



**Universidade Federal de Uberlândia**  
**Faculdade de Engenharia Química**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**



**ESTUDOS FLUIDODINÂMICOS E DE SECAGEM DE  
FERTILIZANTES EM DIFERENTES TIPOS DE SECADORES  
ROTATÓRIOS**

Beatriz Cristina Silvério

**Uberlândia - MG - Brasil**

**2012**





**Universidade Federal de Uberlândia**

**Faculdade de Engenharia Química**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**



**ESTUDOS FLUIDODINÂMICOS E DE SECAGEM DE  
FERTILIZANTES EM DIFERENTES TIPOS DE SECADORES  
ROTATÓRIOS**

Beatriz Cristina Silvério

Orientadores:

Prof. . Dr. Marcos A. de Souza Barrozo

Prof. Dr. Cláudio Roberto Duarte

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química

**Uberlândia - MG - Brasil**

**2012**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

S587e     Silvério, Beatriz Cristina, 1985-  
Estudos fluidodinâmicos e de secagem de fertilizantes em diferentes tipos de secadores rotatórios / Beatriz Cristina Silvério. - 2012.  
164 f. : il.

Orientadores: Marcos A. de Souza Barrozo e Cláudio Roberto Duarte.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

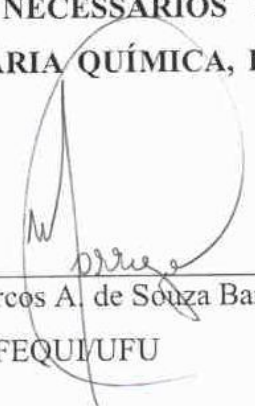
Inclui bibliografia.

1. Engenharia química - Teses. 2. Secagem - Teses. 3. Fertilizantes - Teses. I. Barrozo, Marcos Antonio de Souza. II. Duarte, Cláudio Roberto. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV. Título.

---


CDU: 66.0

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE  
UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA  
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 20  
DE DEZEMBRO DE 2012.




---

Prof. Dr. Marcos A. de Souza Barrozo  
FEQUI/UFU




---

Prof. Dr. Cláudio Roberto Duarte  
FEQUI/UFU



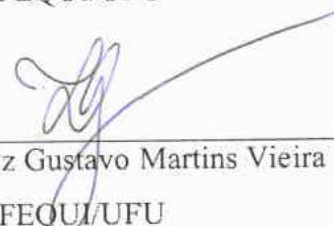
---

Prof. Dr. Edu Barbosa Arruda  
FACIP/UFU



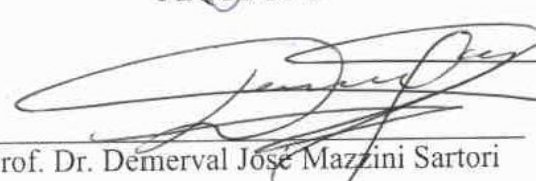
---

Dra. Kássia Graciele dos Santos  
FEQUI/UFU




---

Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira  
FEQUI/UFU



---

Prof. Dr. Demerval José Mazzini Sartori  
DEQ/UFSCar



---

Prof. Dr. Carlos Alberto Severo Felipe  
IFRS/Campus Rio Grande



## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo sublime milagre da salvação, pela obra que começou a fazer em minha vida, pelo amigo e consolador que é trazendo força nos momentos mais difíceis; pelo amor, sabedoria e pela fé concedidos a mim para que me fosse possível a realização de todo trabalho acadêmico.

À minha mãe Marta R. G. Silvério, pelo imensurável amor, dedicação e companheirismo, por acreditar e investir na minha formação sem medir esforços, trabalhando, renunciando conforto e descanso para garantir o melhor para as filhas. Ao meu pai Geraldo E. Silvério, pelas orações e palavras de incentivo e também pelo exemplo de vida e de caráter e testemunho de fé. À minha querida avó Maria A. de Jesus, pelo amor, pelos conselhos e carinho oferecidos a mim. À minha irmã Cíntia C. Silvério Santos e ao meu cunhado Israel R. O. Santos por todo amor e apoio dedicados.

Ao meu esposo Carlos de Souza pelo amor e compreensão e por acreditar nos meus sonhos, e à sua mãe, pela amizade, pelas orações, e por toda ajuda oferecida.

Agradeço também ao meu orientador Marcos Antonio de Souza Barrozo, pelo carinho, pela paciência, pela disposição em me atender e me ouvir, pela preocupação com o meu futuro profissional e por ser um instrumento de Deus em minha vida. Ao meu orientador Claudio Roberto Duarte, pelas sugestões, pelas colaborações, pelo tempo e preocupação oferecidos a mim.

Ao amigo e colega, e Professor Edu Barbosa Arruda, pela colaboração oferecida durante todo este trabalho.

A todos os alunos de iniciação científica que muito colaboraram na execução deste trabalho, Clarissa C. Hamaguchi, Dyovani B. L. dos Santos, Isabela Araújo Resende, Rafael Turchi, Pedro L. Silva Sá, Camila Zanetoni Martins e Danúbia L. M. Gontijo, pelo esforço e comprometimento empenhados ao longo dessa etapa.

A colaboradora Kássia Graciele dos Santos pela amizade, pelo esforço e paciência em me ajudar e ensinar e aos meus colegas de laboratório da pós-graduação e da graduação.

À Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia e aos técnicos, Silvino Joaquim Corrêa, Maria Cecília Marques Ribeiro e Paulo Sergio Martins pelo apoio técnico dedicado durante este trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro investido para a execução desse trabalho.





## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>i</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>v</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>vii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xv</b>
<b>CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>7</b>
2.1 – Fertilizante e a agricultura .....	7
2.2 - Produção de fertilizantes no Brasil.....	8
2.3 - Processo de secagem .....	10
2.4 - Diferentes configurações de secadores rotativos .....	10
2.5 - O secador rotatório .....	13
2.6 - Carga de sólidos nos secadores rotatórios.....	16
2.7- Outros estudos de fluidodinâmica do secador rotatório .....	21
2.8 - Transporte e tempo de residência.....	25
2.9 - Transferência de calor em secadores rotatórios .....	29
2.10 - Umidade de equilíbrio.....	32
2.11 - Cinética de secagem .....	34
2.12 – Simulação computacional de sistemas .....	36
<b>CAPITULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>45</b>
3.1 - Materiais.....	45
3.2 - Cinética de secagem .....	46
3.3 - Secador rotatório .....	47
3.4 – Metodologia experimental para avaliação das diferentes configurações de secadores rotoaerados .....	50
3.5 - Procedimento experimental dos ensaios de secagem.....	55
3.6 – Metodologia da simulação em CFD para o secador rotoaerado.....	57
3.6.1-Modelagem.....	57
3.6.2-Malha computacional.....	58
3.6.3-Procedimento de solução numérica.....	58
3.6.4-Pós processamento .....	59

3.7-Avaliação de parâmetros do Método de Elementos Discretos (DEM) aplicado a tambores rotativos convencionais .....	60
3.7.1- Modelo para fase discreta (DEM) .....	60
3.7.2-Procedimento de solução numérica.....	64
3.7.3-Obtenção do ângulo dinâmico de repouso do fertilizante em tambor rotativo de bancada.....	65
3.7.4- Escoamento de partículas no secador rotativo com suspensores .....	67
<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS.....</b>	<b>71</b>
4.1 - Cinética de secagem. ....	71
4.2 - Comparações dos secadores rotoaerados .....	72
4.3 – Resultados de simulação em CFD da distribuição do ar na saída dos Minitubos nos secadores rotoaerados .....	87
4.4 – Resultados de simulação em CFD utilizando o modelo para fase discreta DEM .....	97
<b>CAPITULO 5 - CONCLUSÕES .....</b>	<b>113</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>117</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>125</b>
Resultados experimentais do secador rotatório convencional contracorrente ARRUDA (2008).....	125
<b>ANEXO B.....</b>	<b>129</b>
Resultados experimentais do secador rotatório convencional concorrente .....	129
SILVÉRIO (2010) .....	129
<b>ANEXO C.....</b>	<b>133</b>
Resultados experimentais do secador rotoaerado RT-03 .....	133
ARRUDA (2008).....	133
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>137</b>
Fotografias de algumas configurações de secadores rotoaerados contidas na Tabela 3.2 .....	137
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>141</b>
Resultados experimentais dos secadores rotoaerados operando em iguais condições experimentais.....	141
<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>145</b>
Resultados experimentais do secador rotoaerado RT-04, .....	145
<b>APÊNDICE D .....</b>	<b>149</b>

Resultados experimentais do secador rotoaerado RT-09, .....	149
<b>APÊNDICE E.....</b>	<b>153</b>
Resultados experimentais do secador rotoaerado RT-17, .....	153
<b>APÊNDICE F.....</b>	<b>157</b>
Resultados experimentais dos secador rotoaerado RT-04, RT-09, RT-17 e convencional contracorrente com maiores condições de carga de sólidos.....	157
<b>APÊNDICE G .....</b>	<b>161</b>
Resultados de simulação em CFD das velocidades de saída do ar nos minitubos nas diferentes configurações estudadas .....	161



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Secador rotativo Rotolouvre (MYERS E BALDWIN, 1999).....	11
Figura 2.2 - Secadores rotatórios em funcionamento: (a) versão rotoaerado e (b) versão convencional ARRUDA (2008);.....	12
Figura 2.3 - Esquema de um secador rotatório com cascadeamento (PERRY e GREEN,1999). ....	13
Figura 2.4 - Esquema da seção transversal do secador rotatório de contato direto com cascadeamento (REVOL, 2001). ....	14
Figura 2.5 - Tipos de suspensores mais comuns em secadores rotatórios.....	16
(FERNANDES, 2008). ....	16
Figura 2.6 - Esquema ilustrando a posição angular ( $\theta_i$ ), da linha com origem no centro do tambor até a ponta do suspensor. ....	18
Figura 2.7 - Esquema ilustrando o conjunto de coordenadas estacionário (X,Y), com origem no eixo do tambor, e o móvel (x,y), com origem na ponta do suspensor, (ARRUDA, 2008). ....	20
Figura 2.8 - Fotografias das medidas do ângulo dinâmico de repouso, com suspensores de 2 segmentos (a) e 3 segmentos (b) utilizadas por ARRUDA (2008). ....	22
Figura 2.9 - Esquema do suspensor em 0° de rotação (VAN PUYVELD, 2009). ....	23
Figura 3.1 - Esquema da unidade experimental utilizada para medidas de secagem em camada fina. ....	46
Figura 3.2 – Esquema da unidade experimental. ....	47
Figura 3.3 – Fotografia da unidade piloto experimental. ....	48
Figura 3.4 – Esquema das dimensões do secador rotoaerado. ....	49
Figura 3.5 – Foto interna do secador rotoaerado. ....	49
Figura 3.6 – Esquema da disposição do minitubos no secador rotoaerado. ....	49
Figura 3.7 – Esquema da disposição do minitubos nos tubos centrais do secador rotoaerado. ....	50
Figura 3.8 – Disposição de minitubos nos tubos centrais do secador rotoaerado: (a) disposição com 42 minitubos, (b) disposição com 56 minitubos e (c) disposição com 83 minitubos. ....	51
Figura 3.9 - Exemplo de malha do secador rotoaerado. ....	58

Figura 3.10 – Esquema da disposição do minitubos no tubo central do secador rotoaerado (ARRUDA, 2008).....	59
Figura 3.11 -Esquema do modelo de forças de contato ( <i>spring-dashpot model</i> ) ANSYS FLEUNT®14.0.....	62
Figura 3.10 - Unidade experimental com tambor rotativo de acrílico.....	65
Figura 3.11 - Fertilizante introduzido no início de cada experimento.....	67
Figura 4.1 - Resultados de cinética de secagem deste estudo juntamente com os obtidos por ARRUDA (2008), [ $T_{ar}=80^{\circ}\text{C}$ e $v_{ar} = 3,0 \text{ m/s}$ ].....	72
Figura 4.2 – Resultados de tempo médio de residência para as diferentes configurações do secador rotoaerado da Tabela 4.1.....	74
Figura 4.3 – Resultados de água removida na secagem de fertilizantes para as configurações da Tabela 4.1. ....	76
Figura 4.4 – Resultados de taxa de secagem para as configurações da Tabela 4.1....	76
Figura 4.5 – Resultados de tempo médio de residência nas diferentes condições experimentais do PCC. ....	79
Figura 4.6 – Água removida nas diferentes condições experimentais do PCC.....	80
Figura 4.7 – Resultados de taxa de secagem nas diferentes condições experimentais. ....	81
Figura 4.8 – Resultados do acréscimo na temperatura das partículas sólidas nas diferentes condições experimentais. ....	82
Figura 4.9 – Tempo de residência nas condições de maiores vazões de alimentação de sólidos. ....	84
Figura 4.10 – Resultados da taxa de secagem nas condições com maiores vazões de alimentação de sólidos.....	85
Figura 4.11 – Resultados da carga de sólidos no tambor ( <i>holdup</i> ) nas condições com maiores vazões de alimentação de sólidos. ....	86
Figura 4.12 – Resultados da perda de carga nas configurações rotoaeradas. ....	87
Figura 4.13 - Resultados experimentais e da simulação para razão das vazões de saída e entrada da configuração com minitubos de 20 mm de diâmetro (RT-01), (vazão de entrada de ar = $0,078 \text{ m}^3/\text{s}$ ). ....	88
Figura 4.14 - Resultados experimentais e da simulação para razão das vazões de saída e entrada da configuração com minitubos de 9 mm de diâmetro (RT-03), (vazão de entrada de ar = $0,078 \text{ m}^3/\text{s}$ ). ....	88

Figura 4.15 - Simulação em CFD das velocidades de saída do ar nos minitubos nas diferentes configurações com velocidade do ar na entrada igual a 1,1 m/s.....	89
Figura 4.16 – Resultados da simulação em CFD das velocidades de saída do ar nos minitubos (para até 30 m/s) nas diferentes configurações com velocidade do ar na entrada igual a 1,1 m/s. ....	90
Figura 4.17 - Simulação em CFD das velocidades de saída do ar nos minitubos nas configurações não híbridas com velocidade do ar na entrada igual a 1,1 m/s....	91
Figura 4.18 - Simulação em CFD das velocidades de saída do ar nos minitubos nas configurações híbridas com velocidade do ar na entrada igual a 1,1 m/s. ....	92
Figura 4.19 - Simulação em CFD das velocidades de saída do ar nos minitubos nas diferentes configurações da Tabela 3.2 com velocidade do ar na entrada igual a 3,9 m/s. ....	92
Figura 4.20 – Resultados da simulação em CFD das velocidades de saída do ar nos minitubos (para até 30 m/s) nas diferentes configurações com velocidade do ar na entrada igual a 3,9 m/s. ....	93
Figura 4.22 - Simulação em CFD das velocidades de saída do ar nos minitubos nas configurações híbridas da Tabela 3.2 com velocidade do ar na entrada igual a 3,9 m/s. ....	94
Figura 4.23 - Velocidades de saída do ar nos minitubos obtidas por CFD para as configurações RT-03, RT-04, RT-09 e RT-17. ....	95
Figura 4.25 - Unidade experimental com tambor rotativo de acrílico.....	97
Figura 4.26 - Simulações DEM do tambor rotativo nas condições do PCC estudadas. ....	99
Figura 4.27 - Fotografias do secador rotativo convencional operando nas condições do experimento. ....	100
Figura 4.28 - Simulações DEM do secador convencional com suspensores nas posições angulares 0°, 60° e 120° nas condições do PCC estudadas. ....	101
Figura 4.29 - Simulações DEM do secador convencional com suspensores nas posições angulares 30° e 90° nas condições do PCC estudadas. ....	102
Figura 4.30 – Massa de fertilizantes ( $h^*$ ) nas posições angulares dos suspensores.	107
Figura 4.31 - Secador rotativo convencional com os suspensores nas posições 0°, 60° e 120°: (a) experimento e (b) imagem obtida da simulação 1 do PCC.....	107

Figura 4.32 - Secador rotativo convencional com os suspensores nas posições 30° e 90°: (a) experimento e (b) imagem obtida da simulação 1 do PCC.....	108
Figura 4.33 – Superfícies de resposta para valores fixos de $k$ na posição $\theta = 0^\circ$ .	110
Figura 4.34 – Superfícies de resposta para valores fixos do parâmetro $\mu_f$ em $\theta = 0^\circ$ . .....	110
Figura Apêndice A1 – Fotografias de das configurações RT-09, RT-12, RT-13, RT14 e RT-15 de secadores rotoaerados. ....	139
Figura Apêndice A2 – Fotografias das configurações RT-16, RT-17, RT-18 e RT-19 dos secadores rotoaerados híbridos. ....	140
Figura Apêndice G1- Simulação em CFD das velocidades de saída do ar nos minitubos nas diferentes configurações da Tabela 3.2 com velocidade do ar na entrada igual a 2,5 m/s.....	163



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Produção nacional de fertilizantes intermediários, (ANDA, 2012).....	9
Tabela 2.2 – Importação de fertilizantes intermediários, (ANDA 2012). ....	9
Tabela 2.3 - Equações semi-empíricas de secagem.....	35
Tabela 2.4 – Parâmetros utilizados nos modelos DEM em vários trabalhos da literatura. .....	41
Tabela 3.1 - Propriedades físicas do fertilizante SSPG. ....	45
Tabela 3.2 – Diferentes configurações de minitubos analisadas. ....	52
Tabela 3.3 - Planejamento experimental dos ensaios de secagem do fertilizante SSPG para comparação de desempenho dos secadores convencionais e rotoaerados..	54
Tabela 3.4 - Condições experimentais para os ensaios ..... de maiores condições de carga de sólidos. ....	54
Tabela 3.5- Planejamento composto central para avaliação dos parâmetros. ....	66
Tabela 3.6 – Condições adotadas nas simulações do tambor rotativo de acrílico.....	66
Tabela 3.7 – Condições adotadas nas simulações do secador rotatório convencional.	69
Tabela 4.1- Diferentes configurações de minitubos analisadas.....	73
Tabela 4.2 - Planejamento experimental dos ensaios de secagem do fertilizante SSPG para comparação de desempenho dos secadores convencionais e rotoaerados..	78
Tabela 4.3 - Resultados do ângulo dinâmico de repouso para as simulações do PCC.	98
Tabela 4.4 – Ângulos de repouso obtidos através das fotografias.....	103
Tabela 4.5 – Ângulos de repouso obtidos através das imagens das simulações. ....	104
Tabela 4.6 – Resultados experimentais da massa de fertilizantes em cada posição angular dos suspensores. ....	105
Tabela 4.7 – Resultados dos desvios das massas das simulações em relação as massas experimentais em cada posição angular ( $\theta$ ) dos suspensores. ....	106
Tabela 4.8 – Resultados da regressão múltipla para os parâmetros avaliados. ....	109
Tabela Anexo A1 - Resultados experimentais de secagem para o secador rotatório convencional contracorrente com 6 suspensores de 3 segmentos (2x0,7x0,7cm) operando com rotação $N_R = 3,6$ rpm e inclinação $\alpha = 3^\circ$ . ....	127

Tabela Anexo B1 - Resultados experimentais de secagem para o secador rotatório convencional concorrente com 6 suspensores de 3 segmentos (2x0,7x0,7cm) operando com rotação $N_R = 3,6$ rpm e inclinação $\alpha = 3^\circ$ .....	131
Tabela Anexo C1 - Resultados experimentais de secagem para o secador rotoaerado RT-03 ARRUDA (2008).....	135
Tabela Apêndice B1 - Resultados experimentais de secagem para as configurações de secador rotoaerado da Tabela 3.2. ....	143
Tabela Apêndice C1 - Resultados experimentais de secagem para o secador rotoaerado RT-04.....	147
Tabela Apêndice D1 - Resultados experimentais de secagem para o secador rotoaerado RT-09.....	151
Tabela Apêndice E1 - Resultados experimentais de secagem para o secador rotoaerado RT-17.....	155
Tabela Apêndice F1 - Resultados experimentais de secagem para os secadores rotoaerados RT-04, RT-09, RT-17 e convencional contracorrente. ....	159

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	– Relação entre a área efetiva de contato gás-partícula e o volume do secador.....	[-]
$a_1$	– Interceptação da linha traçada pelo primeiro segmento do suspensor.....	[m]
$a_2$	– Interceptação da linha traçada pelo segundo segmento do suspensor.....	[m]
$a_3$	– Interceptação da linha traçada pelo terceiro segmento do suspensor.....	[m]
$a_r$	– Ângulo estático de repouso do sólido.....	[rad]
$A$	– Área da seção transversal do secador rotatório.....	[m <sup>2</sup> ]
$A_{FM}$	– Parâmetro da Equação 2.67.....	[-]
$A_P$	– Área da parede do secador rotatório.....	[m <sup>2</sup> ]
$A_{ponta-W-PI}$	– Área dos triângulos formados entre os segmentos dos suspensores	[m <sup>2</sup> ]
$A_{sp}$	– Área superficial das partículas em queda dos suspensores.....	[m <sup>2</sup> ]
$A_W$	– Coeficiente definido na Equação 2.38.....	[-]
$b_1$	– Inclinação da linha traçada pelo primeiro segmento do suspensor	[m]
$b_2$	– Inclinação da linha traçada pelo segundo segmento do suspensor	[m]
$b_3$	– Inclinação da linha traçada pelo terceiro segmento do suspensor	[m]
$B_{FM}$	– Parâmetro da Equação 2.67.....	[-]
$B_W$	– Coeficiente definido na Equação 2.39.....	[m]
$C_W$	– Coeficiente definido na Equação 2.40.....	[m <sup>2</sup> ]
$a, b, c$	– Parâmetros das equações de umidade de equilíbrio - Tabela 2.2...	[-]
$A, B, C$	– Parâmetros das equações de secagem - Tabela 2.3.....	[-]
$C_p$	– Calor específico.....	[kJ kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> ]
$D$	– Diâmetro do secador.....	[m]
$D_0$	– Diâmetro da circunferência descrita pela ponta do suspensor.....	[m]
$D_{ef}$	– Difusividade efetiva.....	[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$d_p$	– Diâmetro da partícula.....	[m]
$f$	– Fator de atrito.....	[-]
$f_a$	– Fração de sólido em queda.....	[-]
$f(H^*)$	– Fator de cascata relacionado ao carregamento do secador.....	[-]

