

# UM ESTUDO DE MISTURA EM LEITO FLUIDIZADO PARA SISTEMAS PARTICULADOS SÓLIDOS



GERALDO LUIZ PALMA

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Fernando Eduardo Milioli



São Carlos

1998

Class.	TESE - EESC
Gutt.	4199
Tombo	0062199

31100006195

S/S 1030631

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

P171e Palma, Geraldo Luiz  
Um estudo de mistura em leito fluidizado para  
sistemas particulados sólidos / Geraldo Luiz  
Palma. -- São Carlos, 1998.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São  
Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.

Área: Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Eduardo Milioli.

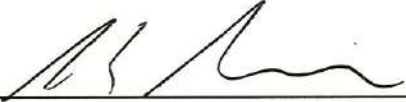
1. Mistura. 2. Segregação. 3. Fluidização.  
I. Título.



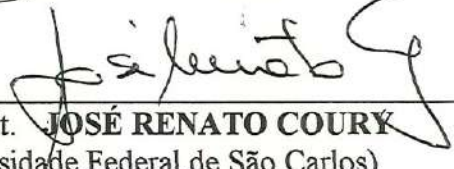
**FOLHA DE APROVAÇÃO**

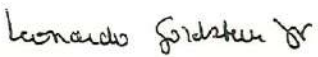
Candidato: Engenheiro **GERALDO LUIZ PALMA**

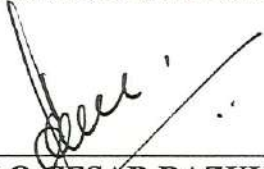
Tese defendida e aprovada em 18.12.98  
pela Comissão Julgadora:


  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **FERNANDO EDUARDO MILIOLI (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

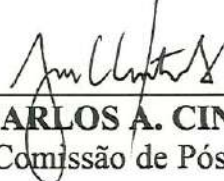
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **JOSMAR DAVILSON PAGLIUSO**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Tit. **JOSÉ RENATO COURY**  
(Universidade Federal de São Carlos)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Tit. **LEONARDO GOLDSTEIN JÚNIOR**  
(UNICAMP)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **PAULO CESAR RAZUK**  
(UNESP – Campus de Bauru)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**  
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica

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

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Doutor Fernando Eduardo Milioli, pela orientação, compreensão e amizade durante a realização deste trabalho.

Ao professor Doutor Eduardo Morgado Belo, pela compreensão e colaboração, no período inicial do programa de pós-graduação.

Ao professor Doutor Paulo César Razuk, pela amizade, colaboração e empenho em questões relativas ao trabalho.

Ao professor Doutor Augusto Ronchi Jr, pela amizade e colaboração.

Aos professores Doutores João Eduardo Guarnetti e Abílio Garcia dos Santos pelo espaço físico cedido para a realização do trabalho.

Aos professores Doutores Yukio Kobayashi e Célio Losnak, pela colaboração.

Aos demais professores do Departamento de Engenharia Mecânica.

Aos técnicos Carlos Roberto Furlanetto, Milton Moggione e Edson Roberto Rondon e às bibliotecárias Maristela Brichi e Ediza dos Santos Alves.

Ao Centro de Engenharia Projetos e Montagens ( CEPEM) pelo empréstimo do equipamento, sem o qual não seria possível a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xv
RESUMO.....	xxiii
ABSTRACT.....	xxiv
1- INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – Objetivos.....	2
2 – REVISÃO DA LITERATURA.....	3
2.1 – Teoria da mistura de sólidos particulados.....	3
2.1.1 – Caracterização dos estados de mistura.....	6
2.1.2 – Conceito do grau de mistura.....	12
2.1.3 – Parâmetros da mistura.....	14
2.1.4 – Taxa de mistura.....	16
2.1.5 – Mecanismo de mistura.....	16
2.1.6 – Mecanismo de segregação.....	18
2.1.7 – Manipulação de sistemas particulados.....	21
2.1.8 – Modelos de mistura.....	21
2.2 – Equipamento de mistura.....	23
2.2.1 – Misturadores tipo tambor rotativo.....	25
2.2.2 – Misturadores convectivos.....	26
2.2.3 – Misturadores de fluxo por gravidade.....	28
2.2.4 – Misturadores tipo leito fluidizado.....	28
2.3 – Teoria de fluidização.....	33
2.3.1 – Alguns critérios para definir grupos.....	39
2.3.2 – Modelagem do escoamento em meio poroso.....	40
2.3.3 – Velocidade de mínima fluidização.....	41
2.3.4 – Algumas relações hidrodinâmicas.....	51
2.3.5 – Formação das bolhas acima do distribuidor.....	52



2.3.6 – Vazão de gás em forma de bolhas no leito.....	53
2.4 – Teoria da mistura em leito fluidizado.....	57
2.4.1 – Parâmetro taxa de circulação ( $T_{CI}$ ).....	61
2.4.2 – Parâmetro taxa de intercâmbio ( $T_{IN}$ ).....	62
2.4.3 – Parâmetro taxa de segregação ( $T_{SE}$ ).....	64
2.5 – Análise estatística.....	78
2.5.1 – Abordagem qualitativa.....	79
2.5.2 – Abordagem quantitativa.....	81
2.5.3 – Caracterização – problemas da amostragem.....	86
2.5.4 – Inferência estatística.....	89
2.5.5 – Índices de mistura e segregação.....	92
2.5.6 – Índice para leito fluidizado.....	97
2.6 – Técnicas experimentais e de amostragem.....	100
2.6.1 – Classificação das técnicas.....	100
3 – MATERIAL E MÉTODOS.....	114
3.1 – Bancada de fluidização.....	115
3.2 – Calibração do medidor de vazão.....	121
3.2.1 – Tipo de tomada de pressão.....	122
3.2.2 – Medidor tipo orifício para baixos números de Reynolds.....	123
3.2.3 – Instalação do medidor de vazão tipo orifício.....	124
3.2.4 – Ensaios de calibração.....	125
3.3 – Caracterização das partículas.....	127
3.4 – Ensaios de operação do leito fluidizado.....	130
3.5 – Sistematização dos ensaios principais.....	131
3.5.1 – Procedimentos para os ensaios principais.....	133
3.6 – Método de retirada e análise das amostras.....	134
3.7 – Análise das amostras.....	135
3.8 – Avaliação da eficiência dos filtros.....	136
4- RESULTADOS.....	139
4.1 – Ensaios com o medidor de vazão.....	139

4.2 – Ensaio preliminares com o leito fluidizado.....	139
4.3 – Resultados principais dos experimentos.....	151
4.4 – Repetição dos experimentos.....	177
4.5 – Variação nas composições do traçador em função do tempo.....	177
4.6 – Variação na massa dos filtros.....	184
4.7 – Índice de mistura para fluidização.....	185
4.8 – Parâmetros do modelo de Gibilaro-Rowe.....	185
5 – DISCUSSÃO.....	188
5.1 – Ensaio preliminares de fluidização.....	188
5.2 – Ensaio principais.....	189
5.2.1 – Experimentos 1a, 2a e 3a, realizados com 6 kg de areia de diâmetro médio 225 $\mu\text{m}$ e 2 kg de traçador de diâmetro médio 450 $\mu\text{m}$ .....	189
5.2.2 - Experimentos 4a, 5a e 6a, realizados com 6 kg de areia de diâmetro médio 450 $\mu\text{m}$ e 2 kg de traçador de diâmetro médio 450 $\mu\text{m}$ .....	194
5.3 – Sobre os parâmetros do modelo de Gibilaro-Rowe.....	197
6 – CONCLUSÃO.....	199
6.1 – Sugestões para futuros trabalhos.....	200
ANEXO A – Resultados dos ensaios de calibração do medidor de vazão, tipo orifício.....	201
ANEXO B – Repetição dos ensaios principais.....	207
ANEXO C – Repetição dos ensaios principais.....	232
BIBLIOGRAFIA.....	257

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Possíveis estados de mistura: estratificado, aleatório e idealmente ordenado.....	5
Figura 2.2 - Representação idealizada de uma zona de falha horizontal.....	7
Figura 2.3 - Exemplo de pontos de contato.....	8
Figura 2.4 - Representação da camada úmida aderente entre partículas.....	9
Figura 2.5 - Representação de mistura ordenada coesiva.....	10
Figura 2.6 - Relações entre diferentes misturas totais baseadas na influência relativa da gravidade e forças superficiais em um dado conjunto de partículas e na homogeneidade da mistura.....	11
Figura 2.7 - escoamento de partículas em um cilindro horizontal.....	17
Figura 2.8 - Segregação do constituinte em pequena escala.....	19
Figura 2.9 – Segregação do constituinte em grande escala.....	20
Figura 2.10 - Segregação de unidades ordenadas: (a) unidades aleatórias ordenadas (b) unidades ordenadas segregadas.....	20
Figura 2.11 - Esquema da formação de uma mistura estriada.....	22
Figura 2.12 - Modelo de tambor rotativo simples.....	25
Figura 2.13 - Misturadores tipo em “V” e em duplo cone.....	26
Figura 2.14 - Representação do misturador tipo fita helicoidal.....	26
Figura 2.15 - Misturador tipo parafuso orbital e vertical.....	27
Figura 2.16 - Misturador com impelidor de alta velocidade.....	27
Figura 2.17 - Esquema de misturadores com fluxo por gravidade.....	28
Figura 2.18 – Esquema básico de um leito fluidizado.....	29
Figura 2.19 – Misturador rápido com pás rotativas e corpo fixo.....	30
Figura 2.20 - Representação de um leito fixo.....	33
Figura 2.21 - Esquema simplificado do leito de jorro.....	34
Figura 2.22 - Representação básica de um leito fluidizado.....	35
Figura 2.23 - Diagrama simplificado para classificação das partículas de acordo com seu comportamento na fluidização com ar em condições ambientes (Geldart, 1986).....	37
Figura 2.24 - Modos de passagem do gás.....	39



Figura 2.25 – Evolução da perda de pressão no decorrer da desfluidização em função da velocidade do ar para uma mistura binária (Mourad et al. (1994).....	47
Figura 2.26 – Velocidades relativas entre o gás e as bolhas. KUNII & LEVENSPIEL (1991).....	52
Figura 2.27 - Modelo de circulação proposto por Talmor & Benenati.....	57
Figura 2.28 – Representação do modelo de Gibilaro-Rowe.....	60
Figura 2.29 – Área de seção transversal de bolhas, esteiras e emulsão.....	61
Figura 2.30 – Forma básica de uma bolha ascendente.....	62
Figura 2.31 – Modelo para o movimento de partículas ao redor da bolha..	63
Figura 2.32 – Partículas deslizando ao longo da superfície da bolha.....	63
Figura 2.33 – Distância adimensional de segregação.....	64
Figura 2.34 – Modelo de um leito fluidizado gás - sólido.....	66
Figura 2.35 – Padrão típico de segregação em misturas binárias.....	70
Figura 2.36 – Balanço de massa nas fases de esteira e de emulsão.....	75
Figura 2.37 – Variação de $f_{WK}$ em função do diâmetro da partícula.....	76
Figura 2.38 – Representação da escala de segregação.....	78
Figura 2.39 - Representação da intensidade de segregação.....	79
Figura 2.40 – Ilustração da redução da escala de segregação através de ciclos de superposição seguida por deformação.....	80
Figura 2.41 - Curva de distribuição para composição das amostras (HARNBY et al. 1985).....	89
Figura 2.42 - Curva de distribuição para uma série de variâncias estimadas das amostras (HARNBY et al. 1985).....	90
Figura 2.43 – Simplificação da sonda de amostragem tipo “ladrão”.....	102
Figura 2.44 – Modelo simplificado de sonda óptica.....	105
Figura 2.45 – Esquema do equipamento usado por Beeckmans & Stahl...	106
Figura 2.46 – Representação do equipamento experimental.....	107
Figura 2.47 – Dispositivo para divisão do leito fluidizado em lâminas.....	107
Figura 2.48 – Conjunto do equipamento experimental.....	108
Figura 2.49 – Alguns detalhes simplificados do conjunto experimental.....	109
Figura 2.50 – Representação da sonda à vácuo.....	110



Figura 2.51 – Diagrama esquemático do aparato experimental.....	111
Figura 2.52 – Equipamento experimental.....	112
Figura 2.53 – Diagrama esquemático do sistema experimental.....	112
Figura 3.1 – Representação da instalação do equipamento.....	116
Figura 3.2 – Esquema de uma das sondas de tomada de pressão.....	116
Figura 3.3 – Detalhes construtivos do anel de tomadas de pressão.....	117
Figura 3.4 – Detalhes da base do leito fluidizado.....	118
Figura 3.5 – Esquema da tubulação entre o compressor e o fluidizador....	119
Figura 3.6 – Curva característica do compressor.....	119
Figura 3.7 – Desenho esquemático do compressor.....	120
Figura 3.8 – Suporte e placa distribuidora.....	121
Figura 3.9 – Esquema de montagem do conjunto distribuidor.....	121
Figura 3.10 – Orifícios para Reynolds baixo. (a) arredondado (b) cônico...	122
Figura 3.11 – Detalhe da tomada de pressão com anel amortecedor.....	123
Figura 3.12 – Trechos retos usados nesse trabalho.....	124
Figura 3.13 – Recomendações mínimas de trechos retos.....	125
Figura 3.14 – Adaptação para instalação do anemômetro.....	126
Figura 3.15 – Sonda para a retirada das amostras.....	134
Figura 3.16 – Posições de retirada das amostras.....	135
Figura 3.17 – Dispositivo separador das partículas.....	136
Figura 3.18 – Desvios dos pesos dos filtros após 15 minutos fora da estufa.....	138
Figura 3.19 – Desvios dos pesos dos filtros após 5 minutos fora da estufa.....	138
Figura 4.1 – Curva de calibração do leito com 8kg de areia $d_{MD}=225 \mu\text{m}$ ..	141
Figura 4.2 – Curva de calibração do leito com 8kg de areia $d_{MD}=225 \mu\text{m}$ ..	142
Figura 4.3 – Curva de calibração do leito com 6kg de areia $d_{MD}=225 \mu\text{m}$ ..	143
Figura 4.4 – Curva de calibração do leito com 6kg de areia $d_{MD}=225 \mu\text{m}$ ..	144
Figura 4.5 – Curva de calibração do leito com 6kg de areia $d_{MD}=450 \mu\text{m}$ ..	145
Figura 4.6 – Curva de calibração do leito com 6kg de areia $d_{MD}=450 \mu\text{m}$ ..	146
Figura 4.7 – Curva de calibração do leito com 2kg de traçador $d_{MD}=450 \mu\text{m}$ .....	147

Figura 4.8 – Curva de calibração do leito com 2kg de traçador $d_{MD}=450 \mu\text{m}$ .....	148
Figura 4.9 – Curva de calibração do leito com 2kg de traçador $d_{MD}=450 \mu\text{m}$ e 6kg de areia $d_{MD}=225 \mu\text{m}$ .....	149
Figura 4.10 – Curva de calibração do leito com 2kg de traçador $d_{MD}=450 \mu\text{m}$ e 6kg de areia $d_{MD}=225 \mu\text{m}$ .....	150
Figura 4.11 – Variação das proporções nas posições – experimento 1a....	153
Figura 4.12 – Variação das proporções nas posições – experimento 1a....	154
Figura 4.13 – Variação das proporções nas posições – experimento 1a....	155
Figura 4.14 – Variação das proporções nas posições – experimento 1a....	156
Figura 4.15 – Variação das proporções nas posições – experimento 2a....	157
Figura 4.16 – Variação das proporções nas posições – experimento 2a....	158
Figura 4.17 – Variação das proporções nas posições – experimento 2a....	159
Figura 4.18 – Variação das proporções nas posições – experimento 2a....	160
Figura 4.19 – Variação das proporções nas posições – experimento 3a....	161
Figura 4.20 – Variação das proporções nas posições – experimento 3a....	162
Figura 4.21 – Variação das proporções nas posições – experimento 3a....	163
Figura 4.22 – Variação das proporções nas posições – experimento 3a....	164
Figura 4.23 – Variação das proporções nas posições – experimento 4a....	165
Figura 4.24 – Variação das proporções nas posições – experimento 4a....	166
Figura 4.25 – Variação das proporções nas posições – experimento 4a....	167
Figura 4.26 – Variação das proporções nas posições – experimento 4a....	168
Figura 4.27 – Variação das proporções nas posições – experimento 5a....	169
Figura 4.28 – Variação das proporções nas posições – experimento 5a....	170
Figura 4.29 – Variação das proporções nas posições – experimento 5a....	171
Figura 4.30 – Variação das proporções nas posições – experimento 5a....	172
Figura 4.31 – Variação das proporções nas posições – experimento 6a....	173
Figura 4.32 – Variação das proporções nas posições – experimento 6a....	174
Figura 4.33 – Variação das proporções nas posições – experimento 6a....	175
Figura 4.34 – Variação das proporções nas posições – experimento 6a....	176
Figura 4.35 – Variações das proporções do traçador, $U_{FL} = 1,4 U_{MF}$ . Exp. 1a.....	178



Figura 4.36 – Variações das proporções do traçador, $U_{FL} = 1,4 U_{MF}$ . Exp. 1b.....	178
Figura 4.37 – Variações das proporções do traçador, $U_{FL} = 1,4 U_{MF}$ . Exp. 1c.....	178
Figura 4.38 – Variações das proporções do traçador, $U_{FL} = 1,7 U_{MF}$ . Exp. 2a.....	179
Figura 4.39 – Variações das proporções do traçador, $U_{FL} = 1,7 U_{MF}$ . Exp. 2b.....	179
Figura 4.40 – Variações das proporções do traçador, $U_{FL} = 1,7 U_{MF}$ . Exp. 2c.....	179
Figura 4.41 – Variações das proporções do traçador, $U_{FL} = 2,0 U_{MF}$ . Exp. 3a.....	180
Figura 4.42 – Variações das proporções do traçador, $U_{FL} = 2,0 U_{MF}$ . Exp. 3b.....	180
Figura 4.43 – Variações das proporções do traçador, $U_{FL} = 2,0 U_{MF}$ . Exp. 3c.....	180
Figura 4.44 – Variações das proporções do traçador, $U_{FL} = 1,4 U_{MF}$ . Exp. 4a.....	181
Figura 4.45 – Variações das proporções do traçador, $U_{FL} = 1,4 U_{MF}$ . Exp. 4b.....	181
Figura 4.46 – Variações das proporções do traçador, $U_{FL} = 1,4 U_{MF}$ . Exp. 4c.....	181
Figura 4.47 – Variações das proporções do traçador, $U_{FL} = 1,7 U_{MF}$ . Exp. 5a.....	182
Figura 4.48 – Variações das proporções do traçador, $U_{FL} = 1,7 U_{MF}$ . Exp. 5b.....	182
Figura 4.49 – Variações das proporções do traçador, $U_{FL} = 1,7 U_{MF}$ . Exp. 5c.....	182
Figura 4.50 – Variações das proporções do traçador, $U_{FL} = 2,0 U_{MF}$ . Exp. 6a.....	183
Figura 4.51 – Variações das proporções do traçador, $U_{FL} = 2,0 U_{MF}$ . Exp. 6b.....	183

Figura 4.52 – Variações das proporções do traçador, $U_{FL} = 2,0 U_{MF}$ . Exp. 6c.....	183
Figura 4.53 – Desvios médios nos pesos dos filtros de papel.....	184
Figura A.1 – Curva do medidor de vazão tipo orifício.....	206
Figura A.2 – Curva do medidor de vazão tipo orifício.....	206
Figura B.1 – Variação das proporções nas posições – experimento 1a.....	208
Figura B.2 – Variação das proporções nas posições – experimento 1a.....	209
Figura B.3 – Variação das proporções nas posições – experimento 1a.....	210
Figura B.4 – Variação das proporções nas posições – experimento 1a.....	211
Figura B.5 – Variação das proporções nas posições – experimento 2a.....	212
Figura B.6 – Variação das proporções nas posições – experimento 2a.....	213
Figura B.7 – Variação das proporções nas posições – experimento 2a.....	214
Figura B.8 – Variação das proporções nas posições – experimento 2a.....	215
Figura B.9 – Variação das proporções nas posições – experimento 3a.....	216
Figura B.10 – Variação das proporções nas posições – experimento 3a.....	217
Figura B.11 – Variação das proporções nas posições – experimento 3a.....	218
Figura B.12 – Variação das proporções nas posições – experimento 3a.....	219
Figura B.13 – Variação das proporções nas posições – experimento 4a.....	220
Figura B.14 – Variação das proporções nas posições – experimento 4a.....	221
Figura B.15 – Variação das proporções nas posições – experimento 4a.....	222
Figura B.16 – Variação das proporções nas posições – experimento 4a.....	223
Figura B.17 – Variação das proporções nas posições – experimento 5a.....	224
Figura B.18 – Variação das proporções nas posições – experimento 5a.....	225
Figura B.19 – Variação das proporções nas posições – experimento 5a.....	226
Figura B.20 – Variação das proporções nas posições – experimento 5a.....	227
Figura B.21 – Variação das proporções nas posições – experimento 6a.....	228
Figura B.22 – Variação das proporções nas posições – experimento 6a.....	229
Figura B.23 – Variação das proporções nas posições – experimento 6a.....	230
Figura B.24 – Variação das proporções nas posições – experimento 6a.....	231
Figura C.1 – Variação das proporções nas posições – experimento 1a.....	233
Figura C.2 – Variação das proporções nas posições – experimento 1a.....	234
Figura C.3 – Variação das proporções nas posições – experimento 1a.....	235



Figura C.4 – Variação das proporções nas posições – experimento 1a.....	236
Figura C.5 – Variação das proporções nas posições – experimento 2a.....	237
Figura C.6 – Variação das proporções nas posições – experimento 2a.....	238
Figura C.7 – Variação das proporções nas posições – experimento 2a.....	239
Figura C.8 – Variação das proporções nas posições – experimento 2a.....	240
Figura C.9 – Variação das proporções nas posições – experimento 3a.....	241
Figura C.10 – Variação das proporções nas posições – experimento 3a...	242
Figura C.11 – Variação das proporções nas posições – experimento 3a...	243
Figura C.12 – Variação das proporções nas posições – experimento 3a...	244
Figura C.13 – Variação das proporções nas posições – experimento 4a...	245
Figura C.14 – Variação das proporções nas posições – experimento 4a...	246
Figura C.15 – Variação das proporções nas posições – experimento 4a...	247
Figura C.16 – Variação das proporções nas posições – experimento 4a...	248
Figura C.17 – Variação das proporções nas posições – experimento 5a...	249
Figura C.18 – Variação das proporções nas posições – experimento 5a...	250
Figura C.19 – Variação das proporções nas posições – experimento 5a...	251
Figura C.20 – Variação das proporções nas posições – experimento 5a...	252
Figura C.21 – Variação das proporções nas posições – experimento 6a...	253
Figura C.22 – Variação das proporções nas posições – experimento 6a...	254
Figura C.23 – Variação das proporções nas posições – experimento 6a...	255
Figura C.24 – Variação das proporções nas posições – experimento 6a...	256

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação de alguns misturadores mais usuais.....	23
Tabela 2.2 – Classificação dos misturadores conforme o movimento.....	24
Tabela 2.3 – Algumas propriedades de areias.....	36
Tabela 2.4 – Algumas propriedades do sal (NaCl).....	37
Tabela 2.5 – Parâmetro ( $\alpha$ ) da equação (47).....	55
Tabela 2.6 – Alguns índices de mistura da literatura.....	96
Tabela 3.1 – Ensaio para a determinação da densidade aparente da areia.....	129
Tabela 3.2 – Determinação da densidade aparente do sal.....	129
Tabela 3.3 – Determinação da densidade absoluta da areia.....	129
Tabela 3.4 – Determinação da densidade absoluta do sal.....	130
Tabela 3.5 – Propriedades físicas da areia.....	130
Tabela 3.6 – Propriedades físicas do sal comum.....	130
Tabela 3.7 – Planejamento para realização dos ensaios.....	134
Tabela 3.8 – Eficiência dos filtros após 15 minutos fora da estufa.....	137
Tabela 3.9 – Eficiência dos filtros após 5 minutos fora da estufa.....	138
Tabela 4.1 – Calibração do equipamento com 8kg de areia 225 $\mu\text{m}$ de diâmetro médio.....	141
Tabela 4.2 – Calibração do equipamento com 8kg de areia 225 $\mu\text{m}$ de diâmetro médio.....	142
Tabela 4.3 – Calibração do equipamento com 6kg de areia 225 $\mu\text{m}$ de diâmetro médio.....	143
Tabela 4.4 – Calibração do equipamento com 6kg de areia 225 $\mu\text{m}$ de diâmetro médio.....	144
Tabela 4.5 – Calibração do equipamento com 6kg de areia 450 $\mu\text{m}$ de diâmetro médio.....	145
Tabela 4.6 – Calibração do equipamento com 6kg de areia 450 $\mu\text{m}$ de diâmetro médio.....	146
Tabela 4.7 – Calibração do equipamento com 2kg de traçador 450 $\mu\text{m}$ de diâmetro médio.....	147



Tabela 4.8 – Calibração do equipamento com 2kg de traçador 450 $\mu\text{m}$ de diâmetro médio.....	148
Tabela 4.9 – Calibração do equipamento com 2kg de traçador 450 $\mu\text{m}$ de diâmetro médio e com 6kg de areia 225 $\mu\text{m}$ de diâmetro médio.....	149
Tabela 4.10 – Calibração do equipamento com 2kg de traçador 450 $\mu\text{m}$ de diâmetro médio e com 6kg de areia 225 $\mu\text{m}$ de diâmetro médio.....	150
Tabela 4.11 – Características dos experimentos principais.....	152
Tabela 4.12 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,4 $U_{MF}$ , areia 225 $\mu\text{m}$ e traçador 450 $\mu\text{m}$ .....	153
Tabela 4.13 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,4 $U_{MF}$ , areia 225 $\mu\text{m}$ e traçador 450 $\mu\text{m}$ .....	154
Tabela 4.14 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,4 $U_{MF}$ , areia 225 $\mu\text{m}$ e traçador 450 $\mu\text{m}$ .....	155
Tabela 4.15 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,4 $U_{MF}$ , areia 225 $\mu\text{m}$ e traçador 450 $\mu\text{m}$ .....	156
Tabela 4.16 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,7 $U_{MF}$ , areia 225 $\mu\text{m}$ e traçador 450 $\mu\text{m}$ .....	157
Tabela 4.17 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,7 $U_{MF}$ , areia 225 $\mu\text{m}$ e traçador 450 $\mu\text{m}$ .....	158
Tabela 4.18 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,7 $U_{MF}$ , areia 225 $\mu\text{m}$ e traçador 450 $\mu\text{m}$ .....	159
Tabela 4.19 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,7 $U_{MF}$ , areia 225 $\mu\text{m}$ e traçador 450 $\mu\text{m}$ .....	160
Tabela 4.20 – Ensaio com velocidade de fluidização 2,0 $U_{MF}$ , areia 225 $\mu\text{m}$ e traçador 450 $\mu\text{m}$ .....	161
Tabela 4.21 – Ensaio com velocidade de fluidização 2,0 $U_{MF}$ , areia 225 $\mu\text{m}$ e traçador 450 $\mu\text{m}$ .....	162
Tabela 4.22 – Ensaio com velocidade de fluidização 2,0 $U_{MF}$ , areia 225 $\mu\text{m}$ e traçador 450 $\mu\text{m}$ .....	163



Tabela 4.23 – Ensaio com velocidade de fluidização $2,0 U_{MF}$ , areia $225\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ .....	164
Tabela 4.24 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,4 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ .....	165
Tabela 4.25 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,4 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ .....	166
Tabela 4.26 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,4 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ .....	167
Tabela 4.27 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,4 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ .....	168
Tabela 4.28 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,7 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ .....	169
Tabela 4.29 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,7 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ .....	170
Tabela 4.30 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,7 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ .....	171
Tabela 4.31 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,7 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ .....	172
Tabela 4.32 – Ensaio com velocidade de fluidização $2,0 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ .....	173
Tabela 4.33 – Ensaio com velocidade de fluidização $2,0 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ .....	174
Tabela 4.34 – Ensaio com velocidade de fluidização $2,0 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ .....	175
Tabela 4.35 – Ensaio com velocidade de fluidização $2,0 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ .....	176
Tabela 4.36 – Desvios médios nos pesos dos filtros de papel.....	184
Tabela 4.37 – Resultados dos índices de mistura para fluidização.....	185
Tabela 4.38 – Parâmetros ligados às condições de fluidização e ao modelo de Gibilaro – Rowe.....	186
Tabela 4.39 – Parâmetros relacionados ao modelo de Gibilaro – Rowe....	186

Tabela 4.40 – Parâmetros ligados às condições de fluidização e ao modelo de Gibilaro – Rowe.....	187
Tabela 4.41 – Parâmetros relacionados ao modelo de Gibilaro – Rowe....	187
Tabela 5.1 – Valores da velocidade de mínima fluidização de acordo com várias equações em (m/s).....	188
Tabela A.1 – Calibração do medidor de vazão.....	202
Tabela A.2 – Calibração do medidor de vazão.....	203
Tabela A.3 – Calibração do medidor de vazão.....	204
Tabela A.4 – Calibração do medidor de vazão.....	205
Tabela B.1 – Ensaios com velocidade de fluidização $1,4 U_{MF}$ , areia $225\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ .....	208
Tabela B.2 – Ensaios com velocidade de fluidização $1,4 U_{MF}$ , areia $225\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . ....	209
Tabela B.3 – Ensaios com velocidade de fluidização $1,4 U_{MF}$ , areia $225\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . ....	210
Tabela B.4 – Ensaios com velocidade de fluidização $1,4 U_{MF}$ , areia $225\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . ....	211
Tabela B.5 – Ensaios com velocidade de fluidização $1,7 U_{MF}$ , areia $225\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . ....	212
Tabela B.6 – Ensaios com velocidade de fluidização $1,7 U_{MF}$ , areia $225\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . ....	213
Tabela B.7 – Ensaios com velocidade de fluidização $1,7 U_{MF}$ , areia $225\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . ....	214
Tabela B.8 – Ensaios com velocidade de fluidização $1,7 U_{MF}$ , areia $225\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . ....	215
Tabela B.9 – Ensaios com velocidade de fluidização $2,0 U_{MF}$ , areia $225\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . ....	216
Tabela B.10 – Ensaios com velocidade de fluidização $2,0 U_{MF}$ , areia $225\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . ....	217
Tabela B.11 – Ensaios com velocidade de fluidização $2,0 U_{MF}$ , areia $225\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . ....	218



Tabela B.12 – Ensaio com velocidade de fluidização $2,0 U_{MF}$ , areia $225\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	219
Tabela B.13 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,4 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	220
Tabela B.14 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,4 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	221
Tabela B.15 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,4 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	222
Tabela B.16 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,4 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	223
Tabela B.17 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,7 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	224
Tabela B.18 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,7 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	225
Tabela B.19 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,7 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	226
Tabela B.20 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,7 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	227
Tabela B.21 – Ensaio com velocidade de fluidização $2,0 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	228
Tabela B.22 – Ensaio com velocidade de fluidização $2,0 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	229
Tabela B.23 – Ensaio com velocidade de fluidização $2,0 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	230
Tabela B.24 – Ensaio com velocidade de fluidização $2,0 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	231
Tabela C.1 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,4 U_{MF}$ , areia $225\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	233
Tabela C.2 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,4 U_{MF}$ , areia $225\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	234

Tabela C.3 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,4 U_{MF}$ , areia $225\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	235
Tabela C.4 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,4 U_{MF}$ , areia $225\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	236
Tabela C.5 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,7 U_{MF}$ , areia $225\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	237
Tabela C.6 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,7 U_{MF}$ , areia $225\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	238
Tabela C.7 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,7 U_{MF}$ , areia $225\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	239
Tabela C.8 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,7 U_{MF}$ , areia $225\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	240
Tabela C.9 – Ensaio com velocidade de fluidização $2,0 U_{MF}$ , areia $225\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	241
Tabela C.10 – Ensaio com velocidade de fluidização $2,0 U_{MF}$ , areia $225\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	242
Tabela C.11 – Ensaio com velocidade de fluidização $2,0 U_{MF}$ , areia $225\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	243
Tabela C.12 – Ensaio com velocidade de fluidização $2,0 U_{MF}$ , areia $225\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	244
Tabela C.13 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,4 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	245
Tabela C.14 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,4 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	246
Tabela C.15 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,4 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	247
Tabela C.16 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,4 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	248
Tabela C.17 – Ensaio com velocidade de fluidização $1,7 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	249

Tabela C.18 – Ensaios com velocidade de fluidização $1,7 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	250
Tabela C.19 – Ensaios com velocidade de fluidização $1,7 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	251
Tabela C.20 – Ensaios com velocidade de fluidização $1,7 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	252
Tabela C.21 – Ensaios com velocidade de fluidização $2,0 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	253
Tabela C.22 – Ensaios com velocidade de fluidização $2,0 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	254
Tabela C.23 – Ensaios com velocidade de fluidização $2,0 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	255
Tabela C.24 – Ensaios com velocidade de fluidização $2,0 U_{MF}$ , areia $450\mu\text{m}$ e traçador $450\mu\text{m}$ . . . . .	256



## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{LF}$ = área da seção transversal do leito.....	m <sup>2</sup>
$A_{UP}$ = área superficial de uma única partícula.....	m <sup>2</sup>
$A_{RQ}$ = número de Arquimedes.....	---
$A_{FT}$ = amplitude de flutuação.....	---
$A$ = fração em peso de finos na região inferior.....	---
$A$ = coeficiente definido na equação (27).....	---
$B$ = coeficiente definido na equação (27).....	---
$C$ = concentração da mistura.....	kg/m <sup>3</sup>
$C_B$ = fração em volume das partículas mais densas na emulsão.....	---
$C_{Bo}$ = fração em volume das partículas mais densas da fase de emulsão no fundo do leito ou lâmina.....	---
$C_W$ = fração em volume de partículas mais densas na esteira.....	---
$C_{PSL}$ = calor específico dos sólidos.....	J/kg.k
$C_{SE}$ = coeficiente de segregação.....	---
$C_O$ = concentração total de finos no compartimento.....	kg/m <sup>3</sup>
$C_{BE}$ = fator de correção de Bessel.....	---
$C_M$ = fração média em massa de sólidos mais pesados no leito todo.....	---
$C_I$ = circulação de massa.....	---
$D_a$ = coeficiente de difusão axial.....	m <sup>2</sup> /s
$d_{TB}$ = diâmetro de tubo.....	m
$d_{MD}$ = diâmetro médio de partículas.....	μm
$d_{PT}$ = diâmetro de partícula.....	m
$d_{PP}$ = diâmetro de partículas pequenas.....	m
$d_{Pg}$ = diâmetro de partículas grandes.....	m
$d_{BL}$ = diâmetro da bolha.....	m
$d_{NV}$ = diâmetro da nuvem de partículas na bolha.....	m
$d_{LF}$ = diâmetro do leito fluidizado.....	m
$d_{FB}$ = diâmetro frontal da bolha.....	m

$d_{EB}$ = diâmetro equivalente da bolha.....	m
$d_{ER}$ = razão entre diâmetros das partículas mais pesadas e mais leves.....	---
$d_R$ = razão entre os diâmetros das partículas ( $> 1$ ).....	---
$d_{MB}$ = diâmetro máximo da bolha.....	m
$d_{PJ}$ = diâmetro das partículas menos fluidizáveis.....	m
$d_{PF}$ = diâmetro das partículas mais fluidizáveis.....	m
$d_{BI}$ = diâmetro da bolha no início.....	m
$D_{SR}$ = coeficiente de dispersão radial dos sólidos.....	$m^2/s$
$E_{DA}$ = coeficiente de dispersão axial dos sólidos.....	$m^2/s$
$E$ = fase de emulsão.....	---
$f$ = coeficiente de atrito.....	---
$f_R$ = freqüência de oscilação do leito fluidizado.....	1/s
$f_W$ = fração volumétrica da fase de esteira.....	---
$f_S$ = fator de correção da razão entre diâmetros de partículas.....	---
$F_{PE}$ = fluxo volumétrico de partículas entrando e saindo da esteira.....	---
$f_{WK}$ = volume de esteira em relação ao volume de bolha.....	---
$f_{NB}$ = relação entre os volumes de nuvem e de bolha.....	---
$f_E$ = fração de emulsão.....	---
$f_{Pg}$ = fração em peso das partículas grandes.....	---
$f_{Pp}$ = fração em peso das partículas pequenas.....	---
$f_{EB}$ = relação entre os volumes de esteira e de gás na bolha.....	---
$f_{BO}$ = freqüência de bolhas no orifício.....	1/s
$f_{BL}$ = fração em volume de bolhas no leito.....	---
$f_A$ = fração em peso do material A.....	---
$f_B$ = fração em peso do material B.....	---
$f_{Ta}$ = fração de partículas traçadoras no leito.....	---
$f_{FA}$ = fração de esteiras e bolhas no leito.....	---
$F_{WB}$ = fração de esteira em relação à soma de esteira e bolha.....	---
$\bar{g}$ = aceleração da gravidade.....	$m/s^2$



$h$ = altura em relação ao distribuidor.....	m
$H_{MF}$ = altura do leito na mínima fluidização.....	m
$H_{FX}$ = altura do leito fixo.....	m
$H^*$ = altura reduzida do leito definida no texto.....	---
$H_{FL}$ = altura do leito na condição de fluidização.....	---
$H_{EX}$ = altura do leito expandido.....	---
$H$ = altura do leito.....	---
$I_{SE}$ = índice de segregação.....	---
$l_{OR}$ = distância entre orifícios.....	m
$K_1$ = coeficiente definido na equação (17).....	
$K_2$ = coeficiente definido na equação (17).....	
$k_{CD}$ = condutividade térmica axial efetiva do leito.....	W/m.K
$K_W$ = coeficiente de intercâmbio entre esteira e emulsão.....	1/s
$L_{TB}$ = comprimento do tubo.....	m
$L_{LP}$ = altura do leito de partículas.....	m
$L_{MF}$ = altura do leito na condição de mínima fluidização.....	m
$L$ = altura do leito.....	m
$M_{TP}$ = massa total de partículas.....	kg
$M$ = índice de partículas.....	---
$m$ = número de amostras com aproximadamente a mesma composição de toda a mistura.....	---
$N_{OD}$ = número de orifícios no distribuidor.....	---
$N_{OR}$ = número de orifícios por unidade de área do distribuidor.....	---
$N_{PA}$ = número de partículas na amostra.....	---
$N_{AM}$ = número de amostras.....	---
$N$ ou $n$ = número de amostras.....	---
$P$ = pressão.....	N/m <sup>2</sup>

$P_{EL}$ = pressão estática no leito.....	$N/m^2$
$P_L$ = pressão em escoamento laminar.....	$N/m^2$
$P_T$ = pressão em escoamento turbulento.....	$N/m^2$
$P_{TB}$ = pressão no tubo.....	$N/m^2$
$P_{LF}$ = pressão no leito fluidizado.....	$N/m^2$
$p_{PA}$ = proporção da partícula (A) na amostra.....	—
$p$ = proporção de um material no sistema.....	—
$q_{PA}$ = proporção da partícula (A) na amostra.....	—
$Q_{CD}$ = fluxo de calor.....	$W$
$Q_{OR}$ = vazão de gás em cada orifício.....	$m^3/s$
$Q_{BL}$ = vazão observável de bolhas através do leito.....	$m^3/s$
$q = (1-p)$ = proporção de um material no leito.....	—
$R_E$ = número de Reynolds.....	—
$R_{EMF}$ = número de Reynolds na mínima fluidização.....	—
$R_{ETE}$ = número de Reynolds terminal.....	—
$R_d$ = razão entre diâmetros de partículas.....	—
$R_a$ = razão entre a altura estática do leito e o diâmetro do leito.....	—
$R_{QP}$ = razão de queda de pressão.....	—
$S$ = desvio padrão da amostra.....	—
s.e. = erro padrão.....	—
$S^2$ = variância da amostra.....	—
$S_R^2$ = variância.....	—
$S_o^2$ = variância no início da mistura.....	—
$S_m^2$ = variância da amostra devida à heterogeneidades na mistura.....	—
$S_a^2$ = variância devida ao erro total da técnica de análise.....	—
$S_s^2$ = variância devida ao erro da remoção física.....	—
$t$ = tempo.....	$s$
$t_e$ = parâmetro definido na equação (110).....	
$T$ = temperatura.....	$K$

$T_{DA}$ = taxa de dispersão axial na fase de emulsão.....	$m^2/s$
$T_{SE}$ = taxa de segregação baseada na área da seção transversal da fase de emulsão.....	$m^2/s$
$T_{IN}$ = taxa de intercâmbio baseada na área da seção transversal da fase de emulsão.....	$1/s$
$T_{CI}$ = taxa de circulação baseada na área da seção transversal da fase de emulsão.....	$m^2/s$
$U$ = velocidade do fluido através dos canais ou tubos.....	$m/s$
$U_{FL}$ = velocidade na condição de fluidização.....	$m/s$
$U_{MF}$ = velocidade de mínima fluidização.....	$m/s$
$U_{BE}$ = velocidade da bolha em relação à fase de emulsão.....	$m/s$
$U_{fa}$ = velocidade de fluidização aparente.....	$m/s$
$U_{fc}$ = velocidade de fluidização completa.....	$m/s$
$U_{fi}$ = velocidade de fluidização incipiente.....	$m/s$
$U_{MFP}$ = velocidade de mínima fluidização das partículas pequenas.....	$m/s$
$U_{MFG}$ = velocidade de mínima fluidização das partículas grandes.....	$m/s$
$U_{BL}$ = velocidade da bolha.....	$m/s$
$U_{RL}$ = velocidade relativa.....	$m/s$
$U_{TE}$ = velocidade terminal da partícula.....	$m/s$
$U_{FT}$ = velocidade total de fluidização.....	$m/s$
$U_{TO}$ = velocidade na qual o índice de mistura ( $M$ ) = 0,5.....	$m/s$
$U_{PJ}$ = velocidade média de descida das partículas menos fluidizáveis.....	$m/s$
$U_{PF}$ = velocidade média de descida das partículas mais fluidizáveis.....	$m/s$
$U_{PT}$ = velocidade da partícula.....	$m/s$
$U_{EM}$ = velocidade do gás na fase de emulsão.....	$m/s$
$U_W$ = velocidade da esteira.....	$m/s$
$U_{AG}$ = velocidade ascendente do gás na emulsão.....	$m/s$
$U_{SG}$ = velocidade superficial na condição de mínima fluidização.....	$m/s$
$U_{EM}$ = velocidade da emulsão.....	$m/s$
$U_{FL}$ = velocidade do fluido.....	$m/s$
$U_{DS}$ = velocidade de descida dos sólidos na emulsão.....	$m/s$



$V_{PT}$ = volume total de partículas no leito.....	$m^3$
$V_{WK}$ = volume de esteira.....	$m^3$
$V_{BL}$ = volume da bolha.....	$m^3$
$V_{PJ}$ = volume de partículas mais densas que descem após a passagem de uma bolha.....	$m^3$
$V_{GB}$ = volume de gás na bolha.....	$m^3$
$V_N$ = volume de nuvem.....	$m^3$
$V$ = velocidade.....	m/s
$V$ = volume da amostra.....	$m^3$
$W_{TP}$ = massa total de partículas no leito.....	kg
$w_{UA}$ = massa de uma única partícula do componente A.....	kg
$w_{UB}$ = massa de uma única partícula do componente B.....	kg
$w_{AM}$ = massa da amostra.....	kg
$w_{CT}$ = fração em peso do componente estudado na metade superior.....	---
$w_{CB}$ = fração em peso do componente estudado na metade inferior.....	---
$W_{fo}$ = massa dos filtros antes dos experimentos.....	g
$W_{fe}$ = massa dos filtros após os experimentos.....	g
$W_{fi}$ = massa dos filtros.....	g
$W_{fa}$ = massa dos filtros + areia.....	g
$W_{fa}^*$ = massa dos filtros + areia após a dissolução do sal.....	g
$W_{tt}$ = massa dos filtros + areia + sal.....	g
$W_{aa}$ = massa da areia.....	g
$W_{sl}$ = massa do sal.....	g
$x$ = coordenada retangular.....	m
$x_i$ = valor observado.....	unidade da grandeza
$x_{MD}$ = média dos valores observados.....	unidade da grandeza
$X_{LF}$ = fração média em massa das partículas mais densas ou mais pesadas no leito.....	---
$X^*$ = fração em massa das partículas mais densas ou mais pesadas no topo do leito.....	---

$Y_{DS}$ = distância adimensional de segregação.....	----
$Y_{JF}$ = distância entre as partículas menos e mais fluidizáveis.....	m
$y$ = distância na direção da difusão.....	m
$z$ = distância do distribuidor.....	m
$Z$ = altura adimensional em relação ao fundo do leito.....	----
$Z'$ = altura adimensional modificada, definida na equação (129).....	----

## SÍMBOLOS GREGOS

$\alpha$ = fator experimental na equação (02).....	----
$\alpha_o$ = fator definido na equação (70).....	----
$\beta$ = fator experimental na equação (02).....	----
$\delta$ = parâmetro na equação (58).....	----
$\Delta$ = variação da grandeza.....	unidade da grandeza
$\gamma_A$ = peso específico do material A.....	$N/m^3$
$\gamma_B$ = peso específico do material B.....	$N/m^3$
$\gamma$ = parâmetro definido na equação (64).....	----
$\lambda$ = parâmetro definido na equação (64).....	----
$\varepsilon$ = porosidade.....	----
$\varepsilon_{MF}$ = porosidade na mínima fluidização.....	----
$\varepsilon_{FX}$ = porosidade do leito fixo.....	----
$\varepsilon_{FL}$ = porosidade na condição de fluidização.....	----
$\mu_{FL}$ = viscosidade do fluido.....	$Pa/s$
$\mu_{PP}$ = média verdadeira da população.....	unidade da grandeza
$\theta_{WK}$ = ângulo da esteira.....	----
$\phi$ = esfericidade da partícula.....	----
$\rho$ = massa específica.....	$kg/m^3$
$\rho_{PT}$ = massa específica do sólido.....	$kg/m^3$
$\rho_{FL}$ = massa específica do fluido.....	$kg/m^3$
$\rho_{MD}$ = massa específica média.....	$kg/m^3$
$\rho_{PP}$ = massa específica das partículas pequenas.....	$kg/m^3$

$\rho_{Pg}$ = massa específica das partículas grandes.....	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{PJ}$ = massa específica das partículas menos fluidizáveis.....	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{PF}$ = massa específica das partículas mais fluidizáveis.....	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{RE}$ = razão entre densidades das partículas mais pesadas e mais leves...—	
$\rho_A$ = massa específica do material A.....	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_B$ = massa específica do material B.....	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{AP}$ = massa específica aparente das partículas.....	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{AB}$ = massa específica absoluta das partículas.....	kg/m <sup>3</sup>
$\phi$ = coeficiente na equação (47).....	—
$\sigma$ = desvio padrão da população.....	—
$\sigma_{LO}$ = melhor estimativa do limite inferior da verdadeira variância.....	—
$\sigma_{UP}$ = melhor estimativa do limite superior da verdadeira variância.....	—
$\sigma_0$ = desvio padrão na condição inicial da mistura segregada.....	—
$\sigma_R$ = desvio padrão definido na equação (118).....	—
$\chi^2$ = chi-quadrado definido na equação (123).....	—
$\chi_{UP}^2$ = chi-quadrado do limite superior.....	—
$\chi_{LO}^2$ = chi-quadrado do limite inferior.....	—



## RESUMO

A mistura de sólidos particulados é uma importante operação direta para inúmeras indústrias além de necessária para a otimização de outros processos.

O propósito central deste trabalho foi de organizar e apresentar alguns dos vários aspectos que cercam o processo de mistura de particulados.

Foram discutidos alguns mecanismos, equipamentos, aplicações estatísticas e técnicas de experimentação.

Nesse trabalho foram propostos três sistemas binários areia/traçador (sal) com granulometrias médias de, respectivamente, 225/450  $\mu\text{m}$ , 450/450  $\mu\text{m}$  e 900/450  $\mu\text{m}$ . Os dois primeiros sistemas foram ensaiados com sucesso. O terceiro sistema proposto mostrou-se inviável, pois nas condições de fluidização necessárias o traçador fragmentou-se consideravelmente.

Foram realizados experimentos com três velocidades de fluidização, 1,4  $U_{MF}$ , 1,7  $U_{MF}$  e 2,0  $U_{MF}$  com retirada de amostras em quatro tempos para três níveis do leito e sete posições no mesmo plano.

Em cada tempo foram retiradas 21 amostras totalizando 504 amostras. Para verificar a repetibilidade dos resultados duas outras séries de experimentos semelhantes foram realizadas. No total efetuou-se 18 experimentos com a retirada de 1512 amostras.

Os resultados mostraram que existe, no tempo inicial, uma melhor homogeneização na região central do leito, possivelmente pela passagem das bolhas por essa região, mesmo em velocidades baixas. No decorrer do tempo verificou-se uma estabilização que depende do sistema de partículas e das condições operacionais.

Os sistemas com diferenças de tamanho mantiveram a segregação ao longo do tempo com tendência para um equilíbrio.

Nas velocidades mais altas o processo alcançou as melhores misturas, sendo que no sistema com partículas de bitolas semelhantes conseguiu-se excelentes resultados.



## ABSTRACT

The mixing of solid powders is an important direct operation in many industries besides necessary to get optimization of other processes.

The purpose of this work was to organize and to present some of the various aspects concerning the process of particulate mixing.

Some mechanisms, equipments, statistic applications and experimental technics were discussed.

In this work three binary systems sand/tracer (salt) with different granulometries were proposed, i. e. 225/450  $\mu\text{m}$ , 450/450  $\mu\text{m}$  and 900/450  $\mu\text{m}$  respectively. The first two systems performed successfully. The third one was not viable since at the required fluidization conditions the tracer considerably fragmented.

During the development of this work carried out laboratory experiments by using three fluidization velocities, i. e. 1,4  $U_{MF}$ , 1,7  $U_{MF}$  and 2,0  $U_{MF}$ , with samples collected from three levels of the bed at seven spots each level, at four different times from start.

In each time 21 samples were collected totalizing the amount of 504 samples. In order to establish the repeatability of the results, two additional similar series of experiments were performed. The total amount of experiments performed were 18 with the collection of 1512 samples.

The results indicated the existence, at the inicial time, of a better homogenization at the bed central region, possibly due to the rising of bubbles through this region, even under low velocities. The mixing and segregation established at different times depending on the particles system and operational conditions.

The systems with difference of sizes kept a segregation behaviour in the course of time, tending to equilibrium.

At higher velocities the process reached better mixtures, with excellent results being found for systems of similar size particles.

## 1- INTRODUÇÃO

A mistura de material sólido granulado é uma importante operação para garantir a qualidade, maximizando a homogeneidade de produtos e processos industriais.

Principalmente quando os componentes possuem propriedades bastante diferentes surgem vários tipos de interações entre as partículas interferindo no desempenho do equipamento e no grau de mistura.

Apesar da aparente simplicidade não é uma tarefa fácil mensurar os fenômenos que ocorrem na mistura de sólidos particulados quando o controle, como condição essencial, faz parte do processo.

A teoria da mistura de sólidos particulados secos fornece o suporte à investigação do processo tendo em vista os vários fenômenos e mecanismos que podem ocorrer nesse tipo de contato.

Entre os fenômenos mais comuns estão a percolação das partículas menores numa região de partículas maiores, coesão por forças eletrostáticas, coesão por efeitos da umidade e a fragmentação dos componentes mais frágeis entre outros. Esses fenômenos estão presentes na grande maioria das operações práticas e possibilitam a explicação de fatos quando da observação experimental.

Inúmeros equipamentos estão disponíveis para promoverem a mistura de sistemas particulados e a melhor opção não é uma escolha fácil pois depende de vários aspectos envolvidos, sendo necessários estudos teóricos e experimentais também nesse campo.

O processo de mistura realizado em um leito fluidizado teve recentemente seu uso ampliado e sua teoria é fundamental para melhor entendimento da operação e pela necessidade de determinar parâmetros



essenciais do processo. Deve ser notado que apesar de já conhecida e desenvolvida, ainda não existe consenso mesmo quanto aos seus fundamentos e os dados observados na literatura variam consideravelmente.

Na realidade a mistura de partículas no leito fluidizado é governado por um conjunto de fenômenos complexos explicados teoricamente, mas difíceis de mensurar pois exigem equipamentos e técnicas sofisticados, caros e muitas vezes de resultados duvidosos ou no mínimo de interpretação trabalhosa.

Para que os resultados experimentais tenham uma adequada interpretação e credibilidade um trabalho estatístico deve ser desenvolvido. Nessa etapa, como nas demais, é preciso cuidado pois é outro aspecto complexo e bastante amplo, com várias abordagens possíveis. Existem abordagens muito sofisticadas e outras mais simples, mais usadas na prática e na maioria dos experimentos uma vez que as mais elaboradas não apresentam facilidades de operação na maioria dos casos.

Nesse trabalho procurou-se abranger alguns dos vários aspectos dessa operação levando-se em conta um tipo específico de equipamento, no caso o leito fluidizado, um dos mais recentes processos em uso.

## 1.1 – Objetivos

Um objetivo deste trabalho foi o de verificar o comportamento do leito fluidizado em relação ao processo de mistura para três sistemas de partículas sólidas.

Outro objetivo foi estudar algumas velocidades para as quais o processo de mistura tem melhor desempenho.

O processo também foi observado em relação ao tempo para verificação de possíveis alterações na homogeneidade.

Também tem como objetivo a verificação teórica dos parâmetros de um modelo de mistura/segregação relacionados às características do processo de fluidização.



## 2 – REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 - Teoria da mistura de sólidos particulados

Segundo CLUMP (1966), o termo mistura pode ser aplicado àquelas operações cuja finalidade é reduzir heterogeneidades ou gradientes na composição, propriedades ou temperaturas do material processado.

De acordo com FAN et al. (1970), a mistura de sólidos é uma operação pela qual dois ou mais materiais particulados são dispersos aleatoriamente em um equipamento misturador. Essa operação de mistura é utilizada em indústrias alimentícias, farmacêuticas, químicas, metalúrgicas, de fertilizantes, materiais cerâmicos, plásticos, borrachas, vidros, tintas, revestimentos para eletrodos de solda, entre outras.

Os estudos teóricos e práticos desse tipo de processo são relativamente recentes e na maioria das vezes existe predominância da prática sobre a teoria, por ser uma operação bastante complexa apesar da sua aparente simplicidade.

A mistura de sólidos particulados é utilizada nos casos onde o produto final é a soma de vários ingredientes, ou como um meio intermediário, quando para se alcançar um produto final é necessário passar pela operação intermediária de mistura como no caso da metalurgia do pó.

Recorre-se, portanto, à mistura de sólidos para obtenção de um produto de aceitável qualidade dependendo da aplicação e para controlar taxas de transferência de calor, transferência de massa e reações química.

Segundo os mesmos autores os aspectos importantes na mistura de sólidos podem ser resumidos pelas questões:

- o que é uma mistura é homogênea ?
- como avaliar se está bem misturada ?

- como uma mistura homogênea pode ser preparada eficiente e economicamente ?

De acordo com LAI & FAN (1975), um esquema adequado e consistente para classificar os sistemas de partículas deve ser estabelecido para facilitar estudos nesse campo. Os sistemas podem ser encontrados em três classes gerais: unitários, binários e multicomponentes.

A classe de partículas unitárias, como as que diferem apenas pela cor, não é considerada nos processos de misturas. Um sistema binário contém dois tipos diferentes de sólidos enquanto um sistema multicomponente contém mais de dois tipos diferentes.

Cada tipo de sistema pode ainda ser dividido em duas subclasses, os homogêneos e os heterogêneos. Um sistema homogêneo tem as mesmas propriedades físicas e é diferenciado através de características como cor e radiatividade. Por outro lado, um sistema heterogêneo tem propriedades físicas diferentes tais como tamanho, forma e densidade.

Segundo POUX et al. (1991) o objetivo de uma operação de mistura, idealmente, é obter uma distribuição na qual cada partícula de um dos componentes está ao lado de uma partícula do outro componente no caso de uma mistura binária. Para esse tipo foi sugerido o nome de mistura idealmente ordenada.

O conhecimento do mecanismo de mistura, das características dos materiais particulados e dos equipamentos onde se processará a mistura é essencial para a preparação de uma mistura homogênea adequada.

Pode-se ainda acrescentar que dependendo da finalidade do produto deve-se atingir um determinado grau de homogeneidade, melhor ou pior.

GOURDON et al. (1988) mostraram os possíveis estados de misturas. Um sistema granulado é composto, em muitos casos, por partículas com características morfológicas, mecânicas e físico-químicas muito diferentes.

Um equipamento deve ser usado para que as partículas evoluam de um estado de mistura a outro. Normalmente parte-se de um estado



estratificado, e o final desejado é um estado perfeitamente ou idealmente ordenado, ou seja, um meio isotrópico, como na figura 2.1.

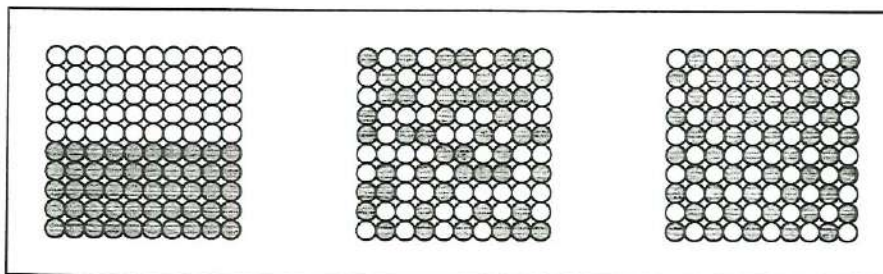


Figura 2.1 – Possíveis estados de misturas: estratificado, aleatório e idealmente ordenado

A noção mais usual de homogeneidade é caracterizada pela igual probabilidade da presença de cada um dos constituintes em todos os pontos do sistema.

A observação dos estados de misturas indica que os métodos de análises práticas influenciam o resultado e uma atenção quando da tomada de amostras pode evitar ou pelo menos minimizar erros.

FAN et al. (1990) em revisão da literatura mais recente notaram que na mistura de diferentes tipos de material particulado o interesse deve estar centrado em quatro grandes questões:

- tipo de misturador utilizado e seu modo de operação;
- caracterização do estado da mistura resultante;
- mecanismo de mistura que originou esse estado, e
- taxa do processo de mistura que originou esse estado.

O processo de mistura é influenciado profundamente pelas características de fluidez do material particulado a ser submetido à operação. Portanto, o reconhecimento da existência de dois tipos de materiais sólidos granulados, os de escoamento livre e os coesivos, forma a base para a classificação e caracterização das misturas e processos de mistura.



### 2.1.1 - Caracterização dos estados de mistura

Os processos de mistura podem ser classificados de várias maneiras, considerando o modo como o sólido escoou ou o mecanismo de mistura envolvido. Assim os processos são classificados em sistemas com grande fluidez ou escoamento livre e sistemas coesivos ou interativos, com base nas características de escoamento.

Uma mistura de grande fluidez permitirá, geralmente, que partículas individuais e livres movam-se independentemente, enquanto que numa mistura de partículas coesivas há algum mecanismo de vínculo entre elas, permitindo o movimento apenas em grupos.

A fronteira entre partículas com fluidez e coesivas não é muito clara uma vez que dependendo da granulometria, as forças de coesão atuam de modo distinto. Ainda com o atrito provocado pelo movimento uma partícula pode passar de boa fluidez a coesiva. É possível ter-se misturas com ambos os tipos de partícula, dificultando sua classificação.

#### Misturas de particulado com grande fluidez

A formação de uma mistura envolvendo somente partículas de escoamento livre é um processo estatístico no qual as regras da probabilidade se aplicam. Se as partículas com essa natureza são idênticas em todos os aspectos exceto a cor, então uma mistura completamente aleatória pode ser obtida.

A mistura nesse tipo de sistema é um processo de rearranjo das partículas que pode ser induzido por uma variedade de mecanismos, tais como difusão, convecção e cisalhamento. Este último é visto por alguns como resultado da combinação dos outros dois mecanismos. Um dos três aparece com predominância de acordo com o equipamento empregado.

Os mecanismos de mistura também podem ser vistos tanto macro quanto microscopicamente. Macroscopicamente visualiza-se o movimento de grupos de partículas, enquanto microscopicamente a atenção está na

percolação entre as partículas nas regiões conhecidas como zonas de colapso ou de falha existentes entre blocos de partículas em movimento.

Se as partículas apresentam características físicas diferentes, uma mistura final parcialmente aleatória será obtida devido à mistura incompleta ou segregação presente no processo. Portanto, uma distribuição aleatória é raramente produzida gerando uma distribuição não uniforme de partículas individuais com grau de homogeneidade relativamente baixo.

Sob essa circunstância, zonas de maior porosidade que o restante da mistura são geradas entre grupos de partículas que deslizam entre si como mostrado na figura 2.2.

A percolação entre as partículas, ou a drenagem de pequenas partículas através dos interstícios entre as partículas maiores, têm lugar nessas falhas no interior do sistema particulado.

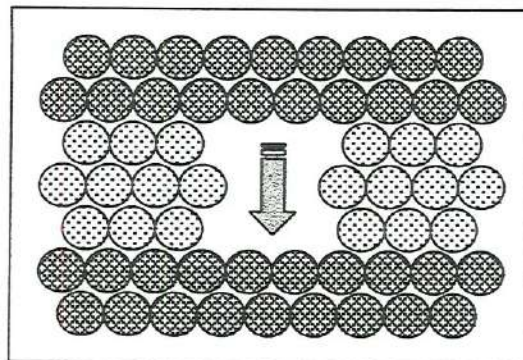


Figura 2.2 - Representação idealizada de uma zona de falha horizontal.

A taxa de percolação depende dos efeitos da força da gravidade e da tensão entre as partículas de diferentes tamanhos, formatos, densidades e rugosidade superficial.

A percolação pode ser induzida por cisalhamento, ou ocorre espontaneamente se a razão entre os diâmetros das partículas que percolam e os diâmetros das partículas do restante do sistema é menor que um determinado valor crítico.

Para processos envolvendo contato entre diferentes tipos de partículas, os pontos de contato entre as espécies podem ser tomados como



medida da qualidade da mistura, ou ainda as áreas de contato, como em FAN et al. (1990). Experimentos mostram um erro relativo menor quando se utiliza os pontos de contato, figura 2.3, ao invés da variância como estimativa da qualidade da mistura, observando-se que na prática existe extrema dificuldade para averiguação.

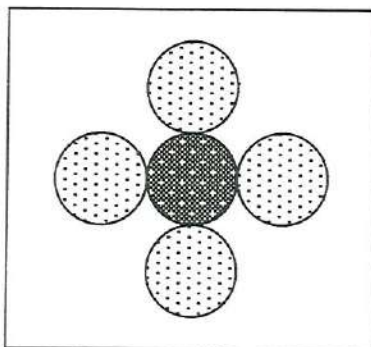


Figura 2.3 - Exemplo de pontos de contato.

#### Misturas coesivas

Com misturas de partículas de escoamento livre a escala de segregação é principalmente uma consequência do movimento individual das partículas. No caso de misturas de sólidos coesivos o movimento independente é restringido por uma variedade de forças entre partículas.

A natureza e intensidade dessas forças determinará a facilidade ou dificuldade de formar aglomerados de constituintes similares. O mecanismo de mistura para partículas de escoamento livre não é adequado para sistemas de sólidos coesivos.

Três forças principais podem formar a estrutura da mistura, descartando-se algum vínculo sólido como por exemplo o promovido por uma reação química. Essas forças são produzidas por:

- umidade;
- carga eletrostática, e
- atração de Van der Waals.



A ligação por umidade como na figura 2.4, é causada pela aproximação de camadas úmidas de partículas vizinhas. A umidade apresenta-se como vapor absorvido ou por pontes líquidas formadas entre as partículas.

Ligação eletrostática é atribuída à forças de atração entre as partículas com diferentes potenciais de carga elétrica superficial.

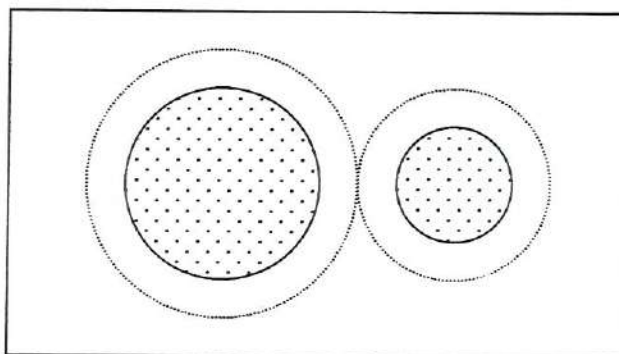


Figura 2.4 - Representação da camada úmida aderente entre partículas.

A atração de Van der Waals refere à força existente entre átomos ou moléculas neutros separados por uma distância maior que a própria dimensão.

As várias forças de atração coexistem em sistemas reais, mas a força de ligação devido à umidade pode sobressair em relação as outras e também interferir em sua magnitude. Em outras palavras, a umidade ambiente tem uma forte influência na formação do produto final.

O termo mistura ordenada foi proposto para descrever misturas formadas por partículas coesivas ou interativas em comparação às misturas aleatórias formadas por partículas de boa fluidez. Quando o termo é aplicado à misturas contendo ambos os tipos de sólidos particulados, começam as dificuldades de classificação.

Sugeriu-se então que dois termos são necessários: um para definir o nível de homogeneidade e outro para o tipo de mistura. Os termos interativo ao invés de ordenado, e não-interativo ao invés de aleatório deveriam ser usados para diferenciar as misturas cujos constituintes fossem coesivos daquelas misturas compostas por partículas de grande fluidez.

Contudo, existem também aqueles que consideram que o mecanismo pelo qual a mistura foi formada deva estabelecer sua denominação. Por isso, o termo mistura ordenada deve ser aplicado apenas a sistemas nos quais a adesão do componente mais fino à superfície da partícula maior, como na figura 2.5, é o mecanismo dominante da formação da mistura, uma vez que a adesão confere um certo grau de ordem ao sistema.

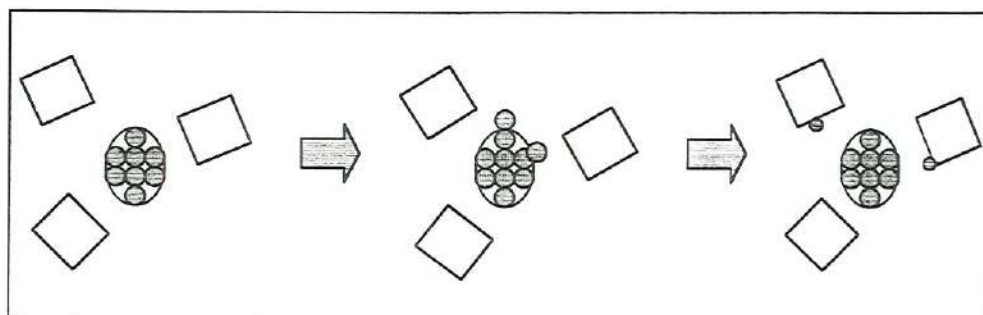


Figura 2.5 - Representação de mistura ordenada coesiva.

Já o termo mistura aleatória parcialmente ordenada é sugerido para descrever aquela situação na qual ambas as misturas, ordenada e aleatória, ocorrem entre os componentes.

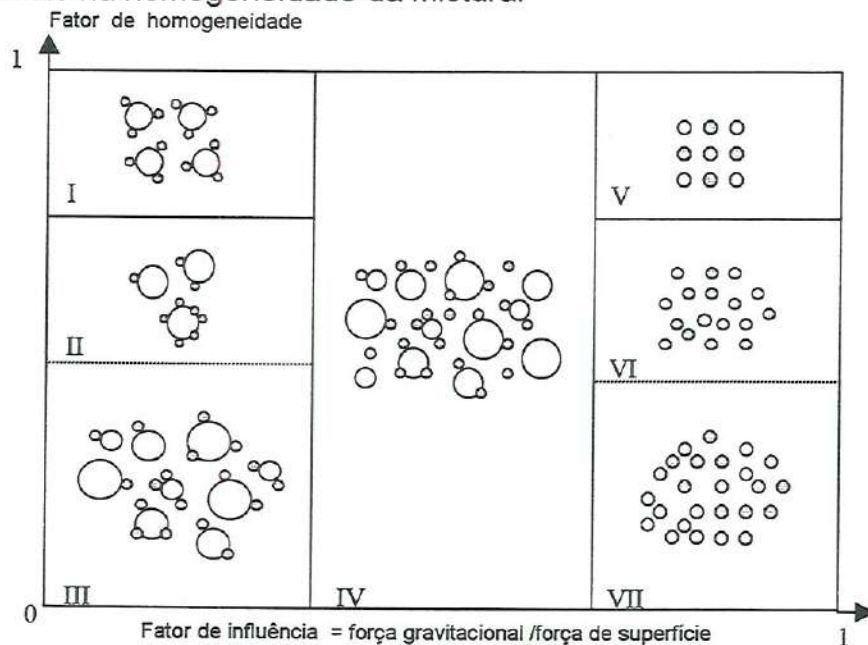
Outro termo é a mistura total que inclui todos os tipos de misturas de sólidos particulados.

Os termos mistura aleatória e mistura ordenada foram introduzidos para avaliar a mistura na prática e levar em consideração as características das partículas. Misturas aleatórias exigem partículas de tamanho e peso iguais e com pouco ou nenhum efeito de superfície.

A mistura chamada de ordenada difere da aleatória por não exigir tamanho e peso iguais para os componentes mas com algum tipo de interação entre eles, ou seja, qualquer forma de adesão. Este conceito é aplicado à partículas coesivas ou interativas finas. Se a mistura é considerada completa o resultado deve ser o de um recobrimento das maiores partículas pelas mais finas.

Alguns autores preferem o termo mistura perfeita correspondendo ao melhor arranjo que pode resultar da operação.

A relação entre as várias misturas totais está retratada no diagrama da figura 2.6, mostrando a influência da força gravitacional e das forças superficiais na homogeneidade da mistura.



- |                                      |
|--------------------------------------|
| I - Perfeitamente ordenada           |
| II - Não perfeitamente ordenada      |
| III - Pseudo - aleatória             |
| IV - Aleatória parcialmente ordenada |
| V - Aleatória ideal                  |
| VI - Aleatória                       |
| VII - Não aleatória                  |

Figura 2.6 - Relações entre diferentes misturas totais baseadas na influência relativa da gravidade e forças superficiais em um dado conjunto de partículas e na homogeneidade da mistura.

Outra definição encontrada é a de um estado de mistura completa, quando partículas de diferentes cores são misturadas e a probabilidade de se retirar uma de determinada cor é a mesma em qualquer ponto da mistura. No caso da probabilidade não ser a mesma a mistura é incompleta. Essas duas definições foram usadas para descrever misturas ordenadas e aleatórias respectivamente.

Sugeriu-se ainda o nome de mistura perfeitamente aleatória como aquela mistura onde a probabilidade de encontrar uma partícula em qualquer



ponto seja idêntica. Para a mesma probabilidade usou-se também o termo mistura completamente aleatória.

Uma mistura binária não aleatória foi definida como aquela na qual a probabilidade de se encontrar uma partícula de determinado componente não é constante em todos os pontos, fato que normalmente ocorre na prática.

Um outro termo encontrado na literatura é o de mistura aleatória parcialmente ordenada, que descreve a mistura quando o menor componente é misturado por ambos os mecanismos. Nesse caso as áreas de absorção das partículas transportadoras tornam-se saturadas com partículas coesivas, enquanto o restante do material coesivo aglomera-se formando unidades ordenadas aleatórias.

Muitos pesquisadores dessa área utilizam o conceito de tamanho da amostra para caracterizar a natureza da mistura. Segundo eles a mistura ordenada não pode alcançar uma homogeneidade maior que aquela descrita pelo tamanho da unidade ordenada simples, estabelecendo esse limite como definição de homogeneidade.

Outra proposta define o termo mistura ordenada como aquela que possui desvio padrão nulo para a concentração de amostra em todos os tamanhos de amostra, observado que o tamanho da amostra é maior que o tamanho de uma unidade ordenada simples. Isso é contrário à definição de mistura aleatória, onde o desvio padrão tende a diminuir com o aumento do tamanho de amostra. Na prática uma mistura de partículas sólidas com desvio padrão nulo pode ser chamada de mistura perfeita, o que não ocorre normalmente.

### 2.1.2 - Conceito de grau de mistura

Um arranjo completamente ordenado de partículas na mistura foi ao longo do tempo considerado como uma mistura perfeita e amostras pontuais dariam a mesma exata composição. Entretanto, na prática tal mistura não pode ser obtida. Para a obtenção da mistura perfeita apenas a técnica de

colocação manual dos constituintes na ordem desejada alcançaria esse objetivo. Na prática, com os equipamentos existentes, uma mistura estatisticamente aleatória é obtida.

Um rápido levantamento bibliográfico permite mostrar que existem muitas sugestões para a definição das misturas de sistemas particulados mas não existe consenso, indicando a dificuldade de entendimento e de interpretação dos mecanismos de mistura, principalmente quando se observa o sistema sob o ponto de vista microscópico.

Portanto, o termo homogeneidade é de difícil definição e não é adequado nem suficiente para qualificar uma mistura, o que depende da natureza do sistema particulado e da finalidade exigida. Um exemplo claro é a diferença de padrão requerido das misturas produzidas nas indústrias de cosméticos e farmacêutica.

Uma das definições de mistura homogênea é aquela na qual as composições dos constituintes são uniformes por toda mistura. Para se conhecer essa homogeneidade algum critério do grau de mistura deve ser definido e avaliado. Para tanto, amostras, ao invés do todo, devem ser analisadas. Essas amostras devem ser representativas da mistura. A quantidade de material a ser retirado em cada amostra, o número de amostras a serem analisadas e o local de retirada, são questões importantes e difíceis quando se trata de mistura de sólidos.

Vários índices são propostos na literatura e essa diversidade é indicativa da dificuldade envolvida na descrição da natureza complexa do processo de mistura e do produto final.

A maioria das definições da qualidade da mistura baseia-se na variância da concentração de um certo componente entre amostras pontuais. Apesar disso é difícil discernir o significado dessas definições.

Para se compreender a homogeneidade de uma mistura é necessário, portanto, um índice que pretende medir o grau de mistura. Esse índice deve especificar as características da mistura final, ser independente do processo de mistura e de fácil determinação.

### 2.1.3 - Parâmetros da mistura

O mecanismo de mistura de sólidos é um processo complexo no qual as características do particulado, do equipamento e das condições de operação podem influir na tendência de misturar ou segregar. Por isso o grau de mistura e a taxa de mistura são funções de inúmeras variáveis relacionadas à essas características.

Normalmente agrupam-se essas variáveis em:

#### Características dos sólidos:

- distribuição do tamanho de partículas;
- forma da partícula e características da superfície;
- densidades absoluta e aparente;
- umidade;
- ângulo de repouso;
- coeficiente de fricção das partículas;
- friabilidade ou capacidade de fragmentação;
- estado de aglomeração, e
- grau de escoamento, livre ou não.

#### Características do equipamento de mistura:

- dimensão e geometria;
- dimensão do rotor;
- material de construção;
- acabamento superficial;
- número, tipo e localização dos alimentadores, e
- dispositivos de descarga.

#### Condições de operação:

- peso de cada constituinte;
- relação dos volumes do misturador e da mistura;



- modo, seqüência, colocação e taxa de adição dos constituintes, e
- velocidades do misturador e/ou agitador, caso existam.

Freqüentemente o particulado se apresenta como uma distribuição de tamanhos o que pode acarretar problemas na operação. No caso dos misturadores usuais as partículas maiores tendem a ficar na superfície e as menores no fundo. Já num equipamento operando em leito fluidizado e considerando apenas o tamanho, as maiores ficam no fundo e as menores nas superfície.

A segregação ocorre também por diferença de densidade. Para os misturadores mais comuns é mais importante a diferença de tamanho do que a de densidades. Em leitos fluidizados a influência da densidade é considerada maior que a do tamanho, dentro de certos limites e proporção.

O formato e as características superficiais do particulado afetam a propriedade de escoamento do sistema. Partículas mais esféricas e com baixa rugosidade fluem melhor que as de características contrárias.

A umidade afeta a mistura uma vez que tende a produzir aglomerados ou proporciona a adesão nas paredes, dificultando a operação como um todo, ou seja, carregamento, mistura, descarregamento e limpeza.

Sólidos com pequeno ângulo de repouso possuem bom escoamento e baixo coeficiente de atrito. Deve-se atentar para o fato de um bom escoamento não ser necessariamente uma vantagem, pois pode haver segregação devido ao movimento mais rápido.

Partículas que fragmentam com relativa facilidade ao se chocarem com outras partículas ou com as paredes do misturador alteram a distribuição de tamanhos e a forma durante o processo, afetando o desempenho geral.

As dimensões e geometria do misturador influem no padrão de escoamento e na velocidade das partículas.

As interações entre as partículas, o seu material de constituição e acabamento podem produzir forças estáticas e o aparecimento de aglomerados.

O número, o tipo e a localização dos pontos de carga e descarga podem melhorar ou piorar o rendimento do sistema como um todo. As condições de operação afetam o grau e a taxa de mistura.

Na operação de homogeneização de sistemas particulados sólidos dois mecanismos competem, o de mistura e o de segregação. Com relação ao mecanismo de mistura os seguintes parâmetros são considerados:

- diâmetro do misturador;
- velocidade de rotação do misturador e/ou do rotor;
- diâmetro médio das partículas;
- coeficiente de atrito médio entre partículas, e
- força da gravidade.

Para o mecanismo de segregação, além dos anteriores, devem ser relacionados outros parâmetros como:

- diferença dos tamanhos médios das partículas;
- densidade média da mistura, e
- diferença das densidades das partículas.

#### 2.1.4 - Taxa de mistura

Nas operações de mistura é necessário conhecer o tempo exigido para alcançar o grau de mistura adequado ao objetivo que se deseja, mas essa também não é uma tarefa muito fácil devido as inúmeras variáveis envolvidas e ao trabalho para processar todas as informações. A taxa de mistura é importante para o entendimento do mecanismo básico de mistura e melhorar o projeto do equipamento.

#### 2.1.5 - Mecanismo de mistura

Revisando a literatura, FAN et al. (1970) encontram três mecanismos para a mistura:

- mistura convectiva, que é a transferência de grupos de partículas adjacentes de um local da mistura a outro. Esse tipo de homogeneização é caracterizada pelo movimento de blocos de partículas dentro do sistema. Os componentes são subdivididos em grupos que se deslocam relativamente uns aos outros e tem seus tamanhos reduzidos. Esse movimento relativo cria áreas de contato entre as diferentes espécies e conduz a um mistura em larga escala.
- mistura difusiva, que é a distribuição de partículas sobre uma nova superfície desenvolvida, como nos misturadores tipo tambor rotativo, figura 2.7. É a homogeneização pelo movimento individual das partículas que assegura a mistura em pequena escala.
- mistura por cisalhamento ou as vezes chamada de difusão-convecção, pois é considerada como uma combinação dos dois mecanismos anteriores. Uma ação mecânica deve ser imposta. A mistura ocorre pelo deslizamento de planos de partículas no interior da mistura.

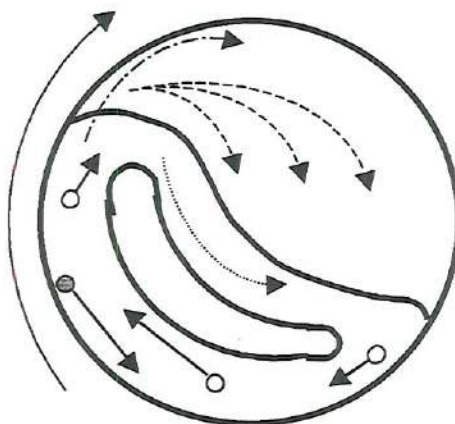


Figura 2.7 - Escoamento de partículas em um cilindro horizontal.



Nas operações de mistura, todo tipo de misturador tem um modo de ação predominante, mas os três modos normalmente ocorrem simultaneamente com maior ou menor intensidade. A convecção pode ser comparada ao movimento turbulento dos líquidos. A difusão é um movimento semelhante à difusão molecular. Essas analogias devem ser feitas apenas em escala macroscópica. É observado que a mistura de partículas sólidas diferem da mistura de líquidos em alguns aspectos de acordo com POUX et al. (1991):

- o movimento de difusão não é equivalente para sistemas gasosos ou líquidos e particulados. No caso de sólidos não existe movimento relativo de partículas sem a adição de energia na mistura.
- componentes de uma mistura de partículas usualmente não possuem as mesmas propriedades e diferem nas características físicas. A mistura de tais componentes pode produzir segregação o que evita a formação de um produto final adequado. Em sistemas líquidos, a segregação é atribuída aos elementos fluidos com diferentes densidades e isso desaparece com a melhor distribuição aleatória possível dentro do sistema.
- nos sistemas particulados o menor elemento é ainda uma partícula e deve ser comparado com uma molécula dos sistemas líquidos. Nesse último caso a menor qualidade da mistura deve ter uma homogeneidade mais fina que em uma mistura de partículas sólidas aleatória.

#### 2.1.6 - Mecanismo de segregação

A possível homogeneização de um sistema particulado ao longo do tempo resulta da competição entre mistura e segregação, e o equilíbrio final entre os dois mecanismos determina a qualidade da mistura. Esse equilíbrio pode ser visto como um processo reversível.

As causas da segregação são várias e dependentes da natureza dos componentes. Em POUX et al. (1991) existe uma proposta de classificação em dois grupos diferenciados pelo resultado final:

- segregação dos componentes, induzida por diferenças no tamanho da partícula, formato, densidade e resiliência.
- segregação por aglomeração de partículas, induzida por cargas eletrostática e umidade.

Para sistemas coesivos ou interativos duas formas de segregação podem ocorrer dentro de uma mistura ordenada, segregação dos constituintes e segregação de unidade ordenada.

A segregação de constituintes ocorre essencialmente em misturas ordenadas de partículas com grande fluidez por causa da ação mecânica. Esse fenômeno pode ser produzido em misturas de partículas coesivas nas quais as tensões aplicadas são suficientes para quebrar a ligação entre os constituintes. Nesse caso a segregação é induzida principalmente pelas diferenças nos tamanhos e densidades das partículas.

A segregação de constituinte pode ser vista ocorrendo em dois estágios, mostrados nas figuras 2.8 e 2.9. Estes estágios são:

- a separação de partículas aderentes de sua partícula transportadora, podendo ser vista como a segregação do constituinte em pequena escala.
- a adesão dessa partícula menor a uma outra partícula menor ou a outra transportadora.

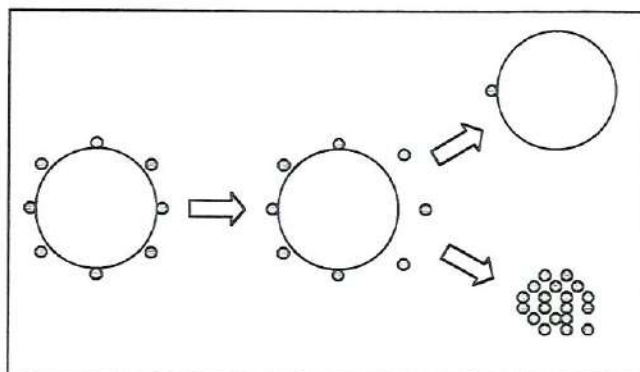


Figura 2.8 - Segregação do constituinte em pequena escala.

Já a segregação de unidade ordenada ocorre somente em misturas formadas pela adesão de dois constituintes. A ligação entre dois constituintes é muito forte e somente unidades ordenadas podem segregar.

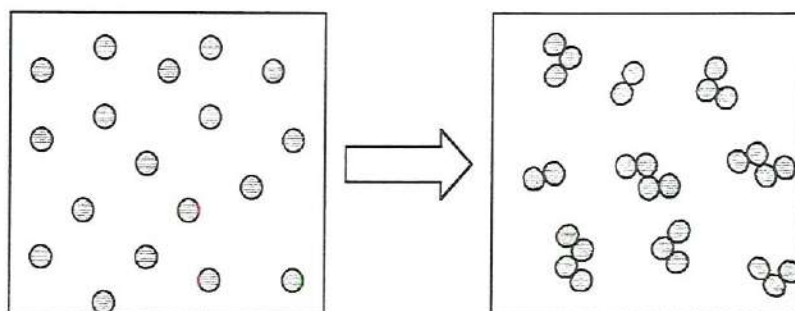


Figura 2.9 – Segregação do constituinte em grande escala.

Segregação de unidade ordenada, por outro lado, é causada pela segregação de partículas transportadoras de diferentes tamanhos com adesão de material coesivo fino, como na figura 2.10.

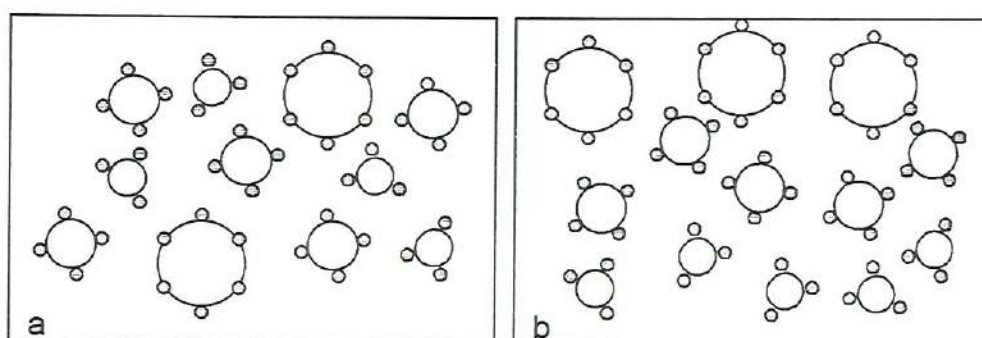


Figura 2.10 - Segregação de unidades ordenadas: (a) unidades aleatórias ordenadas (b) unidades ordenadas segregadas.

Para WANG & FAN (1977) a segregação é um processo que produz separação ou classificação de partículas. Os autores empregaram o modelo estocástico da cadeia de Markov para a mistura de sistema de partículas heterogêneas, diferindo em tamanho e/ou densidade e afirmaram que a vantagem do modelo é a de poder ser aplicado a quase todas as classes de equipamentos.



### 2.1.7 - Manipulação de sistemas particulados

Outro importante aspecto em muitos processos é a manipulação do particulado após a operação de mistura. A mistura pode ser um excelente produto quando ainda se encontra no equipamento, mas um manuseio mal executado pode resultar em segregação. Essa é uma diferença básica dos sistemas particulados em relação aos sistemas líquidos ou sistemas sólidos-líquidos cujos sólidos estão adequadamente dissolvidos.

Foi observado em FAN et al. (1970) a importância dos procedimentos posteriores ao processo de mistura tais como o descarregamento, a vibração e o armazenamento e escoamento em silos.

No projeto do processo de mistura de sólidos sugere-se que seja previsto um mínimo de transporte do produto acabado, ou seja, o armazenamento deve estar o mais próximo possível do equipamento. É claro que esse tipo de preocupação é função do uso do produto.

### 2.1.8 - Modelos de mistura

#### Modelo de difusão

Um modelo proposto como possível mecanismo de mistura de sólidos é o processo de difusão análogo à difusão molecular e esse mecanismo é descrito na maioria das vezes pela equação de Fick.

#### Modelo difusão – convecção

O modelo para descrever esse mecanismo de mistura pode ser descrito pela equação de Fick, do modelo de difusão, com a adição de um termo relativo à velocidade.

#### Modelo de convecção

Um modelo proposto para representar a mistura convectiva foi o processo de formação de uma mistura estriada. O processo, no qual a massa de material é repetidamente submetida a uma série de operações de mistura, inclui divisão e recombinação. O efeito de cada etapa da operação de mistura é superposta a todas etapas anteriores. Tais operações repetidas ilustram o mecanismo de mistura por convecção e é esquematicamente representado na figura 2.11.

O processo de mistura para formar as estrias descrito anteriormente é essencialmente uma representação idealizada da mistura convectiva, cujo modelo está descrito em FAN et al. (1990).

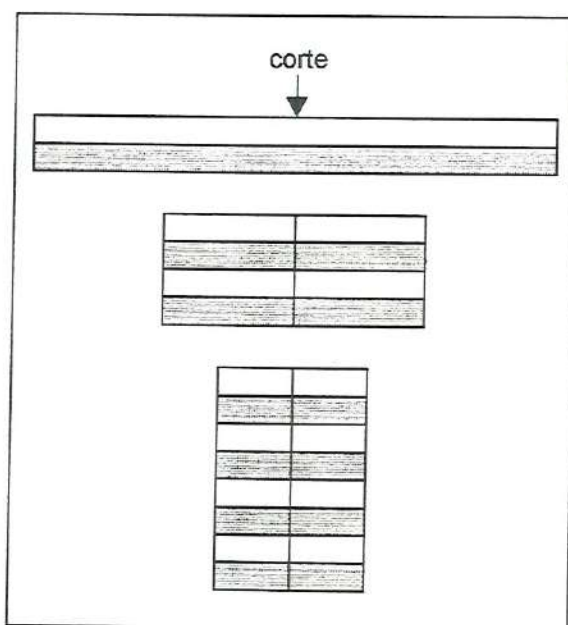


Figura 2.11 - Esquema representativo da formação de uma mistura estriada.

Se uma mistura visualmente uniforme é o objetivo, a operação deve ser interrompida quando a espessura das estrias tornam-se visualmente invisíveis. Esse estudo da formação de misturas estriadas ou em lâminas tem fornecido um profundo entendimento a certas operações básicas de mistura.

## 2.2 - Equipamentos de mistura

Como existe uma relativa simplicidade na construção desse tipo de equipamento a variedade produzida e pesquisada é bastante ampla, diferindo entre si por algum detalhe.

Apesar do grande número de tipos de projetos existentes, a maioria dos misturadores podem ser classificados de acordo com o mecanismo produzido nas partículas ou movimento dos misturadores.

HARNBY et al. (1985), levando em conta o mecanismo, resumiram a classificação dos misturadores em quatro grandes grupos:

- tipo tambor rotativo
- tipo convectivo
- de fluxo por gravidade
- leito fluidizado

Na tabela 2.1 está um resumo dessa classificação, utilizando alguns dos equipamentos mais comuns como exemplo.

Tabela 2.1 – Classificação de alguns misturadores mais usuais.

<u>Tipo de misturador</u>	<u>Tipo de operação</u>	<u>Mecanismo principal</u>
Tambor horizontal	Intermitente	Difusão
Tambor inclinado	Contínuo	Difusão
Cilindro vertical inclinado	Intermitente	Cisalhamento
Em "V"	Intermitente	Difusão
Duplo cone	Intermitente	Difusão
Forma de cubo	Intermitente	Difusão
Helicoidal	Intermitente/contínuo	Convectivo
Leito fluidizado	Intermitente	Convectivo

Autores como FAN et al. (1970) classificaram os equipamentos da seguinte maneira:



- tipo tambor rotativo;
- tipo tambor rotativo com cisalhamento, e
- com outros mecanismos.

Revisando a literatura, FAN et al.(1970) também encontraram os equipamentos classificados em dois grandes grupos:

- misturadores segregativos, que operam principalmente com uma combinação de difusão e cisalhamento, e
- misturadores tipo não-segregativos, cujo mecanismo predominante é a convecção.

Essa classificação não é adequada uma vez que a maioria dos equipamentos produzem algum tipo de segregação dependendo das partículas a serem processadas.

Já, MORAN(1967) apud FAN et al. (1970) classificou os misturadores de acordo com o movimento, resultando na tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Classificação dos misturadores conforme o movimento.

<b><u>Misturadores intermitentes</u></b>			<b><u>Misturadores contínuos</u></b>
<b>Aceleração</b>	<b>Transporte</b>	<b>Leito fluidizado</b>	Por gravidade
Cilindro rotativo	Vertical	Convencional	Sistemas transportadores
Por gravidade	Horizontal	Alta pressão	Centrífugos

Em FAN et al. (1990) é feito um resumo dos mecanismos dos tipos principais de misturadores.

POUX et al. (1991), revendo a literatura, encontraram aproximadamente as mesmas classificações anteriores, apenas diferindo das demais pela proposta de classificação segundo os grupos citados a seguir:

- corpo móvel
- corpo fixo e internos móveis
- leito fluidizado

### 2.2.1 - Misturadores tipo tambor rotativo:

Nesse tipo de misturador a rotação do equipamento faz com que as partículas no seu interior rolem umas sobre as outras formando uma nova superfície a cada instante. É apreciável a segregação que pode ocorrer nesse tipo de equipamento apresentado na figura 2.12.

O tambor rotativo tem como mecanismos predominantes o cisalhamento e a difusão aplicados na mistura de materiais granulares secos, com boa fluidez e com forma, densidade e propriedades dinâmicas semelhantes. A ação é produzida pela rotação e vibração que forçam os produtos a misturarem nas várias direções. Não é adequado para materiais que possam formar aglomerados e pode ocorrer segregação na descarga. É de fácil limpeza e fácil enchimento.

