	1,8349	-8,5969	15,9554	13,1064	-1,5701	-1,3735	2,94365	
54,2321	174,437	53,2742	175,554	52,3961	176,432	-0,9579	1,1169	0,8776	-7,3685	-6,2721	8,59154	6,26857	-1,1445	-2,0798	3,22434	
52,9549	174,038	51,7574	175,235	50,7197	176,192	-1,1975	1,1967	0,9573	-9,2115	-7,4121	9,20538	6,83786	-1,5026	-1,9784	3,48101	
49,6021	175,793	48,5643	176,671	47,1274	178,187	-1,0378	0,8776	1,5158	-7,9831	-10,264	6,75077	10,8271	2,19743	4,64491	-6,8423	
47,0476	173,879	45,93	174,517	44,8922	175,235	-1,1176	0,6382	0,718	-8,5969	-7,4129	4,90923	5,12857	-1,0595	0,34369	0,71579	
49,8415	171,964	48,5643	172,842	47,6862	173,32	-1,2772	0,8776	0,4786	-9,8246	-6,2721	6,75077	3,41857	-2,7815	-3,7969	6,5784	
50,081	173,959	49,0433	174,756	47,8458	176,033	-1,0377	0,7977	1,2765	-7,9823	-8,5536	6,13615	9,11786	0,55051	3,73788	-4,2884	
29,4853	177,628	28,8467	178,825	27,9686	180,101	-0,6386	0,8781	1,1967	1,2764	-4,9123	9,20538	9,11714	2,1294	-0,0737	-2,0557	
30,2836	179,383	29,5652	180,74	29,0862	181,857	-0,7184	1,3563	1,1168	-5,5262	-3,4214	10,4331	7,97714	-2,9297	-1,8108	4,7405	
27,33	184,17	26,1325	185,207	25,2544	186,005	-1,1975	0,8781	1,0371	0,7978	-9,2115	7,97769	5,69857	-2,4546	-2,1976	4,6522	
26,7712	186,962	25,4141	187,999	23,7377	189,356	-1,3571	1,6764	1,0371	1,3562	-10,439	7,97769	9,68714	1,13113	1,6483	-2,7794	
23,1789	182,894	21,742	184,011	20,7841	185,048	-1,4369	0,9579	1,1169	1,0371	-11,053	8,59154	7,40786	-2,9306	-1,0598	3,99036	
21,263	183,053	20,1454	184,409	19,1875	185,766	-1,1176	0,9579	1,3562	-8,5969	-6,8421	10,4323	9,68714	-1,5701	-0,5495	2,11958	
18,8682	184,011	17,5909	185,287	16,7128	186,563	-1,2773	1,2765	1,2764	-9,8254	-6,2721	9,81923	9,11714	-2,7818	-0,55	3,33185	
32,2793	184,33	30,3634	186,404	28,0484	188,319	-1,9159	2,0742	1,9147	-14,738	-16,536	15,9554	13,6764	0,93847	-1,0987	0,16024	
17,3514	157,126	14,7171	156,966	12,8012	156,727	-2,6343	-1,9159	-0,2394	-20,264	-13,685	-1,2269	-1,71	-2,4974	3,0287	-0,5313	
12,8012	157,046	11,045	157,684	9,3686	157,764	-1,7562	0,6382	0,0798	-13,509	-11,974	4,90923	0,57	-0,874	-6,7992	7,67319	
8,4107	157,764	6,8141	157,923	5,6167	157,844	-1,5966	0,1595	-0,0798	-12,282	-8,5529	2,12692	-0,57	-2,3354	-11,266	13,6014	
8,251	156,487	6,4948	156,567	5,0579	156,487	-1,7562	0,0798	-0,0798	-13,509	-10,264	0,61385	-0,57	-1,8481	-14,835	16,6833	
4,7386	156,647	3,2218	157,126	1,8648	157,205	-1,5168	0,4786	0,0798	-11,668	-9,6929	3,68154	0,57	-1,302	-6,5013	7,80331	
20,9437	159,599	18,469	160,157	15,9944	160,317	-2,4747	0,5585	0,1595	-19,036	-17,676	4,29615	1,13929	-0,5497	-5,6524	6,20214	