$f_{tef}$	– Fator de tempo efetivo de contato gás-partícula definido na Equação 2.106.....	[-]
$F_{ss}$	– Fração de sólidos nos suspensores.....	[%]
$F_{ST}$	– Fração volumétrica de sólidos no tambor: $100V_{ST}/V$ .....	[%]
$F_S$	– Fluxo mássico de sólidos por unidade de área do plano horizontal que passa pelo eixo do secador.....	[kgm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$g$	– Aceleração da gravidade.....	[m s <sup>-2</sup> ]
$G_f$	– Vazão mássica de ar de seco.....	[kg/s]
$G_S$	– Vazão mássica de sólido seco.....	[kg/s]
$G_{SU}$	– Vazão mássica de sólido úmido.....	[kg/s]
$h$	– Entalpia.....	[kJ kg <sup>-1</sup> ]
$h^*$	– Carga de sólido no suspensor.....	[kg ou kg/m]
$h'_f$	– Coeficiente pelicular de transferência de calor por convecção....	[J s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
$h_0^*$	– Quantidade de sólido no suspensor que se encontra na posição angular $\theta = 0$ rad.....	[kg ou kg/m]
$h_e$	– Carga efetiva do secador por unidade de comprimento do suspensor .....	[kg/m]
$H^*$	– Carga total de sólidos no secador.....	[kg]
$H_R$	– Relação entre a carga de projeto e a carga efetiva do secador.....	[-]
IC	– Intervalo de confiança.....	[%]
$j_D$	– Fator de transferência de massa.....	[-]
$j_H$	– Fator de transferência de calor.....	[-]
$K$	– Coeficiente de transferência de massa.....	[s <sup>-1</sup> ]
$K_F$	– Parâmetro das Equações 2.75 , 2.76 e 2.77 .....	[-]
$K_M$	– Constante de secagem Equação 2.95 a 2.98.....	[-]
$K_P$	– Parâmetro da Equação 3.19.....	[-]
$k'$	– Parâmetro da Equação 2.61.....	[-]
$l$	– Avanço na direção axial do secador realizado pelo sólido em cada ciclo de cascata.....	[m]
$L$	– Comprimento do secador.....	[m]
$L_1$	– Comprimento do primeiro segmento do suspensor angular.....	[m]
$L_2$	– Comprimento do segundo segmento do suspensor angular.....	[m]

$L_3$	– Comprimento do terceiro segmento do suspensor angular.....	[m]
$M$	– Umidade do sólido, massa de água por massa de sólido seco.....	[kg kg <sup>-1</sup> ]
$M_{eq}$	– Umidade de equilíbrio do sólido, massa de água por massa de sólido seco.....	[kg kg <sup>-1</sup> ]
$M_0$	– Umidade inicial do sólido, massa de água por massa de sólido seco.....	[kg kg <sup>-1</sup> ]
$MR$	– Adimensional de umidade definido na Tabela 2.3.....	[-]
$m'$	– Parâmetro da Equação 2.68.....	[s m <sup>-1</sup> ]
$m_F$	– Parâmetro da Equação 2.75.....	[-]
$m_p$	– Parâmetro da Equação 3.19.....	[-]
$n$	– Número de volumes de controle estabelecidos no secador.....	[-]
$N$	– Número de suspensores.....	[-]
$N_{Ci}$	– Número de ciclos de cascata realizados pela partícula ao atravessar o secador.....	[-]
$n_F$	– Parâmetro das Equações 2.75 .....	[-]
$N_R$	– Número de rotações do tambor por unidade de tempo.....	[rpm]
$Ponta$	– Ponto localizado na ponta ou extremidade do suspensor.....	[m]
$Pr$	– Número de Prandtl ( $Pr = \frac{\mu C_p}{k}$ ).....	[-]
$Q$	– Taxa de transferência de calor entre o gás e os sólidos.....	[kJ s <sup>-1</sup> ]
$Q_P$	– Calor perdido através da parede do casco.....	[kJ s <sup>-1</sup> ]
$R$	– Raio do secador.....	[m]
$R_D$	– Taxa de descarga de sólidos dos suspensores por unidade de comprimento .....	[kg m <sup>-1</sup> ]
$Re$	– Número de Reynolds ( $Re = \frac{Dv\rho}{\mu}$ ).....	[-]
$R_P$	– Raio da partícula.....	[m]
$R_W$	– Taxa de secagem do sólido.....	[s <sup>-1</sup> ]
$R_0$	– Raio da circunferência descrita pela ponta do suspensor.....	[m]
$S$	– Área transversal dos suspensores ocupada pelos sólidos.....	[m <sup>2</sup> ]
$S_b$	– Direção de busca.....	[-]
$T_{amb}$	– Temperatura ambiente.....	[°C]

$T$	– Tempo.....	[s]
$T_f$	– Temperatura do fluido.....	[°C]
$t_q$	– Tempo de queda das partículas numa da posição angular.....	[s]
$\bar{t}_q$	– Tempo médio de queda das partículas numa da posição angular.	[s]
$t_{qmáx}$	– Tempo de queda para o maior caminho percorrido pela partícula em queda, ou seja, para $Y = D$ .....	[s]
$t_r$	– Tempo de residência das partículas dentro de um volume de controle do secador ( $TR/n$ ).....	[s]
$T_S$	– Temperatura do sólido.....	[°C]
$U_{La}$	– Coeficiente de transferência de calor baseado no comprimento do secador.....	[kWm <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> ]
$U_P$	– Coeficiente de calor perdido.....	[kWm <sup>-2</sup> °C <sup>-1</sup> ]
$UR$	– Umidade relativa do ar.....	[-]
$U_{va}$	– Coeficiente global volumétrico de transferência de calor.....	[kWm <sup>-3</sup> °C <sup>-1</sup> ]
$v$	– Velocidade superficial do gás no secador.....	[m s <sup>-1</sup> ]
$V$	– Volume do secador.....	[m <sup>3</sup> ]
$v_{sól}$	– Velocidade de escoamento do sólido através do secador.....	[m s <sup>-1</sup> ]
$\bar{v}_q$	– Velocidade média de queda das partículas.....	[m s <sup>-1</sup> ]
$v_r$	– Velocidade relativa entre o gás e as partículas.....	[m s <sup>-1</sup> ]
$V_{ST}$	– Volume de sólidos no tambor.....	[m <sup>3</sup> ]
$W$	– Umidade absoluta do ar, massa de água por massa de ar seco.....	[kg kg <sup>-1</sup> ]
$W_0$	– Umidade absoluta inicial do ar, massa de água por massa de ar seco.....	[kg kg <sup>-1</sup> ]
$x$	– Posição axial no interior do secador rotatório.....	[m]
$X_0$	– Abscissa da ponta do suspensor no conjunto de coordenadas (X,Y) localizada no centro do tambor na Figura 2.6.....	[m]
$X_{A,B,C,W}$	– Abscissas dos pontos A, B,C e W do suspensor no conjunto de coordenadas (X,Y) localizada no centro do tambor na Figura 2.6.....	[m]
$Y_0$	– Ordenada da ponta do suspensor no conjunto de coordenadas (X,Y) localizada no centro do tambor na Figura 2.6.....	[m]

$y_1$	– Ordenada dos pontos do primeiro segmento do suspensor.....	[m]
$y_2$	– Ordenada dos pontos do segundo segmento do suspensor.....	[m]
$y_3$	– Ordenada dos pontos do terceiro segmento do suspensor.....	[m]
$y_A$	– Ordenada do ponto A no sistema de coordenadas (x,y) localizado na ponta do suspensor.....	[m]
$y_B$	– Ordenada do ponto B no sistema de coordenadas (x,y) localizado na ponta do suspensor.....	[m]
$y_C$	– Ordenada do ponto C no sistema de coordenadas (x,y) localizado na ponta do suspensor.....	[m]
$y_W$	– Ordenada do ponto W, interseção da linha do sólido com a parede do tambor.....	[m]
$Y_{A,B,C,W}$	– Ordenada dos pontos A, B, C e W do suspensor no conjunto de coordenadas (X,Y) localizada no centro do tambor na Figura 2.6.....	[m]
$Y_q$	– Altura de queda das partículas numa da posição angular.....	[m]
$\bar{Y}_q$	– Altura média de queda das partículas numa da posição angular..	[m]
$z$	– Adimensional de comprimento definido na Equação 3.4.....	[-]

#### Sub-índices

$s$	– Sólido
$l$	– líquido
$f$	– Fluido
$v$	– Vapor

#### Símbolos gregos

$\alpha$	– Ângulo de inclinação do secador.....	[rad]
$\alpha_A$	– Ângulo entre o primeiro e o segundo segmento do suspensor.....	[rad]
$\alpha_B$	– Ângulo entre o segundo e o terceiro segmento do suspensor.....	[rad]
$\alpha_e$	– Escalar referente ao tamanho do passo ao longo da direção de busca $S_b$ .....	[-]
$\beta$	– Ângulo definido na Equação 2.43.....	[rad]

$\Delta T_{ln}$	– Diferença média logarítmica de temperatura entre o gás de secagem e as partículas.....	[°C]
$\varepsilon_0$	– Porosidade da cortina de partículas em queda.....	[-]
$\varepsilon$	– Porosidade do leito de partículas.....	[-]
$\lambda$	– Calor latente de vaporização da água pura.....	[kJ kg <sup>-1</sup> ]
$\phi$	– Ângulo dinâmico de repouso do sólido.....	[rad]
$\gamma$	– Ângulo da linha de sólido com o primeiro segmento do suspensor.....	[rad]
$\lambda$	– Calor latente de vaporização da água.....	[kJ kg <sup>-1</sup> ]
$\omega$	– Velocidade angular do secador.....	[rad s <sup>-1</sup> ]
$\rho_b$	– Densidades “ <i>bulk</i> ” dos sólidos.....	[kg m <sup>-3</sup> ]
$\rho_f$	– Densidade do gás.....	[kg m <sup>-3</sup> ]
$\rho_s$	– Densidade dos sólidos.....	[kg m <sup>-3</sup> ]
$\bar{\tau}$	– Tempo médio de residência das partículas no secador.....	[s]
$\theta$	– Posição angular do suspensor em relação ao centro do secador..	[rad]
$\theta_q$	– Ângulo de queda das partículas numa dada posição angular.....	[rad]
$\bar{\theta}_q$	– Angulo médio de queda das partículas numa da posição angular	[rad]
$\mu_f$	Coeficiente de fricção para a o modelo linear DEM.....	[-]
$\eta$	Coeficiente de restituição para a o modelo linear DEM.....	[-]
$k$	Coeficiente de elasticidade para o medelo linear DEM.....	[N/m]
	Coeficiente dinâmico de fricção ou viscosidade do ar nas fórmulas	
$\mu$	– de Re e Pr.....	[-]



## RESUMO

A secagem é uma importante operação à qual se submetem diversos produtos industrializados. Porém, este processo é concebido como uma operação unitária que demanda uma intensa quantidade de energia, o que implica em um grande impacto comercial no custo do produto final. Secadores do tipo rotativos são comumente usados na secagem e processamento de materiais granulados por suportar grande volume de material, possui vasta aplicação no âmbito do beneficiamento de sementes, produção de alimentos e fertilizantes. Além de amenizar os custos com armazenamento e transporte, evitando desintegração dos grânulos do produto, o empedramento e reduzir a formação de incrustações no interior dos equipamentos, a secagem possibilita o atendimento às imposições do mercado consumidor e às leis de regulamentação para a comercialização do produto. O equipamento convencional usado para a operação de secagem constitui-se de um casco cilíndrico com uma pequena inclinação em relação à horizontal, que gira em torno do seu eixo longitudinal, equipado com suspensores, e recebe o nome de secador rotativo. O secador rotativo convencional de contato direto consiste em um equipamento amplamente difundido na área industrial por apresentar vantagens como, por exemplo, alta capacidade de processamento de uma grande variedade de materiais. Com o objetivo de aumentar a eficiência da secagem, outra configuração do secador rotativo foi desenvolvida na FEQUI/UFU, conhecida como secador rotoaerado, avaliada primeiramente por Lisboa *et al.* (2007) e depois por Arruda (2008). O secador rotoaerado é constituído por um tubo central que possui uma série de minitubos conectados a ele, responsáveis por conduzir o ar quente diretamente para o leito de partículas localizadas no fundo do tambor em rotação. Em trabalhos anteriores constatou-se que o secador rotoaerado apresentou maior eficiência quando comparado com o equipamento convencional, usando suspensores. Devido à constatação da ótima eficiência de secagem apresentada pelo secador rotoaerado, o presente trabalho teve como objetivo, estudar a secagem de fertilizantes super fosfato simples granulado em secadores rotoaerados com diferentes configurações ainda não estudadas variando os diâmetros, a disposição e a quantidade dos minitubos conectados ao tubo central. Com os resultados experimentais deste trabalho observou-se que a distribuição e o diâmetro dos minitubos avaliados tiveram influência nos resultados de tempo médio de residência, água removida e taxa de secagem. Verificou-se também que, enquanto as configurações avaliadas em trabalhos anteriores apresentaram resultados de taxa de secagem até quatro vezes maior em comparação à versão convencional, neste trabalho foi possível encontrar configurações com resultados superiores chegando a uma taxa de secagem até 18 vezes maior em comparação à versão convencional. Além dos estudos experimentais, também foi possível realizar a simulação através da Fluidodinâmica Computacional (CFD) do escoamento do ar no tubo central do secador rotoaerado, a fim de se obter a predição das velocidades de saída no ar em cada minitubo e verificou-se a influência da velocidade de saída do ar no escoamento das partículas. Além disso, foi feito um estudo utilizando o Método dos Elementos Discretos (DEM) para simulação do escoamento de partículas de fertilizante em tambores rotativos avaliando-se diferentes parâmetros e as interações entre eles para a simulação em fase discreta.

Palavras chaves: secagem, secador rotatório, secador rotoaerado, fluidodinâmica computacional, simulação DEM.



## ABSTRACT

Drying is an important process that a lot of products were submitted. However, this process is usually very energy-intensive and has a large commercial impact on the cost of the final product. The conventional direct rotary dryer consists of equipment widely used in industrial area due to advantages such as, a high processing capacity of a wide variety of materials. This dryer is commonly used to dry and process granular materials, and has application across a wide range of industries like the fertilizer industry. In the Triângulo Mineiro region and Alto Paranaíba, where is also located the city of Uberlândia - MG, the fertilizer industry exemplifies the use this equipment for removing moisture from the final product. The drum of the rotary cascade dryer is equipped with lifting flights. Many potential benefits can be obtained through a greater understanding of the rotary drying process. One such benefit could be energy savings, whose magnitude can be determined by estimating the energy cost of drying in the particleboard industry. In order to improve drying efficacy, another version of the rotary dryer, known as the “rotoaerated” dryer, was evaluated by Lisboa (2007) and Arruda (2008). the roto-aerated version provides better mass and energy transfer between the hot air and the solids than the conventional countercurrent rotary dryer. The main characteristic of the rotoaerated dryer is its aerated system, which consists of a central pipe (encased in the drum), from which a series of mini-pipes carry hot air directly to the particle bed flowing at the bottom of the drum (without flights). The present work analyzes the drying of granulated fertilizers in a rotoaerated dryer. This work has tested several positions and different diameters of mini pipes. Due to finding the optimum drying performance presented by rotoaerado dryer, the present work aims to study the drying of SSPG fertilizer granules in rotoaerated dryers with different configurations that have not studied, varying the diameter, the provision and quantity of mini pipes. The performance of rotary dryers configurations, were compared based on experimental results. The results of this study have values of loading, residence time, drying rate, and the difference between rotoaerated dryer and concurrent and countercurrent rotary dryers, working under the same operating conditions. It was also found that while the configurations evaluated in previous studies showed results of the drying rate four times higher compared to conventional version, in this work it was possible to find configurations with superior results reaching a drying rate up to 18 times higher compared the conventional version. This study also study different parameters in a Discret Element Method (DEM) simulation method with a linear model.

Key words: drying, rotary dryer, rotoaerated dryer, DEM simulation, fertilizers, concurrent flow



## **CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO**

Um dos problemas mundiais observados na atualidade consiste no aumento populacional terrestre e a crescente demanda de alimentos. Sabendo-se disso, a melhoria da produção agrícola é de grande importância e sua busca caracteriza-se como uma necessidade industrial. Uma das maneiras de alcançá-la é por meio do uso de técnicas de adubação do solo, fornecendo a este os nutrientes capazes de suprir as deficiências em substâncias vitais ao desenvolvimento das plantas. Para isto utilizam-se muitas vezes fertilizantes produzidos industrialmente.

A importância do uso de fertilizantes marcou o crescimento da agricultura e a produção de alimentos na história da humanidade. Desde então, o consumo de fertilizantes aumentou e tem gerado a necessidade de se aprimorar a tecnologia da produção deste insumo, por ter se tornado um fator importante na expansão da produtividade agrícola.

O Brasil é um país de grandes extensões de terras e clima favorável em sua maioria, o que favorece a atividade agrícola. Essa atividade tem se mostrado em expansão com o aumento da renda familiar, o crescimento da economia e dos programas sociais do governo. Por essa razão, o Brasil possui uma grande demanda de fertilizantes o que impulsiona a produção nacional desse produto. Porém, o Brasil não é auto-suficiente neste insumo e a independência das importações tem sido um objetivo desejável e possível para o país. Alguns estudiosos da agronomia afirmam que para o Brasil aproveitar as oportunidades promissoras no mercado internacional e tornar-se o principal fornecedor global de alimentos e biocombustíveis, o agronegócio brasileiro precisa aprimorar o funcionamento do mercado de fertilizantes.

Apesar da crise econômica iniciada no final do ano de 2008, as vendas de fertilizantes totalizaram ao final do ano em um número maior do que em 2007. Mas no início do ano de 2009, as vendas que estavam baixas devido à crise aumentaram à medida que o país se recuperou. Mesmo com essa desaceleração das vendas nesse período, a produção de fertilizantes sofreu pequenos impactos dando continuidade ao crescimento da produção do insumo no país. Segundo relatórios anunciados, a produção de fertilizante mostrou-se crescente nos anos de 2010, 2011 e observando-se os meses de janeiro a agosto de 2012 já ultrapassou os números da produção no mesmo período em 2011 (ANDA 2012).

Como na maioria dos produtos industrializados, os fertilizantes granulados também passam pelo processo de secagem. Após o processo de granulação, que emprega diversos insumos como: água, amônia, ácido sulfúrico entre outros, este insumo agrícola passa por processo de secagem durante sua fabricação. Com o objetivo de amenizar os custos com armazenamento e transporte, evitando desintegração dos grânulos do produto e o empedramento, além de reduzir a formação de incrustações no interior dos equipamentos, a secagem possibilita o atendimento às imposições do mercado consumidor e às leis de regulamentação para a comercialização do produto.

O processo de secagem geralmente demanda uma intensa quantidade de energia o que implica em um grande impacto comercial no custo do produto final. Os secadores geralmente são classificados de acordo com a forma de transmissão de calor, sendo que a escolha do equipamento depende de especificações de uso e operação, ou seja, depende da finalidade. Eles também podem ser classificados como secadores de contato direto, em que o gás de secagem está em contato íntimo com o produto e indireto quando o contato de ambos ocorre por meio de uma superfície aquecida indiretamente.

O secador rotatório convencional usado para a operação de secagem de fertilizantes (e de outros minerais) num processo contínuo, é constituído de um casco cilíndrico com uma pequena inclinação em relação à horizontal, que gira em torno do seu eixo longitudinal, equipado com suspensores e tem contato direto.

Secadores do tipo rotatórios são comumente usados na secagem e processamento de materiais granulados por suportar grande volume de material, e possuem vasta aplicação no âmbito do beneficiamento de sementes, de alimentos e fertilizantes (NONHEBEL E MOSS 1971; MYERS E BALDWIN, 1999). Na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, onde também está localizada a cidade de Uberlândia – MG, a indústria de fertilizantes exemplifica o grande emprego deste equipamento para a remoção de umidade do produto final.

Secadores rotativos com cascadeamento são geralmente equipados com suspensores de diferentes geometrias, cuja finalidade é coletar o material particulado no fundo do tambor, transportá-lo por certa distância ao redor do perímetro circular e lançá-lo em cascata através de uma corrente de ar quente.

Nas configurações convencionais, o material úmido é introduzido na entrada superior e o produto seco é retirado na extremidade inferior (descarga), sendo que o

transporte do material ocorre devido à inclinação do tambor, a rotação e à alimentação constante de material. A maior parte da secagem ocorre quando os sólidos caem dos suspensores e estão em contato direto com o gás, o que corresponde a aproximadamente um décimo do tempo de residência do sólido no secador. Processam materiais granulados de livre escoamento. As vantagens em se utilizar estes equipamentos consistem na sua versatilidade, facilidade de construção e manutenção, capacidade de processar grandes volumes de material além de promoverem o transporte durante a secagem.

O fluxo de gás de secagem pode ser em sentido contracorrente e concorrente. O secador com fluxo concorrente é usado para materiais biológicos, termo-sensíveis ou quando se deseja baixas temperaturas de saída, porém para outros materiais, o fluxo contracorrente é mais indicado devido à maior eficiência térmica que pode ser alcançada nessa configuração. No primeiro caso, o fluxo de gás favorece o escoamento dos sólidos, enquanto no segundo caso o escoamento de sólidos é retardado pelo fluxo de gás. Uma desvantagem do fluxo contracorrente é a temperatura final do produto, resultando em possíveis problemas de deterioração de alguns produtos sensíveis ao calor (MUJUMDAR *et al*, 2007).

Devido à crescente demanda da produção de fertilizantes e à localização da cidade de Uberlândia em um pólo químico, próximo à grandes jazidas de fósforo (Uberaba, Patos de Minas, Araxá e Catalão) e às grandes indústrias produtoras de fertilizantes no país (VALE FÉRTIL, COOPEBRÁS, PETROBRAS), vários estudos realizados na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia foram motivados, a fim de se conhecer e aprimorar as técnicas dos principais equipamentos do processo de fertilizantes.