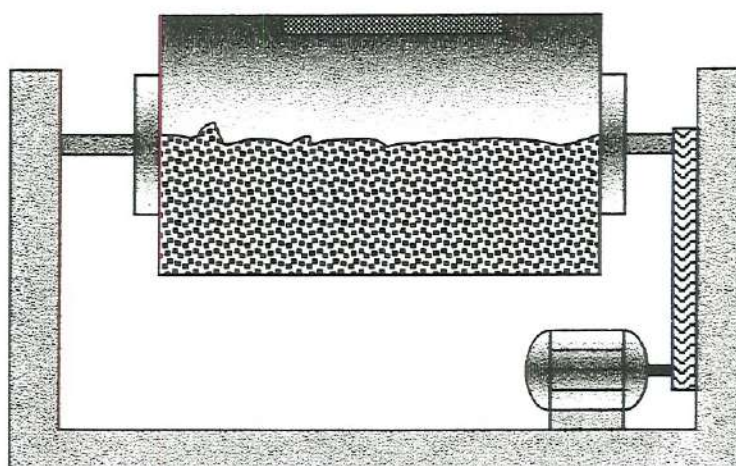


Figura 2.12 - Modelo de tambor rotativo simples.

Os misturadores tipo duplo cone, tipo "V", tipo "Y" e cubo rotativo descentrado possuem os mesmos mecanismos do tambor rotativo. A ação também é mediante rotação em torno de um eixo só que agora elevando o material junto à parede, escorregando e caindo sob efeito da gravidade. Como o anterior, não devem ser aplicados a materiais que aglomeram. São de fácil limpeza e enchimento. Estão apresentados na figura 2.13.

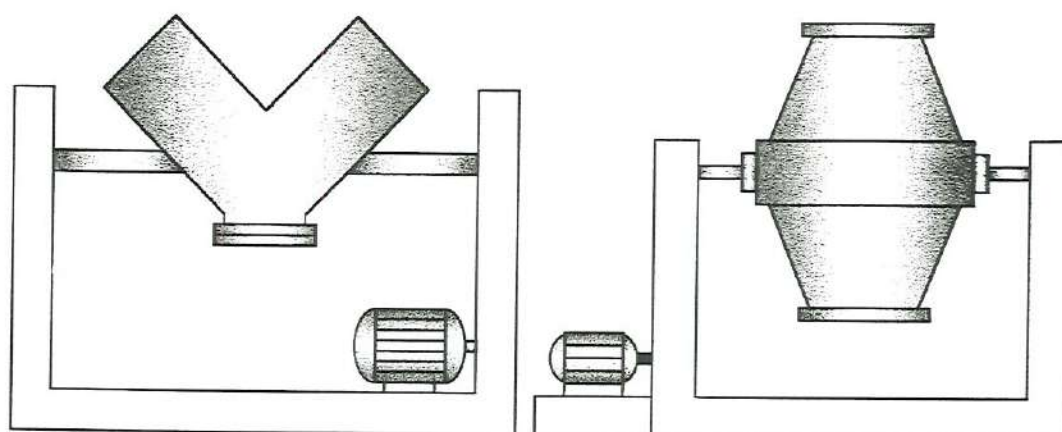


Figura 2.13 - Misturadores tipo em "V" e em duplo cone.

### 2.2.2 - Misturadores convectivos:

Na maioria dos misturadores que operam com esse mecanismo um impelidor rotativo geralmente helicoidal, interno a um corpo estático, desloca grupos de partículas de um local a outro do meio particulado. A segregação é menos intensa que em equipamentos operando por mecanismos de difusão ou cisalhamento.

O tipo fita helicoidal trabalha com convecção para misturar partículas fazendo-as rolar e trocar de posição dentro do grupo. É mais versátil que os anteriores uma vez que pode ser usado tanto para materiais secos quanto com certa umidade e até pastas. Também é adequado a produtos que tendem a aerar quando agitados. É de fácil enchimento mas de difícil limpeza. Pode acontecer segregação uma vez que possui melhor poder de mistura lateral do que axial e também no descarregamento. Está representado na figura 2.14.

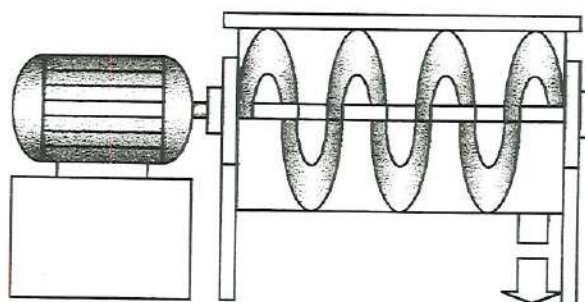


Figura 2.14 - Representação do misturador tipo fita helicoidal.



O misturador de parafuso orbital, apresentado na figura 2.15, tem como mecanismo a convecção e a difusão para misturas de particulado seco ou úmido, pastas e material que necessita adição de líquidos durante o processo. A ação é feita por um parafuso girando em seu próprio eixo ao mesmo tempo em que gira no eixo central do corpo do misturador. Não é adequado para material muito coesivo ou para quebrar aglomerados. Ocorrem problemas na descarga de partículas coesivas e produtos com forma de palito. A segregação pode ser evitada mantendo o parafuso acionado durante a descarga.

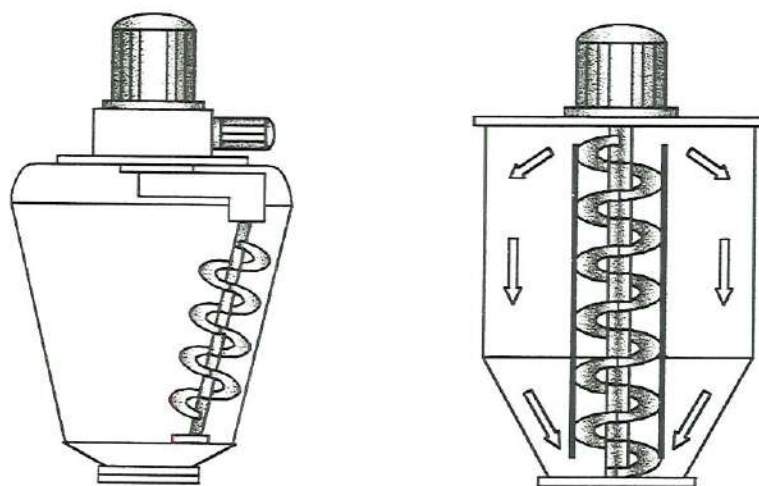


Figura 2.15 - Misturador tipo parafuso orbital e vertical.

O impelidor de alta velocidade trabalha por convecção fazendo com que as partículas, em movimento espiralado, subam pelas paredes do equipamento e caiam pela parte central. É apresentado na figura 2.16.

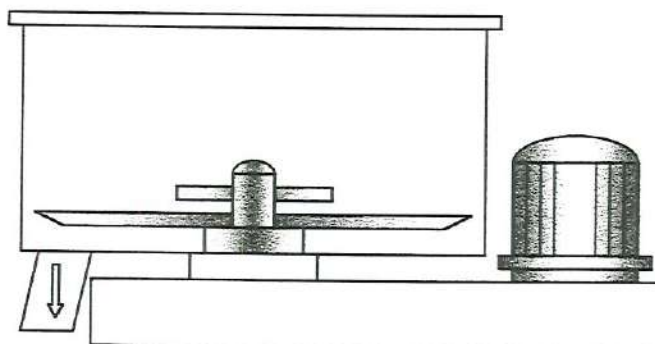


Figura 2.16 - Misturador com impelidor de alta velocidade.

Pode ser aplicado para quebrar materiais aglomerados e não deve ser usado com produtos sensíveis ao calor e frágeis. Se adequadamente projetado é de fácil limpeza e enchimento.

### 2.2.3 - Misturadores de fluxo por gravidade:

As partículas fluem pela influência da gravidade e assim, à medida que um grupo se desloca ocorre a mistura. Normalmente um cone central é instalado para produzir um gradiente de velocidade na direção vertical melhorando o mecanismo.

Exigindo-se melhor mistura as partículas podem ser realimentadas externamente, mecânica ou pneumaticamente, aumentando assim a eficiência. Aqui também ocorre segregação em função das propriedades do material a ser processado. Está apresentado na figura 2.17.

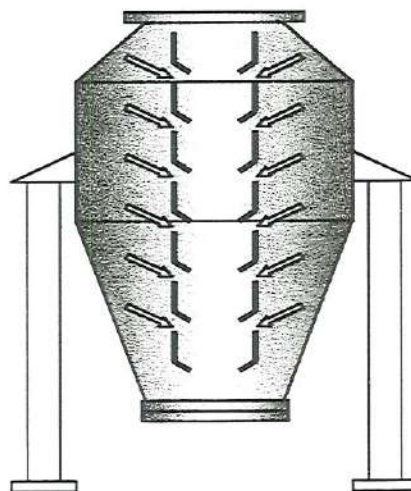


Figura 2.17 - Esquema de misturadores com fluxo por gravidade

### 2.2.4 - Misturadores tipo leito fluidizado:

Esse equipamento, em relação aos demais, é de uso mais recente, mesmo assim ainda é bastante escassa sua utilização.

Os efeitos combinados da convecção e da gravidade promovem a mistura do material onde o peso das partículas tendem a se equilibrar com a

flutuação. Existe, dependendo da vazão, uma grande mobilidade do particulado combinada à turbulência que possibilitam produzir misturas extremamente homogêneas e rápidas.

Em anos mais recentes os equipamentos cujo funcionamento é baseado na fluidização tiveram maior utilização devido à pesquisas para melhorar seu desempenho, ainda assim seu uso é restrito. O mecanismo produzido nesse tipo de equipamento é a difusão e a convecção. O material granulado é suspenso por um fluxo de ar que promove turbulência e circulação, desse modo a mistura é bastante rápida. Não é adequado a materiais com tendência a segregar ou aglomerar, mas isso pode ser minimizado com uma vazão correta de ar. Mesmo assim existe limitação quanto ao seu uso e deve ser melhor estudado. O leito fluidizado possui um potencial apreciável em relação ao tempo e à circulação promovida nas partículas. A figura 2.18 representa esse tipo de equipamento.

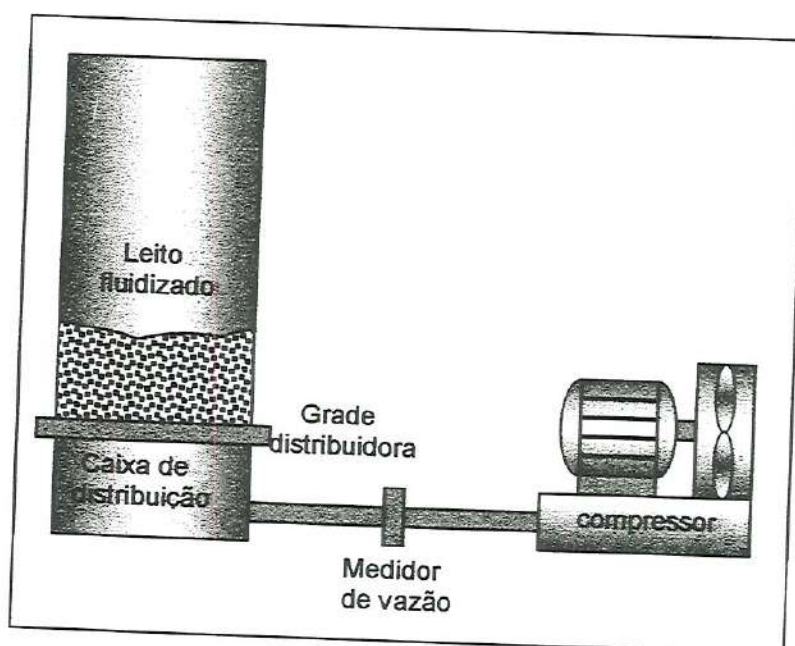


Figura 2.18 – Esquema básico de um leito fluidizado.

Esse levantamento foi fundamentado nos trabalhos de HARNBY (1985), FAN et al. (1990), além de vários outros autores citados pelos mesmos.



Nota-se a existência de um grande número de autores que classificaram esses equipamentos, cada qual com suas particularidades e levando-se em conta a evolução dos mesmos.

Os mesmos autores resumiram as principais características dos vários equipamentos feitos para misturar partículas sólidas, alguns desses estão apresentados nesse trabalho.

#### Outros tipos de misturadores

LOSNAK (1995) apresentou recentemente um misturador denominado “tipo rápido” cujo corpo é fixo e no seu interior, solidárias a um eixo rotativo, estão uma série de pás que promovem o deslocamento das partículas e conseqüente mistura. A figura 2.19 mostra os principais componentes desse equipamento.

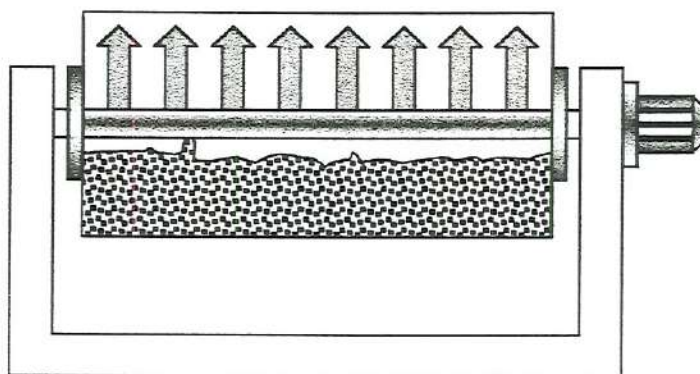


Figura 2.19 – Misturador rápido com pás rotativas e corpo fixo.

#### Características de mistura e dos misturadores

Em FAN et al. (1970) são apresentados alguns critérios que devem merecer atenção quando se faz a seleção de misturadores. Esses critérios são as características de mistura, características construtivas e fatores de custo.

POUX et al. (1991) reforça que uma característica a ser observada é a alteração no tamanho das partículas uma vez que misturadores

convectivos que possuem pequena distância entre o agitador e a parede produzem essa alteração. Outros tipos, como os de leite fluidizado, alteram o tamanho devido ao atrito entre partículas e fragmentação.

Também é imprescindível a preocupação com a qualidade do produto em indústrias como as alimentícias, farmacêuticas e químicas. Isso implica em facilidade de limpeza, evitar partes internas complexas e contato com partes lubrificadas, escolha do material de construção adequado quando as partículas são abrasivas ou reagem quimicamente.

Misturadores com alta velocidade podem elevar a temperatura e danificar ambos, produto e equipamento. Isso ocorre no processamento de polímeros e pode ser evitado usando-se dispositivo de troca de calor.

Misturadores convectivos são menos segregativos que os difusivos e por cisalhamento. Isso deve ser muito bem estudado pois equipamentos de leite fluidizado que também trabalham por convecção promovem segregação dependendo da relação entre densidade e tamanho das partículas.

O desempenho do misturador é também função das propriedades físicas dos componentes da mistura.

Quanto às características de mistura, os seguintes fatores devem ser considerados:

- precisão da mistura;
- reprodução dos resultados;
- tempo de mistura;
- tipo de mistura exigida;
- tendência a segregar;
- tendência a danificar o produto;
- tendência a elevar a temperatura;
- adequação à adição de líquidos;
- quantidade a ser misturada, e
- processo intermitente ou contínuo.

Com relação às características construtivas dos misturadores é necessário observar o seguinte:

- dimensão física;
- exigência de fundação;
- necessidade de equipamento auxiliar;
- potência exigida;
- facilidade de enchimento e/ou esvaziamento;
- facilidade de limpeza;
- disponibilidade de material de construção;
- finalidade, manipulação e contaminação do produto;
- segurança de operação, e
- flexibilidade para diferentes condições de operação.

Pode-se encontrar desempenhos semelhantes entre os vários equipamentos e quando isso acontece o fator custo é decisivo.

Quanto aos fatores de custos envolvidos nesse tipo de processo, são destacados os seguintes aspectos:

- custo do equipamento principal;
- custo do equipamento auxiliar;
- custo da mão-de-obra, e
- custos operacionais, tais como, potência instalada, depreciação e manutenção.

Como pode-se notar existe a necessidade de um compromisso entre os vários aspectos que influem no processo, e é preciso realizar um levantamento prévio dos produtos a serem misturados, do produto final e dos equipamentos disponíveis para uma decisão mais acertada possível.

Apenas uma característica isolada não é parâmetro para a escolha adequada e o resultado será no mínimo duvidoso se tal fato ocorrer.



### 2.3 - Teoria de fluidização

Como já discutido anteriormente, muitos processos industriais exigem o contato entre um sistema sólido particulado e um fluido, ou necessitam de um fluido para promover uma interação entre as partículas, existindo diversas maneiras para fazê-lo.

Entre as atividades que precisam de um contato mais intenso do sistema particulado estão a combustão, gaseificação, secagem, aquecimento de partículas, etc. Destaca-se ainda processos onde simplesmente busca-se uma mistura de sólidos.

O contato entre partículas ou entre partículas e fluido pode ser realizado em inúmeros tipos de equipamentos, dependendo da característica e desempenho dos mesmos, do processo em curso e da finalidade do produto final.

Já foram mostrados equipamentos específicos para mistura, e agora serão discutidos equipamentos que promovem contato partícula - fluido.

Um modo básico de contato é o leito fixo, mostrado na figura 2.20, onde uma massa de partículas sólidas repousa sobre uma base perfurada ou porosa através da qual o fluido injetado é forçado a atravessar os sólidos num fluxo ascendente ou descendente, sendo mais comum o descendente. Esse fluxo não promove movimentação significativa no leito de partículas.

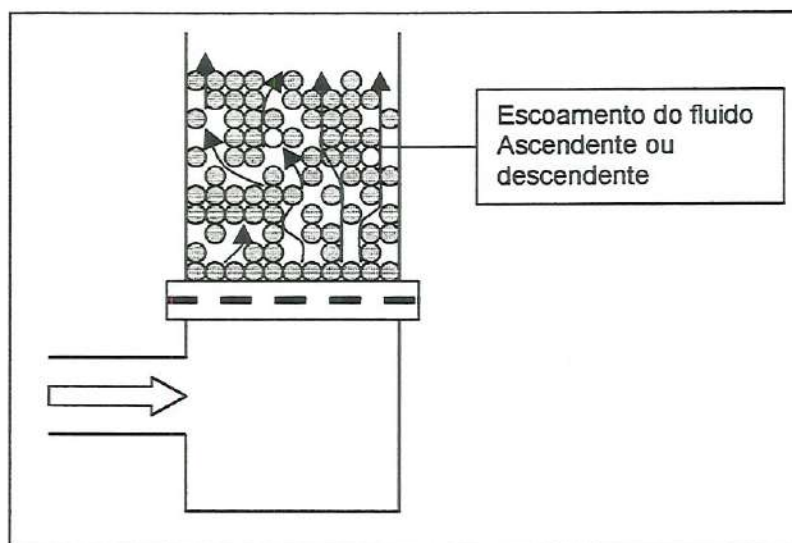


Figura 2.20 - Representação de um leito fixo.

Outro modo semelhante é leito fixo sobre uma base deslizante que pode ser usado em processos contínuos.

Um outro modo de contato pode ser feito pela queda do sistema particulado por um duto vertical onde existe uma corrente fluida ascendente. Isso faz com que exista uma certa turbulência provocada pelo arraste e choque das partículas e conseqüentemente um melhor contato. Esse tipo de processo pode ser usado para a separação e classificação de sólidos particulados.

O leito de jorro, mostrado na figura 2.21, consiste em uma base como no leito fixo, onde estão assentadas as partículas, um fundo cônico ou inclinado que concentra as partículas por ação da gravidade, e um jato de fluido ascendente para promover agitação do sistema sólido.

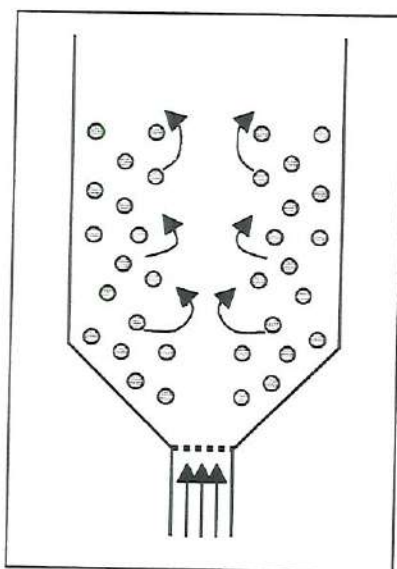


Figura 2.21 - Esquema simplificado do leito de jorro.

O leito fluidizado, representado esquematicamente na figura 2.22, assemelha-se ao leito fixo e ao leito de jorro quanto ao arranjo das partículas sobre uma base plana perfurada ou porosa e ao fluxo ascendente. A diferença está no fluxo mais intenso em relação ao leito fixo, e mais distribuído em relação ao leito de jorro, introduzindo mais energia no sistema particulado e promovendo a movimentação do leito.

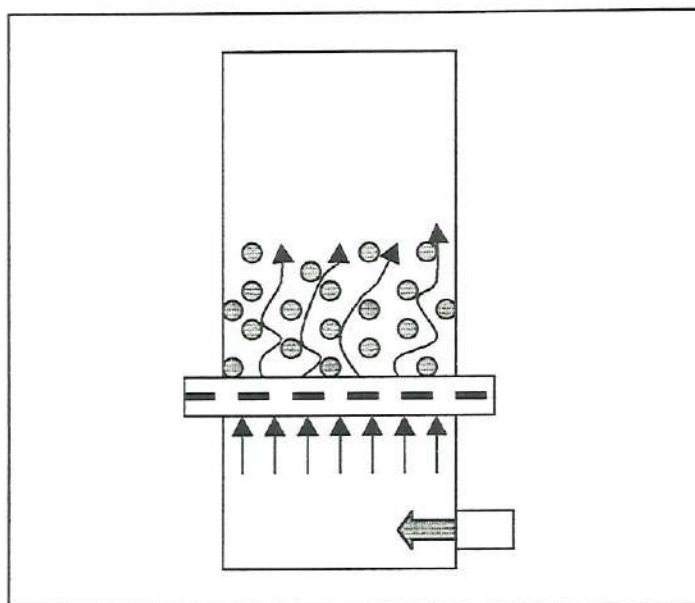


Figura 2.22 - Representação básica de um leito fluidizado.

Cada um desses modos de contato tem suas vantagens e desvantagens que devem ser analisadas sob aspectos operacionais, econômicos e de desempenho. Portanto, estabelecer qual é o melhor ou pior método não é uma tarefa fácil pois envolve inúmeras variáveis e requer muita experimentação e conhecimento teórico.

Um importante ponto para esses modos de contato é a caracterização adequada do material particulado que será objeto do processo. Isso é tão fundamental para o projeto quanto para a operação, e pode determinar o sucesso ou o fracasso do equipamento. Para essa caracterização são necessárias várias propriedades físicas das partículas tais como:

- distribuição de tamanhos;
- natureza da partícula;
- densidades absoluta e aparente;
- forma e esfericidade, e
- tipo de superfície.

Nesse trabalho os sólidos utilizados foram a areia e o sal. Algumas características desses sólidos particulados são importantes para o processo e as tabelas 2.3 e 2.4 apresentam essas características listadas na literatura.



Tabela 2.3 – Algumas propriedades de areias.

AUTOR	$d_{PT}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\rho_{AP}$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$\rho_{AB}$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$\phi$	$\varepsilon_{FX}$	Tipo de areia
Blumberg & Maritz (1953)	210 300	1,46	2,604	-	0,44	-
4 Blumberg & Maritz (1953)	300 420	1,6	2,631	-	0,39	-
Geldart (1986)	-	-	-	0,80 0,90	-	Triturada
5 Geldart (1986)	-	-	-	0,92 0,98	-	Arredondada
1 Massarani (1986)	440	-	2,660	0,75	-	Média de vários tipos
2 Yang et al. (1987)	359	-	2,840	-	0,48	-
3 Yang et al. (1987)	630	-	2,870	-	0,44	-
Khattab et al. (1988)	184	-	2,648	-	-	-
Peeler & Huang (1989)	208 2850	-	2,680	-	-	-
Kunii & Levenspiel (1991)	-	-	-	0,86	-	Arredondada
Kunii & Levenspiel (1991)	-	-	-	0,66	-	Angular
Kunii & Levenspiel (1991)	-	-	-	>0,86	-	De praia antiga
Mourad et al. (1994)	250 315	-	2,650	0,85	-	-

Tabela 2.4 – Algumas propriedades do sal (NaCl)

AUTOR	$d_{PT}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\rho_{AP}$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$\rho_{AB}$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$\phi$	$\varepsilon_{FX}$	Tipo de sal
Geldart (1986)	-	-	-	0,84	-	Comum
Okada (1997)	150 300	1,232	-	-	-	Comum

No leito fluidizado nem todas as partículas podem ser processadas adequadamente. Existem grandes diferenças de comportamento para cada tipo de partícula ou conjunto de partículas no interior do leito.

GELDART (1986) elaborou uma classificação para as partículas de acordo com seu comportamento em relação à fluidização, mostrada na figura 2.23.

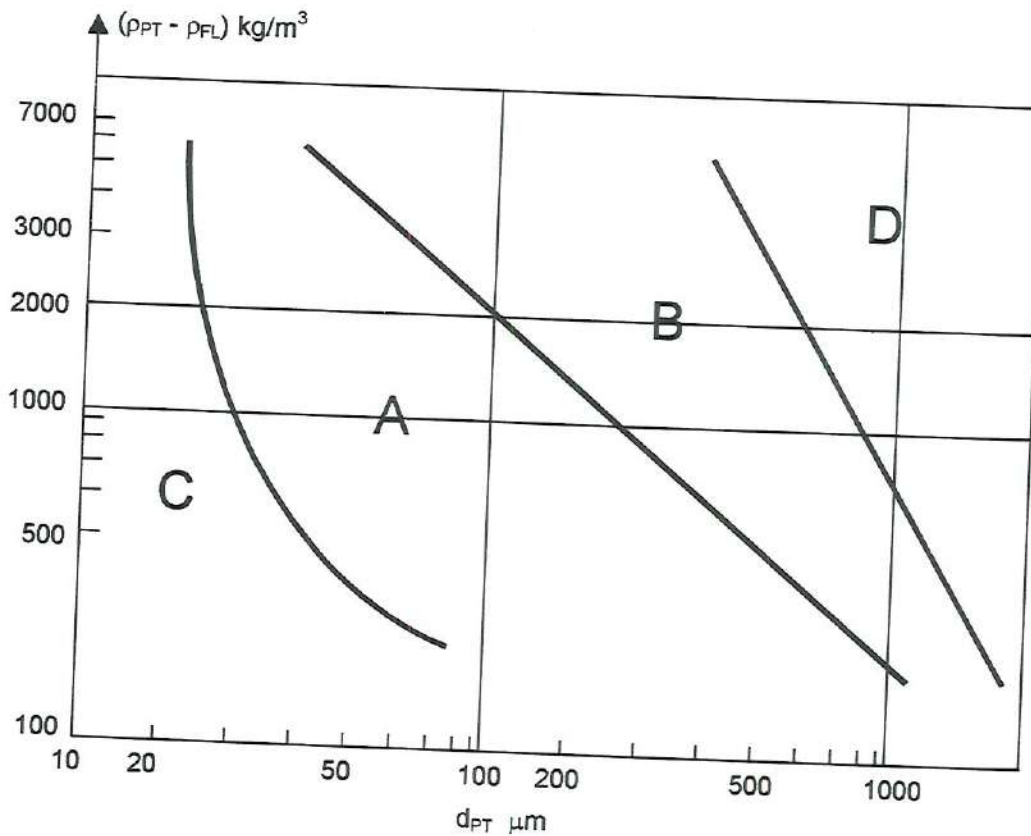


Figura 2.23 - Diagrama simplificado para classificação das partículas de acordo com seu comportamento na fluidização com ar em condições ambientes (Geldart, 1986).

Existem interferências do tamanho e densidade das partículas na qualidade do processo, e em especial para partículas menores que  $45\ \mu\text{m}$  cresce a influência.

Grupo C – Pertencem a esse grupo partículas finas coesivas. Uma fluidização satisfatória é muito difícil de se obter uma vez que o fluido atravessa o leito por canais abertos ou faz com que as partículas se movam como um pistão, dificultando o movimento individual característico. Essa dificuldade surge por causa das forças entre as partículas, maiores que aquela exercida pelo fluido sobre as partículas para evitar a compactação.

Nas pequenas partículas, geralmente menores que  $20\ \mu\text{m}$ , os efeitos das forças eletrostáticas, da umidade, da superfície aderente ou macia e das formas irregulares são mais intensas e não permitem movimento livre. A dureza também influi na fluidização, pois partículas mais deformáveis e coesivas permitem uma área de contato no interior do sistema.

A fluidização nesses casos pode ser possível pelo uso de algum tipo de dispositivo para inibir os efeitos negativos, tais como vibração ou agitação mecânica. Partículas porosas são normalmente coesivas pelo excesso de carga estática e as não porosas com umidade maior que 65% formam uma camada superficial líquida aumentando a coesão.

Grupo A – As partículas são pouco coesivas e bastante aeráveis. Os leitos desse material expandem consideravelmente quando a velocidade aumenta acima de um certo valor. Estão na faixa de  $20$  a  $100\ \mu\text{m}$  e tem uma densidade menor que  $1400\ \text{kg/m}^3$ .

Grupo B – Leitos dessas partículas tem uma expansão menos estável que as do grupo anterior. Bolhas aparecem tão logo a velocidade atinge o ponto no qual as partículas iniciam a suspensão ou um pouco além desse ponto. As forças entre os elementos do sistema são desprezíveis e a expansão do leito é pequena. A faixa de tamanhos está entre  $40$  e  $500\ \mu\text{m}$  e densidades entre  $1400$  e  $4500\ \text{kg/m}^3$ .



Grupo D – Como essas partículas são maiores e os espaços entre elas também, exigem velocidades acima das anteriores para fluidizar, o que torna o regime mais turbulento e o resultado é uma mistura não satisfatória. O tamanho médio é maior que  $600 \mu\text{m}$ .

### 2.3.1 – Alguns critérios para definir grupos

Para estabelecer a qual grupo pertence o sistema particulado alguns critérios iniciais. Uma maneira de se saber o limite entre os grupos A e B é observar se as bolhas aparecem na menor velocidade que as partículas são suspensas. Caso apareçam nessa velocidade ou próxima dela, pertencem ao grupo B. Se a expansão do leito é grande pertencem ao grupo A.

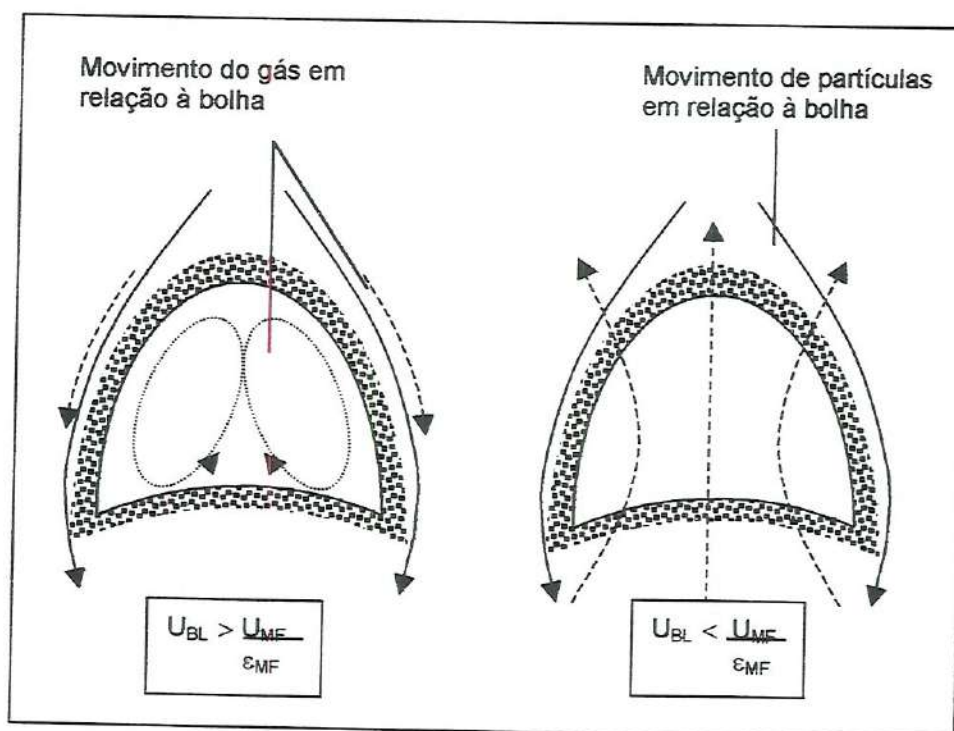


Figura 2.24 - Modos de passagem do gás.

Para estabelecer o limite entre os grupos B e D existem dois critérios. O primeiro é fundamentado no modo como o fluido atravessa o leito. Em

sistemas de partículas menores as bolhas sobem pelo leito mais rápido que o gás intersticial e esse gás tende a permanecer no interior da bolha exceto quando ocorre o agrupamento delas ou na explosão superficial. Em sistemas de partículas maiores as bolhas atravessam o leito mais lentamente que o gás intersticial e este último entra pela parte inferior da bolha saindo pelo topo. Isso é apresentado na figura 2.24.

### 2.3.2 - Modelagem do escoamento em meio poroso

Segundo HOWARD (1989) o modelo mais adequado para esse tipo de escoamento foi atribuído à Ergun onde o meio poroso é representado por um leito fixo formado por uma série de tubos paralelos verticais com mesmos diâmetros e comprimentos.

A velocidade do fluido através dos vazios é relacionada à velocidade superficial de fluidização por

$$U = \frac{U_{FL}}{\varepsilon_{FL}} \quad (01)$$

Como resultado de substituições e adequações surge a equação:

$$\frac{\Delta P_{LF}}{L_{LP}} = 72 \cdot \alpha \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu_{FL} \cdot U_{FL}}{d_{PT}^2} + \frac{3}{4} \beta \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \rho_{FL} \frac{U_{FL}^2}{d_{PT}} \quad (02)$$

No caso de partículas não esféricas deve ser levado em conta a esfericidade,

$$\frac{\Delta P_{LF}}{L_{LP}} = 72 \cdot \alpha \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu_{FL} \cdot U_{FL}}{\phi^2 \cdot d_{PT}^2} + \frac{3}{4} \beta \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \rho_{FL} \frac{U_{FL}^2}{\phi \cdot d_{PT}} \quad (03)$$

GELDART (1986) recomenda o uso do diâmetro de peneira,  $d_s$ , quando não se conhece a relação  $d_{sv}$  que é o diâmetro área/volume ou diâmetro de uma esfera tendo a mesma razão área superficial/volume.

Uma vez fluidizado o leito, a queda de pressão é suficiente para suportar o peso total das partículas, por isso,

$$\Delta P_{FL} = \frac{M_{TP}}{\rho_{PT} \cdot A_{LF}} (\rho_{PT} - \rho_{FL}) \bar{g} \quad (04)$$

A equação (04) implica em que não existe interação entre o leito de partículas e as paredes ou que a energia não é dissipada no leito. Tal dissipação pode surgir devido à colisões entre as partículas e as paredes ou entre partículas. O efeito de tais interações é o aumento de pressão ao longo da altura do leito no sentido do topo para a base.

### 2.3.3 - Velocidade de mínima fluidização

Quando a queda de pressão através do leito torna-se igual ao peso das partículas por unidade de área, o leito começa a expandir e a porosidade fica diferente da condição inicial.

As funções relativas à porosidade na equação de Ergun são sensíveis à pequenas variações nessa característica do sistema, portanto, a solução da equação para a velocidade ( $U$ ) depende de uma certa precisão no seu valor para a condição de fluidização incipiente. Depois de modificações na equação (03) chega-se a:

$$(1 - \epsilon_{MF})(\rho_{PT} - \rho_{FL}) \bar{g} L_{MF} = \frac{150(1 - \epsilon_{MF}) \rho_{FL} \cdot U_{MF} \cdot d_{PT}}{\phi^2 \cdot \epsilon_{MF}^3 \mu_{FL}} + \frac{1,75 \rho_{LF}^2 \cdot U_{MF}^2 \cdot d_{PT}^2}{\phi \cdot \epsilon_{MF}^3 \mu_{FL}^2} \quad (05)$$

O termo à esquerda é um adimensional que recebe o nome de número de Arquimedes para alguns e número de Galileo para outros. Os dois termos à direita em função da densidade, da velocidade de fluidização incipiente, diâmetro da partícula e viscosidade dinâmica do fluido podem ser expressos em termos do número de Reynolds na condição de mínima fluidização. Por isso, a equação aparece na maioria dos trabalhos sob a seguinte forma:



$$A_{RQ} = \frac{150(1 - \varepsilon_{MF})}{\phi^2 \cdot \varepsilon_{MF}^3} Re_{MF} + \frac{1,75}{\phi \cdot \varepsilon_{MF}^3} Re_{MF}^2 \quad (06)$$

Com os valores, os mais confiáveis possíveis, de esfericidade, porosidade e diâmetro de partículas a equação pode ser usada para a obtenção de um parâmetro fundamental para o processo de fluidização, que é a velocidade de mínima fluidização.

Em YANG et al. (1987) os dados de queda de pressão no leito fluidizado foram expressos em termos da razão entre a queda de pressão no leito e a queda de pressão estática no leito, definida da seguinte maneira:

$$R_{QP} = \frac{\Delta P_{LF}}{\Delta P_{EL}} \quad (07)$$

onde a queda de pressão estática representa a relação entre o peso total de partículas e a área da seção transversal do leito, ou seja,

$$\Delta P_{EL} = \frac{W_{TP}}{A_{LF}} \quad (08)$$

No trabalho de YANG et al. (1987) essa relação ficou entre 75% e 90%.

Para prever a porosidade do leito nas condições de fluidização propõem a equação empírica:

$$\frac{U_{FL}}{\varepsilon_{FL}} = \frac{(1 - \varepsilon_{FX})U_{MF}}{\varepsilon_{FX}} + 1,05 \cdot U_{FL} \quad (09)$$

A equação foi aplicada para a determinação da porosidade do leito nas condições de fluidização através da relação

$$H_{FL} = H_{FX} \left( \frac{1 - \varepsilon_{FX}}{1 - \varepsilon_{FL}} \right) \quad (10)$$

VIOTTO & MENEGALLI (1989) trabalharam na otimização de secadores de borra de café, onde estudaram a perda de pressão no leito em função da vazão e da umidade. Quando os sólidos estão totalmente, ou

idealmente, fluidizados, a queda de pressão no leito pode ser determinada por:

$$A_{LF} \cdot \Delta P_{LF} - V_{PT} (\rho_{AP} - \rho_{FL}) \bar{g} = V_{PT} \cdot \rho_{AP} \cdot \bar{g} \quad (11)$$

O peso total de partículas no leito por unidade de área é então determinada por:

$$\frac{W_{TP}}{A_{LF}} = \frac{V_{PT} \cdot \rho_{AP} \cdot \bar{g}}{A_{LF}} \quad (12)$$

A relação para um leito idealmente fluidizado deve ser unitária, ou seja,

$$\frac{\Delta P_{LF}}{W_{TP}} = 1 \quad (13)$$

No trabalho de VIOTTO & MENEGALLI (1989) essa relação ficou entre 60% e 85%.

Em KUNII & LEVENSPIEL (1991) encontra-se para o caso particular de sólidos granulados muito pequenos, uma simplificação da equação de Ergun para  $Re_{MF} < 20$ ,

$$U_{MF} = \frac{(\rho_{PT} - \rho_{FL}) \bar{g} \varepsilon_{MF}^3 \cdot \phi^2 \cdot d_{PT}^2}{150 \cdot \mu (1 - \varepsilon_{MF})} \quad (14)$$

Para o caso particular de sólidos granulados grandes e para  $Re_{MF} > 1000$ ,

$$U_{MF}^2 = \frac{(\rho_{PT} - \rho_{FL}) \bar{g} \varepsilon_{MF}^3 \cdot \phi \cdot d_{PT}}{1,75 \cdot \rho_{FL}} \quad (15)$$

Quando a porosidade na condição de mínima fluidização ou a esfericidade ou ambas não são conhecidas, ainda assim é possível estimar a velocidade de mínima fluidização para um leito de partículas irregulares escrevendo a equação de Ergun como:

$$A_{RQ} = K_1 \cdot Re_{MF}^2 + K_2 \cdot Re_{MF} \quad (16)$$

$$K_1 = \frac{1,75}{\varepsilon_{MF}^3 \cdot \phi} \quad e \quad K_2 = \frac{150(1 - \varepsilon_{MF})}{\varepsilon_{MF}^3 \cdot \phi^2} \quad (17)$$

Foi observado que  $K_1$  e  $K_2$  se mantêm próximos a um valor constante para diferentes tipos de partículas e para uma ampla faixa de número de Reynolds,  $0,001 < Re < 4000$ , prevendo-se a velocidade de mínima fluidização com um desvio padrão de  $\pm 34\%$ .

A partir da equação de Ergun para as condições de mínima fluidização e usando valores de  $K_1$  e  $K_2$  recomendados, obtiveram:

para partículas grandes:

$$Re_{MF} = (28,7^2 + 0,0494 \cdot A_{RQ})^{1/2} - 28,7 \quad (18)$$

para partículas finas:

$$Re_{MF} = (33,7^2 + 0,0408 \cdot A_{RQ})^{1/2} - 33,7 \quad (19)$$

Essas equações são úteis, segundo os autores, como uma estimativa razoável da velocidade de mínima fluidização e enfatizam a atenção que se deve ter na sua determinação, pois é um dos parâmetros básicos do processo de fluidização.

Inúmeros estudos recentes tem sido feitos para verificar a melhor maneira de se determinar a velocidade de mínima fluidização, como é o caso de GLICKSMAN et al. (1993). Eles omitiram fatores que incluem as forças entre as partículas devido à cargas eletrostáticas ou forças de Van der Waals. Também omitiram o coeficiente de atrito, nas forças entre partículas, que foi mostrado ser desprezível em leitos borbulhantes. Os autores simplificaram a equação de Ergun resultando em duas condições para a mínima fluidização:

para baixos números de Reynolds,



$$U_{MF} = \frac{\rho_{PT} \cdot \bar{g} \cdot (1 - \varepsilon_{MF})}{150 \frac{(1 - \varepsilon_{MF})^2}{\varepsilon_{MF}^3} \frac{\mu_{FL}}{\phi^2 \cdot d_{PT}^2}} \quad (20)$$

para números de Reynolds altos, onde o termo relativo à energia cinética da equação de Ergun domina,

$$U_{MF}^2 = \frac{\bar{g}(1 - \varepsilon_{MF})}{1,75 \frac{(1 - \varepsilon_{MF})}{\varepsilon_{MF}^3} \frac{\rho_{FL}}{\phi \cdot d_{PT} \cdot \rho_{PT}}} \quad (21)$$

Outro trabalho, LIPPENS & MULDER (1993), teve como objetivo selecionar a relação para a velocidade de mínima fluidização que fornecesse a melhor correlação para os dados disponíveis na literatura. Foram consideradas relações expressas em termos dos adimensionais número de Reynolds e número de Arquimedes, os quais são funções da velocidade de mínima fluidização.

Essas relações foram testadas com dados de oitenta medições e vinte substâncias diferentes. Foram consideradas ao todo 33 relações que continham os dois parâmetros citados. Verificou-se que as aproximações da equação de Ergun têm resultados válidos somente para uma faixa restrita do número de Reynolds, por isso, podem ser aplicadas em casos específicos e não generalizados.

A equação de Ergun foi considerada pelos autores, por meio de experimentos, como superior a todas as outras formas analisadas.

Em BIN (1994) comentou-se que apesar de inúmeros estudos a respeito da previsão da velocidade de mínima fluidização a discussão ainda persiste. É enfatizado que quanto melhor se conhece as características físicas das partículas como a esfericidade, e a porosidade do leito no estado de mínima fluidização, tanto melhor será a previsão.

Aqui o autor analisou mais de duzentos e vinte conjuntos de dados divididos em número de Reynolds menores que cinco e maiores ou iguais a cinco. A equação que melhor correlacionou os dados foi a seguinte:

$$A_{RQ} = 1416 \cdot Re_{MF} + 25,926 \cdot Re_{MF}^2 \quad (22)$$

com mais ou menos 2,5% de desvio para um intervalo de confiança de 95%. A correlação não fornece bons resultados para números de Reynolds muito baixos.

Uma questão levantada é se a porosidade na condição de mínima fluidização permanece a mesma para todas as condições experimentais.

Mostrou-se que variações nessa propriedade podem ocorrer até para um mesmo material e mesmas condições experimentais de temperatura, pressão e agente de fluidização. Grandes variações na porosidade de mínima fluidização podem ser esperadas quando existe mistura com diversos tamanhos de sólidos. Desse modo, o uso da equação de Ergun para correlacionar dados experimentais da velocidade de mínima fluidização pode ser considerado apenas para sistemas que mantêm constantes a porosidade na mínima fluidização e a esfericidade das partículas.

Em outras palavras, partículas que alteram sua forma durante o processo de fluidização, por exemplo fragmentando-se, podem mudar as condições operacionais do leito.

No trabalho com secador de leito fluidizado de MOURAD et al. (1994) o interesse foi na determinação das velocidades características do estado hidrodinâmico de uma mistura de areia e milho. Os resultados relativos à evolução do perfil axial da fração em massa de milho em função da velocidade do gás foram apresentados com o objetivo de identificar o estado de mistura desses sólidos.

As curvas foram obtidas por fluidização descendente, observando-se geralmente três regiões distintas delimitadas por duas velocidades características conforme a figura 2.25.

Entre a velocidade de mínima fluidização  $U_{mf}$  e a velocidade de completa fluidização  $U_{fc}$  o leito está num estado de segregação parcial ou total. A velocidade aparente de mínima fluidização  $U_{fa}$  é definida como a abscissa do ponto (E), na interseção das retas (OA) e (DB).

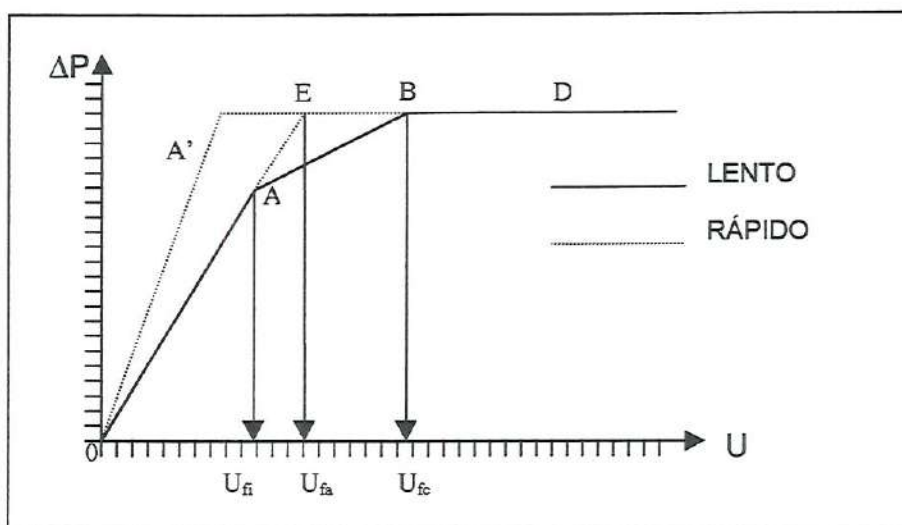


Figura 2.25 – Evolução da perda de pressão no decorrer da desfluidização em função da velocidade do ar para uma mistura binária (Mourad et al. (1994)).

A estimativa de  $U_{fa}$  pode ser feita a partir de correlações empíricas que mostram uma relação entre as velocidades de mínima fluidização e as frações em massa das diferentes partículas:

$$U_{fa} = U_{MFp} \cdot f_{Pp} + U_{MFg} \cdot f_{Pg} \quad \text{ou} \quad \frac{U_{fa}}{U_{MFp}} = \left( \frac{U_{MFg}}{U_{MFp}} \right)^{f_{Pg}^2} \quad (23)$$

MOURAD et al. (1994) apresentaram correlações derivadas da equação de Ergun modificada para a forma:

$$A_{RQ} = A \cdot Re_{AF}^2 + B \cdot Re_{AF} \quad (24)$$

Dentro dessas correlações, a influência da fração em massa das diferentes partículas no leito foi considerada. As densidades e diâmetros médios são:

$$\frac{1}{\rho_{MD}} = \frac{f_{Pp}}{\rho_{Pp}} + \frac{f_{Pg}}{\rho_{Pg}} \quad (25)$$



$$\frac{1}{d_{MD}} = \rho_{MD} \left( \frac{f_{PP}}{\rho_{PP} \cdot d_{PP}} + \frac{f_{PG}}{\rho_{PG} \cdot d_{PG}} \right) \quad (26)$$

e as constantes (A) e (B) na equação (24) são:

$$A = 36,2 \left( \frac{d_{PG} \rho_{PP}}{d_{PP} \rho_{PG}} \right)^{-0,196} \quad e \quad B = 1397 \left( \frac{d_{PG} \rho_{PP}}{d_{PP} \rho_{PG}} \right)^{0,296} \quad (27)$$

Os autores reforçam que o conhecimento do estado de mistura dos sólidos no interior do leito fluidizado é de fundamental importância para o melhor desempenho nas operações com esse tipo de equipamento.

Citando a literatura, apontam estudos que mostram o equilíbrio dinâmico entre mistura e segregação estabilizando em menos de sessenta segundos, e que além dos noventa segundos a estrutura do leito é independente do tempo de fluidização. Observaram também que para um tempo inferior a noventa segundos o perfil de concentração depende unicamente do arranjo inicial dos sólidos dentro do leito.

Outro grupo pesquisando a previsão da velocidade de mínima fluidização, RINCÓN et al. (1994), aponta para as muitas abordagens que existem para avaliar esse parâmetro característico apenas considerando sistemas monodispersos e que não são adequadas quando se trabalha com sistemas polidispersos. São consideradas também outras correlações que presumem um leito contendo muitas espécies de partículas como formado pela soma de vários leitos em série. Embora sejam aproximações, podem resultar em boas previsões.

Uma propriedade do leito também importante na sua caracterização é a queda de pressão. O estudo de ALZHRANI & NOOR WALI (1994) foi a verificação das flutuações na queda de pressão através do leito de sólidos granulados fluidizado por gás.

O modelo usado para avaliar a frequência fundamental das flutuações de pressão foi:

$$f_R = \frac{1}{\pi} \left( \frac{\bar{g}}{H_{MF}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (28)$$

Pelo balanço de massa no leito, obtém-se:

$$H_{MF}(1 - \varepsilon_{MF}) = H_{FX}(1 - \varepsilon_{FX}) \quad (29)$$

Assim, a frequência fundamental passa a ser uma função das condições do leito, na seguinte forma:

$$f_R = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{\bar{g}(1 - \varepsilon_{MF})}{H_{FX}(1 - \varepsilon_{FX})} \right]^{1/2} \quad (30)$$

Com relação à amplitude o maior efeito sobre as flutuações na pressão é exercida pelas bolhas que se originam no processo, transportando sólidos e variando a altura do leito na região onde elas emergem e explodem. A amplitude de flutuação pode ser obtida do deslocamento do leito para as condições onde aparecem as bolhas pela equação:

$$A_{FT} = \rho_{PT}(1 - \varepsilon)\bar{g}\Delta L \quad (31)$$

Outras equações foram desenvolvidas a partir dessa.

Uma conclusão dos autores foi que a amplitude de flutuação da pressão aumenta linearmente com o aumento do excesso de velocidade de fluidização, pois desse modo a taxa de sólidos que cruza qualquer plano horizontal do leito é proporcional a esse excesso ( $U_{FL} - U_{MF}$ ). Outra conclusão foi que a flutuação na queda de pressão é diretamente proporcional à raiz quadrada da altura estática do leito ou raiz quadrada da queda de pressão através do leito  $\Delta P^{0,5}$ .

Em CHESONIS et al. (1990) a velocidade de fluidização foi determinada pela seguinte equação simplificada

$$U_{MF} = \frac{\varepsilon_{MF}^3}{180(1 - \varepsilon_{MF})} \frac{(\rho_{PT} - \rho_{FL})d_{PT}^2 \bar{g}}{\mu_{FL}} \quad (32)$$

Como é possível observar, apesar de inúmeros trabalhos a respeito do tema e do tempo dedicado a esses estudos, os parâmetros básicos do leito fluidizado, como a velocidade de mínima fluidização e a queda de pressão no leito, ainda despertam interesse devido à sua complexidade e sua influência nos demais parâmetros dependentes.

Misturas de partículas em leito fluidizado tem tido maior atenção recentemente principalmente para homogeneizar sistemas com partículas de escoamento livre, de acordo com FAN & SHEN (1990). Em sistemas com partículas coesivas o leito fluidizado deve ter seu uso cercado de todo cuidado ou ainda com restrição.

No caso de sistemas com partículas livres ou de grande fluidez, a vazão de gás é a responsável pela mistura ou separação, mecanismos que competem dentro do leito.

O leito pode ser considerado composto de duas fases, uma descontínua formada pelas bolhas e outra contínua, também chamada de fase densa, de gás e sólidos existindo entre as bolhas. A fase densa por sua vez pode ser subdividida em fase de esteira, que é a porção de material sólido arrastado pelas bolhas ao se deslocarem para a superfície do leito, e a fase de emulsão, considerada como o restante do leito.

O movimento das bolhas é o grande responsável pela mistura dos sólidos, em ambas as direções vertical e horizontal. A mistura horizontal ou lateral é melhor observada na superfície do leito uma vez que no seu interior tal observação não é fácil. Tem sido notado em estudos experimentais que dentro do leito a mistura lateral acontece nas esteiras.

Observações indicam que o movimento de partículas está relacionado com a formação e movimento aleatório das bolhas através do leito, por isso, experimentos em mistura devem ser repetidos para se alcançar resultados significativos.

Foi notado também o transporte ascendente de partículas na direção vertical ou axial, o qual é caracterizado por um comprimento de mistura da ordem do diâmetro da bolha. O deslocamento descendente é mais uniforme e mais lento.

2.3.3.7

0,65 - 390  
0,129 - 425  
0,127 - 515  
0,110 - 610  
0,109 - 710



Estudos de visualização dos escoamentos têm sugerido que além das esteiras das bolhas a mistura horizontal de sólidos é aumentada pelo deslocamento lateral das bolhas, resultado de interações ou agrupamentos entre elas. Portanto, a mistura de sólidos em leito fluidizado está relacionada ao comportamento das bolhas, indicado na figura 2.26.

Em muitos experimentos de misturas de sólidos através de leito fluidizado relatados na literatura o diâmetro do vaso foi menor que 100mm, o que faz as bolhas se agruparem com maior facilidade, aumentando de tamanho rapidamente e formando uma espécie de pistão de gás. Dois tipos diferentes de pistões podem formar, um de ponta arredondada e outro com ponta plana. Essas formas causam diferentes taxas de mistura, a de ponta arredondada promove excelente mistura axial, ao contrário da ponta plana.

#### 2.3.4 – Algumas relações hidrodinâmicas.

A velocidade de subida da bolha em relação à fase de emulsão é dada em KUNII & LEVENSPIEL (1991) como:

$$U_{BE} = 0,711(\bar{g}d_{BL})^{0,5} \quad (33)$$

válida para  $(d_{BL}/d_{LF}) < 0,125$ .

Outra equação para a mesma velocidade é dada por:

$$U_{BE} = \left[ 0,711(\bar{g}d_{BL})^{0,5} \right] 1,2 \exp[-1,49(d_{BL}/d_{LF})] \quad (34)$$

válida quando  $0,125 < (d_{BL}/d_{LF}) < 0,6$ .

Para uma relação entre o diâmetro da bolha e o diâmetro do leito maior que 60 %, o leito não deve ser considerado como borbulhante e sim como tipo pistão.

Com relação às bolhas pode-se ainda ter critérios quanto à formação ou não de nuvem de sólidos da seguinte maneira:

Bolha lenta ou sem nuvem ( $U_{BE} < U_{SG}$ ),

Bolha rápida ou com nuvem ( $U_{BE} > U_{SG}$ ),

$$U_{SG} = \frac{U_{MF}}{\varepsilon_{MF}} \quad (35)$$

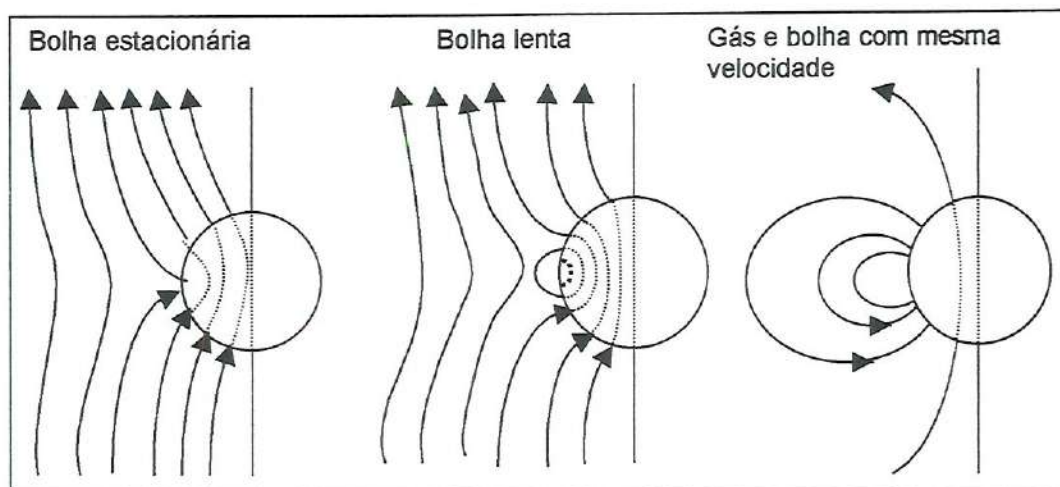


Figura 2.26 – Velocidades relativas entre o gás e as bolhas. KUNII & LEVENSPIEL (1991)

A razão entre os volumes de nuvem e bolha em um leito fluidizado tridimensional é determinada por:

$$f_{NB} = \frac{3 \cdot U_{SG}}{U_{BE} - U_{SG}} \quad (36)$$

E a razão entre os volumes de esteira e de gás na bolha é fornecida pela expressão seguinte:

$$f_{EB} = \frac{V_{WK}}{V_{GB}} \quad (37)$$

### 2.3.5 – Formação das bolhas acima do distribuidor

A vazão de gás em cada orifício do distribuidor é dada por:

$$Q_{OR} = \frac{U_{FL} - U_{MF}}{N_{OR}} \quad (38)$$

onde:

$$N_{OR} = \frac{1}{j_{OR}^2} \quad \text{para orifícios dispostos em malha quadrada}$$

$$N_{OR} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{l_{OR}^2} \quad \text{para orifícios dispostos em malha triangular equilátera}$$

A vazão observável de bolhas através do leito é fornecida por:

$$Q_{BL} = (U_{FL} - U_{MF}) \frac{\pi}{4} \frac{d_{FL}^2}{N_{OR}} \quad (39)$$

Para uma baixa vazão de gás no leito, o diâmetro inicial da bolha é determinado por:

$$d_{BI} = 1,30 \frac{Q_{OR}^{0,4}}{\bar{g}^{0,2}} = \frac{1,30}{\bar{g}^{0,2}} \left( \frac{U_{FL} - U_{MF}}{N_{OR}} \right)^{0,4} \quad (40)$$

válida para unidades no C.G.S. e quando  $d_{BI} < l_{OR}$ .

A interação ou coalescência entre bolhas adjacentes é dada pela frequência de bolhas em um orifício,

$$f_{BO} = \frac{Q_{OR}}{V_{BL}} = \frac{\bar{g}^{0,6}}{1,138 \cdot Q_{OR}^{0,2}} = \frac{54,8}{Q_{OR}^{0,2}} \quad (41)$$

com  $Q_{OR}$  em  $\text{cm}^3$ .

Para uma alta vazão de gás no leito, o diâmetro inicial da bolha é:

$$d_{BI} = \frac{2,78}{\bar{g}} (U_{FL} - U_{MF}) \quad (42)$$

válida para unidades no C.G.S. e quando  $d_{BI} > l_{OR}$ .

### 2.3.6 – Vazão de gás em forma de bolhas no leito

Nem todo excesso de gás ( $U_{FL} - U_{MF}$ ) passa através do leito como bolhas observáveis. Então definiu-se:

$$\phi = \frac{Q_{BL}}{(U_{FL} - U_{MF}) A_{LF}} \quad (43)$$



que é a razão entre a vazão observável de bolhas e o excesso de vazão da teoria bifásica de fluidização. De acordo com GELDART (1986),

$$\varphi = 0,80 \text{ para partículas do tipo A}$$

$$\varphi = 0,65 \text{ para partículas do tipo B}$$

$$\varphi = 0,26 \text{ para partículas do tipo D}$$

Como a forma e o tamanho das bolhas são irregulares, dificultando a sua caracterização várias correlações foram propostas.

Correlações para o crescimento das bolhas

$$\frac{d_{MB} - d_{BL}}{d_{MB} - d_{BI}} = e^{-0,37.z/d_{LF}} \quad ,(\text{m}) \quad (44)$$

$$d_{MB} = 0,65 \left[ \frac{\pi}{4} d_{LF}^2 (U_{FL} - U_{MF}) \right]^{0,4} \quad ,(\text{cm}) \quad (45)$$

válida para os limites listados a seguir:

$$d_{LF} \leq 1,30\text{m}$$

$$0,50 \text{ cm/s} \leq U_{MF} \leq 20 \text{ cm/s}$$

$$60 \mu\text{m} \leq d_{PT} \leq 450 \mu\text{m}$$

$$(U_{FL} - U_{MF}) \leq 48 \text{ cm/s}$$

A velocidade das bolhas em um leito pode ser aproximada por,

$$U_{BL} = (U_{FL} - U_{MF}) + U_{BE} \quad (46)$$

A equação (47), que cobre todas as faixas de tamanho de partículas, A a D, da classificação de Geldart, e que leva em consideração tamanho do vaso é citada em KUNII & LEVENSPIEL (1991),

$$U_{BL} = \varphi(U_{FL} - U_{MF}) + \alpha.U_{BE} \quad (47)$$

Tabela 2.5 – Parâmetro ( $\alpha$ ) da equação (47)

Tipo de sólido	A	B	D
$\alpha$	$3,2.d_{LF}^{1/3}$	$2,0.d_{LF}^{1/2}$	0,87
$d_{LF}$ (m)	0,05 – 1,00	0,10 – 1,00	0,10 – 1,00

Outras correlações em KUNII & LEVENSPIEL (1991):

Para partículas A de Geldart e  $d_{LF} \leq 1,0$  m

$$U_{BL} = 1,55[(U_{FL} - U_{MF}) + 14,1(d_{BL} + 0,005)]d_{LF}^{0,32} + U_{BE} \quad \text{m/s} \quad (48)$$

Para partículas B de Geldart e  $d_{LF} \leq 1,0$  m

$$U_{BL} = 1,6[(U_{FL} - U_{MF}) + 1,13.d_{BL}^{0,5}]d_{LF}^{1,35} + U_{BE} \quad \text{m/s} \quad (49)$$

Na literatura existem inúmeras correlações para a previsão das características das bolhas e do leito.

Em RAMAN et al. (1981) o diâmetro da bolha foi determinado pela equação

$$d_{BL} = d_{MB} - (d_{MB} - d_{BI}) \exp(-0,3.x / d_{LF}) \quad (50)$$

onde:

$$d_{MB} = 1,64[(U_{FL} - U_{MF})A_{LF}]^{0,4} \quad \text{e} \quad d_{BI} = 0,871 \left[ \frac{(U_{FL} - U_{MF})A_{LF}}{N_{OD}} \right]^{-0,4} \quad (51)$$

O diâmetro equivalente de bolha é calculado na metade da altura do leito,  $x = H/2$ .

A fração em volume de bolha no leito fluidizado é:

$$f_{BL} = \frac{U_{FL} - U_{MF}}{U_{BL}} \quad (52)$$

e a velocidade do gás na fase de emulsão é fornecida por:

$$U_{EM} = \frac{U_{MF}}{1 - f_{BL}} \quad (53)$$

A altura do leito expandido é:

$$H_{EX} = \frac{H_{MF}}{1 - f_{BL}} \quad (54)$$

Em WEIMER & CLOUGH (1981) considerou-se a densidade média dos sólidos como:

$$\rho_{MD} = \frac{1}{\frac{f_A}{\rho_A} + \frac{f_B}{\rho_B}} \quad (55)$$

e a altura do leito na condição de mínima fluidização foi dada pela equação,

$$H_{MF} = \frac{W_{TP}}{A_{LF}(1 - \epsilon_{MF})\rho_{MD}} \quad (56)$$

Em HO et al. (1989) o crescimento da bolha em função da altura foi determinado por:

$$d_{BL} = 0,0326(U_{FL} - U_{MF})^{1,11} Z^{0,81} \quad (\text{cm}) \quad (57)$$

SHIAU & LIN (1993) apresentaram para a previsão do crescimento da bolha a equação seguinte:

$$\frac{dd_{BL}}{dz} = 0,3 \frac{d_{MB} - d_{BL}}{d_{LF}} - \delta \cdot d_{BL}^{0,5} \quad (58)$$

onde:

$$\delta = \frac{7,68 \cdot 10^{-3}}{U_{MF} \cdot g^{0,5}}, \quad d_{MB} = 0,652[(U_{FL} - U_{MF})A_{LF}]^{0,4} \quad (\text{cm}) \quad (59)$$

para um distribuidor poroso:

$$d_{BI} = 0,0376(U_{FL} - U_{MF})^2 \quad (\text{cm}) \quad (60)$$

para um distribuidor perfurado:

$$d_{BI} = 0,347 \left[ \frac{(U_{FL} - U_{MF})A_{LF}}{N_{OD}} \right]^{0,4} \quad (\text{cm}) \quad (61)$$

As equações (58 a 61) são válidas para os intervalos dados a seguir:

$$5 \text{ cm/s} \leq U_{FL} \leq 50 \text{ cm/s} \text{ e } 7,9 \text{ cm} \leq d_{LF} \leq 100 \text{ cm.}$$



## 2.4 – Teoria da mistura em leito fluidizado

O leito fluidizado é visto com grande potencial para a realização de processos onde existe necessidade de aliar contato entre sólidos e entre sólidos e fluidos.

Em TALMOR & BENENATI (1963) já é reconhecida ser a circulação de sólidos a responsável pelas características desse processo e são relatados alguns dados em termos de conceitos qualitativos e de índices de mistura arbitrariamente definidos. Também é considerado o uso do leito fluidizado gasoso para promover misturas de sólidos que diferem em tamanho e densidade.

O modelo sugerido foi o de considerar duas regiões do leito com sólidos de mesma densidade, mas não necessariamente com o mesmo diâmetro médio e com uma razão entre os diâmetros do leito e da partícula suficientemente alto para evitar os efeitos de parede. Desprezou-se também o deslocamento horizontal dos sólidos e as variações na fração em peso das partículas em função do tempo. A figura 2.27 resume o modelo.

Na ausência de efeitos de paredes as massas totais de sólidos na parte superior e inferior não devem variar com o tempo, isto é, o fluxo ascendente e descendente de sólidos é igual.

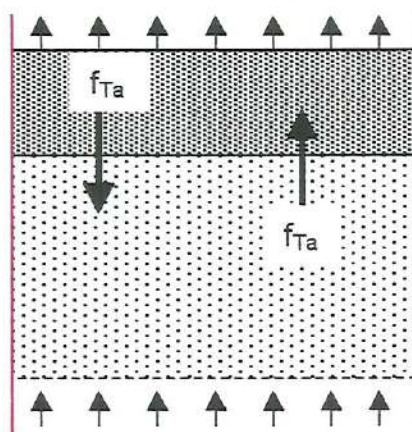


Figura 2.27 - Modelo de circulação proposto por Talmor & Benenati.

Nesse estudo do leito fluidizado, os autores concluíram:

- os fatores que afetam a taxa de circulação de sólidos são o tamanho médio da partícula, e o excesso de escoamento de gás acima do exigido para a mínima fluidização.
- para qualquer tamanho médio de partícula, a taxa de circulação de sólidos é linearmente proporcional ao excesso de gás escoando no leito.
- a razão da circulação dos sólidos varia exponencialmente com o diâmetro médio da partícula.

TANIMOTO et al. (1981) observaram que a segregação ocorre na direção vertical, principalmente quando existem diferenças razoáveis na densidade e no tamanho das partículas. Sob condições de operação do leito, a comprovação da ocorrência de segregação pode ser feita pelo exame do perfil vertical de concentrações dos componentes.

Concordam também que a taxa de mistura ou segregação é determinada pelo movimento das bolhas que atravessam o leito, e que o padrão em condições de regime de equilíbrio é o resultado da competição entre os dois mecanismos.

Os autores encontraram para tais sistemas um modelo devido a GIBILARO & ROWE (1974) no qual a fase sólida do leito é dividida em esteira e emulsão. Para esse modelo foram definidos quatro parâmetros:

- taxa constante de dispersão axial ( $T_{DA}$ ).
- taxa de segregação constante na fase de emulsão ( $T_{SE}$ )
- taxa de circulação em ambas as fases ( $T_{CI}$ ) ascendente nas esteiras e descendentes no topo.
- taxa de intercâmbio constante entre as fases ( $T_{IN}$ ).

Dessa forma, para prever o padrão de segregação ou mistura com base no modelo, esses parâmetros devem ser funções das condições de operação, e não é necessário o uso de qualquer parâmetro ajustável.

Experimentos realizados para verificar o mecanismo de segregação das partículas menos fluidizáveis causado por uma bolha num leito



bidimensional mostrou que a velocidade e a distância adimensional de segregação são dependentes do diâmetro da bolha, do tamanho e principalmente da diferença de densidades das partículas.

Nesse trabalho foram descritos resultados experimentais obtidos em um leito tridimensional, as quais permitiram estimar a distância e o padrão de segregação diretamente das condições de operação através do modelo de Gibilaro-Rowe.

NAIMER et al. (1982) concordam que o movimento das partículas é promovido pelas bolhas. Observaram que um sistema fluidizado deve ser mantido em condições de operação que favoreçam mistura ou segregação adequadas, dependendo da utilização, pois a competição entre os dois mecanismos leva a uma diferença de composição ao longo da altura do leito.

A explicação para esse mecanismo é que ao cruzarem o leito as bolhas carregam partículas da região inferior para a região superior, e a segregação ocorre pelo movimento descendente das partículas mais densas ou maiores ao longo das trajetórias perturbadas atrás das bolhas.

Esse estudo também foi fundamentado no modelo de Gibilaro-Rowe, negligenciando a dispersão axial na fase de emulsão. Isso é comprovado por trabalhos experimentais mostrando que a dispersão axial das partículas mais densas não ocorre no leito.

O foco do estudo foi relacionar todos os parâmetros do modelo definidos conceitualmente com as condições iniciais e de operação do leito. Esses parâmetros são apresentados na figura 2.28.

O leito de partículas foi dividido em lâminas horizontais de alturas iguais, como mostrado na figura 2.29, para prever o padrão de segregação, principalmente na parte inferior do leito. Como esses parâmetros são dependentes do padrão de segregação, um método computacional iterativo foi usado para obtenção do resultado final.

Dessa maneira os parâmetros do modelo de Gibilaro - Rowe foram expressos como uma função de:

- (a) Características das bolhas
  - velocidade de ascensão



- diâmetro
  - fração de emulsão, proporção de bolhas no leito
- (b) Velocidade de mínima fluidização
- (c) Propriedades dos dois materiais que formam o leito

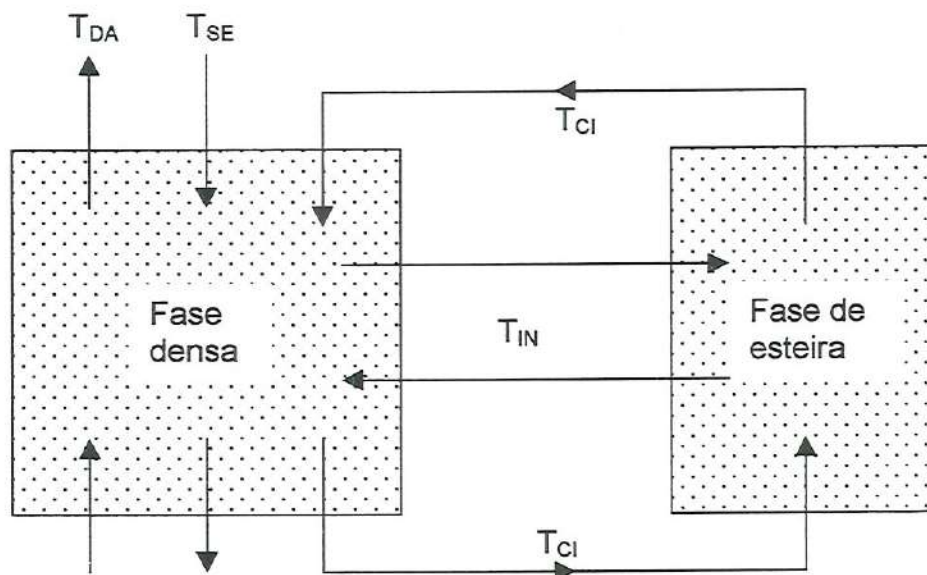


Figura 2.28 – Representação do modelo de Gibilaro-Rowe

Todos os parâmetros foram calculados para cada lâmina do leito com base na sua composição.

Particularmente nesse caso do modelo de Gibilaro-Rowe, os perfis de concentração das partículas mais densas ou menos fluidizáveis, e da fase de esteira na parte mais alta do leito contendo ambas espécies de sólidos, são fornecidos respectivamente por:

$$\left(\frac{C_B}{C_{B0}}\right)^{1+\lambda} \left(\frac{1-C_B}{1-C_{B0}}\right)^{1-\lambda} = e^{-\gamma z} \quad (62)$$

$$C_w = C_B + \frac{C_B(1-C_B)}{\lambda} \quad (63)$$

onde

$$\lambda = \frac{T_{Cl}}{T_{SE}} \quad e \quad \gamma = \frac{T_{IN}}{T_{Cl}} H \quad (64)$$

O propósito de NAIMER et al. (1982) foi o de relacionar os parâmetros  $T_{CI}$ ,  $T_{SE}$ ,  $T_{IN}$  e  $T_{DA}$  às características do material do leito e às condições de operação.

#### 2.4.1 - Parâmetro taxa de circulação ( $T_{CI}$ )

Por definição a taxa de circulação, baseada na fase de emulsão, pode ser relacionada às condições de operação através do balanço do fluxo de sólidos ascendentes e descendentes no interior do leito. Assim,

$$T_{CI} = U_{BL} \cdot F_{WB} \left( \frac{f_{FA}}{1 - f_{FA}} \right) \quad (65)$$

onde 
$$F_{WB} = \frac{V_{WK}}{V_{WK} + V_{BL}} = \frac{1}{2} - \frac{9}{16} \cos \frac{\theta_{WK}}{2} + \frac{1}{16} \cos \frac{3\theta_{WK}}{2} \quad (66)$$

e 
$$f_{FA} = \frac{f_{BL}}{1 - F_{WB}} = \frac{U_{FL} - U_{MF}}{U_{BL} (1 - F_{WB})} \quad (67)$$

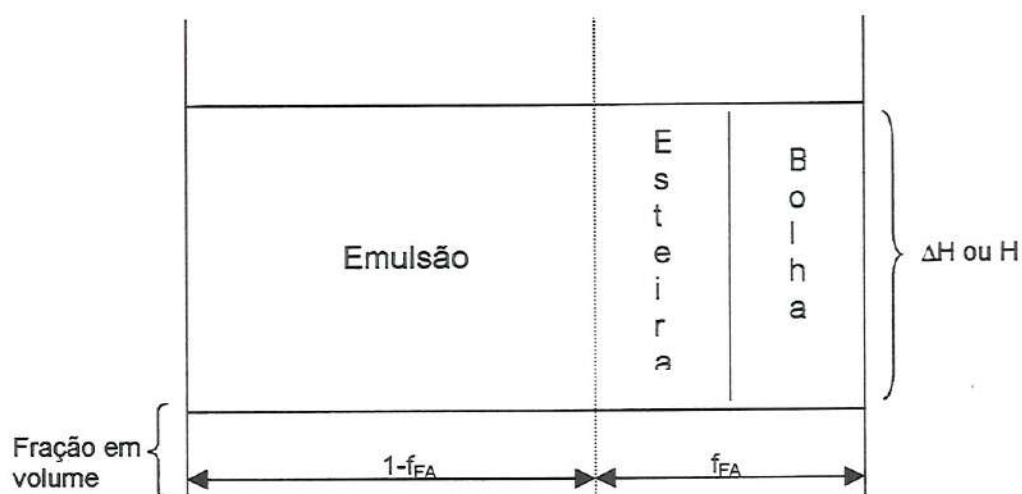


Figura 2.29 – Área de seção transversal de bolhas, esteiras e emulsão.

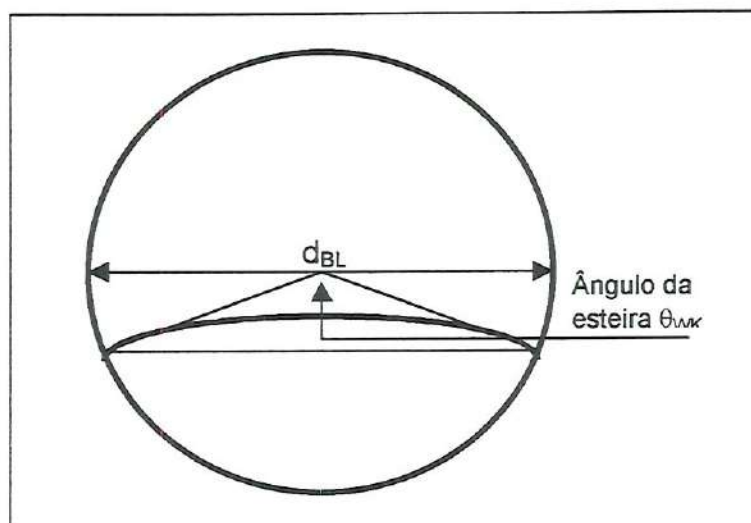


Figura 2.30 – Forma básica de uma bolha ascendente.

A figura 2.30 representa uma simplificação da bolha, indicando o ângulo da esteira dado por:

$$\theta_{WK} = 160 - 160 \exp(-60 \cdot d_{BL}) \quad (68)$$

$$V_{BL} = \frac{\pi}{6} d_{BL}^3 \quad (69)$$

#### 2.4.2 - Parâmetro taxa de intercâmbio ( $T_{IN}$ )

A taxa de intercâmbio pode ser determinada através do fluxo de sólidos entrando e saindo da esteira.

Por hipótese, é assumido que o fluxo de partículas para a esteira é proporcional tanto à fração em volume da esteira, quanto ao fluxo de partículas na nuvem de gás na superfície frontal da bolha. Isso pode ser observado pelas figuras 2.31 e 2.32.

Relação entre os diâmetros da nuvem e da bolha,

$$\left( \frac{d_{NV}}{d_{BL}} \right)^3 = \frac{\alpha_0}{\alpha_0 - 1} \quad \text{onde} \quad \alpha_0 = \frac{U_{BL} \cdot \varepsilon_{MF}}{U_{MF}} \quad (70)$$

Ao se combinar essas equações, o fluxo de partículas para a esteira pode ser dado como:



$$F_{PE} = \frac{\pi}{2} F_{WB} \cdot d_{BL}^2 \frac{U_{MF}}{\epsilon_{MF}} \quad (71)$$

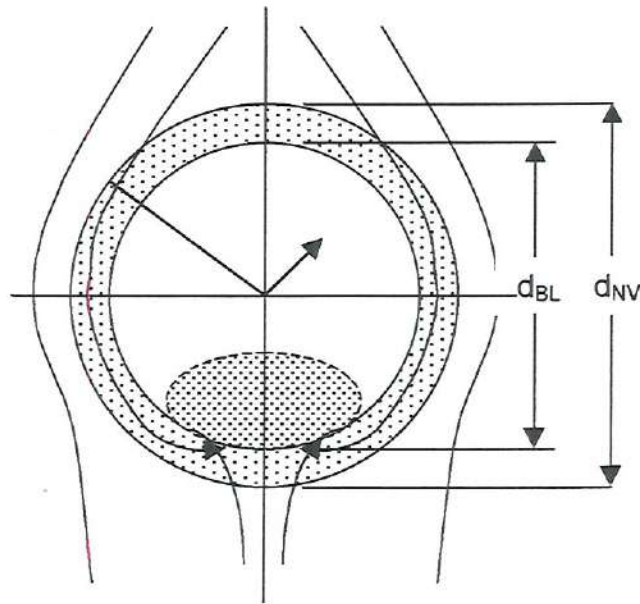


Figura 2.31 – modelo para o movimento de partículas ao redor da bolha.

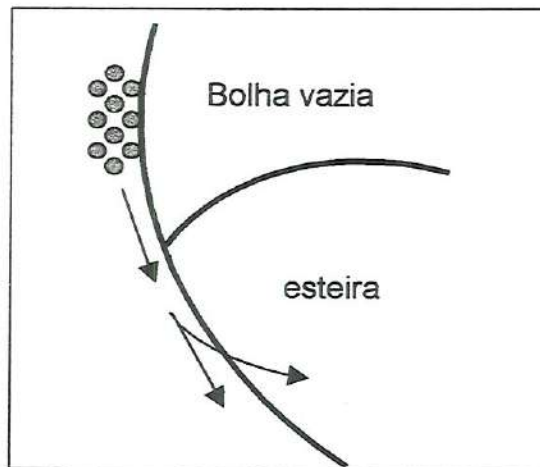


Figura 2.32 – Partículas deslizando ao longo da superfície da bolha.

Desse modo, a taxa de intercâmbio por unidade de volume da bolha é expresso por:

$$\frac{F_{PE}}{V_{BL}} = \frac{6 \cdot F_{PE}}{\pi \cdot d_{BL}^3} = \frac{3}{2} \frac{F_{WB}}{d_{BL}} \frac{U_{MF}}{\epsilon_{MF}} \quad (72)$$

Com base na fase de emulsão, a taxa de intercâmbio resulta:

$$T_{IN} = \frac{3}{2} \frac{F_{WB}}{d_{BL}} \frac{U_{MF}}{\epsilon_{MF}} \left( \frac{f_{FA}}{1 - f_{FA}} \right) \quad (73)$$

### 2.4.3 - Parâmetro taxa de segregação ( $T_{SE}$ )

O parâmetro taxa de segregação pode ser considerado como o fluxo líquido descendente, por unidade de área da seção transversal da fase de emulsão, das partículas menos fluidizáveis em relação às mais fluidizáveis.

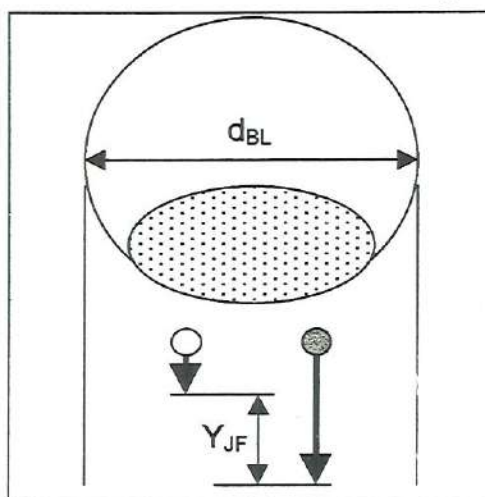


Figura 2.33 – Distância adimensional de segregação.

$T_{SE}$  pode ser derivada da distância média de segregação, mostrada na figura 2.33, pela qual as partículas menos fluidizáveis segregam descendentemente com cada passagem de bolha, em relação às partículas menos fluidizáveis e às características da bolha. Essa distância tem sido determinada experimentalmente e correlacionada em termos da distância de segregação adimensional através da expressão:

$$Y_{DS} = \frac{2 \cdot Y_{JF}}{d_{BL}} \quad (74)$$

Existem na literatura várias expressões para a distância de segregação adimensional, entre elas:

$$Y_{DS} = 0,6 \left( \frac{\rho_{PJ}}{\rho_{PF}} \right) \left( \frac{d_{PJ}}{d_{PF}} \right)^{1/3} \quad (75)$$

O volume de partículas menos fluidizáveis que desce após a passagem de uma única bolha é:

$$V_{PJ} = Y_{DS} \left( \frac{\pi}{4} d_{BL}^2 \right) \frac{d_{BL}}{2} \quad (76)$$

Elas movem-se para baixo numa distância que é o produto da metade da distância de segregação adimensional pelo diâmetro da bolha

$$\frac{Y_{DS}}{2} d_{BL} \quad (77)$$

por uma área equivalente à da seção transversal medida no diâmetro da bolha

$$\frac{\pi}{4} d_{BL}^2 \quad (78)$$

O parâmetro taxa de segregação é determinado por:

$$T_{SE} = \frac{3}{4} Y_{DS} \cdot U_{BL} \left( \frac{f_{FA}}{1-f_{FA}} \right) \quad (79)$$

Estudando o mecanismo de segregação e mistura em leitos bidimensionais e tridimensionais, RICE & BRAINOVICH (1986) relataram a competição entre os dois fenômenos alertando que a predominância de um ou outro depende do estado inicial. O principal mecanismo de mistura, dependente do excesso de gás, é o transporte das partículas menos fluidizáveis nas esteiras das bolhas e a segregação corresponde ao movimento de descida dessas mesmas partículas na fase de emulsão, após a passagem das bolhas.

Observaram ainda que inúmeros experimentos confirmam que o leito fluidizado promove uma rápida mistura desde que as partículas sejam semelhantes em tamanho e densidade, além disso, mostram que a segregação é afetada pelas velocidades superficial e de mínima fluidização.

A segregação também está relacionada ao comportamento das bolhas pois a força de arrasto do agente de fluidização em velocidades moderadas pode suspender as partículas mais fluidizáveis mas não as outras. Portanto quando as bolhas passam pelo leito as partículas menos fluidizáveis têm a oportunidade de movimento descendente pela simples queda através da bolha, através da nuvem ao redor das bolhas ou de vazios formados, atrás das mesmas, pelo deslocamento de partículas.

Outra informação do estudo é que a mistura lateral é resultado do intercâmbio entre as esteiras e a fase de emulsão, ou seja, resulta do



deslocamento pela ascensão das bolhas e posterior espalhamento na superfície após o colapso das mesmas.

BEECKMANS & STAHL (1987) trabalharam com dois arranjos iniciais de leito, um completamente segregado e outro misturado. Em vez do usual, consideraram partículas menos fluidizáveis como aquelas que estão presentes em uma concentração acima da média na parte mais baixa do leito no estado de equilíbrio, e as mais fluidizáveis como aquelas presentes na parte superior do leito numa concentração acima da média.

Chamam a atenção para o fato de que o movimento descendente relativo das partículas menos fluidizáveis não deve ser confundido com o movimento de descida da fase de emulsão como um todo, o que é exigido para contrabalançar o movimento ascendente das esteiras das bolhas.

CHOI et al. (1988) apresentam correlações para prever o diâmetro frontal da bolha e o diâmetro equivalente de bolha. Acrescentam que as bolhas tendem a subir por caminhos preferenciais e que a coalescência ou agrupamento, representado na figura 2.34, pode acontecer também pelo deslocamento lateral das bolhas.

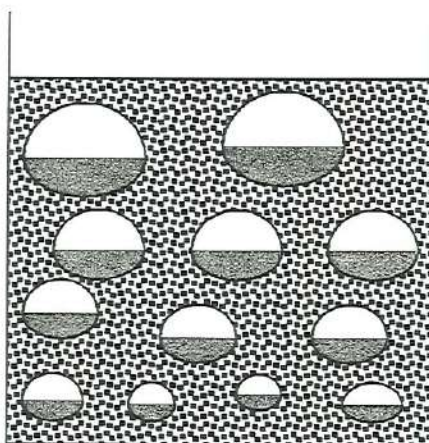


Figura 2.34 – Modelo de um leito fluidizado gás - sólido.

Nesse estudo um modelo teórico para a coalescência das bolhas foi proposto fundamentado na teoria de colisão modificada, considerando distribuição aleatória de bolhas delas no espaço. Foi assumido que as bolhas movem-se aleatoriamente com velocidades iguais por caminhos preferenciais, e coalescem como resultado de colisões com outras bolhas.

As hipóteses para descrever esse comportamento são:

- o leito se encontra no regime borbulhante
- o formato da bolha é esférico
- a bolha sobe uniformemente sem efeitos de parede
- é considerada a teoria bifásica de fluidização
- a coalescência é a única maneira da bolha crescer
- a coalescência ocorre entre pares de bolhas
- a divisão da bolha não é considerada para os grupos de partículas B e D da classificação de Geldart.

Foi considerado também que as bolhas podem mover próximas a caminhos preferenciais e que a subida das mesmas nem sempre é na direção vertical, podendo apresentar um ângulo relativo a essa direção.

A mais importante região de crescimento das bolhas é logo acima do distribuidor quando estão em maior número e mais próximas, apesar de menores.

Para o crescimento da bolha foi desenvolvida a seguinte correlação:

$$(U_{FL} - U_{MF})(d_{BL} - d_{BI}) + 0,474 \cdot \bar{g}^{1/2} (d_{BL}^{3/2} - d_{BI}^{3/2}) = 1,132(U_{FL} - U_{MF})h \quad (80)$$

BILBAO et al. (1988) trabalhando com uma mistura de areia e palha de trigo propuseram outro modelo de segregação e mistura para esses tipos de componentes com base no modelo de Gibilaro-Rowe. Materiais do tipo da palha de trigo, ou outro resto de cultura qualquer, têm aplicação em gaseificação ou combustão, mas devido às suas características de forma e densidade são de difícil fluidização mesmo quando reduzidos a tamanhos menores. A adição de um material com boas propriedades de fluidização como a areia permite que o processo seja conduzido com relativo sucesso, mas mesmo assim ainda ocorre segregação.

Em vista disso, os autores trabalharam com uma versão modificada do modelo para atender às características específicas de componentes tipo palha, e com os parâmetros estimados por NAIMER et al. já citados.



Notaram que por seu tamanho a palha não era arrastada na esteira mas sim em uma série de saltos com a sucessiva passagem das bolhas. Obtiveram resultados satisfatórios na previsão dos perfis de concentrações axiais.

GARCIA-OCHOA et al. (1989) estudando mistura e segregação na fluidização de partículas de tamanhos relativamente grandes com densidades diferentes, mediram os perfis de concentrações e vazios ao longo da altura do leito. Seus resultados foram descritos em conformidade com o modelo de Gibilaro-Rowe.

O modelo leva em conta os quatro mecanismos já citados: a mistura axial, a circulação e o intercâmbio, responsáveis pela mistura no leito, e o quarto mecanismo responsável pela segregação.

Gibilaro-Rowe propuseram equações para prever o movimento das partículas menos fluidizáveis nas fases de emulsão e de esteira:

$$\frac{1}{\beta} \frac{d^2 C_B}{dz^2} + (\lambda + 1 - 2C_B) \frac{dC_B}{dz} + \gamma \cdot \lambda (C_W - C_B) = 0 \quad (81)$$

$$\lambda \frac{dC_W}{dz} = \gamma \cdot \lambda (C_B - C_W) = 0 \quad (82)$$

No modelo estão previstas três simplificações, chamadas de caso 1, caso 2 e caso 3.

No caso 1 consideraram apenas os mecanismos de circulação e segregação, um de mistura e outro de segregação.

No caso 2 levaram em conta os mecanismos de circulação, de segregação e de intercâmbio, dois de mistura e um de segregação.

No caso 3 propuseram os mecanismos de circulação, de segregação e de mistura axial, dois de mistura e um de segregação.

Como conseqüência o caso 1 tem apenas o parâmetro  $\lambda$ , o caso 2 tem os parâmetros  $\lambda$  e  $\gamma$ , enquanto o caso 3 apresenta os parâmetros  $\lambda$  e  $\beta$ .

De acordo com os autores o modelo citado é o que melhor descreve os fenômenos de segregação e mistura apesar de existirem vários outros modelos surgidos posteriormente. Esses são:



- modelo de Burgess, baseado no movimento dos sólidos induzido pelas bolhas de gás, com parâmetros de difícil estimativa.
- modelo de Yoshida, que supõe diferentes velocidades de intercâmbio entre as fases de bolha e de emulsão para cada tipo de sólido, também difícil de estimar os parâmetros.
- modelo de Gelperin com dois parâmetros, de segregação e mistura axial que não são fáceis de serem relacionados com as condições de operação.
- modelo de Tanimoto, aplicável apenas quando os sólidos são muito similares de modo que suas velocidades de mínima fluidização são bastante próximas.

O modelo bifásico de Gibilaro-Rowe inclui quatro parâmetros, resultantes de combinações de mecanismos de mistura e segregação para a maioria dos quais existem técnicas estimativas.

No caso desse trabalho observa-se que os melhores resultados foram obtidos utilizando os casos 1 e 3. O caso 2 não forneceu bons resultados para o tipo de sistema considerado, ou seja, grupo D de Geldart, mas fornece bons resultados para sistemas de partículas menores.

Existem numerosos estudos de mistura em leitos fluidizados borbulhantes, mas nos regimes turbulento e tipo pistão os estudos são raros segundo LEE & KIM (1990).

Eles pesquisaram as características de mistura de partículas de grande tamanho nesses dois regimes por analogia com o transporte axial de calor utilizando a equação de Fourier para a condução de calor,

$$k_{cd} = \frac{Q_{cd} / A_{LF}}{dT / dz} \quad (83)$$

Foi encontrado que o coeficiente de dispersão axial dos sólidos permanece praticamente constante com o aumento da velocidade do gás no regime tipo pistão, mas aumenta com o aumento da velocidade do gás no

regime turbulento. No regime turbulento o coeficiente efetivo de dispersão axial para as partículas maiores é menor que para partículas mais finas:

$$E_{DA} = k_{CD} / \rho_{SL} \cdot C_{P_{SL}} \quad (84)$$

Os mesmos autores, LEE & KIM (1991), correlacionaram o coeficiente de dispersão axial para partículas finas, grupo A da classificação de Geldart, em função das propriedades do leito e das partículas,

$$\frac{E_{DA}}{[\bar{g}(U_{FL} - U_{MF})]^{1/3} d_{BL}^{4/3}} = 1,058 \left( \frac{\mu_{FL}}{18 \cdot U_{TE} \cdot d_{PT} \cdot \rho_{FL}} \right)^{0,368} = 0,365 \cdot Re_{TE}^{-0,368} \quad (85)$$

HOFFMANN & ROMP (1991) trabalharam com partículas de distribuição contínua de tamanhos para verificar a segregação, observaram que se a fração em volume de partículas mais fluidizáveis no leito exceder 50 %, o perfil de concentrações das partículas menos fluidizáveis em tais sistemas muitas vezes exibe duas lâminas distintas como indicado na figura 2.35 a seguir.