ENSAIO DA GRADE MÉDIA 180 RPM																
X1	Y1	X2	Y2	X3	Y3	X'	Y'	X''	Y''	Vx1	Vx2	Vy1	Vy2	DVx/dx	DVy/dy	DVz/dz
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	1/s	1/s	1/s
7,6012	185,289	9,7913	186,018	11,1784	188,28	2,1901	1,3871	0,7295	2,2617	16,8469	9,90786	5,61154	16,155	-3,1684	14,453	-11,285
6,5792	186,018	8,6963	186,529	9,4993	188,645	2,1171	0,803	0,5107	2,1158	16,2854	5,73571	3,92846	15,1129	-4,9831	21,9001	-16,917
10,4483	177,482	8,9883	177,701	8,1122	178,723	-1,46	-0,8761	0,2189	1,0214	-11,231	-6,2579	1,68385	7,29571	-3,4061	25,6367	-22,231
9,4263	164,131	7,5282	164,423	5,8491	164,496	-1,8981	-1,6791	0,2918	0,073	-14,601	-11,994	2,24462	0,52143	-1,3736	-5,9054	7,27895
3,367	165,518	1,1039	165,663	-0,4291	166,32	-2,2631	-1,533	0,1459	0,6566	-17,408	-10,95	1,12231	4,69	-2,8538	24,453	-21,599
17,8947	176,534	16,5806	178,431	14,1715	181,13	-1,3141	-2,4091	1,8968	2,6994	-10,108	-17,208	14,5908	19,2814	5,40248	2,47293	-7,8754
23,1509	176,023	20,5228	179,087	17,4567	182,662	-2,6281	-3,0661	3,0641	3,5749	-20,216	-21,901	23,57	25,535	0,64098	0,6413	-1,2823
26,5091	176,753	24,538	179,671	24,0269	182,881	-1,9711	-0,5111	2,9183	3,2101	-15,162	-3,6507	22,4485	22,9293	-5,8402	0,16476	5,67543
27,3851	178,942	25,925	181,714	26,071	185,216	-1,4601	0,146	2,7724	3,5019	-11,232	1,04286	21,3262	25,0136	-8,4065	1,33005	7,0765
33,3714	170,697	31,4003	173,251	30,0862	176,096	-1,9711	-1,3141	2,5535	2,8453	-15,162	-9,3864	19,6423	20,3236	-2,9303	0,2668	2,66349
33,9554	167,998	30,3782	171,062	28,3341	174,199	-3,5772	-2,0441	3,0642	3,1371	-27,517	-14,601	23,5708	22,4079	-3,6107	-0,3795	3,99022
31,1813	167,852	26,9471	171,135	24,1	173,762	-4,2342	-2,8471	3,2831	2,6264	-32,571	-20,336	25,2546	18,76	-2,8894	-1,9782	4,86761
27,5311	166,174	24,684	168,509	21,1798	171,427	-2,8471	-1,4601	0,3647	1,2403	-17,408	-10,429	2,80538	8,85929	-3,0839	16,5997	-13,516
18,1867	167,269	15,9236	167,633	14,4635	168,874	-2,2631	-1,4601	0,3647	1,2403	-21,901	-11,994	11,7854	9,38071	-1,8246	0,18921	1,6354
23,3699	164,934	20,5228	166,466	18,8437	167,779	-2,8471	-1,6791	1,5321	1,3133	-21,901	-11,994	16,2754	16,6757	-1,8246	0,18921	1,6354
26,144	163,621	24,1	165,736	22,4209	168,071	-2,044	-1,6791	2,1158	2,3346	-15,723	-12,515	17,9585	14,5914	-2,6502	-1,4422	4,09244
37,0945	169,092	34,6124	171,427	32,8603	173,47	-2,4821	-1,7521	2,3346	2,0428	-19,093	-12,515	20,2038	25,0136	2,57528	1,83123	-4,4065
33,2254	175,221	32,0573	177,847	30,3782	181,349	-1,1681	-1,6791	2,6265	3,5019	-8,9854	-11,994	12,3469	15,6336	2,36045	2,04763	-4,4081
47,534	166,977	45,5629	168,582	42,7888	170,77	-1,9711	-2,7741	1,6051	2,1887	-15,162	-19,815	12,3469	17,7186	-1,8881	1,64899	0,23914
41,1827	173,178	40,0147	175,075	39,0656	177,555	-1,168	-0,9491	1,8968	2,4806	-8,9846	-6,7793	14,5908	10,9436	-10,55	-0,1921	10,7421
38,1896	177,847	37,4595	179,306	37,7516	180,838	-0,7301	0,2921	1,4591	1,5321	-5,6162	2,08643	11,2238	10,9436	-10,55	-0,1921	10,7421
46,658	178,431	46,658	180,109	46,804	182,225	0	0,146	1,678	2,1158	0	1,04286	12,9077	15,1129	0	1,31416	-1,3142
50,6731	181,422	50,3081	183,392	50,0891	186,237	-0,365	-0,219	1,9698	2,8453	-2,8077	-1,5643	15,1523	20,3236	-3,4066	2,62527	0,78132
53,2282	182,662	53,8123	185,143	54,1773	187,988	0,5841	0,365	2,4806	2,8453	4,49308	2,60714	19,0815	20,3236	-3,2288	0,5007	2,72809
50,6001	174,053	49,6511	175,586	49,5781	177,847	-0,949	-0,073	1,5321	2,2617	-7,3	-0,5214	11,7854	16,155	-7,1429	2,85204	4,29081
49,4321	162,745	50,0161	165,59	51,1112	167,779	0,584	1,0951	2,8453	2,1888	4,49231	7,82214	12,8869	15,6343	5,70177	-2,1975	-3,5042
52,4982	168,144	51,2572	169,822	51,2572	171,208	-1,241	0	1,678	1,3862	-9,5462	0	12,9077	9,90143	-7,6923	-1,7916	9,48388
56,0024	169,092	54,8343	170,406	55,1263	172,23	-1,1681	0,292	1,3132	1,8239	-8,9854	2,08571	10,1015	13,0279	-9,4779	2,22839	7,24948
57,0974	170,989	55,7834	172,521	55,7834	174,637	-1,314	0	1,5321	2,1158	-10,108	0	11,7854	15,1129	-7,6923	2,17184	5,52047
50,7461	156,544	51,4032	158,733	53,0822	159,754	0,6571	1,679	2,1887	1,0214	5,05462	11,9929	16,8362	7,29571	10,5589	-4,359	-6,1999
52,7172	157,93	53,9583	159,9	55,4183	161,213	1,2411	1,46	1,9698	1,3132	9,54692	10,4286	15,1523	9,38	0,71038	-2,9304	2,22003
56,2944	161,578	57,3894	164,423	58,2655	167,123	1,095	0,8761	2,8453	2,6994	8,42308	6,25786	21,8869	19,2814	-1,9774	-0,9157	2,89309
52,4252	168,217	51,1112	169,749	51,1842	171,354	-1,314	0,073	1,5321	1,605	-10,108	0,52143	11,7854	11,4643	-8,0891	-0,2096	8,29871