Com o objetivo de aumentar a eficiência de secagem, outra configuração do secador rotatório foi desenvolvida, conhecida como secador rotoaerado, avaliada primeiramente por LISBOA *et al* (2007) e, posteriormente, por ARRUDA *et al* (2009a). Alguns estudos foram propostos por ARRUDA *et al* (2009b) com o objetivo de aumentar a transferência de massa e energia entre o ar quente e o sólido granulado super fosfato simples (SSPG) em secadores rotatórios nas seguintes versões: convencional (contracorrente) e roto-aerado. Observou-se através de estudos anteriores que, o secador rotoaerado possui vantagens em relação ao convencional no que diz respeito à eficiência de secagem como também na operação do equipamento, já que esta nova versão

minimizou as quebras do material por atrito, e minimizou os problemas de vazamentos de ar na linha, possibilitando maior aproveitamento do ar de secagem. No secador rotoaerado, o ar quente entra em contato com as partículas depois de percorrer um tubo central contendo minitubos por onde o ar sai e não ocorre cascadeamento. Nos trabalhos prévios supra-mencionados apenas uma configuração de secador rotoaerado foi utilizada, ficando clara a possibilidade de otimização deste novo equipamento.

Trabalhos recentes, encontrados na literatura, têm mostrado que a Fluidodinâmica Computacional (CFD) tem se estabelecido como uma importante ferramenta para simulações de diversos fenômenos em várias aplicações na indústria. Códigos comerciais de CFD estão disponíveis, os quais podem ser utilizados para a simulação dos processos de transferência de calor e massa.

Além dos aspectos fluidodinâmicos, a utilização em códigos comerciais de CFD é também de fundamental importância para otimizar a operação de secagem de vários materiais. Os desafios também são grandes já que as partículas em secadores industriais podem ser de tamanho, forma e densidade heterogêneos, o que caracteriza uma mistura de partículas. Alguns desses códigos permitem também simulações de escoamentos com partículas em fase discreta usando uma abordagem Lagrangeana, baseada nas leis de Newton, denominada Método dos Elementos Discretos (DEM) (FLUENT ANSYS, 2006).

Enquanto alguns modelos multifásicos para fase contínua falham na obtenção de resultados precisos para o comportamento das partículas em sistemas empacotados, a metodologia DEM tem se mostrado, em diversos trabalhos, uma técnica satisfatória de simulação da fase discreta em sistemas concentrados (HOBBS, 2009). Como normalmente as operações com partículas são conduzidas em sistemas com a presença de fase fluida, ocorre então a necessidade de se avaliar metodologias capazes de relacionar a fase fluida com a fase discreta e as interações entre elas.

Na operação de tambores rotativos, como é o caso do secador rotativo, dependendo da geometria e configuração do equipamento e também das condições operacionais, como a velocidade do fluido de secagem e a quantidade de partículas dentro do equipamento, o contato gás-partícula pode favorecer ou não o escoamento das partículas o que pode interferir no processo de secagem resultando num material com uma distribuição mais homogênea de umidade.



Sendo assim, os objetivos do presente trabalho foram: estudar o processo de secagem do fertilizante super fosfato simples granulado em diferentes configurações de secadores rotoaerados, ainda não avaliadas, bem como observar o desempenho do mesmo em relação a outras configurações convencionais.

Além dos estudos experimentais, este trabalho também objetivou realizar simulações em CFD do escoamento do ar no secador rotoaerado, a fim de se obter a distribuição do ar na saída dos minitubos em cada configuração estudada, sendo os resultados da simulação comparados com os dados obtidos experimentalmente.

A utilização de outra abordagem de CFD que utiliza o método DEM também foi objetivo deste trabalho e consistiu em avaliar diversos parâmetros de simulação utilizando o Método de Elementos Discretos (DEM), através da comparação de simulações do escoamento de partículas em tambores rotativos com resultados experimentais.



## **CAPÍTULO 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 – Fertilizante e a agricultura**

Acredita-se que durante a pré-história, em torno de 12000 A.C., surgiram as primeiras formas de agricultura (domesticação de espécies vegetais) e pecuária (domesticação de animais), junto com a formação das primeiras aldeias agrícolas. Nesse período, o uso do fogo e de algumas ferramentas, assim como dos excrementos animais, fazia parte do cotidiano dos aglomerados urbanos, que deram origem às cidades.

O crescimento populacional e a queda da fertilidade dos solos utilizados após anos de sucessivas culturas no continente europeu causaram, entre outros problemas, a escassez de alimentos. Por volta dos séculos XVII e XIX, intensifica-se a adoção de sistemas de rotação de culturas com utilização de plantas forrageiras (capim e leguminosas) e as atividades de pecuária e agricultura se integram. Esta fase é conhecida como Primeira Revolução Agrícola (PLANETA ORGÂNICO, 2009).

Desde então surgiu a necessidade de se aprimorar as técnicas agrícolas iniciando os estudos relacionados aos fatores necessários para a agricultura, tais como: a espécie vegetal, a variedade, a população, tratamentos culturais, clima, economia, solo, disposição de nutrientes e microorganismos no solo. Alguns desses fatores são controláveis, enquanto outros não. A falta de nutrientes disponíveis no solo pode ser compensada pela aplicação de fertilizantes, que apresentam uma elevada taxa de recuperação desses nutrientes com custo relativamente reduzido, aliado à facilidade de aplicação.

Ressalta-se que os elementos minerais que as plantas mais necessitam podem ser divididos em: macro-nutrientes (carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, fósforo, enxofre, cálcio, magnésio e potássio); e micronutrientes (boro, cobalto, ferro, manganês, molibdênio e zinco). Por isso, pode-se dizer que o desenvolvimento de uma planta se dá em “solução nutritiva”, isto é, em água contendo aqueles elementos minerais em quantidades suficientes e na presença de luz, ar e temperatura adequada. Portanto, um solo de qualidade é de fundamental importância para a agricultura, isto é, para o cultivo das plantas em escala maior e com fins econômicos.

Alguns desses elementos estão disponíveis em abundância no meio ambiente e são diretamente assimiláveis pelas plantas (carbono, hidrogênio e oxigênio). Outros, como o nitrogênio, apesar de disponível na atmosfera, não são diretamente absorvíveis

pelas plantas, ou o processo de absorção é muito lento face à demanda produtiva, sendo então a adubação nitrogenada essencial para a produção agrícola.

Sendo assim, a legislação brasileira define fertilizantes como compostos que contém substâncias minerais ou orgânicas, naturais ou sintéticas, fornecedoras de um ou mais nutrientes para as plantas, com o objetivo de complementar o solo suprimindo as deficiências em substâncias vitais à sobrevivência e desenvolvimento dos vegetais.

## **2.2 - Produção de Fertilizantes no Brasil**

Apesar de o Brasil ser um grande produtor de fertilizantes, faz-se necessário o estudo de técnicas que possibilitem o crescimento desta produção uma vez que ela não atende toda a demanda do país devido ao crescente desenvolvimento da agricultura nacional. Assim os próximos parágrafos apresentam um resumo de como ocorreu o aumento da produção deste insumo no país.

No Brasil, a produção de fertilizantes iniciou em meados de 1950 e, nesta época representava cerca de 8% do consumo total. Com o passar dos anos, devido à grande extensão agrícola do país e à grande demanda de fertilizantes, a produção aumentou gradativamente. Na segunda metade dos anos 60, a estrutura industrial do setor ampliou-se com a implantação de novas unidades produtoras de super fosfato simples, tais como: Ferticap, Copebrás, IAP e do complexo de fertilizantes da Ultrafertil. Em 1974, o consumo era de 1,68 milhões de toneladas de nutrientes (ARRUDA, 2008).

No período de 1974 a 1980, a produção brasileira de nitrogênio e fósforo aumentou de 487 mil toneladas de nutrientes para 1,959 milhões de toneladas anuais, ou seja, um acréscimo de 302%. Assim, partindo em 1950 de um nível de atendimento às necessidades de consumo interno em nutrientes de cerca de 8%, o setor de fertilizantes, em 1980, foi responsável pelo atendimento de quase 50% do consumo nacional e hoje almeja no futuro a auto-suficiência no insumo no País. A partir de 1981, quando as metas do PNFCa (Programa Nacional de Fertilizantes de Calcário) foram alcançadas, iniciou-se uma nova fase de desenvolvimento da indústria de fertilizantes no Brasil. Em 1990, a capacidade de produção foi correspondente a 59% do consumo nacional, (ARRUDA, 2008).

A Tabela 2.1 apresenta a produção de fertilizantes nos últimos quatro anos. Os fertilizantes intermediários são compostos pelos nutrientes NPK (nitrogênio, fósforo e

potássio). A Tabela 2.2 mostra os valores das importação de fertilizantes nos últimos quatro anos.

Tabela 2.1 – Produção nacional de fertilizantes intermediários, (ANDA, 2012).

<b>Produção Nacional de Fertilizantes Intermediários (toneladas de produto)</b>					
	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2012/2011</b>
<b>Agosto</b>	774.923	867.291	876.146	967.003	10,40%
<b>Janeiro a Agosto</b>	5.305.039	6.040.890	6.303.716	6.325.204	0,30%
<b>Total do Ano</b>	8.372.565	9.339.867	9.860.779	6.325.204	

Tabela 2.2 – Importação de fertilizantes intermediários, (ANDA 2012).

<b>Importação de Fertilizantes Intermediários (toneladas de produto)</b>					
	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2012/2011</b>
<b>Agosto</b>	1.714.264	1.674.138	1.857.000	2.239.775	20,60%
<b>Janeiro a Agosto</b>	6.268.596	8.883.577	12.977.634	12.634.575	-2,60%
<b>Total do Ano</b>	11.020.805	15.282.499	19.851.069	12.634.575	

Segundo as publicações da ANDA, as entregas de fertilizantes ao consumidor final encerraram o período de janeiro a agosto de 2012 com 17.794.005 toneladas, indicando aumento de 4,8% em relação ao mesmo período de 2011, quando foram entregues 16.971.246 toneladas. Os fertilizantes fosfatados ( $P_2O_5$ ) registraram aumento de 7,3%, passando de 2.405 mil toneladas em 2011 para 2.581 mil toneladas em 2012, com ênfase para as culturas de milho safrinha, algodão, plantio de cana-de-açúcar e uma aceleração nas entregas para safra de verão de soja e milho.

A produção nacional de janeiro-agosto/2012 alcançou 6.325 mil toneladas, contra 6.304 mil toneladas em 2011. Observou-se crescimento nas produções dos fertilizantes nitrogenados de 5,0% e fosfatados de 10,7%, enquanto os potássicos apresentaram redução de 8,6%. As importações de fertilizantes intermediários alcançaram 12.635 mil toneladas no período janeiro-agosto de 2012, acusando redução de 2,6% em relação ao mesmo período de 2011, quando entraram pelos portos brasileiros 12.978 mil toneladas. As reduções observadas foram de 2,8% nos fertilizantes nitrogenados e 3,8% nos potássicos enquanto os fosfatados apresentaram elevação de 1,2% (ANDA, 2012).

### **2.3 - Processo de secagem**

A secagem consiste em uma operação de transferência simultânea de calor e massa muito utilizada na indústria, e tem como objetivo remover água (ou voláteis) de determinado material através da vaporização. É um processo que ocorre espontaneamente na natureza e ou por métodos artificiais, em equipamentos para fins industriais desenvolvidos através do estudo e aplicação de fundamentos teóricos.

A ação do vento e do sol é que promove a secagem natural. Porém a secagem natural é um método muito lento e impreciso para processos industriais para os quais se utiliza a convecção forçada de um gás de secagem, substituindo o sol e outras fontes de calor empregadas na remoção dos voláteis.

Além de amenizar os custos com armazenamento e transporte, evitando desintegração dos grânulos do produto, o empedramento e reduzir a formação de incrustações no interior dos equipamentos, a secagem possibilita o atendimento às imposições do mercado consumidor e às leis de regulamentação para a comercialização de diversos produtos. Sendo assim, pode-se dizer que grande parte dos produtos industrializados é submetida à secagem em alguma etapa do processo de fabricação.

Podemos dizer que devido ao alto consumo energético e por requerer também significativo investimento inicial, além de gastos com manutenção, a secagem é um processo que apresenta um grande impacto comercial no custo do produto final. Desta forma a secagem é considerada um desafio para os engenheiros e cientistas. Estudos relativos a novos equipamentos e otimização dos existentes são certamente muito importantes neste contexto.

### **2.4 - Diferentes configurações de secadores rotativos**

Os tipos mais comuns de secadores rotatórios são os convencionais de fluxo concorrente ou contracorrente, porém, a literatura apresenta algumas diferentes versões de secadores rotatórios não convencionais.

Uma configuração especial de secador rotativo por exemplo é a versão chamada Renneburg DehydrO-Mat (Edward Renneburg & Sons Co.). O Renneburg DehydrO-Mat consiste num secador concorrente construído com pequeno diâmetro na região inicial do equipamento, onde o sólido é alimentado, região na qual ocorre uma rápida

evaporação da umidade superficial da partícula, uma vez que nessa região o gás de secagem está mais aquecido. À medida que o sólido e o gás vão se aproximando da saída, o diâmetro do tambor aumenta, reduzindo então a velocidade do gás e promovendo aumento do holdup de sólidos enquanto estão expostos ao gás mais resfriado (MYERS E BALDWIN, 1999).

Outra configuração especial é a chamada Louisville tipo P (MYERS E BALDWIN, 1999), que também é uma configuração concorrente desenvolvida para secagem de polímeros termicamente sensíveis. Esta versão seca partículas finas e possui uma descarga em formato cônico que promove um transporte pneumático das partículas na saída do secador. A estrutura interna desta versão permite um aumento do tempo de residência favorecendo a secagem. A versão especial chamada Louisville tipo H é um secador concorrente modificado com características de secadores tipo flash. O arranjo interno desta versão consiste em discos alternados e roscas que promovem elevados diferenciais de velocidades entre o meio de secagem e os sólidos a serem processados para aumentar a transferência de calor e conseqüentemente a umidade removida (MYERS E BALDWIN, 1999).

Uma configuração especial de secador rotativo muito conhecida é chamada de secador Rotolouvre (MYERS E BALDWIN, 1999). Esta versão difere do secador convencional da forma como o ar circula através do leito de sólidos promovendo maior contato com as partículas. Como mostra a Figura 2.1, o gás quente é liberado radialmente através de venezianas em um duplo cilindro rotativo.

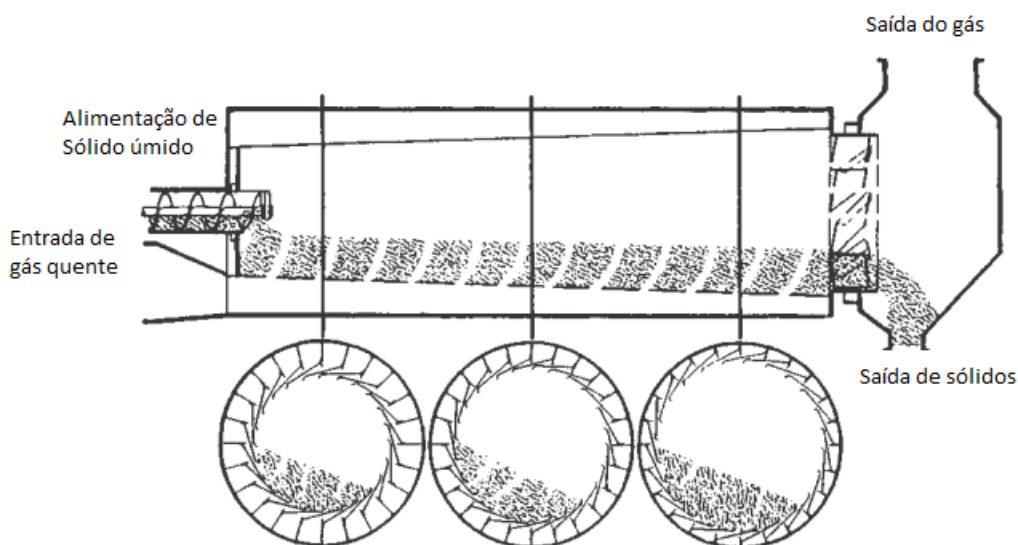


Figura 2.1 – Secador rotativo Rotolouvre (MYERS E BALDWIN, 1999).

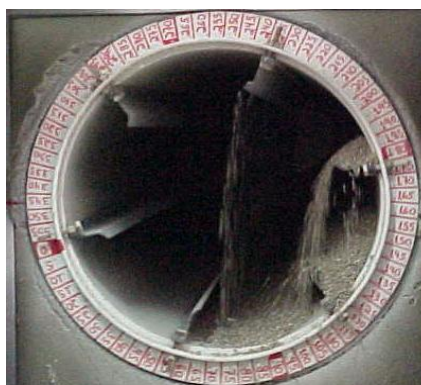
Sabe-se que a secagem é um processo energético que apresenta grande impacto comercial no custo do produto final. Dessa forma, com o objetivo de aumentar a eficiência da secagem, outra configuração do secador rotativo foi desenvolvida na FEQUI/UFU, conhecida como secador rotoaerado, avaliada primeiramente por LISBOA *et al.* (2007) e depois por ARRUDA (2008). A Figura 2.2 mostra a fotografia do interior do secador rotoaerado (a) e a versão convencional com suspensores (b).

Estes trabalhos prévios tinham o objetivo de comparar a transferência de massa e energia entre o ar quente e o material particulado super-fosfato simples em secadores rotatórios nas versões: convencional contracorrente e rotoaerado.

Na Figura 2.2 é possível visualizar vistas internas de um secador convencional, operando com suspensores de 3 segmentos (Figura 2.2b) e do secador roto-aerado (Figura 2.2a).



(a)



(b)

Figura 2.2 - Secadores rotatórios em funcionamento: (a) versão rotoaerado e (b) versão convencional ARRUDA (2008);

O secador rotoaerado, utilizado por ARRUDA (2008) e LISBOA *et al.* (2007), em vez de suspensores, continha um tubo central com 1,4 m de comprimento e 0,1 m de diâmetro interno, diretamente acoplado à linha de ar. A ramificação de tubos menores era composta por 56 minitubos de 0,08 m de comprimento, sendo que foram usados diâmetros internos de 9 mm e 20 mm, montados em arranjos específicos. Nesse estudo verificou-se que o secador rotoaerado possui melhor desempenho que a versão convencional contracorrente com cascadeamento. Em outro trabalho, SILVÉRIO *et al* (2011) comparou esses resultados de secagem do secador rotoaerado com o secador



convencional com fluxo concorrente e verificou-se que o secador rotoaerado também apresentou melhor desempenho que esta outra versão convencional com cascadeamento

## 2.5 - O secador rotatório

Secadores do tipo rotatórios são comumente usados na secagem e processamento de materiais granulados por suportar grande volume de material. Possui vasta aplicação no âmbito do beneficiamento de sementes, produção de alimentos e fertilizantes. Podem também ser adaptados para a secagem de pastas e lamas, se o material for submetido a etapas preparatórias (NONHEBEL e MOSS 1971; MOYERS E BALDWIN, 1999).

O equipamento convencional constitui-se de um casco cilíndrico levemente inclinado em relação à horizontal, que gira em torno do seu eixo longitudinal, equipados com suspensores (ou aletas), e recebe o nome de secador rotatório de contato direto em cascata, e pode ser visto na Figura 1.

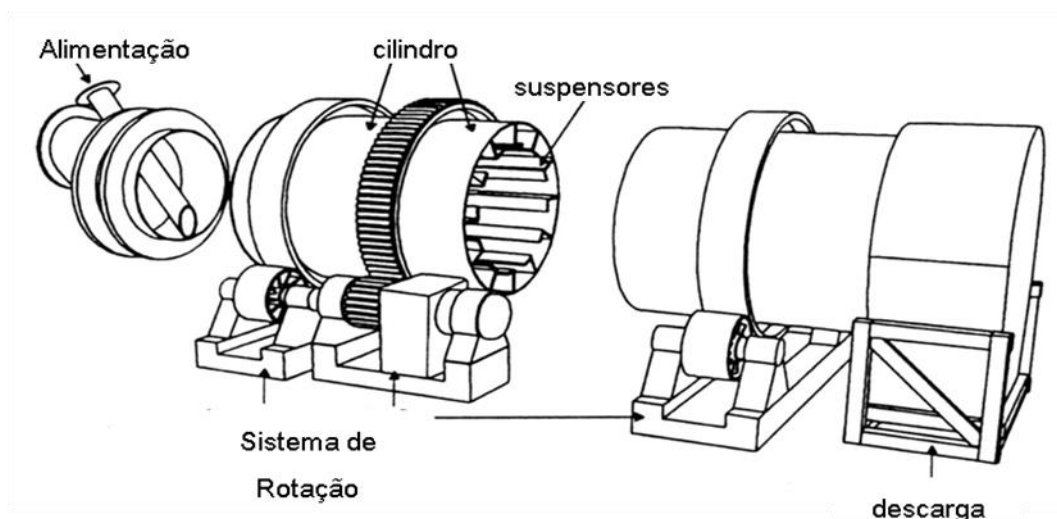


Figura 2.3 - Esquema de um secador rotatório com cascadeamento (PERRY e GREEN,1999).

O comprimento do cilindro normalmente varia de quatro a dez vezes o seu diâmetro, que pode medir de 0,2 a mais de três metros (MOYERS E BALDWIN, 1999).

O sólido úmido é alimentado em uma extremidade do equipamento, que consiste na parte mais elevada, e o percorre devido à ação da gravidade e a inclinação em relação ao solo através de movimentos rotacionais, sendo descarregado na outra extremidade com redução da umidade.

Nos secadores convencionais, os suspensores são responsáveis por promover o cascadeamento do sólido contido no interior do secador, coletando o sólido no fundo do tambor, transportando-o pela periferia do casco até a parte superior e lançando-o em cascata através da corrente de gás, como ilustrado na Figura 2.4.

A maior parte da secagem ocorre quando os sólidos estão em contato direto com o gás, ou seja, durante o cascadeamento. No secador convencional com suspensores, este período corresponde a aproximadamente um décimo do tempo de residência do sólido no secador (MATCHETT e BAKER, 1988).

O secador convencional também pode ser encontrado com diferentes configurações relacionadas à direção do fluxo de gás. O fluxo concorrente é recomendado para materiais termos-sensíveis como materiais biológicos, alimentos e polímeros, pois nele ocorre um rápido resfriamento do gás durante a evaporação inicial da umidade superficial do sólido. Nesta configuração a maior parte da secagem ocorre no início do secador. Dessa forma ocorre uma forte elevação na temperatura do sólido e uma diminuição repentina da temperatura do gás, devido a alta taxa de transferência de calor inicial, ocasionada pelas diferenças de temperatura entre o sólido e o gás quente na entrada, seguida de uma diminuição da temperatura do sólido, paralela à diminuição da temperatura do fluido.