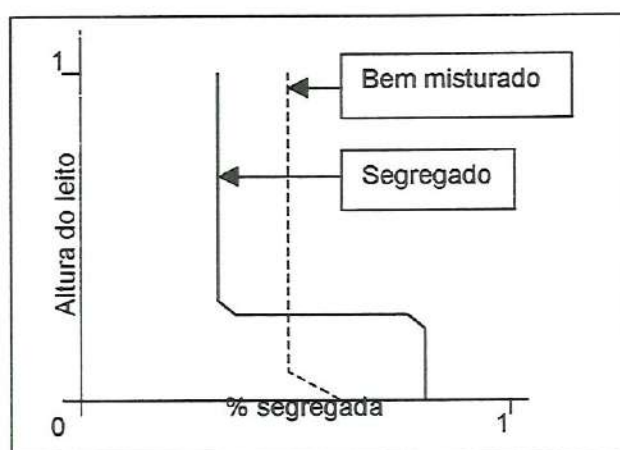


Figura 2.35 – Padrão típico de segregação em misturas binárias.

Encontraram também que se a velocidade de fluidização numa mistura binária de igual densidade é alta o suficiente para fluidizar todo o leito de partículas, então normalmente este é um leito bem misturado, ou seja, a concentração de partículas menos fluidizáveis é mais ou menos uniforme na direção axial, conforme a mesma figura 2.35.

Através de um leito bidimensional BESESME & LEVY (1992) estudaram o intercâmbio de sólidos entre as esteiras das bolhas e a fase de emulsão. Encontraram que uma bolha isolada subindo através dos sólidos é como se fosse um esfera sólida subindo por um líquido próximo do ideal, e camadas de partículas através das quais as bolhas se movem são levantadas formando uma espécie de cauda atrás delas. Além disso cada bolha carrega uma esteira de partículas que pode desprender porções ao longo do caminho.

BESESME & LEVY encontraram uma relação para o coeficiente de intercâmbio de sólidos entre as esteiras e a fase de emulsão como:

$$T_{IN} = \frac{4}{\pi \cdot d_{FB}} \frac{U_{MF}}{\epsilon_{MF}} \quad (86)$$

Encontraram ainda outras duas relações para esse parâmetro,

$$T_{IN} = 0,7 \frac{U_{BL}}{d_{EB}} \quad \text{e} \quad T_{IN} = 0,807 \frac{U_{BL}}{d_{FB}} \quad (87)$$

Os autores reconhecem a necessidade de mais estudos sobre o assunto pois seus ensaios não produziram resultados satisfatórios, a não ser para uma estreita faixa de velocidades de mínima fluidização e de diâmetro de bolha.

HOFFMANN et al. (1993), utilizando um sistema binário, observaram o fenômeno da segregação e afirmaram que embora os leitos fluidizados sejam conhecidos por sua capacidade de obter boas misturas, muitas vezes, dependendo do sistema, apresentam mistura incompleta.

O conhecimento do grau e da taxa de segregação é reputada importante pois em algumas aplicações é exigida uma boa mistura, e deve ser evitada a desfluidização de partes do leito resultando por exemplo na fusão de partículas e no colapso de leito. Em outras operações é interessante manter uma certa proporção de partículas segregadas para a renovação do leito, por exemplo.



O modelo proposto por Gibilaro-Rowe prevê padrões de segregação em sistemas relativamente pobres em partículas menos fluidizáveis. Esse modelo é fundamentado nos conceitos de que uma mistura dispersiva é resultado do distúrbio causado pela subida das bolhas e que uma mistura convectiva ou com circulação é devida à elevação do material nas esteiras das bolhas.

Tentaram demonstrar, sem o uso de parâmetros ajustáveis, se o processo de transporte de sólidos também pode levar em conta os resultados obtidos para misturas ricas em partículas menos fluidizáveis com diferentes densidades e misturas de partículas com iguais densidades com desfluidização, concluindo que o modelo é satisfatório.

Encontraram para o crescimento das bolhas no leito a seguinte expressão:

$$d_{BL} = \frac{(U_{FL} - U_{MF})^{0,4}}{N_{OR}^{0,4} \cdot g^{0,2}} \left[ \frac{6,84}{\pi(1-f_W)} \right]^{0,33} + 2,55(U_{FL} - U_{MF})^{0,94} h \quad (88)$$

Um dos objetivos do trabalho foi mostrar que os mecanismos de transporte de partículas propostos por Gibilaro-Rowe para sistemas pobres em partículas menos fluidizáveis também poderiam ser considerados para misturas ricas nesse tipo de partícula, tanto com diferenças de densidades quanto com densidades iguais.

Os resultados de ensaios usando uma mistura contendo 75% em peso de partículas menos fluidizáveis é mostrado no trabalho e o perfil é claramente bem modelado.

A partir de observações da literatura, FUNG & HAMDULLAHPUR (1993) notaram que a mistura lateral dos sólidos pode em parte ser atribuída às erupções e espalhamento das partículas na superfície do leito. Em relação à origem das partículas lançadas na superfície e ao mecanismo de erupção das bolhas, ainda existe divergência se as partículas originam-se das esteiras ou do topo das bolhas que explodem.

Dependendo de sua velocidade terminal as partículas retornam ao leito ou são arrastadas para fora do mesmo. Esse mecanismo, no caso do retorno das partículas ao leito, contribui para a mistura lateral do sistema.

DELEBARRE et al. (1994) mediram as velocidades de mínima e completa fluidização para materiais particulados distribuídos em tamanho e densidade, e também estabeleceram o estado de mistura em velocidades de fluidização próximas às duas anteriores.

Observaram três tipos de comportamento para uma mistura binária de materiais não dispersos citados na literatura: a mistura perfeita, a segregação perfeita e mistura parcial. Relataram duas possíveis abordagens teóricas para os cálculos envolvendo sólidos multidispersos. Na primeira, as características dos sólidos tais como tamanho e densidade foram inicialmente calculados como uma média das distribuições e depois correlacionados. Na segunda, uma correlação dando a velocidade mínima para cada classe de partículas foi usada e então uma média ou procedimento equivalente forneceu a velocidade característica dos sólidos dispersos.

Para a primeira abordagem:

$$\frac{1}{\rho_{MD}} = \left( \frac{f_{PF}}{\rho_{PF}} \right) + \left( \frac{f_{PJ}}{\rho_{PJ}} \right) \quad \text{e} \quad \frac{1}{d_{MD} \cdot \rho_{MD}} = \left( \frac{f_{PF}}{d_{PF} \cdot \rho_{PF}} \right) + \left( \frac{f_{PJ}}{d_{PJ} \cdot \rho_{PJ}} \right) \quad (89)$$

Para a segunda abordagem:

$$U_{FT} = \sum f_i \cdot U_{MF_i} \quad (90)$$

SHEN et al. (1995) observam que os estudos da mistura dos sólidos combinados com análises do escoamento do agente de fluidização e mecanismos de reação fornecem a base para o projeto de um leito fluidizado. Afirmaram que, em comparação à outros aspectos importantes sobre leito fluidizado, a mistura de sólidos não tem sido extensivamente estudada e, em particular, existe uma escassez de resultados experimentais para leitos em grande escala.

Nesse trabalho, combinaram as misturas radial e axial desenvolvendo um modelo de convecção-difusão para leitos bidimensionais. Observaram



que os mecanismos de mistura radial e axial são promovidos pelas bolhas e que a teoria existente é adequada.

Os autores usaram o modelo de Kunii-Levenspiel da figura 2.36 assumindo que um leito fluidizado com gás e partículas sólidas livres é formado por uma fase diluta, de bolhas não contendo sólidos, e duas fases densas, emulsão e esteiras, contendo todos os sólidos.

A distribuição de bolhas no leito é controlada pela uniformidade da distribuição do gás, pelo posicionamento dos orifícios no distribuidor, pelo tamanho e altura do leito.

A coalescência causa um aumento no diâmetro médio das bolhas e afeta o movimento local das bolhas. Os sólidos são movimentados para cima por ação das bolhas através das esteiras e do arrasto provocado por elas logo abaixo. Existe um fluxo descendente de sólidos nas regiões vizinhas às bolhas em ascensão, o que promove a circulação convectiva.

As esteiras em movimento ascendente ficam em contato com a fase de emulsão com movimento contrário, e os sólidos podem fazer intercâmbio entre as fases. Na fase de emulsão a mistura de sólidos ao longo das direções radial e axial é promovida por dois mecanismos. O primeiro é a difusão gerada pelo movimento aleatório de sólidos, e o segundo é a convecção devido ao movimento lateral das bolhas por causa do seu agrupamento com outras.

Outras hipóteses do modelo assumem que não existe arrasto de partículas para fora do leito, que a fração em volume de bolhas permanece constante e que as porosidades das fases densas permanecem iguais e constantes.

Os parâmetros do modelo são determinados segundo as equações adiante.

Velocidade da fase de esteira:

$$U_w = U_{BL} \quad (91)$$



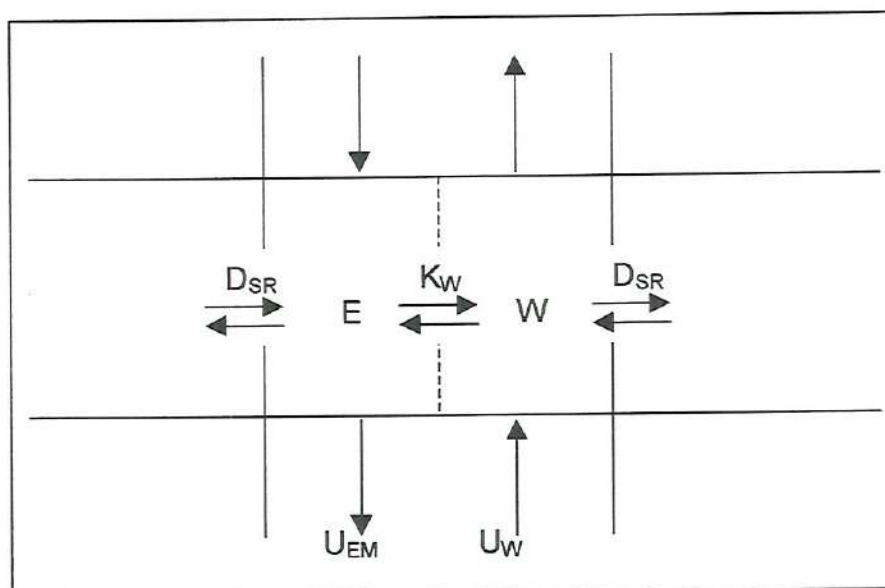


Figura 2.36 – Balanço de massa nas fases de esteira e de emulsão.

Velocidade da fase de emulsão:

Como a porosidade da fase densa é assumida constante através do leito, o fluxo ascendente de sólidos é igual ao fluxo descendente.

$$U_{EM} = U_W \frac{f_W}{f_E} f_{BL} \quad (92)$$

onde  $f_E = 1 - f_{BL} - f_{BL} \cdot f_W$  e  $f_{WK} = \frac{V_{WK}}{V_{BL}}$  (93)

A variação do parâmetro  $f_{WK}$  é mostrado na figura 2.37.

A fração de bolhas no leito depende das velocidades de bolha, da mínima fluidização e de excesso para formação das bolhas de acordo com as relações a seguir:

para bolhas lentas ou  $U_{BL} < U_{AG}$

$$f_{BL} = \frac{U_{FL} - U_{MF}}{U_{BL} + 2U_{MF}} \quad (94)$$

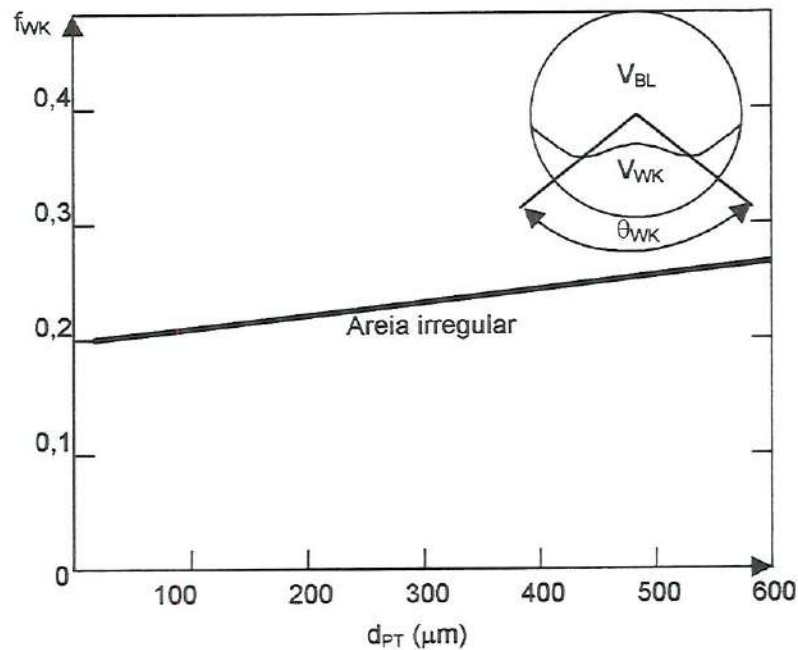


Figura 2.37 – Variação de  $f_{WK}$  em função do diâmetro da partícula.

Bolhas com velocidades intermediárias caracterizam um regime de difícil definição, mas a fração de bolhas pode ser obtida de forma aproximada por:

$$f_{BL} = \frac{U_{FL} - U_{MF}}{U_{BL} - U_{MF}} \quad \text{quando} \quad U_{BL} \cong \frac{U_{MF}}{\varepsilon_{MF}} \quad (95)$$

$$f_{BL} = \frac{U_{FL} - U_{MF}}{U_{BL}} \quad \text{quando} \quad U_{BL} \cong 5 \left( \frac{U_{MF}}{\varepsilon_{MF}} \right) \quad (96)$$

Para bolhas rápidas:

$$f_{BL} = \frac{U_{FL} - U_{MF}}{U_{BL} - U_{MF}} \quad \text{quando} \quad U_{BL} > 5 \left( \frac{U_{MF}}{\varepsilon_{MF}} \right) \quad (97)$$

A velocidade ascendente do gás na fase de emulsão é dado por:

$$U_{AG} = \frac{U_{MF}}{\varepsilon_{MF}} - U_{DS} \quad (98)$$

A velocidade de descida dos sólidos na emulsão é:

$$U_{DS} = \frac{f_W \cdot f_{BL} \cdot U_{BL}}{1 - f_{BL} - f_W \cdot f_{BL}} \quad (99)$$

$U_{DS}$  é positiva quando descendente.

O coeficiente de dispersão radial é calculado por:

$$D_{SR} = 0,0625 \cdot d_{BL} \cdot U_{BE} \quad (100)$$

A relação entre os volumes de nuvem e de bolha é determinado por:

$$f_{NB} = \frac{3}{U_{BE} (U_{MF} / \varepsilon_{MF}) - 1} = \frac{V_N}{V_{BL}} \quad (101)$$

KWANT et al. (1995) relataram que em um leito fluidizado com líquido e homogêneo, o movimento das partículas é aleatório e por isso a tendência a misturar pode ser descrita por uma equação de difusão, chamando esse tipo de mistura de micromistura.

Tem sido mostrado que para leitos fluidizados com gás no regime borbulhante a mistura de partículas é causada principalmente por heterogeneidades. Partículas são transportadas nas esteiras das bolhas ou vazios, enquanto um movimento descendente é observado na fase de emulsão. Esse mecanismo de macromistura é, contudo, muito mais difícil de descrever que o anterior porque exige quantificação do movimento das esteiras e do escoamento ascendente.

Estes fenômenos são muitas vezes bastante dependentes das propriedades das partículas e de fatores geométricos tais como o projeto do distribuidor, tipo de internos e dimensões da coluna.



## 2.5 - Análise estatística

COSTA NETO (1977) observa que quando a população é formada por material contínuo não é possível uma amostragem probabilística pela dificuldade de realizar um sorteio rigoroso. Caso a população seja de natureza gasosa ou líquida promove-se sua mistura e retiram-se amostras, procedimento que pode ser aplicado satisfatoriamente à material sólido.

Segundo HARNBY et al. (1985), em operações com partículas sólidas, processar demasiadamente o material significa tempo excessivo dentro do equipamento. Em consequência disso, enquanto uma mistura adequada pode ser produzida em um período relativamente curto, a segregação pode passar a ser dominante após esse tempo, reduzindo a qualidade do produto final. Apesar de muitas definições disponíveis de qualidade da mistura não serem aplicáveis a todos os casos, algum método de avaliação deve estar disponível para verificar o desempenho do equipamento e o grau de mistura alcançado.

DANCKWERTS (1952) definiu dois parâmetros para auxiliar na especificação da qualidade da mistura: escala e intensidade de segregação.

A escala de segregação observada na figura 2.38 é a medida efetiva do tamanho de regiões de segregação dentro de uma mistura, pela qual o progresso do processamento pode ser verificado. Menor escala de segregação significa melhor mistura.

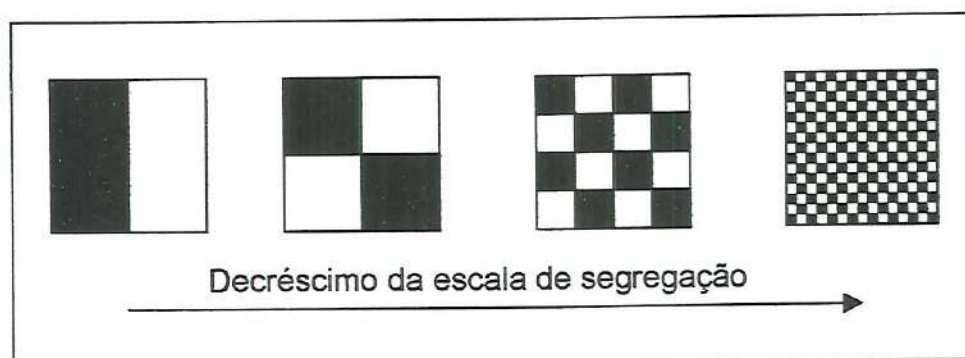


Figura 2.38 – Representação da escala de segregação.

A intensidade de segregação representada na figura 2.39 foi definida como uma medida da variação da concentração da mistura.



Figura 2.39 - Representação da intensidade de segregação.

Em qualquer tentativa de medir esses parâmetros é importante ter em mente que todas as sondas usadas para detectar regiões com variação na composição da mistura tem um volume finito de amostra, não sendo portanto capazes de indicar qualquer mudança numa escala menor que esse volume.

Quando a escala de segregação é reduzida pelo mecanismo de mistura em consideração, para um valor que é da mesma ordem que a dimensão da sonda, não será mais possível medir a escala de segregação, e qualquer melhoria adicional na qualidade da mistura não será detectada.

Essa limitação do volume de detecção é a maior desvantagem em se tentar medir a qualidade da mistura, particularmente próximo ao fim do processo, quando a escala de segregação pode se tornar muito pequena.

Por isso, apesar da escala e intensidade de segregação ou outras medidas da qualidade da mistura, de definição simples, ajudarem a entender os mecanismos de mistura, a determinação experimental desses parâmetros é problemática.

### 2.5.1 - Abordagem qualitativa

Numa abordagem qualitativa, a questão que se coloca é: quando a mistura está perfeita ou pelo menos adequada ao fim desejado?



Para tentar esclarecer isso, considere o problema da dispersão de partículas no produto. A escala de segregação nesse caso é uma região na superfície inspecionada que não possui a mesma composição média da mistura como um todo. A divergência dessa composição média poderia variar para todas as partículas da região de segregação, que é um tipo de divergência de composição muito pequena. A intensidade de segregação é uma medida dessa divergência.

Misturas com alta qualidade possuem baixos valores de escala e intensidade de segregação, e quando uma mistura específica é considerada, o acesso à qualidade depende de quão próximo ela é examinada.

Definiu-se em DANCKWERTS (1953) a escala de exame ou escrutínio para uma mistura como sendo o máximo tamanho da região segregada na mistura considerada imperfeitamente homogênea. A escala de exame fornece uma ligação importante entre a especificação do produto e seu estado de mistura.

Portanto, para um produto específico é preciso escolher a escala, ou tamanho da amostra, e deve-se ter extremo cuidado nessa escolha em função da finalidade do produto, por exemplo, se é para fins industriais ou para medicamentos.

A relação entre a qualidade da mistura e a escala de exame mostrada na figura 2.40 é de difícil previsão. O resultado de uma ampliação ou redução de escala da qualidade da mistura usando a escala de exame deve ser evitada, sendo mais seguro retirar novas amostras numa nova escala de exame.

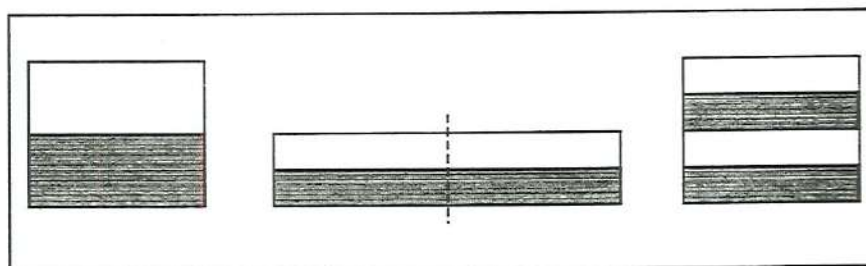


Figura 2.40 – Ilustração da redução da escala de segregação através de ciclos de superposição seguida por deformação.



### 2.5.2 - Abordagem quantitativa

Uma vez fixados a escala de exame e o tamanho da amostra, a mistura pode ser inspecionada, as amostras individuais comparadas e colocadas em uma curva de distribuição. Normalmente o valor médio da composição tem um significado econômico acentuado, pois é usado no controle do elemento principal ou do mais caro da mistura.

O desvio padrão da distribuição é uma medida da qualidade e uma mistura com alta qualidade deverá mostrar pequenos desvios na variação da composição entre as amostras e isso representa um desvio padrão baixo. A definição do desvio padrão é dada como:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - x_{MD})^2}{N-1}} \quad (102)$$

O quadrado do desvio padrão é a variância. Esta é muito usada para especificar a qualidade de uma mistura por causa de suas propriedades aditivas. A variância experimental obtida dessas amostras é de pouco valor, a não ser que se possa relacioná-las aos valores limites da variância.

BLUMBERG & MARITZ (1953) já afirmavam que a aplicação dos conceitos teóricos de mistura completa e incompleta usando como critério testes estatísticos de hipóteses tinham sido confirmados experimentalmente e indicado que a amostragem aleatória segue a distribuição normal. Foi mostrado também que um pequeno número de amostras examinadas estatisticamente é suficiente para indicar se a mistura está completa ou não em qualquer tempo, e que o progresso da mistura com o tempo pode ser descrito através da estatística.

CARLEY-MACAULY & DONALD (1962) avaliaram a mistura produzida em um tambor rotativo com base em equações encontradas na literatura. A composição das amostras retiradas foi medida como a proporção de um dos componentes e a variação na composição entre as

amostras usada como uma indicação da heterogeneidade foi expressa como uma medida de dispersão.

Os autores justificam a preferência pelo uso da variância como medida de dispersão com base na sua eficiência estatística, ou seja, ela resume informações contidas na composição de uma amostra individual com maior precisão que outras medidas, e com base nas suas propriedades aditivas.

Por essas razões a maioria das considerações teóricas sobre misturas têm sido apontadas em termos da variância ou do desvio padrão de amostras pontuais. A medida de dispersão deve gerar um índice independente do tamanho da amostra e possivelmente da proporção de sua composição, permitindo também que alterações em função do tempo de mistura sejam observadas com clareza.

Mesmo em amostras de uma mistura completa com pequeno número de partículas pode ocorrer variações aleatórias entre essas amostras e para partículas que se distinguem apenas pelas cores, a variância desse estado aleatório é fornecido pela estatística como:

$$S_R^2 = \frac{p(1-p)}{N_{PA}} \quad (103)$$

Para o início da mistura a variância é dada pelo produto das composições das partículas:

$$S_0^2 = p(1-p) \quad (104)$$

McCABE & SMITH (1967) observam que quando o sistema for perfeitamente misturado e cada análise feita de maneira correta, todo valor medido deve ser igual à média da população. Porém, se a mistura não for a ideal cada valor observado difere da média, e o seu desvio padrão pode ser usado como medida da qualidade da mistura. Para os autores, o valor do desvio padrão das amostras é uma medida da mistura que tem validade apenas para um conjunto de testes com um sistema e equipamento



específicos. Para esse tipo de análise apresentaram um índice definido como:

$$M = \frac{S}{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_{MD})^2}{(N_{AM} - 1)p(1-p)}} \quad (105)$$

KRISTENSEN (1973) deduziu uma equação para a variância assumindo que as amostras continham um volume constante de sólidos. Essa equação expressa a variância como uma função dos pesos médios e das densidades das partículas, das proporções dos componentes e do peso médio das amostras. A equação resultante aplica-se ao caso especial para a variância de misturas binárias aleatórias, e é dada por:

$$S_R^2 = \frac{p_A \cdot p_B}{w_{AM}} \frac{\rho_{MD}^4}{\rho_A^2 \cdot \rho_B^2} (p_A \cdot w_{UB} + p_B \cdot w_{UA}) \quad (106)$$

De acordo com ORR et al. (1973) a determinação experimental do grau de mistura terá significado apenas se as variações na composição entre partes discretas de uma mistura não forem mascaradas pelas variações causadas por erros inerentes ao método de determinação. A medida experimental da variância é composta pela soma das variâncias devido ao erro total da técnica analítica e devido ao erro na remoção física das amostras. Assumindo independência, as variâncias são aditivas, ou seja,

$$S_m^2 = S^2 + S_a^2 + S_s^2 \quad (107)$$

Segundo JOHNSON (1975) a mistura de partículas sólidas é uma etapa de extrema importância na fabricação de formas de dosagem sólida, tais como comprimidos e capsulas. A eficiência do processo de mistura, ou grau de mistura, é um fator de contribuição da qualidade final com respeito à uniformidade do conteúdo, e é usualmente determinado por uma análise estatística do número de amostras retiradas.

Em FAN & SHIN (1979) o estudo da mistura de sólidos pode ser visto sob dois aspectos. O primeiro é a elucidação da taxa e do mecanismo do



processo de mistura, e o segundo é a caracterização da mistura resultante incluindo sua homogeneidade. Estudos da taxa e do mecanismo de mistura tem se ocupado principalmente com o estabelecimento de expressões ou modelos para a taxa de mistura. Alguns dos modelos tratam somente da taxa global de mistura sem considerar a distribuição espacial das partículas, enquanto outros levam em conta a distribuição de concentração de partículas com o tempo e espaço.

Os modelos do primeiro tipo são expressos em termos da variância, ou grau de mistura, que é subjetivamente definida. Os modelos do segundo tipo são baseados na equação de difusão de Fick, ou em equações estocásticas.

Abordagens estocásticas podem ter vantagens na modelagem da taxa e mecanismo de mistura de sistemas não ideais por causa de sua complexidade. O trabalho desses autores foi o de examinar a aplicação da versão contínua da cadeia de Markov, isto é, uma equação de difusão. Chegaram à conclusão que em princípio a teoria pode ser aplicada a qualquer sistema de mistura de sólidos onde difusão e convecção são importantes, tais como em leito fluidizado.

Estudando a determinação da homogeneidade de uma mistura ordenada, THIEL & STEPHENSON (1982) concluíram que o desvio padrão das amostras calculado pela equação (102) subestimar a verdadeira homogeneidade da amostra. É necessário mostrar que qualquer esquema de amostragem proposto deve ser imparcial. Essa imparcialidade é mais simples de ser verificada pela comparação da composição das amostras com a média da população de partículas obtida da massa total de material carregada no equipamento em vez da média da composição das amostras, desde que não haja perdas no equipamento.

POPPELWELL et al. (1989) propuseram uma modificação no índice baseado no coeficiente de segregação específica, definido como:

$$C_{SE} = \frac{W_{CT} - W_{CB}}{W_{CT} + W_{CB}} \quad (108)$$

que mediu a segregação em sistemas polidispersos induzida por vibração, para:

$$I_{SE} = \frac{A - C_0}{1 - C_0} \quad (109)$$

Observaram o grande número de publicações referindo-se aos índices de mistura e poucas em relação aos índices de segregação. Observaram que pouco tem sido feito para caracterizar o fenômeno por modelos cinéticos e a intensidade de segregação é normalmente expressa em termos de parâmetros estatísticos como o desvio padrão ou variância.

ABDELRAHMAN et al. (1991) estudaram o processamento de minérios e observaram que o consumo de potência e o tempo de mistura são de extrema importância, devendo ser considerados nas etapas de projeto e operação. Contudo, o projeto de processos de mistura de sólidos é ainda repleto de incertezas. Para avaliação das misturas usaram os parâmetros estatísticos média e desvio padrão.

MORT & RIMAN (1995) determinaram a escala de homogeneidade para misturas ordenadas e parcialmente ordenadas. Afirmaram que outros pesquisadores têm usado a teoria da probabilidade para formular modelos analíticos da composição da variância em função do tamanho da amostra em misturas aleatórias. Definiram-se o tamanho da amostra em termos da escala de exame, e um comprimento de escala característico foi usado para descrever um volume de amostra dentro do qual o número total de partículas poderiam estar contidas.

Observaram que a relação entre a variância e o tamanho da amostra tem sido usada para descrever a homogeneidade, e afirmam que modelos baseados em teoria de probabilidade são apropriados para prever a variância das amostras retiradas de um leito de partículas desde que bem misturados.

A comparação entre as variâncias prevista e medida pode ser usada para determinar o grau aleatório da mistura. As amostras normalmente possuem inúmeras partículas podendo ser analisadas com base na fração



em peso. Com isso o arranjo espacial de partículas na mistura não é tão importante. Para uma mistura não aleatória, como é o caso das misturas ordenadas, a distribuição espacial dos componentes deve ser considerada.

Têm sido feitas algumas revisões na literatura com relação aos conceitos e critérios estatísticos para avaliar a mistura e a segregação de sistemas particulados. Entre os autores estão FAN et al. (1970), que estudaram as publicações a esse respeito de 1958 a 1969, catalogando mais de trinta índices. Posteriormente SCHOFIELD (1976) discutiu os fatores que têm determinado as formas e propriedades das misturas, enfatizando problemas muitas vezes ignorados na determinação prática da qualidade da mistura. Para o autor o método utilizado na determinação da qualidade da mistura, em princípio, deve:

- ter algum significado físico em relação ao processo
- ser sensível às mudanças do estado da mistura
- não ser ambíguo
- ser aplicável a diferentes sistemas
- não causar perturbações na mistura
- exigir o mínimo de esforço experimental
- ser matemática e estatisticamente rigoroso

### 2.5.3 - Caracterização – problemas da amostragem

Para POUX et al. (1991) a amostragem é um procedimento de grande importância na determinação da qualidade da mistura devendo ser portanto representativa dessa qualidade.

Em BARROS NETO et al. (1995) as propriedades das misturas são determinadas pelas proporções de seus constituintes e não pela sua quantidade total. Também, as proporções dos componentes na mistura são dependentes e a somatória de todos deve ser igual a 100%.

O método de amostragem, a localização, o tamanho, o número de amostras e o método de análise devem ser estudados com cautela. Desse modo o problema da amostragem pode ser representado por três questões:



onde, quando e como? As respostas a essas questões dependem da finalidade da operação e da natureza do processo de mistura, se contínua ou não.

### Tamanho da amostra

O tamanho da amostra deve ser adaptado à dimensão do material particulado, sendo óbvio que um grande volume não representa a distribuição das partículas finas e volumes pequenos demais acarretam erros na distribuição das partículas maiores, segundo POUX et al. (1991).

O menor tamanho possível de uma amostra é uma única partícula, o que não fornece nenhuma informação sobre a mistura. Por outro lado, o maior tamanho de amostra possível é todo o conjunto de partículas, o que indica falsamente que a mistura é perfeita. O problema do tamanho ideal da amostra é aparentemente simples e não existe um método sistemático proposto para sua determinação.

FAN et al. (1970) observaram que quando o produto é disposto em cápsulas para uso farmacêutico, o tamanho conveniente da amostra é o das próprias cápsulas. Se um número de amostras devem ser tomadas não se deve retirar muito material em cada amostra e uma regra aproximada do *American Institute of Chemical Engineering Test Procedures* é não remover mais que 5% da mistura.

### Número de amostras

Poucos dão informações sobre o número de amostras a serem retiradas da mistura. POUX et al. (1991) observaram que quando um número exagerado de amostras são tomadas, grandes perturbações podem ser causadas, modificando a estrutura originalmente alcançada. Uma indicação é que geralmente entre vinte e quarenta amostras tomadas da mistura fornecem uma correta informação sobre sua homogeneidade.

Em SCHOFIELD (1976) é apresentado um gráfico para um limite de 95% de confiança dos valores da razão entre as variâncias verdadeira e estimada em função do número de amostras. Nesse gráfico, para um número de amostras próximo de 20, a relação entre o desvio padrão verdadeiro e o desvio padrão estimado ficou na faixa de 0,8 a 1,4. Com o aumento do número de amostras essa faixa tende a se estreitar, aproximando-se da unidade.

Observou-se que o erro em assumir uma distribuição normal para aplicações industriais não é muito grave, levando-se em conta a falta de precisão quando se utiliza relativamente poucas amostras.

A determinação do número de amostras depende primariamente do equipamento, da mistura, da técnica de amostragem, do método e do custo da análise das amostras. Nenhum método sistemático foi desenvolvido ainda para determinar o número ideal de amostras a serem retiradas. HARNBY et al. (1985) sugerem que de cinco a quinze amostras devem ser analisadas tanto para operações contínuas quanto em batelada.

#### Localização das amostras

De acordo com POUX et al. (1991), as amostras devem ser retiradas de diferentes pontos da mistura para fornecer uma visão global da evolução do processo de mistura. A amostragem deve portanto ser feita de acordo com um esquema sistemático diferente para cada equipamento, segundo os mesmos autores.

No caso do leito fluidizado o cuidado deve ser redobrado quando se retira amostras da mistura produzida, pois ao diminuir demasiadamente o volume de partículas altera-se significativamente a altura do leito e os parâmetros fundamentais da fluidização dependentes dela.

#### 2.5.4 - Inferência estatística

As amostras são retiradas de um sistema particulado com a finalidade de avaliar a sua qualidade, e isso tem pouco valor se o procedimento for impreciso ou de interpretação duvidosa. A precisão da qualidade da mistura é normalmente expressa em termos da confiança com que uma estimativa pode ser feita para ficar dentro de limites estabelecidos.

Sem o conhecimento dessa precisão da estimativa da qualidade uma comparação significativa não pode ser feita, e um controle do processo de mistura não é satisfatório.

Um conjunto de amostras pode ser colocado em forma gráfica como na figura 2.41, extraída de HARNBY et al. (1985) expressando a frequência de ocorrência de possíveis frações de determinadas espécies. Uma estimativa das características da mistura pode então ser obtida a partir desses valores.

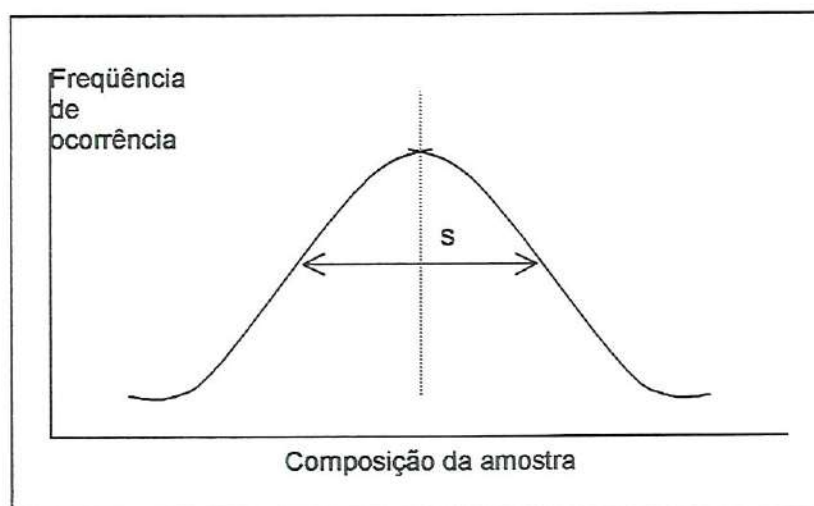


Figura 2.41 - Curva de distribuição para composição das amostras (HARNBY et al. 1985).

Se esse processo é repetido um grande número de vezes então faixas de valores da composição média e variância podem ser obtidas.



Esses valores são expressos na forma de uma curva de distribuição com um valor médio e a variância como mostrado na figura 2.42.

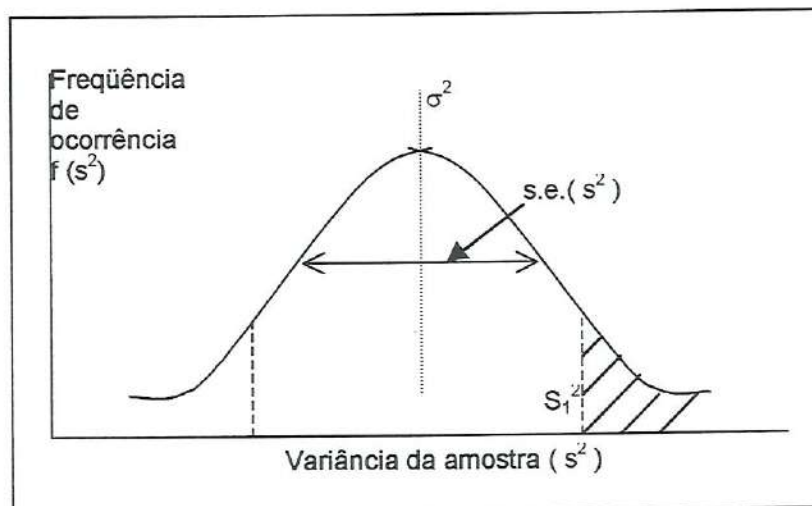


Figura 2.42 - Curva de distribuição para uma série de variâncias estimadas das amostras (HARNBY et al. 1985).

Se desvios na amostra foram evitados a curva de distribuição tem um máximo na verdadeira variância da mistura,  $\sigma^2$ , e o desvio padrão das estimadas da variância, ou o erro padrão da variância,  $s.e.(S^2)$ , podem ser calculados.

A área sob a curva é usada para expressar a probabilidade de certos valores da variância ocorrerem quando a mistura é avaliada por amostragem. Portanto a probabilidade de um valor da variância maior que  $S_1^2$  ser obtido é expresso como a razão entre a área achurada e a área total sob a curva.

Tal procedimento exige um grande trabalho analítico e é normalmente assumido que a curva de distribuição possa ser descrita tanto pela curva normal quanto pela curva chi-quadrado.

Se for assumido que as composições das amostras estão distribuídas normalmente, então a precisão da variância é estimada pelos dois métodos a seguir:

Primeiro método: quando mais de 50 amostras são retiradas.

Nesse caso pode-se assumir que a distribuição das estimativas das variâncias também é normal. Esta nova curva normal pode ser padronizada em termos de uma única variável “ $t_e$ ” de forma que

$$t_e = \frac{S^2 - \sigma^2}{s.e(S^2)} \quad (110)$$

$$\sigma^2 = S^2 \pm t_e \cdot s.e(S^2) \quad (111)$$

Para alta precisão os valores de “ $t_e$ ” e do erro padrão da variância devem ser minimizados. Nesse caso o valor de “ $t_e$ ” é obtido das tabelas de distribuição de Student e determinado pelo nível de confiança exigido para a estimativa.

Um nível de 95% de confiança significa que em média uma em vinte estimativas da variância cai fora desse limite de precisão estabelecido. Se um maior nível de confiança for exigido o valor de Student aumenta e a precisão da estimativa diminui.

O valor do erro padrão da variância da amostra é estimado por:

$$s.e(S^2) = S^2 \sqrt{\frac{2}{N_{AM}}} \quad (112)$$

O aumento na precisão é proporcional à raiz quadrada do número de amostras retiradas da mistura.

Segundo método: Menos de 50 amostras são retiradas.

Quando isso ocorre não é seguro assumir que a distribuição das estimativas da variância será normal e a curva é melhor descrita como uma distribuição chi-quadrado. Assim como no caso da estimativa da precisão baseada na normalidade, nesse caso a precisão aumenta para um menor nível de confiança e tomando um maior número de amostras.

Diferente das estimativas fundamentadas na normalidade, o limite de precisão não é simétrico. Essa precisão da estimativa diminui com a diminuição do número de amostras. Para a distribuição chi-quadrado:

$$\sigma_{LO}^2 = S^2 \frac{N_{AM} - 1}{\chi_{LO}^2} \quad (113)$$

$$\sigma_{UP}^2 = S^2 \frac{N_{AM} - 1}{\chi_{UP}^2} \quad (114)$$

Os valores inferior e superior de chi-quadrado para um dado limite de confiança podem ser obtidos das tabelas dessa distribuição.

Quando não se pode assumir que a distribuição das amostras é normal então a precisão da estimativa não é satisfatória.

#### 2.5.5 - Índices de mistura e segregação

Uma maneira de abordar o conceito de homogeneidade das misturas de partículas é utilizar um índice para medir o grau de uniformidade da mistura. Este deve ser prático, genérico, estar o mais próximo possível da especificação exigida da mistura final, e ser independente do processo de mistura.

Aproximadamente 50 diferentes índices de mistura foram catalogados na literatura, e essa quantidade de critérios dá uma idéia da complexidade do processo e das dificuldades em estimar a homogeneidade.

A maioria dos critérios estão fundamentados em análise estatística, sendo que outros incluem fotometria e abordagens cinéticas. Por causa da natureza aleatória do processo de mistura de sólidos, a análise estatística tem se tornado a abordagem mais freqüente e apresenta como ponto principal a medida do desvio padrão ou da variância de amostras pontuais retiradas do sistema estudado. Os critérios foram expressos na maioria das vezes em diferentes formas desses dois parâmetros estatísticos, de acordo com FAN et al. (1970).



Em POUX et al. (1991) os índices de mistura são divididos em quatro grupos:

- Índices para misturas binárias com base na análise estatística e nas definições de  $\sigma$ ,  $\sigma_0$  e  $\sigma_R$ .
- Índices para misturas binárias com base na análise estatística e não apenas nas definições de  $\sigma$ ,  $\sigma_0$  e  $\sigma_R$ .
- Índices para misturas multicomponentes com base na análise estatística.
- Índices com base no trabalho experimental específico.

Pode-se ainda obter um quinto grupo onde estão agrupados os índices de segregação.

Características das distribuições: dispersão

### Média

Segundo NEVILLE & KENNEDY (1964), a média é um parâmetro que, num primeiro momento, tenta apresentar uma característica da população quanto a um determinado atributo e geralmente não fornece informações confiáveis sobre uma distribuição de observações dentro de um grupo. Observe-se que um mesmo valor de duas médias pode estar se referindo a populações com distribuições diferentes. A dispersão em relação à média deve contribuir para aperfeiçoar as observações, e é importante na análise estatística.

$$x_{MD} = \frac{1}{N_{AM}} \sum x_i \quad (115)$$

### Variância

Para o caso de um conjunto de valores resultado de "n<sub>AM</sub>" observações  $x_i$ , de uma população finita com média  $\mu_{PP}$ , pode-se escrever para cada observação o desvio  $(x_i - \mu_{PP})$ , definindo-se a variância como:

$$\sigma^2 = \sum \frac{(x_i - \mu_{PP})^2}{N_{AM}} \quad (116)$$

A variância é uma medida fundamental da dispersão mas não é prática pois sua unidade é o quadrado da unidade da variável. Para um sistema completamente segregado a variância é definida como o produto das concentrações ou proporções dos componentes. Para um sistema binário essa variância inicial é:

$$\sigma_0^2 = C(1 - C) = p(1 - p) \quad (117)$$

A variância para um sistema perfeitamente aleatório, no qual a probabilidade de encontrar uma partícula de um constituinte da mistura é o mesmo para todos os pontos, é definida como:

$$\sigma_R^2 = \frac{p(1 - p)}{N_{PA}} \quad (118)$$

Essa definição não é prática uma vez que nem sempre é possível contar quantas partículas compõem a amostra, ou no mínimo é bastante trabalhosa, exigindo aparelhos ou medidas mais sofisticados. Existem na literatura vários índices que usam essa definição, como o de KRISTENSEN (1973).

#### Desvio padrão

O desvio padrão é definido como a raiz quadrada da variância e é expresso na mesma unidade da variável, o que o torna mais representativo. Portanto:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu_{PP})^2}{N_{AM}}} \quad (119)$$

A equação é aplicável quando o interesse é um conjunto de "n<sub>AM</sub>" observações determinadas, cuja média verdadeira é a média da população.

Na maioria dos casos, porém, os testes são feitos em relação à apenas um número limitado de amostras da população e não à toda população. Em alguns casos o número de elementos da população pode ser infinito e a média verdadeira desconhecida, sendo disponível apenas a média das observações ou amostras.

Calcula-se então os desvios em relação à média das amostras e não à média verdadeira, colocando-se  $(n_{AM} - 1)$  no denominador da equação do desvio padrão. Conforme apresentado em NEVILLE & KENNEDY (1964), esse procedimento é conhecido como correção de Bessel.

$$C_{BE} = \sqrt{\frac{N_{AM}}{N_{AM} - 1}} \quad (120)$$

Existe uma diferenciação entre a notação da amostra e da população, ou seja:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_{MD})^2}{N_{AM} - 1}} \quad (121)$$

$$\frac{S^2}{\sigma^2} = \frac{N_{AM}}{N_{AM} - 1} \quad (122)$$

Em todos os casos anteriores o seguinte limite pode ser escrito:

$$\sigma_R^2 > \sigma^2 > \sigma_0^2$$

Alguns pesquisadores preferem utilizar o valor do chi-quadrado para avaliar a qualidade da mistura, definindo-o como:

$$\chi^2 = \sum \frac{(x_i - x_{MD})}{x_{MD}} \quad (123)$$

Índices de misturas em FAN et al. (1970) e POUX et al. (1991) em função de propriedades estatísticas conhecidas ou mais fáceis de serem determinadas, são mostrados na tabela 2.6.



Tabela 2.6 – Alguns índices de mistura segundo FAN et al. (1970) e POUX et al. (1991).

Autor	Índice
Coulson & Maitra	$M = 1 - X = \frac{m}{n}$
Smith	$M = \frac{\sigma_0}{\sigma}$
Chudzikiewicz	$M = \frac{\sigma}{x_{MD}}$
Yano, Kanise & Tanaka	$M = \frac{\sigma}{\sigma_0}$
Adams & Baker	$M = \frac{\sum (x_i - x_{MD})}{n-1} = \sigma^2$
Sakaino	$M = \frac{p.q}{\sigma^2.W}$
Leggatt	$M = \frac{\sum (x_i - x_{MD})^2}{x_{MD}} = \chi^2$
Miles	$M = 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_0^2}$
Rose & Robinson	$M = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_0}$
Westmacott & Linehan	$M = \frac{\sigma^2}{\sigma_0^2}$
Izykowski	$M = \frac{ x_i - x_{MD} }{n.x_{MD}}$
Lastovtsev	$M = \left[ \frac{\sum (C_i - C_0)^2 n_i}{C_0^2 (n-1)} \right]^{0.5}$

## 2.5.6 - Índice para leito fluidizado

Especificamente para o leito fluidizado foi desenvolvido um índice com base nas propriedades do leito e das partículas conforme GELDART (1986).

Quando um sistema binário com diferenças de tamanho e/ou densidade é fluidizado, um dos componentes é suspenso em uma menor velocidade e o outro em maior velocidade. Se a diferença é apenas na densidade o mais pesado tende a descer e o mais leve tende a subir e se a diferença é somente no tamanho o maior desce e o menor sobe. É preciso tomar cuidado quando existem no sistema partículas de tamanhos e densidades diferentes, sendo as menores de maior densidade, pois nesse caso é difícil saber qual é a mais ou menos fluidizável.

A correlação a seguir foi obtida, por Nienow-Rowe-Cheung em 1978, para o índice de mistura binária de mesmo tamanho e densidade variável num leito tridimensional.

$$M = \frac{X^*}{X_{LF}} = (1 - e^{-Z})^{-1} \quad (124)$$

onde

$$Z = \frac{U_{FL} - U_{TO}}{U_{FL} - U_{PF}} e^{U_{FL}/U_{TO}} \quad (125)$$

$$\frac{U_{TO}}{U_{PF}} = \left( \frac{U_{PJ}}{U_{PF}} \right)^{1,2} + 0,9(\rho_{RE} - 1)^{1,1} d_{ER}^{0,7} - 2,2.C_M^{0,5}.H^{*1,4} \quad (126)$$

$$H^* = 1 - e^{-\left(\frac{H}{d}\right)_{LF}} \quad (127)$$

Fundamentado nos dados de equilíbrio entre mistura e segregação, obtidos em sistemas binários de diferentes tamanhos e iguais densidades em leitos bidimensionais e tridimensionais, a seguinte correlação foi proposta por RICE & BRAINOVICH (1986):

$$M = \frac{X^*}{X_{LF}} = (1 - e^{-Z^*})^{-1} \quad (128)$$

onde

$$Z^* = \pm \left( \frac{U_{FL} - U_{TO}}{U_{FL} - U_{PF}} \right)^{1/2} e^{U_{FL}/U_{TO}} (f_s)^{1/2} \quad (129)$$

$$f_s = \frac{3}{R_d} \rightarrow U_{FL} > U_{TO} \quad (130)$$

$$f_s = \frac{R_d}{3} \rightarrow U_{FL} < U_{TO} \quad (131)$$

$$R_d = \frac{d_{PJ}}{d_{PF}} \quad (132)$$

O sinal  $\pm$  refere-se a  $U_{FL} > U_{TO}$  e  $U_{FL} < U_{TO}$  respectivamente. A validade dessas correlações depende de uma boa estimativa para o valor de  $U_{TO}$ , velocidade na qual  $M=0,5$ , indicando mistura ainda não homogênea. Em FAN et al. (1990) foram apresentadas correlações para leitos fluidizados:

Tridimensionais

$$U_{TO} = (U_{PF} \cdot U_{PJ})^{0,5} (2.R_d)^{-0,2} \quad (133)$$

bidimensionais

$$U_{TO} = (U_{PF} \cdot U_{PJ})^{0,62} \quad (134)$$

PEELER & HUANG (1989) estudaram os fenômenos de mistura e segregação em um leito fluidizado circular de 0,21m de diâmetro e dois leitos quadrados, um de 0,61m e outro de 1,22m, usando sistemas binários de areia com faixa de tamanhos de 160 $\mu$ m à 2850 $\mu$ m. Propuseram outras duas correlações para  $U_{TO}$ . Para o leito circular obtiveram:

$$U_{TO} = 0,54(U_{PF} \cdot U_{PJ})^{0,5} (d_R)^{0,5} \quad (135)$$

Nessa forma o termo do produto das velocidades de fluidização incipiente para os dois componentes é a média geométrica das duas velocidades.



A outra equação, segundo os autores, pode ser usada tanto para o leito circular quanto para os leitos quadrados, em pequena escala e grande escala. Essa equação é:

$$U_{TO} = 0,27(U_{PF} \cdot U_{PJ})^{0,5} (d_R)^{0,5} (d_{BL})^{-0,21} \quad (136)$$

Outra equação para a previsão de  $U_{TO}$  foi proposta por GARCIA-OCHOA et al. (1993) estudando partículas do grupo D da classificação de Geldart com diferentes densidades, composições e tamanhos.

$$\frac{U_{TO}}{U_{PF}} = \left( \frac{U_{PJ}}{U_{PF}} \right)^{1,43} + 0,98(\rho_{RE} - 1)^{0,21} - 0,99.C_M^{1,02} \quad (137)$$

Os fatores  $H^*$ , altura reduzida do leito, e  $d_{ER}$ , razão de diâmetros entre partículas mais pesadas e mais leves, da equação original de Nienow-Rowe-Cheung foram suprimidos porque, segundo os autores, o primeiro difere menos de 1% da unidade, enquanto o segundo não foi levado em conta por causa da similaridade no tamanho das partículas apesar de não serem exatamente iguais.

Dada a complexidade do processo de mistura e seu caráter específico o número de índices é bastante grande. Nesse trabalho não é proposto nenhum novo índice mas sim uma apresentação de alguns dentre os vários existentes. Vários desses índices não são de fácil aplicação uma vez que utilizam, por exemplo, propriedades físicas de uma única partícula. Essas propriedades podem ser o peso ou a massa específica. Também, em alguns índices é necessário fornecer o número de partículas em cada amostra.

## 2.6 - Técnicas experimentais e de amostragem

Para que as amostras de um determinado sistema particulado sejam analisadas e forneçam informações relevantes é necessário desenvolver métodos tanto para o experimento quanto para a retirada de amostras.

Em HAILU & DAVIDSON (1993) foi observado que inúmeras técnicas tem sido empregadas nos estudos de mistura e segregação de partículas e cada uma delas tem suas vantagens e desvantagens. A classificação dos autores foi feita da seguinte forma:

- Materiais traçadores como os radiativos, magnéticos ou coloridos. De acordo com essa literatura não é recomendado em experimentos no estado de equilíbrio.
- Interrupção brusca da fluidização e análise das camadas. Bastante utilizada, sendo imprópria para medidas contínuas, é trabalhosa e adequada somente para pequena escala.
- Sonda com fibra óptica, exige instrumentação cara e a natureza aleatória das partículas faz com que a interpretação dos sinais enviados seja difícil.
- Outras técnicas que incluem partículas aquecidas como traçadores, permitindo medidas instantâneas.

### 2.6.1 – Classificação das técnicas

De acordo com FAN et al. (1970) a escolha da técnica de amostragem está ligada às características do equipamento e do sistema de partículas analisado. Assim, os métodos mais usuais podem ser subdivididos em dois grandes grupos:

- Análise externa, quando é necessário retirar amostras ou toda a população.
- Análise interna, quando através de algum método é possível o estudo sem a retirada de material.



Dos métodos classificados no primeiro grupo os mais comuns são:

(a) Sonda de amostragem ou sonda ladrão

Entre as maneiras de retirar amostras é o mais usado, mais simples e menos caro. Fabricadas a partir de uma barra ou tubo com compartimentos espaçados na lateral, interno a um outro tubo com orifícios nas mesmas posições dos compartimentos da parte interna de modo que ao deslizar ou girar um em relação ao outro, permite ou não que amostras sejam retiradas. Esse tipo de sonda deve ser projetada para causar o mínimo de perturbação do sistema. Um modelo é apresentado na figura 2.43.

Uma vantagem desse tipo de amostragem é poder ser pontual, favorecendo o estudo da distribuição de concentrações. A operação dessa sonda é também muito simples, e todas funcionam basicamente da mesma forma, isto é, o conjunto é inserido fechado, vertical ou horizontalmente, na mistura para que colete partículas apenas nas posições desejadas. No interior do sistema é aberta de modo que um pequeno volume seja introduzido pela ação do peso próprio, em seguida é novamente fechada e retirada. Repete-se a operação quantas vezes for especificado.

Existem variações desse aparelho, tais como a utilização em conjunto com a técnica de vácuo auxiliando a entrada das partículas e com compartimento na ponta em vez da lateral.

Segundo SCHOFIELD (1976), o uso da sonda é mais comum em sistemas de partículas de escoamento livre, embora haja adaptações que permitem seu uso com materiais coesivos. Existem dúvidas quanto ao seu uso em sistemas com facilidade de segregação, pois isso pode ocorrer durante o preenchimento dos compartimentos induzindo a erros na análise da composição.

A maior desvantagem da sonda é em relação à perturbação que pode causar quando introduzida na mistura. Mostrou-se que essa perturbação é pouco dependente do tipo de ponta, sendo causada principalmente pelo atrito da superfície lateral. A partir disso, para minimizar esse tipo de erro, foi



desenvolvida uma sonda que coleta material apenas na ponta. Embora ela também perturbe o leito de partículas, a amostra é retirada de uma região não afetada.

Mesmo com esses problemas esse tipo de sonda é bastante utilizada. Além do quê, qualquer outro método invasivo do sistema também causa algum tipo de distúrbio.

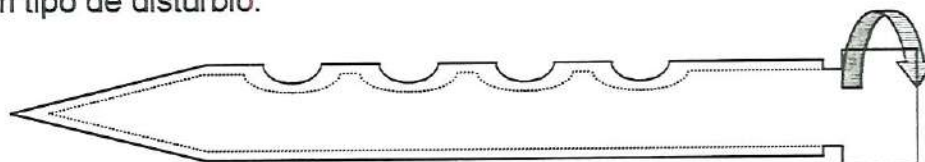


Figura 2.43 – Simplificação da sonda de amostragem tipo “ladrão”.

#### (b) Subdivisão do sistema de partículas

É usual também a divisão do sistema em regiões ou camadas para posterior análise. Dependendo das etapas seguidas, é mais preciso que as sondas anteriores mas é mais trabalhoso uma vez que o volume a ser observado pode ser maior. De qualquer modo, é necessário retirar essas camadas de dentro do equipamento e isso facilita desarranjos nas mesmas.

Dependendo também do tamanho das camadas recai-se no erro da representatividade. Outro erro possível refere-se ao método usado na divisão do sistema pois é preciso usar algum aparato físico.

#### (c) Imobilização ou “congelamento” do sistema

Nesse método, após a mistura ser produzida, recorre-se a algum tipo de líquido que ao ser introduzido na mesma se solidifica imobilizando as partículas. Depois disso a mistura toda é retirada podendo ser trabalhada da forma mais conveniente. Algumas vantagens desse método são a de ter acesso às distâncias entre os componentes, permitir contagem, corte do sistema em diferentes direções, e verificação fotográfica e microscópica.

Uma desvantagem pode ser o deslocamento de partículas menores causado pelo próprio líquido de preenchimento alterando o estado de

equilíbrio. Outra possível desvantagem é o preenchimento incompleto de toda a mistura, tornando o trabalho nulo.

Os líquidos mais usados são ceras, polímeros, resinas ou outro líquido qualquer que possua boa fluidez, solidifique e permita visualização. Pode-se usar o aquecimento do líquido dependendo de sua natureza e da natureza das partículas.

#### (d) Amostragem por escoamento

As amostras são colhidas em intervalos de tempo previamente estabelecidos através do escoamento de partículas do interior do equipamento em funcionamento ou não. Isso é possível instalando-se aberturas em posições definidas do equipamento por onde a coleta é feita.

#### (e) Amostragem por correia transportadora ou de caneca

Aqui as canecas são mergulhadas no material através de uma correia móvel, ou ainda o material cai numa correia para ser analisado. Dependendo do uso pode causar maior ou menor erro na amostragem. No primeiro caso a correia é introduzida no sistema causando alterações, e no segundo caso a correia é usada simplesmente para o transporte de um escoamento como no método anterior.

#### (f) Amostragem por caneca manual

São recipientes que passados por um escoamento ou leito de partículas fazem a coleta do material. Esse tipo é mais utilizado para amostragem de cereais.

#### (g) Amostragem por vácuo

Aqui o abaixamento da pressão é o responsável pelo escoamento das partículas para dentro de um recipiente, podendo ser usado em conjunto com outras técnicas. Uma desvantagem é que não apenas partículas ao redor do ponto de menor pressão são coletadas mas também partículas mais distantes dependendo do tamanho e densidade.

No segundo grupo dos métodos de análise de mistura estão técnicas como partículas radiativas, coloridas, sondas ópticas, sensores de gases, análises de imagens entre outras. Um resumo de algumas é apresentado a seguir:

#### (a) Partículas radiativas

Partículas ativadas quimicamente ou naturalmente radiativas fazem parte do sistema, permitindo que por algum meio externo o caminho percorrido ou localização instantânea da partícula sejam observados. Pode ser feita a análise também pela retirada de amostras.

Para a análise contínua são usados detetores de cintilação, que é a propriedade de irradiação desse tipo de partícula. A desvantagem do método é a própria manipulação de material radiativo, as normas de segurança a serem seguidas, o custo dos equipamentos e a preparação das partículas.

#### (b) Técnica colorimétrica

O sistema é formado por partículas coloridas e ao ser processado altera o padrão de distribuição de cores podendo representar um critério ou a determinação quantitativa do grau de mistura. Fotografias podem ser tiradas e analisadas em espectrofotômetros, o movimento pode ser gravado e a distribuição de velocidades obtida. A principal desvantagem é fornecer informações apenas nas paredes do equipamento. Os equipamentos necessários também são relativamente caros.

#### (c) Sonda óptica



É um dispositivo invasivo para medir a composição da mistura em função da luz refletida da superfície das partículas. Isso permite obter informações sobre a distribuição de composições de misturas de partículas com superfícies que refletem diferentemente. A luz emitida pela sonda é parcialmente refletida pela mistura e essa intensidade é medida por uma fotocélula. A figura 2.44 mostra um esquema dessa sonda.

As sondas ópticas medem a luz refletida apenas de partículas mais próximas às suas janelas de vidro ou quartzo, sendo adequadas para verificações pontuais.

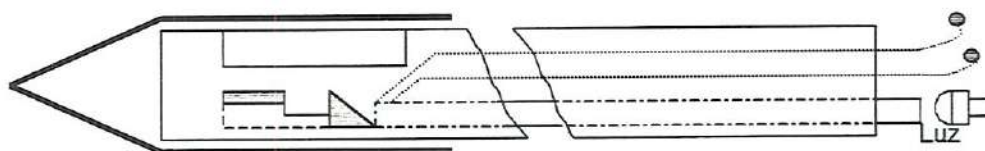


Figura 2.44 – Modelo simplificado de sonda óptica.

As vantagens da sonda óptica são o seu tamanho reduzido, a possibilidade de trabalhar com várias faixas do espectro e sem interrupção do processo. Também é possível seu uso associado com outros métodos tais como sensor de imagem permitindo uma visão da evolução da distribuição de composições e velocidades em pontos determinados do sistema.

Outras técnicas com seus respectivos usuários e/ou autores são apresentadas em GELDART (1986).

Em TALMOR & BENENATI (1963) foi usada a técnica das partículas traçadoras para realizar experimentos visando a mistura de sólidos e a circulação de gás no leito fluidizado.

RICE & BRAINOVICH (1986) estudando os fenômenos de mistura e segregação em leitos fluidizados bidimensionais e tridimensionais optaram pela técnica da interrupção brusca da fluidização desviando o escoamento de ar para fora do leito. Usaram o vácuo para retirar as amostras, peneiramento para a separação e análise, retornando as partículas ao leito e novamente fluidizado.

BEECKMANS & STAHL (1987) utilizaram o procedimento a seguir para estudar a cinética da mistura e segregação em leito fluidizado.

A vazão de ar filtrado foi medido por um orifício previamente calibrado e em seguida poderia ser desviado através de um conjunto de válvulas de alívio e solenóide para o ambiente. A válvula de alívio foi ajustada de modo que a queda de pressão através dela fosse a mesma que através do leito, o que permitiu o leito ser fluidizado ou desfluidizado com o mínimo de perturbação. A instalação está simplificada na figura 2.45.

Utilizaram esferas de vidro e de ferro que após a retirada das amostras as de ferro foram separadas magneticamente e ambas pesadas e retornaram ao leito para dar prosseguimento à operação. Antes de voltarem ao leito desmagnetizou-se as partículas de ferro submetendo-as a um campo magnético alternado de 60 Hz, cuja intensidade foi lentamente reduzida a zero.

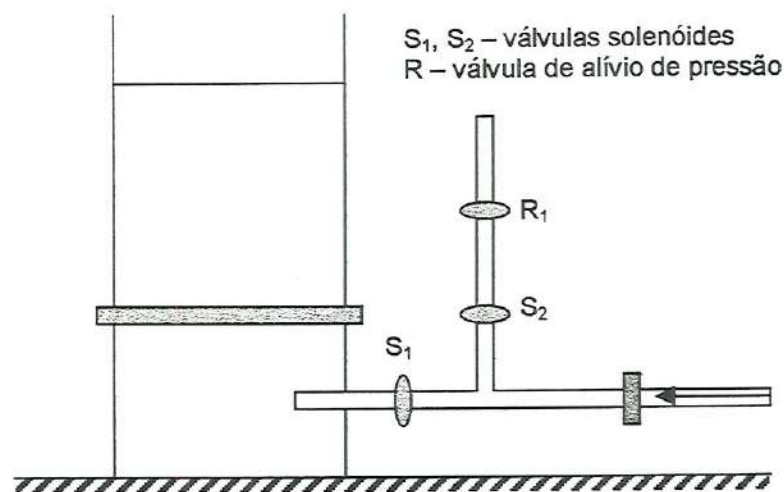


Figura 2.45 – Esquema do equipamento usado por Beeckmans & Stahl.

Em cada experimento de BILBAO et al. (1988), uma vez alcançado o equilíbrio, o fornecimento de ar foi cortado de repente e lâminas de 10mm de espessura retiradas e analisadas.

Técnica semelhante foi utilizada por PEELER & HUANG (1989) para interromper a fluidização e as amostras retiradas do topo do leito por vácuo. Outros pesquisadores como HOFFMANN & ROMP (1991), HOFFMANN et al. (1993) e DELEBARRE et al. (1994) usaram técnica semelhante.

GARCIA-OCHOA (1989) E GARCIA-OCHOA et al. (1993) usaram a técnica de divisão do leito em lâminas sem o corte de suprimento do agente fluidizante. Como mostram as figuras 2.46 e 2.47. Mediram-se os perfis de concentração e porosidade de um sistema com grandes partículas, aproximadamente 4mm de diâmetro e densidades diferentes.

Para . essa divisão foi construído externamente um dispositivo com 12 chapas perfuradas com perfil semicircular, equidistantes, que possibilitaram o aprisionamento das camadas e ao mesmo tempo o escoamento do gás. Ao longo do tubo do leito fluidizado foram feitas 12 fendas horizontais onde as chapas perfuradas se encaixaram, vedadas com um adesivo frágil, exigindo pouco esforço para rompê-lo e deixar a chapa entrar no leito.

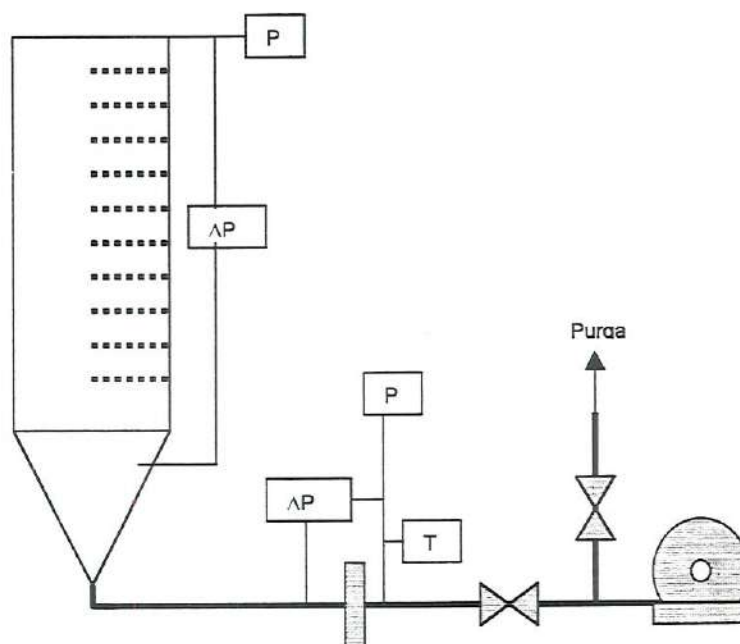


Figura 2.46 – Representação do equipamento experimental.

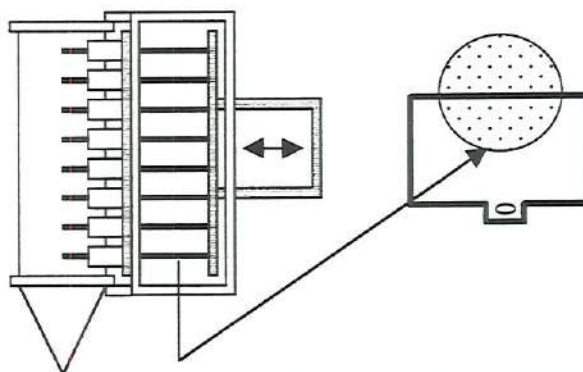


Figura 2.47 – Dispositivo para divisão do leito fluidizado em lâminas.



CHOI et al. (1988) pesquisaram o tamanho e a trajetória das bolhas num leito fluidizado gasoso. Para medir as propriedades das bolhas utilizaram uma sonda de eletroresistividade feita com termopares tipo K com uma distância entre pontas de 9,5 mm. As propriedades das bolhas foram medidas em quatro diferentes alturas e seis diferentes raios do leito circular.

Os sinais de saída das sondas foram armazenados em computador via osciloscópio e conversor, fornecendo informações sobre o comprimento e a frequência. A figura 2.48 mostra o experimento.

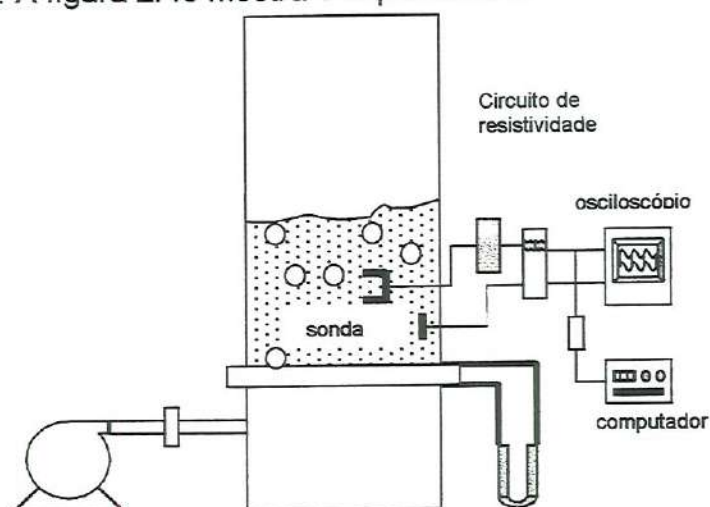


Figura 2.48 – Conjunto do equipamento experimental.

Para verificar as distribuições radial e vertical do gás nos interstícios de um leito fluidizado KHATTAB et al. (1988) usaram como traçador o gás ozônio. Duas sondas ópticas feitas de fibra de quartzo internas a tubos de aço inoxidável de 1,3mm de diâmetro interno, com espaçamento de 10mm entre elas, foram introduzidas no leito.

Feixes de luz ultra violeta, que são absorvidos pelo ozônio, foram transmitidos por uma fibra e recebidos por outra. O comprimento da célula de absorção, isto é, a abertura das superfícies de transmissão e recepção da luz, foi feita com 7mm de modo que mesmo baixas concentrações de ozônio poderiam ser detectadas. A célula foi recoberta por uma tela para prevenir entrada de partículas na mesma.

O ozônio introduzido é levado pelo gás intersticial ascendente e entra na célula de absorção inferior diminuindo instantaneamente a intensidade da

luz recebida pela sonda. Após um determinado tempo que depende da velocidade do gás intersticial, o ozônio entra na célula superior reduzindo também a intensidade de luz. A instalação está na figura 2.49.

Da diferença de tempo e da distância vertical entre sondas, a velocidade do ozônio, que é a mesma do gás intersticial, foi obtida.

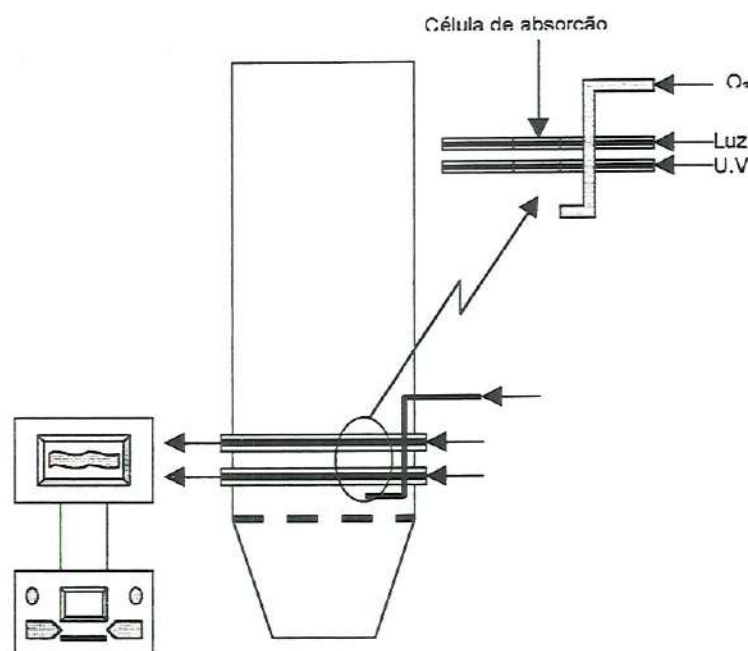


Figura 2.49 – Alguns detalhes simplificados do conjunto experimental.

CHESONIS et al. (1990) trabalharam com um leito fluidizado circulante cuja gás movimentava-se com quantidades de sólidos à velocidades muito maiores que sua velocidade de sedimentação. Esse tipo de leito é completamente diferente do leito fluidizado borbulhante comum pela ausência de bolhas. Em geral pode ser dividido em duas regiões principais, uma mais densa na parte inferior e outra menos densa superior.

Com o objetivo de estudar a hidrodinâmica do leito e a mistura de sólidos usaram uma sonda de amostragem a vácuo, mostrada na figura 2.50, em cinco pontos ao longo da altura do leito.

A sonda era formada por dois tubos concêntricos que podiam ser purgados com ar controlado por válvulas e rotômetros. A ponta da sonda foi disposta de modo a fornecer direcionamento à retirada e o tubo externo purgado para evitar acúmulo de sólidos na entrada. A amostra foi tirada pelo

tubo de menor diâmetro e passada por um pequeno ciclone para a captura dos sólidos.

Cada ensaio foi iniciado introduzindo ar no interior da sonda, limpando-a, ajustando o ar de fluidização para a condição de desejada e então enchendo a coluna com sólidos. Nas condições de ensaio o leito foi fluidizado por uma hora para atingir o equilíbrio de material deixando e retornando ao leito.

Após a sonda ser colocada na posição radial e orientação desejadas, as partículas traçadoras foram injetadas no leito através de uma câmara de pressão maior que a do leito. A limpeza do tubo interno foi interrompida e a válvula de amostragem aberta. Depois do tempo estabelecido para a coleta a válvula foi fechada e a limpeza restaurada. As amostras foram analisadas quanto ao peso, tamanho e concentração.

A sonda foi então removida para outra posição depois de interrompida a fluidização e o leito ficasse estático, reiniciando o procedimento.

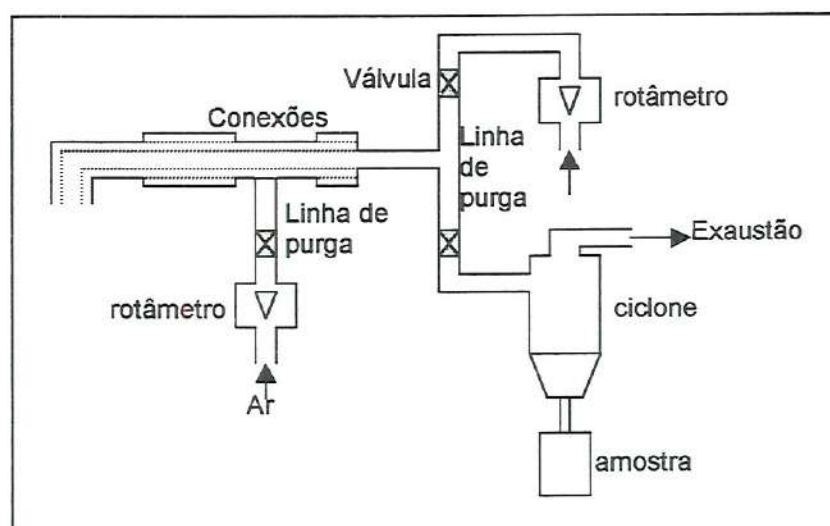


Figura 2.50 – Representação da sonda à vácuo.

LEE & KIM (1990) adotaram o transporte axial de calor no estado de equilíbrio para determinar a mistura de sólidos no leito fluidizado afirmando ser essa técnica mais vantajosa que as partículas traçadoras uma vez que a segregação devida à diferenças no tamanho, formato ou densidade não



existe. Nesse método a razão entre os calores específicos dos sólidos e do gás é tão alta que o calor sensível transportado no leito foi principalmente resultado da mistura de partículas aquecidas.

Providenciou-se duas seções do leito, uma aquecida, situada logo acima do distribuidor e outra refrigerada, localizada na parte superior do leito e com isolamento térmico, indicadas na figura 2.51.

Depois da distribuição de temperaturas do leito alcançar o equilíbrio mediram as temperaturas através de termopares colocados ao longo da altura e dotados de movimento radial.

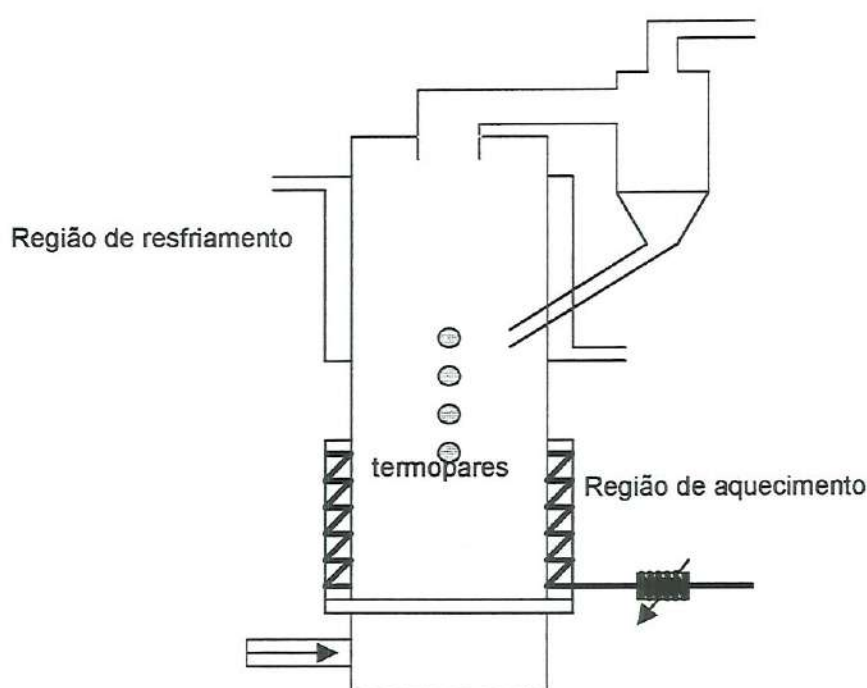


Figura 2.51 – Diagrama esquemático do aparato experimental.

KAGE et al. (1991) utilizaram fibra óptica para medir o diâmetro e a velocidade das bolhas no leito fluidizado.

No dispositivo de medição foram usados dois pares de sondas ópticas, um dos quais era composto de um emissor de luz e um receptor, separadas de 40mm ao longo do eixo central do leito. A distância entre as pontas do emissor e do receptor foi de 10mm. Um detetor recebia os sinais de luz do receptor, gravando em disquetes e transferidos a um computador principal através de um conversor. Os sinais convertidos foram digitalizados

e analisados para determinar o tempo que a bolha levava para passar da sonda inferior para a superior. Esse arranjo está na figura 2.52.

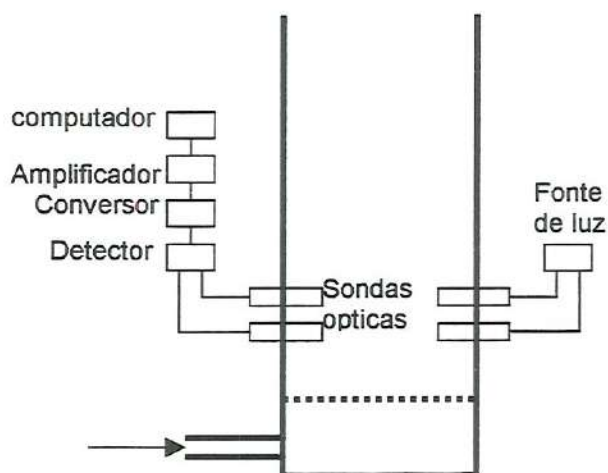


Figura 2.52 – Equipamento experimental.

LIM et al. (1993) modelaram e experimentaram a mistura de sólidos em leitos fluidizados bidimensionais homogêneos e borbulhantes usando a análise digital de imagens como na figura 2.53. Os experimentos foram executados em um leito de dimensões  $(1 \times 0,2 \times 0,009)$  m com um distribuidor tipo placa porosa e ar como agente de fluidização.

Colocaram uma camada de partículas traçadoras num determinado plano horizontal do leito, experimentando para várias velocidades de fluidização e vários tamanhos de partículas. Com a operação do leito foram gravadas as imagens e analisadas posteriormente.

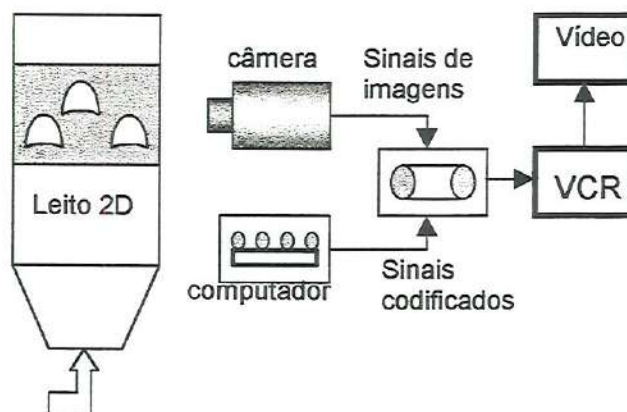


Figura 2.53 – Diagrama esquemático do sistema experimental.

HAILU & DAVIDSON (1993) propuseram uma série de tubos em diferentes níveis do leito para medir a concentração de partículas mais finas nas várias camadas.

A sonda foi feita de tubo com 4mm de diâmetro interno e comprimento 220mm e um coletor de amostras de volume 15 cm<sup>3</sup> colocado na extremidade externa onde existe um pequeno vazamento de ar para a atmosfera. Cinco dessas sondas foram distribuídas ao longo da coluna do leito num espaçamento de 100mm e a inferior a 40mm do distribuidor.

As sondas movimentavam-se horizontalmente para permitir a retirada em várias posições radiais. Próximo a cada saída da sonda tinha uma linha de extração para a limpeza de sólidos antes de se retirar a amostra, assegurando que o material saiu do leito e não aquele retido na sonda anteriormente.

Essa linha extratora foi controlada por uma válvula solenóide de três vias operada por um interruptor eletrônico. Quando o interruptor estava ligado o ar era admitido na sonda e quando estava desligado o ar era desviado para a atmosfera.

A retirada da amostra foi realizada extraíndo o ar simultaneamente de todas as sondas e uma vez limpas dos sólidos remanescente, a extração era interrompida fazendo escoar os sólidos dos pontos determinados para os coletores nos vários níveis. A amostragem terminou quando os coletores ficaram cheios.

As vantagens desse método de acordo com os produtores são:

- amostragem instantânea com leito operando
- método simples e aplicável à experimentos no equilíbrio
- coleta amostras em vários pontos ao mesmo tempo

As técnicas de amostragem e de experimentação também são bastante variadas em função das propriedades a serem determinadas e dos custos dos equipamentos.



### 3 – MATERIAL E MÉTODOS

Através de uma revisão na literatura encontra-se uma variedade de tipos de leitos fluidizados usados em estudos de pequena e grande escala. Existem os chamados leitos bidimensionais, cuja seção transversal retangular possui uma das dimensões bastante reduzida, chegando a alguns milímetros, permitindo principalmente a visualização de sua hidrodinâmica, uma vez que a espessura é pequena.

Uma desvantagem desse tipo de leito é a proximidade das paredes o que acaba interferindo intensamente no processo, alterando, por exemplo, o comportamento das bolhas geradas no distribuidor e aumentando o atrito. Apesar disso, é de utilidade para estudos de formação, velocidade, agrupamento e crescimento das bolhas, por exemplo, através de procedimentos experimentais que usam imagens.

De outro lado está o leito fluidizado tridimensional cujas dimensões são mais proporcionais, reproduzindo mais de perto a realidade. Sua principal desvantagem é a de não permitir observações internas usando técnicas não-intrusivas e sim apenas próximas às paredes quando estas têm transparência suficiente. Mesmo com o leito tridimensional a ampliação de escala deve ser cercada de cuidados.

Encontra-se na bibliografia alguns leitos tridimensionais com dimensões tão reduzidas que talvez não pudessem ser classificados nessa categoria.

Para esse trabalho foram escolhidos dois tipos de leito. Um fabricado com material transparente, acrílico, com a finalidade de visualizações preliminares do seu comportamento durante a fluidização, principalmente quanto à sua uniformidade e formação de bolhas, as principais responsáveis

pela movimentação do leito, promovendo a mistura de partículas. O outro leito foi fabricado com material metálico, aço inoxidável polido, para que não houvesse oxidação e em consequência material da parede fosse transferido ao sistema de partículas interferindo na análise das amostras. Com o polimento diminuiu-se o atrito entre as partículas e as paredes.

Para movimentar o sistema particulado foi utilizado um compressor cujas características serão detalhadas adiante. Uma tubulação de PVC equipada com um medidor de vazão tipo orifício levou o ar do compressor ao leito.

A seguir serão abordadas em detalhes as características e as propriedades do equipamento e das partículas.

### 3.1 – Bancada de fluidização

Como já mencionado a bancada foi montada com dois tipos de tubos, o transparente com diâmetro interno de 144 mm e altura de 900 mm, e o metálico com diâmetro interno de 196 mm, e também com 900 mm de altura. As extremidades dos tubos apresentam flanges para o seu acoplamento na base à câmara de entrada de ar e ao distribuidor. A figura 3.1 mostra o esquema de montagem do equipamento.

Para a tomada de pressão no fundo do leito, logo acima do distribuidor, foram adotados dois procedimentos devido à dificuldades de usinagem.

No tubo transparente, a tomada de pressão foi feita com o auxílio de um tubo com diâmetro externo de 13 mm e comprimento 1000 mm, inserido verticalmente pelo topo do leito, com extremidade inferior apresentando quatro orifícios de 2 mm de diâmetro cobertos com uma tela evitando a entrada de partículas, o que poderia interferir na leitura da pressão.

Na extremidade superior foi providenciada uma tomada para acoplamento da mangueira que leva a pressão ao quadro de manômetros, onde foi feita a leitura dos dados. A figura 3.2 mostra esse tubo com maiores detalhes.

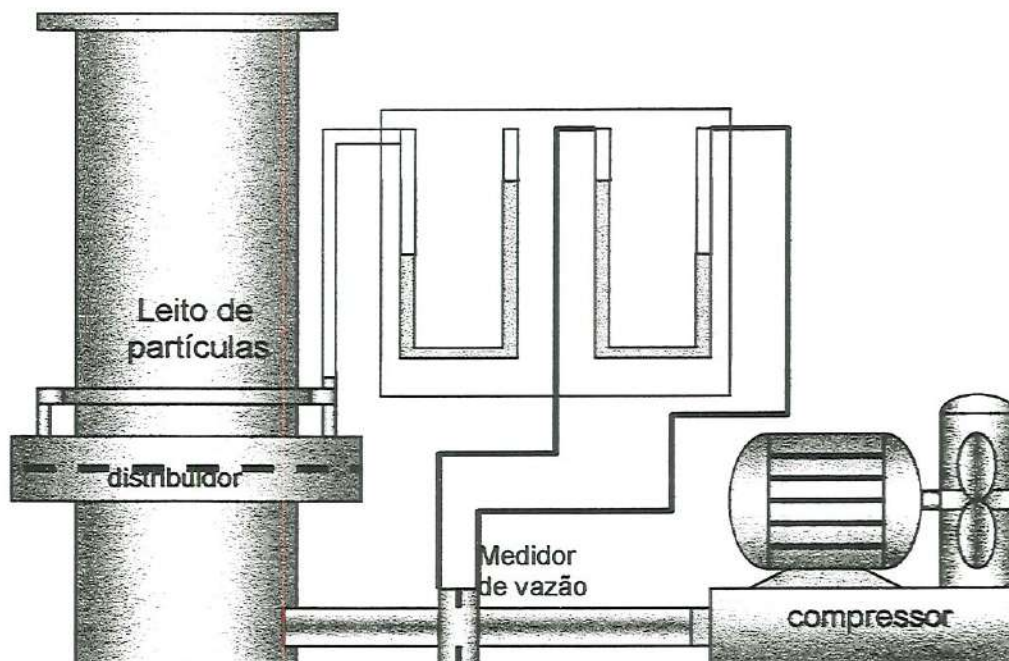


Figura 3.1 – Representação da instalação do equipamento.

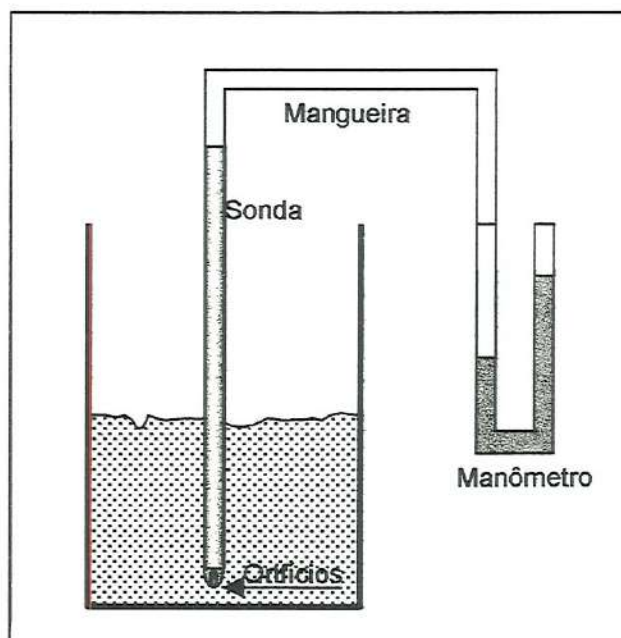


Figura 3.2 – Esquema de uma das sondas de tomada de pressão.



No tubo de aço inoxidável a tomada de pressão foi usinada no próprio flange de acoplamento do tubo com a base. Três orifícios de diâmetro 3 mm dispostos a  $120^\circ$  foram usinados na parte interna do flange, a 1 mm do distribuidor. Os orifícios foram também cobertos com uma tela para evitar a entrada de partículas, provocando entupimentos. As tomadas de pressão foram interligadas no exterior do flange, onde foram instalados bicos e uniões com mangueiras, formando um anel piezométrico. Esse anel melhora a confiabilidade das leituras de pressão uma vez que é tomada em três pontos distintos como uma média. A partir desse anel uma outra mangueira conecta ao quadro de manômetros. Detalhes dessa configuração podem ser vistos na figura 3.3.

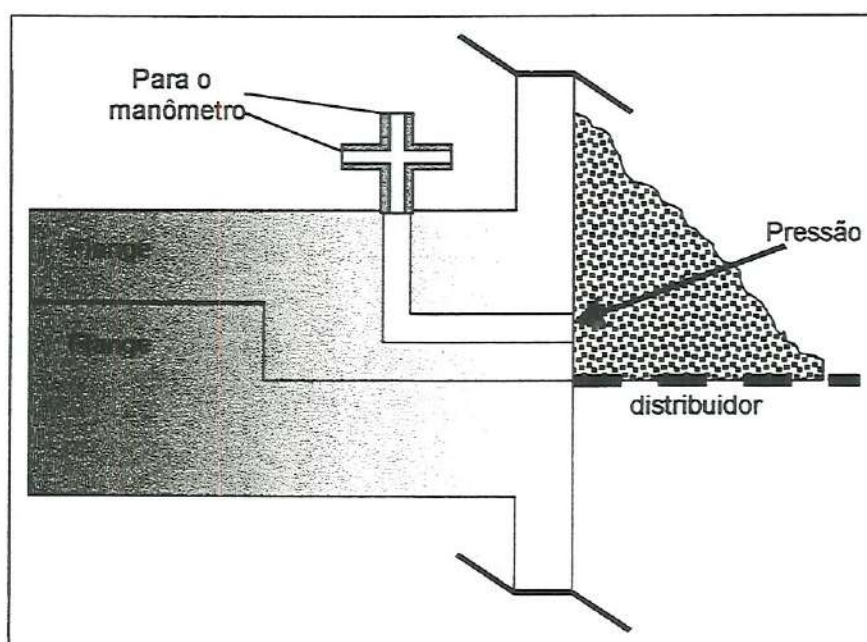


Figura 3.3 – Detalhes construtivos do anel de tomadas de pressão.

A base que suporta dos tubos também foi fabricada em aço inoxidável com o mesmo tipo de flange. Na parte inferior da base foi colocada uma abertura com fechamento tipo *tri-clamp* para a limpeza eventual.

Lateralmente, um tubo de diâmetro externo 50 mm permitiu a entrada do ar vindo do compressor. A figura 3.4 mostra essa parte do equipamento.