ENSAIO DA GRADE MÉDIA 210 RPM																
X1	Y1	X2	Y2	X3	Y3	X'	X''	Y'	Y''	Vx1	Vx2	Vy1	Vy2	DVx/dx	DVy/dy	DVz/dz
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	1/s	1/s	1/s
82,2699	161,28	83,4189	163,462	82,3848	165,873	1,149	-1,0341	2,1816	2,4113	8,83846	-7,3864	16,7815	17,2236	-14,121	0,20262	13,9183
84,9126	164,151	85,2573	165,644	85,1424	167,136	0,3447	-0,1149	1,4927	1,4927	2,65154	-0,8207	11,4823	10,6621	-10,073	-0,5495	10,6227
81,2358	166,562	78,9379	167,022	77,9038	168,285	-2,2979	-1,0341	0,4593	1,2631	-17,676	-7,3864	3,53308	9,02214	-4,4779	11,9509	-7,4731
76,2952	158,639	78,2485	158,639	79,972	161,165	1,9533	1,7235	0	2,5261	15,0254	12,3107	0	18,0436	-1,3898	0	1,38979
119,497	161,969	119,612	164,725	120,186	167,94	0,1149	0,5744	2,7558	3,2151	0,88385	4,10286	21,1985	22,965	28,0158	0,64103	-28,657
116,969	163,577	116,969	165,529	117,888	167,366	0	0,9192	1,952	1,8372	0	6,56571	15,0154	13,1229	0	-0,9695	0,96953
124,552	140,956	125,242	144,286	124,437	146,353	0,6893	-0,8042	3,33	2,0668	5,30231	-5,7443	25,6154	14,7629	-16,026	-3,259	19,2848
123,518	147,387	121,565	150,142	120,646	151,75	-1,9533	-0,9192	2,7558	1,6075	-15,025	-6,5657	21,1985	11,4821	-4,331	-3,5258	7,85673
120,531	152,898	118,922	154,85	119,152	158,065	-1,6085	0,2298	1,952	3,2151	-12,373	1,64143	15,0154	22,965	-8,7128	4,07255	4,64023
122,599	177,585	125,127	177,241	127,769	176,963	0,3447	1,3788	3,4448	3,5595	2,65154	9,84857	26,4985	25,425	20,8791	-0,3116	-20,568
125,586	175,174	127,999	174,715	130,297	174,485	2,4129	2,2979	-0,4593	-0,2296	18,5608	16,4136	-3,5331	-1,64	-0,8899	-4,1217	5,01154
126,965	172,763	129,608	171,959	132,825	171,615	2,6426	3,2172	-0,8038	-0,3444	20,3277	22,98	-6,1831	-2,46	1,00367	-4,6318	3,62817
136,961	172,303	139,259	170,926	142,361	169,777	2,2979	3,1023	-1,3779	-1,1482	17,6762	22,1593	-10,599	-8,2014	1,95097	-1,7402	-0,2108
135,238	170,811	136,846	169,777	139,029	168,744	1,6086	2,1831	-1,0334	-1,0334	12,3738	15,5936	-7,9492	-7,3814	2,00157	-0,5495	-1,4521
160,056	194,579	159,251	191,135	158,562	187,92	-0,8043	-0,6893	-3,4448	-3,2151	-6,1869	-4,9236	-26,498	-22,965	-11,5707	-1,0257	2,59648
154,196	190,216	154,77	188,838	155,23	187,116	0,5745	0,4596	-1,3779	-1,7223	4,41923	3,28286	-10,599	-12,302	-1,978	1,23587	0,74215
147,302	186,771	149,025	185,393	150,634	184,245	1,7234	1,6086	-1,3779	-1,1482	13,2569	11,49	-10,599	-8,2014	-1,0253	-1,7402	2,76544
151,783	185,279	153,736	183,441	155,115	181,719	1,9532	1,3788	-1,8372	-1,7224	15,0246	9,84857	-14,132	-12,303	-2,65	-0,9958	3,64581
157,643	182,523	161,549	182,523	163,962	183,097	3,9065	2,4128	0	0,5741	30,05	17,2343	0	4,10071	-3,2806	0	3,28061
149,37	182,293	152,587	180,686	155	179,078	3,2172	2,4128	-1,6075	-1,6075	24,7477	17,2343	-12,365	-11,482	-2,3354	-0,5495	2,88484
148,681	180,112	151,898	179,193	154,655	177,7	3,2171	2,7575	-0,9186	-1,4927	24,7469	19,6964	-7,0662	-10,662	-1,5699	3,91464	-2,3448
155,804	179,078	159,251	178,274	163,273	179,193	3,4469	4,0215	-0,8038	0,9186	26,5146	28,725	-6,1831	6,56143	0,64127	-15,855	15,2141
165,571	180,571	168,673	182,064	169,822	184,705	3,1022	1,149	1,4927	2,641	23,8631	8,20714	11,4823	18,8643	-5,0467	4,94539	0,10133
164,766	179,767	168,328	179,652	170,167	181,26	3,5618	1,8384	-0,1148	1,6075	27,3985	13,1314	-0,8831	11,4821	-4,0056	-107,71	111,717
169,707	178,848	171,89	180,226	171,89	183,441	2,1831	0	1,3779	3,2151	16,7931	0	10,5992	22,965	-7,6923	8,97436	-1,2821
117,429	191,594	121,335	193,316	122,829	193,89	3,9065	1,4937	1,7224	0,5741	30,05	10,6693	13,2492	4,10071	-4,9611	-5,3115	10,2726
113,407	188,953	116,165	190,101	117,888	189,527	2,7575	1,7235	1,1482	-0,5741	21,2115	12,3107	8,83231	-4,1007	-3,2279	-11,264	14,4916
121,105	188,494	123,863	188,264	126,62	187,46	2,7576	2,7575	-0,2297	-0,8038	21,2123	19,6964	-1,7669	-5,7414	-0,5497	17,303	-16,753
127,884	189,068	131,561	187,575	134,319	187,231	3,6767	2,7575	-1,4927	-0,3445	28,2823	29,6964	-11,482	-2,4607	-2,3352	-6,0438	8,37902
126,965	190,561	130,297	189,757	133,629	189,872	3,332	3,3321	-0,8038	0,1149	25,6308	23,8007	-6,1831	0,82071	-0,5492	-8,7134	9,26259
137,191	189,412	138,8	187,805	140,638	187,345	1,6086	1,8383	-1,6076	-0,4593	12,3738	13,1307	-12,366	-3,2807	0,47051	-5,6516	5,18104
137,536	191,364	139,719	189,986	141,442	189,642	2,183	1,7235	-1,3779	-0,3445	16,7923	12,3107	-10,599	-2,4607	-2,053	-5,9065	7,95942