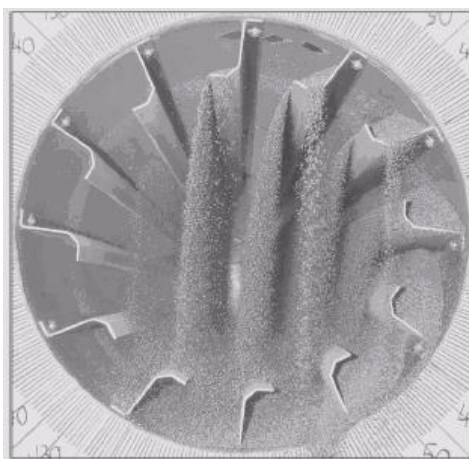


Figura 2.4 - Esquema da seção transversal do secador rotatório de contato direto com cascadeamento (REVOL, 2001).

Para outros materiais, o fluxo contracorrente é mais indicado devido à maior eficiência térmica que pode ser alcançada nessa configuração. Porém, uma desvantagem do fluxo contracorrente é a alta temperatura final do produto, que muitas vezes é mais próxima da temperatura de saída do gás, resultando em possíveis problemas de

degradação de algumas propriedades dos produtos sensíveis ao calor (SONG, 2003 e MUJUMDAR *et al*, 2007).

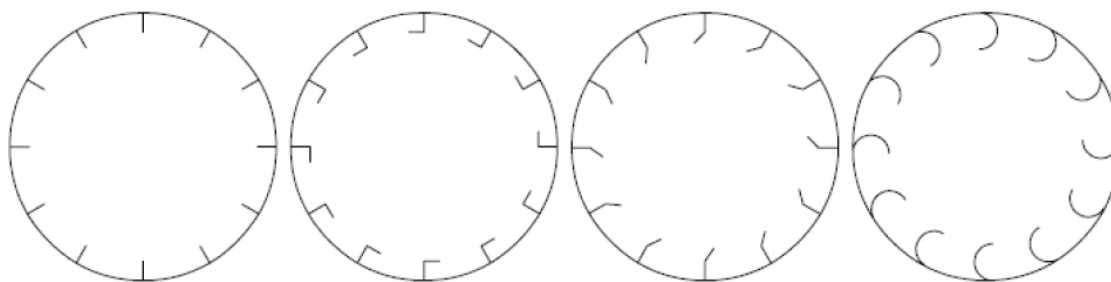
Em trabalhos anteriores, SILVÉRIO (2010) estudou os aspectos fluidodinâmicos e de secagem do fertilizante super-fosfato simples granulado em secadores rotatórios convencionais com fluxo concorrente e comparou o desempenho destes secadores com secadores convencionais com fluxo contracorrente.

Baseado nos resultados experimentais do trabalho de SILVÉRIO (2010) pode-se concluir que os experimentos realizados com a configuração contracorrente apresentaram níveis maiores de carregamento de sólidos (*holdup*) em todos os ensaios do planejamento, realizados na mesma rotação. O secador concorrente operando com menor velocidade de rotação apresentou *holdup* mais próximo aos da versão contracorrente.

Também foi possível observar que os ensaios com a versão contracorrente apresentaram valores de taxas de secagem e remoção de umidade dos sólidos superiores aos obtidos com a versão concorrente. A diferença da taxa de secagem é ainda maior para a versão convencional contracorrente quando comparado com os resultados da configuração concorrente operando com menor velocidade de rotação e maior carregamento.

Outro estudo, realizado por FERNANDES (2008) teve como objetivos analisar um secador industrial concorrente e obter o coeficiente dinâmico de fricção e assim estimar a distribuição da carga dos suspensores além de realizar a modelagem para previsão do processo de secagem. O secador utilizado apresentava diâmetro de 3,0 m e 30 m de comprimento; 2,5° de inclinação em relação ao solo e rotação de projeto de 3 rpm. Este secador tinha a capacidade de processar 120 toneladas de fertilizante super fosfato triplo granulado por hora e continha suspensores de 3 segmentos (220 x 190 x 50 mm) e ângulos entre os segmentos de 90°, 145° e 125°.

O secador rotatório com cascadeamento pode conter um ou mais tipos de suspensores, que são empregados de acordo com as propriedades do sólido a ser secado. A Figura 2.5 apresenta alguns dos diferentes formatos de suspensores. Os suspensores são responsáveis pelo cascadeamento das partículas. A profundidade do suspensor consiste na distância entre a sua extremidade e a parede do tambor, e recomenda-se que esta medida esteja entre 1/12 e 1/8 do diâmetro do tambor.



a) Suspensores retos ou radiais b) com ângulo reto c) angulares d) helicoidais

Figura 2.5 - Tipos de suspensores mais comuns em secadores rotatórios

(FERNANDES, 2008).

Ocorre também a utilização de mais de um tipo de suspensor no mesmo equipamento. Por exemplo, utiliza-se suspensores em forma de espiral na entrada do secador para permitir escoamento mais rápido dos sólidos na parte inicial do tambor e impedir o acúmulo de sólidos na região de entrada do secador.

## 2.6 - Carga de sólidos nos secadores rotatórios

Os secadores rotatórios usualmente operam com fração de sólidos dentro do tambor entre 10 a 15% de seu volume. Abaixo desses valores estará operando com carregamento (*holdup*) insuficiente para preenchimento dos suspensores, enquanto que acima desta faixa aumentam-se as possibilidades de partículas sólidas na parte superior do leito não serem coletadas pelos suspensores, ocasionando “curto circuito” dessas partículas. Fora das condições recomendadas de carregamento, mesmo que o secador tenha sido projetado para manter os sólidos ao longo de um comprimento suficiente que garanta a remoção completa da umidade interna do sólido, seu desempenho pode se tornar insatisfatório devido ao não preenchimento dos suspensores e diminuição do tempo de residência da partícula. (MOYERS E BALDWIN, 1999).

A previsão do carregamento de sólidos no secador é considerada de grande importância, principalmente no que diz respeito ao carregamento de projeto, ponto em que os suspensores estão na sua capacidade máxima. A introdução de mais sólidos irá aparecer como massa adicional na rolagem no fundo do secador, o que caracteriza sobrecarga do sistema (KEMP, 2004).

Estudos relatam que a quantidade de sólidos contida em cada suspensor pode ser calculada em função da sua geometria, da posição angular no interior do tambor ( $\theta$ ) e do ângulo dinâmico de repouso ( $\phi$ ), formado entre os sólidos e a superfície horizontal.

Um estudo realizado por SCHOFIELD e GLIKIN (1962), *apud* MUJUMDAR *et al* (2007) para a secagem de fertilizantes, utilizou a análise do movimento do sólido ao longo do secador, para determinar o ângulo dinâmico de repouso ( $\phi$ ) a partir da resultante das forças (gravitacional, centrífuga e de fricção) atuantes nas partículas sob a iminência de cair dos suspensores. A Equação (2.1) proposta pelos autores para cálculo deste ângulo é função do raio interno traçado da ponta do suspensor até o centro do tambor ( $R_o$ ), da velocidade rotacional ( $N_R$ ), da aceleração da gravidade ( $g$ ) e do coeficiente dinâmico de fricção ( $\mu$ ), que é uma propriedade do material e depende das suas características físicas como formato, tamanho, umidade e densidade.

$$\tan \phi = \frac{\mu + R_o \frac{N_R^2}{g} (\cos \theta - \mu \sin \theta)}{1 - R_o \frac{N_R^2}{g} (\sin \theta + \mu \cos \theta)} \quad (2.1)$$

A razão entre as forças centrífuga e gravitacional é contabilizada na parcela  $R_o N_R^2 / g$ . Secadores rotatórios operam usualmente na faixa entre  $0,0025 < (R_o N_R^2 / g) \leq 0,04$ , além disso KELLY (1968), *apud* MUJUMDAR *et al* (2007) conseguiu obter a validação desta equação para valores de razão das forças  $R_o N_R^2 / g$  de até 0,4.

É importante ressaltar que a Equação 2.1 foi testada apenas para sólidos de livre escoamento com umidade constante e que na prática a umidade decresce à medida que as partículas se movem para a saída do equipamento e há uma tendência do sólido na alimentação aderir nos suspensores devido à alta umidade inicial.

Devido à baixa rotação em secadores rotatórios, a influência da velocidade rotacional sobre a carga dos suspensores pode ser negligenciada já que a força centrífuga é pequena em relação à força gravitacional (BAKER, 1988).

Para a determinação do coeficiente dinâmico de fricção ( $\mu$ ), KELLY (1968), *apud* MUJUMDAR *et al* (2007), desenvolveu um método que consistia em coletar valores experimentais dos ângulos de repouso ( $\phi$ ) e da posição angular do secador ( $\theta$ ), utilizados no cálculo de  $\mu$  para diferentes velocidades de rotação.

O início do cascadeamento se dá quando o ângulo da superfície de sólido em relação ao plano horizontal ultrapassa um determinado valor. Assim, conhecendo-se o ângulo dinâmico de repouso ( $\phi$ ) e a posição angular do suspensor no interior do secador ( $\theta$ ), a área da seção transversal ocupada pelo sólido nos suspensores ( $S$ ) e consequentemente a carga de sólidos nos suspensores podem ser calculadas com o uso da geometria analítica, para suspensores de formato irregular, ou usando geometria plana, para suspensores regulares (WANG *et. al*, 1995).

A Equação (2.2) é aplicável ao cálculo da carga de sólidos num dado suspensor.

$$h^*(\theta_i) = S_i L \rho_s \quad (2.2)$$

sendo  $h^*$  a carga de sólidos no suspensor numa posição angular  $\theta_i$ ,  $\rho_s$  a densidade dos sólidos e  $L$  o comprimento do secador.

Quando o cilindro do secador se movimenta de uma posição para outra, parte dos sólidos do suspensor é despejada e essa quantidade pode ser contabilizada pela Equação (2.3) em que  $h_{d,i}^*$  é a massa despejada do suspensor na posição  $\theta_i$  e  $h_{i-1}^*$  a massa de sólidos no suspensor da posição angular anterior e  $h_i^*$ , a massa de sólidos na posição angular  $\theta_i$ .

$$h_{d,i}^* = h_{i-1}^* - h_i^* \quad (2.3)$$

A Figura 2.6 apresenta um esquema ilustrando a posição angular do suspensor no secador.

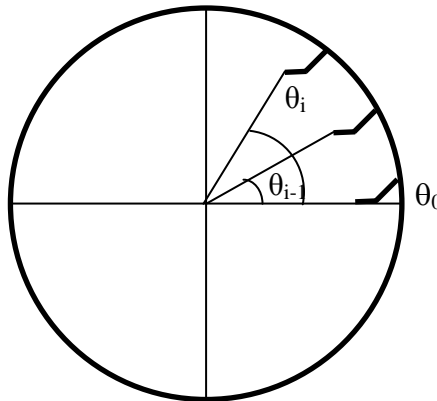


Figura 2.6 - Esquema ilustrando a posição angular ( $\theta_i$ ), da linha com origem no centro do tambor até a ponta do suspensor.

Outro estudo realizado por WANG *et al.* (1995) resultou em um modelo de transporte de partículas que representa o comportamento global por meio de equações diferenciais parciais. O modelo relaciona o fluxo de massa axial com a taxa de descarga de sólidos dos suspensores na direção vertical. A taxa de descarga de sólidos dos suspensores ( $R_D$ ) por unidade de comprimento é dada pela Equação 2.4.

$$R_{Di} = -\rho_s \omega \frac{dS_i}{d\theta_i} = -\rho_s \omega \left( \frac{\partial S_i}{\partial \theta_i} + \frac{\partial S_i}{\partial \phi_i} + \frac{\partial \phi_i}{\partial \theta_i} \right) \quad (2.4)$$

A carga total de projeto do secador ( $H^*$ ), também conhecida por *holdup* pode ser aproximada pela Equação (2.5), proposta por PORTER (1963), *apud* ARRUDA (2008), na qual  $N$  é o número de suspensores e  $h_0^*$  é a máxima carga possível para os suspensores, que ocorre na posição  $\theta = 0^\circ$ .

$$H^* = \frac{NLh_0^*}{2} \quad (2.5)$$

De acordo com KELLY e O'DONNELL (1968) a Equação 2.5 subestima o valor real da carga por ignorar as partículas que estão em queda durante o cascadeamento e, desta forma, propuseram a Equação 2.6.

$$H^* = \frac{(N+1)Lh_0^*}{2} \quad (2.6)$$

Esta equação deveria estimar melhor as partículas em cascadeamento na região superior da seção transversal do secador. Porém, na prática, o cascadeamento ocorre até um ângulo  $\theta$  pouco menor do que  $180^\circ$  e esta equação fornece um valor de  $H^*$  muito maior do que o correto. GLIKIN (1978) relata que essa diferença pode atingir valores maiores que 80% e propôs a Equação 2.7 para o cálculo do *holdup* de sólidos no secador. Nessa equação, o somatório inclui o *holdup* de sólidos de cada suspensor na metade superior do casco, ou seja, em toda a região entre 0 e  $180^\circ$ , sendo que  $h_i^*$  é a carga de sólidos retida no suspensor para cada posição angular.

$$H^* = 2 \sum h_i^* - h_0^* \quad (2.7)$$

Para o cálculo da massa de sólidos no suspensor em função da posição angular, REVOL *et al.* (2001) propôs um método baseado em dois sistemas de coordenadas cartesianas. Com isto, foi desenvolvido um conjunto de equações que estima a carga dos sólidos no suspensor em função da sua posição angular no tambor em suspensores de três segmentos.

Para obter o volume de sólidos no suspensor, as coordenadas dos pontos A, B, C e W, vistos na Figura 2.7, são determinadas e a partir do ângulo  $\delta$  entre os dois eixos de coordenadas faz-se a estimativa da quantidade de sólidos de acordo com a posição angular do suspensor ( $\theta$ ). Os ângulos  $\alpha_A$  e  $\alpha_B$  são os ângulos entre os segmentos dos suspensores.

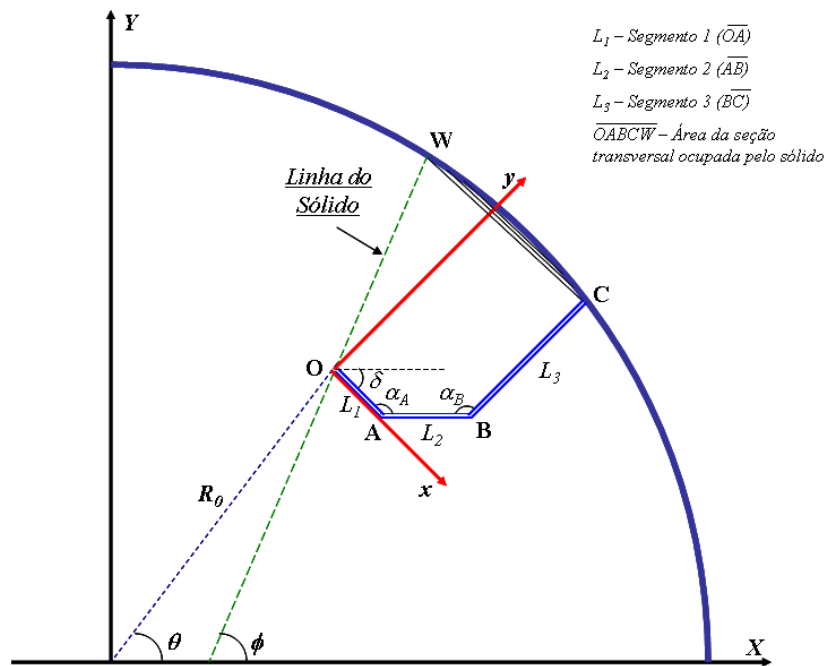


Figura 2.7 - Esquema ilustrando o conjunto de coordenadas estacionário (X,Y), com origem no eixo do tambor, e o móvel (x,y), com origem na ponta do suspensor, (ARRUDA, 2008).



Outra técnica também utilizada para estimar a carga de sólidos em tambores rotativos consiste na predição da profundidade ou altura do leito de sólidos na descarga. SPECHT *et al* (2010) realizaram estudos de fornos rotativos utilizando diferentes taxas de alimentação de sólidos, velocidades de rotação, ângulos de inclinação e dois diferentes diâmetros de tambores de laboratório de 0,4 m de diâmetro e 0,25 m com 6,7 m de comprimento. A profundidade de sólidos na descarga foi projetada para ser muitas vezes maior que o diâmetro das partículas.

Este estudo também concluiu que a profundidade final do material na descarga em tambores rotativos depende da taxa de alimentação, diâmetro do forno, velocidade de rotação, ângulo de repouso do material e do ângulo de inclinação inferior a 5 °. O valor também varia com o diâmetro de partícula. A influência de todas essas variáveis pode ser descrita usando um número adimensional, chamado de número de profundidade do leito (*Bed Depth Number* ou *BD*). Esse número pode ser obtido de um modelo construído para estimar o perfil axial da profundidade do leito.

Os autores observaram que uma faixa encontrada para o número de profundidade (BD) é adequada para todos os fornos industriais. Estes valores devem ser usados como condição inicial, para resolver a equação diferencial para o perfil da profundidade do leito de sólidos no cilindro.

## **2.7- Outros estudos de fluidodinâmica do secador rotatório**

ARRUDA (2008) estudou a fluidodinâmica para secadores rotatórios utilizando um secador contendo 1,5 m de comprimento e 0,3 m de diâmetro, sendo que sua estrutura foi construída de forma a permitir variações de inclinação e rotação do tambor e ainda possibilitar a montagem de qualquer número e tipo de suspensores. Nestes foram estudados três tipos de suspensores um com apenas dois segmentos (3x1 cm) e outros dois tipos de suspensores de três segmentos (3 x 1 x 1cm e 2 x 0,7 x 0,7cm).

A partir de ensaios experimentais e considerando a faixa recomendada de 10 a 15% em volume (MOYERS E BALDWIN, 1999), ARRUDA (2008) concluiu que a configuração na qual o secador apresentou melhores resultados de fração de sólidos totais no secador foi aquela que utilizou seis suspensores, velocidade rotacional de 3,6 rpm e ângulo de inclinação de 3° em relação ao solo.

A Figura 2.8 apresenta a fotografia das configurações com suspensores de 2 e 3 segmentos.

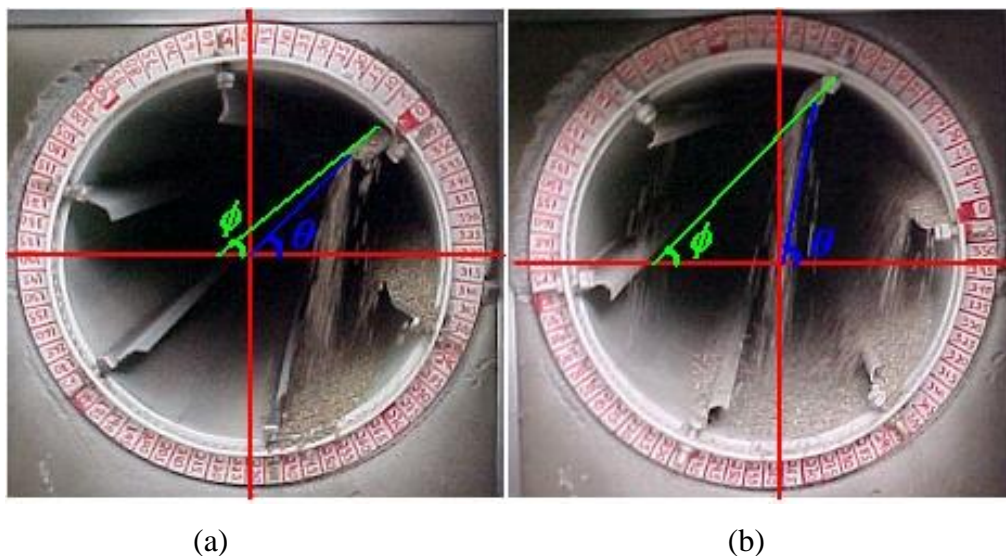


Figura 2.8 - Fotografias das medidas do ângulo dinâmico de repouso, com suspensores de 2 segmentos (a) e 3 segmentos (b) utilizadas por ARRUDA (2008).

Em outros ensaios ARRUDA (2008) obteve a medida de carga dos suspensores em função da sua posição angular no cilindro, efetuada por meio de paradas repentinas do secador em diversas posições angulares e posterior coleta do sólido.

Posteriormente ARRUDA (2008) utilizou a metodologia proposta por REVOL *et al.* (2001) para suspensores de três segmentos e a modificação proposta por LISBOA (2005) em suspensores de dois segmentos para o cálculo da carga de sólidos em função da posição angular dos suspensores e comparou-os com os resultados experimentais. Uma boa concordância foi obtida entre a previsão pela metodologia utilizada e os dados experimentais, sendo assim os autores concluíram que essa sistemática de projeto pode ser usada na predição do comportamento dos sólidos no interior do secador rotatório, uma vez conhecido o coeficiente dinâmico de fricção, as dimensões e condições operacionais.

Outras variáveis que também dependem da posição angular do secador são a altura e o tempo de queda das partículas, pois se os suspensores transportarem o sólido de forma que este maximize a altura de queda do sólido este estará proporcionando maior tempo de contato das partículas com o gás de secagem potencializando o coeficiente de transferência de calor e proporcionando maior taxa de secagem.

VAN PUYVELD (2009) também desenvolveu um modelo (GFRLift) capaz de prever a carga de sólidos nos suspensores durante o movimento rotacional para

suspensores com vários segmentos. Foram utilizados materiais de livre escoamento e considerou-se a umidade do sólido constante ao longo do secador. De acordo com o modelo, suspensores radiais, com apenas um segmento não conseguiram atingir o nível de preenchimento dos suspensores com maior número de segmentos.

A Figura 2.9 apresenta um esquema que ilustra os diferentes segmentos de um suspensor e os pontos usados no modelo (GFRLift). Para materiais de escoamento livre é razoável assumir que o topo da superfície de sólidos no suspensor ocorre no ângulo dinâmico de repouso do sólido e mantém este ângulo mesmo quando o sólido é descarregado.