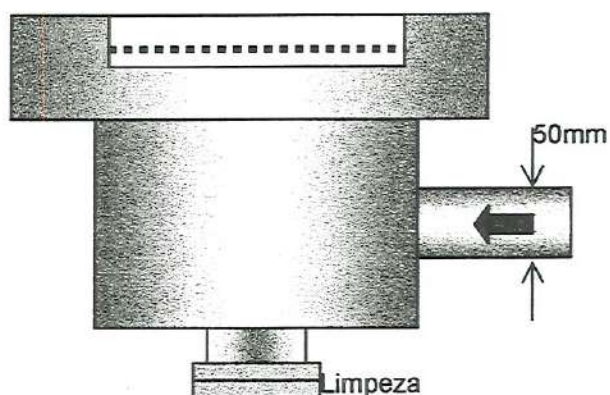


Figura 3.4 – Detalhes da base do leito fluidizado.

A tubulação que leva o ar do compressor até o leito foi feita de PVC pela facilidade de obtenção e de usinagem, com 50 mm de diâmetro externo e espessura de parede de 6 mm, suficiente para suportar a pressão máxima de operação.

O comprimento da tubulação foi obtido de acordo com os critérios exigidos pelo medidor de vazão e serão apresentados adiante. Nessa tubulação foram instaladas três válvulas de esfera, sendo duas de 50 mm e uma de 25 mm. Uma das válvulas de 50 mm foi instalada na entrada para controle parcial da vazão de ar e a outra de 50 mm foi instalada na saída para controle da parada do leito nos intervalos de tempos estipulados para as retiradas de amostras.

A válvula de 25 mm foi usada também para controle de vazão, desviando o ar para fora do equipamento, além de retirar calor ganho no compressor. Nessa tubulação foi instalado um medidor de vazão obedecendo os critérios citados em DELMÉE (1982). A figura 3.5 mostra um esboço da tubulação.

O compressor usado foi do tipo centrífugo, marca *Ibram*, com uma vazão máxima de 0,10 m<sup>3</sup>/s e uma  $\Delta P$  máxima de 39 kPa. Algumas características desse equipamento estão listadas a seguir.

- diâmetro do rotor .....482 mm
- potência do motor.....7,5 cv
- rotação do motor.....3600 rpm

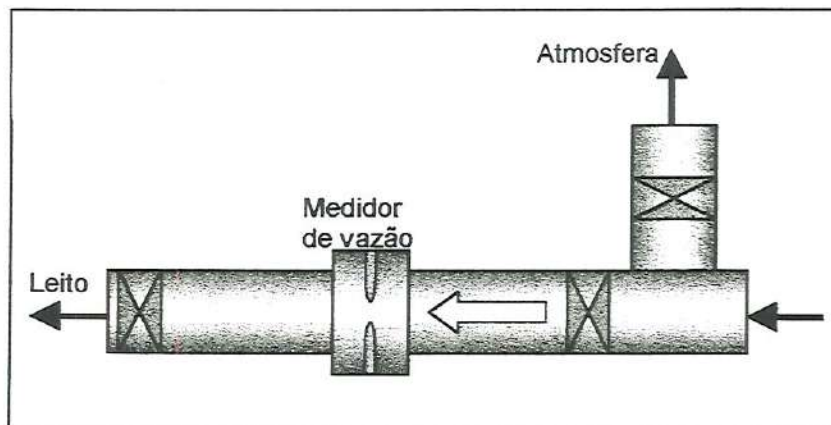


Figura 3.5 – Esquema da tubulação entre o compressor e o fluidizador.

A curva característica do compressor bem como um desenho esquemático do mesmo estão nas figuras 3.6 e 3.7.

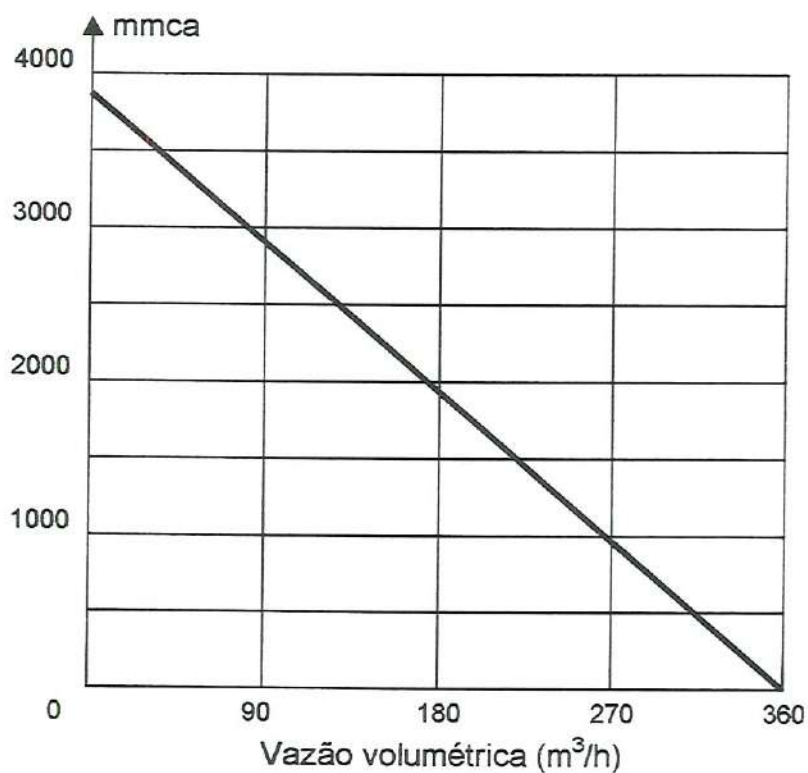


Figura 3.6 – Curva característica do compressor.



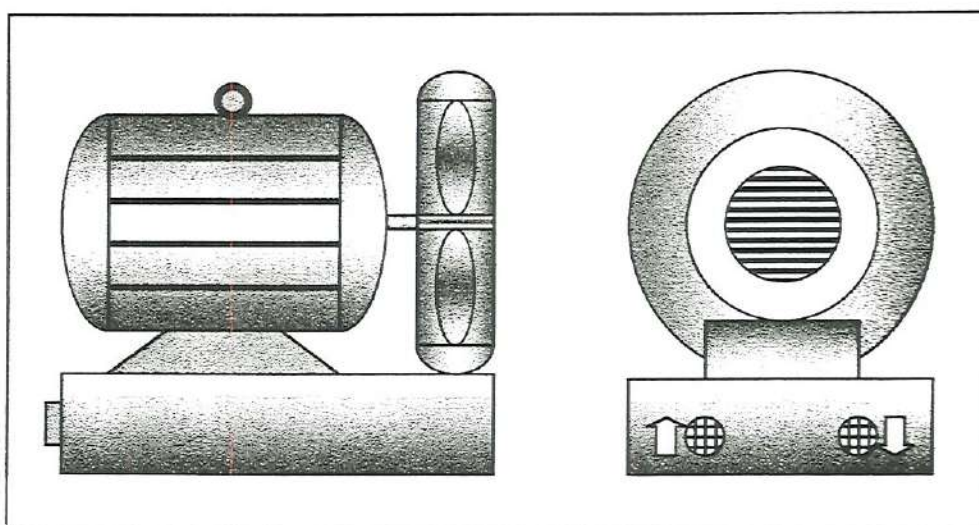


Figura 3.7 – Desenho esquemático do compressor.

A placa distribuidora do escoamento de ar de fluidização foi feita de fórmica com espessura de 1mm e diâmetro total de 350 mm. Esse material foi escolhido pela facilidade de usinagem e pela resistência mecânica suficiente para as dimensões do equipamento.

Foram feitos na placa 148 furos de 1,1 mm num passo triangular de 15 mm provocando uma queda de pressão suficiente para o processo. Esse distribuidor garantiu uma uniformidade adequada do escoamento na câmara e no leito observada através do tubo transparente. Orifícios grandes demais ou em número excessivo não permitem uniformidade na distribuição do ar e como consequência a fluidização é irregular. Isso ocorre por causa da passagem do agente de fluidização apenas em determinadas regiões. A porcentagem de área útil aberta na placa distribuidora foi de 0,47 %.

Para suportar a placa distribuidora foi providenciada uma tela metálica com malha quadrada de 12 mm feita com arame de aço inoxidável de 2 mm de diâmetro, o que garantiu que suportasse uma massa de 8 kg de material no leito. A figura 3.8 mostra o suporte e a placa distribuidora.

As vedações entre os flanges, entre o suporte e o flange da base, entre a placa e o flange do tubo do fluidizador, foram feitas com anéis de borracha. A figura 3.9 mostra um esquema da montagem completa.

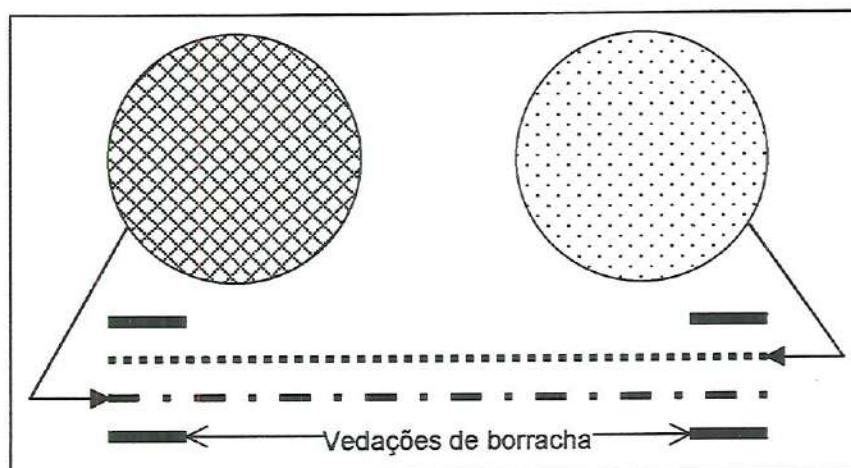


Figura 3.8 – Suporte e placa distribuidora.

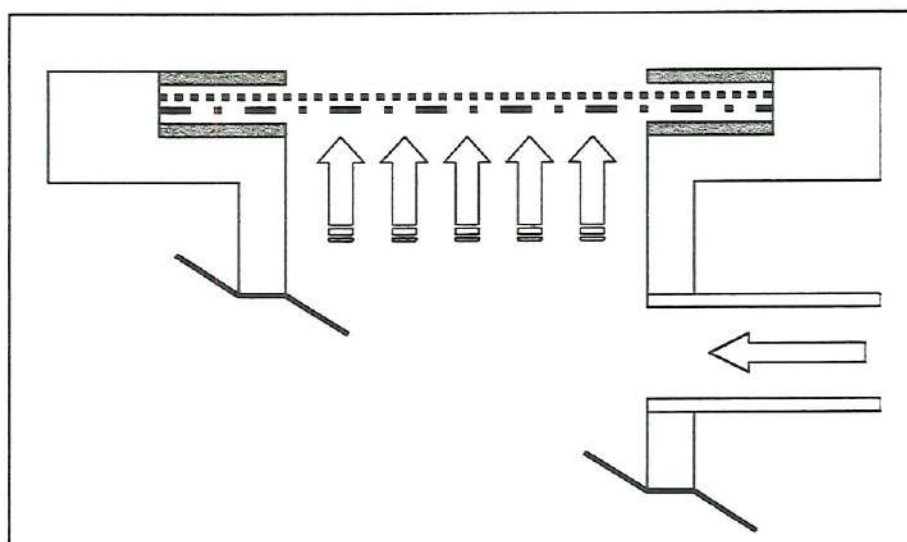


Figura 3.9 – Esquema de montagem do conjunto distribuidor.

### 3.2 – Calibração do medidor de vazão

Nesse trabalho o tipo de medidor escolhido foi o de orifício centrado por ser de fácil fabricação, instalação, calibração e operação, sendo amplamente utilizado apesar de novas tecnologias.

De um modo geral o conjunto de medição é formado por duas partes, um elemento primário e um secundário. O elemento primário é aquele que entra em contato com o fluido, e sua função é a de transformar a vazão em outra grandeza física mensurável, no caso a diferença de pressão entre a

entrada e a saída do orifício. O elemento secundário transforma a grandeza obtida no elemento primário em leitura adequada. A figura 3.10 mostra dois tipos de elementos primários.

Os elementos primários geradores de pressão diferencial são instrumentos que utilizam fundamentos teóricos de aplicação imediata. Sua relação com o escoamento produzido tem bases físicas diretas, sem mecanismos intermediários. Sua função específica é a de criar uma depressão  $\Delta P$  que possa ser associada à uma vazão  $Q$ , feito através de equação do tipo  $Q = k \cdot (\Delta P)^{0,5}$ . O coeficiente ( $k$ ) é característico do elemento que promove a diferença de pressão, da instalação e do fluido.

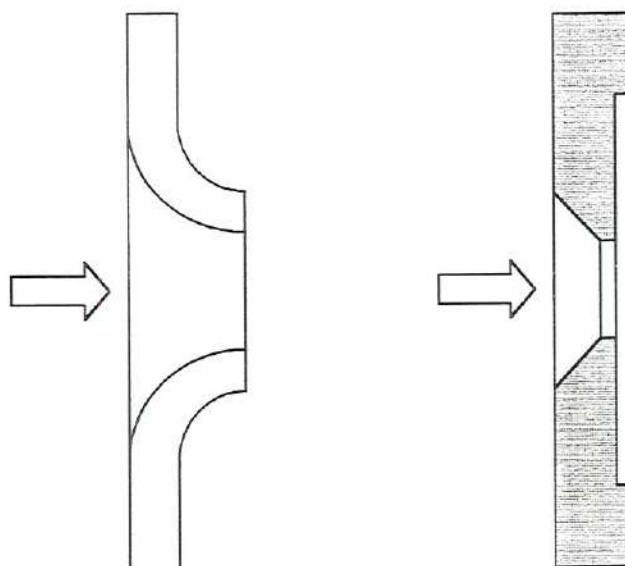


Figura 3.10 – Orifícios para Reynolds baixo. (a) arredondado (b) cônico.

### 3.2.1 – tipo de tomada de pressão

Por sua extrema simplicidade, um grande número de tipos de tomadas de pressão com características distintas foram desenvolvidos e isso traz alguns inconvenientes e restrições ao uso.

Para sua localização, vários critérios e normas podem ser utilizados, dependendo das restrições ou padronizações desejadas. Aqui foi escolhido o tipo com tomada em canto com anel piezométrico que amortece as



flutuações originadas das turbulências próximas ao medidor. Na figura 3.11 está representada a tomada em canto com suas características construtivas.

Esse tipo de tomada tem a vantagem de poder ser instalada em condições mais desfavoráveis que os outros tipos, exatamente por causa do anel amortecedor. Apenas é um pouco mais difícil a sua fabricação, pois alguns cuidados devem ser tomados na usinagem, tais como, acabamento superficial, observação das tolerâncias da norma, paralelismos e excentricidades. Essas normas estão em DELMÉE (1982), entre outros.

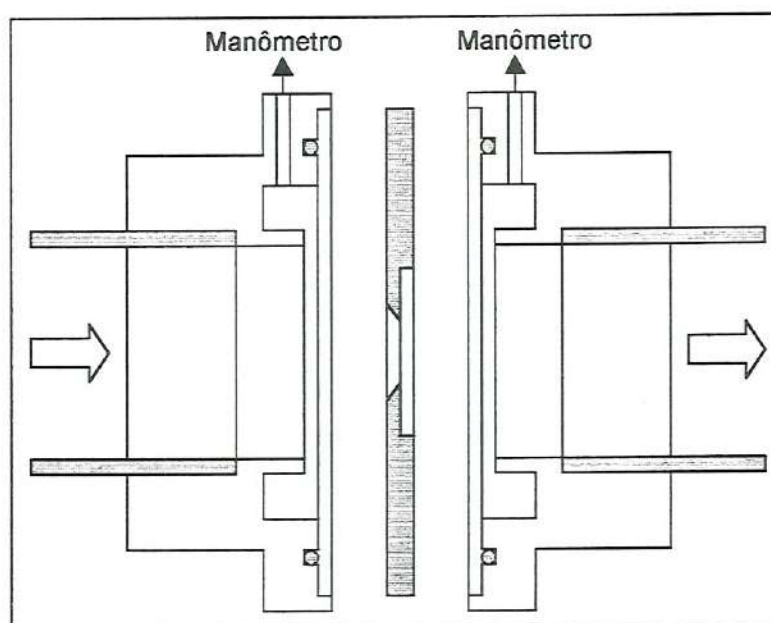


Figura 3.11 – Detalhe da tomada de pressão com anel amortecedor.

### 3.2.2 – Medidor tipo orifício para baixos números de Reynolds

Nos casos onde o número de Reynolds é relativamente baixo o medidor de orifício convencional com aresta a  $90^\circ$  a montante não é recomendado, pois o coeficiente de descarga não é constante nesse regime de escoamento.

Nesse caso dois tipos básicos são recomendados, os orifícios de canto arredondado e os de entrada cônica, representados na figura 3.10.

A principal diferença do orifício de canto arredondado em relação ao convencional é que a face à montante é arredondada na sua concordância

com o orifício de passagem propriamente dito, formando um quarto de círculo. O raio de concordância depende da relação de diâmetros entre o orifício e o tubo,  $\beta = d_{OR}/d_{TB}$ . Para  $\beta = 0,30$ , usado nesse trabalho, o número de Reynolds mínimo é 300 e o máximo 100.000.

### 3.2.3 – Instalação do medidor de vazão tipo orifício.

Para que o perfil de velocidades se desenvolva adequadamente é necessário um comprimento de tubulação suficiente, caso contrário a medição da vazão não terá confiança uma vez que o perfil não se desenvolveu. Nesse sentido existem normas a serem seguidas ao se instalar um elemento gerador de depressão na tubulação, recomendações essas relativas aos trechos retos à montante e à jusante do ponto de medição.

Desse modo, o perfil de velocidade estará o mais próximo possível daquele da calibração, mantendo-se o padrão de comportamento ao longo dos experimentos, e portanto gerando dados mais precisos.

Os acessórios de tubulação e válvulas de controle que provocam alterações na trajetória do fluido são os principais responsáveis por variações no perfil de velocidades, e devem ser tomados cuidados quanto à instalação dos mesmos.

O mínimo comprimento de trecho reto necessário para a formação do perfil depende do tipo de perturbação provocado pelo acessório e da relação de diâmetros entre o orifício e o tubo. Para o caso apresentado, a figura 3.12 mostra as recomendações de trechos retos mínimos à montante e à jusante de acordo com ISMAIL et al. (1995).

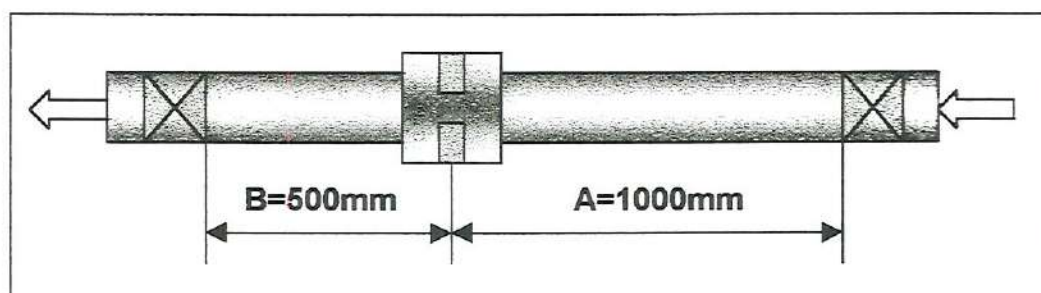


Figura 3.12 – Trechos retos usados nesse trabalho.

Para esse trabalho, com base no diâmetro da tubulação e posição das válvulas, os comprimentos de tubulação estão na figura 3.13.

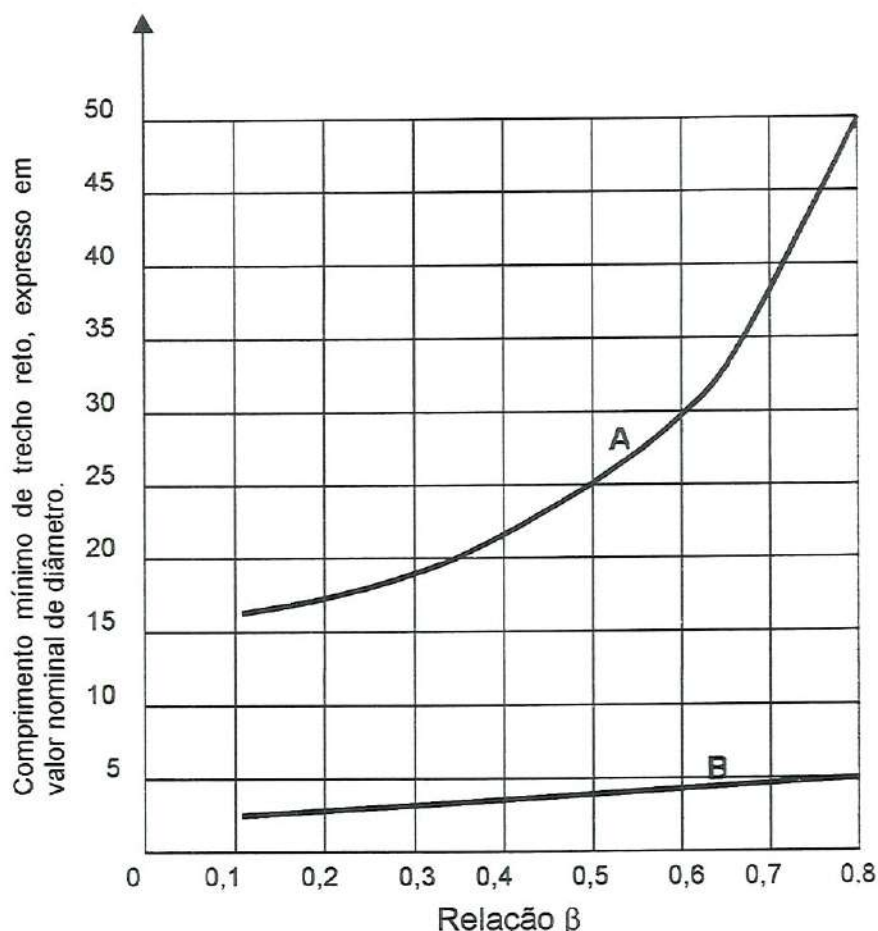


Figura 3.13 – Recomendações mínimas de trechos retos.

#### 3.2.4 – Ensaio de calibração

Para a calibração do medidor de vazão foi usado como padrão um medidor tipo turbina fabricado pela *Airflow developments limited* de origem inglesa, modelo LCA 6000. É um anemômetro de turbina com leitura digital para medida de velocidades do ar, operando na faixa de 0 a 30 m/s.

As especificações do aparelho, de acordo com o fabricante, são as indicadas a seguir:



- precisão a 20<sup>o</sup> C e P<sub>atm</sub> .....melhor que ± 2% F.S.D.
- pressão de operação.....500 mbar a 2 bar
- temperatura de operação.....-10<sup>o</sup> C a 50<sup>o</sup> C
- diâmetro externo.....113 mm

Como restrição o aparelho não é recomendado para diâmetros menores que 113 mm, o que resultou na adaptação de uma expansão na tubulação de 50 mm conforme a figura 3.14.

Devido as baixas velocidades do escoamento outro tipo de calibração disponível, por exemplo tubo de Pitot como na norma A.S.M.E. (1959) , não seria possível. Existem outros medidores mais sofisticados mas não disponíveis para esse trabalho.

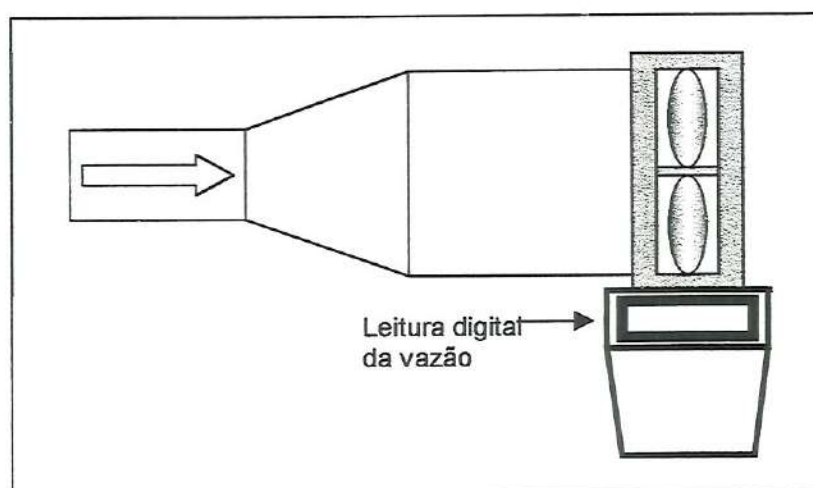


Figura 3.14 – Adaptação para instalação do anemômetro.

Para a calibração do medidor foi estabelecido o procedimento descrito em seguida:

- (a) com o compressor acionado e uma pequena abertura da válvula de saída do compressor, foram feitas as leituras de velocidade no anemômetro e da diferença de pressão provocada no orifício observada no quadro de manômetros.

- (b) A cada nova abertura da válvula de saída do compressor, novo par de leituras, no orifício e no anemômetro, foram feitas.
- (c) Construiu-se tabelas com as diferenças de pressão e as velocidades de cada abertura de válvula.
- (d) Construiu-se gráficos da diferença de pressão em função da velocidade com a respectiva equação da curva.
- (e) Repetiu-se esse procedimento mais três vezes para melhorar a precisão e verificar a constância no padrão de comportamento.

Desse modo, a partir da queda de pressão no orifício, conseguiu-se medir a velocidade na tubulação de 50 mm de diâmetro externo.

Uma preocupação quando se trabalha com gás é o seu fator de compressibilidade. Nesse item é encontrado em DELMÉE (1982) que, para velocidades menores que 15 m/s ao nível do mar, o ar pode ser considerado incompressível.

Já em SILVA (1972) é indicado que quando o número de Mach é pequeno em relação à unidade,  $M < 0,20$ , o fluido pode ser considerado incompressível.

Tanto em FOX & McDONALD (1981) quanto em MUNSON et al. (1994) o escoamento pode ser considerado incompressível quando o número de Mach é menor que 0,30, sendo que os primeiros indicam um desvio de apenas 2% para tal consideração.

As tabelas e gráficos resultados da calibração do medidor de vazão tipo orifício são apresentadas no anexo A.

### 3.3 – Caracterização das partículas

Optou-se por trabalhar com partículas de areia e sal comum (cloreto de sódio – NaCl) pela facilidade de obtenção, custo de aquisição relativamente baixo e no caso específico do sal pela sua propriedade de solubilidade em água, permitindo uma separação sem maiores dificuldades das amostras coletadas.

As granulometrias das partículas foram escolhidas de modo a abranger a faixa de classificação " B " de Geldart, para essa densidade, e pela sua fluidez acentuada, o que elimina em princípio os problemas de coesão já mencionados no capítulo de revisão da bibliografia.

Para a areia os diâmetros médios escolhidos foram:

- passa na peneira 1,20 mm e é retida na 0,60 mm.
- passa na peneira 0,60 mm e é retida na 0,30 mm.
- passa na peneira 0,30 mm e é retida na 0,15 mm.

Para o sal foi escolhido um único diâmetro médio que representa a região central da classificação " B " de Geldart, para essa densidade. Esse diâmetro médio foi:

- passa na peneira 0,60 mm e é retida na 0,30 mm.

No caso do sal apenas um diâmetro foi escolhido pelas seguintes razões:

- (a) a separação granulométrica do sal é extremamente trabalhosa, principalmente para as partículas mais finas por problemas de umidade e coesão.
- (b) com apenas um diâmetro foi possível realizar os ensaios, uma vez que se obteve misturas com partículas de diâmetros médios iguais e misturas com partículas de diâmetros diferentes.
- (c) baixo rendimento do conjunto de peneiras, exigindo um grande número de peneiramentos.

Quanto às propriedades físicas da areia e do sal os ensaios em laboratório forneceram os dados nas tabelas 3.5 e 3.6. As densidades aparentes foram determinadas medindo-se o peso de partículas num volume



padrão. Para a densidade absoluta das partículas foi utilizada a técnica de picnometria.

Cada ensaio representado nas tabelas 3.1 a 3.4 fornece dados médios de 5 ensaios com os mesmos volumes.

Tabela 3.1 – Ensaio para a determinação da densidade aparente da areia.

Ensaio	Volume do recipiente (cm <sup>3</sup> )	Peso do recipiente vazio (g)	Peso do recipiente cheio (g)	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )
1	40	28	83	1,375
2	80	45	162	1,462
3	200	99	382	1,415
			Média	1,417

Tabela 3.2 – Determinação da densidade aparente do sal.

Ensaio	Volume do recipiente (cm <sup>3</sup> )	Peso do recipiente vazio (g)	Peso do recipiente cheio (g)	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )
1	40	28	76	1,200
2	80	45	147	1,275
3	200	99	349	1,250
			Média	1,242

Tabela 3.3 – Determinação da densidade absoluta da areia.

Ensaio	Peso Pic. vazio (g)	Peso Pic. + areia (g)	Peso Pic. + água + areia (g)	Peso pic. + água (g)	Densidade absoluta (g/cm <sup>3</sup> )
1	134	290	730	630	2,786
2	132	283	725	630	2,696
3	136	285	725	630	2,760
4	135	285	730	635	2,727
				Média	2,742

Tabela 3.4 – Determinação da densidade absoluta do sal.

Ensaio	Peso Pic. vazio (g)	Peso Pic. + sal (g)	Peso Pic. + água + sal (g)	Peso pic. + água (g)	Densidade absoluta (g/cm <sup>3</sup> )
1	135	285	725	635	2,500
2	135	285	725	635	2,500
3	136	285	725	635	2,525
4	136	290	730	635	2,610
				Média	2,533

Tabela 3.5 – Propriedades físicas da areia.

Diâmetro da areia (µm)	$\rho_{AP}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{ABS}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\phi$	$\varepsilon$	Tipo de areia
150 – 300	1.417	2.742	0,98	0,48	Arredondada
300 – 600	1.380	2.590	0,75	0,47	Angular
600 – 1200	1.400	2.730	0,75	0,49	Angular

Tabela 3.6 – Propriedades físicas do sal comum.

Diâmetro do sal (µm)	$\rho_{AP}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{ABS}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\phi$	$\varepsilon$	Tipo de sal
300 – 600	1.242	2.533	0,60	0,51	Comum

### 3.4 – Ensaio de operação do leito fluidizado

Ensaio preliminares foram realizados para verificação do padrão de comportamento do leito de partículas nas várias situações, e levantamento das curvas características de fluidização para os diversos tipos de partículas. Os ensaios preliminares permitiram avaliar os parâmetros iniciais relativos à qualidade e tipo de fluidização.

Para essa avaliação dispunha-se de um tubo transparente com recurso adicional de visualização. Posteriormente a fluidização foi realizada

no tubo de aço inoxidável sem a visão do interior, mas com a segurança dos ensaios anteriores e suas respectivas curvas.

Inicialmente foi escolhida a areia na faixa de diâmetros mais finos, pois teoricamente são mais difíceis de fluidizar.

Os ensaios preliminares para o levantamento das curvas de fluidização, imprescindíveis para o desenvolvimento do trabalho, foram feitos seguindo o procedimento detalhado a seguir.

- (a) uma vez montado o equipamento, foi colocado o sistema de partículas com massa de 2 kg.
- (b) após acionou-se o compressor com a válvula de saída fechada, e em consequência o leito manteve-se fixo.
- (c) com uma pequena abertura da válvula alterou-se as leituras de queda de pressão do leito e no orifício, já calibrado, sendo esses dados anotados.
- (d) esse processo foi repetido até uma vazão máxima que não provocasse o arrasto de partículas do leito, com os dados anotados.
- (e) a tabela de dados foi transformada no gráfico que representa o comportamento do leito, e é a base para todos os experimentos com leito fluidizado.
- (f) em seguida o mesmo procedimento foi realizado para as massas de 4, 6 e 8 Kg.

O mesmo procedimento foi utilizado para os outros dois diâmetros médios de areia, e o do sal comum. Tabelas e gráficos de alguns desses ensaios estão apresentados no capítulo 4.

### 3.5 – Sistematização dos ensaios principais

A sistematização dos ensaios foi feita de maneira a contemplar todas as possíveis combinações das partículas disponíveis, e cobrir a faixa de



classificação B de Geldart, ou seja, os diâmetros médios se situam próximos à fronteiras entre as partículas " AB " e " BD " .

Seguindo essa orientação foi proposta a combinação do menor diâmetro médio da areia com o único diâmetro médio do sal, permitindo a verificação do comportamento do leito quando a partícula menos densa está em menor proporção. Nesse caso a partícula menos densa apresenta maior diâmetro, e não está claro qual das partículas fluidiza com maior ou menor facilidade.

Outra combinação foi a do diâmetro médio intermediário da areia com o diâmetro médio único do sal, proporcionando a oportunidade de observação do comportamento da mistura com partículas de diâmetros médios semelhantes. Nesse caso a diferença de densidade é a propriedade que limita a mistura ou promove a segregação. Mesmo nesse caso, como existe uma faixa de diâmetros no sistema, pode haver segregação em função da distribuição de tamanhos de cada componente e não apenas devido à diferença de densidade.

Finalmente foi sugerida a combinação do maior diâmetro médio da areia com o diâmetro médio único do sal para observação da mistura com o componente de maior diâmetro também em maior proporção , contribuindo teoricamente para a segregação mais rápida do leito.

Também é possível ocorrer fragmentação do sal, pela sua maior fragilidade, produzindo uma outra distribuição de partículas em plena operação. Isso pode acontecer para todas as combinações.

Em todos os ensaios foi colocada uma massa de 6 kg de areia e 2 kg de sal, produzindo uma altura estática de leito em torno de 190 mm, correspondendo à uma relação entre o diâmetro do leito e a sua altura estática aproximadamente igual à unidade.

A proporção entre as partículas ficou em 25% para o sal e 75% para a areia em todos os ensaios permitindo, no caso de uma mistura perfeita, uma boa precisão na medida das proporções dos dois componentes nas amostras.

Fica claro que se um dos componentes estiver presente em quantidade muito baixa na amostra será difícil determiná-lo, e isso é mais preciso quanto mais preciso for o método de medição.

### 3.5.1 – Procedimentos para os ensaios principais

Para a determinação da velocidade de cada ensaio foi inicialmente colocado no leito uma massa de 8 kg do particulado, estabelecendo a diferença de pressão correspondente, no medidor de vazão, através da abertura das válvulas. Uma vez fixadas as aberturas das válvulas, a massa de teste foi substituída pela massa do experimento principal.

Nos outros experimentos esse procedimento não foi necessário uma vez que a massa de particulado anterior serviu para fixar as aberturas de válvulas do experimento posterior.

Após a introdução do material no equipamento, o leito foi fluidizado na velocidade estabelecida por um período de 60 segundos.

Assim que o tempo estabelecido foi atingido o leito foi parado pelo fechamento da válvula de entrada de ar na base. Isso foi feito para não alterar a abertura da válvula de controle de vazão o que dificultaria a reposição da mesma abertura para continuar os ensaios e manter o padrão de comportamento. Após a parada do leito as amostras foram retiradas nas posições estabelecidas previamente num total de 21 amostras por tempo de interrupção do experimento.

Em seguida o leito foi novamente fluidizado por um intervalo de tempo até a segunda interrupção e novamente colhidas as amostras. Esse procedimento foi seguido até o final dos ensaios. O número total de amostras retiradas foi de 84 por série de quatro intervalos de tempo.

A tabela (3.7) mostra o esquema de ensaios com os sistemas particulados, os tempos de parada e as velocidades de fluidização.

Os tempos  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  e  $t_4$  se referem, respectivamente, aos tempos de um minuto, quatro minutos, sete minutos e dez minutos de ensaio.



Tabela 3.7 – Planejamento para realização dos ensaios.

SISTEMA	VELOCIDADE	TEMPO
sal (450 $\mu$ m) + areia (225 $\mu$ m )	0,13 (m/s)	t1, t2, t3 e t4
sal (450 $\mu$ m) + areia (225 $\mu$ m )	0,15(m/s)	t1, t2, t3 e t4
sal (450 $\mu$ m) + areia (225 $\mu$ m )	0,18(m/s)	t1, t2, t3 e t4
sal (450 $\mu$ m) + areia (450 $\mu$ m )	0,28(m/s)	t1, t2, t3 e t4
sal (450 $\mu$ m) + areia (450 $\mu$ m )	0,34(m/s)	t1, t2, t3 e t4
sal (450 $\mu$ m) + areia (450 $\mu$ m )	0,40(m/s)	t1, t2, t3 e t4
sal (450 $\mu$ m) + areia (900 $\mu$ m )	0,70(m/s)	t1, t2, t3 e t4
sal (450 $\mu$ m) + areia (900 $\mu$ m )	0,85(m/s)	t1, t2, t3 e t4
sal (450 $\mu$ m) + areia (900 $\mu$ m )	1,00(m/s)	t1, t2, t3 e t4

### 3.6 – Método de retirada e análise das amostras.

A retirada das amostras foi feita por uma sonda do tipo descrita e representada na figura 3.15. Essa sonda possui três compartimentos ao longo do seu comprimento com um volume de 2cm<sup>3</sup> cada o que permitiu retirar aproximadamente 5g em cada um deles. Ela possui um tubo externo para o fechamento das entradas para que durante sua inserção no sistema de partículas não colhesse material em posição não desejada.

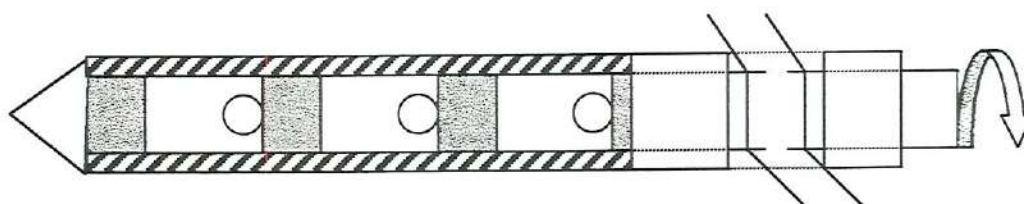


Figura 3.15 – Sonda para a retirada das amostras.

Para cada tempo estabelecido anteriormente, com o leito parado, a sonda foi introduzida no sistema, permanecendo fechada até encostar no distribuidor. Após chegar ao fundo do leito os compartimentos foram abertos pela rotação do tubo externo, permitindo que as partículas escoassem para



o interior dos mesmos, sendo novamente fechados e retirada a sonda para descarregamento das amostras.

Esse procedimento foi repetido para todas as demais posições do leito até completar os tempos especificados. A figura 3.16 mostra um desenho das posições das amostras em relação à área da seção transversal do leito de partículas. Essas posições foram estabelecidas por permitir o máximo número de amostras com a menor interferência possível entre as regiões de amostragem. Nesse caso as distâncias entre todas as posições das amostras foi de aproximadamente 90mm no mesmo plano. Em relação à altura, as aberturas ficaram 40, 105 e 170mm acima do distribuidor.

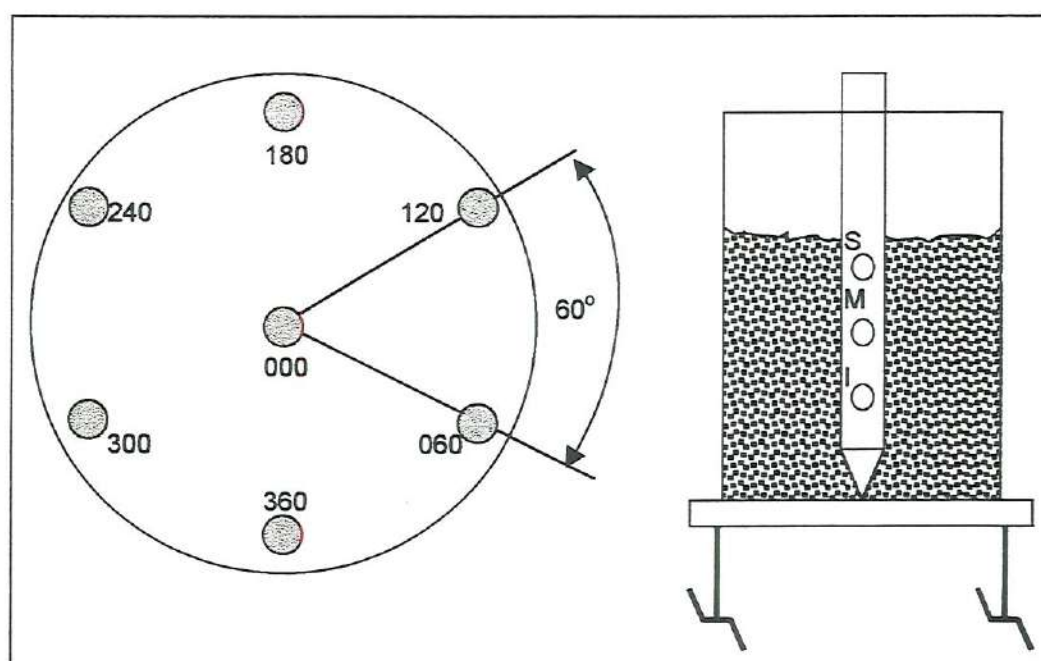


Figura 3.16 – Posições de retirada das amostras.

### 3.7 – Análise das amostras

Tão logo retiradas do leito as amostras foram colocadas em filtros identificados para as suas várias posições no leito, e então os conjuntos amostra e filtro foram novamente pesados e em seguida colocados no dispositivo de separação do sal e areia.

Um volume de água foi passada pelo filtro com a finalidade de dissolver os cristais de sal. A areia permaneceu retida no filtro uma vez que não é dissolvida pela água. Em seguida o filtro e a areia retida foram colocados em estufa com temperatura próxima de 50 °C para a secagem durante aproximadamente quatro horas.

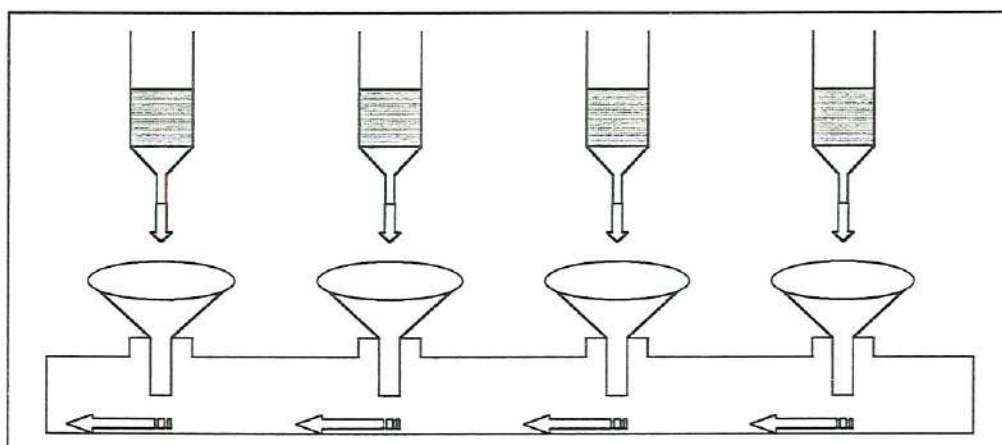


Figura 3.17 – Dispositivo separador das partículas.

Após esse tempo de secagem os conjuntos, filtro e areia, foram pesados, e por diferença de massa encontrou-se as proporções de sal e de areia para cada amostra.

No capítulo 4, resultados, estão apresentadas as amostras de cada ensaio com as respectivas proporções dos dois componentes.

Foram feitas mais duas repetições dos mesmos ensaios para se ter uma melhor representação dos dados. Os anexos (B) e (C) mostram esses outros ensaios, totalizando para cada situação três ensaios.

A partir dessas tabelas foram realizados os cálculos propostos nesse trabalho para verificar a mistura ou segregação no leito fluidizado.

### 3.8 – Avaliação da eficiência dos filtros

Ensaio preliminares foram realizados com a finalidade de avaliar a eficiência dos filtros e do método de análise das amostras.

Inicialmente todos os filtros de papel foram devidamente identificados e pesados em balança com precisão de milésimos de grama, marca Marte, com campânula de acrílico.

Foram então colocadas proporções em massa conhecidas de sal e de areia em cada filtro e submetidos à várias vazões de água verificando-se a partir de qual volume a dissolução de sal era suficiente para uma precisão aceitável na determinação das duas proporções.

Após a dissolução do sal o conjunto filtro e areia foi colocado em estufa com temperatura próxima dos 50 °C por um tempo de aproximadamente quatro horas, necessário para a secagem completa. Em seguida o conjunto foi pesado e por diferença deveria resultar na massa inicial de areia, já conhecida.

As tabelas (3.8) e (3.9), e as figuras (3.18) e (3.19), mostram esses ensaios preliminares e os desvios observados em cada um deles.

Tabela 3.8 – Eficiência dos filtros após 15 minutos fora da estufa.

Filtro	Wfi	Wfa	Wtt	Wfa*	Wfa-Wfa*	% desvio
1	0,931	3,033	4,523	3,014	0,019	0,63
2	0,925	2,923	4,859	2,928	-0,005	-0,17
3	0,923	2,969	4,882	2,965	0,004	0,13
4	0,935	2,959	4,386	2,949	0,010	0,34
5	0,939	3,057	4,928	3,054	0,003	0,10
6	0,926	2,910	4,467	2,932	-0,022	-0,76
7	0,939	3,035	4,356	3,023	0,012	0,40
8	0,936	3,040	4,434	3,028	0,012	0,39
9	0,931	2,939	4,335	2,927	0,012	0,41
10	0,922	3,005	4,377	2,997	0,008	0,27



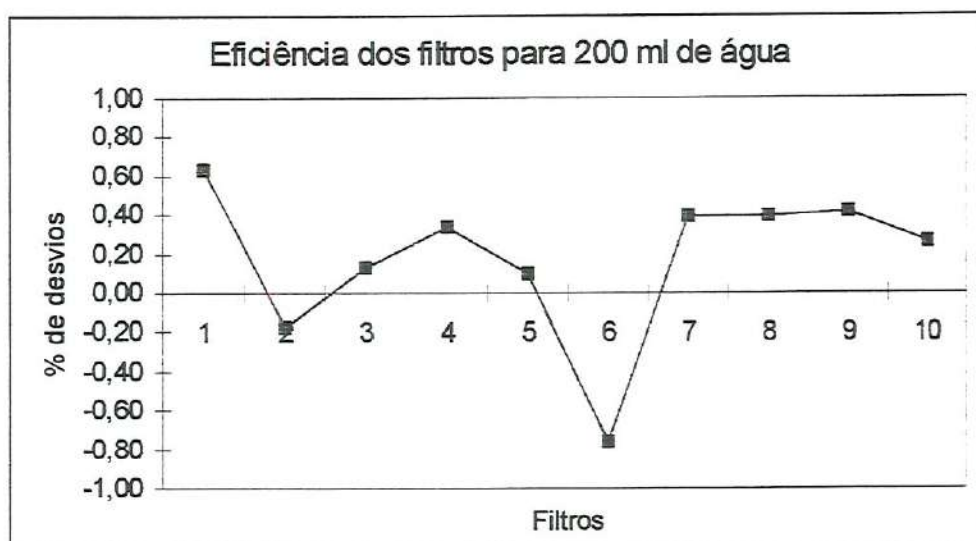


Figura 3.18 – Desvios dos pesos dos filtros após 15 minutos fora da estufa.

Tabela 3.9 – Eficiência dos filtros após 5 minutos fora da estufa.

Filtro	Wfi	Wfa	Wtt	Wfa*	Wfa-Wfa*	% desvio
1	0,931	3,033	4,523	3,002	0,031	1,02
2	0,925	2,923	4,859	2,917	0,006	0,21
3	0,923	2,969	4,882	2,948	0,021	0,71
4	0,935	2,959	4,386	2,943	0,016	0,54
5	0,939	3,057	4,928	3,047	0,010	0,33
6	0,926	2,910	4,467	2,918	-0,008	-0,27
7	0,939	3,035	4,356	3,008	0,027	0,89
8	0,936	3,040	4,434	3,018	0,022	0,72
9	0,931	2,939	4,335	2,920	0,019	0,65
10	0,922	3,005	4,377	2,989	0,016	0,53

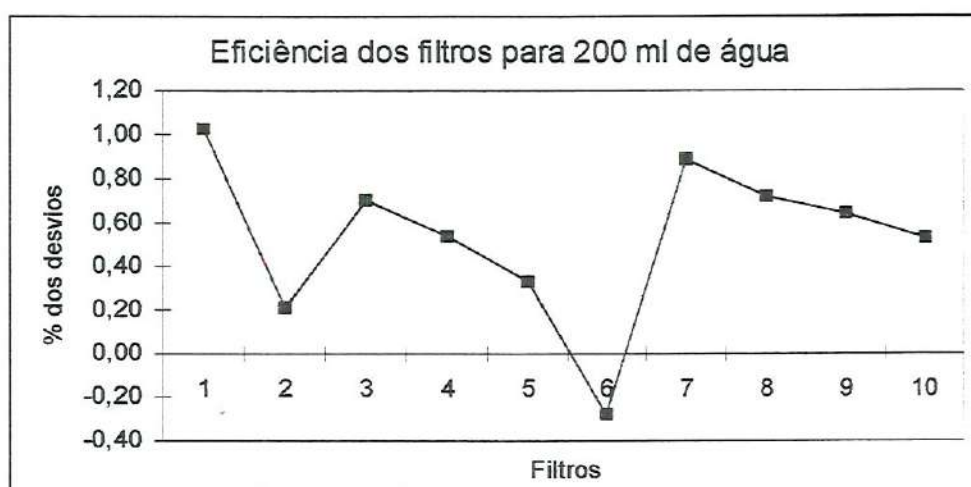


Figura 3.19 – Desvios dos pesos dos filtros após 5 minutos fora da estufa.

## 4 – RESULTADOS

Os resultados obtidos nas diversas fases deste trabalho estão apresentados da seguinte forma:

- ensaios de calibração do medidor de vazão
- ensaios preliminares com o leito fluidizado
- resultados principais dos experimentos
- repetibilidade dos experimentos
- variação nos pesos dos filtros
- parâmetros do modelo de Gibilaro - Rowe

### 4.1 – Ensaio com o medidor de vazão

Esses resultados estão apresentados no anexo A, deste trabalho, na forma de tabelas e gráficos.

### 4.2 – Ensaio preliminares com o leito fluidizado

Para a calibração do equipamento, ou seja, verificação do leito de partículas quanto às suas características de operação, foram realizados diversos experimentos preliminares. Nesses experimentos foram medidas perdas de pressão através do leito de partículas, em função da velocidade superficial do ar. A partir desses dados foram determinadas as velocidades de mínima fluidização ( $U_{MF}$ ).

Dessas verificações originaram as curvas características do leito de partículas, fundamentais para o início dos ensaios principais.

Foram realizados inicialmente ensaios com um massa de areia de 8 kg com diâmetro médio 225  $\mu\text{m}$  para simular a situação próxima dos ensaios principais, pois com essa quantidade de areia a altura estática do leito de partículas foi de 190 mm. As tabelas 4.1 e 4.2 mostram esses ensaios, bem como as figuras 4.1 e 4.2.

Outra série de experimentos iniciou-se operando o leito com uma massa de areia de 6 kg com diâmetro médio 225  $\mu\text{m}$ . Esse ensaio é importante não apenas para observar o comportamento do leito mas também pela utilização do resultado no cálculo do índice de mistura específico para a fluidização de acordo com as equações 124 a 127.

A tabela 4.3 foi feita a partir desse ensaio e a figura 4.3 apresenta os dados em forma gráfica. A tabela 4.4 e a figura 4.4 resultaram de repetição do mesmo tipo de ensaio anterior.

A tabela 4.5 e a figura 4.5 mostram o ensaio para um leito de partículas com massa 6 kg de areia com diâmetro 450  $\mu\text{m}$  e a tabela 4.6 e a figura 4.6 representam a repetição do mesmo ensaio.

Para o material traçador, o sal, foi realizado um ensaio com uma massa de 2 kg e diâmetro médio 450  $\mu\text{m}$ , cujo resultado está na tabela 4.7 e na figura 4.7. Esse ensaio foi novamente realizado de onde a tabela 4.8 e a figura 4.8 foram originadas.

Os resultados dos experimentos com massa 6 kg de areia com diâmetro médio 225  $\mu\text{m}$  em conjunto com massa de 2 kg de traçador de diâmetro médio 450  $\mu\text{m}$ , procedimento real dos experimentos principais, estão na tabela 4.9 e na figura 4.9. A sua repetição está na tabela 4.10 e na figura 4.10.

Como já comentado, foram propostos experimentos com areia de diâmetro médio 900  $\mu\text{m}$  e massa 6 kg juntamente com o material traçador de diâmetro médio 450  $\mu\text{m}$  e 2 kg, mas esses ensaios não puderam se realizar uma vez que o material traçador se fragmentou na velocidade de operação acima da mínima do leito de partículas.



Tabela 4.1 – Calibração do equipamento com 8kg de areia 225  $\mu\text{m}$  de diâmetro médio

DPor(mmco)	DPor(Pa)	DPIf(mmca)	DPIf(Pa)	Ulf(m/s)
2	15,7	48	470,9	0,016
4	31,4	64	627,8	0,025
6	47,1	83	814,2	0,033
9	70,6	108	1059,5	0,042
12	94,2	128	1255,7	0,050
14	109,9	142	1393,0	0,054
16	125,6	156	1530,4	0,059
19	149,1	176	1726,6	0,065
22	172,7	190	1863,9	0,071
25	196,2	206	2020,9	0,076
27	211,9	218	2138,6	0,079
29	227,6	228	2236,7	0,082
32	251,1	246	2413,3	0,087
40	313,9	244	2393,6	0,099
46	361,0	246	2413,3	0,106
52	408,1	250	2452,5	0,114
59	463,0	250	2452,5	0,122
70	549,4	249	2442,7	0,134
84	659,2	249	2442,7	0,147
93	729,9	249	2442,7	0,155
108	847,6	248	2432,9	0,168
117	918,2	248	2432,9	0,176

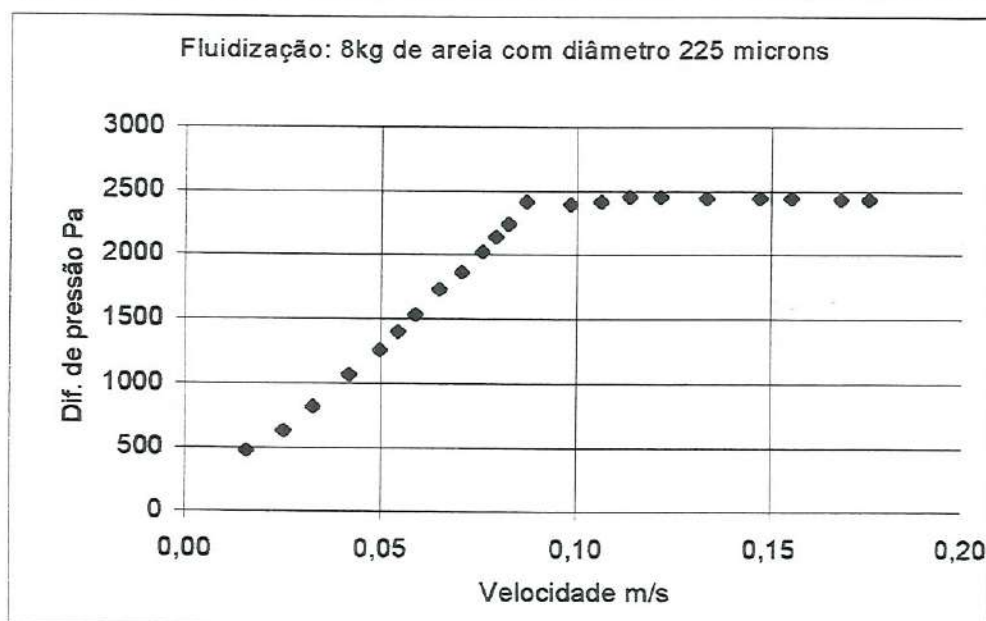


Figura 4.1 – Curva de calibração do leito com 8kg de areia  $d_{MD}=225 \mu\text{m}$ .

Tabela 4.2 – Calibração do equipamento com 8kg de areia 225  $\mu\text{m}$  de diâmetro médio

DPor(mmco)	DPor(Pa)	DPIf(mmca)	DPIf(Pa)	Ulf(m/s)
2	15,7	57	559,2	0,016
5	39,2	77	755,4	0,029
6	47,1	88	863,3	0,033
10	78,5	117	1147,8	0,045
12	94,2	134	1314,5	0,050
17	133,4	162	1589,2	0,061
20	157,0	178	1746,2	0,067
25	196,2	200	1962,0	0,076
29	227,6	218	2138,6	0,082
31	243,3	227	2226,9	0,086
33	259,0	234	2295,5	0,089
37	290,4	242	2374,0	0,094
45	353,2	246	2413,3	0,105
50	392,4	246	2413,3	0,111
57	447,3	248	2432,9	0,120
62	486,6	248	2432,9	0,125
68	533,7	248	2432,9	0,131
72	565,1	246	2413,3	0,136
84	659,2	246	2413,3	0,147
88	690,6	246	2413,3	0,151
92	722,0	246	2413,3	0,155
99	777,0	247	2423,1	0,161

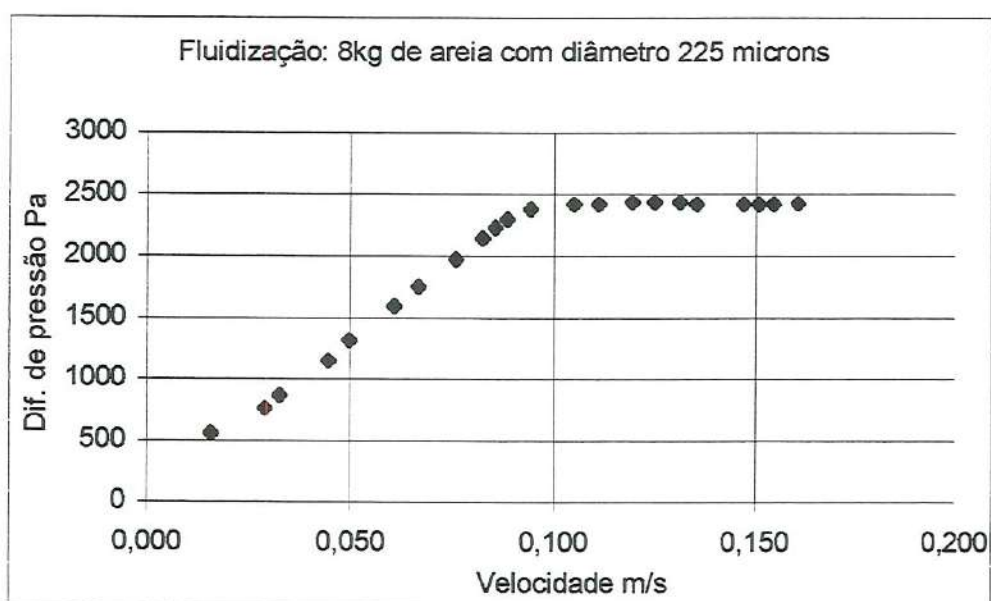


Figura 4.2 – Curva de calibração do leito com 8kg de areia  $d_{MD}=225 \mu\text{m}$ .

Tabela 4.3 – Calibração do equipamento com 6kg de areia 225  $\mu\text{m}$  de diâmetro médio

DPor(mmco)	DPor(Pa)	DPIf(mmca)	DPIf(Pa)	Ulf(m/s)
2	15,7	34	333,5	0,016
3	23,5	48	470,9	0,021
5	39,2	62	608,2	0,029
6	47,1	66	647,5	0,033
7	54,9	78	765,2	0,036
9	70,6	92	902,5	0,042
12	94,2	106	1039,9	0,050
14	109,9	120	1177,2	0,054
17	133,4	132	1294,9	0,061
23	180,5	162	1589,2	0,072
27	211,9	180	1765,8	0,079
33	259,0	178	1746,2	0,089
50	392,4	184	1805,0	0,111
58	455,2	185	1814,9	0,121
78	612,1	184	1805,0	0,142
94	737,7	184	1805,0	0,156

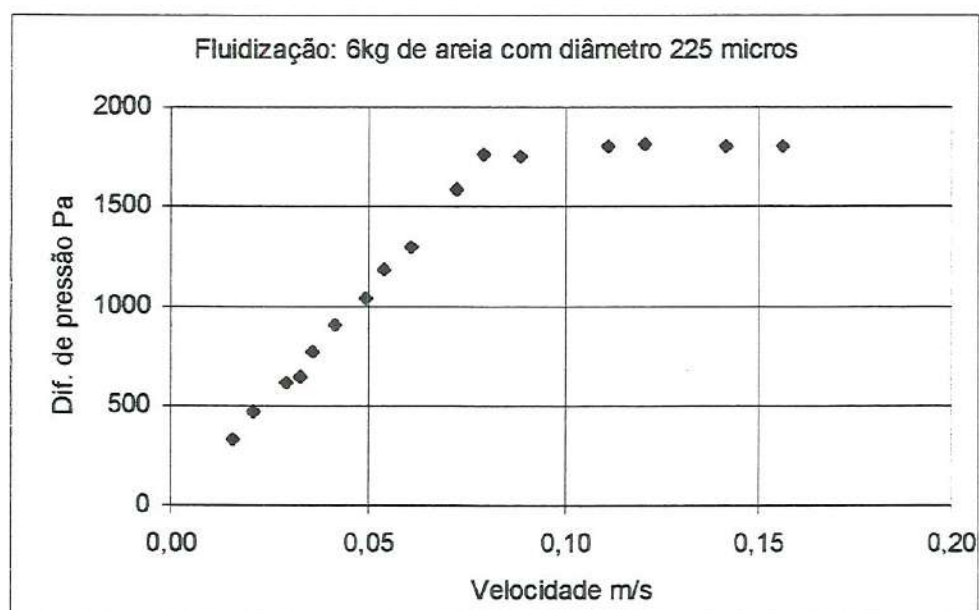


Figura 4.3 – Curva de calibração do leito com 6kg de areia  $d_{MD}=225 \mu\text{m}$ .



Tabela 4.4 – Calibração do equipamento com 6kg de areia 225  $\mu\text{m}$  de diâmetro médio

DPor(mmco)	DPor(Pa)	DPIf(mmca)	DPIf(Pa)	Ulf(m/s)
2	15,7	40	392,4	0,016
6	47,1	66	647,5	0,033
8	62,8	82	804,4	0,039
10	78,5	98	961,4	0,045
14	109,9	112	1098,7	0,054
18	141,3	134	1314,5	0,063
21	164,8	144	1412,6	0,069
25	196,2	157	1540,2	0,076
29	227,6	168	1648,1	0,082
33	259,0	177	1736,4	0,089
37	290,4	178	1746,2	0,094
41	321,8	181	1775,6	0,100
52	408,1	183	1795,2	0,114
58	455,2	183	1795,2	0,121
61	478,7	183	1795,2	0,124
69	541,5	183	1795,2	0,133
75	588,6	183	1795,2	0,139
79	620,0	181	1775,6	0,142
85	667,1	181	1775,6	0,148
91	714,2	181	1775,6	0,154

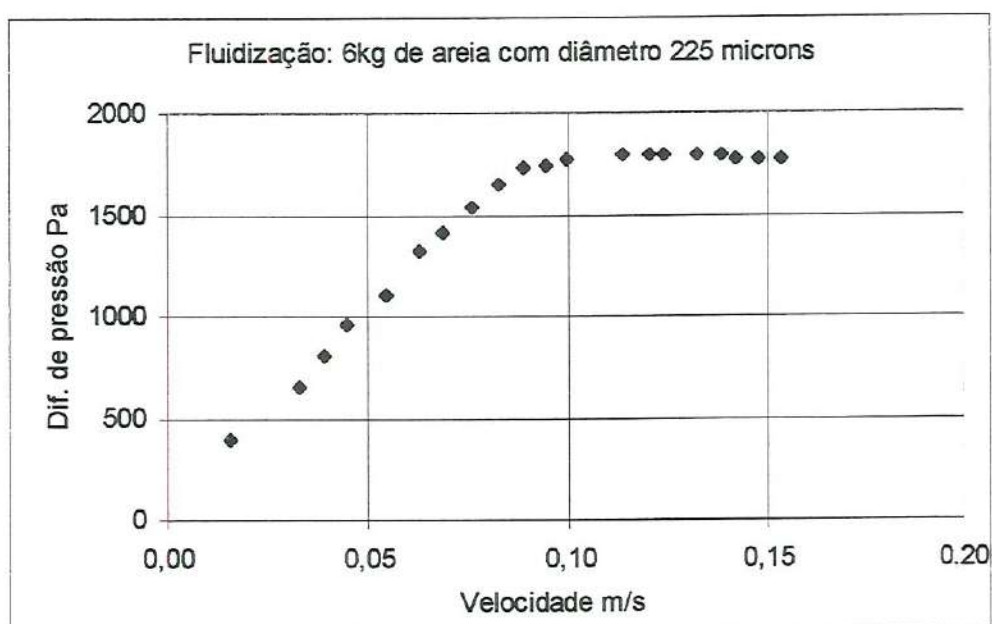


Figura 4.4 – Curva de calibração do leito com 6kg de areia  $d_{MD}=225 \mu\text{m}$ .

Tabela 4.5 – Calibração do equipamento com 6kg de areia 450  $\mu\text{m}$  de diâmetro médio

DPor(mmco)	DPor(Pa)	DPIf(mmca)	DPIf(Pa)	Ulf(m/s)
4	31,4	25	245,3	0,025
6	47,1	33	323,7	0,033
9	70,6	40	392,4	0,042
14	109,9	51	500,3	0,054
24	188,4	67	657,3	0,074
38	298,2	88	863,3	0,096
50	392,4	101	990,8	0,111
76	596,4	126	1236,1	0,140
97	761,3	144	1412,6	0,159
121	949,6	162	1589,2	0,179
146	1145,8	180	1765,8	0,197
158	1240,0	190	1863,9	0,206
178	1396,9	185	1814,9	0,219
189	1483,3	187	1834,5	0,226
202	1585,3	186	1824,7	0,234
235	1844,3	182	1785,4	0,253
255	2001,2	183	1795,2	0,264
270	2119,0	183	1795,2	0,272
383	3005,8	183	1795,2	0,326

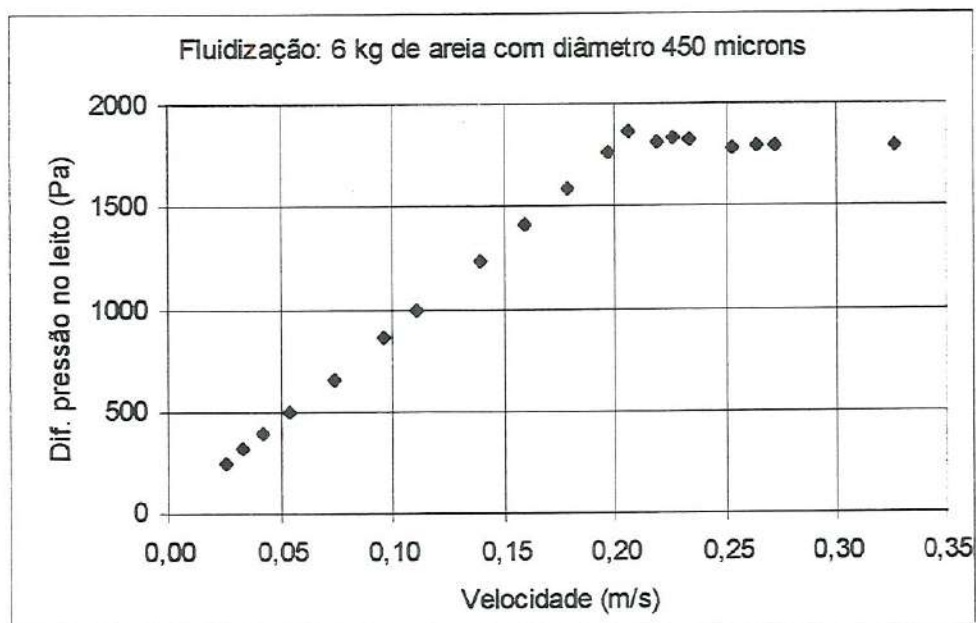


Figura 4.5 – Curva de calibração do leito com 6kg de areia  $d_{MD}=450 \mu\text{m}$ .

Tabela 4.6 – Calibração do equipamento com 6kg de areia 450  $\mu\text{m}$  de diâmetro médio

DPor(mmco)	DPor(Pa)	DPIf(mmca)	DPIf(Pa)	Ulf(m/s)
4	31,4	26	255,1	0,025
7	54,9	36	353,2	0,036
9	70,6	42	412,0	0,042
15	117,7	55	539,6	0,057
38	298,2	88	863,3	0,096
54	423,8	104	1020,2	0,116
64	502,3	112	1098,7	0,127
84	659,2	130	1275,3	0,147
96	753,4	138	1353,8	0,158
120	941,8	153	1500,9	0,178
155	1216,4	175	1716,8	0,204
190	1491,1	182	1785,4	0,227
211	1655,9	181	1775,6	0,239
241	1891,4	183	1795,2	0,257
295	2315,2	181	1775,6	0,285
321	2519,2	181	1775,6	0,298
362	2841,0	182	1785,4	0,317
386	3029,3	183	1795,2	0,328
405	3178,4	183	1795,2	0,336

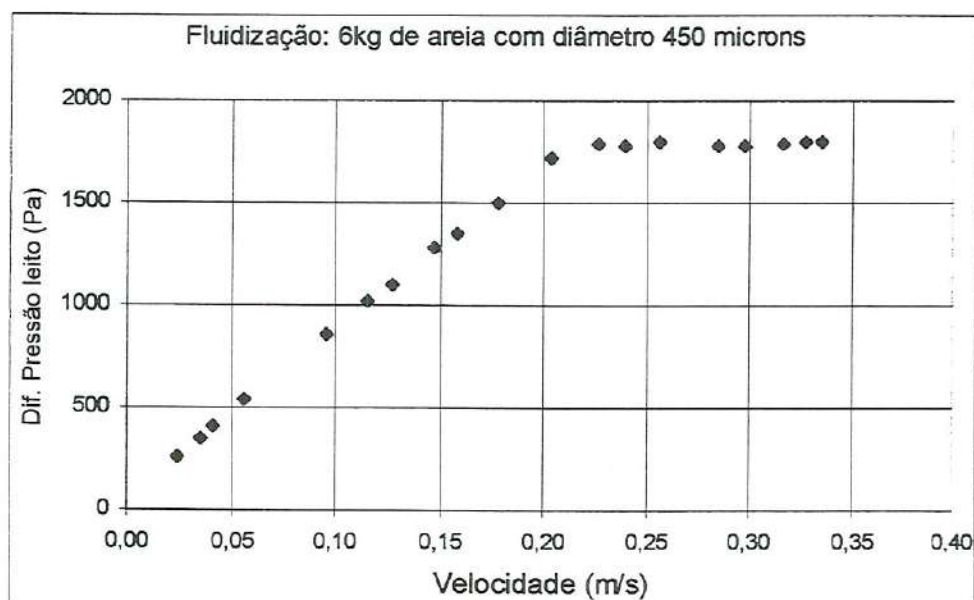


Figura 4.6 – Curva de calibração do leito com 6kg de areia  $d_{MD}=450 \mu\text{m}$ .



Tabela 4.7 – Calibração do equipamento com 2kg de traçador 450  $\mu\text{m}$  de diâmetro médio

DPor(mmco)	DPor(Pa)	DPIf(mmca)	DPIf(Pa)	Ulf(m/s)
1	7,8	5	49,1	0,009
4	31,4	9	88,3	0,025
7	54,9	13	127,5	0,036
12	94,2	17	166,8	0,050
17	133,4	20	196,2	0,061
24	188,4	25	245,3	0,074
29	227,6	28	274,7	0,082
32	251,1	30	294,3	0,087
40	313,9	35	343,4	0,099
50	392,4	39	382,6	0,111
55	431,6	41	402,2	0,117
61	478,7	44	431,6	0,124
71	557,2	47	461,1	0,135
80	627,8	50	490,5	0,143
91	714,2	54	529,7	0,154
102	800,5	54	529,7	0,163
110	863,3	54	529,7	0,170
122	957,5	54	529,7	0,180
138	1083,0	54	529,7	0,192
143	1122,3	53	519,9	0,195

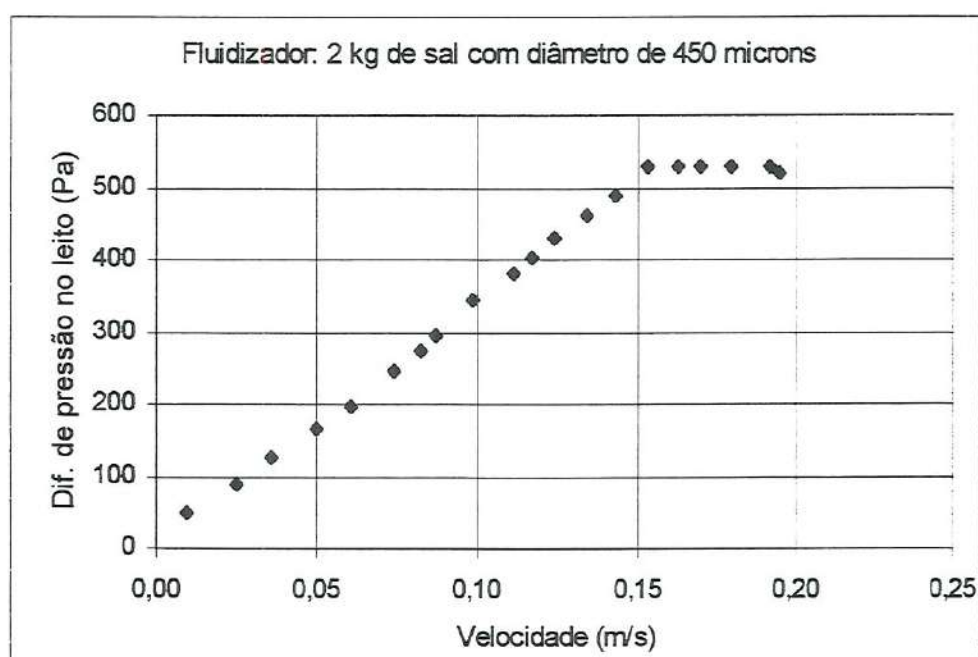


Figura 4.7 – Curva de calibração do leito com 2kg de traçador  $d_{MD}=450 \mu\text{m}$ .

Tabela 4.8 – Calibração do equipamento com 2kg de traçador 450  $\mu\text{m}$  de diâmetro médio

DPor(mmco)	DPor(Pa)	DPIf(mmca)	DPIf(Pa)	Ulf(m/s)
1	7,8	4	39,2	0,009
5	39,2	12	117,7	0,029
9	70,6	16	157,0	0,042
11	86,3	17	166,8	0,047
16	125,6	21	206,0	0,059
21	164,8	25	245,3	0,069
29	227,6	27	264,9	0,082
34	266,8	30	294,3	0,090
45	353,2	35	343,4	0,105
55	431,6	38	372,8	0,117
59	463,0	40	392,4	0,122
68	533,7	42	412,0	0,131
75	588,6	44	431,6	0,139
92	722,0	48	470,9	0,155
102	800,5	50	490,5	0,163
108	847,6	51	500,3	0,168
119	933,9	51	500,3	0,177
129	1012,4	50	490,5	0,185
137	1075,2	51	500,3	0,191
147	1153,7	51	500,3	0,198

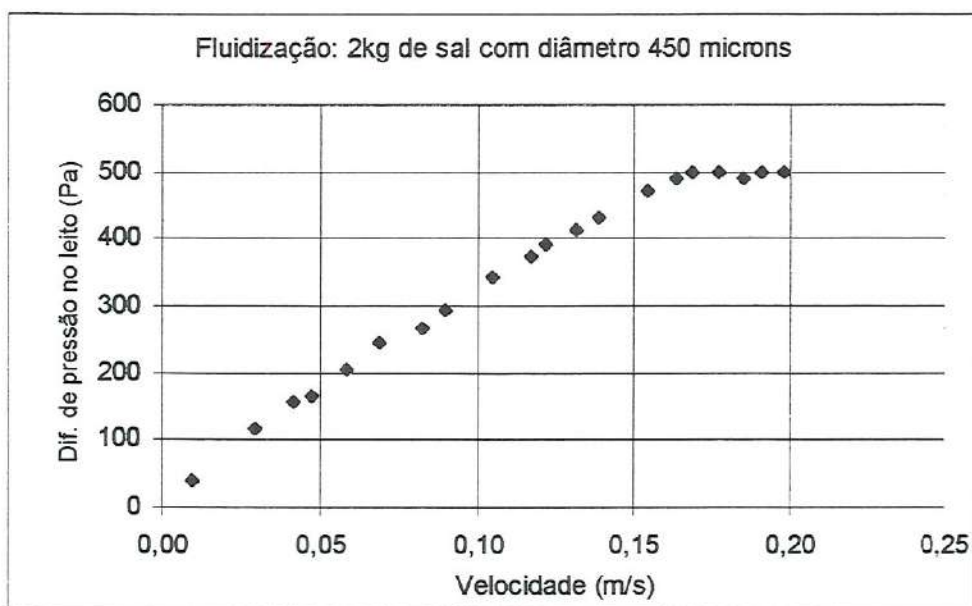


Figura 4.8 – Curva de calibração do leito com 2kg de traçador  $d_{MD}=450 \mu\text{m}$ .

Tabela 4.9 – Calibração do equipamento com 2kg de traçador 450  $\mu\text{m}$  de diâmetro médio e com 6kg de areia 225  $\mu\text{m}$  de diâmetro médio

DPor(mmco)	DPor(Pa)	DPIf(mmca)	DPIf(Pa)	Ulf(m/s)
2	15,7	65	637,7	0,016
4	31,4	84	824,0	0,025
5	39,2	95	932,0	0,029
6	47,1	107	1049,7	0,033
9	70,6	138	1353,8	0,042
14	109,9	175	1716,8	0,054
20	157,0	213	2089,5	0,067
25	196,2	244	2393,6	0,076
29	227,6	260	2550,6	0,082
36	282,5	251	2462,3	0,093
49	384,6	254	2491,7	0,110
56	439,5	254	2491,7	0,118
61	478,7	253	2481,9	0,124
69	541,5	252	2472,1	0,133
76	596,4	252	2472,1	0,140
81	635,7	252	2472,1	0,144
87	682,8	252	2472,1	0,150
94	737,7	252	2472,1	0,156
102	800,5	252	2472,1	0,163
122	957,5	252	2472,1	0,180

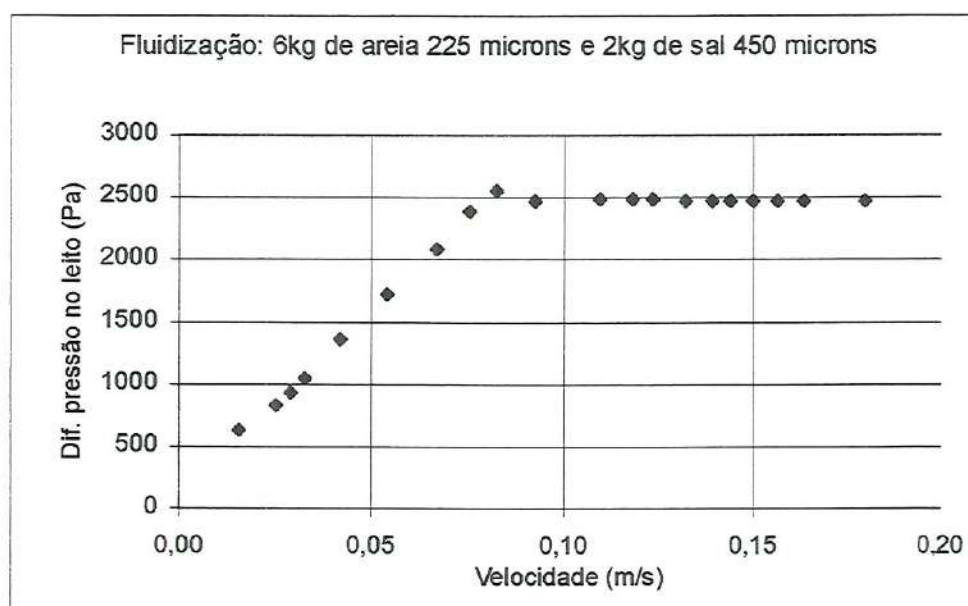


Figura 4.9 – Curva de calibração do leito com 2kg de traçador  $d_{MD}=450 \mu\text{m}$  e 6kg de areia  $d_{MD}=225 \mu\text{m}$ .



Tabela 4.10 – Calibração do equipamento com 2kg de traçador 450  $\mu\text{m}$  de diâmetro médio e com 6kg de areia 225  $\mu\text{m}$  de diâmetro médio

DPor(mmco)	DPor(Pa)	DPIf(mmca)	DPIf(Pa)	Ulf(m/s)
2	15,7	56	549,4	0,016
4	31,4	96	941,8	0,025
7	54,9	124	1216,4	0,036
8	62,8	132	1294,9	0,039
11	86,3	161	1579,4	0,047
15	117,7	186	1824,7	0,057
20	157,0	211	2069,9	0,067
27	211,9	240	2354,4	0,079
36	282,5	251	2462,3	0,093
41	321,8	252	2472,1	0,100
51	400,2	252	2472,1	0,113
58	455,2	252	2472,1	0,121
74	580,8	250	2452,5	0,138
86	674,9	250	2452,5	0,149
101	792,6	250	2452,5	0,162
115	902,5	248	2432,9	0,174
137	1075,2	249	2442,7	0,191
153	1200,7	248	2432,9	0,202
180	1412,6	250	2452,5	0,220

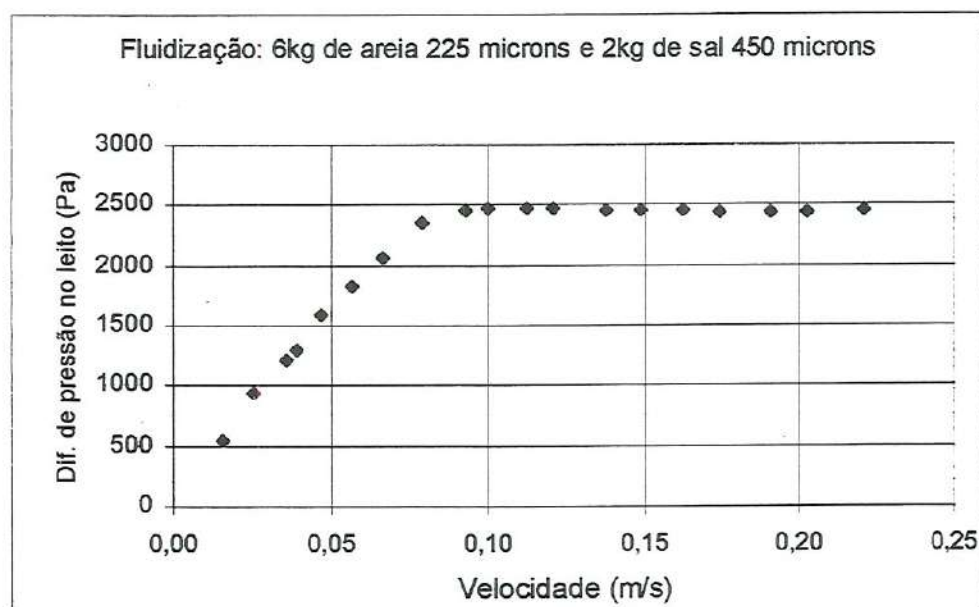


Figura 4.10 – Curva de calibração do leito com 2kg de traçador  $d_{MD}=450 \mu\text{m}$  e 6kg de areia  $d_{MD}=225 \mu\text{m}$ .

### 4.3 – Resultados principais dos experimentos

Já foi mencionado no capítulo 3 que a intenção desse trabalho era a de ensaiar pares de particulados com diâmetros e densidades diferentes, sendo propostas as seguintes combinações:

- areia de diâmetro médio 225  $\mu\text{m}$  em conjunto com traçador de diâmetro médio 450  $\mu\text{m}$  para observar o comportamento do leito em relação às velocidades de operação, à homogeneidade obtida e sua distribuição através de três planos do leito.
- areia de diâmetro médio 450  $\mu\text{m}$  e particulado traçador de diâmetro médio 450  $\mu\text{m}$ , verificando as mesmas características do item anterior.
- areia de diâmetro 900  $\mu\text{m}$  e material traçador de 450  $\mu\text{m}$  de diâmetro médio. Nesse caso específico não foram efetuados ensaios pois o particulado traçador não suportou o atrito e fragmentou, produzindo uma quantidade muito grande de finos comprometendo as observações.

Na tabela 4.11 estão representados todos experimentos realizados, exceto suas repetições. Para os ensaios de repetição a tabela é semelhante.

Nessa tabela estão representados os seguintes ensaios:

- 1a, 2a e 3a – areia com diâmetro médio 225  $\mu\text{m}$  e traçador com diâmetro médio 450  $\mu\text{m}$ .
- 4a, 5a e 6a – areia com diâmetro médio 450  $\mu\text{m}$  e traçador com diâmetro médio 450  $\mu\text{m}$ .

T1, T2, T3 e T4 referem-se aos tempos de fluidização, respectivamente, 1, 4, 7 e 10 minutos.

Tabela 4.11 – Características dos experimentos principais.

Parâmetro Exp.	$U_{MF}$ m/s	$U_{FL}$ m/s	$U_{FL} - U_{MF}$ m/s	$U_{FL}/U_{MF}$ —
1a T1, T2, T3, T4	0,09	0,13	0,04	1,4
2a T1, T2, T3, T4	0,09	0,16	0,07	1,7
3a T1, T2, T3, T4	0,09	0,18	0,09	2,0
4a T1, T2, T3, T4	0,20	0,28	0,08	1,4
5a T1, T2, T3, T4	0,20	0,34	0,14	1,7
6a T1, T2, T3, T4	0,20	0,40	0,20	2,0

Para uma velocidade de operação do leito de partículas próxima de 40% acima da mínima velocidade de fluidização para o conjunto com 6 kg de areia com diâmetro médio 225  $\mu\text{m}$  e 2 kg de traçador com diâmetro médio 450  $\mu\text{m}$  surgiram as tabelas 4.12 a 4.15 e as figuras 4.11 e 4.14.

Para uma velocidade de fluidização 70% acima da velocidade de mínima fluidização os resultados, com o mesmo conjunto de partículas, estão nas tabelas 4.16 a 4.19 e nas figuras 4.15 a 4.18.

Nas tabelas 4.20 a 4.23 e nas figuras 4.19 a 4.22 estão os resultados do experimento feito com o mesmo conjunto particulado e velocidade de operação 100% acima da mínima velocidade de fluidização.

Operando o leito com o conjunto de partículas formado por areia com diâmetro médio 450  $\mu\text{m}$  e massa 6 kg, traçador com diâmetro médio 450  $\mu\text{m}$  e massa 2 kg, com uma velocidade de operação 40% acima da velocidade de mínima fluidização, surgiram as tabelas 4.24 a 4.27 e as figuras 4.23 a 4.26.

As tabelas 4.28 a 4.31 e as figuras 4.27 a 4.30 representam os resultados do experimento feito com o mesmo conjunto particulado anterior e velocidade de operação 70% acima da mínima velocidade de fluidização.

Para operação à uma velocidade de operação 100% acima da velocidade de mínima fluidização os resultados estão representados nas tabelas 4.32 a 4.35 e nas figuras 4.31 a 4.34.



Tabela 4.12 – Ensaio com velocidade de fluidização  $1,4 U_{MF}$ , areia  $225\mu\text{m}$  e traçador  $450\mu\text{m}$ .

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
S 000 T1	0,940	4,094	3,403	2,463	0,691	21,91	78,09	14,11
S 060 T1	0,930	4,269	3,412	2,482	0,857	25,67	74,33	-2,60
S 120 T1	0,936	3,787	3,019	2,083	0,768	26,94	73,06	-7,19
S 180 T1	0,920	4,054	3,249	2,329	0,805	25,69	74,31	-2,67
S 240 T1	0,946	3,851	3,126	2,180	0,725	24,96	75,04	0,17
S 300 T1	0,940	4,296	3,525	2,585	0,771	22,97	77,03	8,82
S 360 T1	0,930	4,358	3,463	2,533	0,895	26,11	73,89	-4,25
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
M 000 T1	0,953	4,172	3,358	2,405	0,814	25,29	74,71	-1,14
M 060 T1	0,936	4,643	3,561	2,625	1,082	29,19	70,81	-14,35
M 120 T1	0,938	4,228	2,438	1,500	1,790	54,41	45,59	-54,05
M 180 T1	0,942	4,334	3,455	2,513	0,879	25,91	74,09	-3,53
M 240 T1	0,938	4,463	3,549	2,611	0,914	25,93	74,07	-3,58
M 300 T1	0,941	4,531	3,628	2,687	0,903	25,15	74,85	-0,61
M 360 T1	0,928	4,525	3,697	2,769	0,828	23,02	76,98	8,61
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
I 000 T1	0,938	5,395	4,359	3,421	1,036	23,24	76,76	7,55
I 060 T1	0,917	5,243	3,361	2,444	1,882	43,50	56,50	-42,53
I 120 T1	0,947	5,418	3,888	2,941	1,530	34,22	65,78	-26,94
I 180 T1	0,934	4,785	3,882	2,948	0,903	23,45	76,55	6,62
I 240 T1	0,926	5,010	4,101	3,175	0,909	22,26	77,74	12,32
I 300 T1	0,929	4,881	4,011	3,082	0,870	22,01	77,99	13,56
I 360 T1	0,936	4,827	3,319	2,383	1,508	38,76	61,24	-35,49

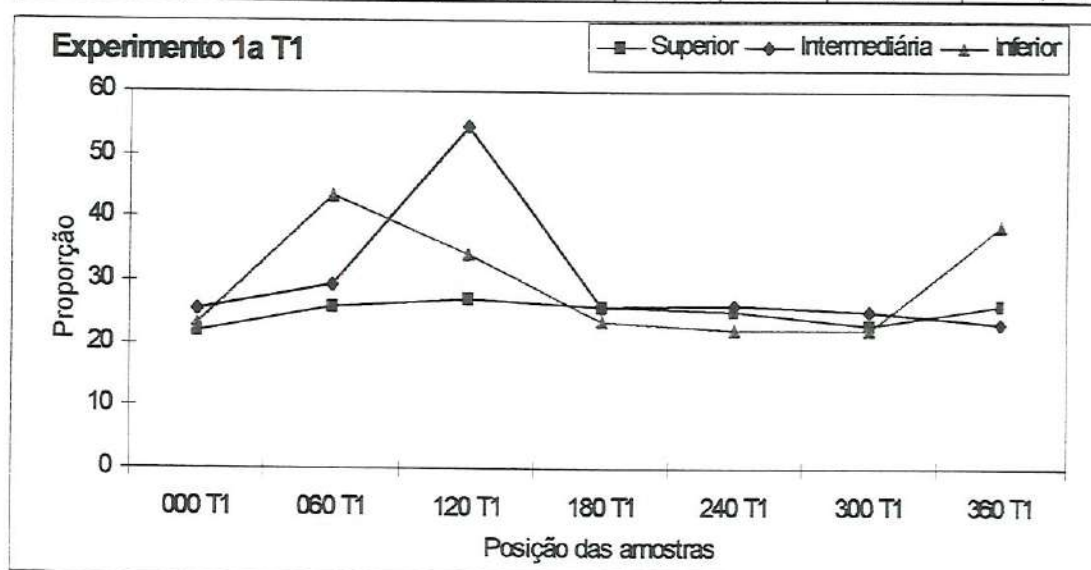


Figura 4.11 – Variação das proporções nas posições – experimento 1a.