ENSAIO DA GRADE MÉDIA 240 RPM																		
X1	Y1	X2	Y2	X3	Y3	X'	Y'	X''	Y''	Vx1	Vx2	Vy1	Vy2	DVx/dx	Dvy/dy	DVz/dz		
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	1/s	1/s	1/s		
15,6558	169,192	13,7879	171,37	12,0239	173,236	-1,8679	2,1778	-1,764	1,8666	-14,368	-12,6	16,7523	13,3329	-0,9468	-1,5701	2,5169		
9,7409	166,392	8,4957	168,155	6,9392	169,918	-1,2452	1,7629	-1,5565	1,763	-9,5785	-11,118	13,5608	12,5929	1,23626	-0,549	-0,6872		
16,0709	157,059	14,5143	159,962	13,0615	162,762	-1,5566	2,9037	-1,4528	2,8	-11,974	-10,377	22,3362	20	-1,0258	-0,8045	1,83031		
15,1369	155,503	13,5804	158,199	12,2314	160,999	-1,5565	2,6963	-1,349	2,8	-11,973	-9,6357	20,7408	20	-1,5017	-0,2747	1,77641		
11,9201	154,259	10,7786	157,059	9,8447	159,651	-1,1415	2,8	-0,9339	2,5926	-8,7808	-6,6707	21,5385	18,5186	-1,8485	-1,0785	2,92703		
30,1835	146,999	26,1365	148,659	22,7121	150,94	-4,047	1,6592	-3,4244	2,2815	-31,131	-24,46	12,7631	16,2964	-1,6483	2,12955	-0,4812		
28,7307	148,762	25,3063	151,562	22,4008	154,051	-3,4244	2,8	-2,9055	2,4889	-26,342	-20,754	21,5385	17,7779	-1,6318	-1,3431	2,97488		
25,0988	153,222	23,231	156,333	21,9857	159,651	-1,8678	3,1111	-1,2453	3,1185	-14,368	-8,895	23,9315	23,7036	-2,93	-0,0733	3,0033		
20,948	157,059	20,948	159,755	22,4008	162,347	0	2,6963	1,4528	2,5926	0	10,3771	20,7408	18,5186	0	-0,8242	0,82417		
19,8066	156,54	19,2877	159,755	19,3915	162,347	-0,5189	3,2148	0,1038	2,5926	-3,9915	0,74143	24,7292	18,5186	-9,1212	-1,9319	11,0531		
22,9196	146,066	19,9103	149,073	17,4199	152,081	-3,0093	3,0074	-2,4904	3,0074	-23,148	-17,789	23,1338	21,4814	-1,7811	-0,5495	2,33056		
15,3445	147,103	13,5804	149,799	11,9201	152,599	-1,7641	2,6963	-1,6603	2,8	-13,57	-11,859	20,7408	20	-0,9697	-0,2747	1,24447		
11,0899	150,422	9,4296	152,081	7,5618	153,429	-1,6603	1,6592	-1,8678	1,3482	-12,772	-13,341	12,7631	9,63	0,34325	-1,8883	1,54506		
7,2505	152,599	5,3826	153,118	3,2035	153,74	-1,8679	0,5185	-2,1791	0,6222	-14,368	-15,565	3,98846	4,44429	0,64058	0,87912	-1,5197		
48,7582	165,044	50,211	163,177	51,8713	161,31	1,4528	-1,8667	1,6603	-1,8667	11,1754	11,8593	-14,359	-13,334	0,47075	-0,5495	0,0787		
47,4092	164,525	48,2394	163,384	49,5884	161,829	0,8302	-1,1407	1,349	-1,5556	6,38615	9,63571	-8,7746	-11,111	3,91419	2,04858	-5,9628		
50,6261	157,37	50,1072	155,192	49,8997	152,91	-0,5189	-2,1778	-0,2075	-2,2814	-3,9915	-1,4821	-16,752	-16,296	-4,836	-0,2097	5,04565		
39,419	164,007	40,9755	163,592	42,3245	162,866	1,5565	-0,4148	1,349	-0,7259	11,9731	9,63571	-3,1908	-5,185	-1,5017	4,80769	-3,306		
42,3245	161,414	43,1547	160,584	43,9848	159,236	0,8302	-0,8296	0,8301	-1,3481	6,38615	5,92929	-6,3815	-9,6293	-0,5503	3,91484	-3,3645		
44,7112	163,073	45,9565	162,244	46,8904	161,31	1,2453	-0,8296	0,9339	-0,9334	9,57923	6,67071	-6,3815	-6,6671	-2,3356	0,34427	1,99133		
47,3055	160,17	47,8243	159,547	49,1733	157,784	0,5188	-0,6222	1,349	-1,763	3,99077	9,63571	-4,7862	-12,593	10,8808	12,5469	-23,428		
49,3808	145,859	46,3715	145,34	43,1547	144,925	-3,0093	-0,5185	-3,2168	-0,4148	-23,148	-22,977	-3,9885	-2,9629	-0,0569	-1,978	2,03495		
38,7964	153,74	35,5795	153,014	32,4664	152,807	-3,2169	-0,7259	-3,1131	-0,2074	-24,745	-22,236	-5,5838	-1,4814	-0,7799	-5,6515	6,43142		
28,2119	160,273	31,0137	162,866	33,7117	162,97	2,8018	2,5926	2,698	0,1037	21,5523	19,2714	19,9431	0,74071	-0,8141	-7,4066	8,22068		
34,023	155,607	31,325	155,607	28,7307	156,747	-2,698	0	-2,5943	0	-20,754	-18,531	0	8,14857	-0,824	0	0,82399		
28,1081	163,281	28,3157	165,355	28,4194	167,221	0,2076	2,0741	0,1037	1,8666	1,59692	0,74071	15,9546	13,3329	-4,1243	-1,264	5,38837		
13,3729	185,162	12,6465	186,199	11,9201	187,029	-0,7264	1,037	-0,7264	0,8297	-5,5877	-5,1886	7,97692	5,92643	-0,5495	-1,9773	2,52678		
10,9862	189,207	10,2598	189,932	8,3919	189,725	-0,7264	0,7259	-1,8679	-0,2074	-5,5877	-13,342	5,58385	-1,4814	10,6752	-9,7331	-0,9421		
68,3706	187,755	66,5028	188,481	65,4651	190,451	-1,8678	0,7259	-1,0377	1,9704	-14,368	-7,4121	5,58385	14,0743	-3,7239	11,6964	-7,9725		
63,1822	186,925	61,2106	187,755	59,3427	189,31	-1,9716	0,8297	-1,8679	1,5555	-15,166	-13,342	6,38231	11,1107	-0,9251	5,69894	-4,7738		
61,3143	185,473	59,3427	185,888	58,0975	187,34	-1,9716	0,4148	-1,2452	1,4519	-15,166	-8,8943	3,19077	10,3707	-3,1811	17,3094	-14,128		
70,2385	175,414	69,3046	177,799	69,2008	180,184	-0,9339	2,3852	-0,1038	2,3851	-7,1838	-0,7414	18,3477	17,0364	-6,8984	-0,5498	7,44815		
59,9653	175,933	56,956	175,621	54,258	176,451	-3,0093	-0,3111	-2,698	0,8296	-23,148	-19,271	-2,3931	5,92571	-1,2884	-26,74	28,0283		