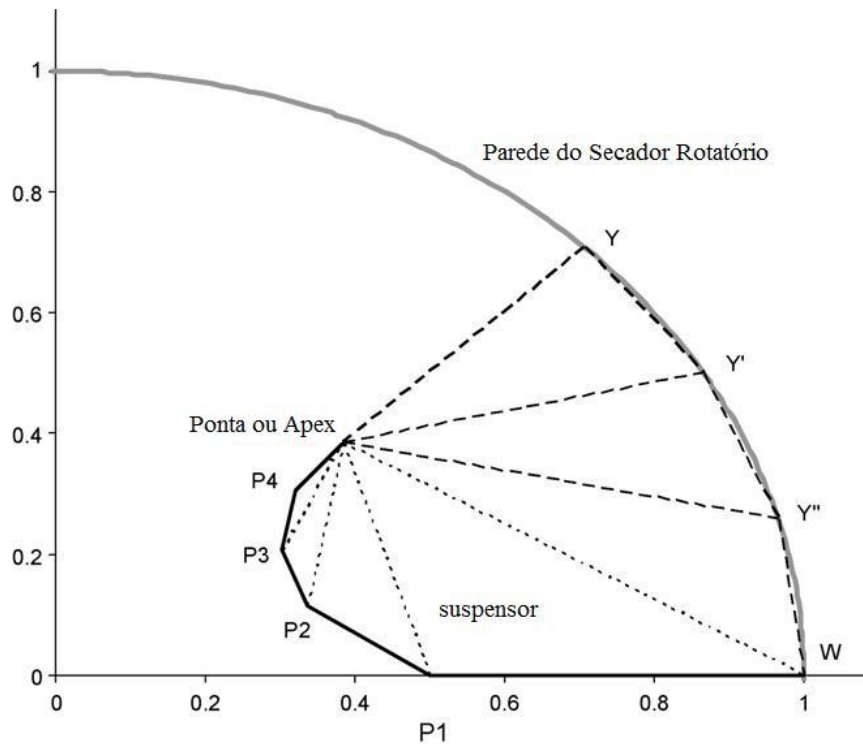


Figura 2.9 - Esquema do suspensor em 0° de rotação (VAN PUYVELD, 2009).

O volume de sólidos no suspensor é calculado em uma posição angular específica através da soma das áreas dos triângulos da Figura 2.6, multiplicada pelo comprimento longitudinal do suspensor, a Equação 2.8 apresenta este cálculo.

$$V_{suspensor}(\theta) = L(A_{Ponta-Y-Y'} + A_{Ponta-Y'-Y''} + \dots + A_{Ponta-P3-P4}) \quad (2.8)$$

A área de cada triângulo pode ser calculada usando a lei dos senos, a distância da parede do tambor à ponta do suspensor e o ângulo correspondente à ponta do suspensor. A Equação 2.9 nos apresenta esse cálculo.

$$A_{Ponta-W-P1} = \frac{1}{2} \overline{Ponta-W} \cdot \overline{Ponta-P1} (\text{seno}(W - Ponta - P1)) \quad (2.9)$$

Para posições angulares menores do que o ângulo dinâmico de repouso forma-se um volume fixo delimitado pela área abaixo da linha formada por  $W$  e a ponta do suspensor, enquanto para ângulos inferiores ocorre um volume variável correspondente à área preenchida por sólidos acima da linha de  $W$  à ponta do suspensor.

A área da região fixa pode ser facilmente calculada e a área variável é determinada pela interceptação da reta que passa pela ponta do suspensor e possui inclinação igual ao ângulo dinâmico de repouso com a circunferência da parede do tambor, através da resolução simultânea das Equações 2.10 e 2.11. O ponto  $b$  representa o ponto que a reta intercepta o secador.

$$y = \varphi x + b \quad (2.10)$$

$$y^2 + x^2 = r^2 \quad (2.11)$$

O ângulo entre  $W$  e  $Y$  na parede do secador é então estimado. Essa região é dividida em triângulos menores e as áreas são calculadas. O volume total é obtido a partir dessas três regiões (Equação 2.12).

$$V_{Suspensor} = L(A_{fixa} + A_{variável}) \quad (2.12)$$

Se a inclinação da ponta do suspensor até  $W$  for maior do que o ângulo dinâmico de repouso, a área variável estimada acima da linha é igual a zero. A área do triângulo seccionada pela linha do ângulo dinâmico de repouso é reduzida, isto pode ser feito até a posição em que o suspensor está praticamente vazio (VAN PUYVELD, 2009).

LEE E SHEEHAN (2010) apresentam um modelo geométrico do perfil de descarga de um suspensor de dois segmentos utilizando uma técnica de análise de imagens. O modelo é indicado para o cálculo do perfil de descarga, porém os resultados mostrados são altamente sensíveis ao ângulo da superfície do material. Fotografias

utilizando câmeras de alta velocidade foram usadas pelos autores para observar a superfície do material granular durante a descarga de sólidos. As imagens obtidas mostraram que a descarga do suspensor é descontínua, e que existem variações significativas no comportamento da descarga de sólidos.

LEE E SHEEHAN (2010) observaram a partir das análises de imagens fotográficas do sólido dentro do suspensor, que, em alguns momentos em que o processo de descarga é descontínuo, o ângulo de superfície dos sólidos não é constante em todo o processo de descarga. Isto contradiz duas das principais hipóteses feitas durante o desenvolvimento do modelo utilizado, no entanto a comparação entre as previsões do modelo e resultados experimentais indicam que estas suposições são adequadas sob as condições estudadas.

Em outro trabalho AJAYI E SHEEHAN (2012) apresentaram uma técnica alternativa de se obter o carregamento de sólidos em secadores rotatórios. Neste trabalho avaliou-se o uso da técnica de análise de imagens para caracterizar a descarga de sólidos em secadores rotatórios com suspensores. Foi realizado um tratamento específico das imagens e a partir destas quantificou-se a área de preenchimento dos suspensores e com os valores do comprimento dos suspensores e a densidade dos sólidos inferiu-se a massa de sólidos nos suspensores. Esta técnica mostrou-se satisfatória desde que se faça uma determinação precisa da área preenchida por sólidos nos suspensores.

## **2.8 - Transporte e tempo de residência**

A complexa movimentação do sólido no secador rotatório ocorre devido à existência de diferentes forças atuando no interior do tambor provocando deslizamentos e rolagem, queda e posterior choque inelástico com o fundo do tambor. Os componentes dessas forças responsáveis pelo avanço das partículas ao longo do secador são:

- Força gravitacional, devido à inclinação do secador,
- Força de arraste exercida pela corrente de gás
- Repique das partículas, devido a um choque com o fundo do tambor,
- Rolagem das partículas no leito do fundo do cilindro rotatório, principalmente quando o equipamento atua com sobrecarga.

MATCHETT e BAKER (1988) analisaram o movimento das partículas levando em conta duas fases desse escoamento, a fase aérea, em que as partículas caem contra a corrente de ar, e a fase densa, na qual as partículas encontram-se no fundo do secador, ou sendo conduzidas pelos suspensores. É importante lembrar que aproximadamente 90-95 % do tempo de residência da partícula o sólido encontra-se na fase densa e praticamente não ocorre secagem nesse período.

O movimento de rotação permite que as partículas sejam coletadas pelo suspensor e levantadas do fundo do secador até uma posição  $\theta$  entre 0 e  $180^\circ$ , de onde o sólido é abandonado. O avanço do sólido ao longo do comprimento do equipamento ocorre devido à inclinação do tambor, na ausência de fluxo de gás, a queda é vertical e a partícula cai a uma distância axial de  $D_o \sin(\theta) / \tan(\alpha)$  na qual foi coletada. Se o fluxo de gás for concorrente, as partículas avançam mais rapidamente, sendo que o inverso ocorre para fluxo contracorrente.

Os efeitos relacionados ao transporte das partículas afetam diretamente a carga de sólidos no secador que é uma variável que influencia diretamente na capacidade de transferência de calor. Os principais fatores que influenciam na carga do secador são: as características do material como densidade e forma, as variáveis de projeto do secador (comprimento, diâmetro e tipos de suspensores) e também as condições operacionais (vazão de sólidos, velocidade e direção do fluxo de gás, rotação e inclinação do tambor) (ALVAREZ e SHENE, 1994).

Um secador com grande capacidade de retenção de sólidos poderá operar em sobrecarga, o que ocasiona o transbordo sobre suspensores diminuindo o contato entre o gás e a partícula. Por outro lado, se o equipamento não for capaz de reter as partículas, operará abaixo da capacidade recomendada, o que impossibilita a descarga de sólidos com a umidade desejada.

O transporte das partículas influencia diretamente no tempo de residência. A existência de várias forças atuantes nas partículas ocasiona dificuldades em se encontrar uma equação capaz de prever esse movimento complexo dentro do secador rotatório. Assim vários autores propuseram equações empíricas e semi-empíricas capazes de estimar o tempo médio de residência do sólido no tambor.

A Equação 2.13 apresenta a forma mais simples de se calcular o tempo médio de residência, porém essa equação não considera as dispersões axiais.

$$\bar{\tau} = \frac{H^*}{G_S} \quad (2.13)$$

Esta estimativa consiste na razão entre a massa total de sólidos contida no secador em regime permanente ( $H^*$ ) (também conhecida por *holdup*), pela vazão de alimentação de sólidos ( $G_S$ ). As medidas de *holdup* podem ser feitas diretamente, porém industrialmente muitas vezes é inconveniente parar o sistema, descarregar o sólido e obter a massa contida no secador.

Uma correlação empírica muito conhecida e citada na literatura para a estimativa do tempo de residência foi a proposta por FRIEDMAN e MARSHALL (1949a, *apud* ARRUDA, 2008), Equação 2.14.

$$\bar{\tau} = L \left( \frac{A_{FM}}{\alpha N_R^{0,9} D} \pm \frac{B_{FM} G_f}{G_S d_P^{0,5}} \right) \quad (2.14)$$

Na Equação 2.14,  $G_S$  é a taxa de alimentação do sólido por unidade de área da seção transversal do secador. O sinal negativo da equação é usado para fluxo concorrente e o sinal positivo, para fluxo contracorrente.

SAEMAN e MITCHELL (1954, *apud* ARRUDA, 2008) propuseram uma equação baseada em análises teóricas do transporte do sólido através do secador, considerando as taxas de transporte incrementais associadas com caminhos individuais de cascadeamento. Assumindo uma relação linear entre o deslocamento horizontal das partículas devido ao fluxo de ar e as suas velocidades, os autores propuseram a Equação 2.15 para estimativa do tempo médio de residência.

$$\bar{\tau} = \frac{L}{f(H^*) D N_R [\tan(\alpha) \pm m'v]} \quad (2.15)$$

O valor do fator de cascata ( $f(H^*)$ ) varia em, para secadores ligeiramente carregados, e para secadores muito carregados e com suspensores pequenos. O sinal positivo na Equação 2.15 é usado para fluxo concorrente e o sinal negativo, para fluxo contracorrente. O parâmetro  $m'$  é uma constante empírica. Os autores desenvolveram um modelo para a estimativa desta constante, mas concluíram que é mais fácil medi-la, do que obter os parâmetros requeridos para sua estimativa.

PERRY e CHILTON (1974) propuseram então a Equação 2.16.

$$\bar{\tau} = \frac{k_p L}{D N^{0,9} \tan \alpha} \quad (2.16)$$

PERRY e CHILTON (1974), ao propor a Equação 2.16 utilizaram resultados experimentais obtidos por FRIEDMAN e MARSHALL (1949a) quem apresentaram uma ampla faixa de tempos de residência. Estes autores perceberam que o *holdup* do secador é afetado pelo número de suspensores em baixas taxas de alimentação, geralmente valores menores do que os utilizados em secadores industriais.

BRITTON *et al.* (2006) publicaram um modelo de distribuição do tempo de residência considerando o efeito dos suspensores de dois segmentos em um secador industrial de açúcar utilizando traçadores. O secador deste estudo continha 28 suspensores igualmente espaçados e fluxo de ar contracorrente.

O modelo de BRITTON *et al.* (2006) considerava um secador dividido em várias fatias ou células que consideravam a fase ativa e passiva das partículas. O modelo combina uso de tanques em séries e análises da geometria dos suspensores, consistindo num modelo dinâmico do transporte de sólidos que responde à variações na taxa de alimentação e rotação do tambor.

PAN *et al.* (2006) realizaram experimentos com o intuito de avaliar o transporte de partículas e o tempo médio de residência em um tambor rotativo com suspensores inclinados. Foi desenvolvido um modelo, baseado na movimentação das partículas, para calcular o tempo médio de residência. As validações experimentais foram realizadas em diferentes condições mostrando que o modelo teve bons resultados. Os resultados experimentais mostraram que a taxa de alimentação tem uma influência muito pequena sobre o tempo médio de residência, e que a relação entre o tempo médio de residência e a inclinação dos suspensores é inversamente proporcional, e a velocidade rotacional afeta o tempo médio de residência de forma exponencial negativa, que é semelhante ao que ocorre com o tambor inclinado convencional.

Outro estudo da fluidodinâmica de escoamento das partículas em secadores rotatórios convencionais concorrentes, com suspensores de três segmentos, foi realizado por SILVÉRIO *et al.* (2011). Foram observadas as influências de variáveis operacionais (velocidade do ar, taxa de alimentação de sólidos, velocidade rotacional e ângulo de inclinação) sobre o *holdup* e o tempo de residência de partículas de fertilizante. Este estudo possibilitou verificar a contribuição do aumento da rotação e da velocidade do ar para a diminuição do *holdup* e do tempo de residência. Também o incremento do ângulo de inclinação promove a diminuição do *holdup* e do tempo de residência. O estudo



também permitiu verificar que com o aumento da taxa de alimentação há um grande aumento do holdup e um pequeno aumento do tempo de residência.

Os estudos fluidodinâmicos, do secador rotatório permitem observar e determinar as condições que propiciam faixas de carregamento ideais, quantificar o tempo médio de residência das partículas e assim, dessa forma, com o equipamento operando em condições adequadas, garantir eficiente transferência de calor entre gás-partícula.

## 2.9 - Transferência de calor em secadores rotatórios

Durante a secagem o calor é absorvido pelo sólido para evaporação da água ou em alguns casos outros componentes voláteis, e os vapores formados são removidos juntamente com o gás de secagem.

A expressão utilizada para a transferência de calor em secadores rotatórios de contato direto em função do coeficiente global, ou volumétrico de transferência de calor ( $U_{va}$ ) é a Equação 2.17.

$$Q = U_{va} V \Delta T_{ln} \quad (2.17)$$

Sendo que  $Q$  é a taxa de transferência de calor entre o gás e os sólidos,  $V$  é o volume do secador, e  $\Delta T_{ln}$  é a diferença média logarítmica de temperatura entre o gás e as partículas.

O coeficiente volumétrico  $U_{va}$  é o produto do coeficiente de transferência de calor, baseado na área efetiva de contato entre o gás e o sólido, e a relação dessa área para o volume do secador.

Segundo MUJUMDAR (2007), alguns autores realizaram diversos estudos para avaliação do  $U_{va}$ . Um dos primeiros estudos extensivos para transferência de calor em secadores rotatórios afetada pelo número de suspensores foi realizado por MILLER *et al* (1942), representado nas Equações 2.18 e 2.19:

$$Q = 1,02LD \frac{(N-1)}{2} G^{0,46} \Delta T_{ln} \quad \text{para 6 suspensores} \quad (2.18)$$

$$Q = 0,228LD \frac{(N-1)}{2} G^{0,60} \Delta T_{ln} \quad \text{para 12 suspensores} \quad (2.19)$$

Nestas equações,  $Q$  é dado em Watts e  $L$  e  $D$  são dados em metros; o escoamento mássico de ar  $G$  é dado em  $\frac{kg}{m^2 \cdot h}$  e  $\Delta T_{ln}$  em Kelvin. O termo  $(N-1)/2$  representa o

número de suspensores na metade superior do secador. O produto  $LD(N-1)/2$  é então proporcional à área total de todas as partículas caindo em cascata.

Comparando essas duas equações com a Equação 2.17 pode-se expressar o coeficiente global volumétrico de transferência de calor, na forma das Equações 2.20 e 2.21,  $U_{VA}$  é dado em  $W/m^3 K$ :

$$U_{VA} = 0,652(N-1)D^{-1}G^{0,46} \quad \text{para 6 suspensores} \quad (2.20)$$

$$U_{VA} = 0,145(N-1)D^{-1}G^{0,60} \quad \text{para 12 suspensores} \quad (2.21)$$

FRIEDMAN e MARSHALL (1949b), concluíram que essa análise possui algumas simplificações que não permitem prever com precisão a transferência de calor, pois o calor perdido pelo secador não é levado em consideração, além das dúvidas existentes das correlações entre a transferência de calor e o número de suspensores.

Assim o *scale-up* da transferência de calor requer cautela e experiência. Eles encontraram que  $U_{va}$  varia proporcionalmente com o *holdup* dos sólidos (como um percentual do volume do tambor) e aumenta com a vazão de gás.

Os autores propuseram que o coeficiente global de transferência de calor em secadores rotatórios pode ser expresso por correlações como a da Equação 2.22.

$$U_{va} = K_F G_f^{m_F} G_S^{n_F} \quad (2.22)$$

Sendo que,  $G_S$  e  $G_f$  são as vazões mássicas de sólido e fluido em base seca, respectivamente.  $K_F$ ,  $m_F$  e  $n_F$  são parâmetros da Equação 2.22.

McCORMICK (1962), avaliou os dados disponíveis na época e concluiu que uma simples e resumida expressão para o coeficiente volumétrico de transferência de calor ( $U_{VA}$ ) poderia ser utilizada, a Equação 2.23.

$$U_{VA} = \frac{K_F G_f^{n_F}}{D} \quad (2.23)$$

Utilizando os dados de FRIEDMAN e MARSHALL (1949b), as constantes teriam os valores:  $K_F = 44$  e  $n_F = 0,16$ . De acordo com McCORMICK (1962) a

constante  $K_F$  é responsável pela contribuição da geometria do suspensor e da velocidade de rotação do tambor. Este autor demonstrou também que todos os dados experimentais analisados por ele poderiam ser correlacionados com  $0,46 < n_F < 0,67$ .

MYKLESTAD (1963), *apud* BAKER (1983), através de dados experimentais obtidos a partir de um secador de 0,2 m de diâmetro por 2 m de comprimento e que continha suspensores angulares, propôs uma correlação que relaciona o coeficiente global volumétrico de transferência de calor com a vazão mássica de ar apenas, ou seja, o coeficiente global volumétrico de transferência de calor é independente do diâmetro do secador, Equação 2.24.

$$U_{VA} = K_F G_f^{m_F} \quad (2.24)$$

Outra análise da transferência de calor utilizando números adimensionais pode ser feita utilizando analogia de CHILTON-COLBURN no qual  $j_D$  é o fator de transferência de massa e o  $j_H$  o fator de transferência de calor e  $f$  o fator de atrito, mostrados na Equação 2.25:

$$j_H = j_D = \frac{f}{2} = \frac{h}{\rho_f v C_{pf}} \text{Pr}^{2/3} \quad (2.25)$$

Em que  $C_{pf}$  é o calor específico deste fluido.

Conhecendo-se o fator de transferência de calor, conhece-se também o fator de transferência de massa como no coeficiente de difusão. Outra forma de expressão para o fator de transferência de calor é através do número de *Reynolds* ( $Re$ ):

$$j_H = a Re^n \quad (2.26)$$

PORTER (1963) propôs algumas simplificações para tornar possível a obtenção da solução analítica aproximada para o coeficiente de transferência de calor local: o perfil de temperatura do gás ao longo do secador é conhecido, no secador, a temperatura do gás é constante ao longo de qualquer trajetória de queda de uma única partícula, não há nenhuma perda de calor do secador para a vizinhança, não há nenhuma transferência de calor entre a partícula e o ambiente durante o período de saturação e a temperatura da partícula se torna uniforme durante cada período de saturação (BAKER, 1983).

Foram encontradas duas condições limites para a operação de secadores e resfriadores. Com números de Fourier altos, a transferência de calor é controlada pelo filme de gás e a difusão térmica dentro dos sólidos é desprezível. Sob estas condições, os fatores dominantes para troca de calor são o contato gás-sólido e o tempo que as

partículas permanecem nos suspensores. Para baixos números de Fourier, a taxa de transferência de calor é controlada pela resistência interna da partícula (BAKER, 1983).

ARRUDA (2008) realizou ensaios experimentais para dois tipos de secadores (convencional e roto-aerado) e encontrou ajustes para as correlações de FRIEDMAN e MARSHALL (1949b) e de MYKLESTAD (1963), para  $U_{va}$  e  $U_P$ , respectivamente. Foram escolhidos os secadores com suspensores de 3 segmentos, 2x0,7x0,7 cm, e o roto-aerado com mini-tubos de 9 mm pois apresentaram o melhor desempenho dentre as duas versões estudadas.

Assim, os parâmetros para o coeficiente global volumétrico de transferência de calor ( $U_{va}$ ) e para o de calor perdido ( $U_P$ ) do secador rotatório convencional utilizado nos experimentos de ARRUDA (2008) foram os das Equações 2.27 e 2.28.

$$U_{va} = 3,535G_f^{0,289}G_S^{0,541} \quad (2.27)$$

$$U_P = 0,227G_f^{0,879} \quad (2.28)$$

Para o rotoaerado na configuração com 56 minitubos de 9 mm de diâmetro (RT-03) usada por ARRUDA (2008) esses coeficientes podem ser calculados pelas Equações 2.29 e 2.30.

$$U_{va} = 29,765G_f^{-0,129}G_S^{0,968} \quad (2.29)$$

$$U_P = 0,387G_f^{1,148} \quad (2.30)$$

## 2.10 - Umidade de equilíbrio

Define-se umidade de equilíbrio como o teor de umidade de um determinado material, correspondente ao equilíbrio entre as pressões de vapor da água no sólido e no meio ambiente, para uma determinada temperatura e umidade relativa do ar na vizinhança. A importância do conhecimento do teor de umidade de equilíbrio reside no fato que esta variável equivale ao teor mínimo de umidade que pode ser atingido por um material em um especificado conjunto de condições de operação. Sendo assim a umidade de equilíbrio constitui-se em uma variável de suma importância na modelagem do processo de secagem, bem como na análise e projeto de secadores.

Os dois métodos convencionais utilizados para determinação de umidade de equilíbrio são o método estático e o método dinâmico. No primeiro, o ar que circunda o

sólido não está em movimento e na segunda técnica, o fluido se movimenta ao redor do sólido. O método estático apresenta maior facilidade de se obter condições termodinâmicas constantes quando comparado ao método dinâmico, constituindo assim em um método mais vantajoso. No método estático, a pressão de vapor nas vizinhanças da partícula pode ser regulada tanto pela utilização de soluções ácidas de diversas concentrações como pelo uso de soluções salinas saturadas, possibilitando assim a adequada obtenção das isotermas de equilíbrio para um dado material (LABUSA *et al.*, 1985; BARROZO, 1995). Soluções ácidas também podem ser utilizadas, mas apresentam dificuldades em seu manuseio e na estabilidade da umidade relativa.