Tabela 4.13 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,4  $U_{MF}$ , areia 225 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
S 000 T2	0,938	4,823	3,832	2,894	0,991	25,51	74,49	-1,99
S 060 T2	0,944	4,585	3,569	2,625	1,016	27,90	72,10	-10,41
S 120 T2	0,928	4,350	3,275	2,347	1,075	31,41	68,59	-20,42
S 180 T2	0,946	2,913	2,340	1,394	0,573	29,13	70,87	-14,18
S 240 T2	0,937	4,930	3,799	2,862	1,131	28,32	71,68	-11,74
S 300 T2	0,929	4,910	3,816	2,887	1,094	27,48	72,52	-9,03
S 360 T2	0,932	4,980	3,899	2,967	1,081	26,70	73,30	-6,38
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
M 000 T2	0,938	4,823	3,864	2,926	0,959	24,68	75,32	1,28
M 060 T2	0,933	4,655	3,575	2,642	1,080	29,02	70,98	-13,84
M 120 T2	0,938	4,602	3,545	2,607	1,057	28,85	71,15	-13,34
M 180 T2	0,935	4,336	3,398	2,463	0,938	27,58	72,42	-9,36
M 240 T2	0,944	5,140	4,050	3,106	1,090	25,98	74,02	-3,76
M 300 T2	0,932	5,156	4,087	3,155	1,069	25,31	74,69	-1,22
M 360 T2	0,942	5,080	3,996	3,054	1,084	26,20	73,80	-4,57
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
I 000 T2	0,929	5,273	4,178	3,249	1,095	25,21	74,79	-0,82
I 060 T2	0,943	4,696	3,654	2,711	1,042	27,76	72,24	-9,96
I 120 T2	0,930	4,909	3,087	2,157	1,822	45,79	54,21	-45,40
I 180 T2	0,935	4,850	3,831	2,896	1,019	26,03	73,97	-3,95
I 240 T2	0,923	5,366	4,229	3,306	1,137	25,59	74,41	-2,31
I 300 T2	0,941	5,415	4,319	3,378	1,096	24,50	75,50	2,05
I 360 T2	0,930	5,370	4,241	3,311	1,129	25,43	74,57	-1,68

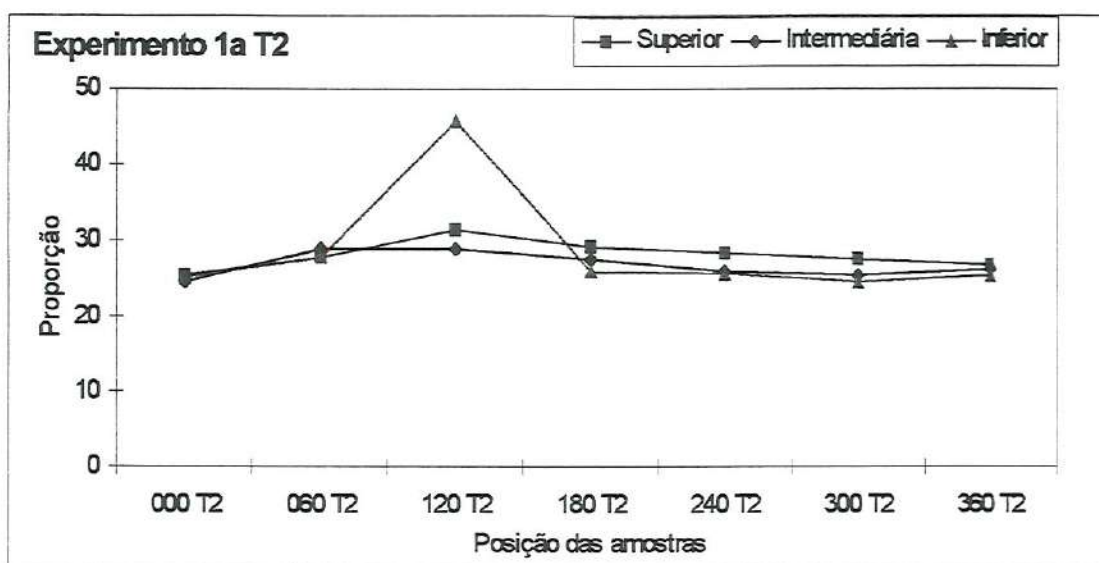


Figura 4.12 – Variação das proporções nas posições – experimento 1a.



Tabela 4.14 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,4  $U_{MF}$ , areia 225 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
S 000 T3	0,948	4,764	3,768	2,820	0,996	26,10	73,90	-4,22
S 060 T3	0,944	4,767	3,716	2,772	1,051	27,49	72,51	-9,06
S 120 T3	0,946	4,742	3,551	2,605	1,191	31,38	68,62	-20,32
S 180 T3	0,938	4,849	3,665	2,727	1,184	30,27	69,73	-17,42
S 240 T3	0,944	4,572	3,568	2,624	1,004	27,67	72,33	-9,66
S 300 T3	0,929	4,246	3,239	2,310	1,007	30,36	69,64	-17,65
S 360 T3	0,946	4,605	3,486	2,540	1,119	30,58	69,42	-18,25
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
M 000 T3	0,945	4,865	3,707	2,762	1,158	29,54	70,46	-15,37
M 060 T3	0,952	4,871	3,750	2,798	1,121	28,60	71,40	-12,60
M 120 T3	0,950	4,758	3,642	2,692	1,116	29,31	70,69	-14,70
M 180 T3	0,944	5,054	3,826	2,882	1,228	29,88	70,12	-16,33
M 240 T3	0,936	4,691	3,636	2,700	1,055	28,10	71,90	-11,02
M 300 T3	0,944	4,371	3,407	2,463	0,964	28,13	71,87	-11,13
M 360 T3	0,933	4,659	3,557	2,624	1,102	29,58	70,42	-15,47
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
I 000 T3	0,944	5,166	4,055	3,111	1,111	26,31	73,69	-5,00
I 060 T3	0,937	5,126	4,003	3,066	1,123	26,81	73,19	-6,75
I 120 T3	0,933	4,901	3,659	2,726	1,242	31,30	68,70	-20,13
I 180 T3	0,934	5,390	4,138	3,204	1,252	28,10	71,90	-11,02
I 240 T3	0,941	5,022	3,947	3,006	1,075	26,34	73,66	-5,09
I 300 T3	0,943	4,819	3,823	2,880	0,996	25,70	74,30	-2,71
I 360 T3	0,933	5,041	3,904	2,971	1,137	27,68	72,32	-9,67

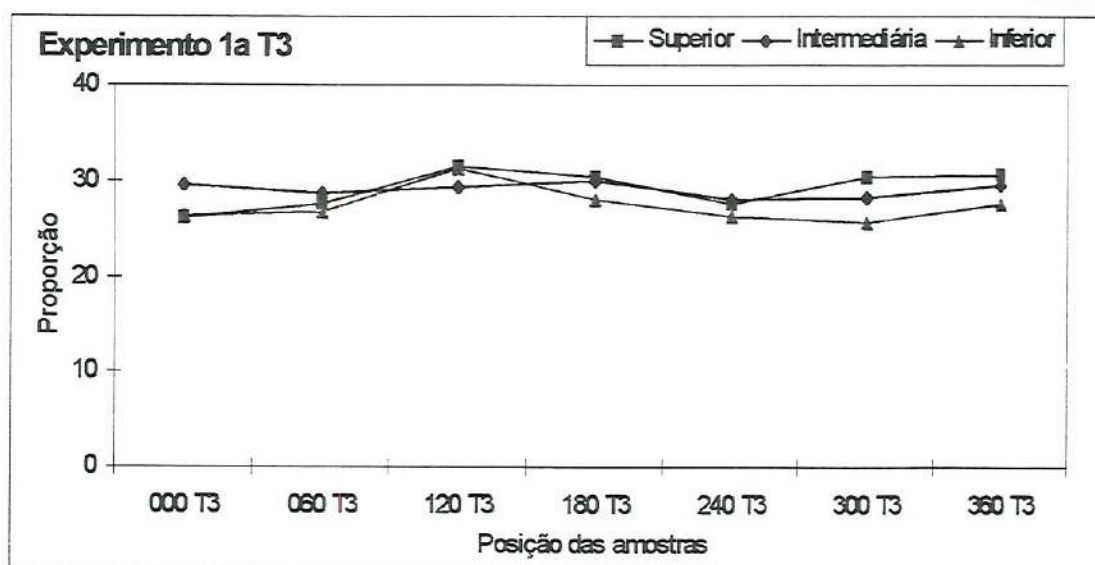


Figura 4.13 – Variação das proporções nas posições – experimento 1a.



Tabela 4.15 – Ensaio com velocidade de fluidização  $1,4 U_{MF}$ , areia  $225\mu\text{m}$  e traçador  $450\mu\text{m}$ .

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
S 000 T4	0,944	4,954	3,873	2,929	1,081	26,96	73,04	-7,26
S 060 T4	0,944	4,613	3,483	2,539	1,130	30,80	69,20	-18,83
S 120 T4	0,944	4,149	3,150	2,206	0,999	31,17	68,83	-19,79
S 180 T4	0,924	4,824	3,559	2,635	1,265	32,44	67,56	-22,92
S 240 T4	0,951	4,713	3,553	2,602	1,160	30,83	69,17	-18,92
S 300 T4	0,932	4,628	3,599	2,667	1,029	27,84	72,16	-10,20
S 360 T4	0,963	4,287	3,259	2,296	1,028	30,93	69,07	-19,16
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
M 000 T4	0,950	5,040	3,890	2,940	1,150	28,12	71,88	-11,09
M 060 T4	0,946	4,682	3,605	2,659	1,077	28,83	71,17	-13,28
M 120 T4	0,944	4,769	3,652	2,708	1,117	29,20	70,80	-14,39
M 180 T4	0,951	5,029	3,796	2,845	1,233	30,24	69,76	-17,32
M 240 T4	0,938	4,829	3,621	2,683	1,208	31,05	68,95	-19,47
M 300 T4	0,940	4,709	3,523	2,583	1,186	31,47	68,53	-20,55
M 360 T4	0,933	4,701	3,608	2,675	1,093	29,01	70,99	-13,82
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
I 000 T4	0,956	5,296	4,115	3,159	1,181	27,21	72,79	-8,13
I 060 T4	0,921	4,814	3,723	2,802	1,091	28,02	71,98	-10,79
I 120 T4	0,939	5,314	4,001	3,062	1,313	30,01	69,99	-16,70
I 180 T4	0,947	5,230	3,969	3,022	1,261	29,44	70,56	-15,09
I 240 T4	0,955	5,152	3,960	3,005	1,192	28,40	71,60	-11,98
I 300 T4	0,940	4,993	3,833	2,893	1,160	28,62	71,38	-12,65
I 360 T4	0,951	5,104	3,959	3,008	1,145	27,57	72,43	-9,32

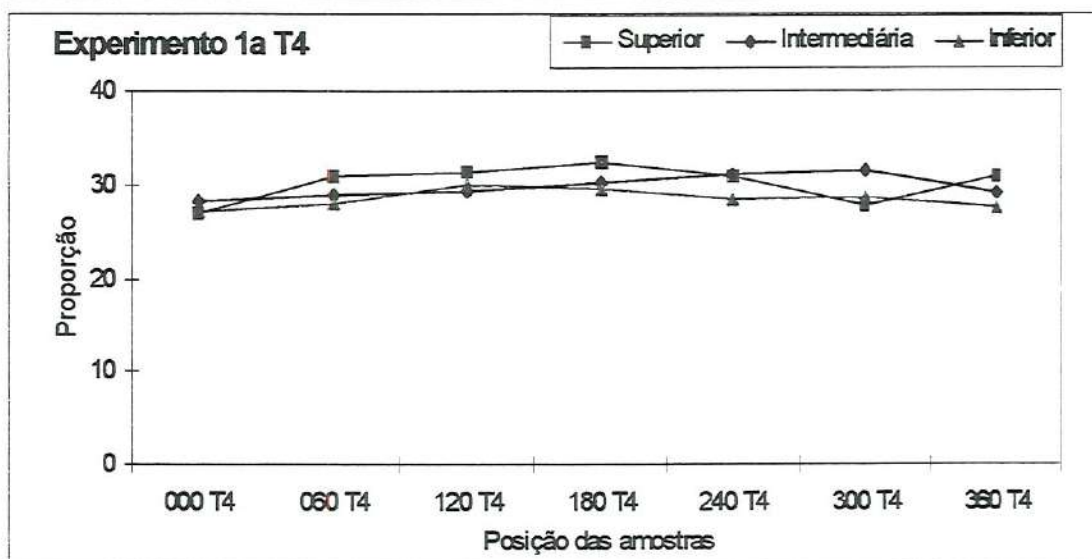


Figura 4.14 – Variação das proporções nas posições – experimento 1a.

Tabela 4.16 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,7  $U_{MF}$ , areia 225 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
S 000 T1	0,948	4,683	3,683	2,735	1,000	26,77	73,23	-6,63
S 060 T1	0,945	4,809	3,699	2,754	1,110	28,73	71,27	-12,97
S 120 T1	0,943	4,777	3,849	2,906	0,928	24,20	75,80	3,29
S 180 T1	0,932	4,662	3,905	2,973	0,757	20,29	79,71	23,18
S 240 T1	0,939	4,862	3,735	2,796	1,127	28,73	71,27	-12,98
S 300 T1	0,940	4,917	3,703	2,763	1,214	30,53	69,47	-18,10
S 360 T1	0,936	4,584	3,486	2,550	1,098	30,10	69,90	-16,94
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
M 000 T1	0,931	4,682	3,667	2,736	1,015	27,06	72,94	-7,61
M 060 T1	0,941	4,954	3,809	2,868	1,145	28,53	71,47	-12,38
M 120 T1	0,930	4,829	3,941	3,011	0,888	22,78	77,22	9,77
M 180 T1	0,950	4,730	3,910	2,960	0,820	21,69	78,31	15,24
M 240 T1	0,943	4,984	3,838	2,895	1,146	28,36	71,64	-11,85
M 300 T1	0,933	4,977	3,542	2,609	1,435	35,48	64,52	-29,55
M 360 T1	0,939	4,702	3,429	2,490	1,273	33,83	66,17	-26,10
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
I 000 T1	0,935	5,037	3,957	3,022	1,080	26,33	73,67	-5,05
I 060 T1	0,934	5,225	4,029	3,095	1,196	27,87	72,13	-10,31
I 120 T1	0,948	5,289	4,305	3,357	0,984	22,67	77,33	10,29
I 180 T1	0,940	5,064	4,200	3,260	0,864	20,95	79,05	19,33
I 240 T1	0,941	5,108	3,912	2,971	1,196	28,70	71,30	-12,90
I 300 T1	0,934	5,277	3,823	2,889	1,454	33,48	66,52	-25,33
I 360 T1	0,951	5,091	3,740	2,789	1,351	32,63	67,37	-23,39

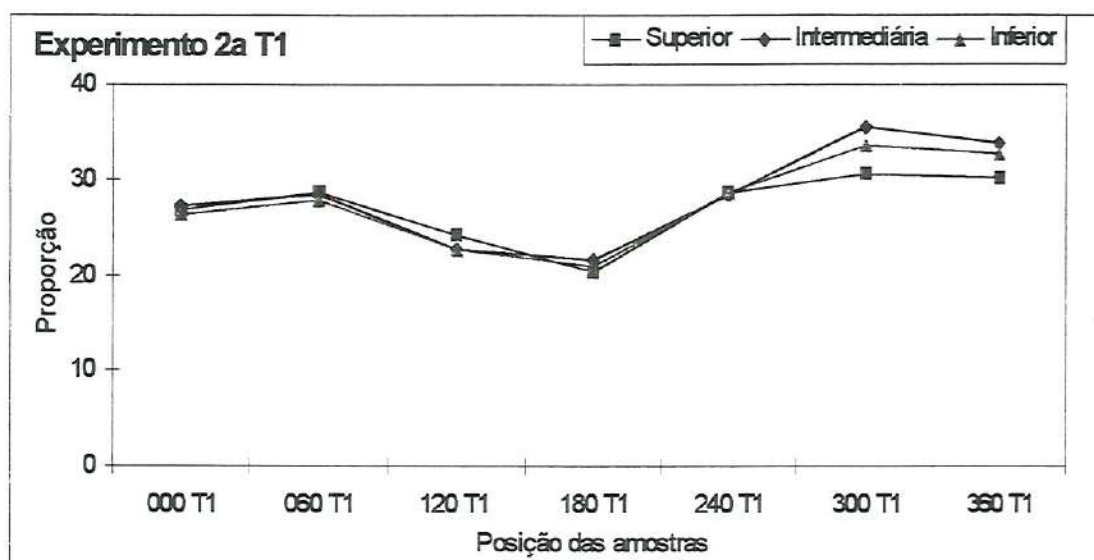


Figura 4.15 – Variação das proporções nas posições – experimento 2a.



Tabela 4.17 – Ensaio com velocidade de fluidização  $1,7 U_{MF}$ , areia  $225\mu\text{m}$  e traçador  $450\mu\text{m}$ .

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
S 000 T2	0,942	4,803	3,967	3,025	0,836	21,65	78,35	15,46
S 060 T2	0,940	4,847	3,738	2,798	1,109	28,38	71,62	-11,93
S 120 T2	0,938	4,971	3,867	2,929	1,104	27,37	72,63	-8,67
S 180 T2	0,949	4,979	3,944	2,995	1,035	25,68	74,32	-2,66
S 240 T2	0,949	4,914	3,853	2,904	1,061	26,76	73,24	-6,57
S 300 T2	0,950	4,752	3,752	2,802	1,000	26,30	73,70	-4,95
S 360 T2	0,944	4,929	3,857	2,913	1,072	26,90	73,10	-7,07
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
M 000 T2	0,940	4,824	3,728	2,788	1,096	28,22	71,78	-11,41
M 060 T2	0,944	4,741	3,764	2,820	0,977	25,73	74,27	-2,84
M 120 T2	0,956	4,942	3,776	2,820	1,166	29,25	70,75	-14,54
M 180 T2	0,950	4,954	3,830	2,880	1,124	28,07	71,93	-10,94
M 240 T2	0,958	4,716	3,646	2,688	1,070	28,47	71,53	-12,20
M 300 T2	0,941	4,757	3,665	2,724	1,092	28,62	71,38	-12,64
M 360 T2	0,961	5,104	3,912	2,951	1,192	28,77	71,23	-13,11
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
I 000 T2	0,929	5,079	3,798	2,869	1,281	30,87	69,13	-19,01
I 060 T2	0,945	5,111	4,022	3,077	1,089	26,14	73,86	-4,36
I 120 T2	0,934	5,235	4,062	3,128	1,173	27,27	72,73	-8,33
I 180 T2	0,936	5,187	4,045	3,109	1,142	26,86	73,14	-6,94
I 240 T2	0,954	5,104	4,017	3,063	1,087	26,19	73,81	-4,55
I 300 T2	0,941	5,096	4,018	3,077	1,078	25,94	74,06	-3,64
I 360 T2	0,931	5,405	4,216	3,285	1,189	26,58	73,42	-5,93

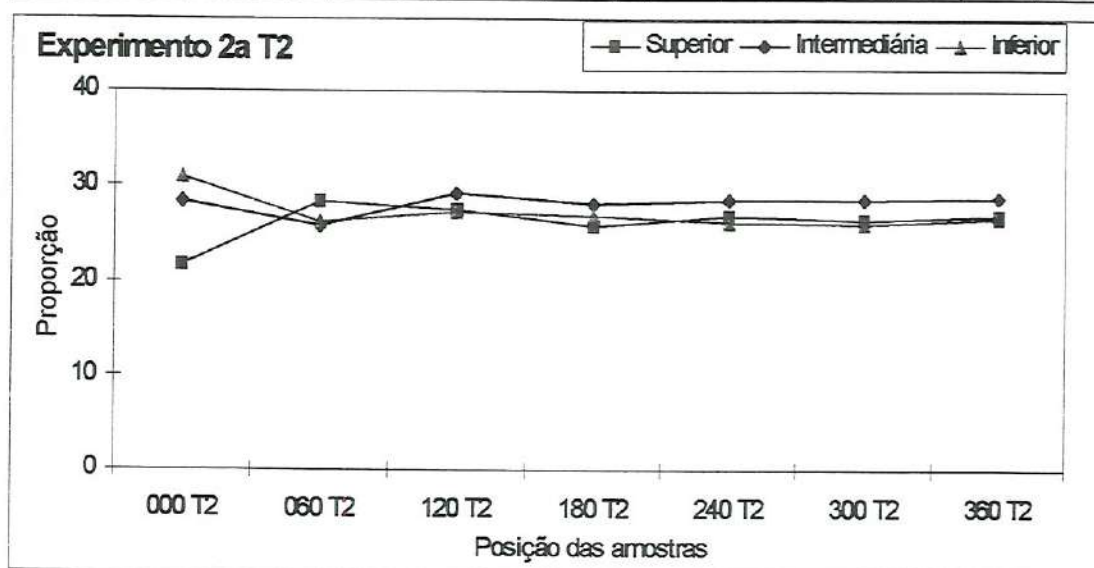


Figura 4.16 – Variação das proporções nas posições – experimento 2a.



Tabela 4.18 – Ensaio com velocidade de fluidização  $1,7 U_{MF}$ , areia  $225\mu\text{m}$  e traçador  $450\mu\text{m}$ .

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
S 000 T3	0,940	5,067	4,050	3,110	1,017	24,64	75,36	1,45
S 060 T3	0,937	4,685	3,663	2,726	1,022	27,27	72,73	-8,32
S 120 T3	0,941	4,708	3,723	2,782	0,985	26,15	73,85	-4,39
S 180 T3	0,943	4,602	3,575	2,632	1,027	28,07	71,93	-10,93
S 240 T3	0,945	4,829	3,706	2,761	1,123	28,91	71,09	-13,54
S 300 T3	0,930	4,765	3,729	2,799	1,036	27,01	72,99	-7,46
S 360 T3	0,952	4,866	3,849	2,897	1,017	25,98	74,02	-3,79
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
M 000 T3	0,960	5,075	3,967	3,007	1,108	26,93	73,07	-7,15
M 060 T3	0,940	4,793	3,730	2,790	1,063	27,59	72,41	-9,38
M 120 T3	0,958	4,822	3,768	2,810	1,054	27,28	72,72	-8,35
M 180 T3	0,942	4,667	3,594	2,652	1,073	28,81	71,19	-13,21
M 240 T3	0,944	4,855	3,726	2,782	1,129	28,87	71,13	-13,40
M 300 T3	0,946	4,807	3,626	2,680	1,181	30,59	69,41	-18,27
M 360 T3	0,948	5,000	3,833	2,885	1,167	28,80	71,20	-13,20
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
I 000 T3	0,945	5,311	4,176	3,231	1,135	26,00	74,00	-3,83
I 060 T3	0,954	5,145	4,012	3,058	1,133	27,03	72,97	-7,52
I 120 T3	0,942	5,035	3,935	2,993	1,100	26,88	73,12	-6,98
I 180 T3	0,953	5,066	3,956	3,003	1,110	26,99	73,01	-7,36
I 240 T3	0,952	5,253	4,086	3,134	1,167	27,13	72,87	-7,86
I 300 T3	0,951	5,068	3,992	3,041	1,076	26,14	73,86	-4,34
I 360 T3	0,932	5,350	4,157	3,225	1,193	27,00	73,00	-7,42

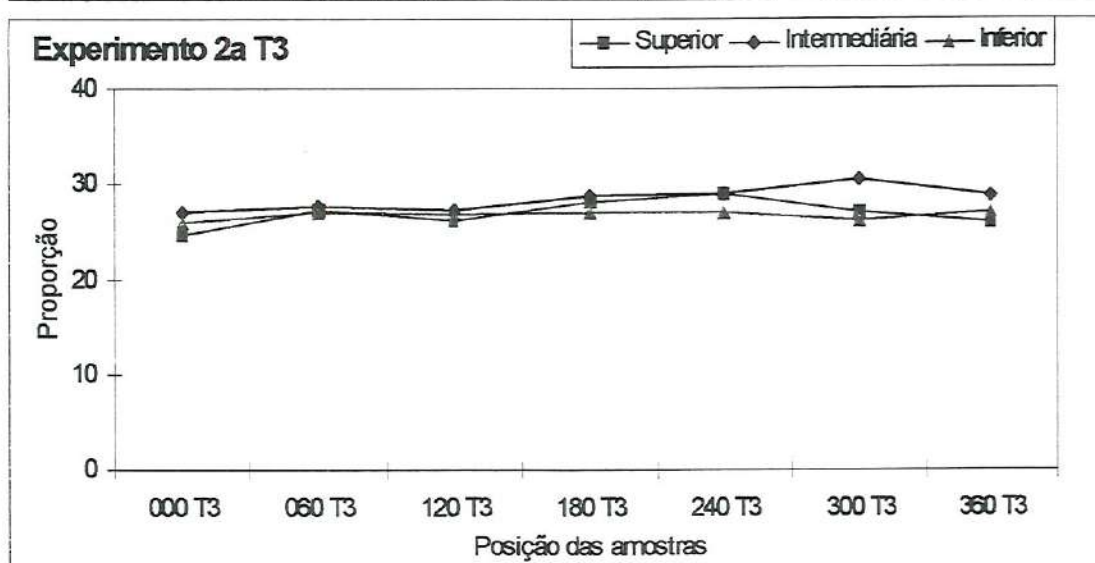


Figura 4.17 – Variação das proporções nas posições – experimento 2a.

Tabela 4.19 – Ensaio com velocidade de fluidização  $1,7 U_{MF}$ , areia  $225\mu\text{m}$  e traçador  $450\mu\text{m}$ .

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
S 000 T4	0,926	5,082	3,968	3,042	1,114	26,80	73,20	-6,73
S 060 T4	0,953	4,750	3,697	2,744	1,053	27,73	72,27	-9,85
S 120 T4	0,935	4,686	3,602	2,667	1,084	28,90	71,10	-13,49
S 180 T4	0,949	4,672	3,617	2,668	1,055	28,34	71,66	-11,78
S 240 T4	0,926	4,806	3,679	2,753	1,127	29,05	70,95	-13,93
S 300 T4	0,951	4,499	3,457	2,506	1,042	29,37	70,63	-14,88
S 360 T4	0,944	4,832	3,791	2,847	1,041	26,77	73,23	-6,63
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
M 000 T4	0,952	5,156	3,998	3,046	1,158	27,55	72,45	-9,24
M 060 T4	0,944	4,755	3,709	2,765	1,046	27,45	72,55	-8,91
M 120 T4	0,934	4,888	3,779	2,845	1,109	28,05	71,95	-10,87
M 180 T4	0,942	4,597	3,601	2,659	0,996	27,25	72,75	-8,26
M 240 T4	0,945	4,979	3,852	2,907	1,127	27,94	72,06	-10,51
M 300 T4	0,943	5,036	3,843	2,900	1,193	29,15	70,85	-14,23
M 360 T4	0,925	4,999	3,836	2,911	1,163	28,55	71,45	-12,42
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
I 000 T4	0,933	5,393	4,196	3,263	1,197	26,84	73,16	-6,85
I 060 T4	0,946	4,992	3,921	2,975	1,071	26,47	73,53	-5,56
I 120 T4	0,934	5,231	4,122	3,188	1,109	25,81	74,19	-3,13
I 180 T4	0,948	5,048	3,966	3,018	1,082	26,39	73,61	-5,27
I 240 T4	0,949	5,307	4,082	3,133	1,225	28,11	71,89	-11,06
I 300 T4	0,945	5,283	4,186	3,241	1,097	25,29	74,71	-1,14
I 360 T4	0,940	5,389	4,168	3,228	1,221	27,44	72,56	-8,91

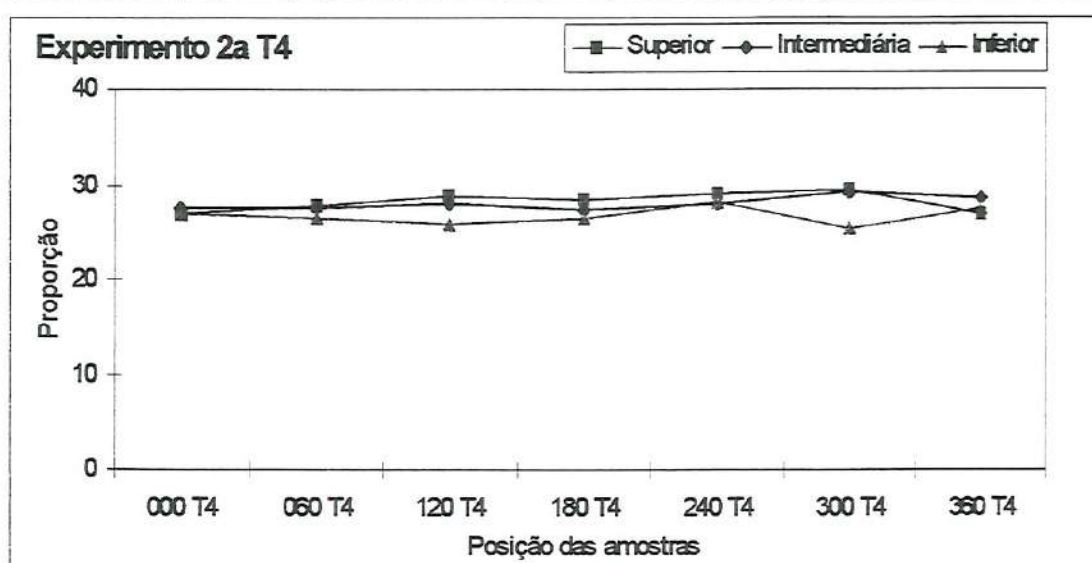


Figura 4.18 – Variação das proporções nas posições – experimento 2a.



Tabela 4.20 – Ensaio com velocidade de fluidização 2,0  $U_{MF}$ , areia 225 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
S 000 T1	0,932	4,255	3,423	2,491	0,832	25,04	74,96	-0,15
S 060 T1	0,954	4,378	3,492	2,538	0,886	25,88	74,12	-3,39
S 120 T1	0,946	4,605	3,703	2,757	0,902	24,65	75,35	1,41
S 180 T1	0,970	4,503	3,701	2,731	0,802	22,70	77,30	10,13
S 240 T1	0,948	4,822	4,001	3,053	0,821	21,19	78,81	17,97
S 300 T1	0,977	4,296	3,543	2,566	0,753	22,69	77,31	10,19
S 360 T1	0,932	4,205	3,450	2,518	0,755	23,07	76,93	8,38
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
M 000 T1	0,965	4,387	3,561	2,596	0,826	24,14	75,86	3,57
M 060 T1	0,924	4,335	3,457	2,533	0,878	25,74	74,26	-2,88
M 120 T1	0,951	4,366	3,210	2,259	1,156	33,85	66,15	-26,15
M 180 T1	0,945	4,398	3,580	2,635	0,818	23,69	76,31	5,53
M 240 T1	0,951	4,782	3,898	2,947	0,884	23,07	76,93	8,34
M 300 T1	0,930	4,240	3,457	2,527	0,783	23,66	76,34	5,68
M 360 T1	0,952	4,276	3,428	2,476	0,848	25,51	74,49	-2,00
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
I 000 T1	0,929	4,868	3,916	2,987	0,952	24,17	75,83	3,44
I 060 T1	0,949	4,800	3,895	2,946	0,905	23,50	76,50	6,38
I 120 T1	0,938	4,771	3,670	2,732	1,101	28,72	71,28	-12,97
I 180 T1	0,942	4,769	3,878	2,936	0,891	23,28	76,72	7,38
I 240 T1	0,923	4,981	4,189	3,266	0,792	19,52	80,48	28,09
I 300 T1	0,952	4,643	3,894	2,942	0,749	20,29	79,71	23,20
I 360 T1	0,934	4,620	3,755	2,821	0,865	23,47	76,53	6,53

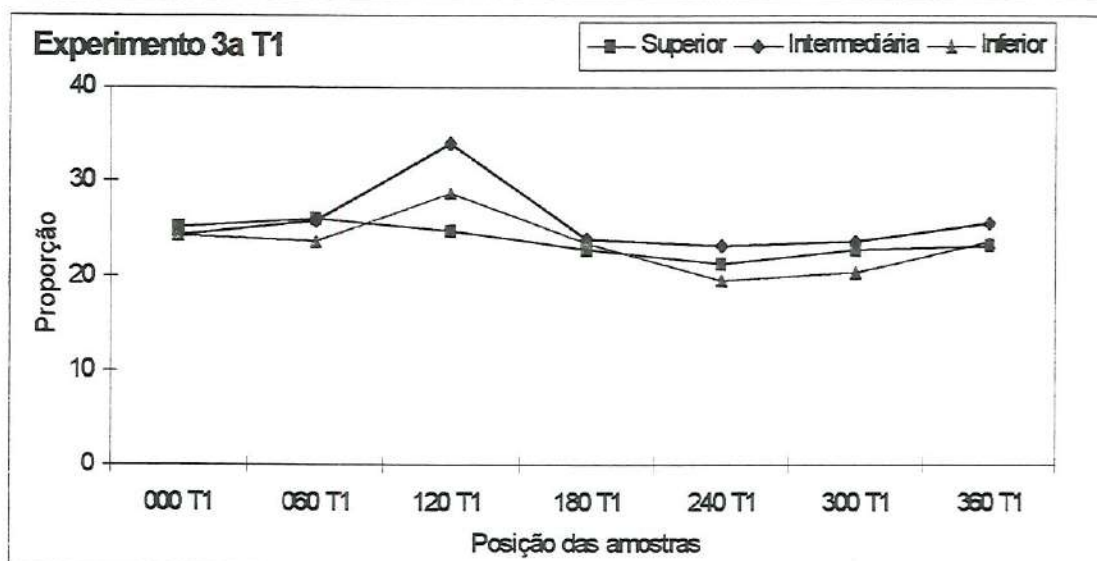


Figura 4.19 – Variação das proporções nas posições – experimento 3a.



Tabela 4.21 – Ensaios com velocidade de fluidização 2,0  $U_{MF}$ , areia 225 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
S 000 T2	0,955	4,631	3,708	2,753	0,923	25,11	74,89	-0,43
S 060 T2	0,934	4,873	3,853	2,919	1,020	25,89	74,11	-3,46
S 120 T2	0,979	4,672	3,671	2,692	1,001	27,11	72,89	-7,77
S 180 T2	0,931	4,438	3,541	2,610	0,897	25,58	74,42	-2,26
S 240 T2	0,977	4,597	3,651	2,674	0,946	26,13	73,87	-4,33
S 300 T2	0,943	4,621	3,708	2,765	0,913	24,82	75,18	0,71
S 360 T2	0,974	4,433	3,560	2,586	0,873	25,24	74,76	-0,95
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
M 000 T2	0,934	4,568	3,617	2,683	0,951	26,17	73,83	-4,47
M 060 T2	0,982	4,690	3,702	2,720	0,988	26,65	73,35	-6,17
M 120 T2	0,942	4,796	3,696	2,754	1,100	28,54	71,46	-12,41
M 180 T2	0,988	4,514	3,525	2,537	0,989	28,05	71,95	-10,87
M 240 T2	0,940	4,538	3,556	2,616	0,982	27,29	72,71	-8,40
M 300 T2	0,986	4,545	3,611	2,625	0,934	26,24	73,76	-4,74
M 360 T2	0,938	4,400	3,452	2,514	0,948	27,38	72,62	-8,70
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
I 000 T2	0,971	5,257	4,174	3,203	1,083	25,27	74,73	-1,06
I 060 T2	0,953	4,887	3,900	2,947	0,987	25,09	74,91	-0,35
I 120 T2	0,989	5,424	4,239	3,250	1,185	26,72	73,28	-6,43
I 180 T2	0,942	4,793	3,812	2,870	0,981	25,47	74,53	-1,86
I 240 T2	0,977	5,956	3,949	2,972	2,007	40,31	59,69	-37,98
I 300 T2	0,944	4,889	3,881	2,937	1,008	25,55	74,45	-2,16
I 360 T2	0,979	4,834	3,849	2,870	0,985	25,55	74,45	-2,16

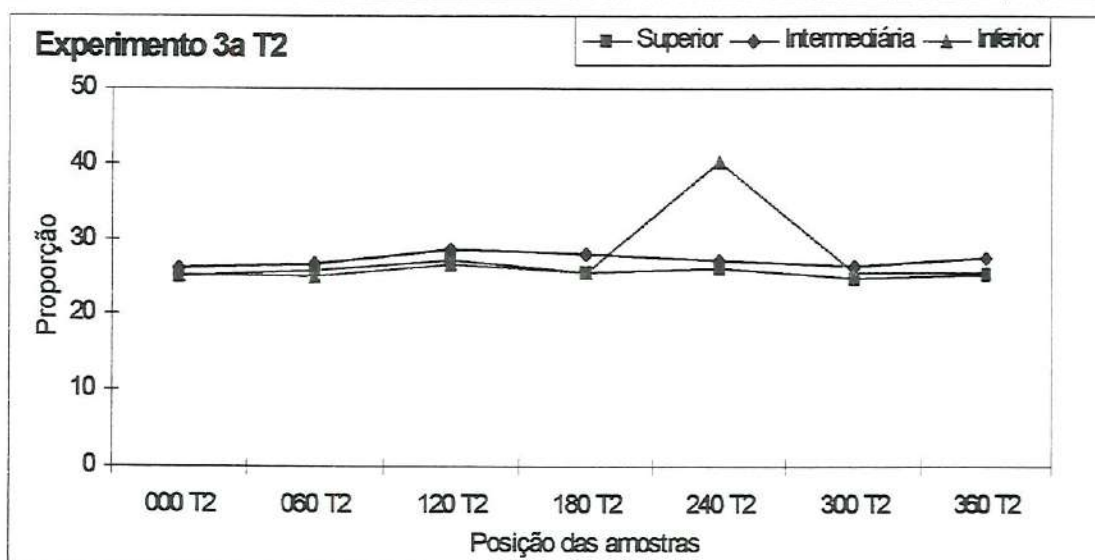


Figura 4.20 – Variação das proporções nas posições – experimento 3a.

Tabela 4.22 – Ensaio com velocidade de fluidização 2,0  $U_{MF}$ , areia 225 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
S 000 T3	0,942	4,614	3,662	2,720	0,952	25,93	74,07	-3,57
S 060 T3	0,966	4,579	3,621	2,655	0,958	26,52	73,48	-5,72
S 120 T3	0,940	4,543	3,592	2,652	0,951	26,39	73,61	-5,28
S 180 T3	0,966	4,082	3,267	2,301	0,815	26,16	73,84	-4,42
S 240 T3	0,930	3,685	2,903	1,973	0,782	28,38	71,62	-11,92
S 300 T3	0,967	4,585	3,641	2,674	0,944	26,09	73,91	-4,18
S 360 T3	0,948	4,766	3,778	2,830	0,988	25,88	74,12	-3,39
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
M 000 T3	0,972	4,617	3,619	2,647	0,998	27,38	72,62	-8,69
M 060 T3	0,937	4,688	3,627	2,690	1,061	28,29	71,71	-11,62
M 120 T3	0,982	4,496	3,525	2,543	0,971	27,63	72,37	-9,53
M 180 T3	0,946	4,202	3,292	2,346	0,910	27,95	72,05	-10,55
M 240 T3	0,965	3,715	2,853	1,888	0,862	31,35	68,65	-20,24
M 300 T3	0,950	4,564	3,579	2,629	0,985	27,26	72,74	-8,27
M 360 T3	0,970	4,872	3,766	2,796	1,106	28,34	71,66	-11,80
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
I 000 T3	0,933	4,939	3,908	2,975	1,031	25,74	74,26	-2,86
I 060 T3	0,980	5,074	3,984	3,004	1,090	26,62	73,38	-6,10
I 120 T3	0,939	4,891	3,829	2,890	1,062	26,87	73,13	-6,97
I 180 T3	0,969	4,776	3,764	2,795	1,012	26,58	73,42	-5,95
I 240 T3	0,936	3,967	3,085	2,149	0,882	29,10	70,90	-14,09
I 300 T3	0,983	5,054	3,967	2,984	1,087	26,70	73,30	-6,37
I 360 T3	0,923	5,081	4,036	3,113	1,045	25,13	74,87	-0,53

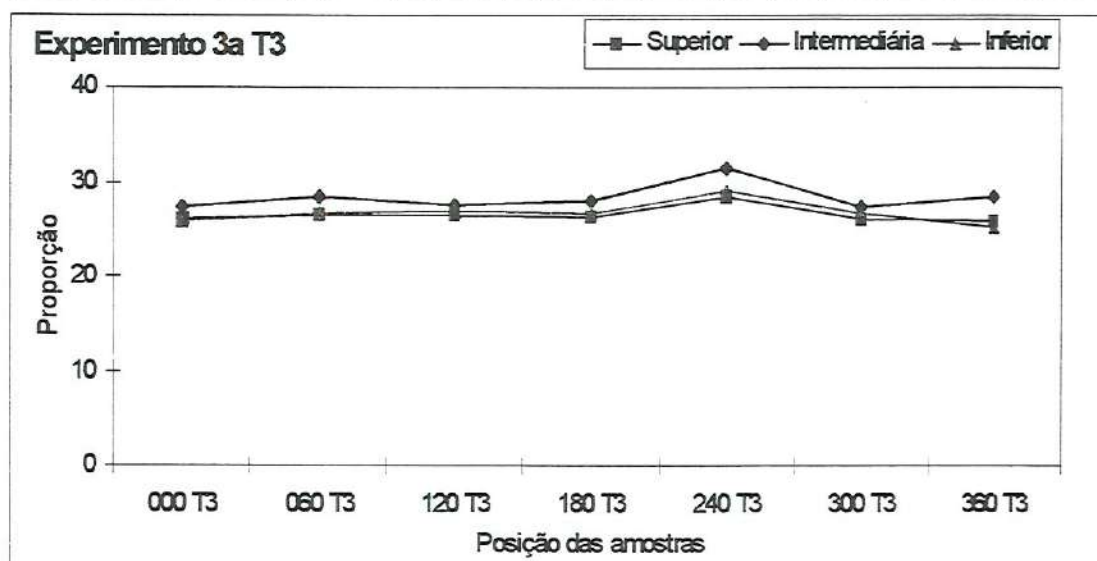


Figura 4.21 – Variação das proporções nas posições – experimento 3a.



Tabela 4.23 – Ensaio com velocidade de fluidização 2,0  $U_{MF}$ , areia 225 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
S 000 T4	0,970	4,296	3,440	2,470	0,856	25,74	74,26	-2,86
S 060 T4	0,938	4,525	3,570	2,632	0,955	26,62	73,38	-6,10
S 120 T4	0,964	4,558	3,609	2,645	0,949	26,41	73,59	-5,32
S 180 T4	0,940	4,726	3,672	2,732	1,054	27,84	72,16	-10,20
S 240 T4	0,961	4,655	3,682	2,721	0,973	26,34	73,66	-5,09
S 300 T4	0,940	4,597	3,631	2,691	0,966	26,42	73,58	-5,36
S 360 T4	0,966	4,522	3,573	2,607	0,949	26,69	73,31	-6,32
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
M 000 T4	0,953	4,390	3,467	2,514	0,923	26,85	73,15	-6,91
M 060 T4	0,936	4,491	3,504	2,568	0,987	27,76	72,24	-9,95
M 120 T4	0,948	4,578	3,582	2,634	0,996	27,44	72,56	-8,89
M 180 T4	0,932	4,756	3,678	2,746	1,078	28,19	71,81	-11,32
M 240 T4	0,958	4,626	3,613	2,655	1,013	27,62	72,38	-9,48
M 300 T4	0,936	4,591	3,578	2,642	1,013	27,72	72,28	-9,80
M 360 T4	0,960	4,578	3,581	2,621	0,997	27,56	72,44	-9,28
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
I 000 T4	0,973	4,707	3,739	2,766	0,968	25,92	74,08	-3,56
I 060 T4	0,934	4,911	3,831	2,897	1,080	27,16	72,84	-7,94
I 120 T4	0,948	4,869	3,761	2,813	1,108	28,26	71,74	-11,53
I 180 T4	0,973	5,120	4,027	3,054	1,093	26,36	73,64	-5,15
I 240 T4	0,930	4,837	3,814	2,884	1,023	26,18	73,82	-4,52
I 300 T4	0,957	4,955	3,912	2,955	1,043	26,09	73,91	-4,17
I 360 T4	0,943	4,900	3,836	2,893	1,064	26,89	73,11	-7,03

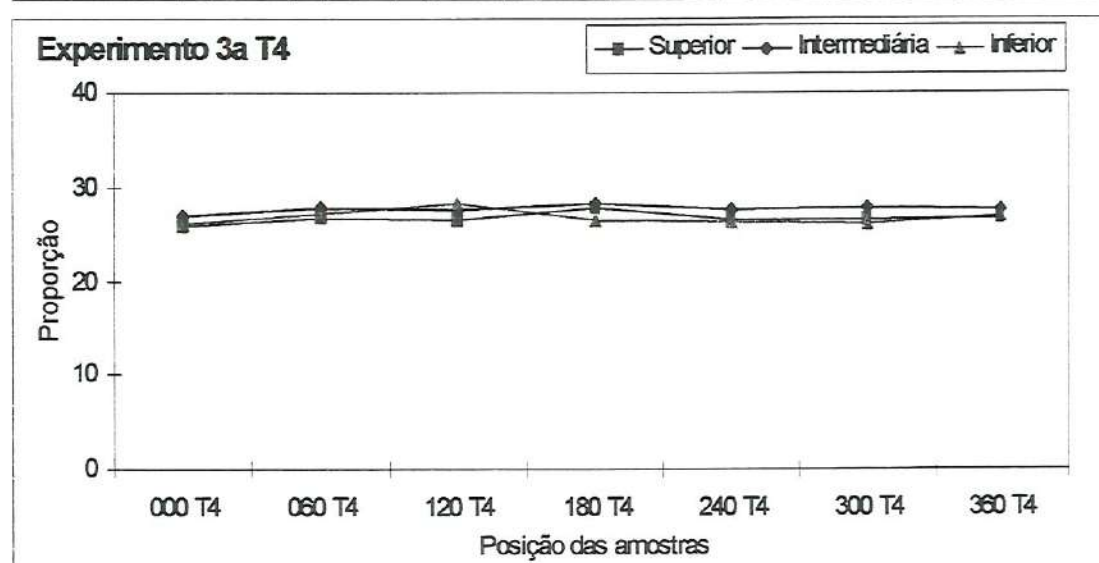


Figura 4.22 – Variação das proporções nas posições – experimento 3a.



Tabela 4.24 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,4  $U_{MF}$ , areia 450 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
S 000 T1	0,918	4,839	3,738	2,820	1,101	28,08	71,92	-10,97
S 060 T1	0,992	4,566	3,564	2,572	1,002	28,04	71,96	-10,83
S 120 T1	0,915	4,359	3,359	2,444	1,000	29,04	70,96	-13,90
S 180 T1	0,981	4,747	3,671	2,690	1,076	28,57	71,43	-12,50
S 240 T1	0,934	4,889	3,799	2,865	1,090	27,56	72,44	-9,29
S 300 T1	0,995	4,556	3,652	2,657	0,904	25,39	74,61	-1,52
S 360 T1	0,932	4,540	3,587	2,655	0,953	26,41	73,59	-5,35
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
M 000 T1	0,990	4,794	3,730	2,740	1,064	27,97	72,03	-10,62
M 060 T1	0,927	4,633	3,625	2,698	1,008	27,20	72,80	-8,09
M 120 T1	0,977	4,615	3,572	2,595	1,043	28,67	71,33	-12,80
M 180 T1	0,936	4,758	3,681	2,745	1,077	28,18	71,82	-11,28
M 240 T1	0,987	5,077	3,949	2,962	1,128	27,58	72,42	-9,35
M 300 T1	0,916	4,421	3,534	2,618	0,887	25,31	74,69	-1,21
M 360 T1	0,993	4,709	3,684	2,691	1,025	27,58	72,42	-9,37
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
I 000 T1	0,922	5,128	3,962	3,040	1,166	27,72	72,28	-9,82
I 060 T1	0,934	5,262	4,077	3,143	1,185	27,38	72,62	-8,69
I 120 T1	0,925	5,136	3,922	2,997	1,214	28,83	71,17	-13,28
I 180 T1	0,927	5,210	4,013	3,086	1,197	27,95	72,05	-10,55
I 240 T1	0,907	5,320	4,084	3,177	1,236	28,01	71,99	-10,74
I 300 T1	0,988	5,033	4,016	3,028	1,017	25,14	74,86	-0,57
I 360 T1	0,913	5,219	4,035	3,122	1,184	27,50	72,50	-9,08

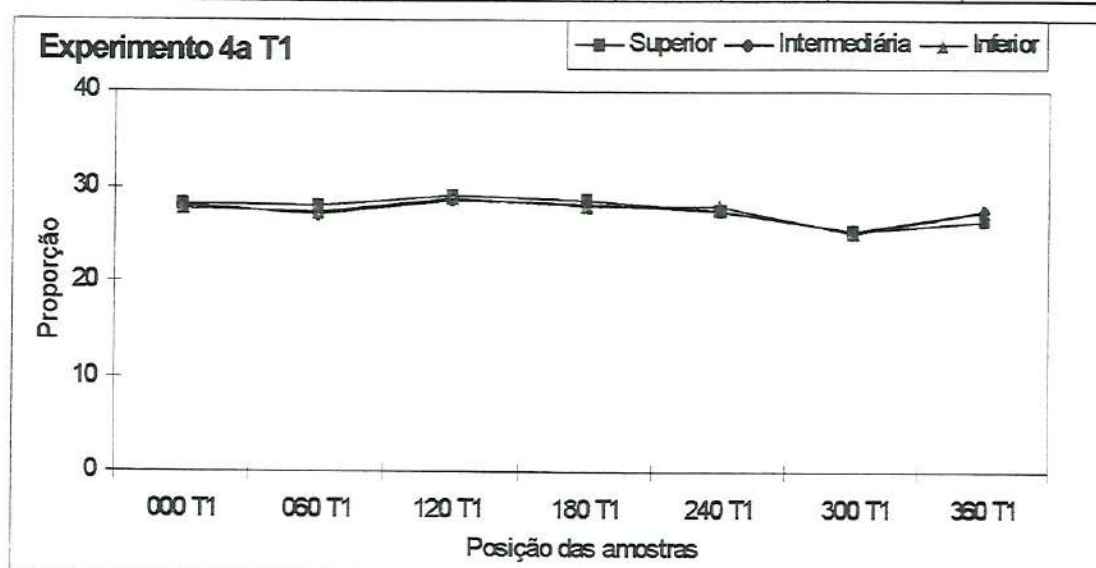


Figura 4.23 – Variação das proporções nas posições – experimento 4a.

Tabela 4.25 – Ensaio com velocidade de fluidização  $1,4 U_{MF}$ , areia  $450\mu\text{m}$  e traçador  $450\mu\text{m}$ .

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
S 000 T2	0,983	4,627	3,664	2,681	0,963	26,43	73,57	-5,40
S 060 T2	0,927	4,508	3,562	2,635	0,946	26,42	73,58	-5,36
S 120 T2	0,967	4,630	3,647	2,680	0,983	26,84	73,16	-6,84
S 180 T2	0,915	4,833	3,772	2,857	1,061	27,08	72,92	-7,68
S 240 T2	0,982	4,643	3,668	2,686	0,975	26,63	73,37	-6,13
S 300 T2	0,916	4,741	3,725	2,809	1,016	26,56	73,44	-5,88
S 360 T2	0,984	4,657	3,673	2,689	0,984	26,79	73,21	-6,68
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
M 000 T2	0,916	4,564	3,594	2,678	0,970	26,59	73,41	-5,98
M 060 T2	0,975	4,629	3,657	2,682	0,972	26,60	73,40	-6,02
M 120 T2	0,928	4,790	3,778	2,850	1,012	26,20	73,80	-4,59
M 180 T2	0,981	4,929	3,849	2,868	1,080	27,36	72,64	-8,61
M 240 T2	0,922	4,663	3,665	2,743	0,998	26,68	73,32	-6,29
M 300 T2	0,978	4,857	3,807	2,829	1,050	27,07	72,93	-7,64
M 360 T2	0,923	4,704	3,702	2,779	1,002	26,50	73,50	-5,66
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
I 000 T2	0,989	5,181	4,086	3,097	1,095	26,12	73,88	-4,29
I 060 T2	0,923	5,125	4,017	3,094	1,108	26,37	73,63	-5,19
I 120 T2	0,996	5,405	4,219	3,223	1,186	26,90	73,10	-7,06
I 180 T2	0,918	5,308	4,138	3,220	1,170	26,65	73,35	-6,20
I 240 T2	0,988	5,262	4,122	3,134	1,140	26,67	73,33	-6,27
I 300 T2	0,914	5,284	4,107	3,193	1,177	26,93	73,07	-7,18
I 360 T2	0,984	5,287	4,134	3,150	1,153	26,80	73,20	-6,70

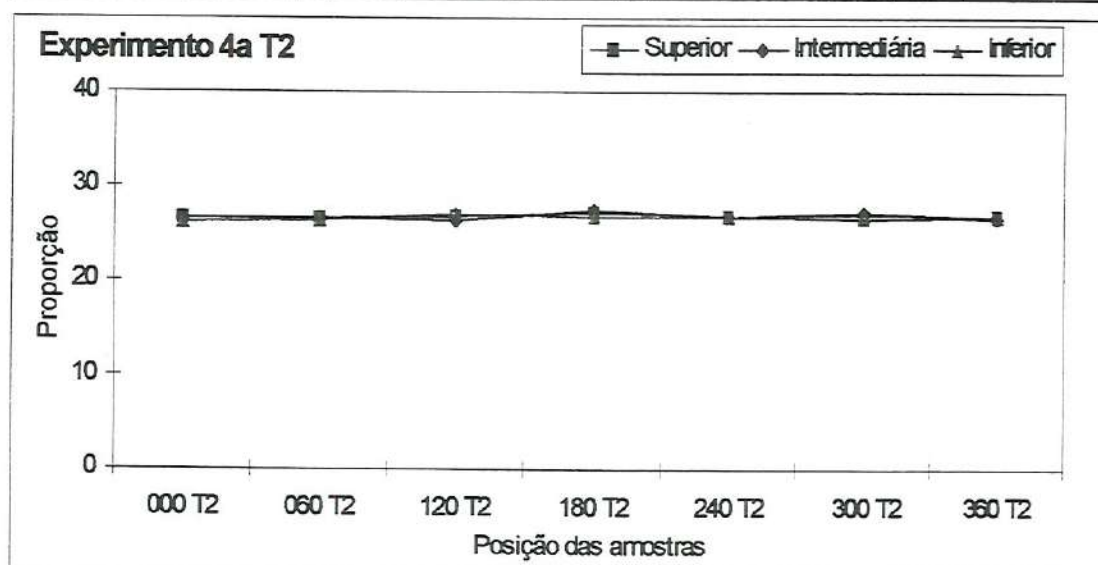


Figura 4.24 – Variação das proporções nas posições – experimento 4a.



Tabela 4.26 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,4  $U_{MF}$ , areia 450 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
S 000 T3	0,926	4,508	3,576	2,650	0,932	26,02	73,98	-3,92
S 060 T3	0,953	4,814	3,794	2,841	1,020	26,42	73,58	-5,37
S 120 T3	0,942	4,669	3,683	2,741	0,986	26,46	73,54	-5,50
S 180 T3	0,915	4,835	3,797	2,882	1,038	26,48	73,52	-5,59
S 240 T3	0,958	4,689	3,726	2,768	0,963	25,81	74,19	-3,14
S 300 T3	0,957	4,875	3,839	2,882	1,036	26,44	73,56	-5,45
S 360 T3	0,926	4,528	3,605	2,679	0,923	25,62	74,38	-2,44
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
M 000 T3	0,967	4,732	3,752	2,785	0,980	26,03	73,97	-3,95
M 060 T3	0,932	4,858	3,846	2,914	1,012	25,78	74,22	-3,01
M 120 T3	0,962	4,854	3,812	2,850	1,042	26,77	73,23	-6,62
M 180 T3	0,925	4,840	3,828	2,903	1,012	25,85	74,15	-3,29
M 240 T3	0,956	4,744	3,757	2,801	0,987	26,06	73,94	-4,05
M 300 T3	0,944	4,918	3,872	2,928	1,046	26,32	73,68	-5,02
M 360 T3	0,961	4,751	3,763	2,802	0,988	26,07	73,93	-4,10
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
I 000 T3	0,929	5,226	4,087	3,158	1,139	26,51	73,49	-5,68
I 060 T3	0,981	5,391	4,248	3,267	1,143	25,92	74,08	-3,54
I 120 T3	0,930	5,260	4,089	3,159	1,171	27,04	72,96	-7,56
I 180 T3	0,954	5,203	4,098	3,144	1,105	26,01	73,99	-3,87
I 240 T3	0,937	5,232	4,095	3,158	1,137	26,47	73,53	-5,56
I 300 T3	0,962	5,345	4,156	3,194	1,189	27,13	72,87	-7,84
I 360 T3	0,920	5,356	4,177	3,257	1,179	26,58	73,42	-5,94

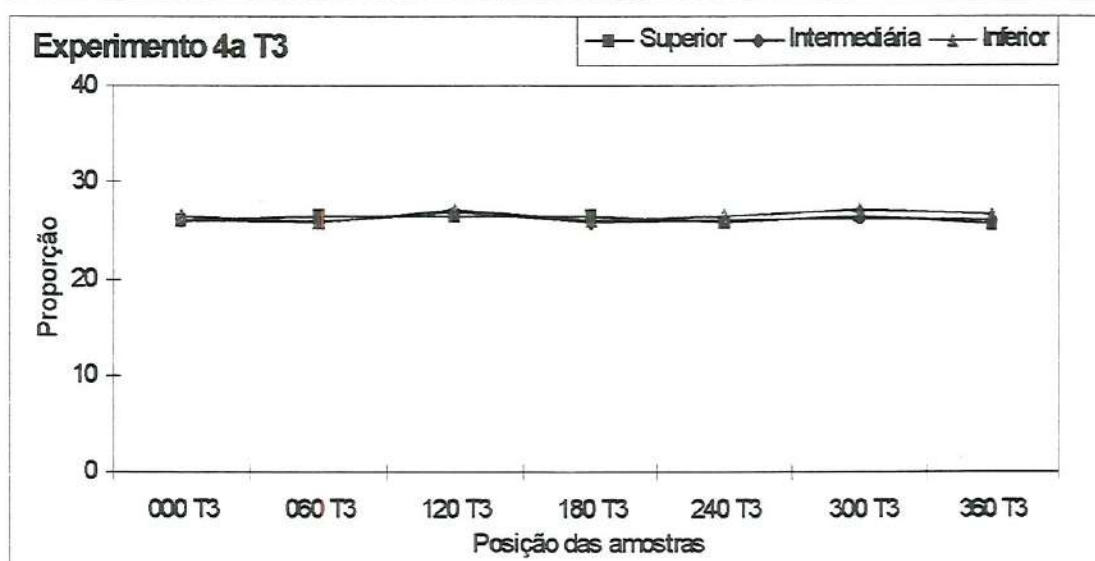


Figura 4.25 – Variação das proporções nas posições – experimento 4a.



Tabela 4.27 – Ensaio com velocidade de fluidização  $1,4 U_{MF}$ , areia  $450\mu\text{m}$  e traçador  $450\mu\text{m}$ .

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
S 000 T4	0,961	4,894	3,864	2,903	1,030	26,19	73,81	-4,54
S 060 T4	0,941	4,939	3,907	2,966	1,032	25,81	74,19	-3,15
S 120 T4	0,958	4,666	3,684	2,726	0,982	26,48	73,52	-5,60
S 180 T4	0,919	4,832	3,787	2,868	1,045	26,71	73,29	-6,39
S 240 T4	0,955	4,704	3,733	2,778	0,971	25,90	74,10	-3,48
S 300 T4	0,927	4,795	3,774	2,847	1,021	26,40	73,60	-5,29
S 360 T4	0,967	4,969	3,936	2,969	1,033	25,81	74,19	-3,15
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
M 000 T4	0,940	4,809	3,813	2,873	0,996	25,74	74,26	-2,89
M 060 T4	0,966	4,874	3,869	2,903	1,005	25,72	74,28	-2,79
M 120 T4	0,918	4,729	3,733	2,815	0,996	26,13	73,87	-4,34
M 180 T4	0,944	4,972	3,925	2,981	1,047	25,99	74,01	-3,82
M 240 T4	0,924	4,847	3,842	2,918	1,005	25,62	74,38	-2,41
M 300 T4	0,982	4,780	3,804	2,822	0,976	25,70	74,30	-2,72
M 360 T4	0,912	4,880	3,849	2,937	1,031	25,98	74,02	-3,78
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
I 000 T4	0,959	5,350	4,199	3,240	1,151	26,21	73,79	-4,63
I 060 T4	0,918	5,286	4,128	3,210	1,158	26,51	73,49	-5,70
I 120 T4	0,956	5,268	4,127	3,171	1,141	26,46	73,54	-5,52
I 180 T4	0,929	5,435	4,268	3,339	1,167	25,90	74,10	-3,47
I 240 T4	0,955	5,320	4,200	3,245	1,120	25,66	74,34	-2,57
I 300 T4	0,923	5,230	4,093	3,170	1,137	26,40	73,60	-5,30
I 360 T4	0,945	5,408	4,249	3,304	1,159	25,97	74,03	-3,73

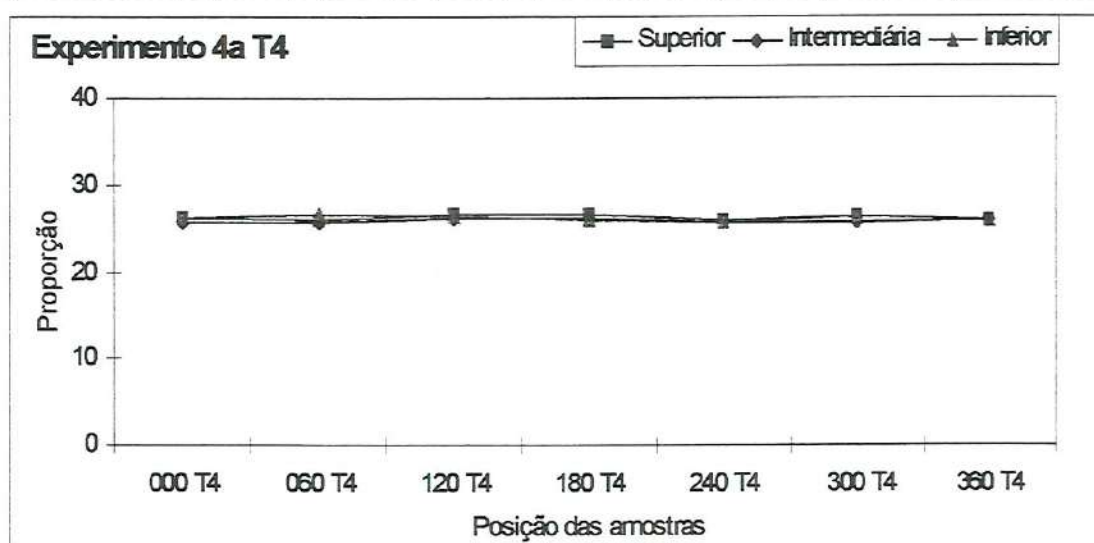


Figura 4.26 – Variação das proporções nas posições – experimento 4a.

Tabela 4.28 – Ensaio com velocidade de fluidização  $1,7 U_{MF}$ , areia  $450\mu\text{m}$  e traçador  $450\mu\text{m}$ .

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
S 000 T1	0,933	5,198	4,088	3,155	1,110	26,03	73,97	-3,94
S 060 T1	0,937	4,888	3,846	2,909	1,042	26,37	73,63	-5,21
S 120 T1	0,922	4,738	3,764	2,842	0,974	25,52	74,48	-2,05
S 180 T1	0,934	4,459	3,571	2,637	0,888	25,19	74,81	-0,76
S 240 T1	0,912	4,553	3,521	2,609	1,032	28,34	71,66	-11,80
S 300 T1	0,933	4,687	3,630	2,697	1,057	28,16	71,84	-11,21
S 360 T1	0,917	4,636	3,599	2,682	1,037	27,88	72,12	-10,34
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
M 000 T1	0,951	5,070	3,971	3,020	1,099	26,68	73,32	-6,30
M 060 T1	0,918	4,865	3,870	2,952	0,995	25,21	74,79	-0,83
M 120 T1	0,944	4,837	3,850	2,906	0,987	25,35	74,65	-1,39
M 180 T1	0,912	4,540	3,626	2,714	0,914	25,19	74,81	-0,77
M 240 T1	0,950	4,548	3,548	2,598	1,000	27,79	72,21	-10,05
M 300 T1	0,918	4,611	3,545	2,627	1,066	28,87	71,13	-13,39
M 360 T1	0,930	4,581	3,579	2,649	1,002	27,44	72,56	-8,91
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
I 000 T1	0,906	5,438	4,216	3,310	1,222	26,96	73,04	-7,28
I 060 T1	0,939	5,444	4,319	3,380	1,125	24,97	75,03	0,11
I 120 T1	0,928	5,366	4,224	3,296	1,142	25,73	74,27	-2,85
I 180 T1	0,938	5,028	4,010	3,072	1,018	24,89	75,11	0,44
I 240 T1	0,915	4,913	3,786	2,871	1,127	28,19	71,81	-11,31
I 300 T1	0,945	5,108	3,902	2,957	1,206	28,97	71,03	-13,70
I 360 T1	0,911	5,244	4,056	3,145	1,188	27,42	72,58	-8,82

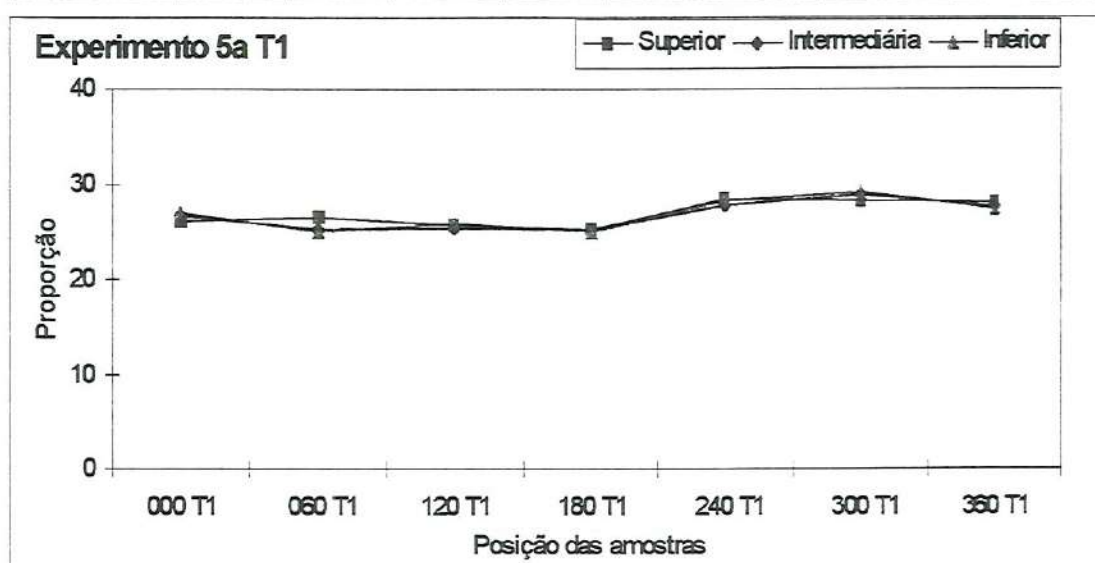


Figura 4.27 – Variação das proporções nas posições – experimento 5a.



Tabela 4.29 – Ensaio com velocidade de fluidização  $1,7 U_{MF}$ , areia  $450\mu\text{m}$  e traçador  $450\mu\text{m}$ .

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
S 000 T2	0,938	5,176	4,086	3,148	1,090	25,72	74,28	-2,80
S 060 T2	0,912	4,916	3,890	2,978	1,026	25,62	74,38	-2,44
S 120 T2	0,943	4,828	3,809	2,866	1,019	26,23	73,77	-4,69
S 180 T2	0,905	4,804	3,801	2,896	1,003	25,72	74,28	-2,82
S 240 T2	0,951	4,627	3,683	2,732	0,944	25,68	74,32	-2,65
S 300 T2	0,911	4,724	3,746	2,835	0,978	25,65	74,35	-2,53
S 360 T2	0,952	4,804	3,802	2,850	1,002	26,01	73,99	-3,89
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
M 000 T2	0,913	5,016	3,975	3,062	1,041	25,37	74,63	-1,46
M 060 T2	0,926	4,813	3,827	2,901	0,986	25,37	74,63	-1,45
M 120 T2	0,911	4,628	3,653	2,742	0,975	26,23	73,77	-4,69
M 180 T2	0,919	4,843	3,853	2,934	0,990	25,23	74,77	-0,91
M 240 T2	0,912	4,569	3,651	2,739	0,918	25,10	74,90	-0,41
M 300 T2	0,945	4,670	3,731	2,786	0,939	25,21	74,79	-0,83
M 360 T2	0,901	4,700	3,745	2,844	0,955	25,14	74,86	-0,55
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
I 000 T2	0,914	5,546	4,355	3,441	1,191	25,71	74,29	-2,77
I 060 T2	0,907	5,354	4,234	3,327	1,120	25,19	74,81	-0,74
I 120 T2	0,917	4,951	3,922	3,005	1,029	25,51	74,49	-1,99
I 180 T2	0,922	5,309	4,209	3,287	1,100	25,07	74,93	-0,30
I 240 T2	0,910	4,982	3,918	3,008	1,064	26,13	73,87	-4,32
I 300 T2	0,896	5,290	4,151	3,255	1,139	25,92	74,08	-3,56
I 360 T2	0,925	5,197	4,097	3,172	1,100	25,75	74,25	-2,91

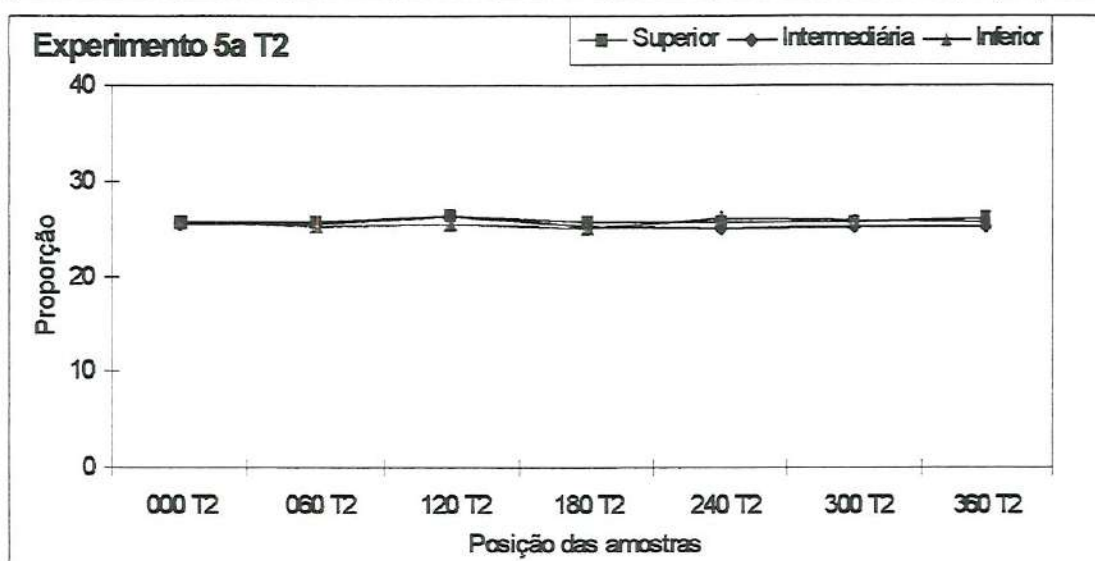


Figura 4.28 – Variação das proporções nas posições – experimento 5a.



Tabela 4.30 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,7  $U_{MF}$ , areia 450 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
S 000 T3	0,912	4,656	3,694	2,782	0,962	25,69	74,31	-2,70
S 060 T3	0,917	4,650	3,713	2,796	0,937	25,10	74,90	-0,40
S 120 T3	0,911	4,565	3,639	2,728	0,926	25,34	74,66	-1,35
S 180 T3	0,916	4,671	3,721	2,805	0,950	25,30	74,70	-1,18
S 240 T3	0,897	4,718	3,746	2,849	0,972	25,44	74,56	-1,72
S 300 T3	0,913	4,695	3,722	2,809	0,973	25,73	74,27	-2,83
S 360 T3	0,911	4,763	3,805	2,894	0,958	24,87	75,13	0,52
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
M 000 T3	0,920	4,726	3,764	2,844	0,962	25,28	74,72	-1,09
M 060 T3	0,910	4,568	3,644	2,734	0,924	25,26	74,74	-1,03
M 120 T3	0,922	4,509	3,614	2,692	0,895	24,95	75,05	0,20
M 180 T3	0,900	4,551	3,624	2,724	0,927	25,39	74,61	-1,54
M 240 T3	0,922	4,649	3,711	2,789	0,938	25,17	74,83	-0,67
M 300 T3	0,907	4,724	3,776	2,869	0,948	24,84	75,16	0,66
M 360 T3	0,925	4,703	3,745	2,820	0,958	25,36	74,64	-1,41
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
I 000 T3	0,916	5,173	4,089	3,173	1,084	25,46	74,54	-1,82
I 060 T3	0,925	5,018	3,990	3,065	1,028	25,12	74,88	-0,46
I 120 T3	0,915	5,095	4,042	3,127	1,053	25,19	74,81	-0,76
I 180 T3	0,917	5,043	3,986	3,069	1,057	25,62	74,38	-2,41
I 240 T3	0,896	5,017	3,949	3,053	1,068	25,92	74,08	-3,53
I 300 T3	0,913	5,099	4,034	3,121	1,065	25,44	74,56	-1,74
I 360 T3	0,916	5,092	4,040	3,124	1,052	25,19	74,81	-0,76

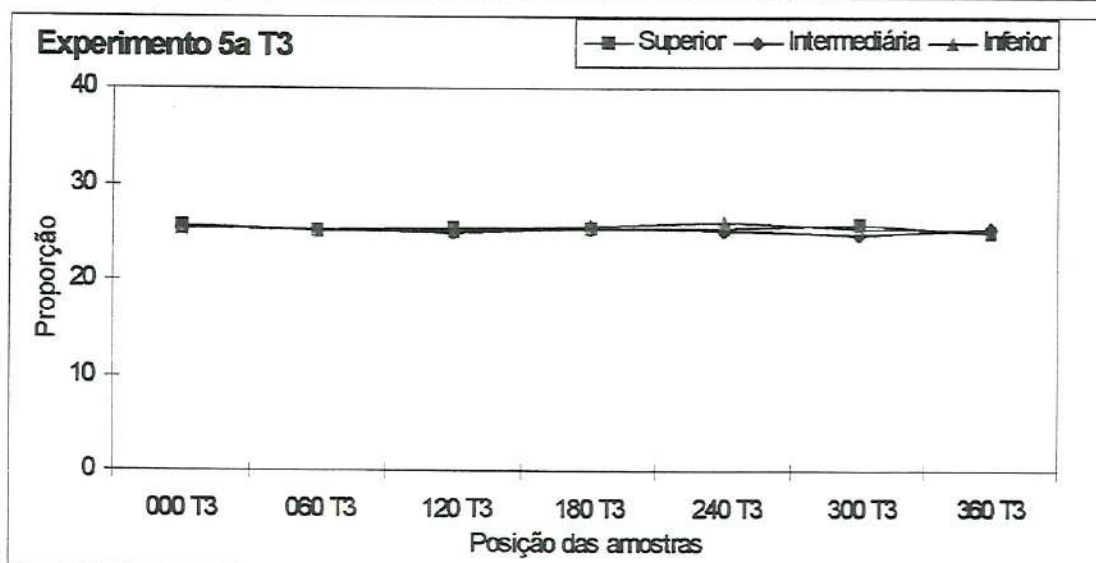


Figura 4.29 – Variação das proporções nas posições – experimento 5a.

Tabela 4.31 – Ensaio com velocidade de fluidização  $1,7 U_{MF}$ , areia  $450\mu\text{m}$  e traçador  $450\mu\text{m}$ .

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
S 000 T4	0,921	4,854	3,890	2,969	0,964	24,51	75,49	2,00
S 060 T4	0,926	4,941	3,932	3,006	1,009	25,13	74,87	-0,52
S 120 T4	0,920	4,440	3,556	2,636	0,884	25,11	74,89	-0,45
S 180 T4	0,940	4,331	3,460	2,520	0,871	25,69	74,31	-2,67
S 240 T4	0,928	4,342	3,494	2,566	0,848	24,84	75,16	0,65
S 300 T4	0,943	4,817	3,829	2,886	0,988	25,50	74,50	-1,97
S 360 T4	0,920	4,798	3,834	2,914	0,964	24,86	75,14	0,57
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
M 000 T4	0,911	4,812	3,817	2,906	0,995	25,51	74,49	-1,98
M 060 T4	0,951	4,844	3,865	2,914	0,979	25,15	74,85	-0,59
M 120 T4	0,916	4,537	3,614	2,698	0,923	25,49	74,51	-1,92
M 180 T4	0,943	4,514	3,614	2,671	0,900	25,20	74,80	-0,81
M 240 T4	0,909	4,530	3,638	2,729	0,892	24,63	75,37	1,49
M 300 T4	0,912	4,718	3,749	2,837	0,969	25,46	74,54	-1,81
M 360 T4	0,919	4,699	3,765	2,846	0,934	24,71	75,29	1,18
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
I 000 T4	0,937	5,542	4,383	3,446	1,159	25,17	74,83	-0,67
I 060 T4	0,921	5,238	4,176	3,255	1,062	24,60	75,40	1,62
I 120 T4	0,939	4,987	3,949	3,010	1,038	25,64	74,36	-2,50
I 180 T4	0,914	4,982	3,954	3,040	1,028	25,27	74,73	-1,07
I 240 T4	0,934	5,031	4,004	3,070	1,027	25,07	74,93	-0,27
I 300 T4	0,898	5,102	4,044	3,146	1,058	25,17	74,83	-0,66
I 360 T4	0,954	5,217	4,150	3,196	1,067	25,03	74,97	-0,12

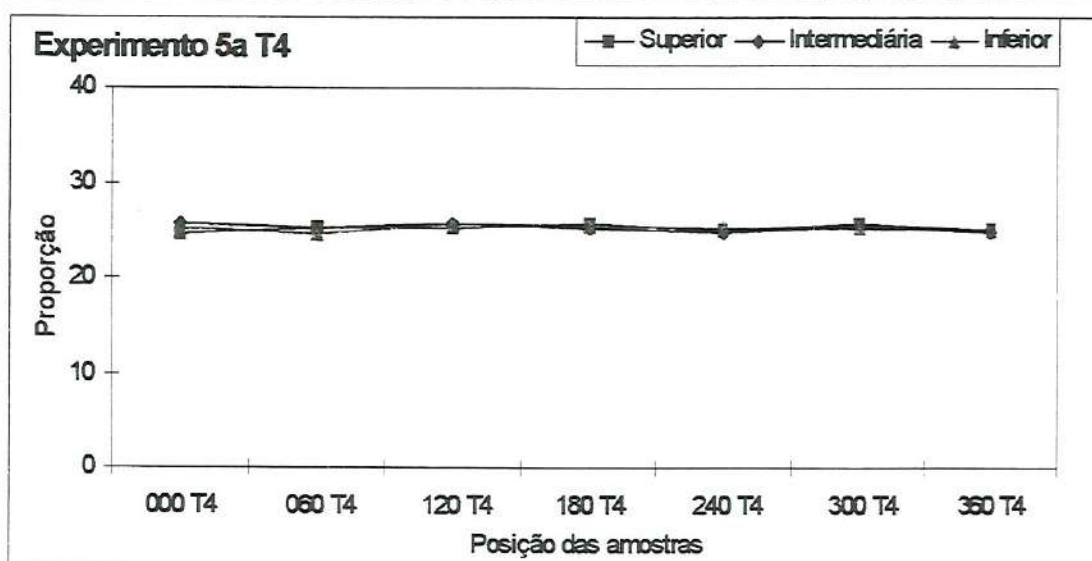


Figura 4.30 – Variação das proporções nas posições – experimento 5a.



Tabela 4.32 – Ensaios com velocidade de fluidização 2,0  $U_{MF}$ , areia 450 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
S 000 T1	0,900	4,994	3,993	3,093	1,001	24,45	75,55	2,25
S 060 T1	0,917	4,140	3,340	2,423	0,800	24,82	75,18	0,72
S 120 T1	0,905	4,504	3,598	2,693	0,906	25,17	74,83	-0,69
S 180 T1	0,931	4,727	3,795	2,864	0,932	24,55	75,45	1,82
S 240 T1	0,911	4,669	3,734	2,823	0,935	24,88	75,12	0,48
S 300 T1	0,915	4,735	3,798	2,883	0,937	24,53	75,47	1,92
S 360 T1	0,918	4,831	3,867	2,949	0,964	24,64	75,36	1,48
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
M 000 T1	0,939	4,546	3,678	2,739	0,868	24,06	75,94	3,89
M 060 T1	0,923	4,249	3,437	2,514	0,812	24,41	75,59	2,40
M 120 T1	0,961	4,407	3,564	2,603	0,843	24,46	75,54	2,19
M 180 T1	0,912	4,410	3,568	2,656	0,842	24,07	75,93	3,86
M 240 T1	0,923	4,619	3,698	2,775	0,921	24,92	75,08	0,33
M 300 T1	0,918	4,627	3,705	2,787	0,922	24,86	75,14	0,57
M 360 T1	0,924	4,625	3,731	2,807	0,894	24,16	75,84	3,50
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
I 000 T1	0,937	4,540	3,686	2,749	0,854	23,70	76,30	5,47
I 060 T1	0,943	4,508	3,650	2,707	0,858	24,07	75,93	3,88
I 120 T1	0,923	4,517	3,655	2,732	0,862	23,98	76,02	4,23
I 180 T1	0,938	4,842	3,879	2,941	0,963	24,67	75,33	1,35
I 240 T1	0,925	4,899	3,908	2,983	0,991	24,94	75,06	0,25
I 300 T1	0,954	4,912	3,915	2,961	0,997	25,19	74,81	-0,75
I 360 T1	0,916	5,078	4,025	3,109	1,053	25,30	74,70	-1,19

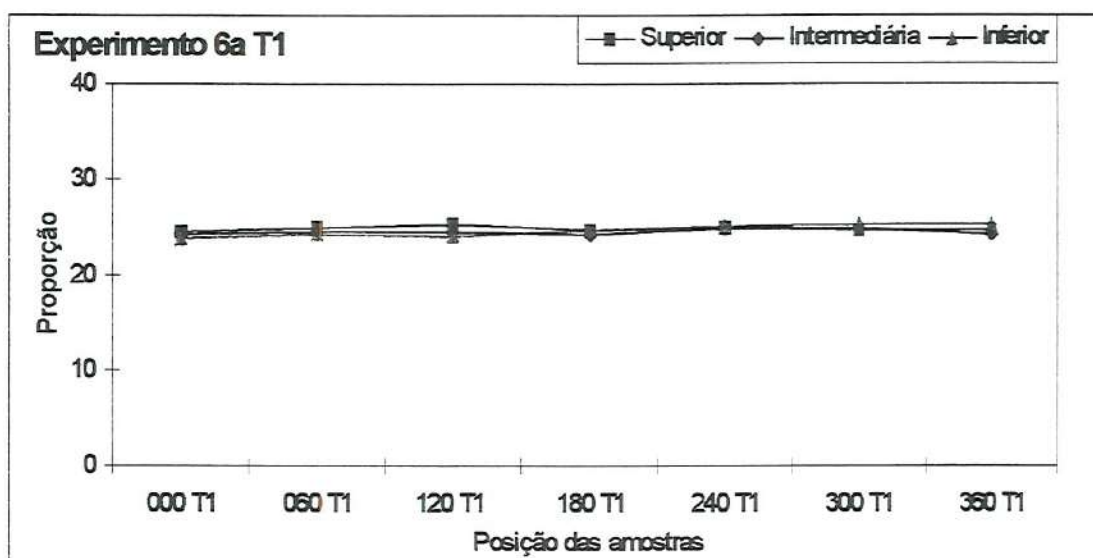


Figura 4.31 – Variação das proporções nas posições – experimento 6a.



Tabela 4.33 – Ensaio com velocidade de fluidização 2,0  $U_{MF}$ , areia 450 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
S 000 T2	0,926	4,522	3,634	2,708	0,888	24,69	75,31	1,24
S 060 T2	0,933	4,806	3,861	2,928	0,945	24,40	75,60	2,46
S 120 T2	0,927	4,797	3,840	2,913	0,957	24,73	75,27	1,10
S 180 T2	0,908	4,624	3,704	2,796	0,920	24,76	75,24	0,98
S 240 T2	0,917	4,614	3,698	2,781	0,916	24,78	75,22	0,90
S 300 T2	0,921	4,743	3,799	2,878	0,944	24,70	75,30	1,22
S 360 T2	0,930	4,721	3,788	2,858	0,933	24,61	75,39	1,58
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
M 000 T2	0,925	4,534	3,667	2,742	0,867	24,02	75,98	4,07
M 060 T2	0,927	4,660	3,747	2,820	0,913	24,46	75,54	2,22
M 120 T2	0,914	4,643	3,737	2,823	0,906	24,30	75,70	2,90
M 180 T2	0,920	4,513	3,634	2,714	0,879	24,46	75,54	2,19
M 240 T2	0,911	4,538	3,652	2,741	0,886	24,43	75,57	2,34
M 300 T2	0,928	4,701	3,775	2,847	0,926	24,54	75,46	1,86
M 360 T2	0,922	4,660	3,736	2,814	0,924	24,72	75,28	1,14
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
I 000 T2	0,921	4,936	3,949	3,028	0,987	24,58	75,42	1,70
I 060 T2	0,912	5,109	4,085	3,173	1,024	24,40	75,60	2,47
I 120 T2	0,914	5,222	4,167	3,253	1,055	24,49	75,51	2,09
I 180 T2	0,917	4,903	3,914	2,997	0,989	24,81	75,19	0,76
I 240 T2	0,918	4,990	3,990	3,072	1,000	24,56	75,44	1,80
I 300 T2	0,920	5,091	4,074	3,154	1,017	24,38	75,62	2,53
I 360 T2	0,929	5,093	4,069	3,140	1,024	24,59	75,41	1,66

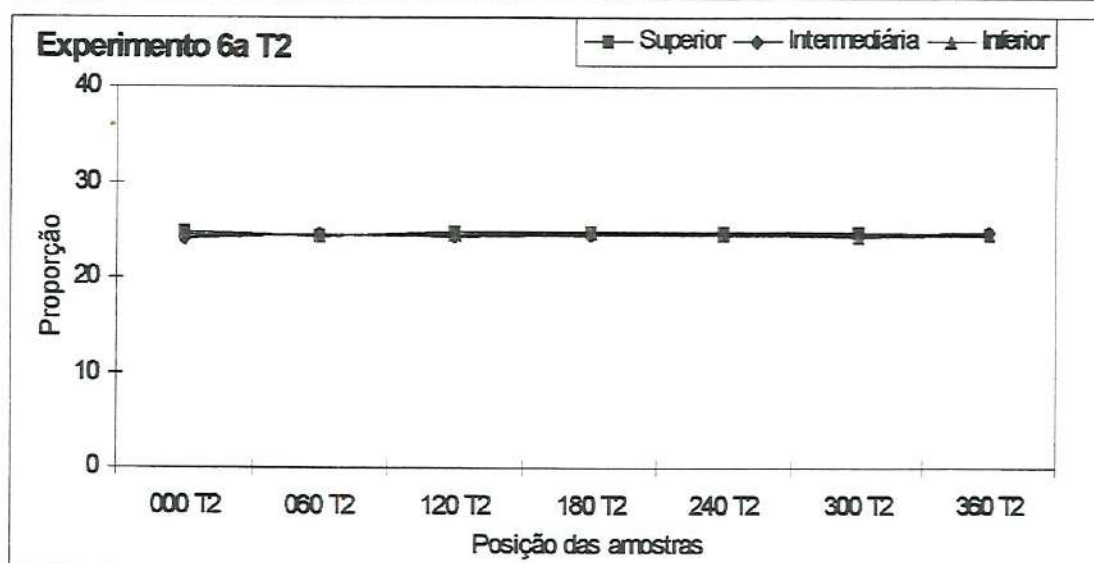


Figura 4.32 – Variação das proporções nas posições – experimento 6a.

Tabela 4.34 – Ensaio com velocidade de fluidização 2,0  $U_{MF}$ , areia 450 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
S 000 T3	0,936	5,060	4,058	3,122	1,002	24,30	75,70	2,89
S 060 T3	0,932	4,890	3,905	2,973	0,985	24,89	75,11	0,46
S 120 T3	0,921	4,838	3,880	2,959	0,958	24,46	75,54	2,22
S 180 T3	0,926	4,604	3,682	2,756	0,922	25,07	74,93	-0,27
S 240 T3	0,927	4,777	3,820	2,893	0,957	24,86	75,14	0,57
S 300 T3	0,923	4,824	3,890	2,967	0,934	23,94	76,06	4,42
S 360 T3	0,921	4,775	3,800	2,879	0,975	25,30	74,70	-1,18
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
M 000 T3	0,929	4,923	3,940	3,011	0,983	24,61	75,39	1,58
M 060 T3	0,896	4,780	3,827	2,931	0,953	24,54	75,46	1,89
M 120 T3	0,911	4,607	3,696	2,785	0,911	24,65	75,35	1,43
M 180 T3	0,909	4,558	3,667	2,758	0,891	24,42	75,58	2,38
M 240 T3	0,931	4,772	3,830	2,899	0,942	24,52	75,48	1,94
M 300 T3	0,908	4,717	3,772	2,864	0,945	24,81	75,19	0,77
M 360 T3	0,918	4,751	3,822	2,904	0,929	24,24	75,76	3,15
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
I 000 T3	0,916	5,300	4,238	3,322	1,062	24,22	75,78	3,20
I 060 T3	0,921	5,380	4,279	3,358	1,101	24,69	75,31	1,25
I 120 T3	0,915	5,003	3,989	3,074	1,014	24,80	75,20	0,79
I 180 T3	0,936	5,064	4,054	3,118	1,010	24,47	75,53	2,18
I 240 T3	0,913	5,124	4,084	3,171	1,040	24,70	75,30	1,23
I 300 T3	0,919	5,130	4,074	3,155	1,056	25,08	74,92	-0,31
I 360 T3	0,911	5,225	4,177	3,266	1,048	24,29	75,71	2,91

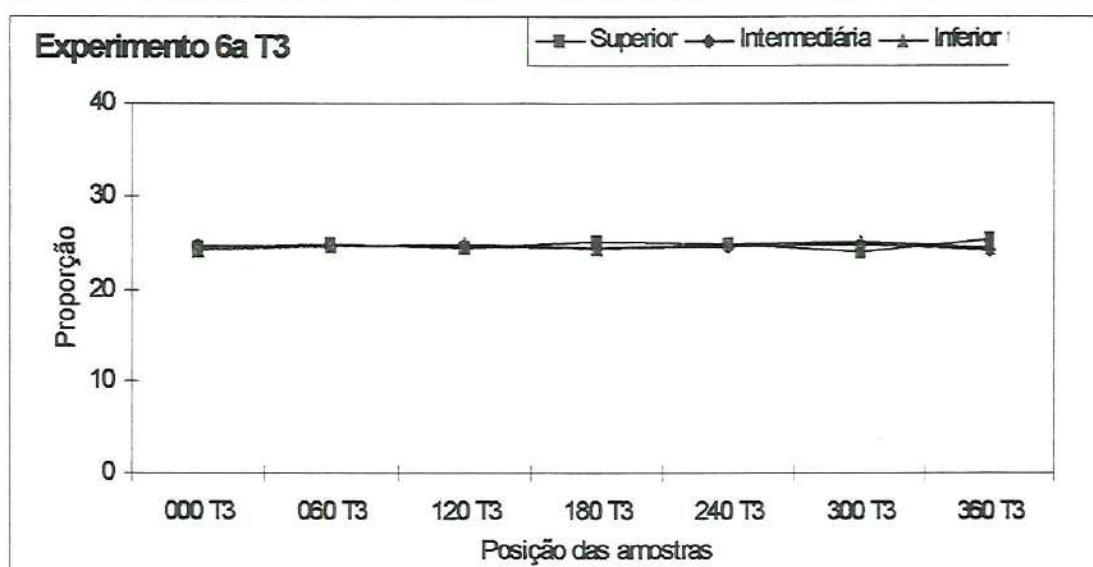


Figura 4.33 – Variação das proporções nas posições – experimento 6a.



Tabela 4.35 – Ensaio com velocidade de fluidização 2,0  $U_{MF}$ , areia 450 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
S 000 T4	0,920	4,388	3,520	2,600	0,868	25,03	74,97	-0,12
S 060 T4	0,926	4,614	3,708	2,782	0,906	24,57	75,43	1,77
S 120 T4	0,918	4,733	3,821	2,903	0,912	23,91	76,09	4,58
S 180 T4	0,925	4,522	3,621	2,696	0,901	25,05	74,95	-0,19
S 240 T4	0,934	4,683	3,774	2,840	0,909	24,25	75,75	3,11
S 300 T4	0,939	4,835	3,885	2,946	0,950	24,38	75,62	2,53
S 360 T4	0,928	4,838	3,865	2,937	0,973	24,88	75,12	0,46
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
M 000 T4	0,915	4,386	3,539	2,624	0,847	24,40	75,60	2,45
M 060 T4	0,916	4,674	3,736	2,820	0,938	24,96	75,04	0,16
M 120 T4	0,908	4,748	3,826	2,918	0,922	24,01	75,99	4,12
M 180 T4	0,920	4,480	3,620	2,700	0,860	24,16	75,84	3,49
M 240 T4	0,917	4,680	3,745	2,828	0,935	24,85	75,15	0,61
M 300 T4	0,919	4,684	3,740	2,821	0,944	25,07	74,93	-0,29
M 360 T4	0,920	4,707	3,760	2,840	0,947	25,01	74,99	-0,03
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
I 000 T4	0,918	4,876	3,905	2,987	0,971	24,53	75,47	1,91
I 060 T4	0,914	5,194	4,135	3,221	1,059	24,74	75,26	1,04
I 120 T4	0,925	5,201	4,145	3,220	1,056	24,70	75,30	1,23
I 180 T4	0,906	4,993	3,986	3,080	1,007	24,64	75,36	1,46
I 240 T4	0,910	5,114	4,062	3,152	1,052	25,02	74,98	-0,10
I 300 T4	0,916	5,090	4,051	3,135	1,039	24,89	75,11	0,43
I 360 T4	0,923	5,243	4,165	3,242	1,078	24,95	75,05	0,19

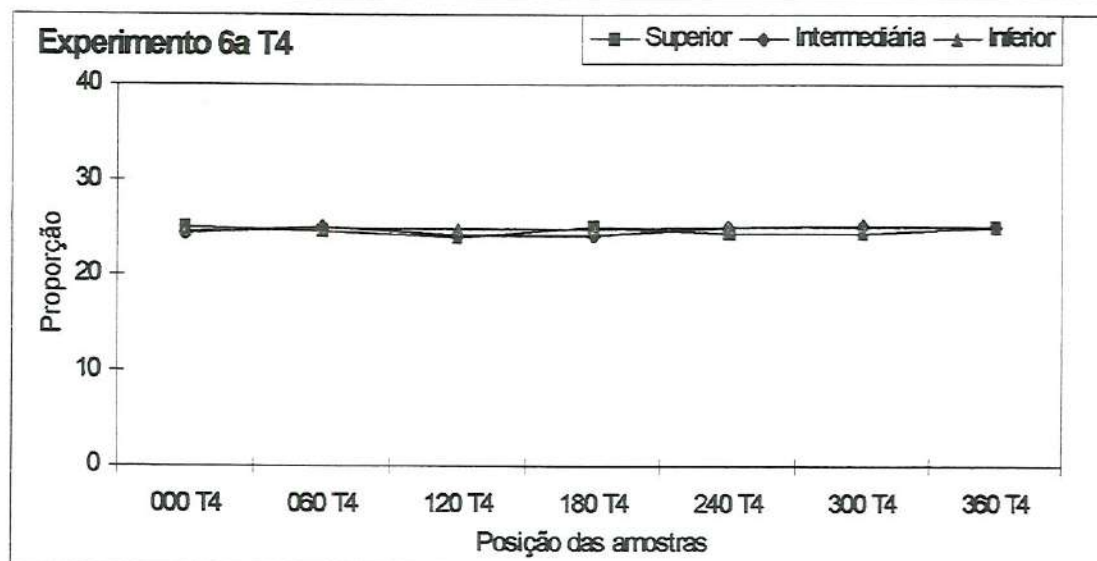


Figura 4.34 – Variação das proporções nas posições – experimento 6a.