X1	Y1	ENSAIO DA GRADE LARGA 200 RPM										Y'	Y"	Vx1	Vx2	Vy1	Vy2	DVx/dx	Dvy/dy	DVz/dz
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	1/s	1/s	1/s
7,7959	190,136	6,4983	193,306	4,4799	196,188	-1,2976	-2,0184	3,1697	2,8817	-9,9815	-14,417	24,3823	20,5836	3,41831	-1,1985	-2,2199				
7,7238	186,534	6,21	189,272	4,552	191,433	-1,5138	-1,658	2,7375	2,1612	-11,645	-11,843	21,0577	15,4371	0,13096	-2,0532	1,92221				
5,2008	186,534	3,9032	189,272	2,3894	191,361	-1,2976	-1,5138	2,7375	2,0892	-9,9815	-10,813	21,0577	14,9229	0,64066	0	-0,6407				
2,029	183,797	0,2989	186,534	-1,3591	188,696	-1,7301	-1,658	2,7376	2,1612	-13,308	-11,843	21,0585	15,4371	-0,8471	-2,0534	2,9005				
9,2376	180,051	7,2913	182,212	5,2729	183,941	-1,9463	-2,0184	2,1612	1,729	-14,972	-14,417	16,6246	12,35	-0,2848	-1,9779	2,26274				
13,5628	173,495	12,3373	175,296	10,8956	176,737	-1,2255	-1,4417	1,801	1,4408	-9,4269	-10,298	13,8538	10,2914	0,71068	-1,978	1,26735				
8,2284	176,449	6,1379	178,322	4,1195	179,618	-2,0905	-2,0184	1,8731	1,2967	-16,081	-14,417	14,4085	9,26214	-0,7958	-2,7475	3,54329				
3,8311	177,385	2,3173	179,69	0,5872	181,419	-1,5138	-1,7301	2,3053	1,729	-11,645	-12,358	17,7331	12,35	0,47116	-2,3351	1,86393				
14,0674	162,113	13,4907	164,994	13,1303	168,596	-0,5767	-0,3604	2,8816	3,602	-4,4362	-2,5743	22,1662	25,7286	-3,2285	1,23626	1,99222				
12,121	164,85	11,4723	167,011	11,256	168,596	-0,6487	-0,2163	2,1612	1,5849	-4,99	-1,545	16,6246	11,3207	-5,3106	-2,4541	7,76477				
8,733	164,13	8,2284	166,219	7,868	167,804	-0,5046	-0,3604	2,0892	1,5849	-3,8815	-2,5743	16,0708	11,3207	-2,5907	-2,2736	4,8643				
5,2008	161,969	5,2008	164,274	4,9124	165,931	0	-0,2884	2,3053	1,6569	0	-2,06	17,7331	11,835	0	-2,5585	2,55849				
6,9308	166,651	6,2821	168,596	5,417	169,893	-0,6487	-0,8651	1,9451	1,2967	-4,99	-6,1793	14,9623	9,26214	1,83334	-2,9305	1,09719				
5,6333	174,432	4,6241	176,016	2,9661	177,313	-1,0092	-1,658	1,5849	1,2967	-7,7631	-11,843	12,1915	9,26214	4,04259	-1,8483	-2,1943				
1,5965	176,233	0,5152	178,034	-0,7103	179,618	-1,0813	-1,2255	1,801	1,5849	-8,3177	-8,7536	13,8538	11,3207	0,40311	-1,4065	1,00341				
1,0198	178,25	-0,0615	180,195	-1,287	181,78	-1,0813	-1,2255	1,9451	1,5849	-8,3177	-8,7536	14,9623	11,3207	0,40311	-1,8722	1,46908				
11,4002	182,14	9,598	184,013	7,5075	185,238	-1,8022	-2,0905	1,873	1,2247	-13,863	-14,932	14,0737	8,74786	0,5932	-3,0218	2,4286				
16,5904	182,86	14,4999	186,39	13,3465	188,119	-2,0905	-1,1534	3,53	1,7289	-16,081	-8,2386	27,1538	12,3493	-3,7514	-4,1939	7,94528				
22,7898	179,258	20,9877	181,275	18,1763	182,5	-1,8021	-2,8114	2,0171	1,2247	-13,862	-20,081	15,5162	8,74786	3,45104	-3,3555	-0,0956				
22,069	184,733	20,6993	185,886	19,0413	186,606	-1,3697	-1,658	1,1527	0,7204	-10,536	-11,843	8,86692	5,14571	0,95401	-3,2283	2,27425				
42,4694	184,013	39,5138	184,805	36,4862	185,021	-2,9556	-3,0276	0,7925	0,2161	-22,735	-21,626	6,09615	1,54357	-0,3754	-5,7446	6,12003				
41,2439	181,203	37,8558	182,14	35,2607	182,428	-3,3881	-2,5951	0,9365	0,2882	-26,062	-18,536	7,20385	2,05857	-2,2213	-5,4942	7,71542				
28,2684	187,903	26,1058	190,424	24,2315	192,298	-2,1626	-1,8743	2,5214	1,8731	-16,635	-13,388	19,3954	13,3793	-1,5017	-2,386	3,88769				
27,115	183,797	25,3849	185,886	23,0782	187,543	-1,7301	-2,3067	2,0892	1,6569	-13,308	-16,476	16,0708	11,835	1,83109	-2,0275	0,19637				
40,8114	185,814	38,1442	186,39	35,4049	186,462	-2,6672	-2,7393	0,5764	0,072	-20,517	-19,566	4,43385	0,51429	-0,3564	-6,8001	7,15643				
32,5935	190,569	31,296	192,153	29,8543	192,874	-1,2975	-1,4417	1,5849	0,7204	-9,9808	-10,298	12,1915	5,14571	0,24438	-4,4456	4,20121				
59,1213	176,16	56,8866	177,097	55,517	177,169	-2,2347	-1,3696	0,9366	0,072	-17,19	-9,7829	7,20462	0,51429	-3,3146	-7,1432	10,4578				
53,5706	178,178	50,3988	178,97	48,02	178,97	-3,1718	-2,3788	0,7924	0	-24,398	-16,991	6,09538	0	-2,3353	-7,6923	10,0276				
45,7853	178,682	40,523	178,682	36,0537	178,538	-5,2623	-4,4693	0	-0,1441	-40,479	-31,924	0	-1,0293	-1,6258	0	1,62584				
48,2363	175,584	44,7761	176,521	41,3881	176,953	-3,4602	-3,388	0,9365	0,4323	-26,617	-24,2	7,20385	3,08786	-0,6985	-4,3951	5,09357				
42,1089	180,195	38,2884	181,059	35,0445	181,419	-3,8205	-3,2439	0,8645	0,3602	-29,388	-23,171	6,65	2,57286	-1,6275	-4,7162	6,34366				
55,3728	173,495	53,1381	174,864	50,8314	175,44	-2,2347	-2,3067	1,3687	0,5763	-17,19	-16,476	10,5285	4,11643	-0,3193	-4,6848	5,00408				
48,02	192,874	46,0737	191,361	43,6227	189,488	-1,9463	-2,451	-1,5128	-1,8731	-14,972	-17,507	-11,637	-13,379	1,30278	-1,15175	-2,4545				