Há um grande número de equações teóricas (baseadas nas teorias cinéticas de adsorção), semi-empíricas e empíricas propostas para estimativa de umidade de equilíbrio de diversos materiais.

ARRUDA (2008) obteve dados experimentais de umidade de equilíbrio do fertilizante super fosfato simples granulado pelo método estático em soluções salinas. Este analisou a adequação de algumas equações propostas na literatura aos dados experimentais e observou que o melhor ajuste foi obtido pela equação de HALSEY modificada (Equação 2.31).  $M_{eq}$  refere-se ao teor de umidade de equilíbrio dos grãos ou partículas, UR representa a umidade relativa do ar que circunda a amostra de sólidos, e  $T_s$  é o valor da temperatura do sólido.

$$M_{eq} = \left( \frac{-\exp(-0,045T_s - 2,08)}{\ln(UR)} \right)^{\frac{1}{1,435}} \quad (2.31)$$

Para o estudo do processo de secagem em secadores rotatórios é necessário o estudo das isotermas de equilíbrio do material particulado utilizado. Essa informação é usada na avaliação do adimensional de umidade ( $MR$ ) determinado experimentalmente por meio da cinética de secagem em camada fina, para posterior ajuste das correlações empíricas de cinética mostradas na seqüência, assim a umidade de equilíbrio definirá o teor mínimo de umidade que o sólido pode atingir em uma determinada condição de secagem. Sendo assim, para o fertilizante utilizado no presente trabalho, a Equação 2.31 foi obtida pelo ajuste feito por ARRUDA (2008).

## 2.11 - Cinética de secagem

O processo de secagem pode ocorrer em taxa constante se nesse período a resistência interna ao transporte de umidade é muito menor do que a resistência externa de retirada da umidade da superfície. Posteriormente ocorrem períodos em que a taxa de secagem decresce de forma contínua. O final do período de taxa de secagem constante e início do período de taxa decrescente ocorrem em um valor de umidade conhecido por umidade crítica, sendo que alguns materiais podem apresentar dois ou mais desses pontos, (KEEY, 1972).

De acordo com KEMP e OAKLEY (2002), para descrever o período de taxa decrescente, um modelo de cinética de secagem deve ser escolhido levando-se em consideração se a modelagem será baseada em um modelo de parâmetros concentrados ou distribuídos. A descrição matemática desse período depende da solução simultânea de equações não lineares envolvendo vários parâmetros, característicos de cada material. O sucesso da aplicação de um determinado modelo depende de medidas precisas desses parâmetros, o que nem sempre é possível. Como exemplo, pode-se citar a tortuosidade, a distribuição de tamanho dos poros e os coeficientes de difusão em sólidos.

Sabe-se que os modelos clássicos de secagem em camada fina isoladamente não descrevem adequadamente o processo de transferência de calor e massa em camadas espessas, uma vez que os balanços de massa e energia da fase gasosa não são considerados. Entretanto, estes estudos são indispensáveis na predição das equações para a taxa de secagem, utilizadas na modelagem dos fenômenos de transferência em leitos de camada espessa (BARROZO, 1995).

A Tabela 2.3 apresenta as equações mais citadas na literatura para secagem em camada fina. As Equações de PAGE (1949) e OVERHULTZ *et al.* (1973) são oriundas de modificações empíricas da equação de LEWIS (1921).

O parâmetro  $K_M$ , apresentado nestas equações, é conhecido como constante de secagem e, no caso dos trabalhos que utilizam equações oriundas do modelo difusivo, é comum encontrar uma relação de  $K_M$  com a difusividade efetiva de acordo com a Equação 2.35.

Tabela 2.3 - Equações semi-empíricas de secagem.

<i>Equação</i>	<i>Referência</i>
$MR = \exp(-K_M t)$ $K_M = A \exp(-B/T_f)$	LEWIS (1921)
$MR = \exp(-K_M t^n)$ $K_M = A \exp(-B/T_f)$	PAGE (1949)
$MR = \exp(-(K_M t)^n)$ $K_M = \exp(A + B/T_f)$	OVERHULTZ <i>et al.</i> (1973)

$$K_M = \frac{D_{ef} \pi^2}{R_p^2} \quad (2.35)$$

Estudos feitos por ARRUDA (2008) mostram que, para o fertilizante super fosfato simples granulado, as equações de PAGE (1949) e de OVERHULTZ *et al.* (1973) foram as que melhor se ajustaram aos dados de cinética de secagem do fertilizante em camada fina, sendo que os valores confirmam que o modelo de PAGE (1949) ajustou-se com qualidade superior às demais equações analisadas, ao longo de toda a curva de secagem. A Equação 2.36 apresenta o modelo de PAGE ajustado aos valores experimentais de ARRUDA (2008).

$$MR = \exp \left[ -0,431 \exp \left( \frac{-121,845}{T_f} \right) t^{0,392} \right] \quad (2.36)$$

## **2.12 – Simulação computacional de sistemas**

O conhecimento da fluidodinâmica do sistema é de suma importância para o projeto e otimização de equipamentos.

O crescente avanço da tecnologia dos computadores abriu novas possibilidades para a abordagem de problemas que exigem cálculos e soluções para os mais completos modelos matemáticos, como é o caso das simulações pela técnica da fluidodinâmica computacional (CFD). A utilização de CFD para as simulações da fluidodinâmica e secagem é de fundamental importância para a compreensão dos fenômenos envolvidos (GRACE E TAGHIPOUR, 2004).

Um melhor entendimento dos fenômenos envolvidos na fluidodinâmica de um secador rotativo para que a operação de secagem seja otimizada, passa necessariamente pelo desenvolvimento de uma modelagem com base nas equações de conservação de massa, momento e energia, com suas equações constitutivas pertinentes, bem como pelo acoplamento de pressão e velocidade.

A validação dos modelos empregados pode atenuar problemas de contato sólido-gás, ou mesmo indicar a necessidade de modificação da configuração e de condições operacionais, a fim de propiciar um melhor escoamento das partículas sólidas e um melhor contato gás-partícula.

A resolução numérica dos escoamentos multifásicos pode ser compreendida tanto pela abordagem Euler-Lagrange, quanto pela abordagem Euler-Euler.

### *Abordagem Euler-Euler*

A resolução numérica dos escoamentos multifásicos pela abordagem Euler-Euler considera que as diferentes fases do sistema são matematicamente contínuas e interpenetrantes. Assim surge o conceito de fração volumétrica das fases que são funções contínuas no espaço e no tempo e a soma das mesmas é igual a um. Assim, equações de conservação para cada fase são apresentadas para modelar o escoamento multifásico com a necessidade da utilização de equações constitutivas, que são obtidas a partir de informações empíricas, ou no caso do escoamento granular, pela aplicação da teoria cinética granular.



Vários pesquisadores estão dedicando esforços na área de escoamentos multifásicos no sentido de se desenvolver modelos matemáticos que reproduzam processos multifásicos e técnicas numéricas adequadas à solução destes modelos.

A Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI/UFU) tem proposto e desenvolvido trabalhos que empregam a técnica de simulação CFD como ferramenta auxiliar na compreensão dos fenômenos inerentes a processos como:

- otimização do recobrimento de sementes de soja em leito de jorro (DUARTE, 2006);
- identificação de regimes de escoamento em leito de jorro (LOURENÇO, 2006) e fluidodinâmica do leito de jorro (VIEIRA NETO, 2006; SANTOS, 2007);
- separação em hidrociclones convencionais e filtrantes (VIEIRA, 2006; LACERDA, 2007; ALMEIDA, 2008, FAÇANHA, 2012);
- escoamento laminar de fluidos não Newtonianos em seções anulares (PEREIRA, 2006; VIEIRA NETO, 2011);
- fluidodinâmica de esferas leves e bolhas em líquidos (MELO, 2007);
- extração mecânica da bixina a partir de urucum em leito de jorro (CUNHA, 2008);
- limpeza de gases em lavador venturi (GAMA, 2008);
- filtração em filtros manga (ROCHA, 2010).
- efeito de diversos modelos de arraste sobre os perfis de porosidade no leito de jorro e velocidade dos sólidos SANTOS (2011a).
- fluidodinâmica de partículas de diferentes tamanhos em reatores de leito de jorro utilizados para pirólise de biomassa (SANTOS, 2011b).

Os resultados do uso de um modelo Euleriano Granular Multifásico, em trabalhos preliminares, revelaram o bom potencial da técnica na previsão do comportamento fluidodinâmico do leito de jorro (DUARTE *et al.*, 2005).

É importante lembrar que, equipamentos como os secadores rotatórios são geralmente bifásicos, coexistindo na maioria dos casos a fase sólida (partículas) e a fase gasosa (ar). Sendo assim, é importante conhecer os principais modelos multifásicos, bem como as considerações adotadas pelo FLUENT ANSYS®, empregados neste trabalho.

O FLUENT ANSYS® apresenta três modelos diferentes que utilizam a abordagem Euler-Euler: o Modelo *Volume of Fluid* (VOF), o Modelo de Mistura e o Modelo Euleriano.

O modelo VOF consiste na técnica de rastreamento de superfície aplicada à malha fixa Euleriana. Ele é projetado para dois ou mais líquidos imiscíveis em que a posição da interface entre os fluidos é de interesse. No modelo VOF, um único conjunto de equações de momento é compartilhada pelos líquidos, e a fração de volume de cada um dos fluidos em cada célula computacional é considerada em todo o domínio. As aplicações do modelo VOF incluem fluxos estratificados, os fluxos de superfície livre em tanques agitados, enchimento, o movimento de grandes bolhas num líquido, o movimento do líquido após uma ruptura de barragens, a previsão de rompimento do jato (tensão superficial), e no monitoramento constante ou transitório de qualquer interface gás-líquido (VIEIRA, 2006).

O Modelo de Mistura é projetado para duas ou mais fases (fluido ou partícula) que são tratados como contínuas interpenetrantes. O Modelo de Mistura resolve as equações dinâmicas de mistura e fornece a velocidade relativa para descrever as fases dispersas. Este modelo é utilizado em sistemas diluídos, ou seja, com fração volumétrica da fase discreta menor que 10%, geralmente utilizados em escoamentos com bolhas, sedimentação e separadores como ciclones ou hidrociclones (FLUENT ANSYS 2006).

O modelo Euleriano resolve um conjunto de equações de momento e continuidade para cada fase. O acoplamento é realizado através da pressão e troca de coeficientes de transferência entre as fases. A maneira em que este acoplamento é tratado depende do tipo de fases envolvidas (VIEIRA, 2006). No escoamento granular (fluido-partícula), os fluxos são tratados de maneira diferente do que no escoamento não-granular (fluido-fluido). Para fluxos granulares, as propriedades são obtidas a partir da aplicação de teoria cinética granular. A mudança no momento entre as fases também depende do tipo de mistura que está sendo modelada. O Modelo Multifásico Euleriano é o mais complexo modelo multifásico do FLUENT ANSYS® e pode ser utilizado, por exemplo, para simulação de colunas de bolhas, sedimentadores, leito de jorro e leito fluidizado (FLUENT ANSYS 2006).

### *Abordagem Euler-Lagrange*

A abordagem Euler-Lagrange consiste em modelar a fase contínua utilizando as equações de Navier-Stokes, ausente da fase discreta, utilizando-se das informações fluidodinâmicas como dados de entrada para a descrição do comportamento da fase discreta.

O modelo de fase discreta Lagrangeano segue a aproximação de Euler- Lagrange. A fase fluida é tratada como contínua pela resolução das equações de Navier-Stokes calculadas no tempo, enquanto a fase discreta é resolvida injetando-se um grande número de partículas, bolhas ou gotas, através do campo de escoamento calculado e são tratadas pela mecânica clássica do corpo sólido, especificamente pela aplicação da 2ª Lei do movimento de Newton, sendo considerada a interação de momento, massa e energia da fase discreta com a fase fluida (SANTOS, 2007).

Dentre as dificuldades encontradas na abordagem Lagrangeana, podemos ressaltar a necessidade de utilizar correlações para descrever as interações partícula-parede, partícula-partícula e partícula-gás e a dificuldade em prever as variáveis de campo para a fase particulada, dificultando a visualização científica dos fenômenos que influenciam nas trajetórias das partículas (DECKER *et al.*, 2004).

Um método aplicado para a abordagem Lagrangeana consiste na utilização de modelos DEM (Discret Element Method) ou Método dos Elementos Discretos, que permite simular partículas em movimento como pontos de massa em sistemas concentrados. É importante ressaltar que os detalhes do fluxo em torno das partículas (formação de vórtices, a separação do fluxo, as camadas de limite) são negligenciadas. Desta forma, alguns dos modelos utilizados em códigos convencionais DEM restringem sua aplicabilidade a sistemas contendo apenas a fase discreta.

A literatura apresenta alguns modelos utilizados na metodologia DEM para melhor predição das forças de contato. DI RENZO (2004) comparou três modelos para forças de contato, e numa comparação macroscópica o modelo linear "mola-amortecedor" (*spring-dashpot*) estudado mostrou bons resultados para a predição das forças de contato.

Uma maneira intuitiva e simples de modelar as relações mecânicas consiste em se utilizar combinações de elementos mecânicos lineares em série ou em paralelo, a fim de representar um sistema dinâmico com características apropriadas. Esta foi a idéia de

CUNDALL e STRACK (1979), que propuseram um modelo linear paralelo “mola-amortecedor” para a direção normal e um “mola-amortecedor” linear paralelo em série com um controle deslizante para a direção tangencial. O termo “mola” se refere à contribuição das forças elásticas para a resposta enquanto o termo “amortecedor” se refere à dissipação devido à deformações plásticas. Desta forma apenas as colisões friccionais e elásticas são consideradas, sendo assim os parâmetros materiais usados na definição do modelo são as coeficiente elástico (ou de mola) normal e tangencial  $K_n$  e  $K_t$  e o parâmetro relacionado ao coeficiente de fricção  $\mu_f$ . Estes parâmetros aparecem nas relações das forças de deslocamento para o cálculo das forças normais e tangenciais (DI RENZO, 2004).

De fato, o método DEM tem se mostrado uma técnica computacional cada vez mais utilizada para simular o comportamento de sistemas em fase discreta em aplicações na indústria e em estudos científicos.

A literatura mostra vários trabalhos de estudos e verificações de modelos que se utilizam de vários parâmetros, dependendo do processo e material analisados. Alguns dos parâmetros utilizados, por exemplo, no modelo linear "mola-amortecedor", citado anteriormente, são os coeficientes de restituição ( $\eta$ ), de fricção ( $\mu_f$ ) e o coeficiente de elasticidade ou mola ( $k$ ).

Diante da vasta faixa de parâmetros possíveis em modelos propostos para a metodologia DEM de simulação em fase discreta, a Tabela 2.4 apresenta alguns dos parâmetros relacionados aos coeficientes utilizados na predição de forças de contato de alguns trabalhos encontrados na literatura. Nela verificamos também o *time step* utilizado em cada simulação bem como o número de partículas.

Observa-se na Tabela 2.4, que os valores encontrados para os parâmetros dos modelos utilizados nos trabalhos de simulação DEM, variam significativamente, uma vez que cada simulação foi conduzida para equipamentos distintos e representando o escoamento de partículas feitas de material diferente as quais podem conduzir diferentes respostas de colisões partícula-partícula e partícula-parede. Sendo assim verifica-se a importância em se estudar a influência e a interação dos parâmetros do modelo utilizados na simulação DEM, para encontrar um melhor conjunto de parâmetros que melhor caracterize o sistema em estudo.

Tabela 2.4 – Parâmetros utilizados nos modelos DEM em vários trabalhos da literatura.

n°	Autores	Equipamento	Material	dp (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	n° partículas	$\eta$	k (N/m)	$\mu_f$	time step (s)
1	NEUWIRTH <i>et al</i> (2012)	leito fluidizado	polímero	6	1800	5900	0,83 e 0,85	-	0,25 e 0,32	-
2	REMY <i>et al</i> (2011)	misturador	esfera de vidro	2 to 4	2200	14000 a 20000	0,6	-	0,5	-
3	CHAUDHURI <i>et al</i> (2010)	calcinador	tanoeiro	2	8900	8000	0,8	6000	-	3. 10 <sup>-6</sup>
4	ANAND <i>et al</i> (2009)	hopper	esfera de aço	2,35	7850	6790	-	250-308	0,2	-
5	GENG <i>et al</i> (2009)	secador rotatório	cilindros de alumínio	2	2700	-	0,02	-	0,2 e 0,3	10 <sup>-5</sup>
6	FRIES <i>et al</i> (2012)	leito fluidizado	alumina	2	1500	25.10 <sup>4</sup>	0,8	-	0,1	10 <sup>-6</sup>
7	JIANG <i>et al</i> (2011)	tambor rotativo	esfera de vidro	1,5 a 3	2600	15000	0,9	-	0,3	5. 10 <sup>-5</sup>
8	KETTERHAGEN <i>et al</i> (2008)	hopper	esfera de vidro	0,5 a 2,24	2500	35500	0,94	250-308	0,1 e 0,15	-
9	LI <i>et al</i> (2012)	leito fluidizado	sementes de papoula	1,2	1000	9240	0,98	200	0,1	-
10	LI <i>et al</i> (2013)	leito de jorro	esfera de vidro	4,04	2526	44,8	0,87	800	0,1	-
11	LI <i>et al</i> (2009)	hopper	esfera de vidro	10	2460	-	-	-	0,15; 0,13	1,14. 10 <sup>-6</sup>
12	ZHONG <i>et al</i> (2006)	leito de jorro	-	1,5 a 3,0	1020	62000	0,9	800	0,3	10 <sup>-6</sup>
13	SAHNI <i>et al</i> (2011)	-	-	-	1600	4.10 <sup>4</sup> a 10 <sup>5</sup>	0,7	6000	0,7	2. 10 <sup>-6</sup>
14	REN <i>et al</i> (2012)	-	milho	6,6 e 6,4	1385	23956 e 26482	0,59	-	0,34	1. 10 <sup>-6</sup>
15	STEFAN RADL <i>et al</i> (2010)	misturador	esfera de vidro	3	2500	-	0,98; 0,8, e 0,7	105000	0,5	-
16	REMY <i>et al</i> (2011)	misturados	-	2 a10	2200	14000 e 20000	0,6	-	-	< 10 <sup>-5</sup>
17	LU <i>et al</i> (2008)	-	-	2	2508	1000	0,93	109680	0,5	10 <sup>-6</sup>

### 2.13- Aplicabilidade de CFD em tambores rotativos

As técnicas de CFD tem se mostrado uma ferramenta importante para a compreensão de resultados obtidos em diversos equipamentos da indústria. Recentemente vários trabalhos de simulação com tambores rotativos foram realizados para avaliação dos efeitos de mistura e transferência de calor nesses equipamentos.

GENG *et al* (2009) realizaram a simulação em 3D do processo de mistura de partículas finas e alongadas em secadores rotativos convencionais com suspensores. A movimentação das partículas foi modelada por DEM (Método dos Elementos Discretos) em 3D e também foi desenvolvido um modelo para a colisão das partículas.

Foram consideradas no desenvolvimento dos modelos matemáticos: a força de contato entre as partículas, a força de atrito e a força gravitacional que age sobre uma partícula individualmente. A influência da velocidade de rotação do equipamento na mistura das partículas foi observada e comparada com os resultados para partículas esféricas sob condições operacionais idênticas.

O trabalho de GENG *et al* (2010) verificou que as características de mistura de partículas finas alongadas e partículas esféricas apresentaram taxa de mistura constante até um estado completamente misturado com algumas diferenças entre os dois tipos de partículas.

ALONSO *et al* (1991), *apud* XU *et al* (2010), investigaram a segregação de partículas em um cilindro rotativo quase-2D (84 milímetros de diâmetro e 18mm de comprimento) utilizando esferas de vidro, de plástico e esferas de aço e de chocolate de diferentes diâmetros (0,7 a 5 mm), para mostrar que as partículas menores e as mais densas tendem a se concentrar no núcleo do leito, e que o tamanho e densidade pode compensar um ao outro para reduzir a segregação.

JAIN *et al* (2005) estudaram a segregação e mistura em um tubo de vidro quase-2D circular (280 milímetros de diâmetro), usando esferas de vidro e de aço ambas com 4mm de diâmetro, indicando que a segregação pode resultar tanto da percolação ou flutuação, ou ambos, e demonstrando que a mistura pode ser alcançada quando as esferas densas também são maiores e quando a relação do tamanho das partículas é maior do que a densidade das partículas.

XU *et al* (2010) avaliou o comportamento da mistura das esferas de vidro de mesmo tamanho em um tambor rotativo utilizando simulações modeladas por DEM e

comparando com resultados experimentais. Os experimentos indicaram que quanto maior a velocidade de rotação houve uma melhora significativa na mistura.

As simulações de XU *et al* (2010) também revelaram que a densidade e tamanho das partículas são os fatores que mais influenciaram a mistura, enquanto o efeito do coeficiente de fricção é menos significativo. XU *et al* (2010) utilizou neste estudo o modelo esférico de contacto com base no trabalho de THORTON (THORTON e YIN, 1991), a força normal é determinado pela Teoria Hertzianas, e a força tangencial é modelada pela teoria de Mindlin e Deresiewicz, conforme descrito em LI *et al* (2005). Estes experimentos e simulações de mistura provaram evidências anteriores do regime de classificação do comportamento de mistura das partículas e demonstrou que a velocidade rotacional é um fator dominante uma vez que, maiores velocidades rotacionais afetam significativamente a mistura das partículas.

LIU *et al* (2010) realizaram um estudo que avaliou um modelo bidimensional algébrico de mistura e deslizamento (ASM), para um sistema contendo as fases líquida, gasosa e partículas sólidas em um tambor rotativo. Este trabalho teve como foco o escoamento, a mistura de sólidos e o *holdup* de gás em tambores rotativos variáveis que podem ser influenciadas pela taxa de aeração e velocidade rotacional. A simulação foi conduzida utilizando um software comercial para CFD, PHOENICS 3.6. Os autores observaram que o gás se dispersa principalmente em uma área limitada na região vertical do fluxo de bolhas. As partículas de pirita mostraram-se bem distribuídas. Foi verificado que o aumento da velocidade de rotação tem pouca influência no *holdup* de bolhas de gás.





## CAPITULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 - Materiais

Para os experimentos de secagem e fluidodinâmica deste trabalho foi utilizado o fertilizante do tipo SSPG (super fosfato simples granulado) que é produzido através da reação de concentrado fosfático com o ácido fosfórico e vapor d'água. Esse material apresenta, na sua composição, aproximadamente 20% de  $P_2O_5$  (o chamado SSP 00-20-00) solúvel em água, 7 a 8 % de ácidos livres, e outros componentes ditos inertes. A Tabela 3.1 mostra algumas propriedades físicas do fertilizante SSPG, são elas a massa específica ( $\rho_s$ ), o calor específico ( $C_p$ ), o diâmetro médio de Sauter ( $d_{Sauter}$ ) e a porosidade ( $\epsilon$ ).

A indústria de fertilizantes fornece as informações do produto através da Ficha de Inspeção de Produtos Químicos (FISPQ) a qual contém um valor de densidade de 1100 kg/m<sup>3</sup> para o fertilizante SSPG. Para verificar o valor de densidade, neste trabalho foi feito o quarteamento da amostra e posteriormente a massa específica e o  $d_p$  (diâmetro da esfera de igual volume) da partícula foi obtida pela técnica de picnometria utilizando-se glicerina e um picnômetro de 50 mL e posteriormente a porosidade do material foi calculada através de uma proveta de um litro de volume. O  $C_p$  foi obtido de trabalhos anteriores (ARRUDA, 2008). Para a mesma amostra, utilizando-se o equipamento CPA-2-1 HAVER & BOECKER que fornece a análise granulométrica do material, e possibilitou o calculo do diâmetro médio de Sauter, baseado, portanto no diâmetro de Feret (média das maiores dimensões da área projetada da partícula).

Tabela 3.1 - Propriedades físicas do fertilizante SSPG.

$\rho_s$	$C_p$	$d_p$	$d_{Sauter}$	$\epsilon$
kg/m <sup>3</sup>	kcal/kg°C	mm	mm	%
1845	1,026	2,88	4,88	43

### 3.2 - Cinética de secagem

Para verificar se o material usado neste trabalho possuía as mesmas características em termos de cinética de secagem do material utilizado por ARRUDA (2008) e SILVÉRIO (2010), optou-se por realizar alguns testes de cinética de secagem em camada fina.

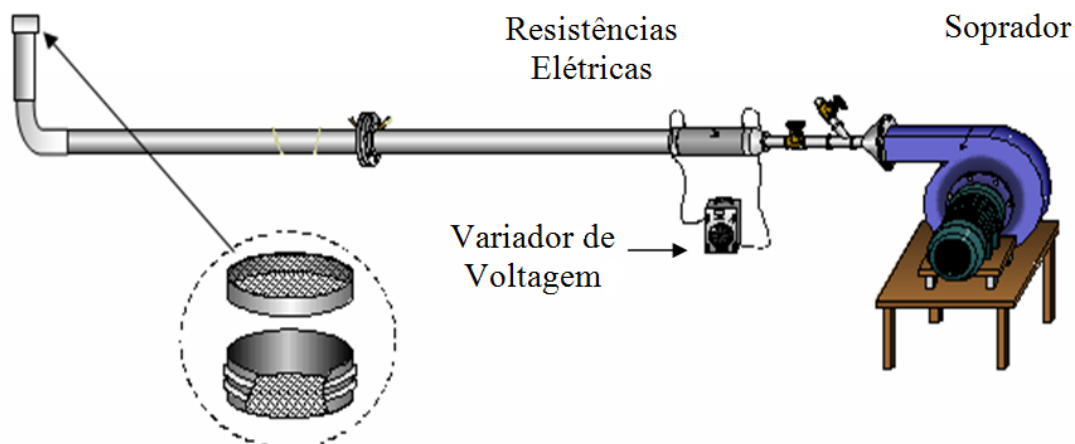


Figura 3.1 - Esquema da unidade experimental utilizada para medidas de secagem em camada fina.

Na unidade experimental apresentada na Figura 3.1, um soprador impulsionava o ar através de uma tubulação que possuía um conjunto de resistências elétricas acionadas por um variador de voltagem, sendo então conduzido por um duto termicamente isolado até a célula acoplada ao final da linha. As condições experimentais foram as mesmas utilizadas por ARRUDA (2008). A velocidade do ar era ajustada por meio de válvulas tipo gaveta e medida com o auxílio de um anemômetro de fio quente, introduzido em orifícios anteriores à célula. Na extremidade de saída da tubulação de ar quente da unidade experimental era acoplada a célula contendo o material particulado úmido. Essa célula consistia, basicamente, de um tubo cilíndrico com o mesmo diâmetro da tubulação e era dotada de telas metálicas nas duas bases, formando uma câmara de 1,5 cm de espessura. Anteriormente à célula, encontravam-se instalados termopares para as medidas de temperatura de bulbo úmido e bulbo seco. Por meio dessas medidas foram obtidas a temperatura e a umidade do ar durante o experimento.

A velocidade do ar utilizada nos experimentos foi de 3,0 m/s, a temperatura de 80°C e a umidade inicial do material era de 0,15 kg de água por kg de sólido seco. O

ajuste das condições operacionais foi feito com uma célula reserva (idêntica à célula de medida) acoplada à unidade, cuja função era manter constante a condição fluidodinâmica do sistema. Em seguida eram realizadas medidas de temperatura de bulbo úmido e bulbo seco.

Depois de atingidas as condições experimentais, a célula de medida era inserida na unidade, iniciando neste instante a contagem de tempo do experimento (tempo zero). Periodicamente, a célula era retirada e sua massa determinada em uma balança analítica. Durante a obtenção da massa da amostra a célula reserva era acoplada à unidade para manter o equilíbrio térmico e fluidodinâmico do sistema. No final do teste, novas medidas de umidade do ar eram realizadas e a umidade final da amostra submetida à secagem em camada fina era determinada pelo método da estufa ( $105 \pm 2$ ) °C por 24 horas.

Os resultados de cinética de secagem foram comparados com o modelo de PAGE (1949) ajustado a partir dos dados experimentais de ARRUDA (2008).

### 3.3 - Secador rotatório

O equipamento utilizado neste trabalho foi construído seguindo dimensões de projeto recomendadas na literatura (BAKER, 1988; PERRY e GREEN, 1999). Segundo ARRUDA (2008) a condição ideal de operação do secador contracorrente era de 6 suspensores, com inclinação do tambor de 3° e velocidade rotacional de 3,6 rpm. Assim o secador contracorrente estaria operando em condições que lhe conferem as maiores eficiências de transferência de massa e energia.

A Figura 3.2 mostra um esquema da unidade experimental.

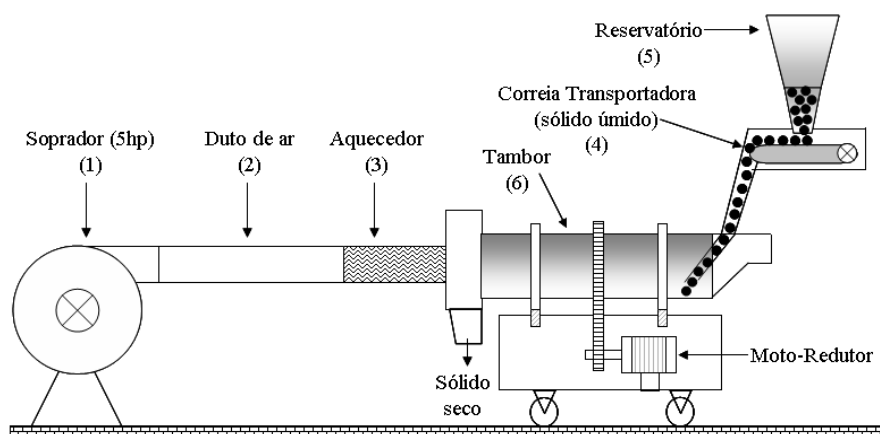


Figura 3.2 – Esquema da unidade experimental.

Sendo assim, os dados experimentais para comparação dos secadores rotoaerados foram obtidos para a inclinação do tambor de 3° e velocidade rotacional de 3,6 rpm. Estes valores foram escolhidos por corresponderem às condições de carregamento ótimo do secador convencional (ARRUDA, 2008).

O aparato experimental mostrado na Figura 3.2 foi constituído por um soprador de 5 cv (1) acoplado a um duto de 2 m de comprimento e 0,2 m de diâmetro (2). Entre esse duto e o secador existe um sistema de aquecimento com resistências elétricas (3), reguladas por um variador de voltagem. A alimentação de sólidos foi feita por meio de uma correia transportadora (4) montada abaixo de um silo (5) onde o material granulado úmido era armazenado. A correia era acionada por um motor de 0,5 cv acoplado a um moto-redutor e a velocidade era regulada por um inversor de frequência. A rotação do motor também permitia variações através de um inversor de frequência acoplado à um motor redutor (8). O sólido seco era descarregado na parte inferior do equipamento (7).

A Figura 3.3 mostra uma fotografia da unidade piloto do secador rotatório.



Figura 3.3 – Fotografia da unidade piloto experimental.

O secador rotatório (6) tinha 1,5 m de comprimento e 0,3 m de diâmetro e sua estrutura foi construída de forma a permitir variações em sua configuração. As configurações de secadores rotoaerados, utilizados neste trabalho contêm um tubo central com 1,8 m de comprimento e 0,1 m de diâmetro interno, diretamente acoplado à

linha de ar. O mesmo tubo central permitia a adaptação de diferentes diâmetros e quantidades de minitubos. Neste trabalho foram utilizados os minitubos com 9, 6 e 3 mm de diâmetro com diferentes quantidades de mini tubos sendo estas: 42, 56 e 83 tubos. Os diferentes arranjos de minitubos utilizados neste trabalho serão descritos posteriormente.

A Figura 3.4 mostra um esquema das dimensões do secador rotoaerado e a Figura 3.5 mostra uma foto interna do secador rotoaerado.

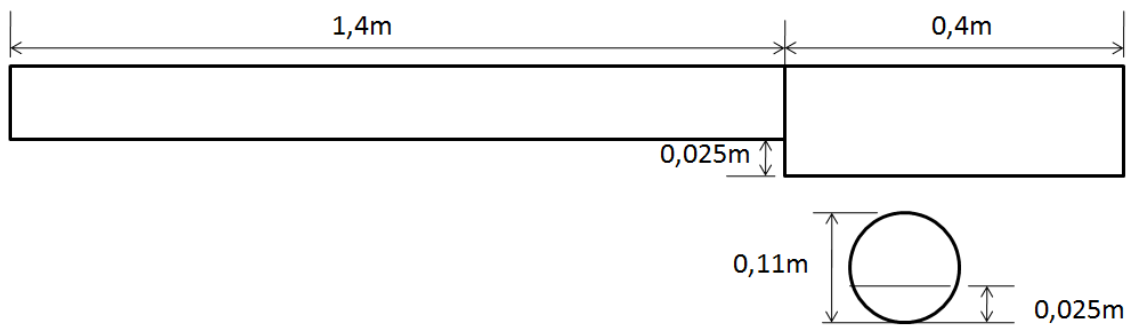


Figura 3.4 – Esquema das dimensões do secador rotoaerado.



Figura 3.5 – Foto interna do secador rotoaerado.

A Figura 3.6 mostra um esquema do tubo central do secador rotoaerado e o arranjo padrão com as medidas das distâncias dos minitubos.

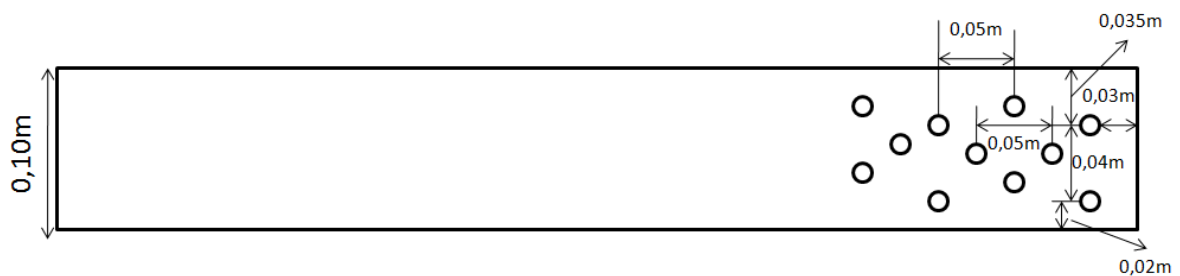


Figura 3.6 – Esquema da disposição do minitubos no secador rotoaerado.

As configurações contendo um total de 83 minitubos possuíam todos os tubos conforme a Figura 3.6. Os tubos das posições radiais centrais apontadas na Figura 3.6 foram obstruídos para os experimentos com as configurações contendo 56 minitubos. Para os experimentos com as configurações contendo 42 minitubos, 14 dos tubos nas posições radiais externas foram obstruídos utilizando-se dispositivos que impediam a passagem de ar pelos furos.

### 3.4 – Metodologia experimental para avaliação das diferentes configurações de secadores rotoaerados

Neste trabalho foi utilizado um tubo central de mesmas dimensões do tubo do rotoaerado utilizado por ARRUDA (2008). O tubo central deste trabalho, que era diretamente acoplado à linha de ar, continha 27 furos a mais do que o utilizado por ARRUDA (2008). Esta modificação foi feita para permitir a adaptação de maiores quantidades de minitubos de diferentes diâmetros. A Figura 3.7 mostra um esquema da disposição dos furos para os diferentes tipos de tubos centrais. Desta forma foi possível obstruir os furos centrais (configurações com 56 minitubos) do equipamento correspondente a Figura 3.7 (b) e comparar os resultados de tempo de residência e secagem com os dados obtidos por ARRUDA (2008).

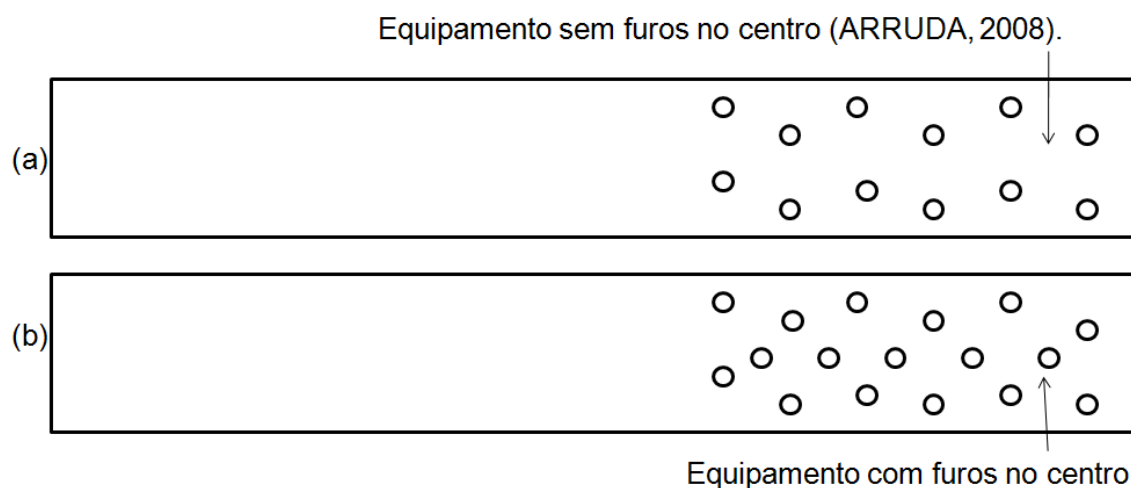


Figura 3.7 – Esquema da disposição do minitubos nos tubos centrais do secador rotoaerado.

Os resultados dos dois equipamentos (com réplicas), correspondendo à mesma configuração (9 mm 56 tubos), um utilizado por ARRUDA (2008) (Figura 3.7 (a)), o outro construído para este trabalho com os furos centrais obstruídos (Figura 3.7 (b)) apresentaram resultados estatisticamente iguais (para o método estatístico *t-student*). Assim, o efeito da dissipação térmica através dos parafusos que obstruíram os furos centrais foi considerado desprezível mostrando que esta adaptação do equipamento pode ser utilizada para análise do efeito de diferentes quantidades de minitubos na secagem de fertilizantes em secadores rotoaerados.

Com o objetivo de aumentar a eficiência de secagem e estudar o escoamento das partículas dentro do secador rotoaerado, foram selecionadas 19 configurações com diferentes arranjos de minitubos, sendo que as configurações do experimento 1 (com 56 minitubos de 20 mm) e a do experimento 6 (com 56 minitubos de 9 mm) foram estudadas anteriormente no trabalho de ARRUDA (2008) e utilizadas neste trabalho para comparação com as demais configurações.

A Tabela 3.2 apresenta as diferentes distribuições de minitubos utilizadas neste trabalho. Os experimentos 1 ao 9 foram realizados nas configurações do tubo central contendo apenas minitubos de mesmo diâmetro denominadas não híbridas. As demais configurações foram montadas a partir da combinação de diferentes arranjos de minitubos de diâmetros diferentes, também chamadas de configurações híbridas.

A Figura 3.8 mostra a disposição de minitubos para as configurações com 42, 56 e 83 minitubos.

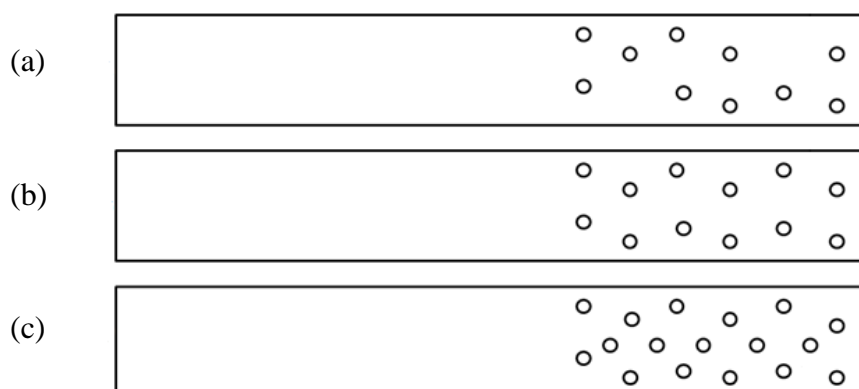


Figura 3.8 – Disposição de minitubos nos tubos centrais do secador rotoaerado: (a) disposição com 42 minitubos, (b) disposição com 56 minitubos e (c) disposição com 83 minitubos.

Tabela 3.2 – Diferentes configurações de minitubos analisadas.

Configuração	Descrição das Configurações
1	<b>RT-01</b> Rotoaerado com 56 minitubos com 20 mm de diâmetro.
2	<b>RT-02</b> Rotoaerado com 56 minitubos com 12 mm de diâmetro.
3	<b>RT-03:</b> Rotoaerado com 56 minitubos com 9 mm de diâmetro.
4	<b>RT-04:</b> Rotoaerado com 56 minitubos com 6 mm de diâmetro.
5	<b>RT-05</b> Rotoaerado com 56 minitubos com 3 mm de diâmetro.
6	<b>RT-06:</b> Rotoaerado com 83 minitubos com 9 mm de diâmetro.
7	<b>RT-07:</b> Rotoaerado com 83 minitubos com 6 mm de diâmetro.
8	<b>RT-08</b> Rotoaerado com 83 tubos de 3 mm.
9	<b>RT-09:</b> Rotoaerado com 42 minitubos com 9 mm de diâmetro.
10	<b>RT-10:</b> Rotoaerado híbrido com 18 primeiros minitubos com 9 mm, próximos 18 minitubos com 6 mm e os últimos 20 minitubos com 3 mm.
11	<b>RT-11:</b> Rotoaerado híbrido com 18 primeiros minitubos com 3 mm, próximos 18 minitubos com 6 mm e os últimos 20 minitubos com 9 mm.
12	<b>RT-12:</b> Rotoaerado híbrido com 27 primeiros minitubos com 9 mm, próximos 27 minitubos com 6 mm e os últimos 29 minitubos com 3 mm.
13	<b>RT-13:</b> Rotoaerado híbrido com 27 primeiros minitubos com 3 mm, próximos 27 minitubos com 6 mm e os últimos 29 minitubos com 9 mm.
14	<b>RT-14:</b> Rotoaerado híbrido com 28 minitubos com 9 mm, 27 minitubos com 6 mm e 28 minitubos com também 9 mm sendo os diâmetros iguais dispostos axialmente e diâmetros diferentes radialmente distribuídos.
15	<b>RT-15:</b> Rotoaerado híbrido com 28 minitubos com 6 mm, 27 minitubos com 9 mm e 28 minitubos com também 6 mm sendo os diâmetros iguais dispostos axialmente e diâmetros diferentes radialmente distribuídos.
16	<b>RT-16:</b> Rotoaerado híbrido com 28 minitubos com 6 mm, 27 minitubos com 9 mm e 28 minitubos com 3 mm sendo os diâmetros iguais dispostos axialmente e diâmetros diferentes radialmente distribuídos.
17	<b>RT-17:</b> Rotoaerado híbrido com 28 minitubos com 6 mm, 28 minitubos com 9 mm sendo a disposição dos tubos disposta de forma intercalada axialmente e radialmente.
18	<b>RT-18:</b> Rotoaerado híbrido com 28 minitubos com 9 mm, 28 minitubos com 3 mm sendo a disposição dos tubos disposta de forma intercalada axialmente e radialmente.
19	<b>RT-19</b> Rotoaerado híbrido com 28 minitubos com 6 mm, 28 minitubos com 3 mm sendo a disposição dos tubos disposta de forma intercalada axialmente e radialmente.

As configurações 10 a 19 da Tabela 3.2 são as configurações denominadas híbridas. As configurações híbridas 10 a 13 possuem diâmetros de minitubos diferentes axialmente distribuídos, as configurações 14 a 16 possuem diâmetros de minitubos



diferentes radialmente distribuídos e as configurações 17 a 19 possuem diferentes diâmetros de minitubos dispostos de forma intercalada.

Para uma primeira avaliação de um total de 19 diferentes configurações de secadores rotoaerados foi adotada uma condição experimental igual em todos os experimentos. Sendo assim esses experimentos foram realizados com velocidade do ar de 1,1 m/s (medidas em um tubo de 0,2 m de diâmetro), temperatura de entrada do ar 85°C e vazão de sólidos na alimentação 1,0 kg/min.

No Apêndice A são mostradas as fotografias das configurações híbridas da Tabela 3.2.