#### 4.4 – Repetição dos experimentos

Para verificar a repetibilidade dos resultados do item anterior os experimentos foram executados mais duas vezes e estão colocados nos anexos B e C desse trabalho.

#### 4.5 – Variações nas composições do traçador em função do tempo

Para verificar a evolução das variações nas composições das amostras em relação aos tempos de ensaio, 1, 4, 7 e 10 minutos, foram feitas as figuras 4.35 a 4.52.

As figuras 4.35 a 4.37 se referem aos experimentos 1a, 1b e 1c com velocidades de fluidização de  $1,4 U_{MF}$ .

As figuras 4.38 a 4.40 se referem aos experimentos 2a, 2b e 2c com velocidades de fluidização de  $1,7 U_{MF}$ .

As figuras 4.41 a 4.43 se referem aos experimentos 3a, 3b e 3c com velocidades de fluidização de  $2,0 U_{MF}$ .

As figuras 4.44 a 4.46 se referem aos experimentos 4a, 4b e 4c com velocidades de fluidização de  $1,4 U_{MF}$ .

As figuras 4.47 a 4.49 se referem aos experimentos 5a, 5b e 5c com velocidades de fluidização de  $1,7 U_{MF}$ .

As figuras 4.50 a 4.52 se referem aos experimentos 6a, 6b e 6c com velocidades de fluidização de  $2,0 U_{MF}$ .

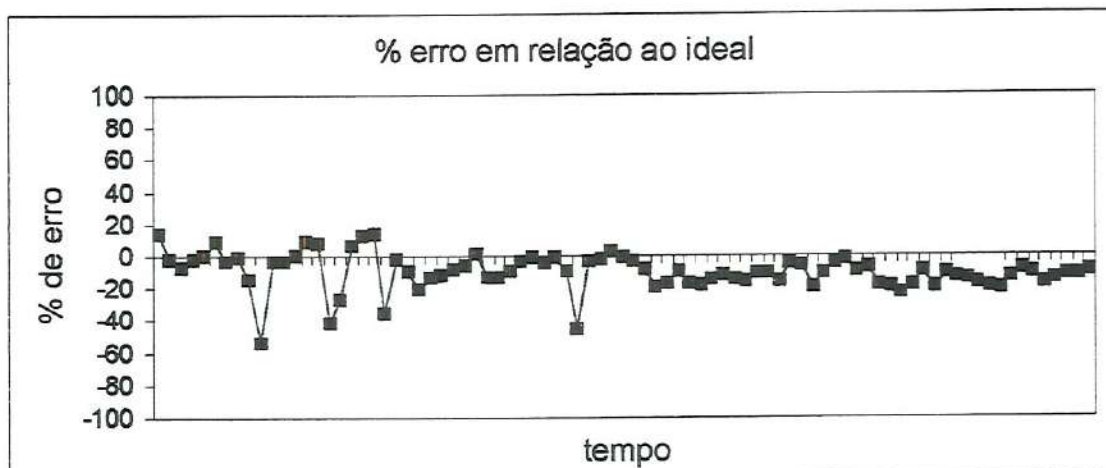


Figura 4.35 – Variações das proporções do traçador,  $U_{FL} = 1,4 U_{MF}$ . Exp. 1a.



Figura 4.36 – Variações das proporções do traçador,  $U_{FL} = 1,4 U_{MF}$ . Exp. 1b.



Figura 4.37 – Variações das proporções do traçador,  $U_{FL} = 1,4 U_{MF}$ . Exp. 1c.



Figura 4.38 – Variações das proporções do traçador,  $U_{FL} = 1,7U_{MF}$ . Exp. 2a.

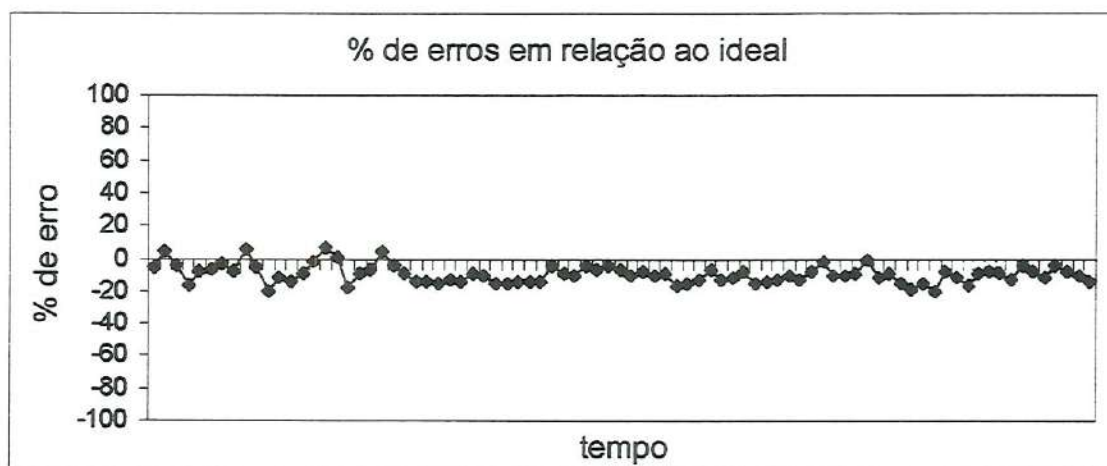


Figura 4.39 – Variações das proporções do traçador,  $U_{FL} = 1,7U_{MF}$ . Exp. 2b.

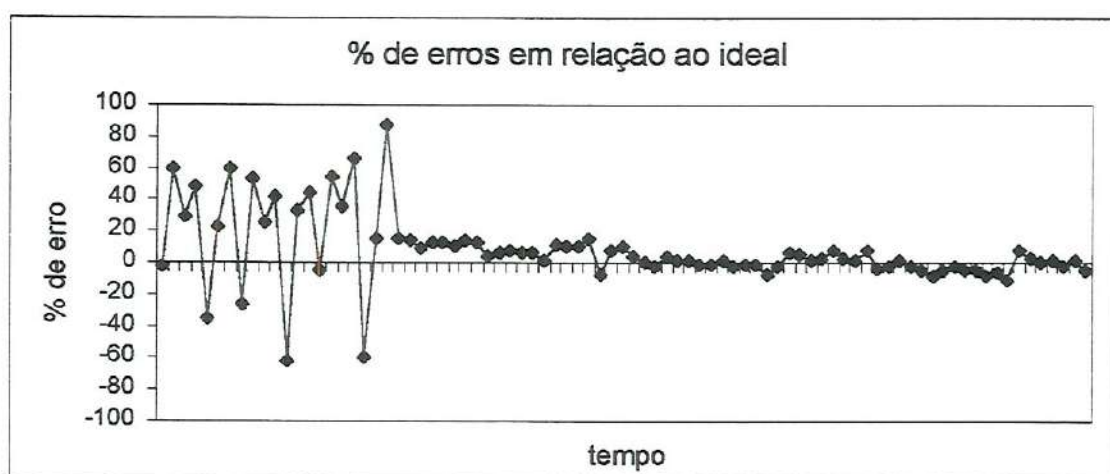


Figura 4.40 – Variações das proporções do traçador,  $U_{FL} = 1,7U_{MF}$ . Exp. 2c.





Figura 4.41 – Variações das proporções do traçador,  $U_{FL} = 2,0 U_{MF}$ . Exp. 3a.



Figura 4.42 – Variações das proporções do traçador  $U_{FL} = 2,0 U_{MF}$ . Exp. 3b.

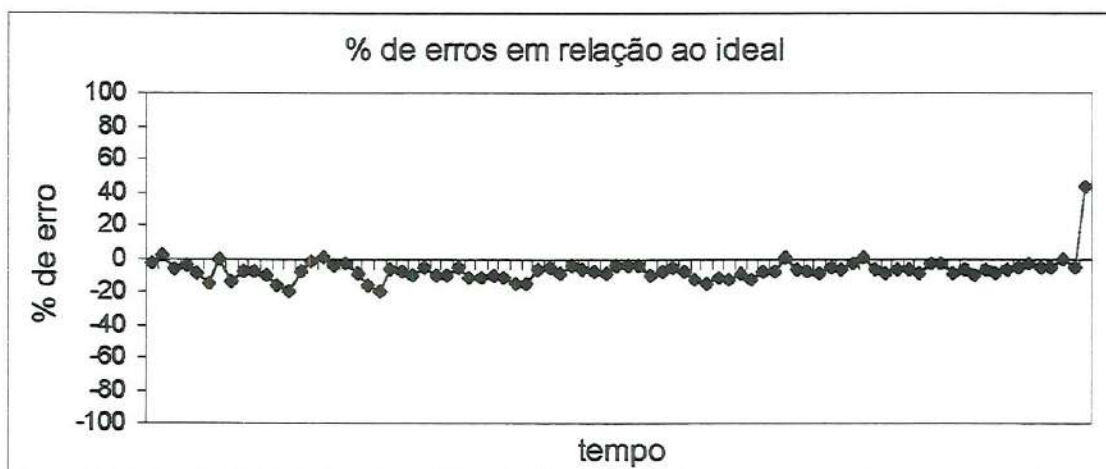


Figura 4.43 – Variações das proporções do traçador,  $U_{FL} = 2,0 U_{MF}$ . Exp. 3c.

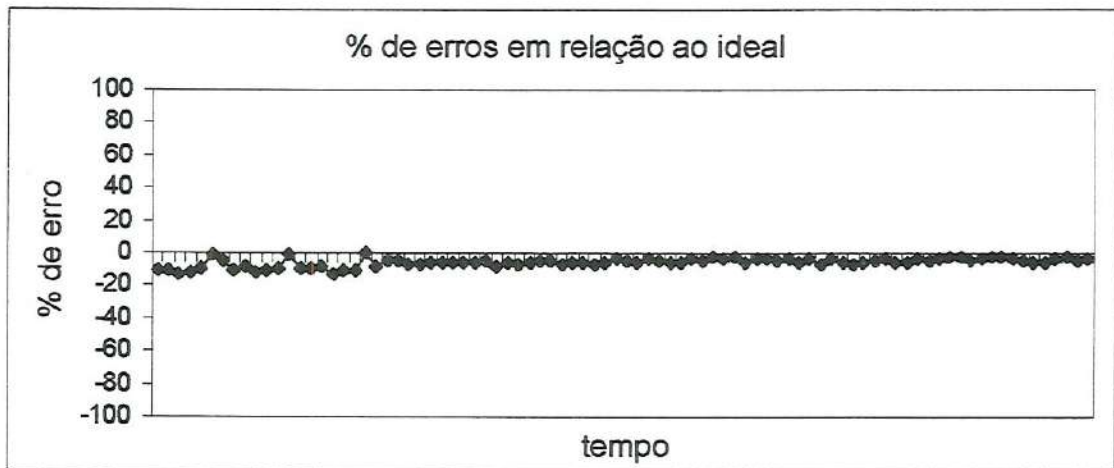


Figura 4.44 – Variações das proporções do traçador,  $U_{FL} = 1,4 U_{MF}$ . Exp. 4a.



Figura 4.45 – Variações das proporções do traçador,  $U_{FL} = 1,4 U_{MF}$ . Exp. 4b.



Figura 4.46 – Variações das proporções do traçador,  $U_{FL} = 1,4 U_{MF}$ . Exp. 4c.



Figura 4.47 – Variações das proporções do traçador,  $U_{FL} = 1,7 U_{MF}$ . Exp. 5a.

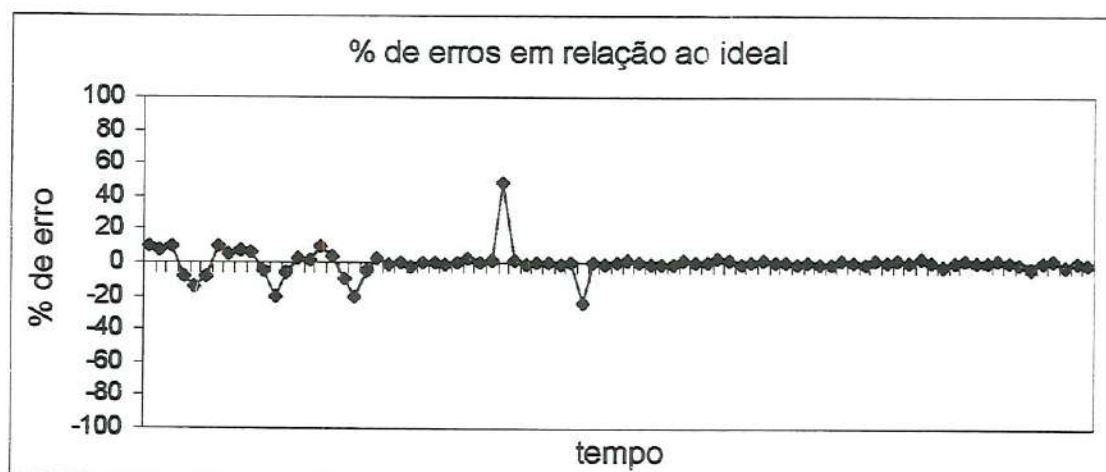


Figura 4.48 – Variações das proporções do traçador,  $U_{FL} = 1,7 U_{MF}$ . Exp. 5b.

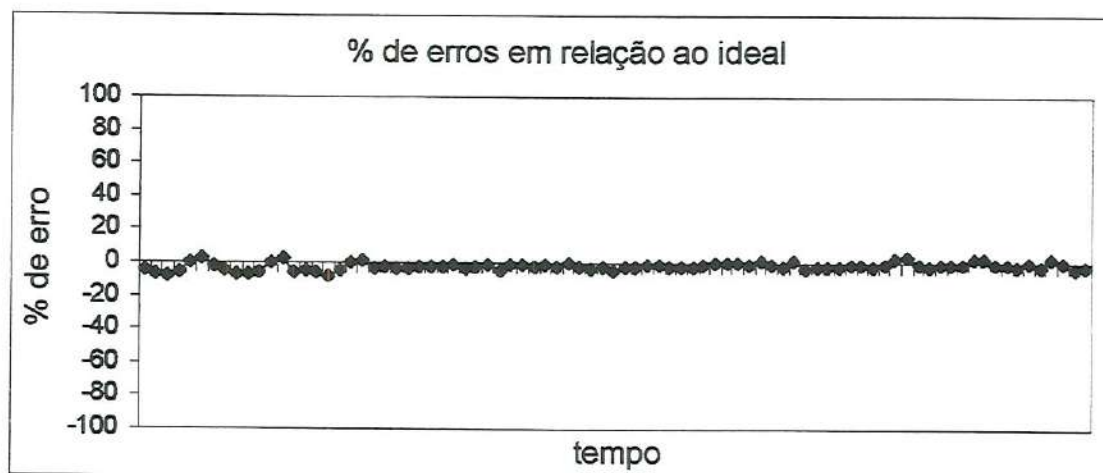


Figura 4.49 – Variações das proporções do traçador,  $U_{FL} = 1,7 U_{MF}$ . Exp. 5c.



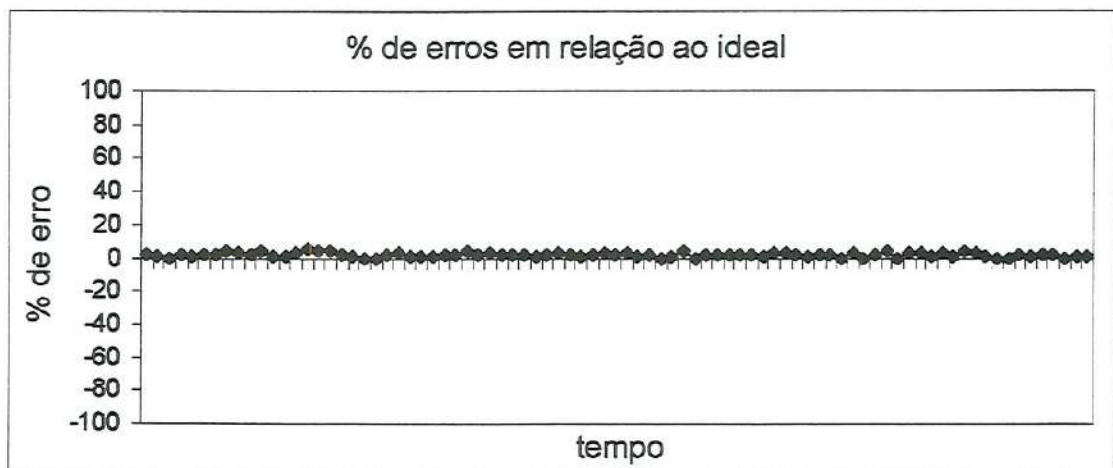


Figura 4.50 – Variações das proporções do traçador,  $U_{FL} = 2,0 U_{MF}$ . Exp. 6a.



Figura 4.51 – Variações das proporções do traçador,  $U_{FL} = 2,0 U_{MF}$ . Exp. 6b.

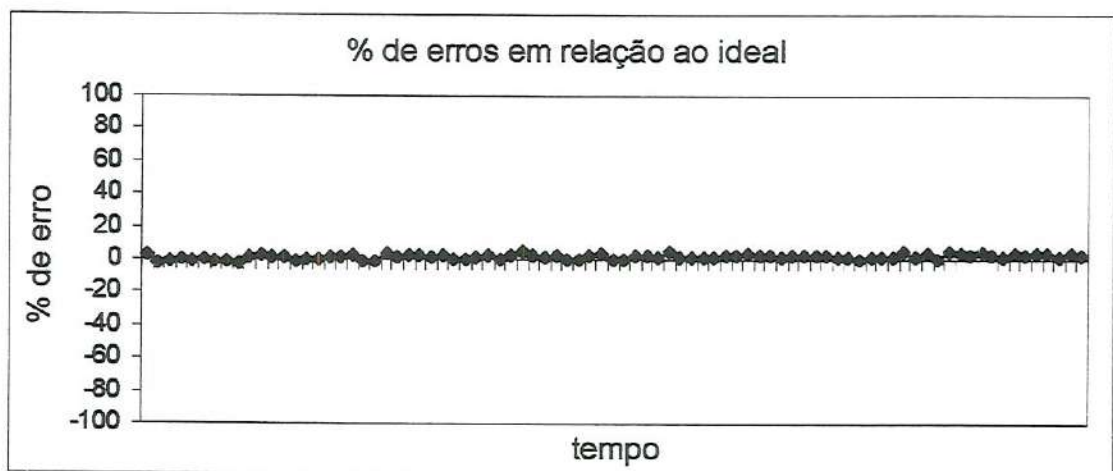


Figura 4.52 – Variações das proporções do traçador,  $U_{FL} = 2,0 U_{MF}$ . Exp. 6c.

## 4.6 – Variação na massa dos filtros

Tabela 4.36 – Desvios médios nos pesos dos filtros de papel.

Experimento	Wfo	Wfe	% desvio
Exp. 1a	0,944	0,949	-0,53
Exp. 1b	0,938	0,913	2,67
Exp. 1c	0,939	0,935	0,43
Exp. 2a	0,938	0,938	0,00
Exp. 2b	0,944	0,942	0,21
Exp. 2c	0,942	0,940	0,21
Exp. 3a	0,965	0,962	0,31
Exp. 3b	0,943	0,936	0,74
Exp. 3c	0,933	0,927	0,64
Exp. 4a	0,941	0,933	0,85
Exp. 4b	0,924	0,922	0,22
Exp. 4c	0,920	0,926	-0,65
Exp. 5a	0,922	0,917	0,54
Exp. 5b	0,920	0,918	0,22
Exp. 5c	0,938	0,927	1,17
Exp. 6a	0,924	0,928	-0,43
Exp. 6b	0,909	0,919	-1,10
Exp. 6c	0,924	0,935	-1,19

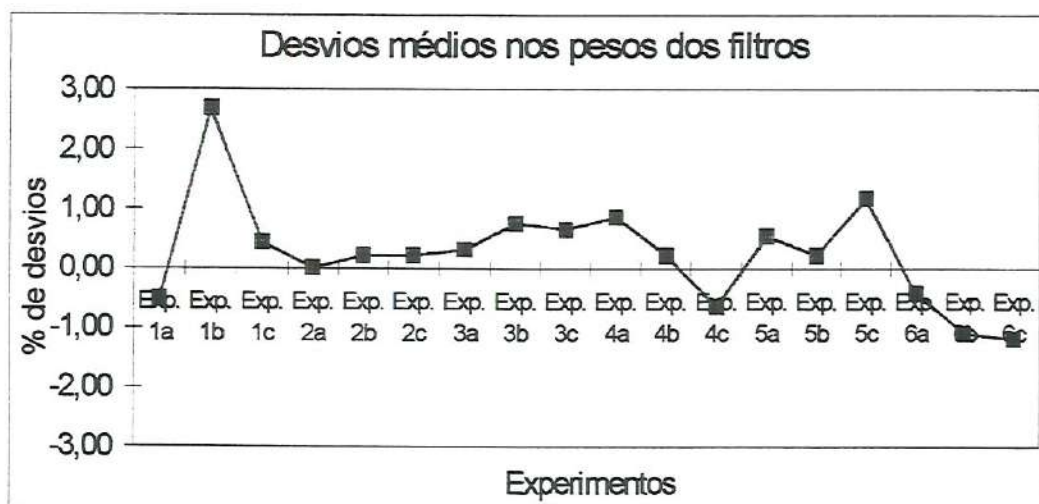


Figura 4.53 – Desvios médios nos pesos dos filtros de papel.

#### 4.7 – Índice de mistura para fluidização

Não é objetivo desse trabalho a comparação entre os inúmeros índices existentes na literatura. Alguns desses índices estão apresentados no capítulo de revisão da literatura, sendo que um deles é específico para o processo de fluidização. Na tabela 4.37 estão os valores dos índices calculados teoricamente pelas equações 124 a 127.

Tabela 4.37 – Resultados dos índices de mistura para fluidização.

Experimento	1a	2a	3a	4a	5a	6a
Índice	0,99	0,99	0,99	1,0	1,0	1,0

#### 4.8 – Parâmetros do modelo de Gibilaro-Rowe

Para a verificação teórica dos parâmetros do modelo proposto por Gibilaro – Rowe são apresentadas as tabelas 4.38 a 4.41.

Nessas tabelas os parâmetros  $T_{CI}$ ,  $T_{SE}$  e  $T_{IN}$  são calculados para as três alturas de coleta de amostras, como demonstração.



Tabela 4.38 – Parâmetros ligados às condições de fluidização e ao modelo de Gibilaro – Rowe.

$U_{FL} - U_{MF}$ (m/s)	$U_{FL}/U_{MF}$ (—)	$G_{AR}$ (m <sup>3</sup> /s)	$d_{BO}$ (m)	$d_{BL}$ (m)	$h_{LF}$ (m)
0,04	1,4	$6,70 \cdot 10^{-06}$	0,007	0,013	0,040
0,04	1,4	$6,70 \cdot 10^{-06}$	0,007	0,023	0,105
0,04	1,4	$6,70 \cdot 10^{-06}$	0,007	0,033	0,170
0,07	1,7	$1,17 \cdot 10^{-05}$	0,009	0,016	0,040
0,07	1,7	$1,17 \cdot 10^{-05}$	0,009	0,028	0,105
0,07	1,7	$1,17 \cdot 10^{-05}$	0,009	0,040	0,170
0,09	2,0	$1,51 \cdot 10^{-05}$	0,010	0,018	0,040
0,09	2,0	$1,51 \cdot 10^{-05}$	0,010	0,032	0,105
0,09	2,0	$1,51 \cdot 10^{-05}$	0,010	0,046	0,170

Tabela 4.39 – Parâmetros relacionados ao modelo de Gibilaro – Rowe.

$d_{BL}$ (m)	$\theta_{WK}$ (—)	$U_{BL}$ (m/s)	$F_{WB}$ (—)	$f_{fa}$ (—)	$T_{Cl}$ (m/s)	$T_{IN}$ (1/s)	$T_{SE}$ (m/s)
0,013	87	0,294	0,051	0,143	0,0025	0,207	0,019
0,023	120	0,378	0,156	0,126	0,0085	0,305	0,021
0,033	138	0,438	0,237	0,120	0,0141	0,306	0,023
0,016	99	0,352	0,081	0,217	0,0079	0,440	0,038
0,028	130	0,443	0,251	0,211	0,0298	0,752	0,046
0,040	145	0,515	0,352	0,210	0,0482	0,730	0,053
0,018	106	0,389	0,103	0,258	0,0139	0,623	0,053
0,032	137	0,488	0,298	0,263	0,0519	1,037	0,068
0,046	150	0,568	0,386	0,258	0,0762	0,911	0,077

Tabela 4.40 – Parâmetros ligados às condições de fluidização e ao modelo de Gibilaro – Rowe.

$U_{FL} - U_{MF}$ (m/s)	$U_{FL}/U_{MF}$ (—)	$G_{AR}$ (m <sup>3</sup> /s)	$d_{BO}$ (m)	$d_{BL}$ (m)	$h_{LF}$ (m)
0,08	1,4	$1,34 \cdot 10^{-05}$	0,009	0,018	0,040
0,08	1,4	$1,34 \cdot 10^{-05}$	0,009	0,034	0,105
0,08	1,4	$1,34 \cdot 10^{-05}$	0,009	0,049	0,170
0,14	1,7	$2,35 \cdot 10^{-05}$	0,012	0,024	0,040
0,14	1,7	$2,35 \cdot 10^{-05}$	0,012	0,042	0,105
0,14	1,7	$2,35 \cdot 10^{-05}$	0,012	0,061	0,170
0,20	2,0	$3,35 \cdot 10^{-05}$	0,013	0,027	0,040
0,20	2,0	$3,35 \cdot 10^{-05}$	0,013	0,049	0,105
0,20	2,0	$3,35 \cdot 10^{-05}$	0,013	0,071	0,170

Tabela 4.41 – Parâmetros relacionados ao modelo de Gibilaro – Rowe.

$d_{BL}$ (m)	$\theta_w$ (—)	$U_{BL}$ (m/s)	$F_{WB}$ (—)	$f_{fa}$ (—)	$T_{CI}$ (m/s)	$T_{IN}$ (1/s)	$T_{SE}$ (m/s)
0,018	106	0,379	0,103	0,235	0,0120	1,103	0,057
0,034	139	0,491	0,248	0,217	0,0337	1,263	0,066
0,049	152	0,573	0,322	0,206	0,0479	1,066	0,072
0,024	122	0,485	0,165	0,346	0,0422	2,268	0,125
0,042	147	0,596	0,293	0,332	0,0867	2,164	0,144
0,061	156	0,690	0,346	0,310	0,1076	1,597	0,151
0,027	128	0,566	0,192	0,438	0,0846	3,462	0,215
0,049	152	0,693	0,322	0,426	0,1655	3,046	0,250
0,071	158	0,793	0,359	0,393	0,1843	2,044	0,250

## 5 – DISCUSSÃO

Nesse capítulo serão feitas abordagens dos resultados apresentados no capítulo 4. A discussão se refere principalmente aos resultados dos ensaios de calibração do equipamento, aos experimentos principais e aos parâmetros principais do modelo de Gibilaro – Rowe.

### 5.1 – Ensaios preliminares de fluidização

De acordo com a equação 06, de Ergun, as velocidades de mínima fluidização teóricas foram 0,093, 0,217 e 0,600 m/s, para as areias de  $d_{MD}$  225, 450 e 900  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Para a partícula traçadora,  $d_{MD}$  de 450  $\mu\text{m}$ , essa velocidade foi de 0,160 m/s. Nos ensaios, as velocidades médias de mínima fluidização foram 0,09, 0,20 e 0,50 m/s, respectivamente, para as areias de  $d_{MD}$  225, 450 e 900  $\mu\text{m}$  e 0,15 m/s para o traçador,  $d_{MD}$  de 450  $\mu\text{m}$ .

Tabela 5.1 – Valores da velocidade de mínima fluidização de acordo com várias equações em (m/s).

Partícula Equação	Areia $d_{MD} = 225\mu\text{m}$	Areia $d_{MD} = 450\mu\text{m}$	Areia $d_{MD} = 900\mu\text{m}$	Traçador $d_{MD} = 450\mu\text{m}$
Eq. 06	0,093	0,217	0,612	0,164
Eq. 18	0,093	0,202	1,003	0,175
Eq. 32	0,086	0,300	1,490	0,290
Eq. 24	0,040	0,150	0,460	0,140
Eq. 22	0,050	0,190	0,540	0,170
Eq. 19	0,060	0,226	0,630	0,210



Portanto de acordo com a tabela 5.1 a equação de Ergun é ainda uma boa referência para o cálculo da velocidade de mínima fluidização e outros parâmetros do processo que dependem dela.

Durante a realização dos experimentos foram observadas pequenas flutuações nas pressões e velocidades, como previsto na literatura, mas para efeito desse trabalho foram lidos valores médios, desprezando-se essas variações para os cálculos dos parâmetros gerais do processo.

As figuras 4.1 a 4.10 indicam um bom comportamento do equipamento quanto às condições de fluidização, chegando sua eficiência a mais de 90 %. Essa eficiência foi estabelecida pela relação entre a pressão medida durante os experimentos e o peso do conjunto de partículas dividido pela área da seção transversal do leito.

## 5.2 – Ensaio principais

5.2.1 – Experimentos 1a, 2a e 3a, realizados com 6 kg de areia de diâmetro médio 225  $\mu\text{m}$  e 2 kg de traçador de diâmetro médio 450  $\mu\text{m}$ .

Velocidade: 1,4  $U_{MF}$

Na primeira série de experimentos foi estabelecida uma velocidade de fluidização de 0,13 m/s, correspondendo à aproximadamente 40 % acima da velocidade de mínima fluidização.

Nas tabelas 4.12 a 4.15 estão os dados dos experimentos (1a) dessa primeira série para os tempos de um, quatro, sete e dez minutos.

É observado na tabela referente ao primeiro minuto de ensaio, tabela 4.12, que nas proporções do elemento traçador no plano superior existe uma certa regularidade mas não se apresenta como uma distribuição perfeita, indicando uma grande dispersão nos erros relativos. Isso pode ser melhor observado nas figuras 4.35 a 4.52 de erros relativos em função do tempo.

No plano intermediário existe também uma certa regularidade, exceto para uma posição e como na distribuição anterior os erros relativos estão numa faixa bastante ampla indicando maior heterogeneidade.

A distribuição das amostras no plano inferior também apresentou grandes variações em relação à mistura ideal.

Essa grande diferença nas proporções da mistura é provavelmente devido à baixa vazão de ar para o leito e a conseqüente menor formação de bolhas, além de menor tamanho das mesmas e menor taxa de crescimento.

Pode ser acrescentado que durante a fluidização formam-se vazios ou perturbações maiores, mesmo em regiões da fase de emulsão, causando a queda de partículas de maior diâmetro ou mais densas, acentuando a segregação. Já nas bolhas, apesar das baixas velocidades, são elevadas algumas partículas menos densas ou de menor diâmetro nas esteiras e outras no topo das mesmas.

Essa segregação ocorre também pela grande diferença de tamanhos uma vez que a diferença de densidades é bastante pequena para o processo. Entretanto, mesmo essa pequena diferença de densidades pode, nessa velocidade, ser responsabilizada em parte pela segregação ou heterogeneidades nas distribuições das proporções.

Durante as repetições dessas mesmas condições de ensaio, experimentos 1b e 1c, ocorreram fatos semelhantes, ou seja, distribuições irregulares para o primeiro minuto de fluidização, conforme pode ser visto nas tabelas referentes à esses experimentos, tabelas B.1 a B.4 e figuras B.1 a B.4 do anexo B, e tabelas C.1 a C.4 e figuras C.1 a C.4 do anexo C deste trabalho.

Observa-se também nos três experimentos que apesar de não estar homogênea a distribuição, existe uma regularidade nas posições centrais. Em tais posições a variação foi menor que as variações em posições próximas à parede do leito.

Essas observações podem, possivelmente, ser explicadas pela coalescência e ascensão das bolhas que tendem a se deslocar para a região central do leito.



Com o aumento do tempo de operação para quatro minutos as amostras mostraram ainda uma distribuição longe da ideal, mas com uma melhora em relação ao tempo anterior, explicada pela mistura prévia no primeiro minuto.

Não foram notadas grandes diferenças entre os planos superior, intermediário e inferior, apesar de existirem algumas diferenças entre os experimentos.

Essas diferenças devem-se à pequenas variações na vazão de ar entre os experimentos uma vez que o controle foi feito por válvula comum, abrindo ou fechando a passagem do fluido, e por manômetro do tipo "U" o que não é um controle absolutamente rigoroso apesar de terem sido tomados todos os cuidados possíveis para minimizar erros.

Fluidizando o conjunto de partículas por mais três minutos, totalizando sete minutos de operação, notou-se novamente certa regularidade entre as amostras coletadas, tanto na região central do leito quanto nas regiões laterais. Entretanto, continuaram as diferenças entre os experimentos e as variações em relação à composição ideal ficaram em patamares elevados, indicando segregação durante os ensaios.

Com o término do último intervalo de tempo totalizando dez minutos, continuaram as irregularidades nas composições das amostras em relação ao ideal. Novamente, dentro do mesmo experimento houve regularidade maior na região central e diferenças entre os experimentos. Já quanto às posições laterais as diferenças se acentuaram tanto dentro do mesmo plano quanto em relação aos outros experimentos.

Em resumo, nessa série de experimentos (1a) com uma velocidade de fluidização de aproximadamente 40 % acima da velocidade de mínima fluidização, as amostras mostraram que mesmo operando o leito durante um tempo relativamente longo, não ocorreu uma estabilização das composições, mostrando deficiências quanto ao mecanismo de mistura.

Velocidade:  $1.7 U_{MF}$



A próxima série de experimentos, 2a, refere-se àqueles realizados com uma velocidade de fluidização de aproximadamente 70 % acima da velocidade de mínima fluidização, correspondendo à uma velocidade de 0,15 m/s, de acordo com as tabelas 4.16 a 4.19.

Nas tabelas B.5 a B.8 e C.5 a C.8, experimentos 2b e 2c, dos anexos B e C e respectivas figuras, encontram-se os resultados das amostras dos experimentos repetidos nas mesmas condições de operação.

Observando especificamente as tabelas referentes ao primeiro intervalo de tempo, ou seja, o minuto inicial de fluidização, nota-se uma melhora na homogeneidade com relação ao mesmo período do experimento anterior (1a). Mesmo assim existem irregularidades nas proporções entre as diversas localizações das amostras.

As maiores diferenças em relação à proporção ideal encontram-se nas laterais do leito, uma vez que nos planos centrais essas diferenças não são tão acentuadas. Isso pode ser, novamente, uma indicação do agrupamento e subida das bolhas pela região central e uma menor perturbação da fase de emulsão nas laterais.

Com a continuidade da operação de fluidização, acrescentando mais três minutos, houve uma tendência à estabilização próxima a um valor em cada plano de distribuições.

Novamente, os dois primeiros experimentos (2a-T2 e 2b-T2) estabilizaram em valores próximos e o terceiro (2c-T2) em valores menos elevados do traçador, mas em ambos os casos com o mesmo tipo de tendência. Uma explicação possível é novamente pequenas diferenças no controle da vazão de ar.

Com o acréscimo de mais três minutos de fluidização amenizaram-se as dispersões para a maioria dos planos e das posições. Pode-se notar uma aproximação das proporções em torno de um valor para os dois primeiros experimentos. Para o terceiro, apesar de diferenças em relação aos anteriores, elas diminuíram e ficaram muito próximas do valor ideal da homogeneidade da mistura.

Operando o leito por mais três minutos as amostras mostraram que poucas alterações ocorreram nos vários planos e posições. Em algumas posições aumentou a concentração do traçador, diminuindo em outras. A tendência a um valor continuou mas também permaneceram irregularidades na mistura, indicando que nessa velocidade ainda não foi possível uma homogeneidade ideal.

Velocidade:  $2,0 U_{MF}$

A próxima série de experimentos foi feita com uma velocidade de fluidização de aproximadamente 100 % acima da velocidade de mínima fluidização, ou seja, 0,18 m/s. Essa série está retratada nas tabelas 4.20 a 4.23.

Nas tabelas B.9 a B.12 e C.9 a C.12 dos anexos B e C, respectivamente, se encontram os resultados das amostras dos experimentos repetidos com essas as mesmas condições de operação.

No primeiro intervalo de tempo do processo continuaram as diferenças nas concentrações das partículas principalmente em relação às posições situadas próximas aos contornos sólidos. Nas posições centrais as diferenças foram menores como observado anteriormente nos outros experimentos. Nesse trabalho não foi possível medir se isso realmente ocorreu devido à concentração de bolhas no centro do leito mas as menores diferenças nessa região pode ser uma indicação como nos experimentos anteriores.

Como aconteceu nas velocidades menores existiu uma tendência à estabilização mas as dispersões continuaram a serem notadas mesmo com três minutos a mais no tempo. Nas posições centrais novamente ocorreram as menores diferenças.

Com sete minutos de fluidização a situação modificou-se pouco, em algumas posições houve melhora, em outras não, mas mantendo-se próximo do valor ideal de mistura. Não houve maior segregação em função do tempo.



Passados dez minutos de intervalo após o início do experimento as amostras retiradas mostraram um leito de partículas com certo grau de segregação, pequeno, mas ainda irregular em relação à homogeneidade ideal.

Essa série de experimentos com velocidades de fluidização aproximadas de 1,4 , 1,7 e 2,0 vezes a velocidade de mínima fluidização indicou a ocorrência de segregação em todas elas. Isso se deveu principalmente à diferença de tamanhos entre as partículas com alguma contribuição da diferença de densidades. Deve ser investigada a operação do leito à maiores velocidades, pois talvez seja possível atingir uma homogeneidade ideal para a mistura desse conjunto de partículas.

O índice de mistura específico para leito fluidizado, indicado nas equações ee a ee, mostrou antecipadamente que se poderia alcançar uma índice ideal de mistura, fato que não ocorreu na prática.

5.2.2 – Experimentos 4a, 5a e 6a, realizados com 6 kg de areia de diâmetro médio 450  $\mu\text{m}$  e 2 kg de traçador de diâmetro médio 450  $\mu\text{m}$ .

Nessa outra série de experimentos foram usadas as mesmas razões entre a velocidade de fluidização e a de mínima fluidização que nesse caso foi de 0,20 m/s.

Velocidade: 1,4  $U_{MF}$

A velocidade inicial de operação foi de 0,28, ou seja, 40 % acima da velocidade de mínima fluidização, mantendo a mesma razão da série anterior. Os dados referentes à esses experimentos estão nas tabelas 4.24 a 4.27. A repetição dos experimentos realizados estão nas tabelas B.13 a B.16 e C.13 a C.16 dos anexos B e C, juntamente com as figuras.

Da leitura dessas tabelas é possível notar uma melhora significativa na homogeneidade em relação à série anterior com mesma razão entre as velocidade de operação e de mínima fluidização. Deve se observado que



apesar dessa mesma relação a diferença entre essas mesmas velocidades apresenta um maior valor. Essa diferença é bastante importante para a formação de bolhas, indicando de antemão que deve ser alcançado um melhor índice de mistura. Outro fato que contribui para melhor desempenho é o mesmo diâmetro médio das partículas.

Mesmo assim, são notadas irregularidades em algumas posições laterais e também nas posições centrais. Isso pode ser explicado pelas mesmas razões já mencionadas anteriormente.

Com o aumento do tempo de fluidização para quatro minutos as amostras retiradas mostram um melhor resultado, ainda não perfeito e com alguma segregação. O pouco de segregação ocorreu pela baixa vazão de ar e também pela pequena diferença nas densidades.

Acrescentando-se mais três minutos no tempo do processo a mistura alterou pouco sua homogeneidade, tendendo para um valor pouco abaixo do ideal. Esse tipo de mistura, dependendo da utilização, já poderia ser considerada adequada. A distribuição das amostras já se apresentou bastante regular, com uma dispersão pequena, apesar de não ter alcançado o padrão ideal.

Não houve melhora significativa em relação ao período anterior quando o processo de fluidização avançou por mais três minutos, apresentando uma boa homogeneidade, mantendo alguma variação em determinadas posições, como pode ser observado.

Velocidade:  $1,7 U_{MF}$

Outra série de experimentos foi feita com o mesmo conjunto de partículas aumentando-se a vazão de ar e proporcionando uma velocidade de fluidização de aproximadamente  $0,34 \text{ m/s}$  o que corresponde a 70 % acima da velocidade de mínima fluidização.

As tabelas 4.28 a 4.31 mostram os resultados dessa série de experimentos. As respectivas repetições dos mesmos ensaios são apresentadas nas tabelas B.17 a B.20 e C.17 a C.20 dos anexos B e C.

No primeiro minuto de operação o leito já alcançou uma boa homogeneidade mas ainda não a ideal e algumas posições ficaram com proporções bastante variadas. O que pode ter ocorrido é a dificuldade inicial em deixar o leito menos compacto causando algumas diferenças principalmente nas laterais e isso pode ser estendido aos outros experimentos.

Com quatro minutos de fluidização o leito se encontrou com melhor distribuição, mais homogêneo e com uma estabilização muito próxima do ideal, com exceção de duas posições na primeira repetição do experimento que apresentaram falhas. Novamente as posições centrais apresentaram-se bastante regulares.

Aos sete minutos a homogeneidade do leito nos três experimentos ficou mais uniforme além de muito próxima da proporção ideal de mistura, indicando que para essa vazão de ar o leito todo foi movimentado pela passagem das bolhas.

Após o processo ter sido conduzido por dez minutos as mesmas considerações anteriores podem ser feitas com base nas tabelas desse intervalo de tempo.

Velocidade:  $2,0 U_{MF}$

A última série de experimentos com o mesmo conjunto de partículas foi feita com uma velocidade de fluidização o dobro da velocidade de mínima fluidização acarretando em velocidade de  $0,40 \text{ m/s}$ .

Os resultados desses experimentos estão nas tabelas 4.32 a 4.35 e suas repetições estão nos anexos B e C representadas pelas tabelas B.21 a B.24 e C.21 a C.24, respectivamente.

Com o aumento da vazão de ar e do conseqüente aumento na diferença entre as velocidades de operação e de mínima fluidização as bolhas são maiores e sobem através do leito com maior velocidade causando também maior possibilidade de mistura.



Já no primeiro minuto do processo é possível observar, inclusive nas repetições, que o leito se encontra num estado excelente de homogeneidade mostrando que quando as partículas são de mesmo tamanho e densidades próximas a velocidade já é adequada em relação à mistura produzida.

Durante os demais intervalos de tempo , 4, 7 e 10 minutos. o leito se comportou da mesma maneira, mostrando equilíbrio na competição entre os mecanismos de segregação e mistura.

Ao final do tempo de operação o leito se manteve com a mesma qualidade de mistura como mostrado nas tabelas. Não houve, pelo menos durante a retirada das amostras, domínio da segregação ou da mistura.

Tanto as posições centrais quanto as posições laterais se mantiveram extremamente próximas da mistura ideal.

### 5.3 – Sobre os parâmetros do modelo de Gibilaro – Rowe.

É possível, através das tabelas 4.38 a 4.41, observar o comportamento teórico dos parâmetros do modelo de Gibilaro-Rowe para os sistema particulados ensaiados.

Para uma diferença ( $U_{FL} - U_{MF}$ ) igual a aproximadamente 0,04 m/s e sistema com areia de  $d_{MD}$  225  $\mu\text{m}$  e traçador com  $d_{MD}$  450  $\mu\text{m}$  é notada a pequena evolução do valor do parâmetro taxa de segregação ( $T_{SE}$ ), já o parâmetro taxa de circulação ( $T_{CI}$ ) possui valores e evolução maiores. O parâmetro taxa de intercâmbio ( $T_{IN}$ ), nesse caso, tendeu à um valor constante.

Com uma diferença ( $U_{FL} - U_{MF}$ ) igual a aproximadamente 0,07 m/s e mesmo sistema anterior, é notada uma maior evolução do valor do parâmetro taxa de segregação ( $T_{SE}$ ). O parâmetro taxa de circulação ( $T_{CI}$ ), novamente, possui valores e evolução maiores que ( $T_{SE}$ ). Já o parâmetro taxa de intercâmbio ( $T_{IN}$ ), nesse caso, não ficou constante como no caso anterior sendo observada uma pequena diminuição no seu valor.

Para uma diferença ( $U_{FL} - U_{MF}$ ) igual a aproximadamente 0,09 m/s e mesmo sistema anterior, repetiu-se a maior evolução do valor do parâmetro



taxa de segregação ( $T_{SE}$ ) em relação aos casos anteriores. A taxa de circulação ( $T_{CI}$ ), novamente, possui valores e evolução maiores que ( $T_{SE}$ ). O parâmetro taxa de intercâmbio ( $T_{IN}$ ), nesse caso, além de não ficar constante como no primeiro caso foi observada uma maior diminuição no seu valor.

Para uma diferença ( $U_{FL} - U_{MF}$ ) igual a aproximadamente 0,08 m/s e sistema com areia de  $d_{MD}$  450  $\mu\text{m}$  e traçador com  $d_{MD}$  450  $\mu\text{m}$  é também observada uma pequena evolução do valor do parâmetro taxa de segregação ( $T_{SE}$ ), já o parâmetro taxa de circulação ( $T_{CI}$ ) possui valores e evolução maiores. O parâmetro taxa de intercâmbio ( $T_{IN}$ ), nesse caso, houve uma diminuição do seu valor.

Com uma diferença ( $U_{FL} - U_{MF}$ ) igual a aproximadamente 0,14 m/s e mesmo sistema anterior é, novamente, notada uma maior evolução do valor do parâmetro taxa de segregação ( $T_{SE}$ ) em relação ao anterior. O parâmetro taxa de circulação ( $T_{CI}$ ), repetiu a tendência de valores e evolução maiores que ( $T_{SE}$ ). Com relação à taxa de intercâmbio ( $T_{IN}$ ), acentuou a diminuição dos valores teóricos.

Para uma diferença ( $U_{FL} - U_{MF}$ ) igual a aproximadamente 0,20 m/s e mesmo sistema anterior, houve uma tendência do valor do parâmetro taxa de segregação ( $T_{SE}$ ) a se estabilizar. A taxa de circulação ( $T_{CI}$ ), novamente, possui valores e evolução maiores que ( $T_{SE}$ ). O parâmetro taxa de intercâmbio ( $T_{IN}$ ), nesse caso, foi observado um grande decréscimo no seu valor.

É possível observar que os parâmetros ( $T_{CI}$ ) e ( $T_{IN}$ ), relacionados à homogeneização, são teoricamente maiores que o parâmetro do modelo ligado à segregação ( $T_{SE}$ ), o que indicaria uma mistura de boa qualidade.

É necessário a realização de experimentos específicos para avaliar corretamente o modelo de Gibilaro-Rowe, o que foge dos objetivos desse trabalho.

## 6 - CONCLUSÕES

A observação dos experimentos e a análise dos resultados permitiram as conclusões apresentadas a seguir:

- (a) – o sistema de amostragem revelou os planos analisados de uma forma eficiente, diferindo de técnicas mostradas na literatura nas quais retiram-se lâminas ao invés de pontos.
- (b) – a mistura foi mais rápida na região central em relação às posições próximas à parede do leito na grande maioria dos experimentos, mesmo naqueles com velocidades de fluidização baixas.
- (c) – com relação ao tempo de operação, os experimentos com maiores velocidades alcançam o equilíbrio entre a mistura e a segregação mais rapidamente em consequência do maior volume de bolhas e da relação de diâmetros das partículas no leito.
- (d) – no sistema com diferenças de tamanho e pouca diferença de densidade, existiu equilíbrio no mecanismo de segregação na maior velocidade pesquisada.
- (e) – para o sistema com semelhantes diâmetros de partículas praticamente não existiu segregação ao final do tempo pesquisado.
- (f) – não foi necessária grande velocidade de fluidização para promover a homogeneização no sistema com semelhanças de tamanho.
- (g) – a fluidização produziu resultados semelhantes nos experimentos com mesmas características, mostrando repetibilidade.
- (h) – apesar de teóricas, as taxas que promovem a mistura no modelo de Gibilaro-Rowe,  $T_{IN}$  e  $T_{CI}$ , são maiores que a taxa relacionada à segregação,  $T_{SE}$ , o que em princípio concorda com os resultados.

- (i) – o índice de mistura específico para leite fluidizado foi adequado quando o sistema binário é de diâmetros semelhantes.

#### 6.1-Sugestões para futuros trabalhos

- (a) – realizar experimentos com outros sistemas de particulados sólidos, com maiores diferenças granulométricas e de densidades.
- (b) – para sistemas com diferenças de tamanhos e/ou densidade verificar a existência de velocidades onde as misturas sejam otimizadas.
- (c) – realizar modificações no equipamento para realizar o processo de mistura de forma contínua.
- (d) – experimentar novas técnicas de amostragem e estatística, além de novos materiais traçadores.
- (e) – desenvolver técnicas experimentais que permitam a determinação das distribuições granulométricas das partículas das amostras.
- (f) – verificar a precisão do método de amostragem com menores proporções de traçadores no leite.
- (g) – comparar os resultados de mistura obtidos no leite fluidizado com outros equipamentos.
- (h) – verificar o custo/benefício do processo realizado em leite fluidizado em relação à outros processos e equipamentos.





## ANEXO A

Os resultados obtidos nos ensaios para a calibração do medidor de vazão, tipo orifício, adotado nesse trabalho.

Conforme os procedimentos estabelecidos anteriormente no capítulo 3, resultaram as tabelas A.1 a A.4. Nessas tabelas estão dados de variação de pressão no medidor, velocidade na tubulação do medidor e velocidade no leito fluidizado. Foram realizados quatro ensaios para verificação da repetibilidade dos resultados.

A partir das tabelas anteriores foram construídos os gráficos mostrados nas figuras A.1 e A.2. Nesses gráficos estão dados de variação de pressão em função da velocidade no medidor ou no leito, além de equações de curva polinomiais ajustadas aos dados empíricos.

No caso da calibração do medidor de vazão a temperatura do ar durante os ensaios variou desde aproximadamente 21 °C até 43 °C. Com essa variação da temperatura não foi promovida nenhuma correção na massa específica do ar.

Também, de acordo com o capítulo 3, não foi feita correção quanto à compressibilidade do ar pois o número de Mach foi inferior ao valor 0,3, mencionado anteriormente.

Tabela A.1 – Calibração do medidor de vazão

Dpor (Pa)	Uor(m/s)	Qor(cm <sup>3</sup> /s)	Ulf(m/s)
24	0,51	10,01	0,02
71	1,03	20,22	0,04
102	1,40	27,49	0,05
149	1,62	31,81	0,06
181	1,91	37,50	0,07
212	2,06	40,45	0,08
259	2,35	46,14	0,09
322	2,64	51,84	0,10
385	2,94	57,73	0,11
432	3,16	62,05	0,12
565	3,60	70,69	0,14
683	3,97	77,95	0,15
910	4,63	90,91	0,17
1012	4,92	96,60	0,18
1091	5,14	100,92	0,19
1185	5,36	105,24	0,20
1271	5,58	109,56	0,21
1452	5,88	115,45	0,22
1640	6,32	124,09	0,24
1813	6,69	131,36	0,25
1993	7,05	138,43	0,27
2088	7,20	141,37	0,27
2166	7,27	142,75	0,27
2394	7,71	151,39	0,29
2535	7,93	155,71	0,30
2692	8,23	161,60	0,31
2959	8,52	167,29	0,32
3139	8,82	173,18	0,33
3359	9,11	178,87	0,34
3508	9,33	183,19	0,35
3704	9,55	187,51	0,36
3900	9,92	194,78	0,37
4144	10,21	200,47	0,38
4324	10,36	203,42	0,39
4568	10,80	212,06	0,41
4756	10,95	215,00	0,41
4913	11,09	217,75	0,42
5101	11,39	223,64	0,43
5729	12,12	237,98	0,46
6443	12,86	252,51	0,48

Tabela A.2 – Calibração do medidor de vazão

DPor (Pa)	Uor (m/s)	Qor(cm <sup>3</sup> /s)	Ufl(m/s)
55	0,95	18,65	0,036
118	1,47	28,86	0,055
180	1,91	37,50	0,072
228	2,20	43,20	0,083
298	2,57	50,46	0,097
345	2,72	53,41	0,102
392	3,01	59,10	0,113
510	3,38	66,37	0,127
643	3,82	75,01	0,144
761	4,26	83,65	0,160
832	4,48	87,96	0,168
957	4,77	93,66	0,179
1020	5,00	98,18	0,188
1162	5,29	103,87	0,199
1334	5,66	111,13	0,213
1507	6,10	119,77	0,229
1624	6,32	124,09	0,238
1758	6,54	128,41	0,246
1891	6,83	134,11	0,257
2001	7,05	138,43	0,265
2150	7,27	142,75	0,273
2417	7,71	151,39	0,290
2637	8,15	160,03	0,306
2747	8,30	162,97	0,312
3006	8,67	170,24	0,326
3249	9,03	177,30	0,339
3500	9,40	184,57	0,353
3751	9,70	190,46	0,365
4081	10,21	200,47	0,384
4418	10,58	207,74	0,398
4654	10,80	212,06	0,406
4819	11,02	216,38	0,414
5007	11,24	220,70	0,423
5470	11,75	230,71	0,442
6302	12,71	249,56	0,478
7299	13,74	269,78	0,517
8217	14,47	284,12	0,544
8696	14,91	292,76	0,561
9794	15,80	310,23	0,594



Tabela A.3 – Calibração do medidor de vazão

DPor (Pa)	Uor (m/s)	Qor(cm <sup>3</sup> /s)	Ufl(m/s)
31	0,73	14,33	0,027
71	1,03	20,22	0,039
141	1,62	31,81	0,061
188	1,98	38,88	0,074
235	2,28	44,77	0,086
298	2,57	50,46	0,097
385	2,86	56,16	0,108
479	3,30	64,80	0,124
573	3,67	72,06	0,138
659	3,98	78,15	0,150
777	4,33	85,02	0,163
918	4,70	92,28	0,177
1036	5,00	98,18	0,188
1138	5,29	103,87	0,199
1311	5,73	112,51	0,215
1467	5,95	116,83	0,224
1585	6,24	122,52	0,235
1758	6,61	129,79	0,248
1883	6,83	134,11	0,257
2048	7,12	139,80	0,268
2229	7,49	147,07	0,282
2409	7,71	151,39	0,290
2637	8,16	160,22	0,307
2794	8,38	164,54	0,315
3037	8,74	171,61	0,329
3367	9,18	180,25	0,345
3657	9,55	187,51	0,359
3987	9,99	196,15	0,376
4301	10,43	204,79	0,392
4630	10,80	212,06	0,406
4921	11,24	220,70	0,423
5650	12,05	236,60	0,453
6396	12,86	252,51	0,483
7220	13,66	268,21	0,514
7973	14,25	279,80	0,536
8546	14,84	291,38	0,558
9190	15,43	302,97	0,580
9606	15,80	310,23	0,594
10540	16,46	323,19	0,619
11168	16,90	331,83	0,635

Tabela A.4 – Calibração do medidor de vazão

DPor (Pa)	Uor (m/s)	Qor(cm <sup>3</sup> /s)	Ufl(m/s)
24	0,51	10,01	0,019
31	0,73	14,33	0,027
47	0,88	17,28	0,033
63	1,10	21,60	0,041
86	1,25	24,54	0,047
102	1,47	28,86	0,055
126	1,62	31,81	0,061
149	1,76	34,56	0,066
188	1,98	38,88	0,074
228	2,20	43,20	0,083
283	2,50	49,09	0,094
322	2,72	53,41	0,102
377	2,94	57,73	0,111
463	3,30	64,80	0,124
534	3,60	70,69	0,135
596	3,74	73,43	0,141
706	4,04	79,33	0,152
785	4,40	86,39	0,165
895	4,70	92,28	0,177
1012	5,00	98,18	0,188
1162	5,36	105,24	0,202
1256	5,58	109,56	0,210
1436	5,95	116,83	0,224
1538	6,17	121,15	0,232
1687	6,46	126,84	0,243
1938	6,98	137,05	0,262
2143	7,34	144,12	0,276
2409	7,79	152,96	0,293
2668	8,23	161,60	0,309
2912	8,52	167,29	0,320
3139	8,89	174,56	0,334
3335	9,18	180,25	0,345
3485	9,40	184,57	0,353
3687	9,70	190,46	0,365
3948	10,00	196,35	0,376
4175	10,28	201,85	0,386
4418	10,65	209,11	0,400
4740	11,02	216,38	0,414
4874	11,09	217,75	0,417
4983	11,31	222,07	0,425

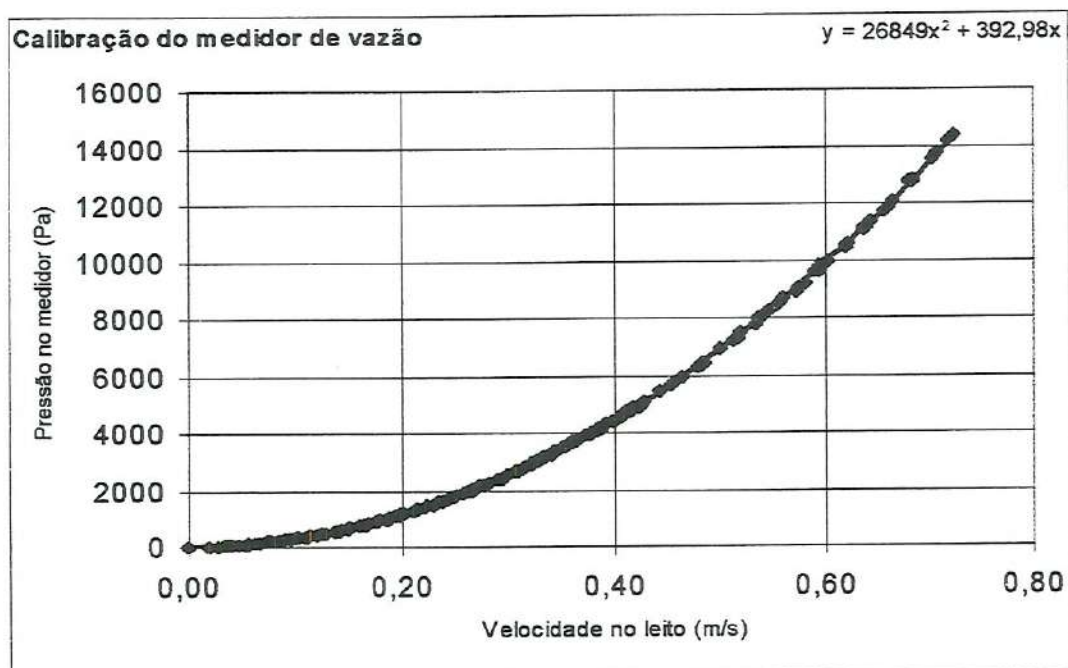


Figura A.1 – Curva do medidor de vazão tipo orifício.

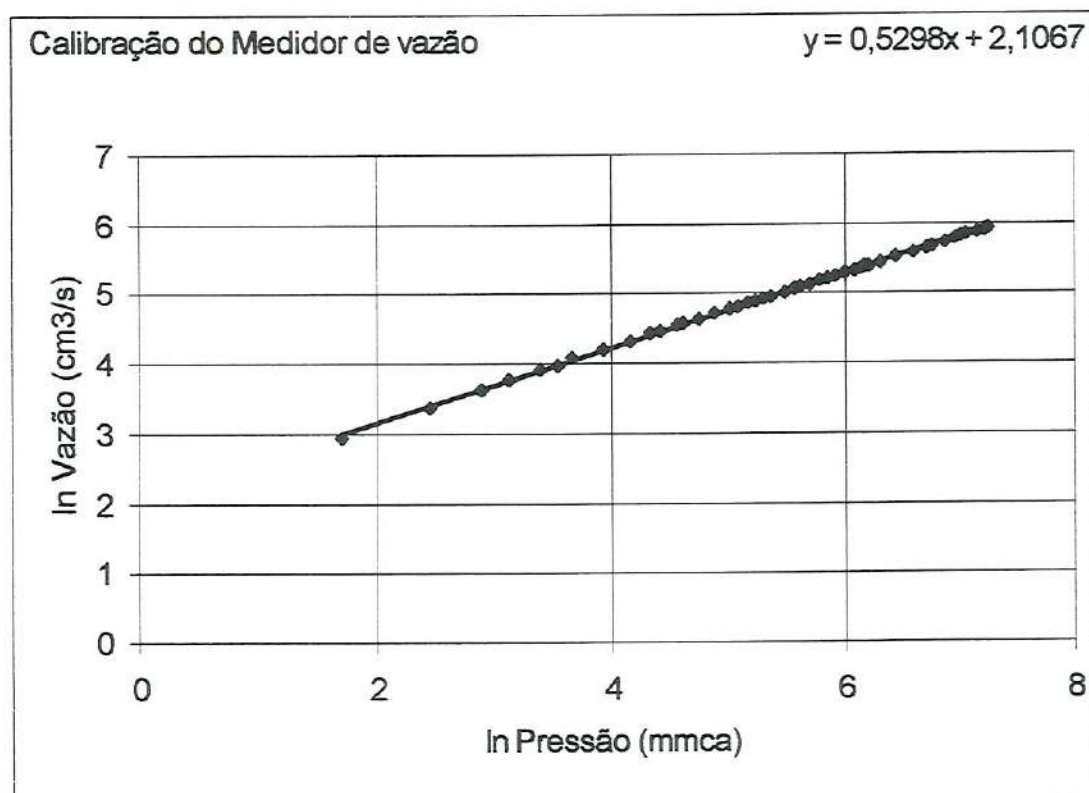


Figura A.2 – Curva do medidor de vazão tipo orifício.



## ANEXO B

Para verificar o comportamento do leito fluidizado quanto à repetibilidade dos resultados experimentais, os ensaios foram executados mais duas vezes nas mesmas condições.

As tabelas B.1 a B.4 representam a velocidade de fluidização próxima de 40% acima da velocidade de mínima fluidização para o conjunto com diâmetro médio 225  $\mu\text{m}$  para a massa de 6 kg de areia e diâmetro médio 450  $\mu\text{m}$  para a massa de 2 kg de material traçador. As figuras B.1 a B.4 foram feitas a partir dessas tabelas.

Em seguida estão as tabelas B.5 a B.8 cuja velocidade de operação estava próxima de 70% acima da velocidade de mínima fluidização para o mesmo conjunto de partículas e as figuras B.5 a B.8 são respectivamente as formas gráficas dessas tabelas.

Finalmente as tabelas B.9 a B.12 representam esse conjunto de partículas para uma velocidade de operação de 100% acima da velocidade de mínima fluidização. As figuras B.9 a B.12 representam essas tabelas respectivamente.

As tabelas B.13 a B.16 representam a velocidade de fluidização próxima de 40% acima da velocidade de mínima fluidização para o conjunto com diâmetro médio 450  $\mu\text{m}$  para a massa de 6 kg de areia e diâmetro médio 450  $\mu\text{m}$  para a massa de 2 kg de material traçador. As figuras B.13 a B.16 surgiram dessas tabelas respectivamente.

A seguir estão as tabelas B.17 a B.20 cuja velocidade de operação foi próxima de 70% acima da velocidade de mínima fluidização para o mesmo conjunto de partículas anterior e nas figuras B.17 a B.20 estão respectivamente as formas gráficas dessas tabelas.

Por último as tabelas B.21 a B.24 representam esse mesmo conjunto de partículas para uma velocidade de operação de 100% acima da velocidade de mínima fluidização. Respectivamente, as figuras B.21 a B.24 representam essas tabelas.

Tabela B.1 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,4  $U_{MF}$ , areia 225 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
S 000 T1	0,938	4,107	3,576	2,638	0,531	16,76	83,24	49,20
S 060 T1	0,950	3,923	1,014	0,064	2,909	97,85	2,15	-74,45
S 120 T1	0,932	4,254	2,255	1,323	1,999	60,17	39,83	-58,45
S 180 T1	0,944	4,513	3,915	2,971	0,598	16,76	83,24	49,21
S 240 T1	0,929	4,326	3,853	2,924	0,473	13,92	86,08	79,55
S 300 T1	0,955	4,713	4,001	3,046	0,712	18,95	81,05	31,95
S 360 T1	0,932	4,508	2,181	1,249	2,327	65,07	34,93	-61,58
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
M 000 T1	0,953	4,178	3,756	2,803	0,422	13,09	86,91	91,05
M 060 T1	0,926	5,067	3,247	2,321	1,820	43,95	56,05	-43,12
M 120 T1	0,939	4,031	2,463	1,524	1,568	50,71	49,29	-50,70
M 180 T1	0,944	4,416	3,693	2,749	0,723	20,82	79,18	20,06
M 240 T1	0,956	4,305	3,771	2,815	0,534	15,95	84,05	56,79
M 300 T1	0,925	4,612	3,216	2,291	1,396	37,86	62,14	-33,97
M 360 T1	0,948	4,835	2,360	1,412	2,475	63,67	36,33	-60,74
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
I 000 T1	0,922	4,874	4,267	3,345	0,607	15,36	84,64	62,77
I 060 T1	0,944	4,300	3,733	2,789	0,567	16,90	83,10	47,97
I 120 T1	0,924	4,622	3,726	2,802	0,896	24,23	75,77	3,18
I 180 T1	0,948	4,685	4,068	3,120	0,617	16,51	83,49	51,42
I 240 T1	0,926	4,507	4,036	3,110	0,471	13,15	86,85	90,07
I 300 T1	0,941	5,096	4,567	3,626	0,529	12,73	87,27	96,36
I 360 T1	0,937	5,444	4,515	3,578	0,929	20,61	79,39	21,29

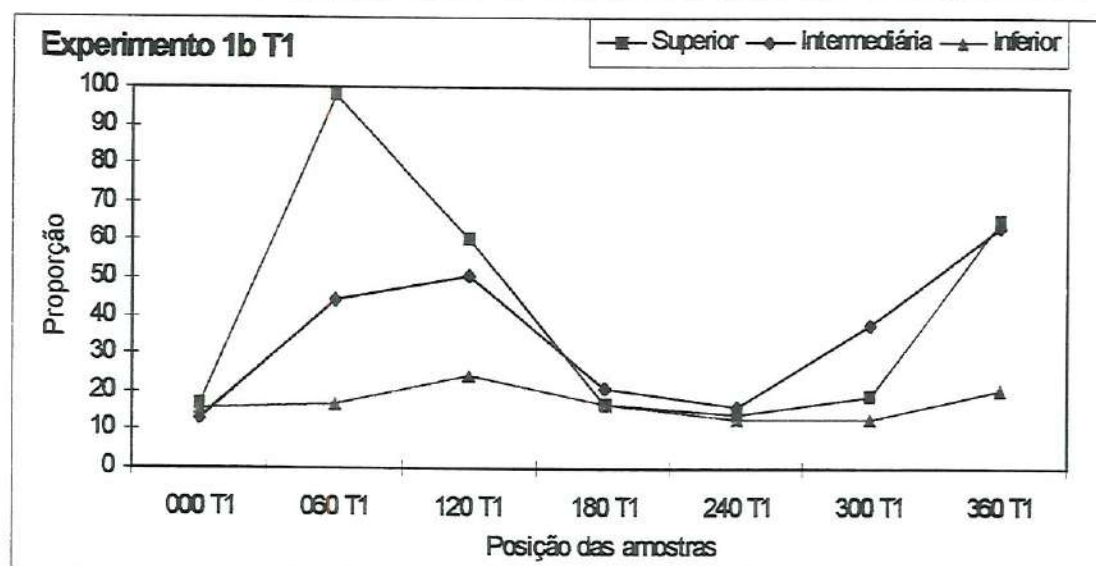


Figura B.1 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1b.



Tabela B.2 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,4  $U_{MF}$ , areia 225 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
S 000 T2	0,945	4,669	3,694	2,749	0,975	26,18	73,82	-4,51
S 060 T2	0,929	4,845	3,884	2,955	0,961	24,54	75,46	1,87
S 120 T2	0,929	4,621	3,959	3,030	0,662	17,93	82,07	39,43
S 180 T2	0,947	4,521	3,932	2,985	0,589	16,48	83,52	51,70
S 240 T2	0,940	4,763	4,034	3,094	0,729	19,07	80,93	31,10
S 300 T2	0,960	4,533	3,687	2,727	0,846	23,68	76,32	5,59
S 360 T2	0,928	4,662	3,836	2,908	0,826	22,12	77,88	13,01
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
M 000 T2	0,929	4,710	3,567	2,638	1,143	30,23	69,77	-17,30
M 060 T2	0,930	4,836	3,402	2,472	1,434	36,71	63,29	-31,90
M 120 T2	0,937	4,638	3,869	2,932	0,769	20,78	79,22	20,32
M 180 T2	0,936	4,519	3,849	2,913	0,670	18,70	81,30	33,69
M 240 T2	0,928	4,856	4,101	3,173	0,755	19,22	80,78	30,07
M 300 T2	0,936	4,366	3,245	2,309	1,121	32,68	67,32	-23,51
M 360 T2	0,935	4,475	3,414	2,479	1,061	29,97	70,03	-16,59
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
I 000 T2	0,936	4,997	4,075	3,139	0,922	22,70	77,30	10,11
I 060 T2	0,929	4,997	3,817	2,888	1,180	29,01	70,99	-13,81
I 120 T2	0,948	4,918	4,188	3,240	0,730	18,39	81,61	35,96
I 180 T2	0,929	4,828	4,238	3,309	0,590	15,13	84,87	65,21
I 240 T2	0,938	5,280	4,619	3,681	0,661	15,22	84,78	64,22
I 300 T2	0,936	4,631	4,022	3,086	0,609	16,48	83,52	51,68
I 360 T2	0,945	4,625	3,564	2,619	1,061	28,83	71,17	-13,29

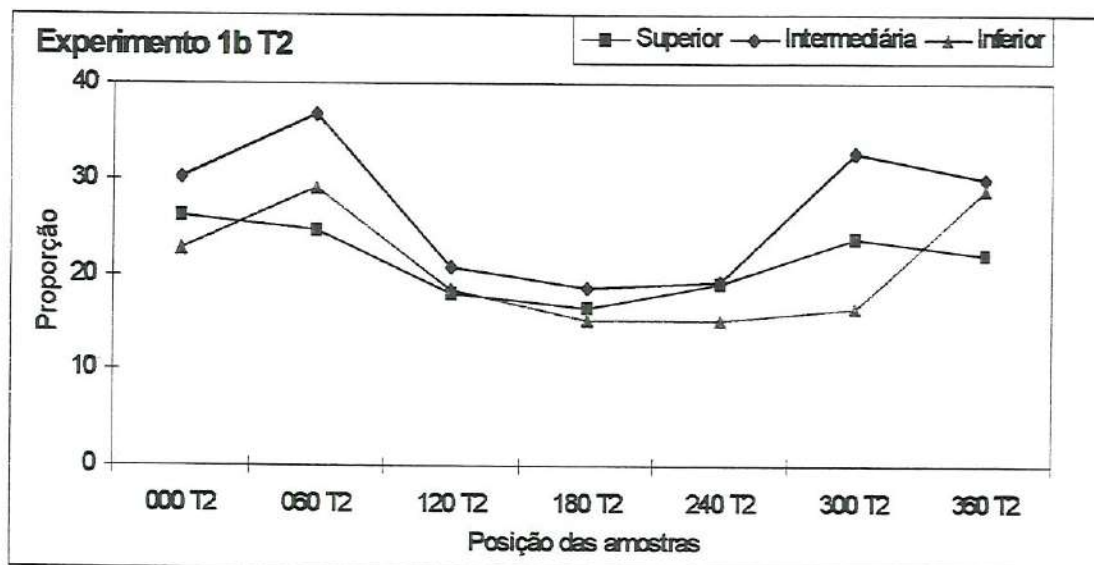


Figura B.2 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1b.



Tabela B.3 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,4  $U_{MF}$ , areia 225 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
S 000 T3	0,934	4,622	3,988	3,054	0,634	17,19	82,81	45,43
S 060 T3	0,924	4,369	3,594	2,670	0,775	22,50	77,50	11,13
S 120 T3	0,948	4,580	3,883	2,935	0,697	19,19	80,81	30,27
S 180 T3	0,934	4,051	3,471	2,537	0,580	18,61	81,39	34,35
S 240 T3	0,940	4,627	3,880	2,940	0,747	20,26	79,74	23,39
S 300 T3	0,931	4,555	3,898	2,967	0,657	18,13	81,87	37,90
S 360 T3	0,949	4,656	3,821	2,872	0,835	22,52	77,48	10,99
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
M 000 T3	0,934	4,634	3,895	2,961	0,739	19,97	80,03	25,17
M 060 T3	0,955	4,043	3,233	2,278	0,810	26,23	73,77	-4,69
M 120 T3	0,945	4,630	3,780	2,835	0,850	23,07	76,93	8,38
M 180 T3	0,944	4,316	3,690	2,746	0,626	18,56	81,44	34,66
M 240 T3	0,936	4,596	3,861	2,925	0,735	20,08	79,92	24,49
M 300 T3	0,946	4,549	3,822	2,876	0,727	20,18	79,82	23,90
M 360 T3	0,941	4,398	3,543	2,602	0,855	24,73	75,27	1,08
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
I 000 T3	0,947	4,912	3,984	3,037	0,928	23,40	76,60	6,82
I 060 T3	0,940	3,071	2,468	1,528	0,603	28,30	71,70	-11,65
I 120 T3	0,933	4,844	3,911	2,978	0,933	23,86	76,14	4,80
I 180 T3	0,942	4,551	3,894	2,952	0,657	18,20	81,80	37,33
I 240 T3	0,944	5,254	4,042	3,098	1,212	28,12	71,88	-11,10
I 300 T3	0,945	4,878	4,072	3,127	0,806	20,49	79,51	21,99
I 360 T3	0,938	4,576	3,702	2,764	0,874	24,02	75,98	4,06

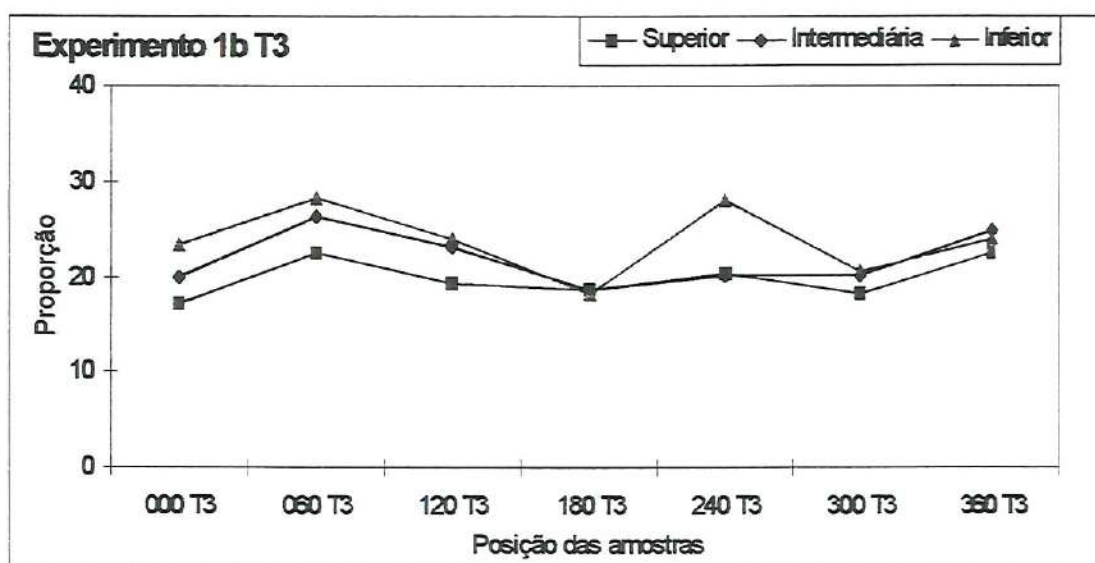


Figura B.3 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1b.

Tabela B.4 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,4  $U_{MF}$ , areia 225 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
S 000 T4	0,934	4,443	3,828	2,894	0,615	17,53	82,47	42,64
S 060 T4	0,939	4,696	3,938	2,999	0,758	20,18	79,82	23,91
S 120 T4	0,937	4,657	3,929	2,992	0,728	19,57	80,43	27,75
S 180 T4	0,929	3,219	2,805	1,876	0,414	18,08	81,92	38,29
S 240 T4	0,936	4,549	3,916	2,980	0,633	17,52	82,48	42,69
S 300 T4	0,929	4,616	3,878	2,949	0,738	20,02	79,98	24,90
S 360 T4	0,944	4,930	4,162	3,218	0,768	19,27	80,73	29,75
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
M 000 T4	0,950	4,522	3,842	2,892	0,680	19,04	80,96	31,32
M 060 T4	0,936	4,693	3,759	2,823	0,934	24,86	75,14	0,56
M 120 T4	0,941	4,773	3,950	3,009	0,823	21,48	78,52	16,40
M 180 T4	0,927	3,956	3,372	2,445	0,584	19,28	80,72	29,67
M 240 T4	0,943	4,673	3,983	3,040	0,690	18,50	81,50	35,14
M 300 T4	0,953	4,632	3,879	2,926	0,753	20,47	79,53	22,14
M 360 T4	0,929	4,993	4,038	3,109	0,955	23,50	76,50	6,39
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
I 000 T4	0,951	4,815	4,044	3,093	0,771	19,95	80,05	25,29
I 060 T4	0,940	4,862	3,863	2,923	0,999	25,47	74,53	-1,85
I 120 T4	0,937	4,843	4,095	3,158	0,748	19,15	80,85	30,55
I 180 T4	0,938	3,757	3,279	2,341	0,478	16,96	83,04	47,44
I 240 T4	0,938	4,965	4,101	3,163	0,864	21,46	78,54	16,52
I 300 T4	0,946	2,718	2,343	1,397	0,375	21,16	78,84	18,13
I 360 T4	0,931	5,231	4,147	3,216	1,084	25,21	74,79	-0,83

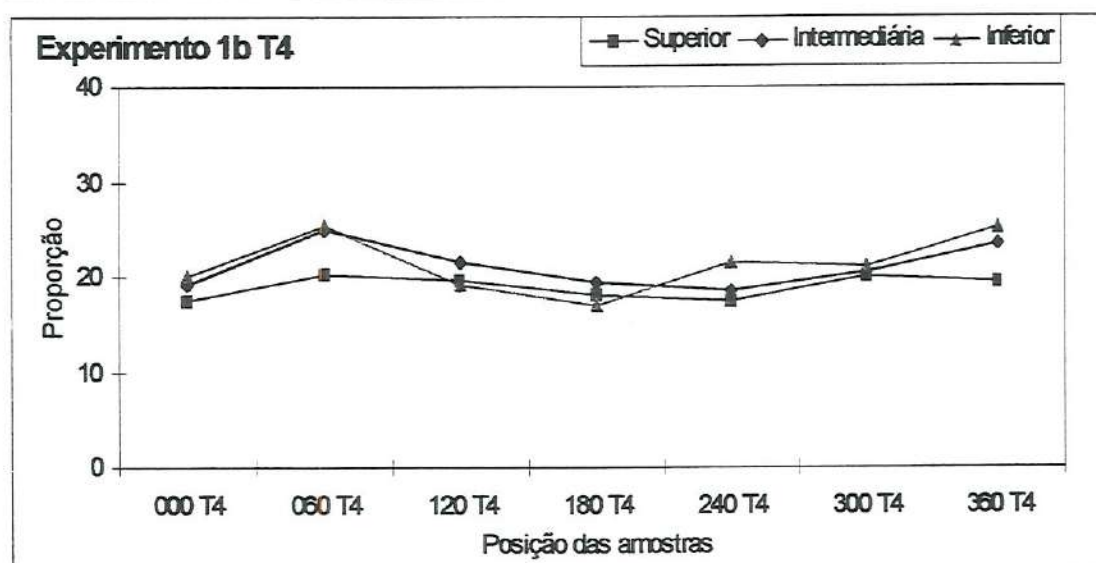


Figura B.4 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1b.



Tabela B.5 – Ensaio com velocidade de fluidização  $1,7 U_{MF}$ , areia  $225\mu\text{m}$  e traçador  $450\mu\text{m}$ .

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
S 000 T1	0,946	4,939	3,883	2,937	1,056	26,45	73,55	-5,47
S 060 T1	0,955	4,619	3,740	2,785	0,879	23,99	76,01	4,21
S 120 T1	0,944	4,778	3,772	2,828	1,006	26,24	73,76	-4,72
S 180 T1	0,936	4,777	3,622	2,686	1,155	30,07	69,93	-16,86
S 240 T1	0,952	4,668	3,664	2,712	1,004	27,02	72,98	-7,47
S 300 T1	0,944	4,789	3,756	2,812	1,033	26,87	73,13	-6,95
S 360 T1	0,950	4,755	3,775	2,825	0,980	25,76	74,24	-2,93
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
M 000 T1	0,950	5,013	3,906	2,956	1,107	27,25	72,75	-8,24
M 060 T1	0,948	4,509	3,663	2,715	0,846	23,76	76,24	5,23
M 120 T1	0,944	4,942	3,888	2,944	1,054	26,36	73,64	-5,17
M 180 T1	0,946	4,906	3,656	2,710	1,250	31,57	68,43	-20,80
M 240 T1	0,958	4,777	3,696	2,738	1,081	28,31	71,69	-11,68
M 300 T1	0,944	4,870	3,732	2,788	1,138	28,99	71,01	-13,75
M 360 T1	0,943	4,920	3,830	2,887	1,090	27,41	72,59	-8,78
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
I 000 T1	0,940	5,259	4,158	3,218	1,101	25,49	74,51	-1,93
I 060 T1	0,932	4,851	3,932	3,000	0,919	23,45	76,55	6,61
I 120 T1	0,946	5,319	4,239	3,293	1,080	24,70	75,30	1,23
I 180 T1	0,951	5,231	3,938	2,987	1,293	30,21	69,79	-17,25
I 240 T1	0,938	5,070	3,935	2,997	1,135	27,47	72,53	-8,99
I 300 T1	0,940	5,176	4,035	3,095	1,141	26,94	73,06	-7,19
I 360 T1	0,941	5,197	4,171	3,230	1,026	24,11	75,89	3,70

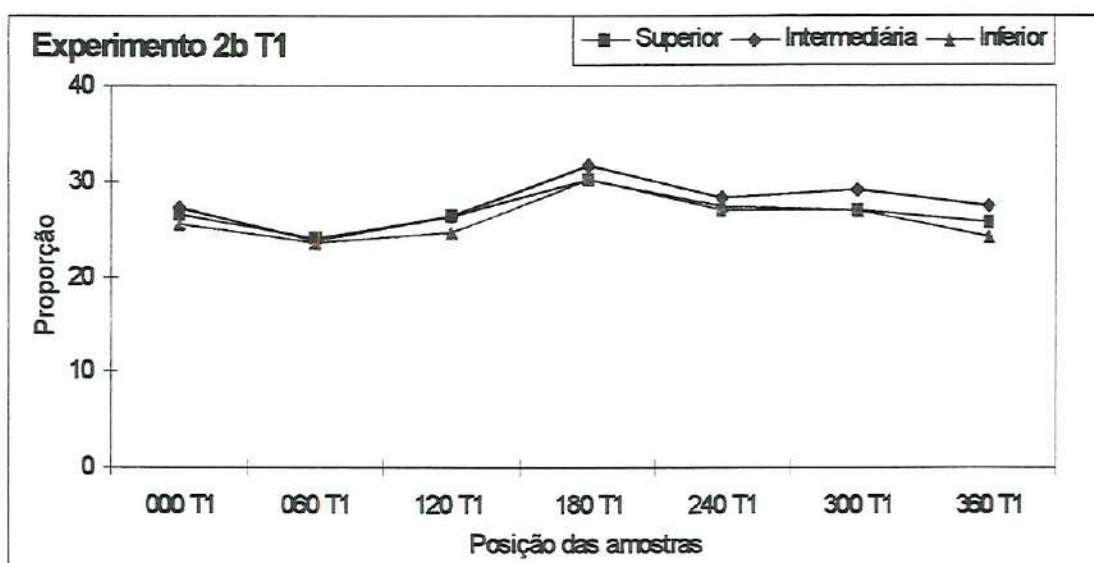


Figura B.5 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1b.



Tabela B.6 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,7  $U_{MF}$ , areia 225 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
S 000 T2	0,935	4,705	3,720	2,785	0,985	26,13	73,87	-4,31
S 060 T2	0,913	4,879	3,787	2,874	1,092	27,53	72,47	-9,20
S 120 T2	0,936	4,710	3,609	2,673	1,101	29,17	70,83	-14,31
S 180 T2	0,927	4,654	3,575	2,648	1,079	28,95	71,05	-13,65
S 240 T2	0,932	4,973	3,787	2,855	1,186	29,35	70,65	-14,82
S 300 T2	0,918	4,911	3,767	2,849	1,144	28,65	71,35	-12,74
S 360 T2	0,928	4,779	3,666	2,738	1,113	28,90	71,10	-13,50
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
M 000 T2	0,929	4,818	3,742	2,813	1,076	27,67	72,33	-9,64
M 060 T2	0,934	4,917	3,809	2,875	1,108	27,82	72,18	-10,13
M 120 T2	0,931	4,779	3,645	2,714	1,134	29,47	70,53	-15,17
M 180 T2	0,944	4,782	3,656	2,712	1,126	29,34	70,66	-14,79
M 240 T2	0,918	4,947	3,782	2,864	1,165	28,92	71,08	-13,54
M 300 T2	0,927	4,963	3,786	2,859	1,177	29,16	70,84	-14,27
M 360 T2	0,919	4,876	3,724	2,805	1,152	29,11	70,89	-14,13
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
I 000 T2	0,946	5,185	4,076	3,130	1,109	26,16	73,84	-4,44
I 060 T2	0,953	5,261	4,068	3,115	1,193	27,69	72,31	-9,72
I 120 T2	0,948	5,146	3,978	3,030	1,168	27,82	72,18	-10,15
I 180 T2	0,916	4,981	3,914	2,998	1,067	26,25	73,75	-4,76
I 240 T2	0,929	5,283	4,114	3,185	1,169	26,85	73,15	-6,89
I 300 T2	0,918	5,399	4,223	3,305	1,176	26,24	73,76	-4,74
I 360 T2	0,925	5,143	4,005	3,080	1,138	26,98	73,02	-7,34

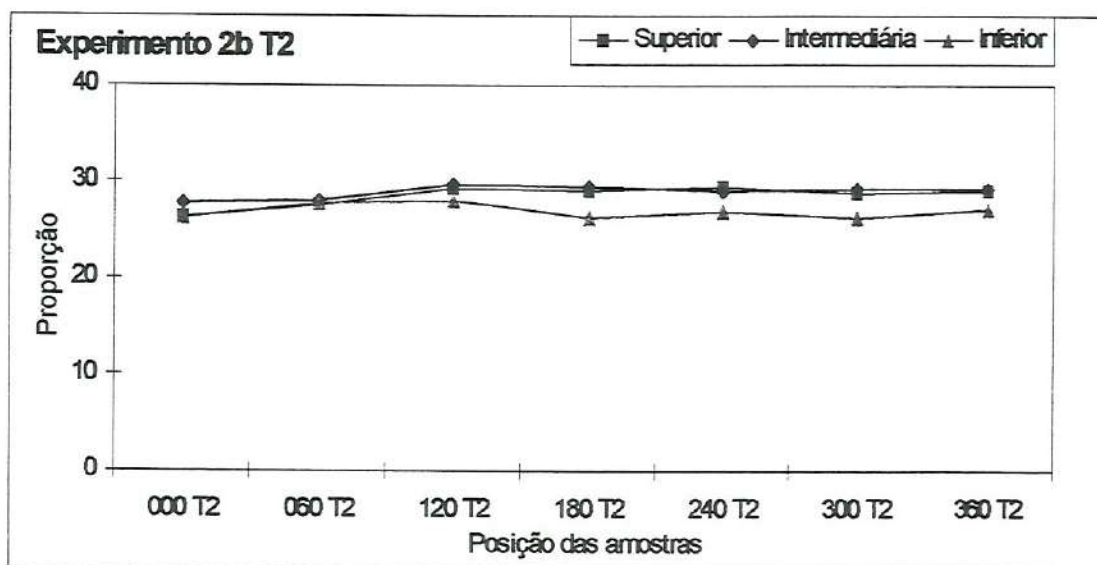


Figura B.6 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1b.

Tabela B.7 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,7  $U_{MF}$ , areia 225 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
S 000 T3	0,906	4,722	3,661	2,755	1,061	27,80	72,20	-10,08
S 060 T3	0,931	4,598	3,597	2,666	1,001	27,30	72,70	-8,42
S 120 T3	0,929	4,748	3,686	2,757	1,062	27,81	72,19	-10,10
S 180 T3	0,937	4,587	3,587	2,650	1,000	27,40	72,60	-8,75
S 240 T3	0,914	4,538	3,460	2,546	1,078	29,75	70,25	-15,96
S 300 T3	0,940	4,564	3,490	2,550	1,074	29,64	70,36	-15,64
S 360 T3	0,927	4,651	3,586	2,659	1,065	28,60	71,40	-12,58
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
M 000 T3	0,931	4,652	3,655	2,724	0,997	26,79	73,21	-6,70
M 060 T3	0,926	4,502	3,476	2,550	1,026	28,69	71,31	-12,87
M 120 T3	0,946	4,757	3,683	2,737	1,074	28,18	71,82	-11,29
M 180 T3	0,916	4,570	3,581	2,665	0,989	27,07	72,93	-7,63
M 240 T3	0,937	4,557	3,488	2,551	1,069	29,53	70,47	-15,34
M 300 T3	0,920	4,766	3,641	2,721	1,125	29,25	70,75	-14,53
M 360 T3	0,936	4,658	3,592	2,656	1,066	28,64	71,36	-12,71
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
I 000 T3	0,933	4,963	3,842	2,909	1,121	27,82	72,18	-10,12
I 060 T3	0,937	4,927	3,784	2,847	1,143	28,65	71,35	-12,73
I 120 T3	0,920	5,043	3,922	3,002	1,121	27,19	72,81	-8,05
I 180 T3	0,936	4,935	3,920	2,984	1,015	25,38	74,62	-1,50
I 240 T3	0,929	4,793	3,710	2,781	1,083	28,03	71,97	-10,80
I 300 T3	0,953	5,416	4,169	3,216	1,247	27,94	72,06	-10,53
I 360 T3	0,924	5,071	3,926	3,002	1,145	27,61	72,39	-9,45

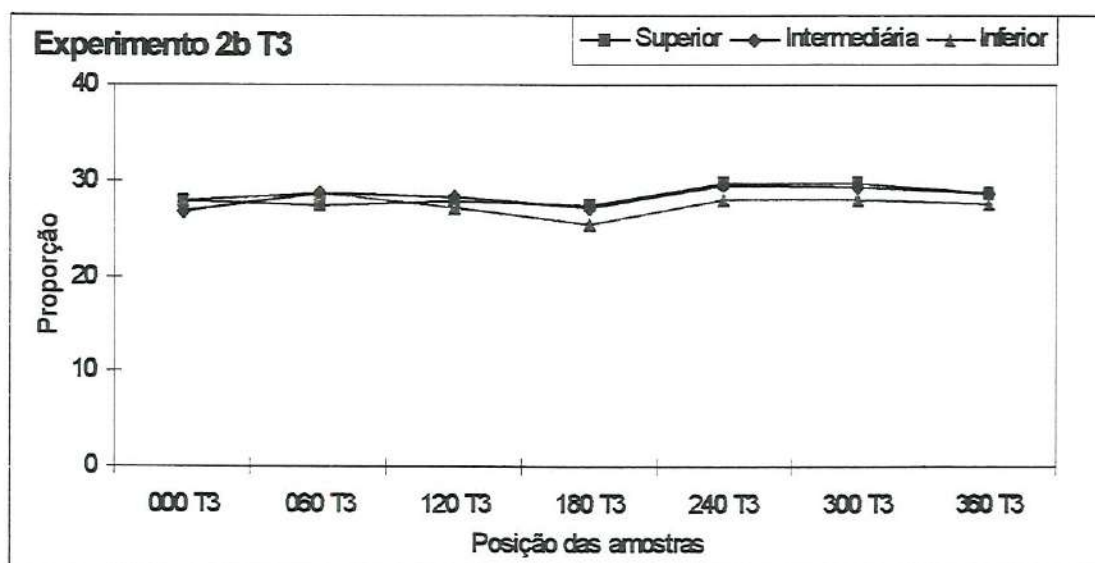


Figura B.7 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1b.