ENSAIO DA GRADE LARGA 220 RPM																
X1	Y1	X2	Y2	X3	Y3	X'	Y'	X''	Y''	Vx1	Vx2	Vy1	Vy2	DVx/dx	Dvy/dy	DVz/dz
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	1/s	1/s	1/s
15,0159	192,338	18,5761	192,672	21,5801	192,449	3,5602	0,3335	-0,2223	27,3862	21,4571	2,56538	-1,5879	-12,453	-1,6654	-12,453	14,1189
20,1338	191,337	23,3603	191,56	25,808	190,559	3,2265	0,2224	-1,0007	24,8192	17,4836	1,71077	-7,1479	-39,832	-2,2736	-39,832	42,1055
26,4755	190,114	28,4782	190,114	30,2583	189,67	2,0027	0	-0,4447	15,4054	12,715	0	-3,1764	-1,3434	-1,3434	0	1,34338
6,3377	194,451	9,1191	194,339	12,1231	194,006	2,7814	3,004	-0,1112	21,3954	21,4571	-0,8554	-2,3829	0,2222	13,7363	-13,758	
5,7814	190,781	7,6728	191,115	10,1205	191,337	1,8914	2,4477	0,3335	0,2224	14,5492	17,4836	2,56538	1,58857	1,55141	-2,929	1,37756
6,7827	186	7,8953	186,779	9,2304	187,335	1,1126	0,7783	0,5559	8,55846	9,53643	5,98692	3,97071	0,87899	-2,5905	1,71154	
5,1138	180,219	4,8913	182,331	4,0012	183,332	-0,2225	2,1126	1,0007	0,4448	4,27923	7,15214	8,55308	7,14786	20,8823	-4,3089	-16,573
2,6661	185,333	3,2224	186,445	4,2237	186,89	0,5563	1,0013	1,1119	1,4454	-10,27	-8,7421	11,1185	7,14786	-1,444	-2,7471	3,89144
4,6688	173,992	3,3337	175,437	2,1098	176,438	-1,3351	-1,2239	1,4454	1,0007	-7,7023	-7,9471	16,25	7,94214	0,24452	-3,9327	3,6882
7,339	176,105	5,7814	177,772	4,1125	179,218	-1,5576	1,6679	1,4454	-11,982	-11,921	12,83	10,3243	-0,039	-1,5023	1,54137	
11,5668	179,551	10,788	181,442	9,6754	182,442	-0,7788	-1,1126	1,8902	1,0007	-5,9908	-7,9471	14,54	7,14786	2,51204	-3,9108	1,39874
11,7893	184,555	13,792	185,889	16,1284	186,779	2,0027	2,3364	1,3343	0,8895	15,4054	16,6886	10,2638	6,35357	0,64073	-2,9306	2,28985
16,5735	187,335	19,2437	187,557	22,804	187,446	2,6702	3,5603	0,2224	-0,1112	20,54	25,4307	1,71077	-0,7943	1,83159	-11,264	9,43215
17,6861	186,223	20,0225	186,556	22,3589	186,112	2,3364	2,3364	0,3336	-0,4447	17,9723	16,6886	2,56615	-3,1764	-0,5495	-17,214	17,7634
22,1364	186,779	25,4742	186,112	28,2557	184,332	3,3378	2,7815	-0,6671	-1,7791	25,6754	19,8679	-5,1315	-12,708	-1,7399	11,3571	-9,6172
20,9126	182,442	23,6941	182,331	25,808	180,997	2,7815	2,1139	-0,1112	-1,3343	21,3962	15,0993	-0,8554	-9,5307	-2,2638	78,0156	-75,752
19,0212	177,328	17,3523	178,995	16,2397	180,441	-1,6689	-1,1126	1,6678	1,4455	-12,838	-7,9471	12,8292	10,325	-2,9304	-1,5015	4,43192
32,8173	179,551	35,265	178,217	37,2676	176,883	2,4477	2,0026	-1,3343	-1,3343	18,8285	14,3043	-10,264	-9,5307	-1,8483	-0,5495	2,39779
28,2557	168,544	27,5881	169,767	26,253	170,656	-0,6676	-1,3351	1,2231	0,8895	-5,1354	-9,5364	9,40846	6,35357	6,59234	-2,4977	-4,0947
28,3669	171,879	27,6994	172,769	26,698	173,325	-0,6675	-1,0014	0,8895	0,5559	-5,1346	-7,1529	6,84231	3,97071	3,02358	-3,2283	0,20474
26,5868	175,104	25,3629	175,993	24,6954	176,438	-1,2239	-0,6675	0,8895	0,4448	-9,4146	-4,7679	6,84231	3,17714	-3,7967	-4,1205	7,91716
14,4596	166,987	12,7907	168,321	10,8993	169,656	-1,6689	-1,8914	1,3343	1,3342	-12,838	-13,51	10,2638	9,53	0,40284	-0,55	0,14714
38,4915	174,103	40,9392	173,77	42,3855	172,435	2,4477	1,4463	-0,3335	-1,3343	18,8285	10,3307	-2,5654	-9,5307	-3,4717	20,8855	-17,414
18,9099	154,979	21,9139	156,758	24,4729	157,425	3,004	2,559	1,779	0,6671	23,1077	18,2786	13,6846	4,765	-1,6076	-5,0138	6,6214
19,355	151,866	20,5788	153,533	22,3589	154,534	1,2238	1,7801	1,6679	1,0007	9,41385	12,715	12,83	7,14786	2,69746	-3,4068	0,7093
13,1245	147,529	13,0132	149,753	12,9019	153,089	-0,1113	-0,1113	2,2238	3,356	-0,8562	-0,795	17,1062	23,8257	-0,5495	3,02166	-2,4722
14,7933	147,974	14,5708	150,42	14,4596	153,645	-0,2225	-0,1112	2,4461	3,2244	-1,7115	-0,7943	18,8162	23,0314	4,1225	1,72326	2,39922
16,4622	149,419	16,6847	151,754	18,1311	154,089	0,2225	1,4464	2,335	2,3349	1,71154	10,3314	17,9615	16,6779	38,7411	-0,5498	-38,191
20,8013	145,639	21,4689	148,196	22,9152	149,753	0,6676	1,4463	2,5573	1,5667	5,13538	10,3307	19,6715	11,1193	7,7821	-3,3443	-4,4378
24,0278	151,532	25,3629	152,755	27,5881	153,867	1,3351	2,2252	1,223	1,1119	10,27	15,8943	9,40769	7,94214	4,21263	-1,1983	-3,0143
28,812	154,089	31,3709	154,756	33,2623	155,312	2,5589	1,8914	0,6671	0,556	19,6838	13,51	5,13154	3,97143	-2,4127	-1,739	4,15173
31,4822	153,089	33,7074	153,533	36,3776	153,533	2,2252	2,6702	0,4448	0	17,1169	19,0729	3,42154	0	0,87899	-7,6923	6,81332

ENSAIO DA GRADE LARGA 250 RPM																
X1	Y1	X2	Y2	X3	Y3	X'	Y'	X''	Y''	Vx1	Vx2	Vy1	Vy2	DVx/dx	DVy/dy	DVz/dz
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	1/s	1/s	1/s
12,1216	187,891	14,5163	189,965	17,0705	191,401	2,3947	2,5542	2,0741	1,4358	18,4208	18,2443	15,9546	10,2557	-0,0737	-2,7477	2,82135
24,3343	191,88	26,729	193,555	28,964	194,353	2,3947	2,235	1,6752	0,7977	18,4208	15,9643	12,8862	5,69786	-1,0258	-4,291	5,31681
23,6159	189,726	25,1325	191,64	27,2877	192,358	1,5166	2,1552	1,9145	0,7179	11,6662	15,3943	14,7269	5,12786	2,45822	0	-2,4582
10,2059	188,769	13,2391	190,843	16,1127	192,438	3,0332	2,8736	2,074	1,5955	23,3323	20,5257	15,9538	11,3964	-0,9253	-2,1974	3,1227
2,3833	175,207	4,0596	176,803	5,0973	177,361	1,6763	1,0377	1,5955	0,5584	12,8946	7,41214	12,2731	3,98857	-3,2706	-5,1924	8,463
5,0973	171,378	5,9753	173,054	6,8534	173,931	0,878	0,8781	1,6752	0,8775	6,75385	6,27214	12,8862	6,26786	-0,5486	-3,9508	4,49939
9,0085	174,33	10,3655	175,766	11,962	176,803	1,357	1,5965	1,4358	1,0371	10,4385	11,4036	11,0446	7,40786	0,71121	-2,5329	1,82171
10,1261	176,484	11,7225	178,079	12,6804	179,037	1,5964	0,9579	1,5954	0,9573	12,28	6,84214	12,2723	6,83786	-3,4063	-3,4063	6,81265
32,3963	173,213	33,434	174,49	35,0304	174,888	1,0377	1,5964	1,2763	0,3989	7,98231	11,4029	9,81769	2,84929	3,29628	-5,4599	2,16357
38,4628	170,661	39,4206	171,857	41,2565	171,618	0,9578	1,8359	1,1966	-0,2393	7,36769	13,1136	9,20462	-1,7093	5,99904	-9,1208	3,12172
1,3457	157,02	1,5851	159,891	2,7825	161,327	0,2394	1,1974	2,8717	1,4359	1,84154	8,55286	22,09	10,2564	28,0339	-4,1208	-23,913
5,8955	164,997	7,4121	166,752	9,248	167,869	1,5166	1,8359	1,7549	1,1168	11,6662	13,1136	13,4992	7,97714	0,95438	-3,1467	2,19228
8,8489	164,837	9,8068	166,433	11,483	167,23	0,9579	1,6762	1,5954	0,7978	7,36846	11,9729	12,2723	5,69857	4,80676	-4,1204	-0,6863
12,84	165,954	14,7557	167,151	16,8311	167,869	1,9157	2,0754	1,1966	0,7179	14,7362	14,8243	9,20462	5,12786	0,04601	-3,407	3,36095
13,4786	170,341	14,8355	172,096	16,432	173,054	1,3569	1,5965	1,755	0,9572	10,4377	11,4036	13,5	6,83714	0,71183	-3,7965	3,08467
23,2966	166,114	24,494	167,629	25,1325	168,347	1,1974	0,6385	1,5156	0,7179	9,21077	4,56071	11,6585	5,12786	-3,8835	-4,3089	8,19238
41,8153	162,923	40,8574	164,598	39,1014	165,795	-0,9579	-1,756	1,6752	1,1966	-7,3685	-12,543	12,8862	8,54714	5,40181	-2,5901	-2,8117
45,7266	160,211	44,5292	161,646	43,731	162,125	-1,1974	-0,7982	1,4359	0,4786	-9,2108	-5,7014	11,0454	3,41857	-2,9308	-5,3115	8,24232
57,0613	168,985	54,5868	170,022	51,793	170,341	-2,4745	-2,7938	1,037	0,3191	-19,035	-19,956	7,97692	2,27929	0,37224	-5,4943	5,12211
55,5446	154,148	52,9903	154,706	51,7132	154,148	-2,5543	-1,2771	0,5584	-0,5584	-19,648	-9,1221	4,29538	-3,9886	-4,121	-14,835	18,9562
47,6423	154,547	45,8862	155,185	45,1678	154,547	-1,7561	-0,7184	0,6381	-0,6381	-13,508	-5,1314	4,90846	-4,5579	-4,7702	-14,835	19,6054
6,0551	161,168	6,7735	162,285	7,4919	163,242	0,7184	0,7184	1,1168	0,9572	5,52615	5,13143	8,59077	6,83714	-0,5495	-1,5702	2,11967
14,1171	153,031	12,6005	153,988	11,6427	154,547	-1,5166	-0,9578	0,9573	0,5584	-11,666	-6,8414	7,36385	3,98857	-3,1813	-3,5258	6,7071
52,6711	176,165	55,6245	176,085	58,6577	175,846	2,9534	3,0332	-0,0798	-0,2393	22,7185	21,6657	-0,6138	-1,7093	-0,3565	13,7273	-13,371
29,6026	191,082	31,8376	192,358	33,9928	192,837	2,235	2,1552	1,2763	0,4786	17,1923	15,3943	9,81769	3,41857	-0,8045	-5,0138	5,81829
38,7821	163,162	37,8242	164,119	37,1058	164,917	-0,9579	-0,7184	0,9573	0,7977	-7,3685	-5,1314	7,36385	5,69786	-2,3354	-1,7403	4,07565
-0,5701	173,851	0,6273	175,048	2,3035	175,925	1,1974	1,6762	1,1966	0,8775	9,21077	11,9729	9,20462	6,26786	2,30674	-2,4543	0,14751
-0,7297	158,775	-0,3306	161,248	1,4255	163,96	0,3991	1,7561	2,4729	2,7122	3,07	12,5436	19,0223	19,3729	23,7373	0,14176	-23,879
22,0195	163,162	20,024	164,04	18,7468	164,359	-1,9955	-1,2772	0,8775	0,3191	-15,35	-9,1229	6,75	2,7929	-3,1206	-5,0948	8,21542
20,4231	174,41	21,5406	175,686	23,0572	176,165	1,1175	1,5166	1,2764	0,4786	8,59615	10,8329	9,81846	3,41857	2,00152	-5,014	3,01249
49,8773	152,313	47,4028	152,473	45,4073	152,473	-2,4745	-1,9955	0,1595	0	-19,035	-14,254	1,22692	0	-1,9321	-7,6923	9,62443
45,4871	160,211	44,5292	161,646	43,3319	161,966	-0,9579	-1,1973	1,4359	0,3191	-7,3685	-8,5521	11,0454	2,27929	1,2357	-6,105	4,85325
0,2282	166,034	1,5053	167,31	3,1816	168,666	1,2771	1,6763	1,2763	1,3561	9,82385	11,9736	9,81769	9,68643	1,38323	-0,1028	-1,5804

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÜI, J.C.; JIMENEZ, J. (1987). On the performance of particle tracking. **Journal of Fluid Mechanics**, v.185, p.447-468.
- BARBOSA JR., A.R. (1989). **Desenvolvimento de metodologia para determinação do coeficiente de reaeração dos escoamentos naturais da água com o emprego de traçador gasoso**. São Carlos 187 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- BENNETT, J.P.; RATHBUN, R.E. (1972). **Reaeration in open-channel flow**. Washington U.S.Government Printing Office. (Geological survey professional paper, n.737). p.75.
- BIRD, R.B.et al. (1960). **Transport phenomena**. Singapore, Willey International,. P.780
- BOYLE, W.C; BERTHOUEX, A.M.; ROONEY, T.C. (1974). Pitfall in parameter estimation for oxygen transfer data. **Journal of the Environmental Engineering Division**, v.100, n.2, p.391-408.
- BROW, L.C; BAILLOD, CR. (1982). Modeling and interpreting oxygen transfer data. **Journal of the Environmental Engineering Division**, v.108, n.4, p.607-628.
- BRUMLEY, B. (1984). Turbulence measurements near the free surface in stirred grid experiments in gas transfer at water surface. In: BRUSTSAERT, W.; JIRKA, G.H., ed. **Gas transfer at water surface**. Dordrecht, D.Reidel. p.83-92..
- BRUMLEY, B.H.; JIRKA, G.H.(1987). Near-surface turbulence in a grid-stirred tank. **Journal of Fluid Mechanics**, v.183, n.1, p.235-263.
- CAMPBELL, J.A.; HANRATTY, T.J. (1983). Mechanism of turbulent mass transfer at a solid boundary. **A.I.C.H.E. Journal**, v.29, n.2, p.221-9.
- CHENG, N.S.; LAW, A.W.K. (2001). Measurement of turbulence generated by oscillating grid. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.127, n.3, p.201-208, Mar.
- CHU, C.R.; JIRKA, G.H. (1991). Turbulent velocity and gas concentration measurements in the near-surface layer. In: WILHELMS, E.C.; GULLIVER, J.S., ed. **Air water mass transfer**. New York, ASCE. p.160-172.