Tabela B.8 – Ensaio com velocidade de fluidização  $1,7 U_{MF}$ , areia  $225\mu\text{m}$  e traçador  $450\mu\text{m}$ .

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
S 000 T4	0,946	4,871	3,880	2,934	0,991	25,25	74,75	-0,98
S 060 T4	0,941	4,582	3,550	2,609	1,032	28,34	71,66	-11,80
S 120 T4	0,957	4,523	3,546	2,589	0,977	27,40	72,60	-8,75
S 180 T4	0,934	4,724	3,600	2,666	1,124	29,66	70,34	-15,70
S 240 T4	0,959	4,607	3,476	2,517	1,131	31,00	69,00	-19,36
S 300 T4	0,932	4,470	3,424	2,492	1,046	29,56	70,44	-15,44
S 360 T4	0,962	3,515	2,719	1,757	0,796	31,18	68,82	-19,82
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
M 000 T4	0,962	4,841	3,788	2,826	1,053	27,15	72,85	-7,91
M 060 T4	0,944	4,635	3,594	2,650	1,041	28,20	71,80	-11,36
M 120 T4	0,945	4,625	3,530	2,585	1,095	29,76	70,24	-15,98
M 180 T4	0,944	4,739	3,699	2,755	1,040	27,40	72,60	-8,77
M 240 T4	0,949	4,692	3,679	2,730	1,013	27,06	72,94	-7,63
M 300 T4	0,943	4,452	3,488	2,545	0,964	27,47	72,53	-9,00
M 360 T4	0,947	4,514	3,486	2,539	1,028	28,82	71,18	-13,25
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
I 000 T4	0,923	5,239	4,118	3,195	1,121	25,97	74,03	-3,75
I 060 T4	0,953	4,973	3,880	2,927	1,093	27,19	72,81	-8,05
I 120 T4	0,948	5,039	3,877	2,929	1,162	28,40	71,60	-11,98
I 180 T4	0,958	5,075	3,993	3,035	1,082	26,28	73,72	-4,88
I 240 T4	0,944	5,060	3,949	3,005	1,111	26,99	73,01	-7,38
I 300 T4	0,942	4,792	3,715	2,773	1,077	27,97	72,03	-10,63
I 360 T4	0,938	4,879	3,726	2,788	1,153	29,26	70,74	-14,55

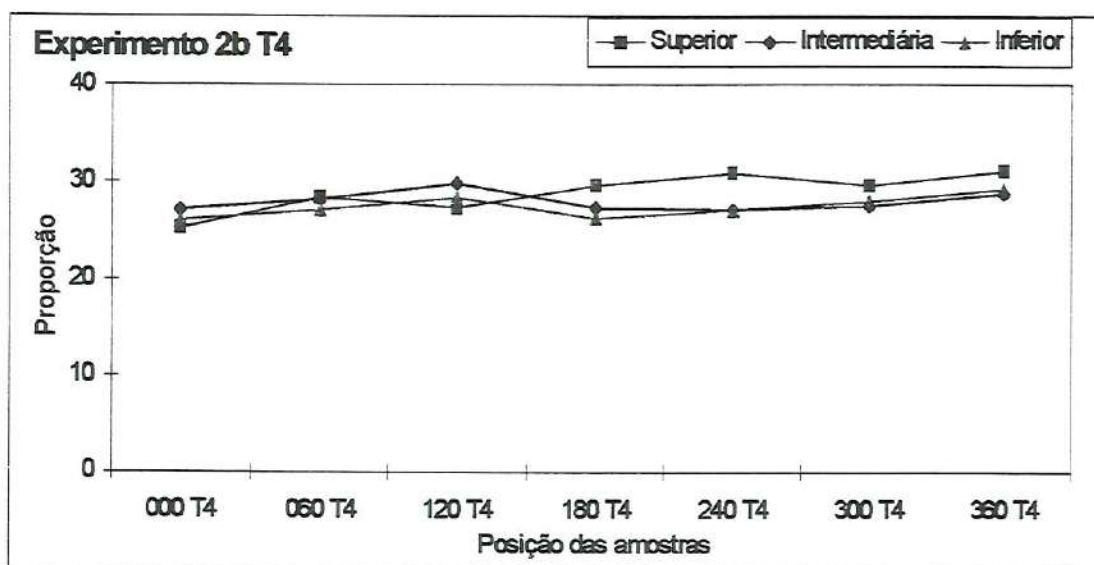


Figura B.8 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1b.



Tabela B.9 – Ensaio com velocidade de fluidização 2,0  $U_{MF}$ , areia 225 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
S 000 T1	0,925	4,370	3,423	2,498	0,947	27,49	72,51	-9,05
S 060 T1	0,999	4,100	2,886	1,887	1,214	39,15	60,85	-36,14
S 120 T1	0,926	4,217	2,265	1,339	1,952	59,31	40,69	-57,85
S 180 T1	0,988	3,995	3,202	2,214	0,793	26,37	73,63	-5,20
S 240 T1	0,931	4,200	3,276	2,345	0,924	28,27	71,73	-11,55
S 300 T1	0,996	4,684	3,724	2,728	0,960	26,03	73,97	-3,96
S 360 T1	0,916	4,692	3,726	2,810	0,966	25,58	74,42	-2,28
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
M 000 T1	0,960	4,404	3,661	2,701	0,743	21,57	78,43	15,88
M 060 T1	0,922	4,028	3,078	2,156	0,950	30,59	69,41	-18,26
M 120 T1	0,965	4,445	3,142	2,177	1,303	37,44	62,56	-33,23
M 180 T1	0,936	3,780	3,010	2,074	0,770	27,07	72,93	-7,66
M 240 T1	0,977	4,242	3,365	2,388	0,877	26,86	73,14	-6,93
M 300 T1	0,914	4,571	3,582	2,668	0,989	27,04	72,96	-7,56
M 360 T1	0,993	4,788	3,688	2,695	1,100	28,99	71,01	-13,75
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
I 000 T1	0,929	4,499	4,041	3,112	0,458	12,83	87,17	94,87
I 060 T1	0,954	4,417	3,949	2,995	0,468	13,51	86,49	84,99
I 120 T1	0,938	4,894	4,412	3,474	0,482	12,18	87,82	105,19
I 180 T1	0,969	4,255	3,463	2,494	0,792	24,10	75,90	3,72
I 240 T1	0,917	4,531	3,595	2,678	0,936	25,90	74,10	-3,47
I 300 T1	0,948	4,818	3,861	2,913	0,957	24,73	75,27	1,10
I 360 T1	0,922	5,175	4,244	3,322	0,931	21,89	78,11	14,21

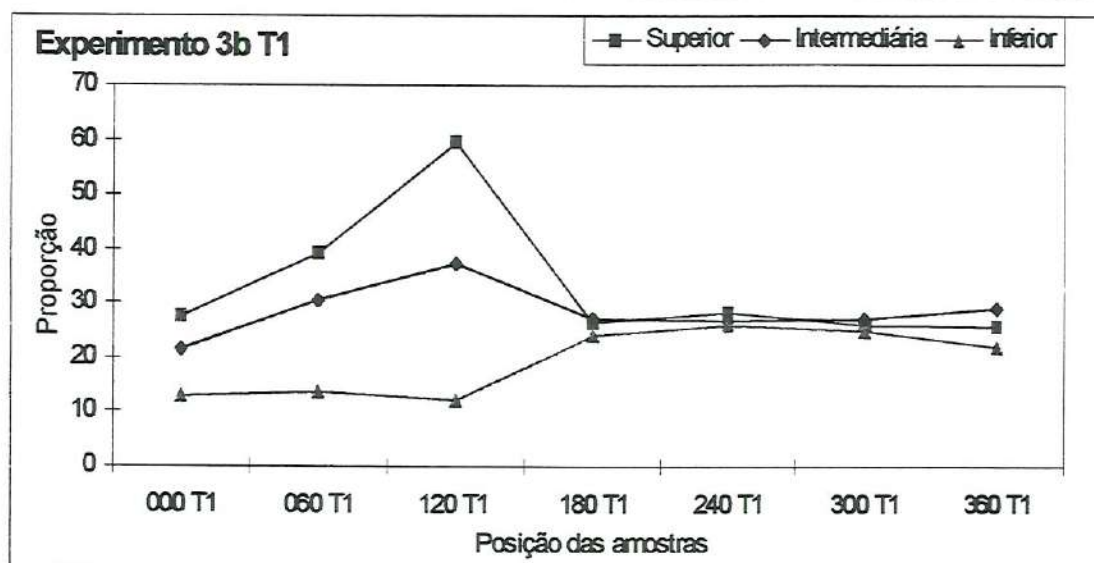


Figura B.9 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1b.

Tabela B.10 – Ensaio com velocidade de fluidização  $2,0 U_{MF}$ , areia  $225\mu\text{m}$  e traçador  $450\mu\text{m}$ .

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
S 000 T2	1,003	4,817	3,846	2,843	0,971	25,46	74,54	-1,80
S 060 T2	0,911	4,848	3,805	2,894	1,043	26,49	73,51	-5,63
S-120 T2	0,990	4,799	3,769	2,779	1,030	27,04	72,96	-7,55
S 180 T2	0,914	4,604	3,583	2,669	1,021	27,67	72,33	-9,65
S-240 T2	1,007	4,714	3,765	2,758	0,949	25,60	74,40	-2,34
S-300 T2	0,913	4,784	3,716	2,803	1,068	27,59	72,41	-9,39
S 360 T2	0,996	5,025	3,942	2,946	1,083	26,88	73,12	-6,99
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
M 000 T2	0,926	4,722	3,717	2,791	1,005	26,48	73,52	-5,57
M 060 T2	0,988	4,760	3,751	2,763	1,009	26,75	73,25	-6,54
M 120 T2	0,933	4,760	3,658	2,725	1,102	28,80	71,20	-13,18
M 180 T2	1,004	4,656	3,646	2,642	1,010	27,66	72,34	-9,60
M 240 T2	0,928	4,658	3,596	2,668	1,062	28,47	71,53	-12,19
M 300 T2	0,988	4,802	3,692	2,704	1,110	29,10	70,90	-14,10
M 360 T2	0,920	4,916	3,806	2,886	1,110	27,78	72,22	-10,00
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
I 000 T2	0,988	5,128	4,000	3,012	1,128	27,25	72,75	-8,24
I 060 T2	0,920	5,193	4,093	3,173	1,100	25,74	74,26	-2,89
I 120 T2	1,011	5,199	4,053	3,042	1,146	27,36	72,64	-8,64
I 180 T2	0,911	5,033	3,933	3,022	1,100	26,69	73,31	-6,32
I 240 T2	1,006	5,118	4,030	3,024	1,088	26,46	73,54	-5,51
I 300 T2	0,917	5,165	4,027	3,110	1,138	26,79	73,21	-6,68
I 360 T2	1,012	5,389	4,274	3,262	1,115	25,47	74,53	-1,86

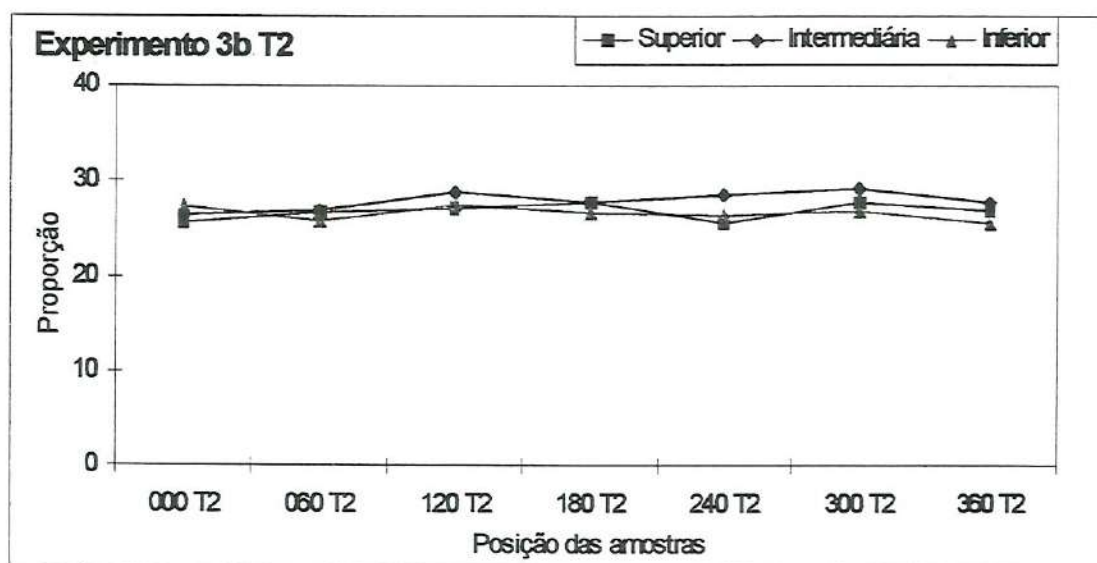


Figura B.10 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1b.



Tabela B.11 – Ensaio com velocidade de fluidização 2,0  $U_{MF}$ , areia 225 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
S 000 T3	0,905	4,901	3,843	2,938	1,058	26,48	73,52	-5,58
S 060 T3	0,964	4,526	3,593	2,629	0,933	26,19	73,81	-4,56
S 120 T3	0,919	4,763	3,724	2,805	1,039	27,03	72,97	-7,51
S 180 T3	0,971	4,653	3,642	2,671	1,011	27,46	72,54	-8,95
S 240 T3	0,912	4,688	3,644	2,732	1,044	27,65	72,35	-9,58
S 300 T3	0,957	4,972	3,863	2,906	1,109	27,62	72,38	-9,49
S 360 T3	0,930	4,526	3,593	2,663	0,933	25,95	74,05	-3,64
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
M 000 T3	0,999	4,993	3,926	2,927	1,067	26,72	73,28	-6,42
M 060 T3	0,922	4,480	3,520	2,598	0,960	26,98	73,02	-7,34
M 120 T3	0,998	4,806	3,733	2,735	1,073	28,18	71,82	-11,28
M 180 T3	0,911	4,642	3,593	2,682	1,049	28,12	71,88	-11,08
M 240 T3	0,977	4,783	3,704	2,727	1,079	28,35	71,65	-11,82
M 300 T3	0,920	4,968	3,806	2,886	1,162	28,71	71,29	-12,91
M 360 T3	0,986	4,615	3,565	2,579	1,050	28,93	71,07	-13,60
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
I 000 T3	0,931	5,315	4,157	3,226	1,158	26,41	73,59	-5,35
I 060 T3	0,991	4,888	3,853	2,862	1,035	26,56	73,44	-5,87
I 120 T3	0,930	5,215	4,047	3,117	1,168	27,26	72,74	-8,28
I 180 T3	0,990	5,076	3,974	2,984	1,102	26,97	73,03	-7,30
I 240 T3	0,921	5,202	4,065	3,144	1,137	26,56	73,44	-5,87
I 300 T3	0,998	5,372	4,204	3,206	1,168	26,70	73,30	-6,38
I 360 T3	0,917	4,950	3,892	2,975	1,058	26,23	73,77	-4,70

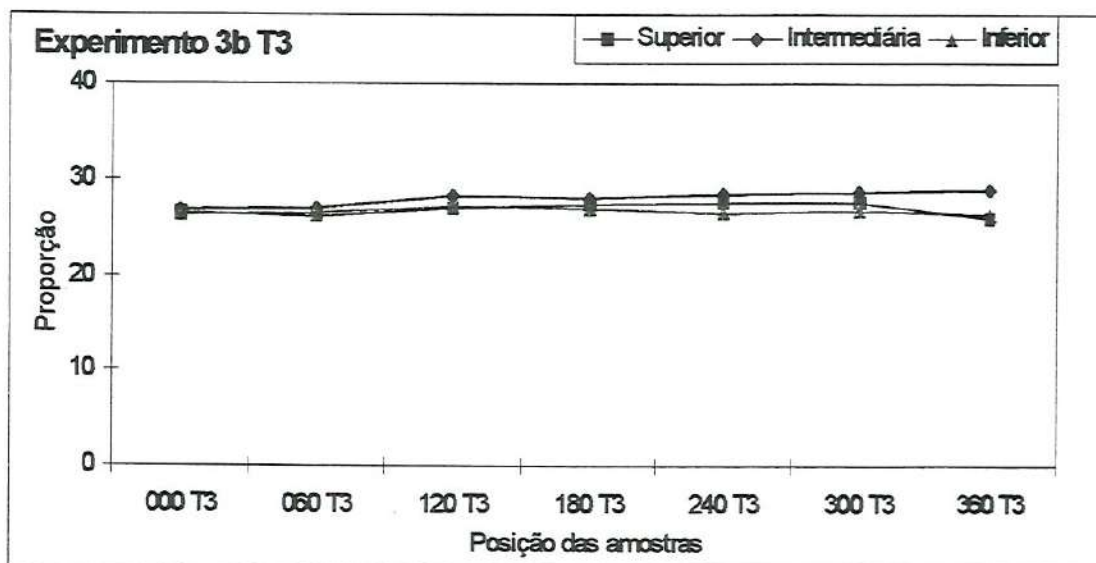


Figura B.11 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1b.



Tabela B.12 – Ensaio com velocidade de fluidização 2,0  $U_{MF}$ , areia 225 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
S 000 T4	0,975	4,768	3,795	2,820	0,973	25,65	74,35	-2,54
S 060 T4	0,917	4,688	3,631	2,714	1,057	28,03	71,97	-10,81
S 120 T4	0,982	4,560	3,566	2,584	0,994	27,78	72,22	-10,01
S 180 T4	0,915	4,468	3,512	2,597	0,956	26,91	73,09	-7,09
S 240 T4	0,983	4,278	3,372	2,389	0,906	27,50	72,50	-9,08
S 300 T4	0,920	4,356	3,669	2,749	0,687	19,99	80,01	25,04
S 360 T4	0,985	4,499	3,579	2,594	0,920	26,18	73,82	-4,51
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
M 000 T4	0,925	4,782	3,735	2,810	1,047	27,15	72,85	-7,90
M 060 T4	0,986	4,797	3,729	2,743	1,068	28,02	71,98	-10,79
M 120 T4	0,910	4,540	3,562	2,652	0,978	26,94	73,06	-7,21
M 180 T4	0,977	4,726	3,666	2,689	1,060	28,27	71,73	-11,58
M 240 T4	0,923	4,332	3,396	2,473	0,936	27,46	72,54	-8,95
M 300 T4	0,991	4,630	3,724	2,733	0,906	24,90	75,10	0,41
M 360 T4	0,918	4,543	3,597	2,679	0,946	26,10	73,90	-4,20
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
I 000 T4	0,965	5,153	4,046	3,081	1,107	26,43	73,57	-5,42
I 060 T4	0,899	5,167	4,004	3,105	1,163	27,25	72,75	-8,25
I 120 T4	0,972	4,986	3,897	2,925	1,089	27,13	72,87	-7,85
I 180 T4	0,927	5,083	3,956	3,029	1,127	27,12	72,88	-7,81
I 240 T4	0,983	5,024	3,929	2,946	1,095	27,10	72,90	-7,74
I 300 T4	0,924	4,931	3,850	2,926	1,081	26,98	73,02	-7,33
I 360 T4	0,971	5,086	3,977	3,006	1,109	26,95	73,05	-7,24

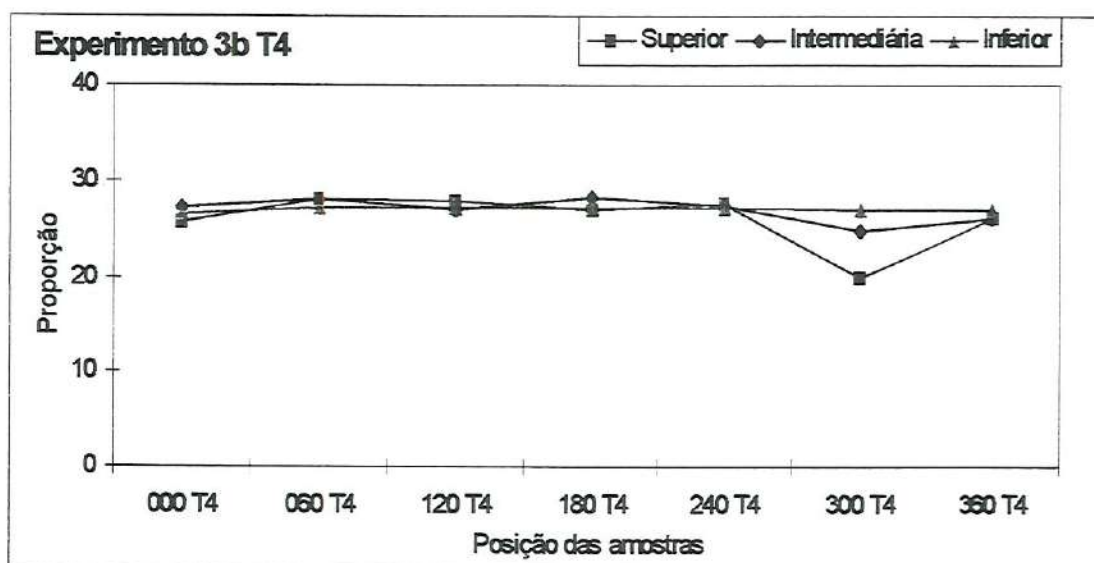


Figura B.12 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1b.

Tabela B.13 – Ensaio com velocidade de fluidização  $1,4 U_{MF}$ , areia  $450\mu\text{m}$  e traçador  $450\mu\text{m}$ .

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
S 000 T1	0,937	4,682	3,735	2,798	0,947	25,29	74,71	-1,14
S 060 T1	0,977	4,796	3,773	2,796	1,023	26,79	73,21	-6,67
S 120 T1	0,927	4,717	3,573	2,646	1,144	30,18	69,82	-17,18
S 180 T1	0,972	4,768	3,602	2,630	1,166	30,72	69,28	-18,61
S 240 T1	0,921	4,757	3,752	2,831	1,005	26,20	73,80	-4,58
S 300 T1	0,979	4,785	3,829	2,850	0,956	25,12	74,88	-0,47
S 360 T1	0,936	4,742	3,768	2,832	0,974	25,59	74,41	-2,31
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
M 000 T1	0,977	4,579	3,684	2,707	0,895	24,85	75,15	0,61
M 060 T1	0,917	4,690	3,636	2,719	1,054	27,94	72,06	-10,51
M 120 T1	0,975	4,717	3,629	2,654	1,088	29,08	70,92	-14,02
M 180 T1	0,935	4,838	3,643	2,708	1,195	30,62	69,38	-18,35
M 240 T1	0,976	4,779	3,874	2,898	0,905	23,80	76,20	5,06
M 300 T1	0,929	4,605	3,759	2,830	0,846	23,01	76,99	8,63
M 360 T1	0,973	4,650	3,681	2,708	0,969	26,35	73,65	-5,13
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
I 000 T1	0,928	4,939	3,939	3,011	1,000	24,93	75,07	0,28
I 060 T1	0,971	5,415	4,143	3,172	1,272	28,62	71,38	-12,66
I 120 T1	0,940	5,111	3,926	2,986	1,185	28,41	71,59	-12,00
I 180 T1	0,977	5,408	3,895	2,918	1,513	34,15	65,85	-26,78
I 240 T1	0,926	5,219	4,608	3,682	0,611	14,23	85,77	75,65
I 300 T1	0,970	5,245	4,254	3,284	0,991	23,18	76,82	7,85
I 360 T1	0,930	5,105	4,006	3,076	1,099	26,32	73,68	-5,03

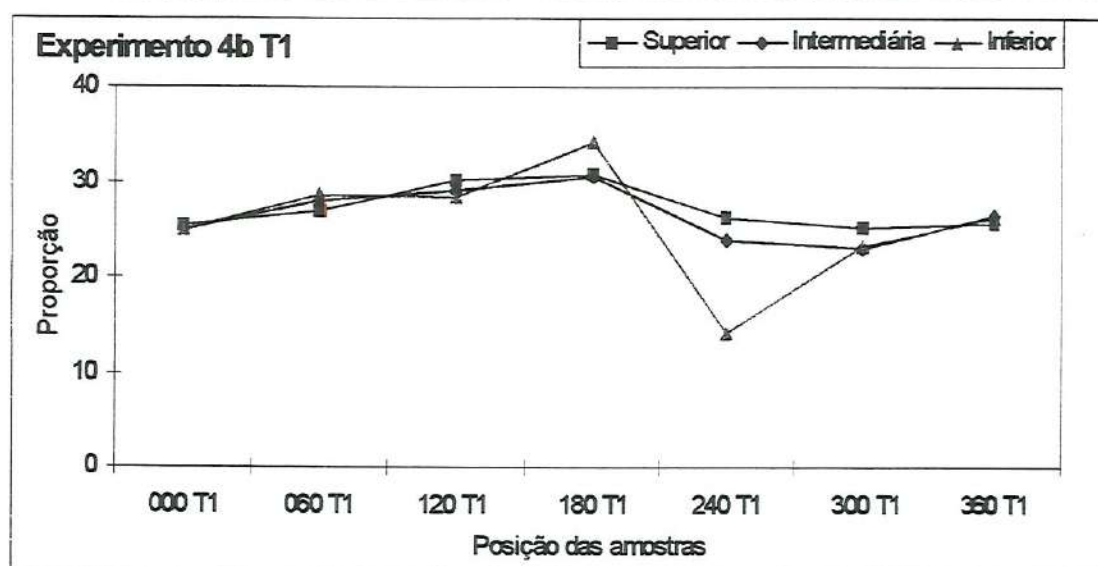


Figura B.13 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1b.



Tabela B.14 – Ensaios com velocidade de fluidização 1,4  $U_{MF}$ , areia 450 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
S 000 T2	0,979	4,525	3,591	2,612	0,934	26,34	73,66	-5,09
S 060 T2	0,923	4,828	3,774	2,851	1,054	26,99	73,01	-7,38
S 120 T2	0,971	4,854	3,834	2,863	1,020	26,27	73,73	-4,83
S 180 T2	0,929	4,669	3,706	2,777	0,963	25,75	74,25	-2,91
S 240 T2	0,980	4,586	3,616	2,636	0,970	26,90	73,10	-7,06
S 300 T2	0,885	4,550	3,624	2,739	0,926	25,27	74,73	-1,05
S 360 T2	0,911	4,850	3,848	2,937	1,002	25,44	74,56	-1,72
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
M 000 T2	0,929	4,613	3,649	2,720	0,964	26,17	73,83	-4,46
M 060 T2	0,967	4,838	3,787	2,820	1,051	27,15	72,85	-7,92
M 120 T2	0,933	4,814	3,816	2,883	0,998	25,72	74,28	-2,78
M 180 T2	0,978	4,695	3,727	2,749	0,968	26,04	73,96	-4,00
M 240 T2	0,914	4,565	3,623	2,709	0,942	25,80	74,20	-3,11
M 300 T2	0,970	4,815	3,814	2,844	1,001	26,03	73,97	-3,97
M 360 T2	0,931	4,909	3,877	2,946	1,032	25,94	74,06	-3,63
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
I 000 T2	0,986	5,322	4,192	3,206	1,130	26,06	73,94	-4,07
I 060 T2	0,942	5,328	4,147	3,205	1,181	26,93	73,07	-7,15
I 120 T2	0,987	5,322	4,171	3,184	1,151	26,55	73,45	-5,84
I 180 T2	0,927	5,055	3,978	3,051	1,077	26,09	73,91	-4,18
I 240 T2	0,967	5,127	4,020	3,053	1,107	26,61	73,39	-6,05
I 300 T2	0,936	5,217	4,101	3,165	1,116	26,07	73,93	-4,10
I 360 T2	0,982	5,478	4,291	3,309	1,187	26,40	73,60	-5,31

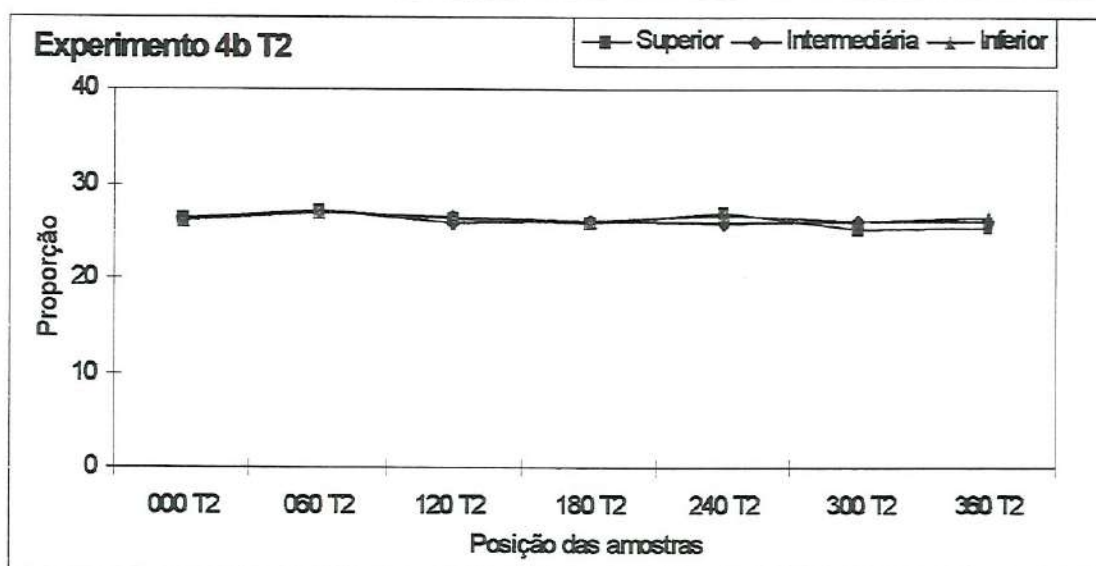


Figura B.14 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1b.



Tabela B.15 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,4  $U_{MF}$ , areia 450 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
S 000 T3	0,905	4,944	3,916	3,011	1,028	25,45	74,55	-1,78
S 060 T3	0,937	4,762	3,759	2,822	1,003	26,22	73,78	-4,66
S 120 T3	0,886	4,823	3,803	2,917	1,020	25,91	74,09	-3,50
S 180 T3	0,934	4,668	3,713	2,779	0,955	25,58	74,42	-2,25
S 240 T3	0,898	4,585	3,631	2,733	0,954	25,87	74,13	-3,38
S 300 T3	0,936	4,797	3,794	2,858	1,003	25,98	74,02	-3,76
S 360 T3	0,893	4,767	3,749	2,856	1,018	26,28	73,72	-4,86
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
M 000 T3	0,920	4,747	3,754	2,834	0,993	25,95	74,05	-3,65
M 060 T3	0,895	4,859	3,842	2,947	1,017	25,66	74,34	-2,56
M 120 T3	0,923	4,791	3,786	2,863	1,005	25,98	74,02	-3,78
M 180 T3	0,901	4,708	3,740	2,839	0,968	25,43	74,57	-1,68
M 240 T3	0,928	4,708	3,737	2,809	0,971	25,69	74,31	-2,68
M 300 T3	0,896	4,761	3,769	2,873	0,992	25,67	74,33	-2,60
M 360 T3	0,925	4,872	3,872	2,947	1,000	25,34	74,66	-1,33
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
I 000 T3	0,875	5,339	4,169	3,294	1,170	26,21	73,79	-4,62
I 060 T3	0,914	5,355	4,215	3,301	1,140	25,67	74,33	-2,61
I 120 T3	0,890	5,308	4,146	3,256	1,162	26,30	73,70	-4,95
I 180 T3	0,920	5,142	4,047	3,127	1,095	25,94	74,06	-3,61
I 240 T3	0,907	5,209	4,074	3,167	1,135	26,38	73,62	-5,24
I 300 T3	0,922	5,262	4,153	3,231	1,109	25,55	74,45	-2,16
I 360 T3	0,902	5,471	4,270	3,368	1,201	26,29	73,71	-4,89

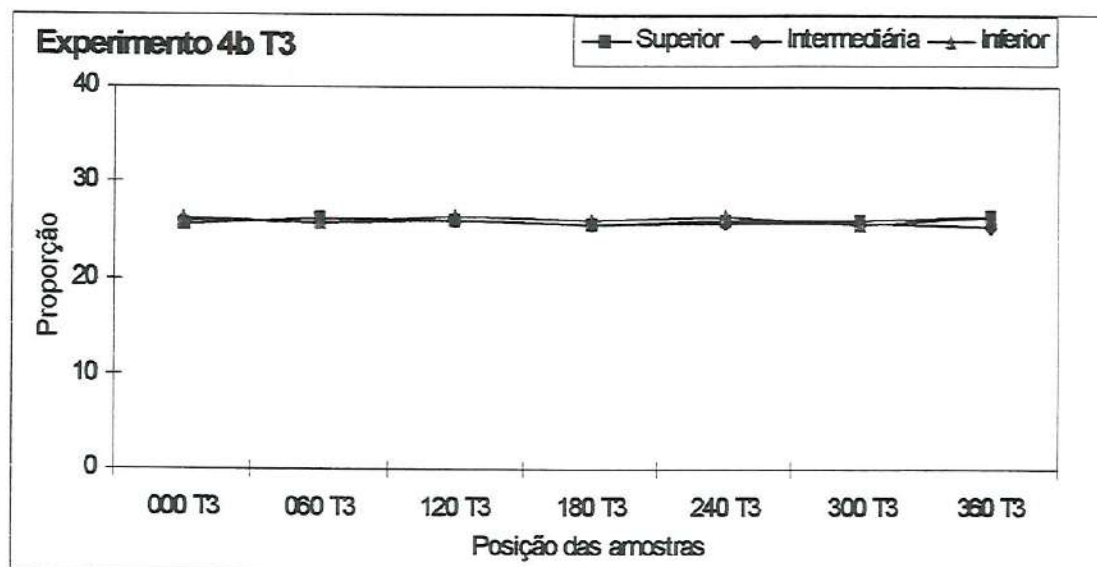


Figura B.15 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1b.

Tabela B.16 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,4  $U_{MF}$ , areia 450 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
S 000 T4	0,945	4,660	3,708	2,763	0,952	25,63	74,37	-2,44
S 060 T4	0,903	4,773	3,728	2,825	1,045	27,00	73,00	-7,42
S 120 T4	0,931	4,679	3,716	2,785	0,963	25,69	74,31	-2,70
S 180 T4	0,926	4,778	3,810	2,884	0,968	25,13	74,87	-0,52
S 240 T4	0,947	4,514	3,598	2,651	0,916	25,68	74,32	-2,65
S 300 T4	0,918	4,526	3,608	2,690	0,918	25,44	74,56	-1,74
S 360 T4	0,948	4,779	3,781	2,833	0,998	26,05	73,95	-4,03
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
M 000 T4	0,895	4,636	3,697	2,802	0,939	25,10	74,90	-0,40
M 060 T4	0,913	4,832	3,815	2,902	1,017	25,95	74,05	-3,66
M 120 T4	0,909	4,723	3,778	2,869	0,945	24,78	75,22	0,90
M 180 T4	0,933	4,911	3,900	2,967	1,011	25,41	74,59	-1,63
M 240 T4	0,896	4,400	3,514	2,618	0,886	25,29	74,71	-1,13
M 300 T4	0,923	4,551	3,632	2,709	0,919	25,33	74,67	-1,31
M 360 T4	0,908	4,805	3,823	2,915	0,982	25,20	74,80	-0,79
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
I 000 T4	0,933	5,376	4,224	3,291	1,152	25,93	74,07	-3,58
I 060 T4	0,900	5,382	4,183	3,283	1,199	26,75	73,25	-6,55
I 120 T4	0,931	5,374	4,260	3,329	1,114	25,07	74,93	-0,29
I 180 T4	0,894	5,310	4,170	3,276	1,140	25,82	74,18	-3,16
I 240 T4	0,928	4,836	3,838	2,910	0,998	25,54	74,46	-2,10
I 300 T4	0,891	5,009	3,947	3,056	1,062	25,79	74,21	-3,06
I 360 T4	0,924	5,269	4,164	3,240	1,105	25,43	74,57	-1,70

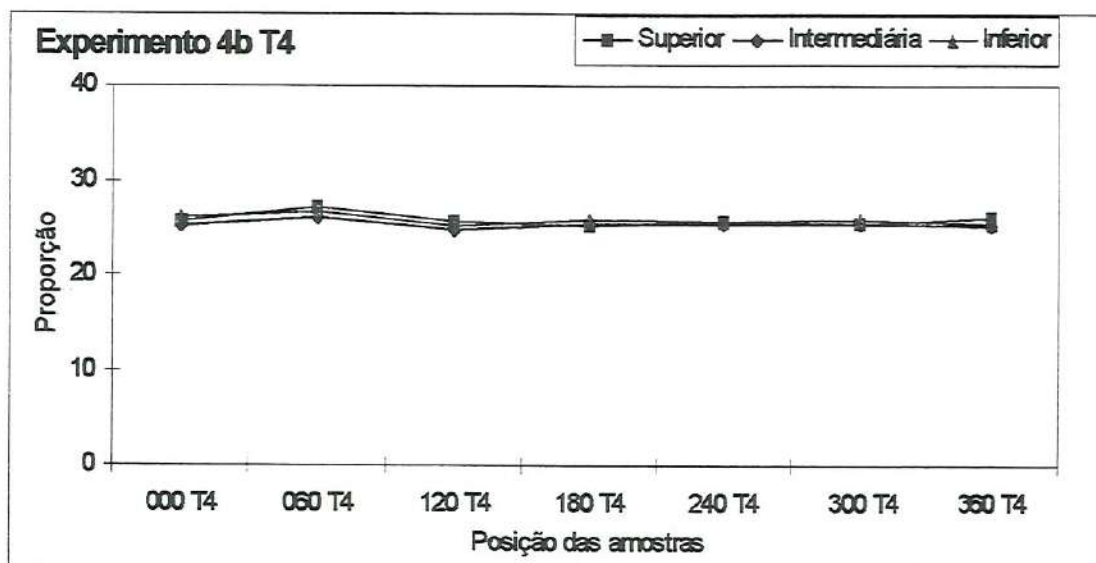


Figura B.16 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1b.



Tabela B.17 – Ensaios com velocidade de fluidização 1,7  $U_{MF}$ , areia 450 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
S 000 T1	0,914	4,762	3,880	2,966	0,882	22,92	77,08	9,07
S 060 T1	0,923	4,613	3,753	2,830	0,860	23,31	76,69	7,27
S 120 T1	0,925	4,595	3,762	2,837	0,833	22,70	77,30	10,14
S 180 T1	0,925	4,723	3,689	2,764	1,034	27,22	72,78	-8,17
S 240 T1	0,911	4,500	3,457	2,546	1,043	29,06	70,94	-13,97
S 300 T1	0,917	4,643	3,630	2,713	1,013	27,19	72,81	-8,05
S 360 T1	0,928	4,737	3,868	2,940	0,869	22,81	77,19	9,58
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
M 000 T1	0,905	4,636	3,743	2,838	0,893	23,93	76,07	4,45
M 060 T1	0,912	4,557	3,707	2,795	0,850	23,32	76,68	7,21
M 120 T1	0,911	4,530	3,677	2,766	0,853	23,57	76,43	6,07
M 180 T1	0,908	4,574	3,613	2,705	0,961	26,21	73,79	-4,63
M 240 T1	0,929	4,498	3,379	2,450	1,119	31,35	68,65	-20,26
M 300 T1	0,911	4,595	3,615	2,704	0,980	26,60	73,40	-6,02
M 360 T1	0,918	4,714	3,786	2,868	0,928	24,45	75,55	2,26
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
I 000 T1	0,926	5,099	4,070	3,144	1,029	24,66	75,34	1,38
I 060 T1	0,936	5,039	4,103	3,167	0,936	22,81	77,19	9,59
I 120 T1	0,930	4,949	3,975	3,045	0,974	24,23	75,77	3,16
I 180 T1	0,922	4,886	3,784	2,862	1,102	27,80	72,20	-10,07
I 240 T1	0,918	4,954	3,689	2,771	1,265	31,34	68,66	-20,24
I 300 T1	0,906	5,037	3,951	3,045	1,086	26,29	73,71	-4,90
I 360 T1	0,918	5,155	4,125	3,207	1,030	24,31	75,69	2,84

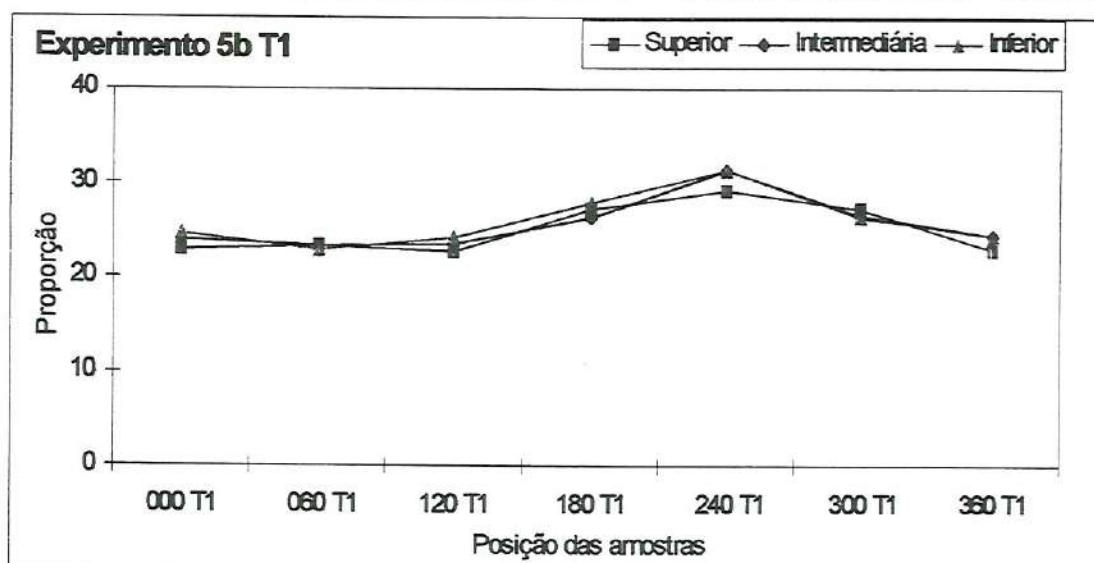


Figura B.17 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1b.



Tabela B.18 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,7  $U_{MF}$ , areia 450 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
S 000 T2	0,911	4,411	3,526	2,615	0,885	25,29	74,71	-1,13
S 060 T2	0,911	4,739	3,781	2,870	0,958	25,03	74,97	-0,10
S 120 T2	0,930	4,812	3,821	2,891	0,991	25,53	74,47	-2,07
S 180 T2	0,920	4,632	3,709	2,789	0,923	24,87	75,13	0,54
S 240 T2	0,926	4,650	3,723	2,797	0,927	24,89	75,11	0,43
S 300 T2	0,915	4,533	3,622	2,707	0,911	25,18	74,82	-0,71
S 360 T2	0,915	4,770	3,809	2,894	0,961	24,93	75,07	0,29
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
M 000 T2	0,922	4,520	3,646	2,724	0,874	24,29	75,71	2,92
M 060 T2	0,931	4,658	3,724	2,793	0,934	25,06	74,94	-0,24
M 120 T2	0,916	4,766	3,813	2,897	0,953	24,75	75,25	1,00
M 180 T2	0,923	4,622	3,997	3,074	0,625	16,90	83,10	47,96
M 240 T2	0,931	4,687	3,755	2,824	0,932	24,81	75,19	0,75
M 300 T2	0,925	4,650	3,713	2,788	0,937	25,15	74,85	-0,61
M 360 T2	0,905	4,575	3,652	2,747	0,923	25,15	74,85	-0,60
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
I 000 T2	0,928	5,016	3,995	3,067	1,021	24,98	75,02	0,10
I 060 T2	0,899	5,025	3,979	3,080	1,046	25,35	74,65	-1,39
I 120 T2	0,921	5,142	4,083	3,162	1,059	25,09	74,91	-0,35
I 180 T2	0,920	5,045	3,690	2,770	1,355	32,85	67,15	-23,89
I 240 T2	0,936	5,141	4,088	3,152	1,053	25,04	74,96	-0,17
I 300 T2	0,918	5,162	4,088	3,170	1,074	25,31	74,69	-1,21
I 360 T2	0,926	5,089	4,052	3,126	1,037	24,91	75,09	0,36

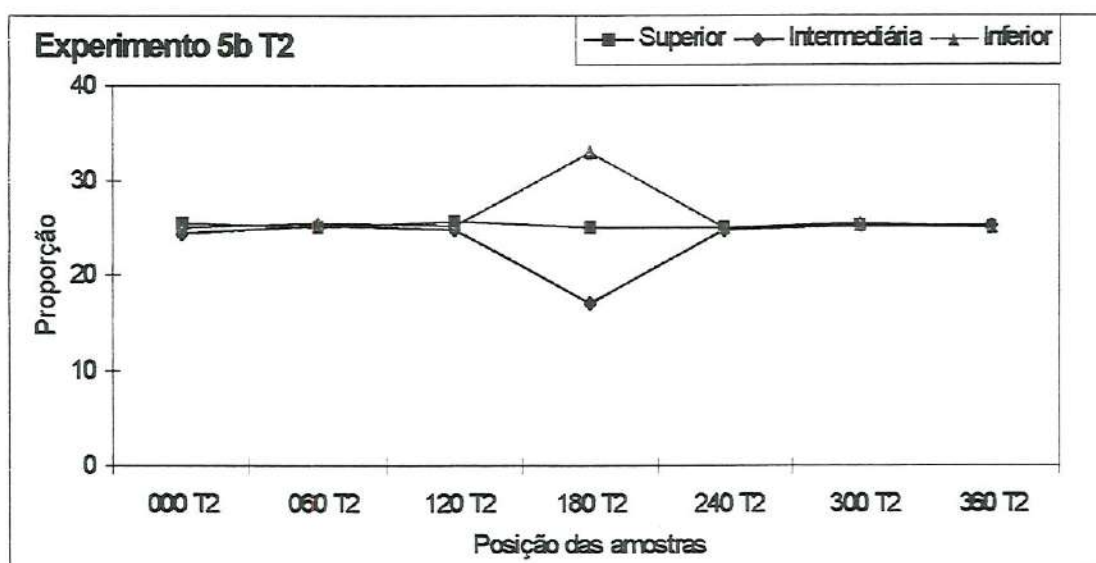


Figura B.18 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1b.

Tabela B.19 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,7  $U_{MF}$ , areia 450 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
S 000 T3	0,921	4,835	3,871	2,950	0,964	24,63	75,37	1,50
S 060 T3	0,914	4,656	3,718	2,804	0,938	25,07	74,93	-0,27
S 120 T3	0,911	4,616	3,677	2,766	0,939	25,34	74,66	-1,36
S 180 T3	0,916	4,502	3,595	2,679	0,907	25,29	74,71	-1,16
S 240 T3	0,931	4,402	3,524	2,593	0,878	25,30	74,70	-1,17
S 300 T3	0,930	4,939	3,947	3,017	0,992	24,74	75,26	1,03
S 360 T3	0,918	4,806	3,838	2,920	0,968	24,90	75,10	0,41
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
M 000 T3	0,918	4,707	3,762	2,844	0,945	24,94	75,06	0,24
M 060 T3	0,934	4,560	3,671	2,737	0,889	24,52	75,48	1,97
M 120 T3	0,916	4,567	3,666	2,750	0,901	24,68	75,32	1,30
M 180 T3	0,931	4,594	3,671	2,740	0,923	25,20	74,80	-0,79
M 240 T3	0,914	4,434	3,557	2,643	0,877	24,91	75,09	0,34
M 300 T3	0,918	4,865	3,895	2,977	0,970	24,58	75,42	1,73
M 360 T3	0,914	4,719	3,770	2,856	0,949	24,94	75,06	0,24
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
I 000 T3	0,920	5,191	4,129	3,209	1,062	24,87	75,13	0,54
I 060 T3	0,922	4,988	3,961	3,039	1,027	25,26	74,74	-1,02
I 120 T3	0,915	5,000	3,984	3,069	1,016	24,87	75,13	0,52
I 180 T3	0,916	5,007	3,978	3,062	1,029	25,15	74,85	-0,61
I 240 T3	0,918	4,949	3,934	3,016	1,015	25,18	74,82	-0,71
I 300 T3	0,915	5,337	4,248	3,333	1,089	24,63	75,37	1,52
I 360 T3	0,929	5,245	4,163	3,234	1,082	25,07	74,93	-0,28

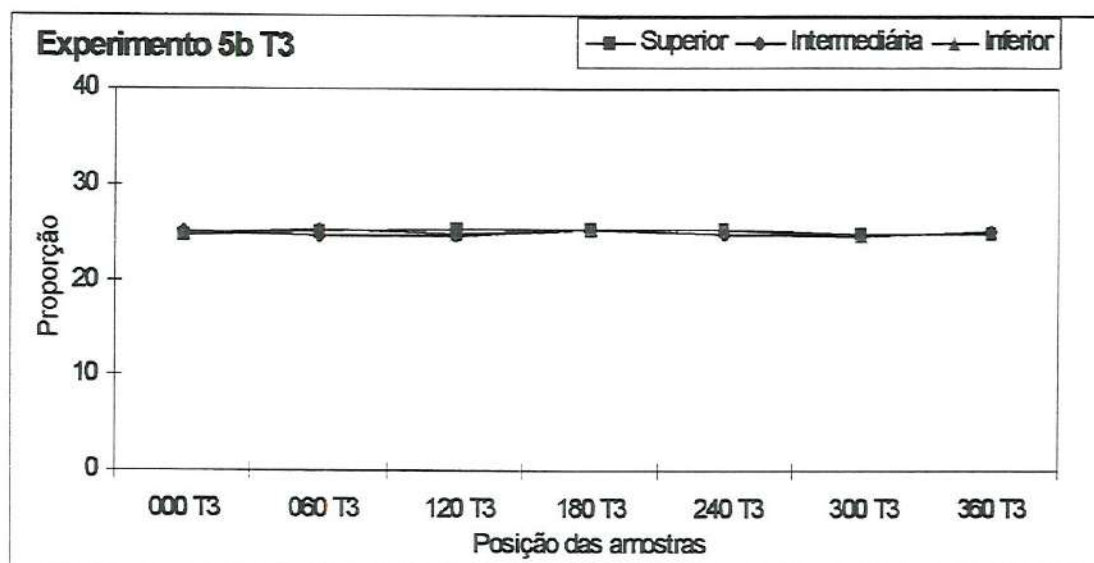


Figura B.19 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1b.



Tabela B.20 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,7  $U_{MF}$ , areia 450 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
S 000 T4	0,915	4,773	3,801	2,886	0,972	25,19	74,81	-0,77
S 060 T4	0,928	4,751	3,802	2,874	0,949	24,82	75,18	0,71
S 120 T4	0,921	4,595	3,675	2,754	0,920	25,04	74,96	-0,16
S 180 T4	0,924	4,664	3,740	2,816	0,924	24,71	75,29	1,19
S 240 T4	0,927	4,724	3,775	2,848	0,949	24,99	75,01	0,03
S 300 T4	0,926	4,700	3,774	2,848	0,926	24,54	75,46	1,89
S 360 T4	0,921	4,645	3,719	2,798	0,926	24,87	75,13	0,54
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
M 000 T4	0,919	4,692	3,723	2,804	0,969	25,68	74,32	-2,66
M 060 T4	0,908	4,791	3,818	2,910	0,973	25,06	74,94	-0,23
M 120 T4	0,923	4,685	3,753	2,830	0,932	24,77	75,23	0,91
M 180 T4	0,918	4,562	3,651	2,733	0,911	25,00	75,00	0,00
M 240 T4	0,915	4,587	3,667	2,752	0,920	25,05	74,95	-0,22
M 300 T4	0,907	4,561	3,654	2,747	0,907	24,82	75,18	0,72
M 360 T4	0,919	4,626	3,698	2,779	0,928	25,03	74,97	-0,13
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
I 000 T4	0,914	5,152	4,078	3,164	1,074	25,34	74,66	-1,35
I 060 T4	0,920	5,230	4,108	3,188	1,122	26,03	73,97	-3,97
I 120 T4	0,928	5,225	4,146	3,218	1,079	25,11	74,89	-0,44
I 180 T4	0,923	4,966	3,963	3,040	1,003	24,81	75,19	0,77
I 240 T4	0,917	4,916	3,890	2,973	1,026	25,66	74,34	-2,56
I 300 T4	0,920	4,966	3,957	3,037	1,009	24,94	75,06	0,25
I 360 T4	0,915	5,034	3,997	3,082	1,037	25,18	74,82	-0,70

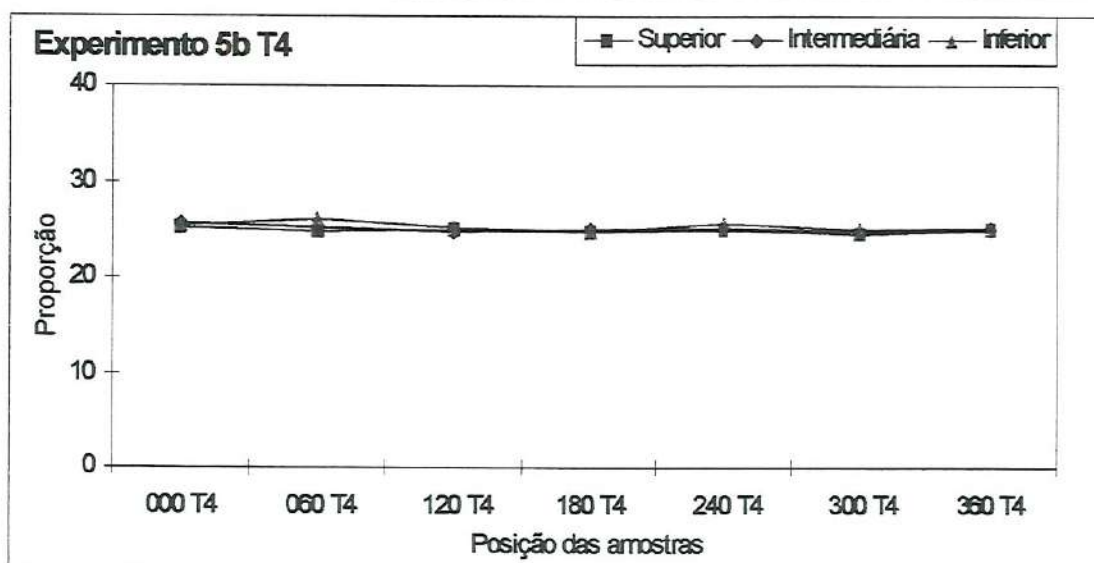


Figura B.20 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1b.



Tabela B.21 – Ensaio com velocidade de fluidização 2,0  $U_{MF}$ , areia 450 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
S 000 T1	0,914	5,000	4,006	3,092	0,994	24,33	75,67	2,77
S 060 T1	0,936	4,760	3,794	2,858	0,966	25,26	74,74	-1,04
S 120 T1	0,922	4,671	3,723	2,801	0,948	25,29	74,71	-1,13
S 180 T1	0,937	4,591	3,686	2,749	0,905	24,77	75,23	0,94
S 240 T1	0,912	4,636	3,713	2,801	0,923	24,79	75,21	0,87
S 300 T1	0,933	4,757	3,802	2,869	0,955	24,97	75,03	0,10
S 360 T1	0,914	4,775	3,814	2,900	0,961	24,89	75,11	0,44
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
M 000 T1	0,922	4,778	3,836	2,914	0,942	24,43	75,57	2,34
M 060 T1	0,942	4,673	3,796	2,854	0,877	23,51	76,49	6,36
M 120 T1	0,922	4,582	3,673	2,751	0,909	24,84	75,16	0,66
M 180 T1	0,910	4,526	3,617	2,707	0,909	25,14	74,86	-0,55
M 240 T1	0,920	4,682	3,757	2,837	0,925	24,59	75,41	1,68
M 300 T1	0,922	4,559	3,655	2,733	0,904	24,86	75,14	0,58
M 360 T1	0,941	4,644	3,748	2,807	0,896	24,20	75,80	3,32
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
I 000 T1	0,920	5,246	4,196	3,276	1,050	24,27	75,73	3,00
I 060 T1	0,939	5,147	4,119	3,180	1,028	24,43	75,57	2,33
I 120 T1	0,902	5,043	4,019	3,117	1,024	24,73	75,27	1,10
I 180 T1	0,913	4,998	3,982	3,069	1,016	24,87	75,13	0,52
I 240 T1	0,936	5,127	4,079	3,143	1,048	25,01	74,99	-0,02
I 300 T1	0,915	5,023	3,981	3,066	1,042	25,37	74,63	-1,44
I 360 T1	0,922	5,032	4,015	3,093	1,017	24,74	75,26	1,03

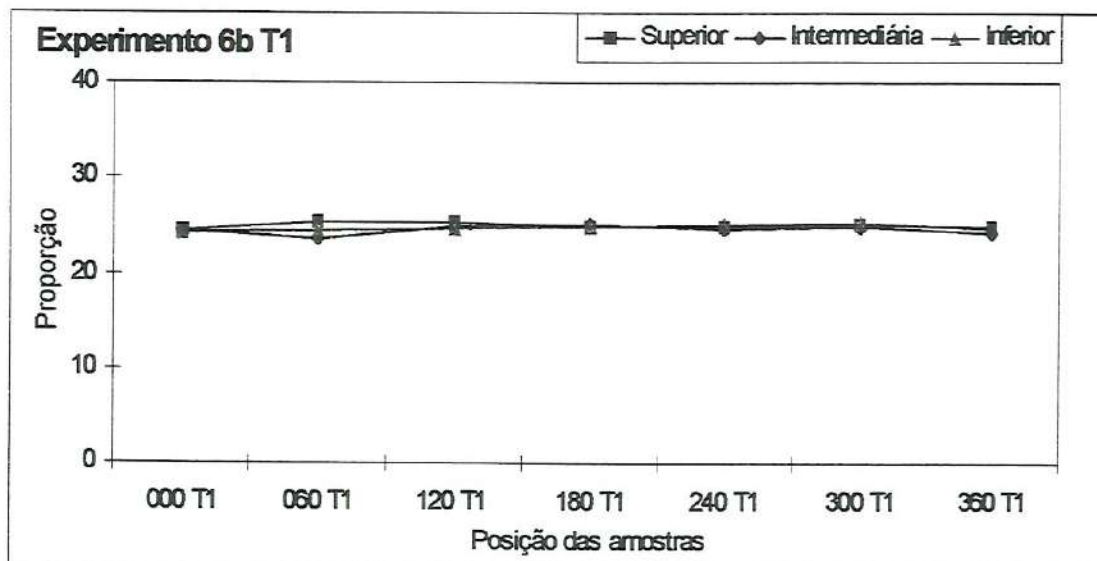


Figura B.21 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1b.

Tabela B.22 – Ensaio com velocidade de fluidização 2,0  $U_{MF}$ , areia 450 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
S 000 T2	0,923	4,516	3,635	2,712	0,881	24,52	75,48	1,96
S 060 T2	0,920	4,655	3,740	2,820	0,915	24,50	75,50	2,05
S 120 T2	0,925	4,718	3,808	2,883	0,910	23,99	76,01	4,20
S 180 T2	0,911	4,515	3,627	2,716	0,888	24,64	75,36	1,46
S 240 T2	0,921	4,893	3,927	3,006	0,966	24,32	75,68	2,80
S 300 T2	0,922	4,707	3,766	2,844	0,941	24,86	75,14	0,56
S 360 T2	0,932	4,939	3,960	3,028	0,979	24,43	75,57	2,32
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
M 000 T2	0,931	4,544	3,656	2,725	0,888	24,58	75,42	1,72
M 060 T2	0,933	4,631	3,727	2,794	0,904	24,45	75,55	2,27
M 120 T2	0,930	4,724	3,780	2,850	0,944	24,88	75,12	0,48
M 180 T2	0,925	4,480	3,606	2,681	0,874	24,59	75,41	1,69
M 240 T2	0,914	4,833	3,879	2,965	0,954	24,34	75,66	2,70
M 300 T2	0,933	4,713	3,790	2,857	0,923	24,42	75,58	2,38
M 360 T2	0,926	4,981	3,981	3,055	1,000	24,66	75,34	1,37
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
I 000 T2	0,938	5,038	4,042	3,104	0,996	24,29	75,71	2,91
I 060 T2	0,902	5,083	4,049	3,147	1,034	24,73	75,27	1,09
I 120 T2	0,934	5,173	4,126	3,192	1,047	24,70	75,30	1,22
I 180 T2	0,917	4,955	3,945	3,028	1,010	25,01	74,99	-0,05
I 240 T2	0,937	5,289	4,201	3,264	1,088	25,00	75,00	0,00
I 300 T2	0,917	5,110	4,065	3,148	1,045	24,92	75,08	0,31
I 360 T2	0,926	5,451	4,332	3,406	1,119	24,73	75,27	1,09

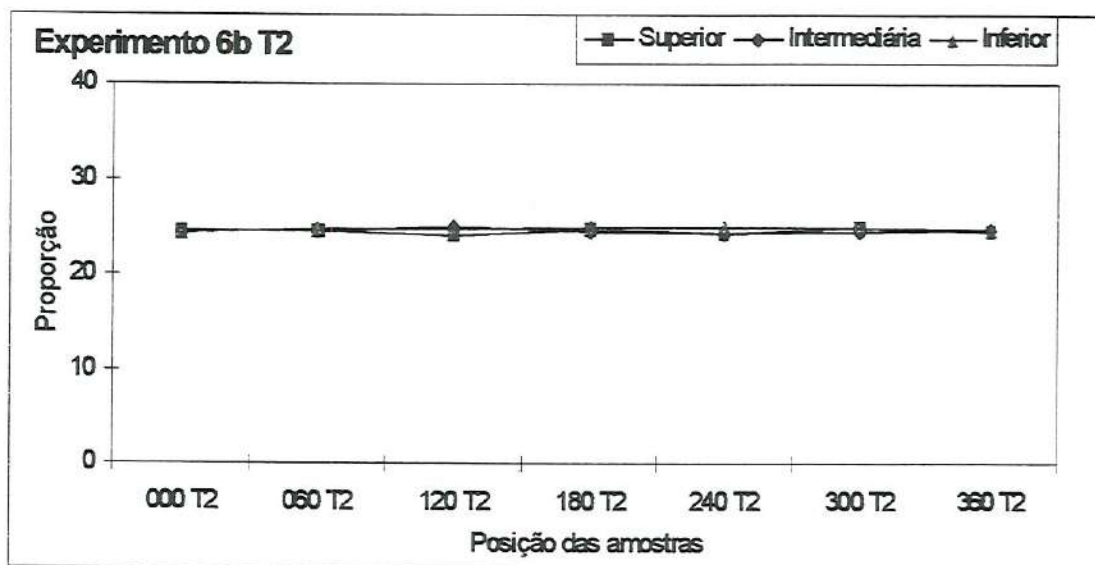


Figura B.22 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1b.



Tabela B.23 – Ensaios com velocidade de fluidização 2,0  $U_{MF}$ , areia 450 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
S 000 T3	0,911	4,933	3,932	3,021	1,001	24,89	75,11	0,45
S 060 T3	0,896	4,713	3,792	2,896	0,921	24,13	75,87	3,61
S 120 T3	0,907	4,607	3,687	2,780	0,920	24,86	75,14	0,54
S 180 T3	0,911	4,509	3,609	2,698	0,900	25,01	74,99	-0,06
S 240 T3	0,899	4,700	3,758	2,859	0,942	24,78	75,22	0,88
S 300 T3	0,899	4,611	3,696	2,797	0,915	24,65	75,35	1,42
S 360 T3	0,907	4,648	3,747	2,840	0,901	24,08	75,92	3,80
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
M 000 T3	0,920	4,799	3,845	2,925	0,954	24,59	75,41	1,65
M 060 T3	0,907	4,674	3,743	2,836	0,931	24,71	75,29	1,15
M 120 T3	0,920	4,548	3,653	2,733	0,895	24,67	75,33	1,34
M 180 T3	0,905	4,542	3,657	2,752	0,885	24,33	75,67	2,74
M 240 T3	0,915	4,628	3,732	2,817	0,896	24,13	75,87	3,60
M 300 T3	0,907	4,648	3,744	2,837	0,904	24,16	75,84	3,46
M 360 T3	0,910	4,624	3,729	2,819	0,895	24,10	75,90	3,74
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
I 000 T3	0,907	5,178	4,114	3,207	1,064	24,91	75,09	0,35
I 060 T3	0,931	5,144	4,104	3,173	1,040	24,69	75,31	1,27
I 120 T3	0,924	5,033	4,028	3,104	1,005	24,46	75,54	2,21
I 180 T3	0,931	5,048	4,035	3,104	1,013	24,61	75,39	1,60
I 240 T3	0,906	4,993	3,992	3,086	1,001	24,49	75,51	2,07
I 300 T3	0,917	5,118	4,090	3,173	1,028	24,47	75,53	2,16
I 360 T3	0,903	5,080	4,044	3,141	1,036	24,80	75,20	0,80

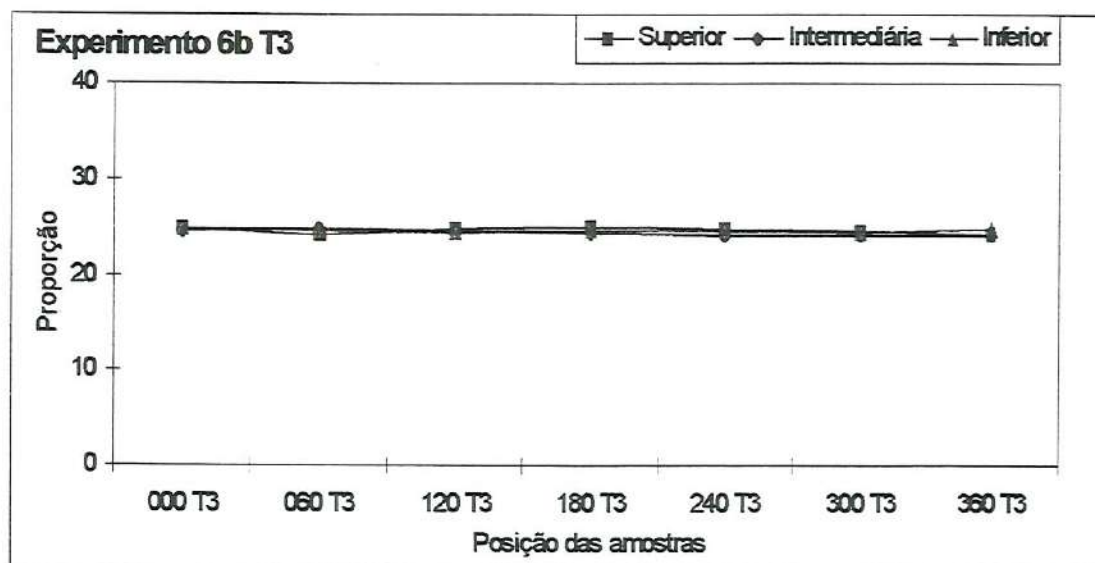


Figura B.23 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1b.



Tabela B.24 – Ensaio com velocidade de fluidização 2,0  $U_{MF}$ , areia 450 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
S 000 T4	0,909	4,630	3,713	2,804	0,917	24,64	75,36	1,44
S 060 T4	0,901	4,583	3,678	2,777	0,905	24,58	75,42	1,71
S 120 T4	0,899	4,665	3,734	2,835	0,931	24,72	75,28	1,13
S 180 T4	0,904	4,638	3,700	2,796	0,938	25,12	74,88	-0,48
S 240 T4	0,901	4,606	3,688	2,787	0,918	24,78	75,22	0,90
S 300 T4	0,918	4,701	3,793	2,875	0,908	24,00	76,00	4,16
S 360 T4	0,909	4,679	3,771	2,862	0,908	24,08	75,92	3,80
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
M 000 T4	0,913	4,779	3,831	2,918	0,948	24,52	75,48	1,95
M 060 T4	0,906	4,544	3,647	2,741	0,897	24,66	75,34	1,39
M 120 T4	0,916	4,619	3,693	2,777	0,926	25,01	74,99	-0,03
M 180 T4	0,902	4,628	3,701	2,799	0,927	24,88	75,12	0,49
M 240 T4	0,907	4,584	3,694	2,787	0,890	24,20	75,80	3,29
M 300 T4	0,908	4,697	3,781	2,873	0,916	24,18	75,82	3,41
M 360 T4	0,902	4,627	3,742	2,840	0,885	23,76	76,24	5,23
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
I 000 T4	0,914	5,187	4,138	3,224	1,049	24,55	75,45	1,84
I 060 T4	0,902	5,024	3,998	3,096	1,026	24,89	75,11	0,44
I 120 T4	0,902	4,977	3,956	3,054	1,021	25,06	74,94	-0,22
I 180 T4	0,901	5,055	4,025	3,124	1,030	24,80	75,20	0,83
I 240 T4	0,912	5,076	4,046	3,134	1,030	24,74	75,26	1,07
I 300 T4	0,899	5,044	4,020	3,121	1,024	24,70	75,30	1,20
I 360 T4	0,915	5,114	4,080	3,165	1,034	24,62	75,38	1,52

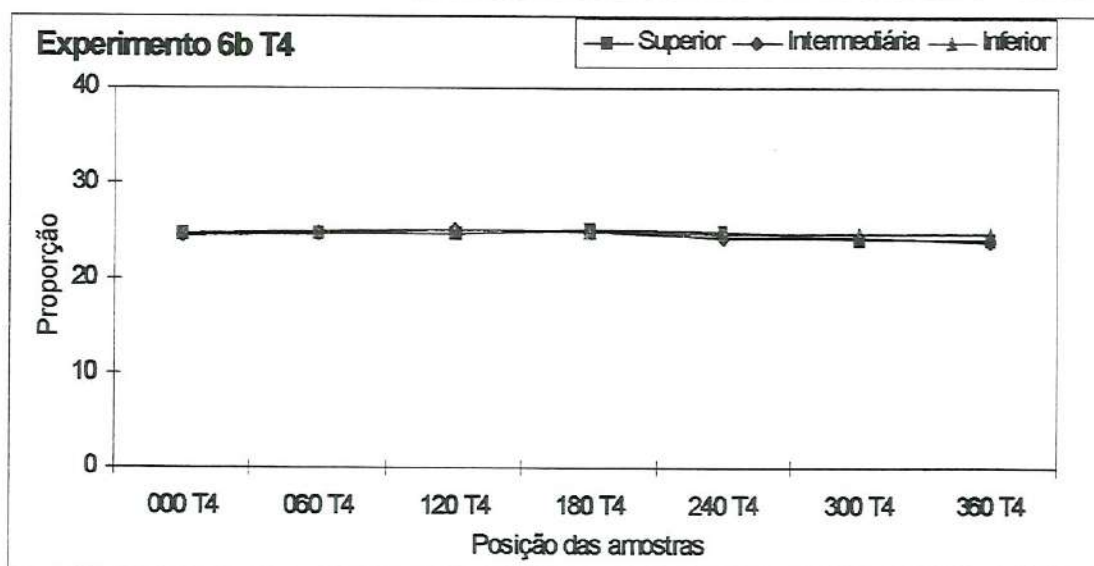


Figura B.24 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1b.

## ANEXO C

Para verificar o comportamento do leito fluidizado quanto à repetibilidade dos resultados experimentais, os ensaios foram executados mais duas vezes nas mesmas condições.

As tabelas C.1 a C.4 representam a velocidade de fluidização próxima de 40% acima da velocidade de mínima fluidização para o conjunto com diâmetro médio 225  $\mu\text{m}$  para a massa de 6 kg de areia e diâmetro médio 450  $\mu\text{m}$  para a massa de 2 kg de material traçador. As figuras C.1 a C.4 foram feitas a partir dessas tabelas.

Em seguida estão as tabelas C.5 a C.8 cuja velocidade de operação estava próxima de 70% acima da velocidade de mínima fluidização para o mesmo conjunto de partículas e as figuras C.5 a C.8 são respectivamente as formas gráficas dessas tabelas.

Finalmente as tabelas C.9 a C.12 representam esse conjunto de partículas para uma velocidade de operação de 100% acima da velocidade de mínima fluidização. As figuras C.9 a C.12 representam essas tabelas respectivamente.

As tabelas C.13 a C.16 representam a velocidade de fluidização próxima de 40% acima da velocidade de mínima fluidização para o conjunto com diâmetro médio 450  $\mu\text{m}$  para a massa de 6 kg de areia e diâmetro médio 450  $\mu\text{m}$  para a massa de 2 kg de material traçador. As figuras C.13 a C.16 surgiram dessas tabelas respectivamente.

A seguir estão as tabelas C.17 a C.20 cuja velocidade de operação foi próxima de 70% acima da velocidade de mínima fluidização para o mesmo conjunto de partículas anterior e nas figuras C.17 a C.20 estão respectivamente as formas gráficas dessas tabelas.

Por último as tabelas C.21 a C.24 representam esse mesmo conjunto de partículas para uma velocidade de operação de 100% acima da velocidade de mínima fluidização. Respectivamente, as figuras C.21 a C.24 representam essas tabelas.



Tabela C.1 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,4  $U_{MF}$ , areia 225 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
S 000 T1	0,936	4,915	4,421	3,485	0,494	12,42	87,58	101,37
S 060 T1	0,939	4,379	3,495	2,556	0,884	25,70	74,30	-2,71
S 120 T1	0,933	4,367	2,797	1,864	1,570	45,72	54,28	-45,32
S 180 T1	0,934	4,798	4,320	3,386	0,478	12,37	87,63	102,09
S 240 T1	0,936	4,554	4,228	3,292	0,326	9,01	90,99	177,45
S 300 T1	0,944	4,849	4,467	3,523	0,382	9,78	90,22	155,56
S 360 T1	0,935	4,581	3,752	2,817	0,829	22,74	77,26	9,95
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
M 000 T1	0,936	4,881	4,322	3,386	0,559	14,17	85,83	76,43
M 060 T1	0,928	4,275	2,761	1,833	1,514	45,23	54,77	-44,73
M 120 T1	0,938	4,605	3,720	2,782	0,885	24,13	75,87	3,59
M 180 T1	0,934	4,779	3,846	2,912	0,933	24,27	75,73	3,03
M 240 T1	0,951	4,545	4,203	3,252	0,342	9,52	90,48	162,72
M 300 T1	0,932	4,874	4,427	3,495	0,447	11,34	88,66	120,47
M 360 T1	0,941	4,466	3,065	2,124	1,401	39,74	60,26	-37,10
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
I 000 T1	0,929	5,438	4,420	3,491	1,018	22,58	77,42	10,73
I 060 T1	0,940	4,697	3,693	2,753	1,004	26,72	73,28	-6,45
I 120 T1	0,940	4,971	4,602	3,662	0,369	9,15	90,85	173,10
I 180 T1	0,946	4,967	2,936	1,990	2,031	50,51	49,49	-50,50
I 240 T1	0,925	4,732	4,464	3,539	0,268	7,04	92,96	255,13
I 300 T1	0,938	5,180	4,698	3,760	0,482	11,36	88,64	120,02
I 360 T1	0,940	4,851	4,195	3,255	0,656	16,77	83,23	49,05

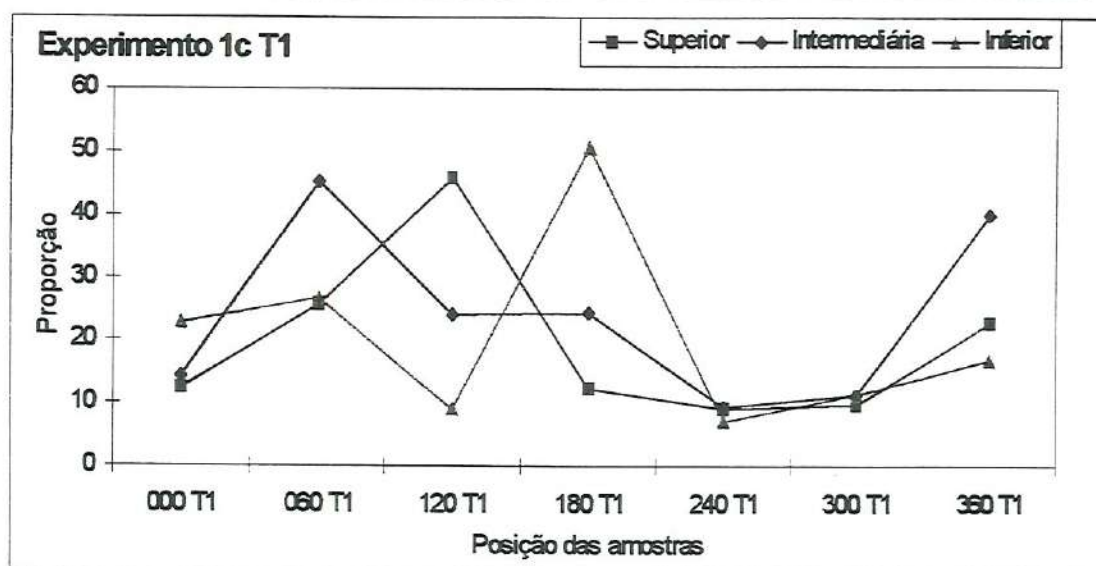


Figura C.1 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1c.



Tabela C.2 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,4  $U_{MF}$ , areia 225 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
S 000 T2	0,967	4,612	4,084	3,117	0,528	14,49	85,51	72,59
S 060 T2	0,951	4,367	3,877	2,926	0,490	14,34	85,66	74,29
S 120 T2	0,936	4,304	3,751	2,815	0,553	16,42	83,58	52,26
S 180 T2	0,961	4,877	4,314	3,353	0,563	14,38	85,62	73,89
S 240 T2	0,944	4,649	4,127	3,183	0,522	14,09	85,91	77,44
S 300 T2	0,956	4,883	4,314	3,358	0,569	14,49	85,51	72,54
S 360 T2	0,947	4,869	4,296	3,349	0,573	14,61	85,39	71,12
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
M 000 T2	0,937	4,708	4,130	3,193	0,578	15,33	84,67	63,11
M 060 T2	0,933	4,353	3,502	2,569	0,851	24,88	75,12	0,47
M 120 T2	0,936	4,589	3,912	2,976	0,677	18,53	81,47	34,90
M 180 T2	0,935	4,741	4,131	3,196	0,610	16,03	83,97	55,98
M 240 T2	0,948	4,651	4,135	3,187	0,516	13,93	86,07	79,41
M 300 T2	0,943	4,947	4,285	3,342	0,662	16,53	83,47	51,21
M 360 T2	0,955	5,029	4,221	3,266	0,808	19,83	80,17	26,05
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
I 000 T2	0,934	5,131	4,523	3,589	0,608	14,49	85,51	72,57
I 060 T2	0,944	4,484	3,530	2,586	0,954	26,95	73,05	-7,23
I 120 T2	0,940	4,703	3,567	2,627	1,136	30,19	69,81	-17,19
I 180 T2	0,930	4,980	3,913	2,983	1,067	26,35	73,65	-5,11
I 240 T2	0,926	5,005	4,471	3,545	0,534	13,09	86,91	90,96
I 300 T2	0,948	5,139	4,507	3,559	0,632	15,08	84,92	65,78
I 360 T2	0,939	5,037	4,119	3,180	0,918	22,40	77,60	11,60

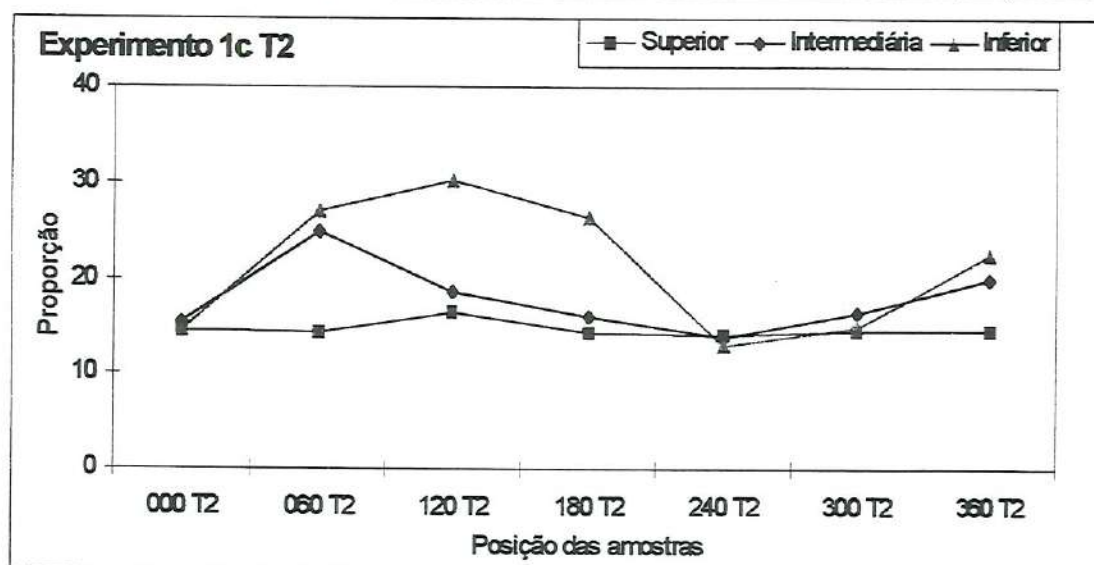


Figura C.2 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1c.

Tabela C.3 – Ensaio com velocidade de fluidização  $1,4 U_{MF}$ , areia  $225\mu\text{m}$  e traçador  $450\mu\text{m}$ .

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
S 000 T3	0,956	4,804	4,228	3,272	0,576	14,97	85,03	67,01
S 060 T3	0,936	4,335	3,823	2,887	0,512	15,06	84,94	65,97
S 120 T3	0,947	4,486	3,898	2,951	0,588	16,61	83,39	50,47
S 180 T3	0,944	4,628	3,954	3,010	0,674	18,30	81,70	36,65
S 240 T3	0,947	4,518	3,900	2,953	0,618	17,31	82,69	44,46
S 300 T3	0,936	5,017	4,340	3,404	0,677	16,59	83,41	50,70
S 360 T3	0,958	4,923	4,250	3,292	0,673	16,97	83,03	47,29
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
M 000 T3	0,939	4,744	4,138	3,199	0,606	15,93	84,07	56,97
M 060 T3	0,955	4,385	3,733	2,778	0,652	19,01	80,99	31,52
M 120 T3	0,938	4,582	3,937	2,999	0,645	17,70	82,30	41,24
M 180 T3	0,955	4,537	3,877	2,922	0,660	18,43	81,57	35,68
M 240 T3	0,939	4,510	3,887	2,948	0,623	17,45	82,55	43,30
M 300 T3	0,962	4,840	4,157	3,195	0,683	17,61	82,39	41,95
M 360 T3	0,951	4,960	3,863	2,912	1,097	27,36	72,64	-8,64
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
I 000 T3	0,964	5,003	4,434	3,470	0,569	14,09	85,91	77,46
I 060 T3	0,956	4,531	3,404	2,448	1,127	31,52	68,48	-20,70
I 120 T3	0,966	4,861	4,190	3,224	0,671	17,23	82,77	45,12
I 180 T3	0,942	4,939	4,177	3,235	0,762	19,06	80,94	31,14
I 240 T3	0,968	4,773	4,204	3,236	0,569	14,95	85,05	67,18
I 300 T3	0,956	5,156	4,421	3,465	0,735	17,50	82,50	42,86
I 360 T3	0,948	5,135	4,028	3,080	1,107	26,44	73,56	-5,44

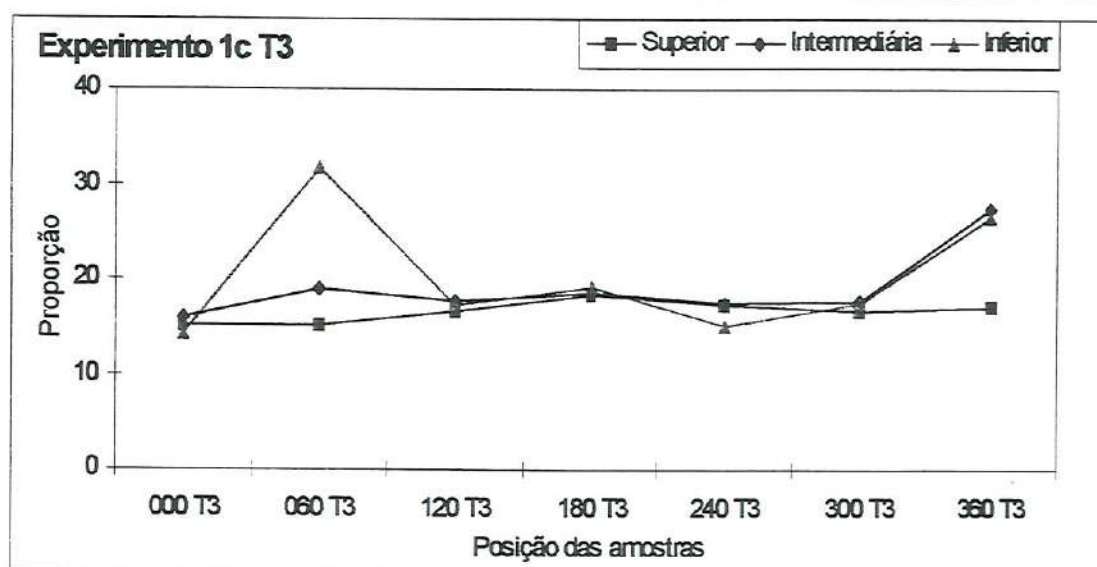


Figura C.3 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1c.



Tabela C.4 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,4  $U_{MF}$ , areia 225 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
S 000 T4	0,948	4,575	3,916	2,968	0,659	18,17	81,83	37,59
S 060 T4	0,947	4,475	3,751	2,804	0,724	20,52	79,48	21,82
S 120 T4	0,943	4,739	3,979	3,036	0,760	20,02	79,98	24,87
S 180 T4	0,936	4,621	3,910	2,974	0,711	19,29	80,71	29,57
S 240 T4	0,942	4,659	3,935	2,993	0,724	19,48	80,52	28,35
S 300 T4	0,937	4,836	4,137	3,200	0,699	17,93	82,07	39,45
S 360 T4	0,949	4,570	3,827	2,878	0,743	20,52	79,48	21,84
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
M 000 T4	0,961	4,668	3,950	2,989	0,718	19,37	80,63	29,07
M 060 T4	0,937	4,535	3,739	2,802	0,796	22,12	77,88	13,00
M 120 T4	0,950	4,927	4,109	3,159	0,818	20,57	79,43	21,55
M 180 T4	0,941	4,729	3,980	3,039	0,749	19,77	80,23	26,44
M 240 T4	0,950	4,527	3,817	2,867	0,710	19,85	80,15	25,95
M 300 T4	0,960	4,923	4,106	3,146	0,817	20,62	79,38	21,27
M 360 T4	0,955	4,516	3,789	2,834	0,727	20,42	79,58	22,46
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
I 000 T4	0,948	4,656	3,951	3,003	0,705	19,01	80,99	31,49
I 060 T4	0,951	4,077	2,712	1,761	1,365	43,67	56,33	-42,75
I 120 T4	0,927	5,071	4,255	3,328	0,816	19,69	80,31	26,96
I 180 T4	0,963	4,990	4,141	3,178	0,849	21,08	78,92	18,58
I 240 T4	0,940	4,872	4,203	3,263	0,669	17,01	82,99	46,94
I 300 T4	0,951	4,990	4,237	3,286	0,753	18,64	81,36	34,10
I 360 T4	0,928	4,601	3,551	2,623	1,050	28,59	71,41	-12,55

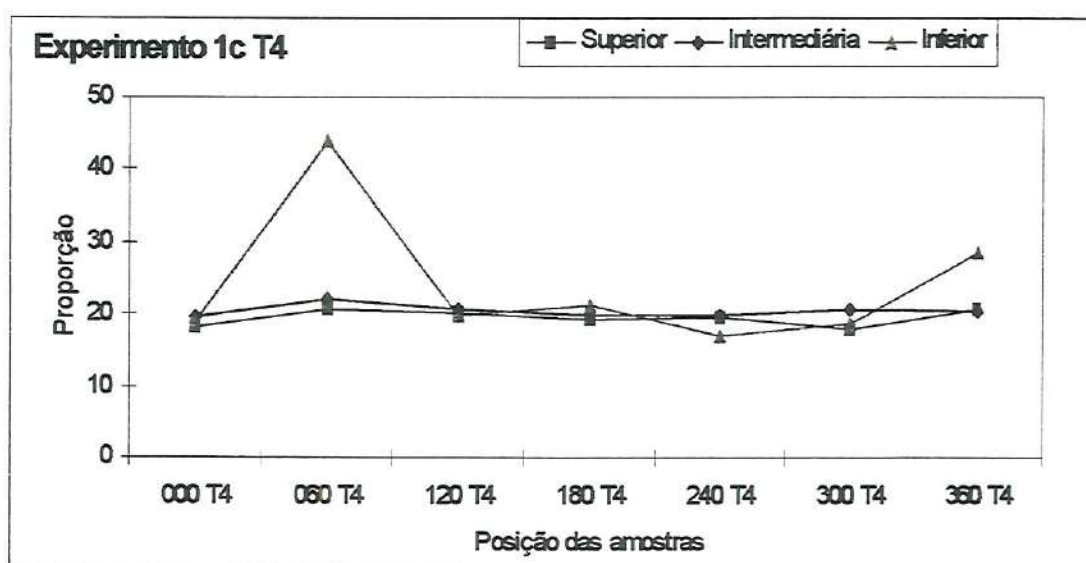


Figura C.4 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1c.



Tabela C.5 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,7  $U_{MF}$ , areia 225 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
S 000 T1	0,954	4,592	3,654	2,700	0,938	25,78	74,22	-3,04
S 060 T1	0,957	4,733	4,142	3,185	0,591	15,65	84,35	59,73
S 120 T1	0,934	4,542	3,841	2,907	0,701	19,43	80,57	28,67
S 180 T1	0,958	4,352	3,777	2,819	0,575	16,94	83,06	47,57
S 240 T1	0,936	4,449	3,082	2,146	1,367	38,91	61,09	-35,75
S 300 T1	0,953	4,446	3,737	2,784	0,709	20,30	79,70	23,17
S 360 T1	0,917	4,424	3,876	2,959	0,548	15,63	84,37	59,99
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
M 000 T1	0,942	4,483	3,277	2,335	1,206	34,06	65,94	-26,60
M 060 T1	0,940	4,687	4,075	3,135	0,612	16,33	83,67	53,06
M 120 T1	0,951	4,600	3,873	2,922	0,727	19,92	80,08	25,48
M 180 T1	0,938	4,468	3,846	2,908	0,622	17,62	82,38	41,88
M 240 T1	0,946	4,331	2,133	1,187	2,198	64,93	35,07	-61,50
M 300 T1	0,941	4,500	3,831	2,890	0,669	18,80	81,20	33,00
M 360 T1	0,949	4,398	3,802	2,853	0,596	17,28	82,72	44,67
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
I 000 T1	0,932	4,809	3,783	2,851	1,026	26,46	73,54	-5,53
I 060 T1	0,967	5,033	4,376	3,409	0,657	16,16	83,84	54,72
I 120 T1	0,955	5,042	4,289	3,334	0,753	18,42	81,58	35,69
I 180 T1	0,958	4,868	4,279	3,321	0,589	15,06	84,94	65,96
I 240 T1	0,949	4,702	2,386	1,437	2,316	61,71	38,29	-59,49
I 300 T1	0,948	4,768	3,937	2,989	0,831	21,75	78,25	14,92
I 360 T1	0,953	4,778	4,267	3,314	0,511	13,36	86,64	87,13

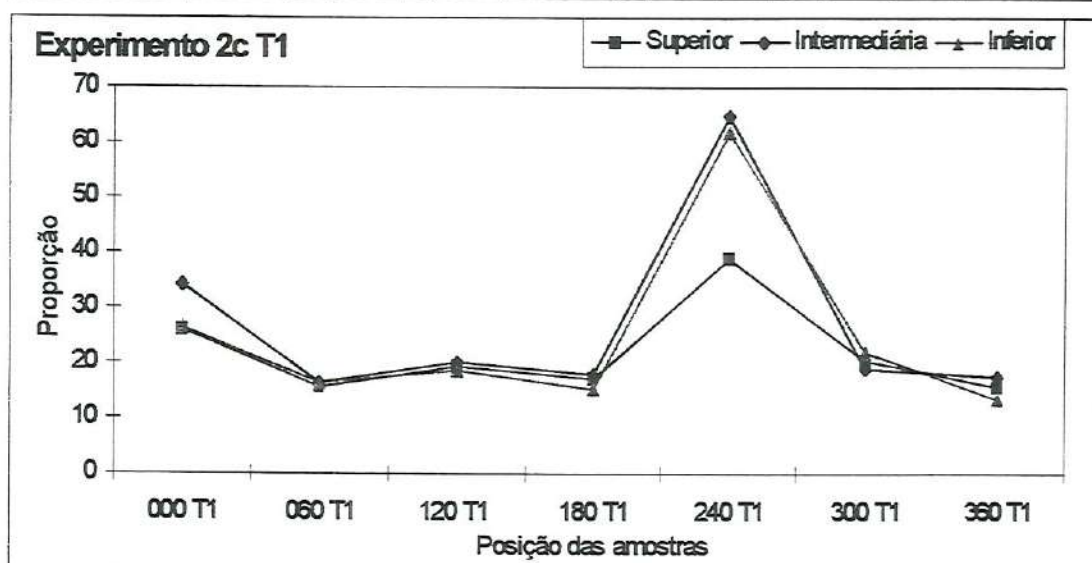


Figura C.5 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1c.