- COSTA, O.S. (1992). **Análise do efeito da umidade sobre o coeficiente de reoxigenação**. São Carlos. 86p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CREMASCO, M.A. (1998). **Fundamentos de transferência de massa**. Campinas, Ed.da UNICAMP. p.741.
- COULSON, J.M.; RICHARDSON, J.F. (1985). **Chemical engineering**. Fundação Calouste Gulbenkian. v.1
- CUNHA, A.C. (1993). **Transferência de gases em sistemas líquidos altamente agitados induzidos por hélices do tipo turbina em tanques cilíndricos**. São Carlos. 176p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- DICKEY, T.D. et al. (1984). A laboratory technique for investigating the relationship between gas transfer and fluid turbulence. In: BRUTSAERT, W.; JIRKA, G.H., ed. **Gas transfer at water surface**. Dordrecht, D.Reidel. p.93-100.
- DE SILVA, I.P.D.; FERNANDO, H.J.S. (1994). Oscillating grids as a source of nearly isotropic turbulence. **Physics Fluids**, v.6, n.7, p.2455-2466, July.
- FEGHALI, J.P. (1974). **Mecânica Dos fluidos**. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos. v.1
- FORTESCUE, G.E.; PEARSON, J.R.A. (1967). On gas absorption into a turbulent liquid. **Chemical Engineering Science**, v.22, p.1163-1176.
- FOX, R.W.; McDONALD, A.T. (1995). **Introdução á mecânica dos fluidos**. 4.ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos.
- FREYMUTH, P. (1993). Flow visualization in fluid mechanics. **Review of Scientific Instruments**, v.64, n.1, p.1-17.
- GULLIVER, J.S. (1991). Introduction to air-water mass transfer. In: WILHELMS, E.C.; GULLIVER, J.S., ed. **Air water mass transfer**. New York, ASCE. p.1-7.
- GULLIVER, J.S.; TAMBURRINO, A. (1995). Turbulent surface deformation and their relationship to mass transfer in a open-channel. In: JÄHNE, B.; MONAHAN, E.C., ed. **Air water gas transfer**. Heidelberg. p.589-600.
- HINES, A.L.; MADDOX, R.N. (1985). **Mass transfer** – fundamentals and applications. New Jersey, Prentice-Hall. p.542.
- HINZE, J.O. (1959). **Turbulence**. New York, McGraw-Hill. p.586.

- HOPFINGER, E.L.; TOLY, J.A. (1976). Spatially decaying turbulence and its relation to mixing across density interfaces. **Journal of fluid mechanics**, v.78, n.1, p.155-175.
- HUNT, J.C.R. (1984). Turbulence structure and turbulent diffusion near gas/liquid interfaces. In: BRUTSAERT, W.; JIRKA, G.H., ed. **Gas transfer at water surface**. Dordrecht, D.Reidel. p.67-82.
- KISHINESSKY, M.K.H.; SEREBRIANSKY, V.T. (1955). The mechanism of mass transfer at the gas-liquid interface with vigorous stirring. **Journal Applied Chemistry**, n.29, p.29-33.
- McCREADY, M.J.; HANRATTY, T. (1984). Concentration fluctuations close to a sheared gas-liquid interfaces. **A.I.C.H.E. Journal**, v.30, n.5, p.816-820.
- McCREADY, M.J.; VASSILIADOU, E.; HANRATTY, T. (1986). Computer simulation of turbulence mass transfer at a mobile interface. **A.I.C.H.E. Journal**, v.32, n.7, p.1108-1115.
- MELLO, E.D. (1996). **Sistema ótico para avaliação do coeficiente de reaeração superficial em corpos d'água**. São Carlos. 150 p. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MIRANDA, L.M. (2000). **Estudo da deformação superficial gerada pela turbulência na interface ar/água, no domínio da frequência, e sua relação com o coeficiente de aeração**. São Carlos. 125 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MOMESSO, A.M. (1996). **Absorção e dessorção de gases através da interface ar-água em sistemas de agitação mecânica**. São Carlos. 145 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- RODI, W. (1980). **Turbulence models and their application in hydraulics**. Delft, IAHR.
- ROMA, W.N.L. (1988). **Medida dos parâmetros de turbulência superficial e sua interrelação com o coeficiente de reaeração**. São Carlos. 74 p. Tese (Livre-docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ROMA, W.N.L.; GIORGETTI, M.F. (1995). **Optical detection of turbulence-related parameters and correlation with reaeration coefficient in grid-stirred tank**. /Comunicação pessoal/
- SCHULZ, H.E. (1985). **Investigação do mecanismo de reoxigenação da água em escoamento e sua correlação com o nível de turbulência junto à superfície**.

São Carlos. 299 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SOUZA FILHO, F.A. (1995). **Modelação numérica da hidrodinâmica em canais com a utilização de modelos de turbulência.** São Carlos. 148p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

TAMBURRINO, A. (1994). **Free-surface kinematics: measurement and relation to the mass transfer coefficient in open-channel flow.** Minnesota, 237 p. Tese (Doutorado) – Faculty of the Graduate School, University of Minnesota.

TAMBURRINO, A.; GULLIVER, J.S. (1991). Surface renewal due to large flow structures in open-channel flow. In: WILHELMS, E.C.; GULLIVER, J.S., ed. **Air water mass transfer.** New York, ASCE. p.126-138.

TENNEKES, H.A.; LUMLEY, J.L. (1972). **First course in turbulence.** Massachusetts. The Massachusetts Institute of Technology. p.300.

THOMPSON, S.M.; TURNER, J.S. (1975). Mixing across an interface due to turbulence generated by an oscillating grid. **Journal of Fluid Mechanics**, v.67, n.2, p.349-368.

TOOR, H.L.; MARCHELLO, J.M. (1958). Film-penetration model for mass and heat transfer. **A.I.C.H.E. Journal**, v.4, n.1, p.97-101.

ORLINS, J.J.; GULLIVER, J.S. (2000). Measurements of free turbulence. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GAS TRANSFER AT WATER SURFACES, 4., Flórida, /Comunicação pessoal/

WHITMAN, W.G. (1923). A Preliminary experimental confirmation of the two film theory of gas absorption. **Chemical and Metallurgical Engineering**, v.29, n.4, p.146-148.