Tabela C.6 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,7  $U_{MF}$ , areia 225 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
S 000 T2	0,955	4,767	3,944	2,989	0,823	21,59	78,41	15,80
S 060 T2	0,913	4,682	3,853	2,940	0,829	22,00	78,00	13,66
S 120 T2	0,928	4,314	3,532	2,604	0,782	23,10	76,90	8,25
S 180 T2	0,941	4,192	3,470	2,529	0,722	22,21	77,79	12,57
S 240 T2	0,952	4,569	3,764	2,812	0,805	22,26	77,74	12,33
S 300 T2	0,941	4,427	3,639	2,698	0,788	22,60	77,40	10,60
S 360 T2	0,941	4,134	3,437	2,496	0,697	21,83	78,17	14,53
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
M 000 T2	0,943	4,805	3,947	3,004	0,858	22,22	77,78	12,53
M 060 T2	0,935	4,740	3,829	2,894	0,911	23,94	76,06	4,42
M 120 T2	0,950	4,469	3,639	2,689	0,830	23,59	76,41	5,99
M 180 T2	0,937	4,247	3,475	2,538	0,772	23,32	76,68	7,19
M 240 T2	0,944	4,472	3,644	2,700	0,828	23,47	76,53	6,52
M 300 T2	0,928	4,399	3,587	2,659	0,812	23,39	76,61	6,87
M 360 T2	0,945	4,273	3,453	2,508	0,820	24,64	75,36	1,46
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
I 000 T2	0,937	5,194	4,240	3,303	0,954	22,41	77,59	11,56
I 060 T2	0,941	5,003	4,086	3,145	0,917	22,58	77,42	10,74
I 120 T2	0,947	4,638	3,798	2,851	0,840	22,76	77,24	9,85
I 180 T2	0,948	4,577	3,793	2,845	0,784	21,60	78,40	15,72
I 240 T2	0,942	4,643	3,636	2,694	1,007	27,21	72,79	-8,12
I 300 T2	0,959	4,654	3,798	2,839	0,856	23,17	76,83	7,91
I 360 T2	0,948	4,506	3,694	2,746	0,812	22,82	77,18	9,54

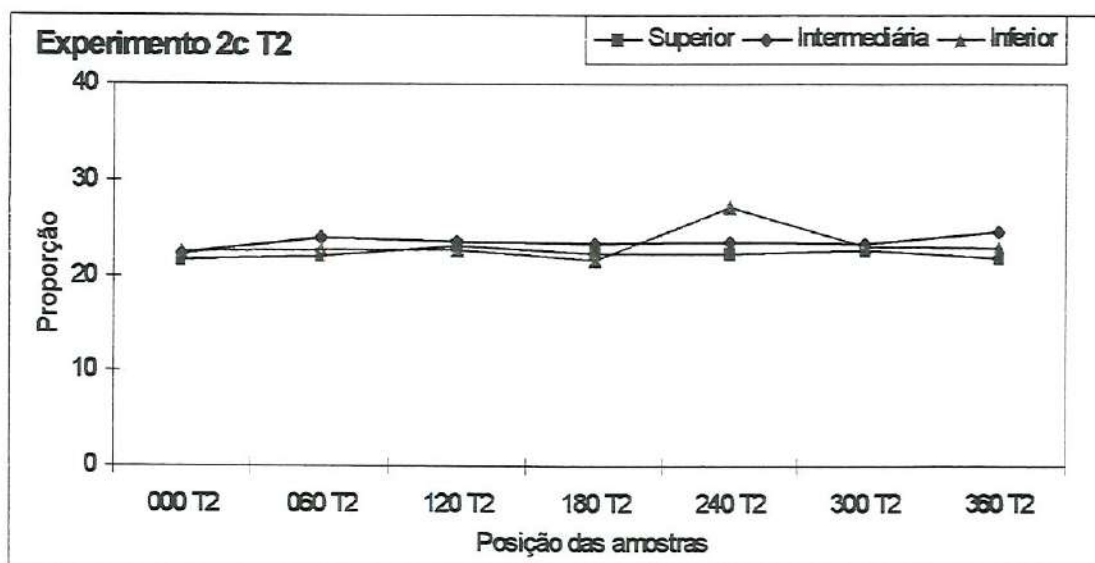


Figura C.6 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1c.



Tabela C.7 – Ensaio com velocidade de fluidização  $1,7 U_{MF}$ , areia  $225\mu\text{m}$  e traçador  $450\mu\text{m}$ .

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
S 000 T3	0,929	4,400	3,561	2,632	0,839	24,17	75,83	3,43
S 060 T3	0,947	4,593	3,680	2,733	0,913	25,04	74,96	-0,16
S 120 T3	0,946	4,687	3,729	2,783	0,958	25,61	74,39	-2,37
S 180 T3	0,947	4,470	3,619	2,672	0,851	24,16	75,84	3,50
S 240 T3	0,929	4,444	3,580	2,651	0,864	24,58	75,42	1,71
S 300 T3	0,937	4,236	3,422	2,485	0,814	24,67	75,33	1,32
S 360 T3	0,950	4,512	3,610	2,660	0,902	25,32	74,68	-1,27
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
M 000 T3	0,933	4,515	3,613	2,680	0,902	25,18	74,82	-0,72
M 060 T3	0,950	4,602	3,701	2,751	0,901	24,67	75,33	1,33
M 120 T3	0,959	4,694	3,730	2,771	0,964	25,81	74,19	-3,14
M 180 T3	0,934	4,438	3,556	2,622	0,882	25,17	74,83	-0,68
M 240 T3	0,946	4,474	3,579	2,633	0,895	25,37	74,63	-1,45
M 300 T3	0,942	4,299	3,393	2,451	0,906	26,99	73,01	-7,37
M 360 T3	0,961	4,474	3,574	2,613	0,900	25,62	74,38	-2,42
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
I 000 T3	0,965	4,946	4,015	3,050	0,931	23,39	76,61	6,90
I 060 T3	0,945	4,925	3,979	3,034	0,946	23,77	76,23	5,18
I 120 T3	0,948	4,933	3,951	3,003	0,982	24,64	75,36	1,45
I 180 T3	0,945	4,771	3,841	2,896	0,930	24,31	75,69	2,85
I 240 T3	0,949	4,717	3,838	2,889	0,879	23,33	76,67	7,17
I 300 T3	0,944	4,534	3,657	2,713	0,877	24,43	75,57	2,34
I 360 T3	0,939	4,780	3,828	2,889	0,952	24,79	75,21	0,87

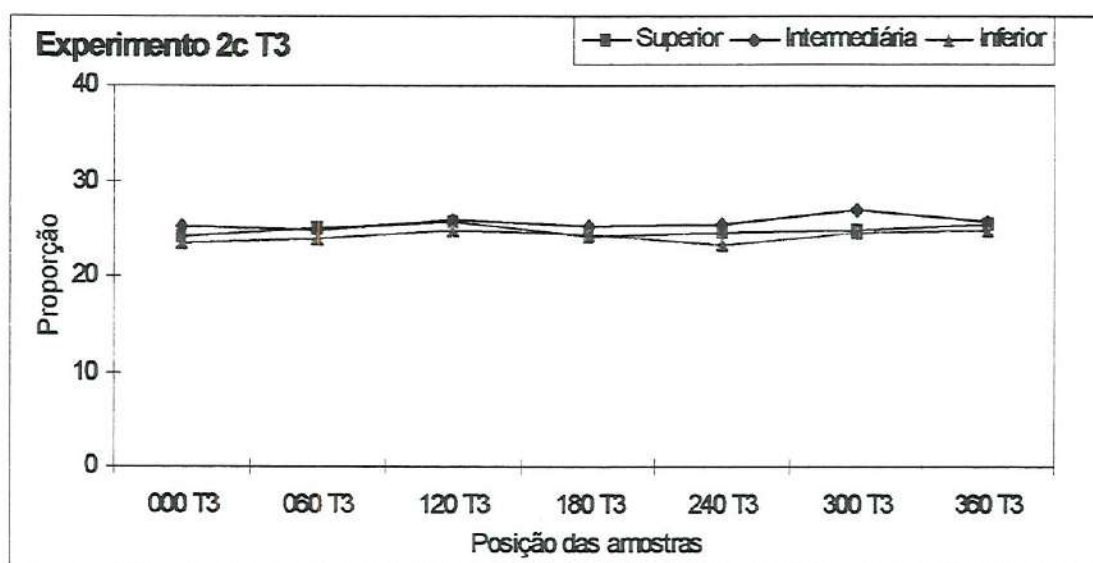


Figura C.7 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1c.



Tabela C.8 – Ensaio com velocidade de fluidização  $1,7 U_{MF}$ , areia  $225\mu\text{m}$  e traçador  $450\mu\text{m}$ .

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
S 000 T4	0,952	4,577	3,731	2,779	0,846	23,34	76,66	7,12
S 060 T4	0,932	4,660	3,694	2,762	0,966	25,91	74,09	-3,52
S 120 T4	0,969	4,612	3,674	2,705	0,938	25,75	74,25	-2,91
S 180 T4	0,923	3,861	3,134	2,211	0,727	24,74	75,26	1,03
S 240 T4	0,950	4,659	3,713	2,763	0,946	25,51	74,49	-1,98
S 300 T4	0,933	4,351	3,449	2,516	0,902	26,39	73,61	-5,27
S 360 T4	0,946	4,441	3,484	2,538	0,957	27,38	72,62	-8,70
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
M 000 T4	0,946	4,615	3,649	2,703	0,966	26,33	73,67	-5,05
M 060 T4	0,944	4,674	3,716	2,772	0,958	25,68	74,32	-2,66
M 120 T4	0,936	4,532	3,587	2,651	0,945	26,28	73,72	-4,87
M 180 T4	0,930	4,275	3,398	2,468	0,877	26,22	73,78	-4,65
M 240 T4	0,935	4,642	3,626	2,691	1,016	27,41	72,59	-8,78
M 300 T4	0,951	4,409	3,486	2,535	0,923	26,69	73,31	-6,34
M 360 T4	0,933	4,498	3,485	2,552	1,013	28,42	71,58	-12,02
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
I 000 T4	0,948	4,833	3,932	2,984	0,901	23,19	76,81	7,80
I 060 T4	0,925	4,959	3,979	3,054	0,980	24,29	75,71	2,91
I 120 T4	0,961	4,825	3,853	2,892	0,972	25,16	74,84	-0,62
I 180 T4	0,946	4,674	3,752	2,806	0,922	24,73	75,27	1,08
I 240 T4	0,959	5,342	4,220	3,261	1,122	25,60	74,40	-2,34
I 300 T4	0,934	4,747	3,804	2,870	0,943	24,73	75,27	1,09
I 360 T4	0,941	5,254	4,113	3,172	1,141	26,45	73,55	-5,50

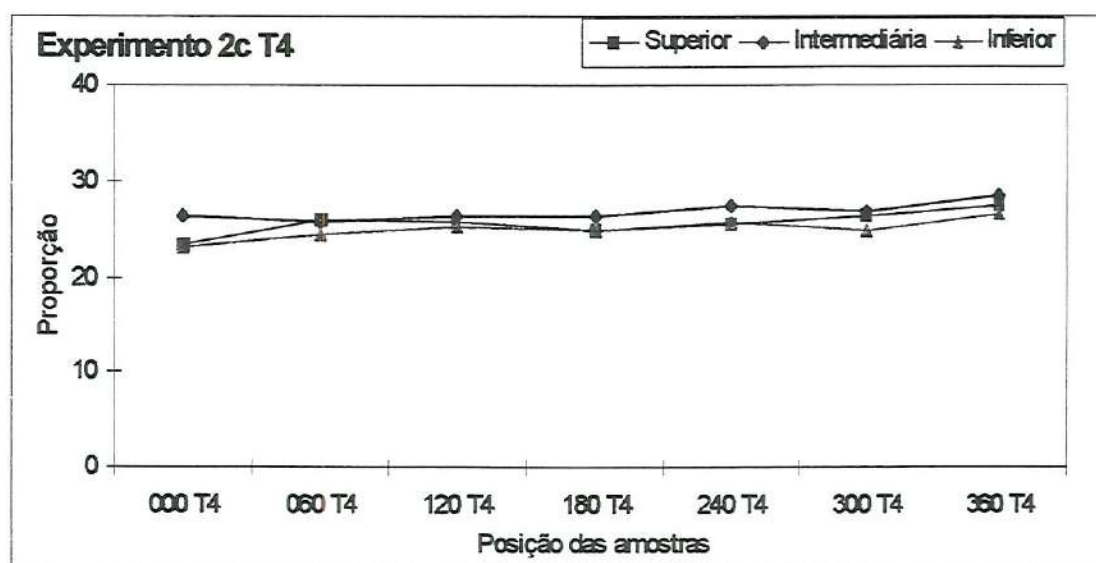


Figura C.8 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1c.

Tabela C.9 – Ensaio com velocidade de fluidização 2,0  $U_{MF}$ , areia 225 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
S 000 T1	0,936	4,795	3,794	2,858	1,001	25,94	74,06	-3,62
S 060 T1	0,923	4,688	3,766	2,843	0,922	24,49	75,51	2,09
S 120 T1	0,949	4,608	3,624	2,675	0,984	26,89	73,11	-7,04
S 180 T1	0,928	4,942	3,893	2,965	1,049	26,13	73,87	-4,34
S 240 T1	0,933	4,552	3,553	2,620	0,999	27,60	72,40	-9,43
S 300 T1	0,923	4,481	3,431	2,508	1,050	29,51	70,49	-15,29
S 360 T1	0,932	4,568	3,651	2,719	0,917	25,22	74,78	-0,87
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
M 000 T1	0,983	4,829	3,713	2,730	1,116	29,02	70,98	-13,84
M 060 T1	0,940	4,662	3,656	2,716	1,006	27,03	72,97	-7,50
M 120 T1	0,928	4,656	3,639	2,711	1,017	27,28	72,72	-8,36
M 180 T1	0,928	5,009	3,868	2,940	1,141	27,96	72,04	-10,58
M 240 T1	0,920	4,680	3,561	2,641	1,119	29,76	70,24	-16,00
M 300 T1	0,945	4,648	3,483	2,538	1,165	31,46	68,54	-20,54
M 360 T1	0,924	4,596	3,601	2,677	0,995	27,10	72,90	-7,74
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
I 000 T1	0,918	5,132	4,055	3,137	1,077	25,56	74,44	-2,18
I 060 T1	0,981	5,113	4,083	3,102	1,030	24,93	75,07	0,29
I 120 T1	0,927	5,071	3,995	3,068	1,076	25,97	74,03	-3,72
I 180 T1	0,984	5,303	4,190	3,206	1,113	25,77	74,23	-2,99
I 240 T1	0,926	5,046	3,918	2,992	1,128	27,38	72,62	-8,69
I 300 T1	0,971	4,968	3,767	2,796	1,201	30,05	69,95	-16,80
I 360 T1	0,916	4,872	3,627	2,711	1,245	31,47	68,53	-20,56

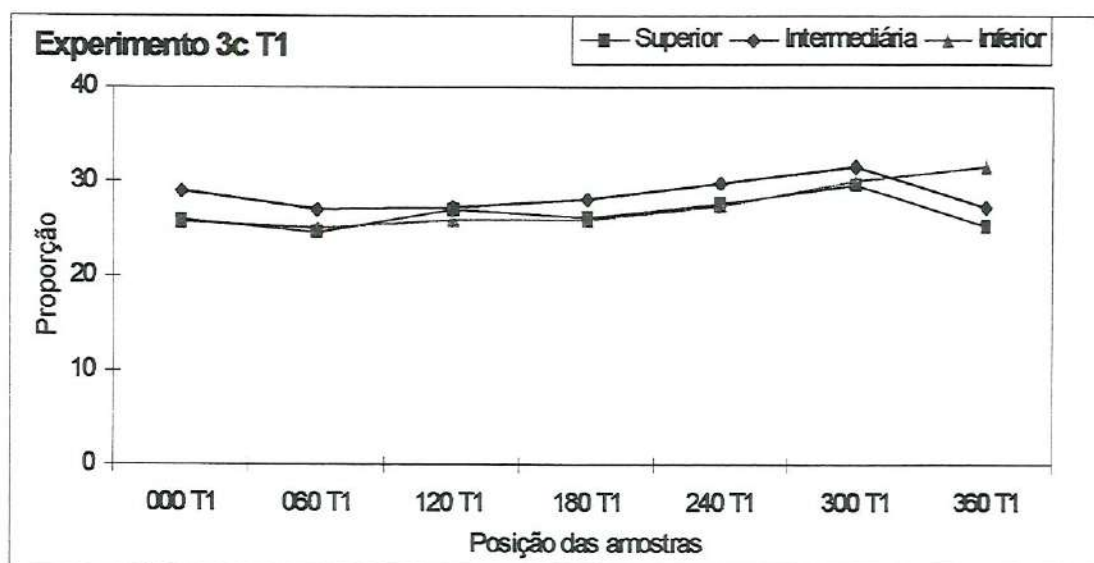


Figura C.9 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1c.



Tabela C.10 – Ensaio com velocidade de fluidização 2,0  $U_{MF}$ , areia 225 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
S 000 T2	0,929	4,501	3,540	2,611	0,961	26,90	73,10	-7,08
S 060 T2	0,934	4,741	3,705	2,771	1,036	27,21	72,79	-8,13
S 120 T2	0,925	4,756	3,683	2,758	1,073	28,01	71,99	-10,74
S 180 T2	0,929	4,400	3,483	2,554	0,917	26,42	73,58	-5,37
S 240 T2	0,930	4,615	3,590	2,660	1,025	27,82	72,18	-10,12
S 300 T2	0,933	4,830	3,737	2,804	1,093	28,05	71,95	-10,86
S 360 T2	0,931	4,553	3,590	2,659	0,963	26,59	73,41	-5,97
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
M 000 T2	0,930	4,599	3,562	2,632	1,037	28,26	71,74	-11,55
M 060 T2	0,930	4,773	3,686	2,756	1,087	28,29	71,71	-11,61
M 120 T2	0,934	4,879	3,783	2,849	1,096	27,78	72,22	-10,01
M 180 T2	0,921	4,527	3,513	2,592	1,014	28,12	71,88	-11,09
M 240 T2	0,932	4,718	3,605	2,673	1,113	29,40	70,60	-14,96
M 300 T2	0,926	4,797	3,656	2,730	1,141	29,48	70,52	-15,18
M 360 T2	0,925	4,605	3,614	2,689	0,991	26,93	73,07	-7,16
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
I 000 T2	0,939	5,095	4,001	3,062	1,094	26,32	73,68	-5,03
I 060 T2	0,938	5,162	3,993	3,055	1,169	27,68	72,32	-9,67
I 120 T2	0,922	5,156	4,044	3,122	1,112	26,26	73,74	-4,81
I 180 T2	0,928	4,847	3,793	2,865	1,054	26,89	73,11	-7,04
I 240 T2	0,923	5,045	3,932	3,009	1,113	27,00	73,00	-7,41
I 300 T2	0,939	5,190	4,022	3,083	1,168	27,48	72,52	-9,01
I 360 T2	0,907	5,252	4,113	3,206	1,139	26,21	73,79	-4,63

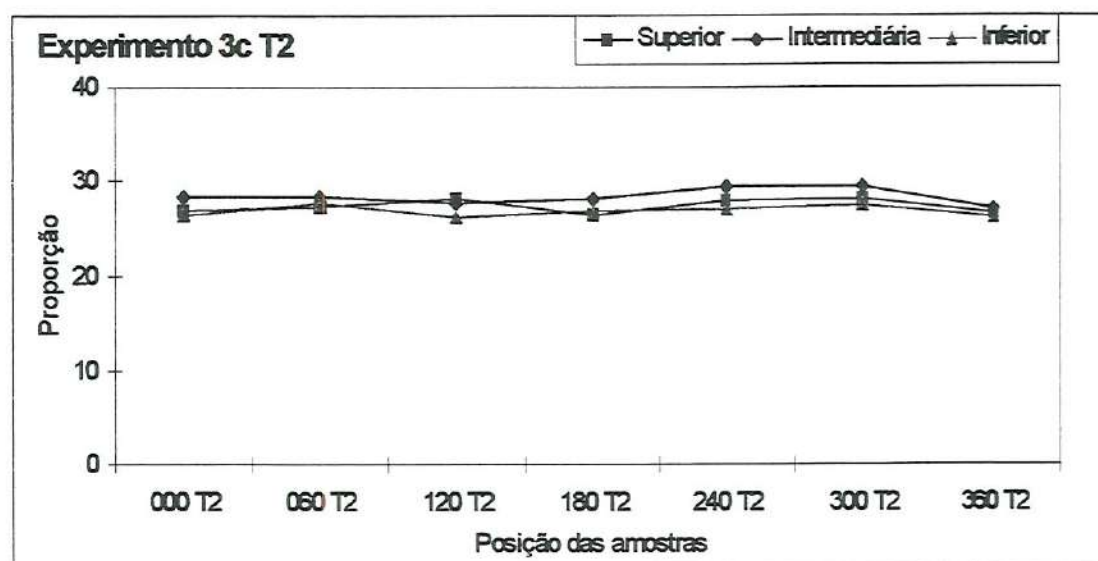


Figura C.10 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1c.



Tabela C.11 – Ensaio com velocidade de fluidização  $2,0 U_{MF}$ , areia  $225\mu\text{m}$  e traçador  $450\mu\text{m}$ .

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
S 000 T3	0,920	4,935	3,881	2,961	1,054	26,25	73,75	-4,77
S 060 T3	0,917	4,579	3,622	2,705	0,957	26,13	73,87	-4,34
S 120 T3	0,918	4,571	3,553	2,635	1,018	27,87	72,13	-10,29
S 180 T3	0,913	4,676	3,661	2,748	1,015	26,97	73,03	-7,32
S 240 T3	0,917	4,632	3,653	2,736	0,979	26,35	73,65	-5,13
S 300 T3	0,936	4,610	3,609	2,673	1,001	27,25	72,75	-8,24
S 360 T3	0,923	4,754	3,657	2,734	1,097	28,63	71,37	-12,69
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
M 000 T3	0,927	4,945	3,761	2,834	1,184	29,47	70,53	-15,16
M 060 T3	0,918	4,596	3,558	2,640	1,038	28,22	71,78	-11,42
M 120 T3	0,933	4,643	3,573	2,640	1,070	28,84	71,16	-13,32
M 180 T3	0,921	4,629	3,604	2,683	1,025	27,64	72,36	-9,56
M 240 T3	0,928	4,684	3,613	2,685	1,071	28,51	71,49	-12,32
M 300 T3	0,912	4,590	3,589	2,677	1,001	27,22	72,78	-8,14
M 360 T3	0,930	4,777	3,733	2,803	1,044	27,14	72,86	-7,88
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
I 000 T3	0,925	5,246	4,167	3,242	1,079	24,97	75,03	0,12
I 060 T3	0,917	4,949	3,873	2,956	1,076	26,69	73,31	-6,32
I 120 T3	0,937	5,056	3,940	3,003	1,116	27,09	72,91	-7,73
I 180 T3	0,932	5,029	3,902	2,970	1,127	27,51	72,49	-9,12
I 240 T3	0,920	5,134	4,021	3,101	1,113	26,41	73,59	-5,35
I 300 T3	0,936	5,022	3,931	2,995	1,091	26,70	73,30	-6,37
I 360 T3	0,921	5,163	4,068	3,147	1,095	25,81	74,19	-3,15

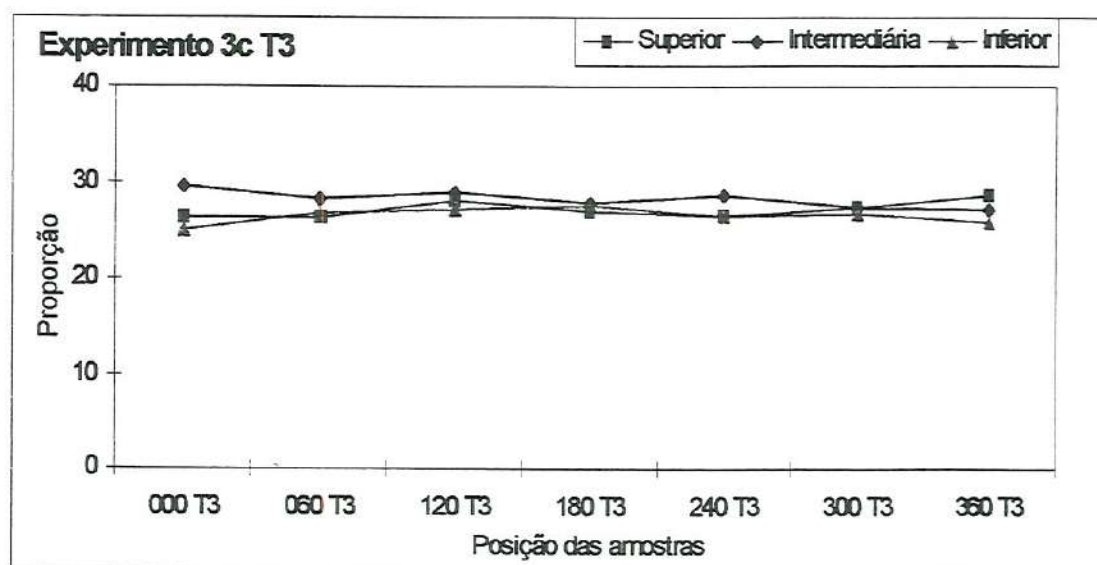


Figura C.11 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1c.

Tabela C.12 – Ensaio com velocidade de fluidização 2,0  $U_{MF}$ , areia 225 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
S 000 T4	0,942	5,151	4,110	3,168	1,041	24,73	75,27	1,08
S 060 T4	0,907	4,881	3,821	2,914	1,060	26,67	73,33	-6,27
S 120 T4	0,942	4,248	3,342	2,400	0,906	27,40	72,60	-8,77
S 180 T4	0,932	4,584	3,603	2,671	0,981	26,86	73,14	-6,93
S 240 T4	0,950	4,559	3,595	2,645	0,964	26,71	73,29	-6,41
S 300 T4	0,929	4,608	3,598	2,669	1,010	27,45	72,55	-8,94
S 360 T4	0,938	5,155	4,066	3,128	1,089	25,82	74,18	-3,19
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
M 000 T4	0,918	5,081	4,011	3,093	1,070	25,70	74,30	-2,73
M 060 T4	0,922	4,852	3,771	2,849	1,081	27,51	72,49	-9,11
M 120 T4	0,920	4,369	3,442	2,522	0,927	26,88	73,12	-6,98
M 180 T4	0,929	4,598	3,575	2,646	1,023	27,88	72,12	-10,34
M 240 T4	0,917	4,520	3,556	2,639	0,964	26,76	73,24	-6,56
M 300 T4	0,941	4,598	3,590	2,649	1,008	27,56	72,44	-9,30
M 360 T4	0,902	4,724	3,701	2,799	1,023	26,77	73,23	-6,60
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
I 000 T4	0,927	5,352	4,185	3,258	1,167	26,37	73,63	-5,21
I 060 T4	0,918	5,236	4,120	3,202	1,116	25,85	74,15	-3,27
I 120 T4	0,941	4,922	3,863	2,922	1,059	26,60	73,40	-6,02
I 180 T4	0,920	5,053	3,954	3,034	1,099	26,59	73,41	-5,98
I 240 T4	0,937	4,949	3,937	3,000	1,012	25,22	74,78	-0,89
I 300 T4	0,930	5,025	3,942	3,012	1,083	26,45	73,55	-5,47
I 360 T4	0,934	4,710	4,051	3,117	0,659	17,45	82,55	43,25

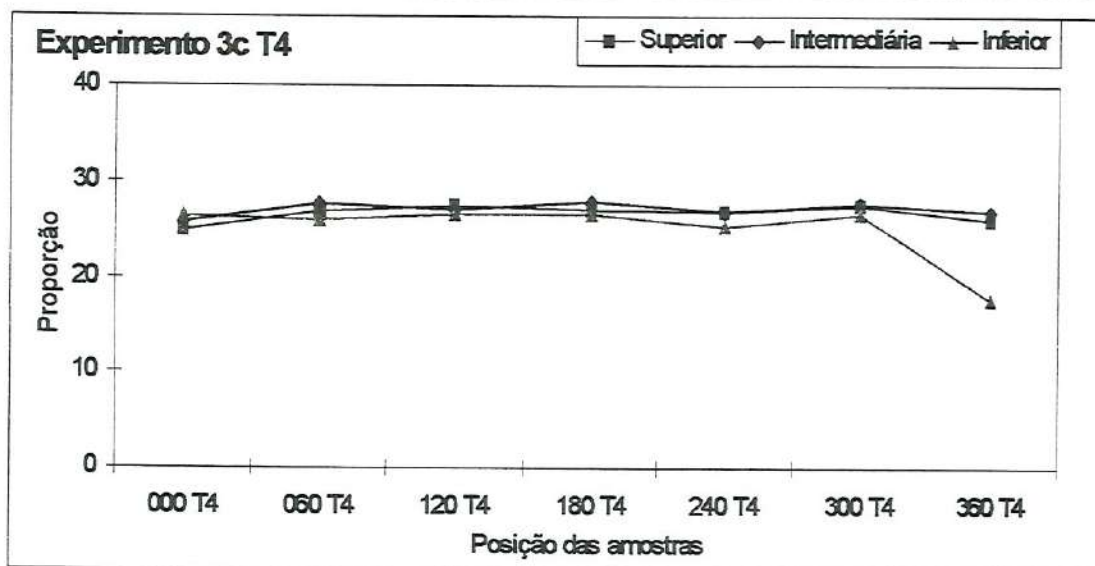


Figura C.12 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1c.



Tabela C.13 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,4  $U_{MF}$ , areia 450 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
S 000 T1	0,915	4,710	3,772	2,857	0,938	24,72	75,28	1,15
S 060 T1	0,939	4,854	3,924	2,985	0,930	23,75	76,25	5,24
S 120 T1	0,911	4,626	3,786	2,875	0,840	22,61	77,39	10,57
S 180 T1	0,951	4,436	3,660	2,709	0,776	22,27	77,73	12,27
S 240 T1	0,912	4,028	3,341	2,429	0,687	22,05	77,95	13,39
S 300 T1	0,946	4,535	3,659	2,713	0,876	24,41	75,59	2,43
S 360 T1	0,922	4,827	3,907	2,985	0,920	23,56	76,44	6,11
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
M 000 T1	0,935	4,738	3,761	2,826	0,977	25,69	74,31	-2,69
M 060 T1	0,927	4,873	3,889	2,962	0,984	24,94	75,06	0,25
M 120 T1	0,941	4,710	3,730	2,789	0,980	26,00	74,00	-3,85
M 180 T1	0,916	4,621	3,847	2,931	0,774	20,89	79,11	19,67
M 240 T1	0,925	4,046	3,339	2,414	0,707	22,65	77,35	10,36
M 300 T1	0,919	4,601	3,790	2,871	0,811	22,03	77,97	13,50
M 360 T1	0,935	4,782	3,896	2,961	0,886	23,03	76,97	8,55
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
I 000 T1	0,911	5,207	4,139	3,228	1,068	24,86	75,14	0,56
I 060 T1	0,921	5,378	4,269	3,348	1,109	24,88	75,12	0,47
I 120 T1	0,918	4,906	2,195	1,277	2,711	67,98	32,02	-63,22
I 180 T1	0,935	5,148	4,108	3,173	1,040	24,69	75,31	1,27
I 240 T1	0,926	4,814	3,905	2,979	0,909	23,38	76,62	6,93
I 300 T1	0,939	4,992	2,970	2,031	2,022	49,89	50,11	-49,89
I 360 T1	0,924	5,094	3,341	2,417	1,753	42,04	57,96	-40,53

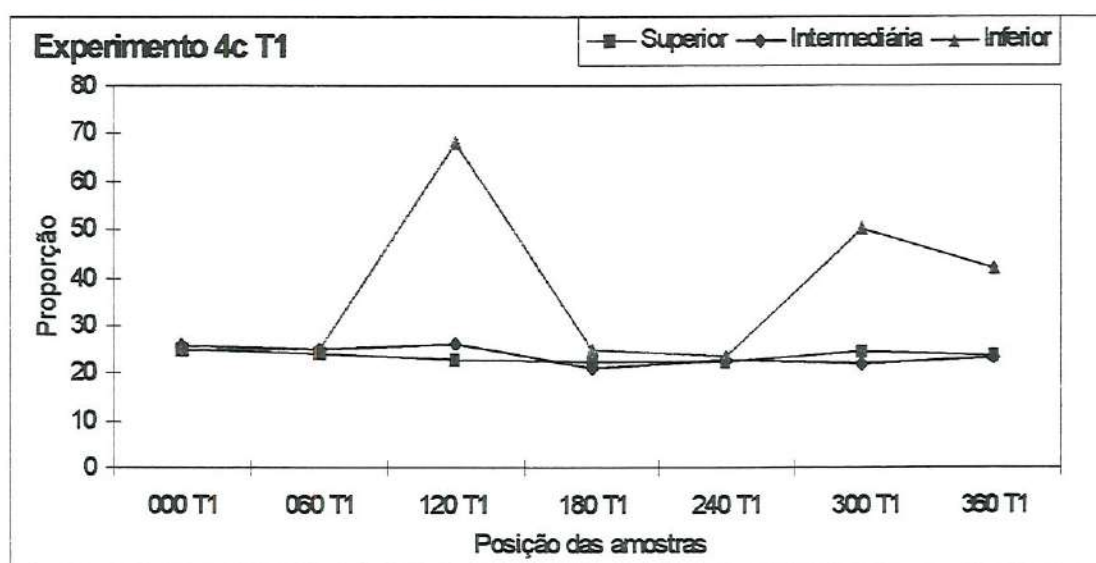


Figura C.13 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1c.



Tabela C.14 – Ensaios com velocidade de fluidização  $1,4 U_{MF}$ , areia  $450\mu\text{m}$  e traçador  $450\mu\text{m}$ .

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
S 000 T2	0,930	4,776	3,786	2,856	0,990	25,74	74,26	-2,88
S 060 T2	0,901	4,799	3,804	2,903	0,995	25,53	74,47	-2,06
S 120 T2	0,929	4,639	3,691	2,762	0,948	25,55	74,45	-2,16
S 180 T2	0,905	4,833	3,855	2,950	0,978	24,90	75,10	0,41
S 240 T2	0,914	4,654	3,717	2,803	0,937	25,05	74,95	-0,21
S 300 T2	0,919	4,680	3,729	2,810	0,951	25,29	74,71	-1,13
S 360 T2	0,938	4,569	3,618	2,680	0,951	26,19	73,81	-4,55
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
M 000 T2	0,918	4,665	3,708	2,790	0,957	25,54	74,46	-2,12
M 060 T2	0,942	4,803	3,821	2,879	0,982	25,43	74,57	-1,71
M 120 T2	0,923	4,610	3,674	2,751	0,936	25,39	74,61	-1,52
M 180 T2	0,933	4,694	3,736	2,803	0,958	25,47	74,53	-1,85
M 240 T2	0,930	4,715	3,760	2,830	0,955	25,23	74,77	-0,92
M 300 T2	0,934	4,622	3,682	2,748	0,940	25,49	74,51	-1,91
M 360 T2	0,901	4,709	3,730	2,829	0,979	25,71	74,29	-2,76
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
I 000 T2	0,948	5,211	4,121	3,173	1,090	25,57	74,43	-2,22
I 060 T2	0,921	5,259	4,151	3,230	1,108	25,54	74,46	-2,12
I 120 T2	0,933	5,067	3,994	3,061	1,073	25,96	74,04	-3,68
I 180 T2	0,930	5,049	4,004	3,074	1,045	25,37	74,63	-1,46
I 240 T2	0,944	5,137	4,054	3,110	1,083	25,83	74,17	-3,21
I 300 T2	0,911	5,065	3,946	3,035	1,119	26,94	73,06	-7,19
I 360 T2	0,937	5,230	4,108	3,171	1,122	26,14	73,86	-4,34

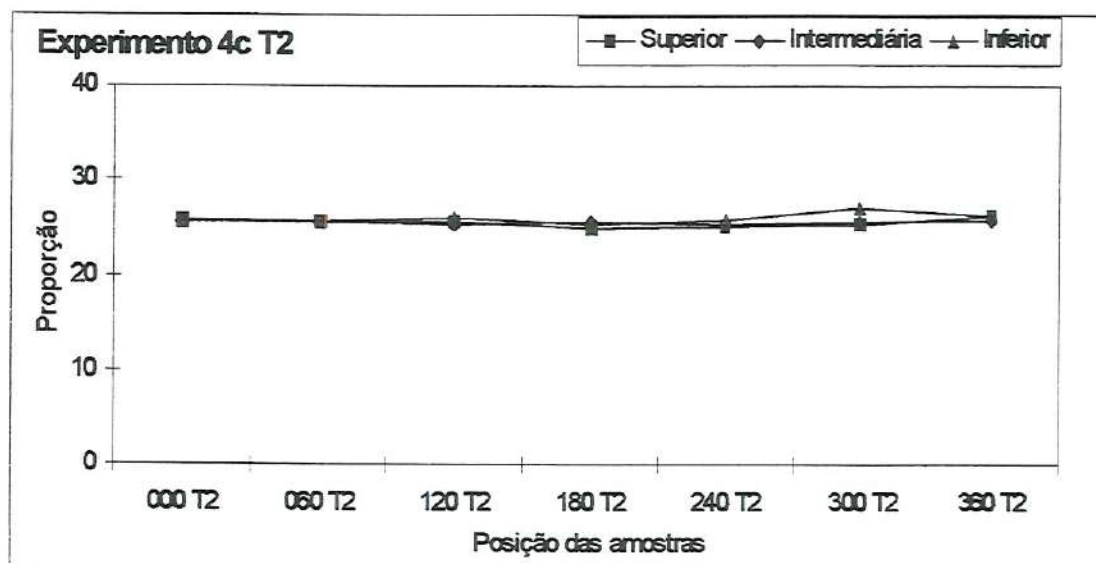


Figura C.14 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1c.

Tabela C.15 – Ensaio com velocidade de fluidização  $1,4 U_{MF}$ , areia  $450\mu\text{m}$  e traçador  $450\mu\text{m}$ .

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
S 000 T3	0,916	4,492	3,591	2,675	0,901	25,20	74,80	-0,78
S 060 T3	0,934	4,570	3,647	2,713	0,923	25,39	74,61	-1,52
S 120 T3	0,920	4,621	3,694	2,774	0,927	25,05	74,95	-0,19
S 180 T3	0,935	4,608	3,678	2,743	0,930	25,32	74,68	-1,26
S 240 T3	0,918	4,780	3,810	2,892	0,970	25,12	74,88	-0,46
S 300 T3	0,941	4,820	3,823	2,882	0,997	25,70	74,30	-2,73
S 360 T3	0,904	4,846	3,771	2,867	1,075	27,27	72,73	-8,33
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
M 000 T3	0,947	4,671	3,738	2,791	0,933	25,05	74,95	-0,21
M 060 T3	0,918	4,518	3,611	2,693	0,907	25,19	74,81	-0,77
M 120 T3	0,921	4,635	3,709	2,788	0,926	24,93	75,07	0,27
M 180 T3	0,924	4,568	3,649	2,725	0,919	25,22	74,78	-0,87
M 240 T3	0,942	4,789	3,824	2,882	0,965	25,08	74,92	-0,34
M 300 T3	0,909	4,753	3,778	2,869	0,975	25,36	74,64	-1,44
M 360 T3	0,935	4,787	3,795	2,860	0,992	25,75	74,25	-2,92
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
I 000 T3	0,912	5,167	4,107	3,195	1,060	24,91	75,09	0,35
I 060 T3	0,929	4,965	3,925	2,996	1,040	25,77	74,23	-2,98
I 120 T3	0,926	5,116	4,050	3,124	1,066	25,44	74,56	-1,74
I 180 T3	0,955	5,120	4,046	3,091	1,074	25,79	74,21	-3,05
I 240 T3	0,915	5,153	4,073	3,158	1,080	25,48	74,52	-1,90
I 300 T3	0,940	5,212	4,108	3,168	1,104	25,84	74,16	-3,26
I 360 T3	0,922	5,059	3,539	2,617	1,520	36,74	63,26	-31,96

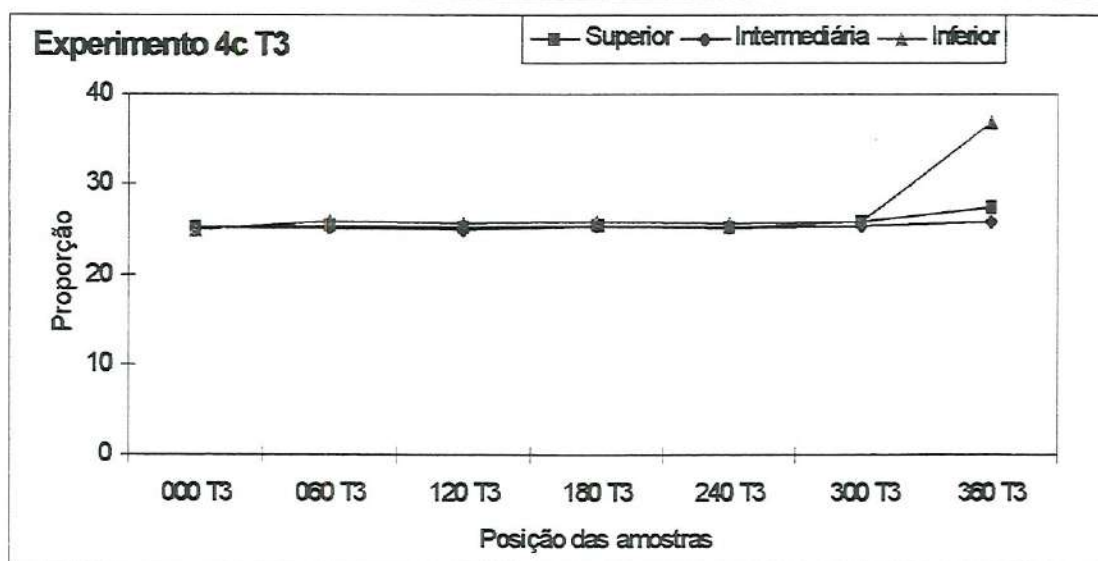


Figura C.15 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1c.



Tabela C.16 – Ensaio com velocidade de fluidização  $1,4 U_{MF}$ , areia  $450\mu\text{m}$  e traçador  $450\mu\text{m}$ .

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
S 000 T4	0,914	4,773	3,806	2,892	0,967	25,06	74,94	-0,23
S 060 T4	0,913	4,649	3,696	2,783	0,953	25,51	74,49	-1,99
S 120 T4	0,922	4,778	3,783	2,861	0,995	25,80	74,20	-3,12
S 180 T4	0,910	4,741	3,795	2,885	0,946	24,69	75,31	1,24
S 240 T4	0,927	4,702	3,769	2,842	0,933	24,72	75,28	1,15
S 300 T4	0,923	4,743	3,775	2,852	0,968	25,34	74,66	-1,34
S 360 T4	0,918	4,701	3,746	2,828	0,955	25,24	74,76	-0,97
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
M 000 T4	0,926	4,846	3,848	2,922	0,998	25,46	74,54	-1,80
M 060 T4	0,917	4,652	3,698	2,781	0,954	25,54	74,46	-2,12
M 120 T4	0,932	4,740	3,786	2,854	0,954	25,05	74,95	-0,21
M 180 T4	0,943	4,599	3,687	2,744	0,912	24,95	75,05	0,22
M 240 T4	0,910	4,769	3,808	2,898	0,961	24,90	75,10	0,39
M 300 T4	0,929	4,627	3,665	2,736	0,962	26,01	73,99	-3,90
M 360 T4	0,907	4,769	3,820	2,913	0,949	24,57	75,43	1,74
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. sal
I 000 T4	0,922	5,437	4,293	3,371	1,144	25,34	74,66	-1,33
I 060 T4	0,922	5,173	4,088	3,166	1,085	25,52	74,48	-2,05
I 120 T4	0,936	5,144	4,046	3,110	1,098	26,09	73,91	-4,19
I 180 T4	0,920	4,996	3,968	3,048	1,028	25,22	74,78	-0,88
I 240 T4	0,932	5,146	4,053	3,121	1,093	25,94	74,06	-3,61
I 300 T4	0,931	5,118	4,044	3,113	1,074	25,65	74,35	-2,54
I 360 T4	0,938	5,171	4,008	3,070	1,163	27,47	72,53	-9,01

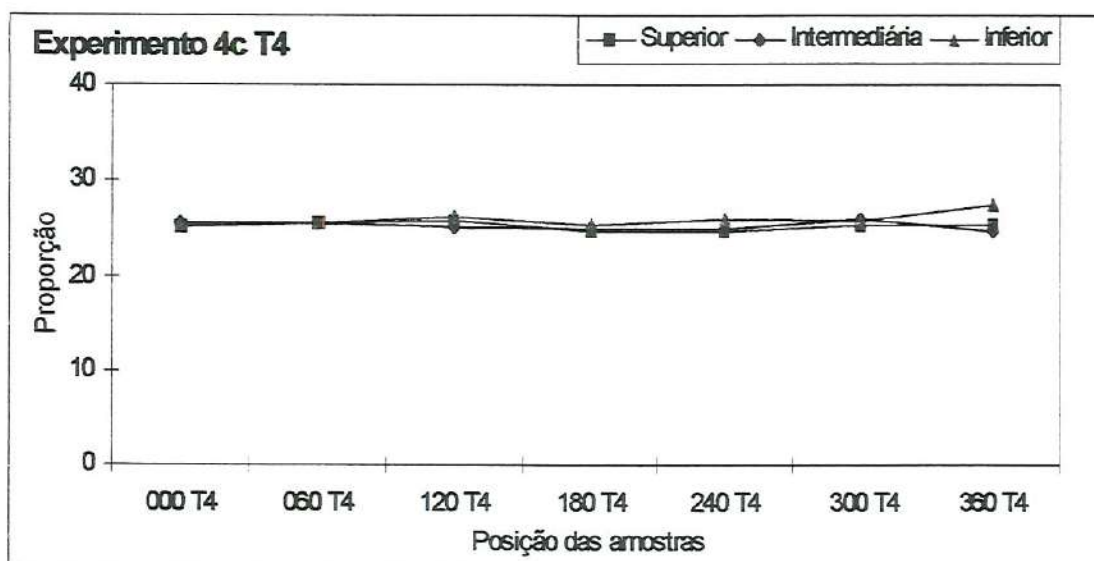


Figura C.16 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1c.

Tabela C.17 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,7  $U_{MF}$ , areia 450 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
S 000 T1	0,947	4,782	3,770	2,823	1,012	26,39	73,61	-5,26
S 060 T1	0,931	4,646	3,648	2,717	0,998	26,86	73,14	-6,94
S 120 T1	0,941	4,706	3,675	2,734	1,031	27,38	72,62	-8,71
S 180 T1	0,933	4,333	3,425	2,492	0,908	26,71	73,29	-6,39
S 240 T1	0,930	4,719	3,770	2,840	0,949	25,05	74,95	-0,18
S 300 T1	0,937	4,537	3,663	2,726	0,874	24,28	75,72	2,97
S 360 T1	0,938	4,718	3,749	2,811	0,969	25,63	74,37	-2,48
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
M 000 T1	0,930	4,660	3,686	2,756	0,974	26,11	73,89	-4,26
M 060 T1	0,936	4,641	3,639	2,703	1,002	27,04	72,96	-7,56
M 120 T1	0,942	4,558	3,588	2,646	0,970	26,83	73,17	-6,80
M 180 T1	0,926	4,294	3,400	2,474	0,894	26,54	73,46	-5,82
M 240 T1	0,942	4,634	3,714	2,772	0,920	24,92	75,08	0,33
M 300 T1	0,933	4,568	3,679	2,746	0,889	24,46	75,54	2,22
M 360 T1	0,915	4,700	3,693	2,778	1,007	26,61	73,39	-6,03
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
I 000 T1	0,954	5,100	4,006	3,052	1,094	26,39	73,61	-5,26
I 060 T1	0,932	5,211	4,079	3,147	1,132	26,45	73,55	-5,50
I 120 T1	0,942	4,923	3,839	2,897	1,084	27,23	72,77	-8,19
I 180 T1	0,921	4,905	3,858	2,937	1,047	26,28	73,72	-4,87
I 240 T1	0,932	5,024	4,005	3,073	1,019	24,90	75,10	0,39
I 300 T1	0,930	5,014	4,009	3,079	1,005	24,61	75,39	1,59
I 360 T1	0,936	5,180	4,076	3,140	1,104	26,01	73,99	-3,89

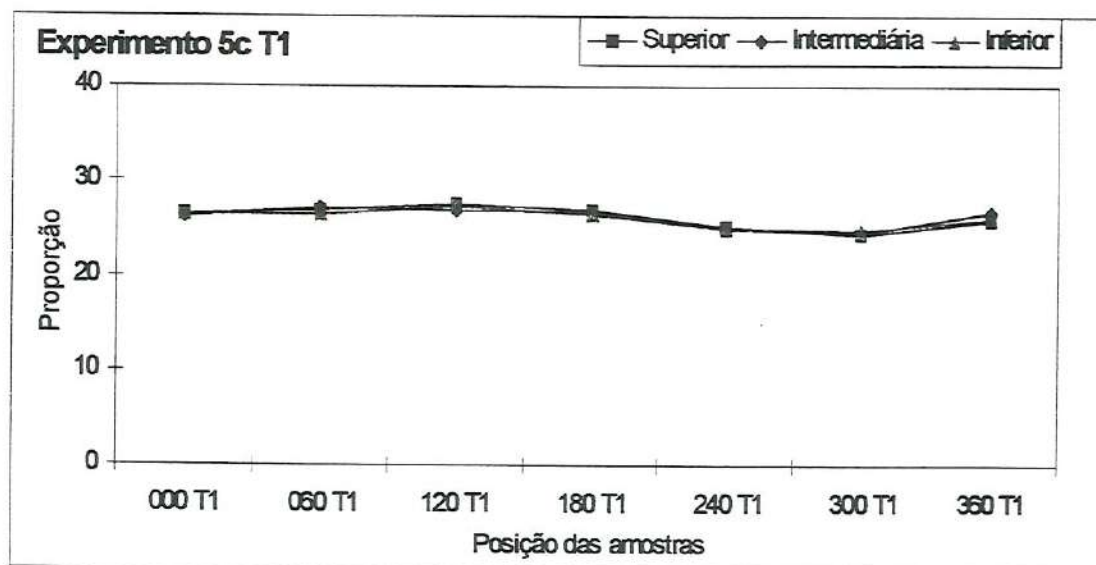


Figura C.17 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1c.



Tabela C.18 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,7  $U_{MF}$ , areia 450 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
S 000 T2	0,933	4,557	3,631	2,698	0,926	25,55	74,45	-2,16
S 060 T2	0,941	4,437	3,531	2,590	0,906	25,92	74,08	-3,53
S 120 T2	0,932	4,207	3,361	2,429	0,846	25,83	74,17	-3,22
S 180 T2	0,937	4,380	3,499	2,562	0,881	25,59	74,41	-2,30
S 240 T2	0,927	4,465	3,561	2,634	0,904	25,55	74,45	-2,16
S 300 T2	0,932	4,669	3,717	2,785	0,952	25,47	74,53	-1,86
S 360 T2	0,926	4,659	3,711	2,785	0,948	25,40	74,60	-1,56
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
M 000 T2	0,916	4,582	3,635	2,719	0,947	25,83	74,17	-3,22
M 060 T2	0,922	4,499	3,577	2,655	0,922	25,78	74,22	-3,01
M 120 T2	0,929	4,483	3,585	2,656	0,898	25,27	74,73	-1,06
M 180 T2	0,929	4,504	3,569	2,640	0,935	26,15	73,85	-4,41
M 240 T2	0,922	4,577	3,647	2,725	0,930	25,44	74,56	-1,75
M 300 T2	0,936	4,784	3,805	2,869	0,979	25,44	74,56	-1,74
M 360 T2	0,929	4,715	3,740	2,811	0,975	25,75	74,25	-2,92
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
I 000 T2	0,935	5,062	4,016	3,081	1,046	25,35	74,65	-1,36
I 060 T2	0,937	4,915	3,899	2,962	1,016	25,54	74,46	-2,12
I 120 T2	0,931	4,943	3,943	3,012	1,000	24,93	75,07	0,30
I 180 T2	0,935	4,987	3,949	3,014	1,038	25,62	74,38	-2,41
I 240 T2	0,932	5,000	3,944	3,012	1,056	25,96	74,04	-3,69
I 300 T2	0,918	5,169	4,076	3,158	1,093	25,71	74,29	-2,77
I 360 T2	0,918	5,296	4,153	3,235	1,143	26,11	73,89	-4,24

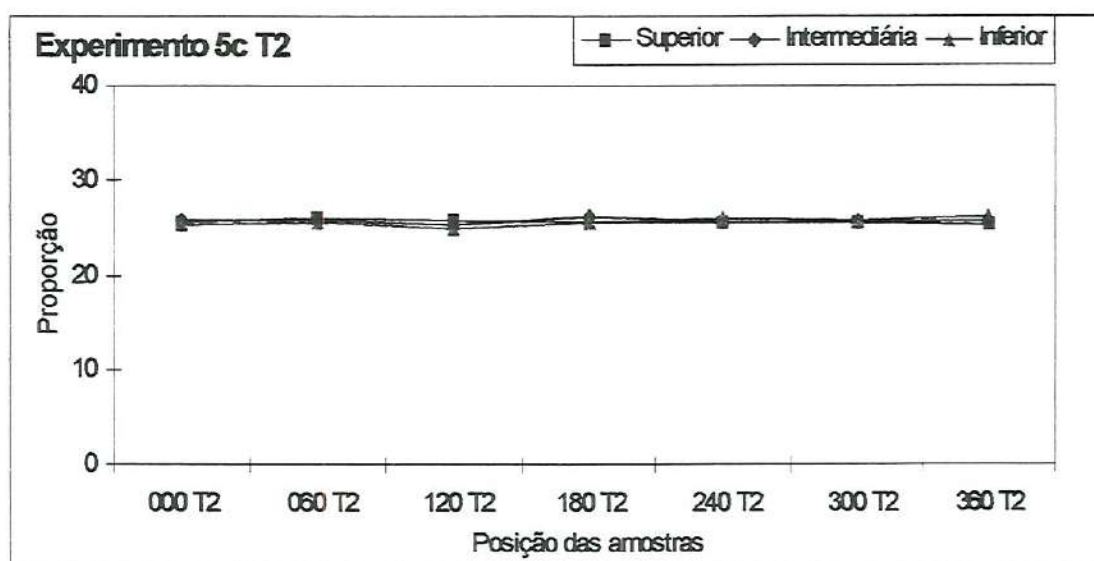


Figura C.18 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1c.

Tabela C.19 – Ensaio com velocidade de fluidização 1,7  $U_{MF}$ , areia 450 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
S 000 T3	0,939	4,475	3,574	2,635	0,901	25,48	74,52	-1,89
S 060 T3	0,940	4,462	3,563	2,623	0,899	25,53	74,47	-2,06
S 120 T3	0,923	4,414	3,531	2,608	0,883	25,29	74,71	-1,16
S 180 T3	0,943	4,686	3,734	2,791	0,952	25,43	74,57	-1,71
S 240 T3	0,932	4,428	3,530	2,598	0,898	25,69	74,31	-2,67
S 300 T3	0,953	4,476	3,578	2,625	0,898	25,49	74,51	-1,92
S 360 T3	0,926	4,630	3,679	2,753	0,951	25,67	74,33	-2,63
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
M 000 T3	0,929	4,668	3,724	2,795	0,944	25,25	74,75	-0,98
M 060 T3	0,931	4,503	3,610	2,679	0,893	25,00	75,00	0,00
M 120 T3	0,931	4,545	3,640	2,709	0,905	25,04	74,96	-0,17
M 180 T3	0,924	4,643	3,712	2,788	0,931	25,03	74,97	-0,13
M 240 T3	0,922	4,622	3,687	2,765	0,935	25,27	74,73	-1,07
M 300 T3	0,916	4,454	3,580	2,664	0,874	24,70	75,30	1,20
M 360 T3	0,936	4,667	3,722	2,786	0,945	25,33	74,67	-1,30
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
I 000 T3	0,921	5,139	4,056	3,135	1,083	25,68	74,32	-2,63
I 060 T3	0,922	5,032	4,015	3,093	1,017	24,74	75,26	1,03
I 120 T3	0,924	5,003	3,949	3,025	1,054	25,84	74,16	-3,25
I 180 T3	0,927	5,033	3,987	3,060	1,046	25,47	74,53	-1,86
I 240 T3	0,927	5,155	4,071	3,144	1,084	25,64	74,36	-2,49
I 300 T3	0,924	4,975	3,938	3,014	1,037	25,60	74,40	-2,34
I 360 T3	0,921	5,278	4,172	3,251	1,106	25,38	74,62	-1,51

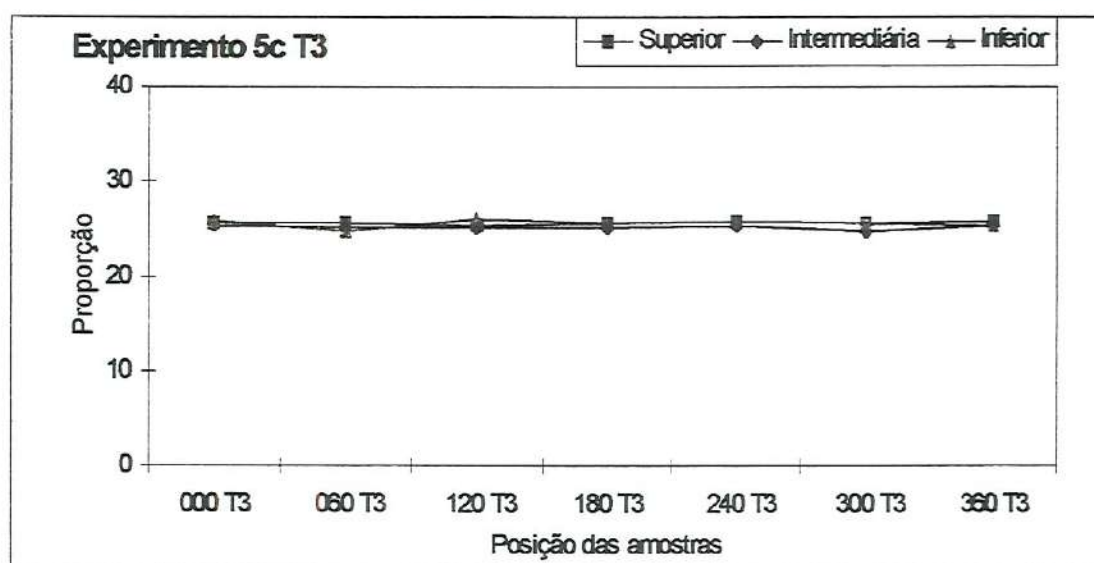


Figura C.19 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1c.



Tabela C.20 – Ensaios com velocidade de fluidização 1,7  $U_{MF}$ , areia 450 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
S 000 T4	0,951	4,642	3,706	2,755	0,936	25,36	74,64	-1,42
S 060 T4	0,933	4,674	3,719	2,786	0,955	25,53	74,47	-2,07
S 120 T4	0,937	4,380	3,510	2,573	0,870	25,27	74,73	-1,06
S 180 T4	0,945	4,638	3,738	2,793	0,900	24,37	75,63	2,58
S 240 T4	0,964	4,579	3,709	2,745	0,870	24,07	75,93	3,88
S 300 T4	0,940	4,854	3,861	2,921	0,993	25,37	74,63	-1,46
S 360 T4	0,937	4,964	3,930	2,993	1,034	25,68	74,32	-2,64
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
M 000 T4	0,924	4,637	3,692	2,768	0,945	25,45	74,55	-1,77
M 060 T4	0,937	4,667	3,722	2,785	0,945	25,34	74,66	-1,32
M 120 T4	0,925	4,601	3,667	2,742	0,934	25,41	74,59	-1,61
M 180 T4	0,950	4,704	3,784	2,834	0,920	24,51	75,49	2,01
M 240 T4	0,925	4,633	3,729	2,804	0,904	24,38	75,62	2,54
M 300 T4	0,935	4,841	3,850	2,915	0,991	25,37	74,63	-1,46
M 360 T4	0,937	4,828	3,849	2,912	0,979	25,16	74,84	-0,64
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	% Dif. Sal
I 000 T4	0,940	5,177	4,097	3,157	1,080	25,49	74,51	-1,92
I 060 T4	0,934	5,134	4,084	3,150	1,050	25,00	75,00	0,00
I 120 T4	0,967	5,162	4,088	3,121	1,074	25,60	74,40	-2,35
I 180 T4	0,918	5,192	4,145	3,227	1,047	24,50	75,50	2,05
I 240 T4	0,951	5,071	4,036	3,085	1,035	25,12	74,88	-0,48
I 300 T4	0,926	5,502	4,320	3,394	1,182	25,83	74,17	-3,21
I 360 T4	0,948	5,250	4,152	3,204	1,098	25,52	74,48	-2,05

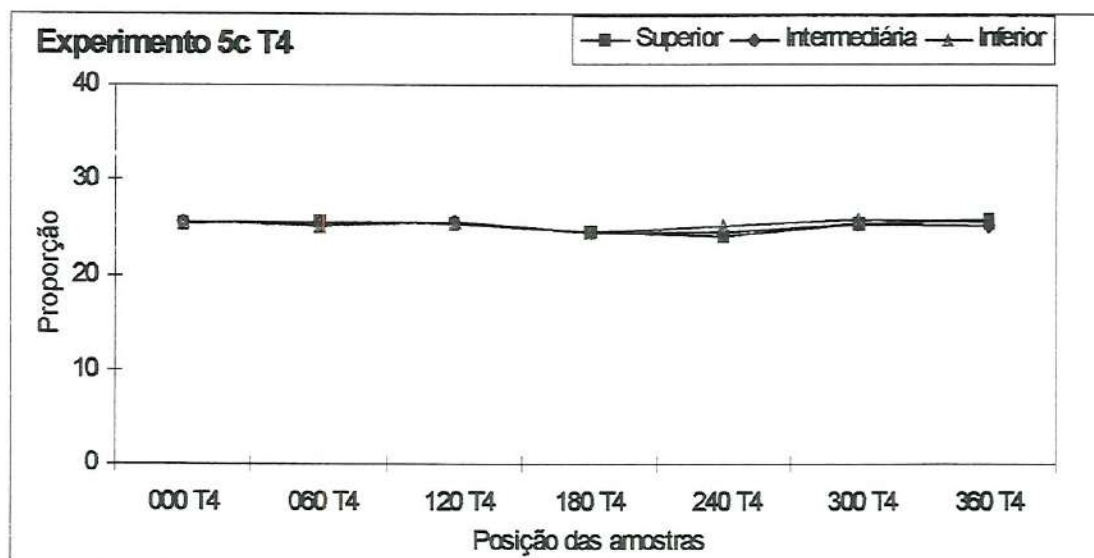


Figura C.20 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1c.

Tabela C.21 – Ensaio com velocidade de fluidização  $2,0 U_{MF}$ , areia  $450\mu m$  e traçador  $450\mu m$ .

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
S 000 T1	0,922	4,645	3,737	2,815	0,908	24,39	75,61	2,51
S 060 T1	0,921	4,694	3,722	2,801	0,972	25,76	74,24	-2,96
S 120 T1	0,934	4,539	3,627	2,693	0,912	25,30	74,70	-1,18
S 180 T1	0,934	4,592	3,678	2,744	0,914	24,99	75,01	0,05
S 240 T1	0,944	4,584	3,664	2,720	0,920	25,27	74,73	-1,09
S 300 T1	0,915	4,571	3,661	2,746	0,910	24,89	75,11	0,44
S 360 T1	0,924	4,705	3,749	2,825	0,956	25,28	74,72	-1,12
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
M 000 T1	0,919	4,575	3,653	2,734	0,922	25,22	74,78	-0,87
M 060 T1	0,931	4,607	3,668	2,737	0,939	25,54	74,46	-2,13
M 120 T1	0,914	4,581	3,679	2,765	0,902	24,60	75,40	1,64
M 180 T1	0,931	4,521	3,649	2,718	0,872	24,29	75,71	2,92
M 240 T1	0,907	4,528	3,639	2,732	0,889	24,55	75,45	1,83
M 300 T1	0,928	4,548	3,659	2,731	0,889	24,56	75,44	1,80
M 360 T1	0,935	4,618	3,687	2,752	0,931	25,28	74,72	-1,10
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
I 000 T1	0,931	5,097	4,061	3,130	1,036	24,87	75,13	0,53
I 060 T1	0,938	5,069	4,030	3,092	1,039	25,15	74,85	-0,60
I 120 T1	0,939	5,000	3,998	3,059	1,002	24,67	75,33	1,32
I 180 T1	0,926	4,952	3,962	3,036	0,990	24,59	75,41	1,67
I 240 T1	0,928	4,965	3,984	3,056	0,981	24,30	75,70	2,88
I 300 T1	0,934	5,013	3,985	3,051	1,028	25,20	74,80	-0,80
I 360 T1	0,930	5,043	4,002	3,072	1,041	25,31	74,69	-1,22

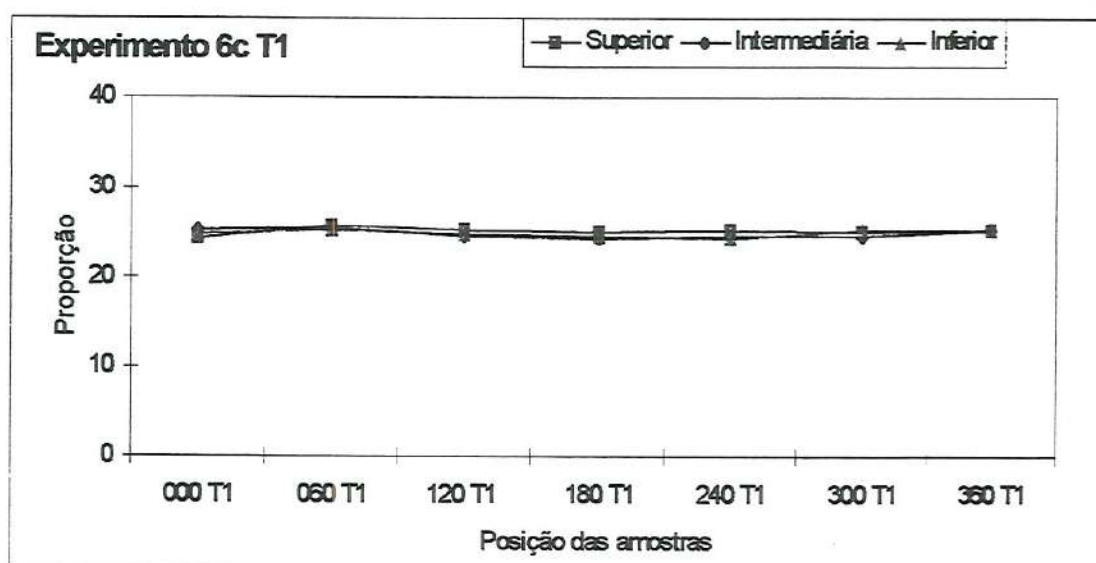


Figura C.21 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1c.



Tabela C.22 – Ensaio com velocidade de fluidização  $2,0 U_{MF}$ , areia  $450\mu\text{m}$  e traçador  $450\mu\text{m}$ .

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
S 000 T2	0,932	4,692	3,781	2,849	0,911	24,23	75,77	3,18
S 060 T2	0,933	4,655	3,738	2,805	0,917	24,64	75,36	1,47
S 120 T2	0,919	4,831	3,873	2,954	0,958	24,49	75,51	2,09
S 180 T2	0,937	4,439	3,589	2,652	0,850	24,27	75,73	3,00
S 240 T2	0,933	4,524	3,637	2,704	0,887	24,70	75,30	1,21
S 300 T2	0,898	4,432	3,566	2,668	0,866	24,50	75,50	2,02
S 360 T2	0,912	4,578	3,665	2,753	0,913	24,90	75,10	0,38
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
M 000 T2	0,933	4,600	3,681	2,748	0,919	25,06	74,94	-0,24
M 060 T2	0,936	4,611	3,705	2,769	0,906	24,65	75,35	1,41
M 120 T2	0,935	4,895	3,930	2,995	0,965	24,37	75,63	2,59
M 180 T2	0,921	4,453	3,566	2,645	0,887	25,11	74,89	-0,45
M 240 T2	0,955	4,533	3,656	2,701	0,877	24,51	75,49	2,00
M 300 T2	0,922	4,203	3,418	2,496	0,785	23,93	76,07	4,49
M 360 T2	0,929	4,700	3,783	2,854	0,917	24,32	75,68	2,81
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
I 000 T2	0,930	5,112	4,084	3,154	1,028	24,58	75,42	1,70
I 060 T2	0,932	5,055	4,044	3,112	1,011	24,52	75,48	1,95
I 120 T2	0,924	5,428	4,307	3,383	1,121	24,89	75,11	0,45
I 180 T2	0,934	4,988	3,975	3,041	1,013	24,99	75,01	0,05
I 240 T2	0,926	4,978	3,984	3,058	0,994	24,53	75,47	1,91
I 300 T2	0,936	4,904	3,952	3,016	0,952	23,99	76,01	4,20
I 360 T2	0,923	5,119	4,071	3,148	1,048	24,98	75,02	0,10

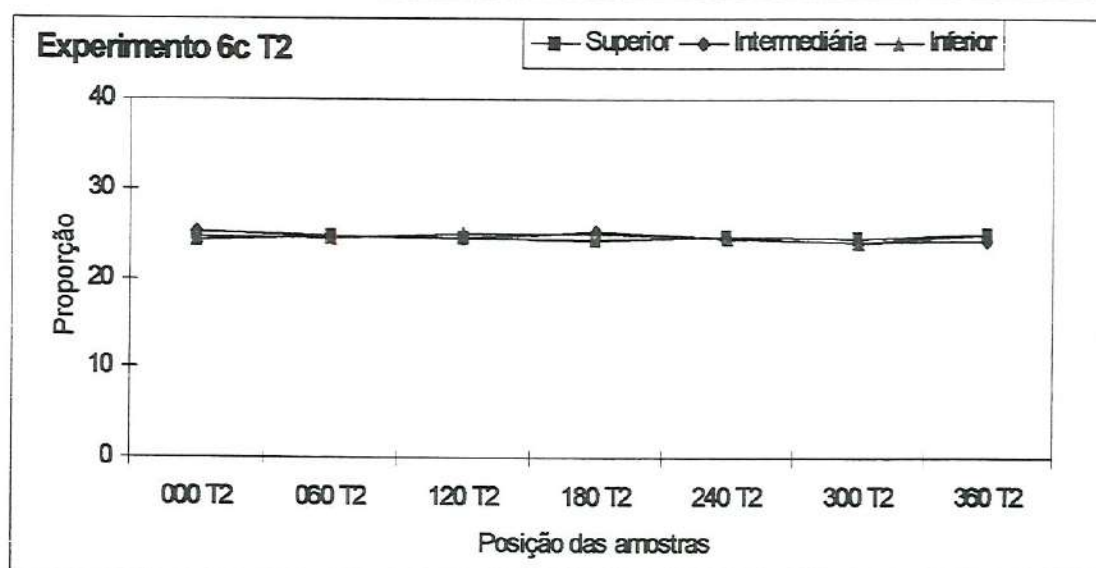


Figura C.22 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1c.

Tabela C.23 – Ensaio com velocidade de fluidização 2,0  $U_{MF}$ , areia 450 $\mu$ m e traçador 450 $\mu$ m.

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
S 000 T3	0,973	4,676	3,752	2,779	0,924	24,95	75,05	0,19
S 060 T3	0,973	4,577	3,696	2,723	0,881	24,45	75,55	2,27
S 120 T3	0,979	4,784	3,853	2,874	0,931	24,47	75,53	2,18
S 180 T3	0,959	4,623	3,713	2,754	0,910	24,84	75,16	0,66
S 240 T3	0,983	4,406	3,587	2,604	0,819	23,93	76,07	4,49
S 300 T3	0,957	4,655	3,742	2,785	0,913	24,69	75,31	1,26
S 360 T3	0,977	4,756	3,820	2,843	0,936	24,77	75,23	0,93
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
M 000 T3	0,960	4,658	3,749	2,789	0,909	24,58	75,42	1,71
M 060 T3	0,981	4,513	3,639	2,658	0,874	24,75	75,25	1,03
M 120 T3	0,957	4,694	3,785	2,828	0,909	24,32	75,68	2,78
M 180 T3	0,974	4,630	3,737	2,763	0,893	24,43	75,57	2,35
M 240 T3	0,977	4,543	3,683	2,706	0,860	24,12	75,88	3,66
M 300 T3	0,966	4,677	3,772	2,806	0,905	24,39	75,61	2,51
M 360 T3	0,982	4,728	3,811	2,829	0,917	24,48	75,52	2,13
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
I 000 T3	0,962	5,185	4,145	3,183	1,040	24,63	75,37	1,51
I 060 T3	0,966	5,012	4,020	3,054	0,992	24,52	75,48	1,97
I 120 T3	0,971	5,100	4,092	3,121	1,008	24,41	75,59	2,41
I 180 T3	0,965	5,096	4,082	3,117	1,014	24,55	75,45	1,85
I 240 T3	0,990	5,081	4,087	3,097	0,994	24,30	75,70	2,89
I 300 T3	0,962	5,095	4,071	3,109	1,024	24,78	75,22	0,90
I 360 T3	0,986	5,174	4,136	3,150	1,038	24,79	75,21	0,87

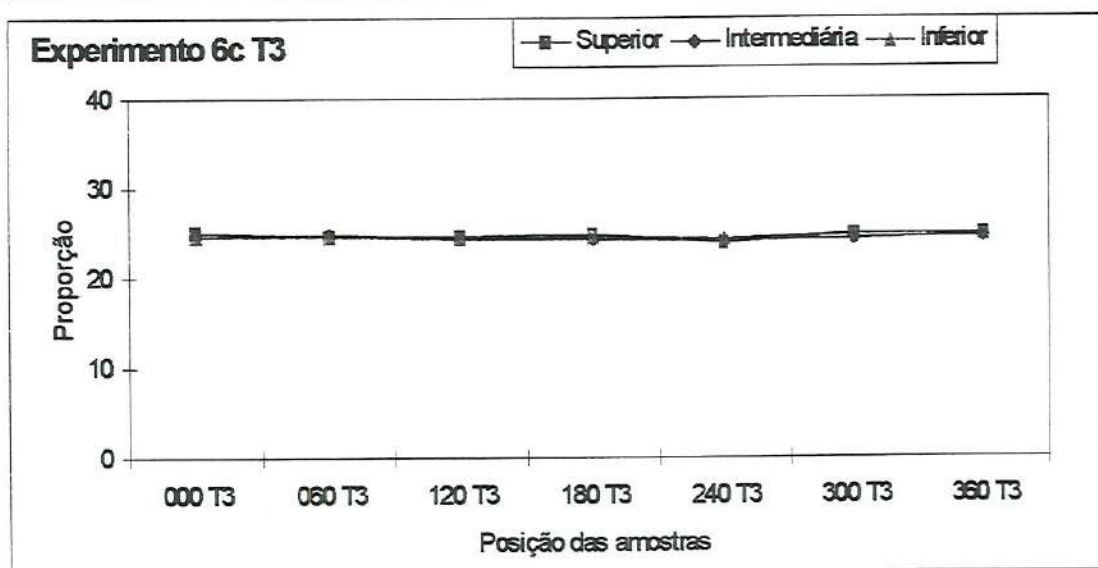


Figura C.23 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1c.



Tabela C.24 – Ensaio com velocidade de fluidização  $2,0 U_{MF}$ , areia  $450\mu\text{m}$  e traçador  $450\mu\text{m}$ .

Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
S 000 T4	0,966	5,017	4,009	3,043	1,008	24,88	75,12	0,47
S 060 T4	0,985	4,724	3,798	2,813	0,926	24,77	75,23	0,94
S 120 T4	0,958	4,489	3,622	2,664	0,867	24,55	75,45	1,82
S 180 T4	0,979	4,579	3,690	2,711	0,889	24,69	75,31	1,24
S 240 T4	0,970	4,544	3,694	2,724	0,850	23,78	76,22	5,12
S 300 T4	0,946	4,765	3,823	2,877	0,942	24,67	75,33	1,35
S 360 T4	0,943	4,771	3,847	2,904	0,924	24,14	75,86	3,57
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
M 000 T4	0,958	4,895	3,916	2,958	0,979	24,87	75,13	0,54
M 060 T4	0,977	4,704	3,816	2,839	0,888	23,83	76,17	4,93
M 120 T4	0,979	4,512	3,657	2,678	0,855	24,20	75,80	3,30
M 180 T4	0,957	4,571	3,689	2,732	0,882	24,41	75,59	2,44
M 240 T4	0,991	4,554	3,700	2,709	0,854	23,97	76,03	4,30
M 300 T4	0,956	4,683	3,774	2,818	0,909	24,39	75,61	2,50
M 360 T4	0,988	4,767	3,833	2,845	0,934	24,72	75,28	1,15
Posição	Wfi	Wtt	Wfa	Waa	Wsl	% sal	% areia	%Dif. Sal
I 000 T4	0,960	5,271	4,227	3,267	1,044	24,22	75,78	3,23
I 060 T4	0,982	5,128	4,111	3,129	1,017	24,53	75,47	1,92
I 120 T4	0,970	5,022	4,048	3,078	0,974	24,04	75,96	4,00
I 180 T4	0,981	5,017	4,039	3,058	0,978	24,23	75,77	3,17
I 240 T4	0,964	4,995	4,004	3,040	0,991	24,58	75,42	1,69
I 300 T4	0,973	5,155	4,141	3,168	1,014	24,25	75,75	3,11
I 360 T4	0,967	5,223	4,184	3,217	1,039	24,41	75,59	2,41

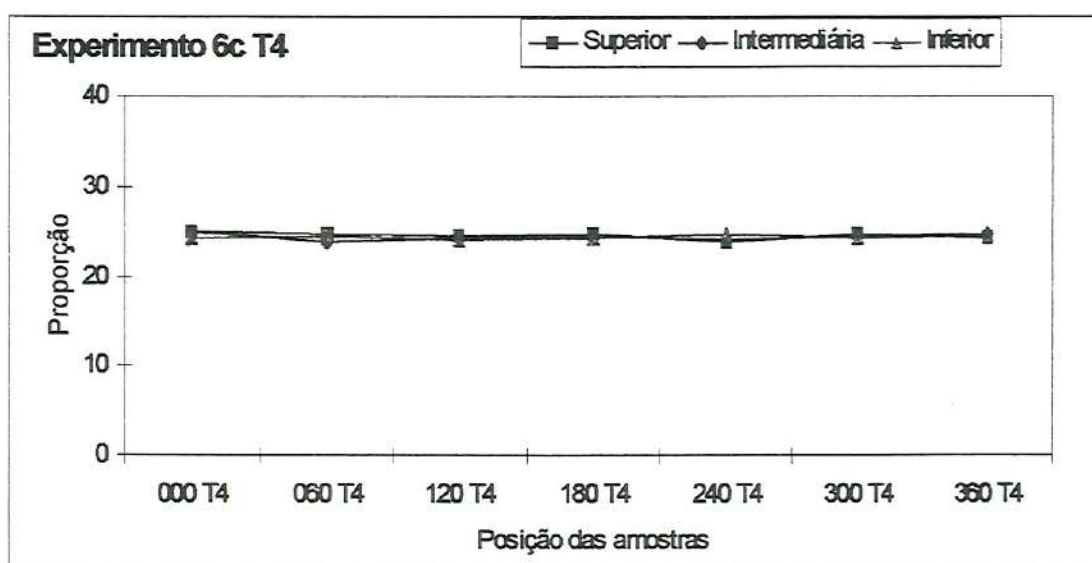


Figura C.24 – Variação das proporções do traçador nas posições – exp. 1c.

## BIBLIOGRAFIA

- ABDELRAHMAN, A. A.; ALY, I. H.; AKL, M. (1991). Effect of the geometry of revolving mixers on their performance. International Journal of Mineral Processing, v. 32, p. 319 – 328.
- ALZHRANI, A. A.; NORR WALI, M. M. (1993). A study of pressure drop in a gas-solids fluidized bed. Powder Technology, v. 76, p. 185 – 189.
- BARROS NETO, B; SCARMINIO, I.S. e BRUNS, R. E. Planejamento e otimização de experimentos. Campinas, Ed. Unicamp, 1995, Cap. 6, p. 187 – 215.
- BASESME, E. A.; LEVY, E. K. (1992). Solids exchange between the bubble wake and the emulsion phase in a two - dimensional gas - fluidized bed. Powder Technology. v. 72, p. 45 – 45.
- BEECKMANS, J. M.; STAHL, B. (1987). Mixing and segregation kinetics in a Strongly segregated gas-fluidized bed. Powder Technology. v. 53, p. 31 – 38.
- BÍN, A. K. (1994). Prediction of the minimum fluidization velocity. Powder Technology. v. 81, p. 197 – 199.
- BILBAO, R. et al. (1988). Model of mixing – segregation for straw / sand mixtures in fluidized-beds. Powder Technology. v. 56, p. 149 – 155.
- BLUMBERG, R.; MARITZ, J. S. (1953). Mixing of solid particles. Chemical Engineering Science. v. 2, p. 240 – 246.
- CARLEY - MACAULY, K. W.; DONALD, M. B. (1962). The mixing of solids in tumbling mixers – I. Chemical Engineering Science. v. 17, p. 493 – 506.



- CHESONIS, D. C. et al. (1990). Hidrodinamics and mixing of solids in a recirculating fluidized bed. Ind. Eng. Chem. Res. v. 29. p. 1785 – 1792.
- CHOI, J. H.; SON, J. E.; KIM, S. D. (1988). Bubble size and frequency in gas fluidized beds. Journal of Chemical Engineering of Japan. v. 21, p. 171 – 178.
- CLUMP, C. W. (1967). Mixing of solids. In: UHL, V. M.; GRAY J. B.. Mixing, theory and practice, vol. 2. New York, Academic Press. Cap. 10, p. 263 – 286.
- COSTA NETO, P. L. O. Estatística. São Paulo, Ed. Edgard Blücher, 1977, 2<sup>a</sup> ed. Cap. 3, p. 39 – 58.
- DA SILVA, M. B. Termodinâmica. São Paulo, Ed. Edgard Blücher, 1972. Vol. 2, cap. 7. p. 55 – 131.
- DANCKWERTS, P. V. (1952). The definition and measurement of some characteristics of mixtures. Applied Scientific Research. v. 3, p. 279 – 296.
- DANCKWERTS, P. V. (1953). Theory of mixtures and mixing. Research: Science and its application in industry. v.6, n.9, p. 355 – 361.
- DELEBARRE, A. B.; PAVINATO, A.; LEROY, J. C. (1994). Fluidization and mixing of solids distributed in size and density. Powder Technology. v. 80, p. 227 – 233.
- DELMÉE, G. J. Manual de medição de vazão. São Paulo, Ed. Edgard Blücher, 1983. Cap. III, p. 207 – 217 e p. 284 – 292.

- FAN, L. T.; CHEN, J. S.; WATSON, C. A. (1970). Solids mixing. Industrial and Engineering Chemistry. v. 62, n. 7, p. 53 – 69.
- FAN, L. T.; CHEN, Y. M. (1990). Recent developments in solids mixing. Powder Technology. v. 61, p. 255 – 287.
- FOX, R. W.; McDONALD, A. T. Introdução à mecânica dos fluidos. Rio de Janeiro, Ed. Guanabara Dois, 2<sup>a</sup> ed., 1981.
- FUNG, A. S.; HAMDULLAHPUR, F. (1993). Effect of bubble coalescence on Entrainment in gas fluidized beds. Powder Technology. v. 77, p. 251 – 265.
- GARCIA - OCHOA, F. et al. (1989). A study of segregation in a gas-solid fluidized bed: particles of different density. Powder Technology. v. 58, p. 169 – 174.
- GARCIA - OCHOA, F.; ROMERO, A.; VILLAR, J. C. (1993). Segregation in gas – fluidized beds; mixing index for solids of type D. International Chemical Engineering. v. 33, n. 3, p. 456 – 459.
- GELDART, D. Gas fluidization technology. Chichester, John Wiley & Sons, 1986. p.
- GIBILARO, L. G.; ROWE, P. N. (1974). A model for a segregating gas fluidised bed. Chemical Engineering Science. v. 29, p. 1403 – 1412.
- GLICKSMAN, L. R.; HYRE, M.; WOLOSHUN, K. (1993). Simplified scaling relationships for fluidized beds. Powder Technology. v. 77, p. 177 – 199.
- GOURDON, J. L.; CHARONNAT, Y.; ROBIN, P. (1988). Évaluation par échantillonnage des procédés de mélange de grains. Bulletin Liaison



Laboratoire des Ponts et Chaussées. v. 153, p. 117 – 121.

HAILU, L.; DAVIDSON, J. F. (1993). Measurement of the distribution of fines in a batch fluidized bed by a direct sampling technique. Chemical Engineering Science. v. 48, n. 7, p. 1265 – 1272.

HARNBY, N. Characterization of powder mixtures. In: HARNBY, N.; EDWARDS, M. F.; NIENOW, A. W. *Mixing in the process industries*. London, Butterworths, 1985. Cap. 2, p. 23 – 38.

HARNBY, N. The selection of powder mixers. In: HARNBY, N.; EDWARDS, M. F.; NIENOW, A. W. *Mixing in the process industries*. London, Butterworths, 1985. Cap. 3, p. 39 – 53.

HO, T. C.; KIRKPATRICK, M.; HOPPER, J. R. (1989). Mixing and combustion in a shallow coal-limestone fluidized bed combustor. The Canadian Journal of Chemical Engineering. v. 67, p. 207 – 217.

HOFFMANN, A. C.; ROMP, E. J. (1991). Segregation in a fluidized powder of a continuous size distribution. Powder Technology. v. 66, p. 119 – 126.

HOFFMANN, A. C.; JANSSEN, L. P. B. M.; PRINS, J. (1993). Particle segregation in fluidized binary mixtures. Chemical Engineering Science. v. 48, n. 9, p. 1583 – 1592.

HOWARD, J. R. *Fluidized bed technology*. Bristol, Adam Hilger, 1989. Cap. 1 e 2, p. 1 – 69.

ISMAIL, K. A. R.; GONÇALVES, M. M. e BENEVENUTO, F. J. *Instrumentação básica para engenharia*. Campinas, Ed. do autor, 1997. Parte II, cap. 3 p. 145 - 171.

- JOHNSON, M. C. R. (1975). The effect of particle size upon mixture homogeneity. Pharm. Acta Helv.. v. 50, n. 3, p.60 – 63.
- KAGE, H. et al. (1991). Bubble behavior in bubbling fluidized beds of binary particles. Journal of chemical Engineering of Japan. v. 24, n. 4, p. 525 – 531.
- KHATTAB, I. A.; KURODA, C.; ISHIDA, M. (1988). Radial and vertical distributions of the interstitial gas velocity in a fluidized bed. Journal of Chemical Engineering of Japan. v. 21, n. 3, p. 282 – 287.
- KRISTENSEN, H. G. (1973). Statistical properties of random and non-random mixtures of dry solids. Part I. A general expression for the variance of the composition of samples. Powder Technology. v. 7, p. 249 – 257.
- KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. Fluidization engineering. Boston, Butterworth – Heinemann, 1991, 2<sup>a</sup> ed. Cap. 1, 3, 5 e 6.
- KWANT, G.; PRINS, W.; VAN SWAAIJ, W. P. M. (1995). Particle mixing and separation in a binary solids floating fluidized bed. Powder Technology. v. 82, p. 279 – 291.
- LAI, F. S.; FAN, L. T. (1975). Application of a discrete mixing model to the study of mixing of multicomponent solid particles. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.. v. 14, n. 4, p. 403 – 410.
- LEE, G. S.; KIM, S. D. (1990). Axial mixing of solids in turbulent fluidized beds. The Chemical Engineering Journal. v. 44, p. 1 – 9.
- LEE, G. S.; KIM, S. D. (1991). Axial mixing of fine particles in fluidized beds. The Chemical Engineering Journal. v. 47, p. 47 – 50.



- LIPPENS, C. B.; MULDER, J. (1993). Prediction of the minimum fluidization velocity. Powder Technology. v. 75, p. 67 – 78.
- LOSNAK, C. Projeto, construção e ensaio de um misturador rápido de corpo fixo para pós. Botucatu, 1995. 157 p. Tese (doutorado). Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.
- McCABE, W. L.; SMITH, J. C. ( 1967). Units operations of chemical engineering. McGraw-Hill Book Company, Kogakusha Company, Tóquio, Japan. Cap. 25, p. 793 – 864.
- MASSARANI, G. Alguns aspectos da separação sólido fluido. In: FREIRE, J. T.; GUBULIN, J. C. eds. Tópicos especiais de sistemas particulados. São Carlos, UFSCar, 1986. v. 2, cap. I, p. 2 –20.
- MORT, P. R.; RIMAN, R. E. (1995). Determination of homogeneity scale in ordered and partially ordered mixtures. Powder Technology. v. 82, p. 93 – 104.
- MOURAD, M.; HEMATI, M. LAGUERIE, C. (1994). Hydrodynamique d'un séchoir à lit fluidisé à flottation: Détermination des vitesses caractéristiques de fluidisation de mélanges de maïs et de sable. Powder Technology. v. 80, p. 45 – 54.
- MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F. and OKIISHI, T. H. Fundamentos da mecânica dos fluidos. São Paulo, Ed. Edgard Blücher, 1997. Vol. 2, cap. 11, p. 638 – 711.
- NAIMER, N. S.; CHIBA, T.; NIENOW, A. W. (1982). Parameter estimation for a solids mixing/segregation model for gas fluidized beds. Chemical Engineering Science. v. 37, n. 7, p. 1047 – 1057.

- NEVILLE, A. M.; KENNEDY, J. B. Basic statistical methods for engineers and scientists. Scanton, Pennsylvania, International Textbook Company, 1964. p.
- NIENOW, A. W.; EDWARDS, M. F.; HARNBY, N. Introduction to mixing problems. In: HARNBY, N.; EDWARDS, M. F.; NIENOW, A. W. Mixing in the process industries. London, Butterworths, 1985. Cap. 1, p. 1 – 22.
- ORR, N. A.; SHOTTON, E. (1973). The mixing of cohesive powders. The Chemical Engineer. January.
- OKADA, A. Influências da geometria e da rotação do rotor sobre o desempenho de um misturador helicoidal. Botucatu, 1997. 116 p. Tese (doutorado). Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.
- PEELER, J. P. K.; HUANG, J. R. (1989). Segregation of wide size range particle mixtures in fluidized beds. Chemical Engineering Science. v. 44, n. 5, p. 1113 – 1119.
- POPPELWELL, L. M. et al. (1989). Theoretical comparison of two segregation indices for binary powder mixtures. Powder Technology. v. 58, p. 55 – 61.
- POUX, M. et al. (1991). Powder mixing: some practical rules applied to agitated systems. Powder Technology. v. 68, p. 213 – 234.
- RAMAN, P. et al. (1981). Mathematical model for the fluid-bed gasification of biomass materials. Application to feedlot manure. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. v. 20, p. 686 – 692.



- RICE, R. W.; BRAINOVICH, J. F. (1986). Mixing/segregation in two- and three-dimensional fluidized beds: Binary systems of equidensity spherical particles. American Institute of Chemical Engineerings Journal. v. 32, n. 1, p. 7 – 16.
- RINCÓN, J. et al. (1994). Predicting the minimum fluidization velocity of multicomponent systems. Journal of Chemical Engineering of Japan. v. 27, n. 2, p. 177 – 181.
- SCHOFIELD, C. (1976). The definition and assessment of mixture quality in mixtures of particulate solids. Powder Technology. v. 15, 169 – 180.
- SHEN, L.; ZHANG, M.; XU, Y. (1995). Solids mixing in fluidized beds. Powder Technology. v. 85, p. 207 – 212.
- SHIAU, C. Y.; LIN, C. J. (1993). An improved bubble assemblage model for fluidized-bed catalytic reactors. Chemical Engineering Science. v. 48, n. 7, p. 1299 – 1308.
- TALMOR, E.; BENENATI, R. F. (1963). Solids mixing and circulation in gas fluidized beds. American Institute of Chemical Engineerings Journal. v. 9, n. 4, p. 536 – 540.
- TANIMOTO, H. et al. (1981). Jetsam descent induced by a single bubble passage in three-dimensional gas-fluidized beds. Journal of Chemical Engineering of Japan. v. 14, n. 4, p. 273 – 276.
- THIEL, W. J.; STEPHENSON, P. L. (1982). Assesing the homogeneity of a ordered mixture. Powder Technology. v. 31, p. 45 – 50.

- VIOTTO, L. A.; MENEGALLI, F. C. Secagem de borra de café em leito fluidizado. In: XVII Encontro sobre escoamento em meios porosos. Anais, vol 2. São Carlos, UFSCar, 1989. p. 313 – 325.
- WANG, R. H.; FAN, L. T. (1977). Stochastic modeling of segregation in a motionless mixer. Chemical Engineering Science. v. 32, p. 695 – 701.
- WEIMER, A. W.; CLOUGH, D. E. (1981). Modeling a low pressure steam-oxygen fluidized bed coal gasifying reactor. Chemical Engineering Science. v. 36, p. 549 – 567.
- YANG, J. S.; LIU, Y. A.; SQUIRES, A. M. (1987). Pressure drop across shallow fluidized beds: theory and experiment. Powder Technology. v. 53, p. 79 – 89.