Uma vez observadas as configurações que se destacaram neste primeiro estudo, ou seja, as que apresentaram maiores valores de taxa de secagem, decidiu-se avaliar o desempenho dessas configurações em diferentes condições experimentais, e assim observar os resultados de secagem frente às variações das condições de: velocidade do ar na entrada ( $v_f$ ), vazão de sólidos alimentada ( $G_{su}$ ) e temperatura do ar de secagem ( $T_f$ ).

Para esta avaliação foi proposto um planejamento composto central ortogonal (PCC) com 4 réplicas no centro  $\alpha=1,414$ , (BOX *et. al.*, 1978), elaborado por ARRUDA (2008) conforme a Tabela 3.3.

A partir da utilização deste planejamento foi possível também comparar os resultados do secador convencional concorrente (SILVÉRIO, 2010), contracorrente (ARRUDA, 2008) e as diferentes configurações de secadores rotoaerados que se destacaram na primeira avaliação das configurações.

Para melhor avaliação e comparação da capacidade dos secadores rotoaerados em relação ao secador convencional em maiores condições de carga de sólidos, foram realizados experimentos de secagem e tempo médio de residência para em condições equivalentes, ao experimento 10 da Tabela 3.3, ou seja, maior velocidade de alimentação de ar de secagem, porém, com maiores vazões de alimentação de sólidos. As condições operacionais desses ensaios experimentais podem ser vistos na Tabela 3.4.

Em cada experimento foram feitos ensaios secagem, de tempo de residência, utilizando-se traçadores, e também foram obtidas as cargas de sólidos (massa do *holdup*) contidas no tambor durante os experimentos. Os valores em negrito da Tabela 3.4 consistem na condição operacional coincidente com o PCC da Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Planejamento experimental dos ensaios de secagem do fertilizante SSPG para comparação de desempenho dos secadores convencionais e rotoaerados.

Experimento	$v_f$ (m/s)	$T_f$ (°C)	$G_{su}$ (kg/min)
1	1,5	75	0,8
2	1,5	75	1,2
3	1,5	95	0,8
4	1,5	95	1,2
5	3,5	75	0,8
6	3,5	75	1,2
7	3,5	95	0,8
8	3,5	95	1,2
9	1,1	85	1
10	3,9	85	1
11	2,5	71	1
12	2,5	99	1
13	2,5	85	0,7
14	2,5	85	1,3
15	2,5	85	1
16	2,5	85	1
17	2,5	85	1
18	2,5	85	1

Tabela 3.4 - Condições experimentais para os ensaios de maiores condições de carga de sólidos.

$v_f$ (m/s)	$T_f$ (°C)	$G_{su}$ (kg/min)
<b>3,9</b>	<b>85</b>	<b>1,0</b>
3,9	85	1,3
3,9	85	1,9
3,9	85	2,5

### 3.5 - Procedimento experimental dos ensaios de secagem

Após um tempo igual a três vezes o tempo médio de residência do fertilizante, foram feitas medidas de vazões de sólido iniciais e finais enquanto todas as condições experimentais eram controladas. Assim que as vazões de saída e entrada de sólidos se igualavam, as amostras para determinação de umidade eram recolhidas e os dados de temperatura do sólido e do ar obtidos com o secador operando em estado estacionário. Os testes de secagem foram feitos após a garantia das condições operacionais constantes, ou seja, quando se estivesse em regime permanente. O equipamento era ligado e todas as condições ajustadas para o teste.

#### *Medidas de Vazão*

A velocidade média do ar de secagem era medida por um anemômetro de fio quente (de precisão 0,01 m/s) em uma tubulação de 0,2 m de diâmetro. A vazão de sólidos foi obtida pela coleta periódica de amostra na saída do leito e aferição da massa em balança analítica digital de precisão  $10^{-2}$  g.

#### *Medidas do Tempo de Residência*

O tempo de residência foi determinado com a metodologia do uso de traçadores. Foram feitas injeções do tipo pulso de 80 traçadores (fertilizantes com a coloração verde) no sistema de alimentação, quando o secador encontrava-se em regime permanente, sendo recolhidas amostras de 15 em 15 segundos. O material era então analisado e verificava-se a quantidade de traçadores em cada amostra. Ao final de cada teste era recolhida a carga do secador e contabilizada a massa, para cada condição experimental. Com isso, calculava-se a fração de traçadores para cada intervalo de tempo, o que permitia montar uma curva da fração de sólidos ( $E(t)$ ) em função do tempo de residência.  $Q(t)$  correspondia a quantidade de traçadores encontrados no tempo  $t$ ,  $Q_{total}$  correspondia ao total de traçadores introduzidos (80 traçadores). O cálculo da área sob curva fornecia o tempo médio de residência das partículas (Equações 3.1 e 3.2). Este cálculo foi realizado utilizando-se integração numérica pela regra do trapézio composta.

$$E(t) = \frac{Q(t)}{Q_{total}} \quad (3.1)$$

$$\bar{\tau} = \sum t \cdot E(t) \quad (3.2)$$

### *Temperaturas do Ar e do Sólido*

A temperatura do ar, na entrada e na saída do secador, era medida utilizando-se termopares de cobre-constantan, previamente calibrados em banhos termostáticos com termômetro padrão, ligados a um amostrador digital de precisão 0,1 °C. A leitura das temperaturas era realizada com o auxílio de mostradores digitais acoplados aos termopares.

Para se obter a distribuição de temperatura dos sólidos, coletados na saída do secador, um termopar foi introduzido no interior de um recipiente termicamente isolado de forma a permitir a obtenção da temperatura do mesmo por calorimetria.

### *Umidade do Ar e do Sólido*

A determinação da umidade do ar na entrada e saída do secador era realizada por meio de medidas de temperaturas de bulbo seco e úmido e a determinação de umidade e temperatura ambiente através de um termo-higro-anemômetro introduzido na mesma posição em que era medida a velocidade de entrada do ar.

Anteriormente ao processo de secagem, o fertilizante era umidificado até a umidade inicial do experimento, geralmente entre a faixa de 0,12 e 0,15 kg de água por kg de sólido seco. A água era fornecida sob a forma de névoa por um bico atomizador a lotes de 6 kg de material, sob constante mistura. Posteriormente este material ficava em repouso por 12 horas para melhor absorção da umidade.

As amostras de fertilizantes eram retiradas na entrada e saída do secador. A massa de cada amostra era obtida e levada a uma estufa à temperatura de  $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$  por 24 horas, sendo a massa úmida e a massa seca das amostras medidas em balança analítica digital com precisão de  $10^{-4}$  g.

### *Taxa de Secagem*

A taxa de secagem foi calculada pela relação entre a quantidade de água evaporada (razão entre a vazão de sólidos úmido ( $G_{SU}$ ) e a vazão de sólido seco ( $G_{SS}$ )) e o tempo de residência das partículas no secador ( $\tau$ ), como na Equação 3.3

$$R_w = \frac{G_{SU}}{G_{SS} \cdot \tau} \cdot 10^3 \quad (3.3)$$

### Perda de Carga

Para a comparação da perda de carga das diversas configurações de secadores avaliadas, foram obtidos os valores de perda de carga utilizando-se um manômetro em U contendo água. A medida de perda de carga foi feita através de um orifício no tubo central 20 cm antes da entrada do tambor.

## 3.6 – Metodologia da simulação em CFD para o secador rotoaerado

### 3.6.1-Modelagem

A simulação do escoamento do ar no secador rotoaerado foi realizada resolvendo a equação da continuidade e da quantidade de movimento para a fase gasosa em regime turbulento, na qual a turbulência foi contabilizada pela resolução do modelo de turbulência  $k-\varepsilon$ . Desta maneira o software FLUENT ANSYS® 14.0 realiza os cálculos para as equações da Continuidade (Equação 3.4) e do Movimento (Equação 3.5).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left( \overline{\tau} \right) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.5)$$

O modelo  $k-\varepsilon$  é baseado no modelo da equação de transporte da energia cinética de turbulência ( $k$ ) e a taxa de dissipação ( $\varepsilon$ ), expressos pelas Equações 3.6 e 3.7, respectivamente.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \cdot \varepsilon - Y_M - S_k \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot (G_k + C_3 \cdot G_b) - C_{2\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \cdot (3.7)$$

Nas quais  $G_k$  é o termo referente à energia turbulenta relacionada à velocidade do fluido,  $G_b$  corresponde ao termo de energia turbulenta relacionada à força de empuxo,  $Y_M$  corresponde à contribuição das flutuações da dilatação para a taxa de dissipação,  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_{3\varepsilon}$  são constantes e  $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  são números de turbulência de Prandtl para  $k$  e  $\varepsilon$  respectivamente.

A viscosidade turbulenta é calculada pela Equação 3.8 na qual  $C_\mu$  é uma constante.

$$\mu_t = \rho \cdot C_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.8)$$

Os tópicos a seguir mostram como foram conduzidas as simulações realizadas no *software* FLUENT ANSYS® para a obtenção dos perfis de velocidade de saída do ar nos secadores rotoaerados.

### 3.6.2-Malha computacional

Primeiramente foram construídas 19 malhas para os secadores rotoaerados nas configurações da Tabela 3.2. O *software* utilizado para a confecção das malhas foi o GAMBIT 2.3.16®. As malhas utilizadas continham aproximadamente um milhão de células. A Figura 3.9 mostra uma imagem de uma malha construída para avaliação das velocidades de saída nos minitubos do secador rotoaerado.

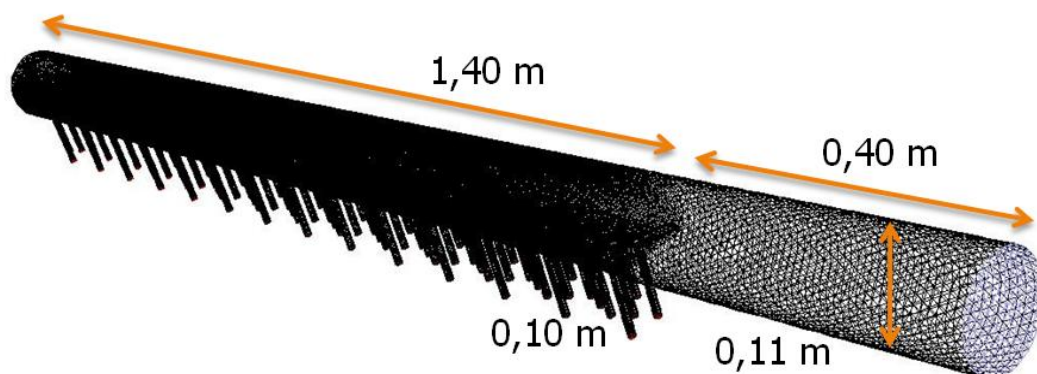


Figura 3.9 - Exemplo de malha do secador rotoaerado.

### 3.6.3-Procedimento de solução numérica

O Conjunto de equações de conservação e constitutivas foi resolvido utilizando-se o método dos volumes finitos. O acoplamento entre velocidade e pressão foi definido pelo algoritmo SIMPLE. Os resíduos utilizados foram menores que  $10^{-3}$ . O tempo de simulação de todos os casos foi de 7 segundos e o *time-step* de  $10^{-4}$ .

As condições de contorno adotadas foram:

- Entrada: velocidade 3,63; 8,6 e 12,94 m/s na entrada do tubo central, ou seja 1,1; 2,5 e 3,9 m/s na tubulação dos experimentos, com intensidade de turbulência de 10% baseada no diâmetro hidráulico de 0,11 m (diâmetro da entrada de ar);

- Saída: pressão atmosférica;
- Parede: não deslizamento do fluido.

Para a discretização espacial foi utilizado o modelo *Upwind* de primeira ordem e para a discretização temporal o modelo implícito de primeira ordem.

### 3.6.4-Pós processamento

*Obtenção experimental e por simulação da velocidade de saída dos mini-tubos:*

Para o estudo do efeito do diâmetro dos minitubos na fluidodinâmica do secador rotoaerado foram obtidas experimentalmente as velocidade de saída do ar conforme a metodologia proposta por ARRUDA (2008). Para tanto, foi usado um anemômetro instalado em um tubo com 2 m de comprimento a partir da extremidade do minitubo e 2 in de diâmetro interno, montado na saída de cada minitubo, para se garantir que a interferência da introdução do anemômetro na medida fosse a mínima possível, como mostra a Figura 3.10.

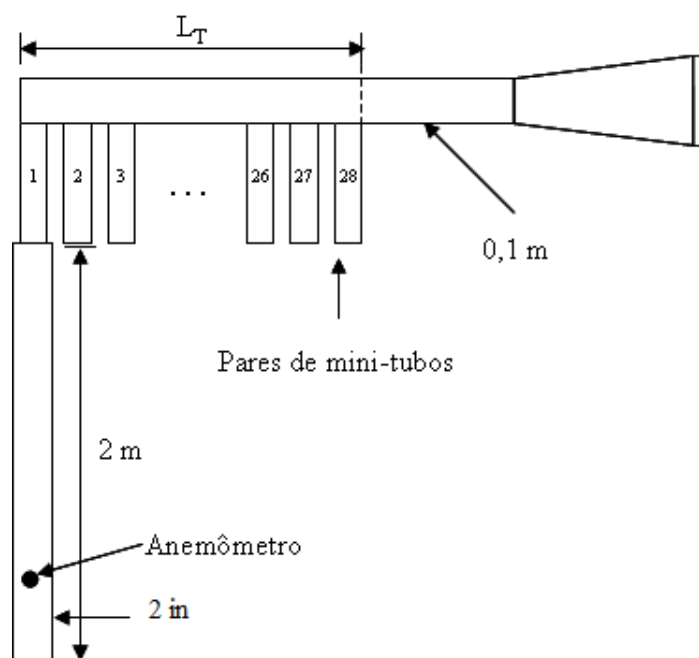


Figura 3.10 – Esquema da disposição do minitubos no tubo central do secador rotoaerado (ARRUDA, 2008).

Assim, foi possível calcular a fração volumétrica de ar, dada pela relação entre a vazão volumétrica de ar em cada minitubo e a vazão volumétrica total de ar alimentada ao rotoaerado. Essa medida considera desprezível o efeito da parede do tubo em que se encontra o anemômetro.

Com o objetivo de comparar os resultados experimentais com os resultados das simulações em CFD, utilizando-se o *software* FLUENT 14<sup>®</sup>, foram obtidos perfis de fração volumétrica de ar na saída dos minitubos, para a configuração RT-03 (56 minitubos com 9 mm de diâmetro) e outro para a configuração RT-01 (56 minitubos com 20 mm de diâmetro). A vazão de alimentação de ar utilizada nos dois casos foi de 0,078 m<sup>3</sup>/s correspondendo a uma velocidade média de alimentação de 2,5 m/s.

Observou-se que os resultados de simulação em CFD no FLUENT<sup>®</sup> 14.0 foram satisfatórios comparados com os resultados experimentais, sendo assim optou-se por utilizar as mesmas condições de simulação para obtenção dos perfis de velocidade do ar para as configurações da Tabela 3.2, nas vazões de ar correspondentes às velocidades do ar de entrada 1,1, 2,5 e 3,9 m/s.

### **3.7-Avaliação de parâmetros do Método de Elementos Discretos (DEM) aplicado a tambores rotativos convencionais**

Os tópicos a seguir mostram como foram conduzidas as simulações realizadas no *software* FLUENT<sup>®</sup> 14.0 para a obtenção do ângulo dinâmico de repouso e da carga de fertilizante nos suspensores para a avaliação dos parâmetros do Método dos Elementos Discretos (DEM) para tambores rotativos.

As simulações usando o Método de Elementos Discretos, neste trabalho, foram realizadas em dois tipos de sistemas rotatórios. Um sendo o próprio secador rotatório convencional, e o outro um pequeno sistema de bancada do tipo tambor rotativo, empregado na determinação experimental do ângulo dinâmico de repouso.

A seguir é apresentado o modelo utilizado (DEM) e a metodologia usada nas simulações de cada um destes sistemas.

#### **3.7.1- Modelo para fase discreta (DEM)**

O *software* FLUENT ANSYS<sup>®</sup> 14.0, uma vez que se opta pela utilização do modelo Euleriano, além de resolver as equações de transporte para a fase contínua, permite simular uma fase discreta segundo uma abordagem Lagrangeana que utiliza o



DEM (*Discret Element Method*). Esta segunda fase consiste em partículas esféricas contidas na fase contínua. O modelo calcula as trajetórias das fases discretas e contínuas. O acoplamento entre as fases e o seu impacto sobre ambas as trajetórias da fase discreta e o fluxo de fase contínua também é incluído nos cálculos.

O modelo utilizado resolve para a fase fluida a Equação 3.9 da Continuidade e a Equação 3.10 do Movimento.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.10)$$

A utilização de modelos DEM (*Discret Element Method*) permite simular partículas em movimento como pontos de massa em movimento. A partir da segunda lei de Newton, as equações diferenciais ordinárias que regem o movimento das partículas são representadas da seguinte forma:

$$m \frac{d\vec{v}_p}{dt} = \vec{F}_{arraste} + \vec{F}_{pressão} + \vec{F}_{massa-virtual} + \vec{F}_{gravitacional} + \vec{F}_{outras} \quad (3.11)$$

$$\vec{v}_p = \frac{dx}{dt} \quad (3.12)$$

Na qual  $\vec{v}_p$  é velocidade da partícula,  $x$  é a posição da partícula e  $t$  é o tempo.

A implementação DEM é baseado no trabalho de CUNDALL E STRACK (1979), e contabiliza as forças resultantes da colisão das partículas por meio da aproximação da “esfera macia”.

As forças de colisão de partículas são determinadas pela deformação, que é medida como a sobreposição entre os pares de esferas (ver Figura 3.11), ou entre uma esfera e um limite. A Equação 3.11 é integrada ao longo do tempo para capturar a intersecção das partículas utilizando-se uma escala de tempo que é determinada pela rigidez dos materiais.

As forças de contato entre as partículas  $F_{ij}$ , contabilizadas no termo  $\vec{F}_{outras}$  da Equação 3.11, são representadas pelo modelo de colisão chamado "mola-amortecedor"

(*spring-dashpot model*). Essas forças são decompostas nas direções normal e tangencial, representado na Figura 3.11.

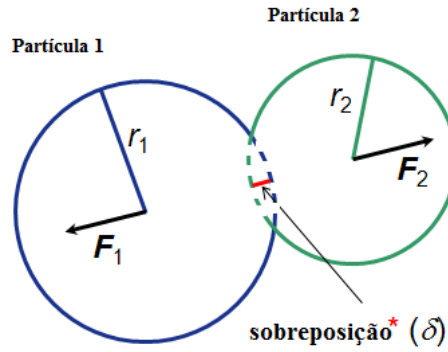


Figura 3.11 -Esquema do modelo de forças de contato (*spring-dashpot model*) ANSYS FLEUNT®14.0.

Por sua vez, as componentes normal e tangencial da força de contato  $F_{ij}$  são decompostas em forças elásticas ou de repulsão (chamadas de conservativas), responsáveis pelo movimento de translação, e forças de amortecimento (chamadas de dissipativas), responsáveis pelo movimento de rotação das partículas (PÖSCHEL; SCHWAGER, 2005).

O valor da constante de elasticidade na força normal de contacto partícula-partícula deve ser suficientemente alta para fazer duas partículas recuarem em uma colisão, fazendo uma sobreposição máxima menor que o raio da partícula, para uma alta velocidade relativa entre elas. É possível estimar o valor da constante de elasticidade  $k$  através da seguinte equação (CUNDALL e STRACK, 1979):

$$k \geq \sqrt[3]{\frac{2v_p^2}{3\pi\epsilon_D^2} d_p} \quad (3.13)$$

na qual  $d_p$  é o diâmetro da partícula,  $v_p$  é o módulo da velocidade relativa entre as duas partículas que estão colidindo,  $\epsilon_D$  é a fração do diâmetro que se permite sobrepor,  $\pi\sqrt{m/k}$  é o tempo de colisão avaliado e  $m$  é a massa da partícula dada por  $(\rho d_p^3 \pi)/6$ .

Para a colisão elástica linear, o vetor unitário ( $\vec{e}_{12}$ ) é definido da partícula 1 para a partícula 2:

$$\vec{e}_{12} = \frac{(x_2 - x_1)}{\|x_2 - x_1\|} \quad (3.14)$$

Na Equação 3.14  $x_1$  e  $x_2$  representam as posições das partículas 1 e 2, respectivamente.

A sobreposição  $\delta$  (que durante o contato é menor do que zero) é definida como:

$$\delta = \|x_2 - x_1\| - (r_1 + r_2) \quad (3.15)$$

Na Equação 3.15  $r_1$  e  $r_2$  representam os raios das partículas 1 e 2.

Para o modelo de colisão "mola-amortecedor", define-se uma constante como na lei de colisão elástica  $k$ , junto com um coeficiente de restituição para o termo amortecedor ( $\eta$ ). Nota-se que  $0 < \eta \leq 1$ .

Para os cálculos das forças, as seguintes expressões são avaliadas:

$$f_{perda} = \sqrt{\pi^2 \cdot \ln^2 \eta} \quad (3.16)$$

$$m_{12} = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \quad (3.17)$$

$$t_{col} = f_{perda} \sqrt{\frac{m_{12}}{k}} \quad (3.18)$$

$$\gamma = -2 \cdot \frac{m_{12} \cdot \ln \eta}{t_{col}} \quad (3.19)$$

$$\vec{v}_{p12} = \vec{v}_{p1} + \vec{v}_{p2} \quad (3.20)$$

Na qual  $f_{perda}$  é um fator de redução ou perda de massa,  $m_1$  e  $m_2$  são as massas das partículas 1 e 2, respectivamente,  $m_{12}$  é a chamada "massa reduzida",  $t_{col}$  é o tempo de colisão, e  $\vec{v}_{p1}$  e  $\vec{v}_{p2}$  são as velocidades das partículas 1 e 2, respectivamente,  $\vec{v}_{p12}$  é a velocidade relativa entre as partículas 1 e 2, e  $\gamma$  é o coeficiente de amortecimento.

A força sobre uma partícula pode ser calculado como na Equação 3.21 (CUNDALL e STRACK, 1979):

$$\vec{F}_1 = (k\delta + \gamma(\vec{V}_{12} \cdot \vec{e}_{12}))\vec{e}_{12} \quad (3.21)$$

E de acordo com a 3ª Lei de Newton a força exercida na partícula 2 é:

$$\vec{F}_2 = -\vec{F}_1 \quad (3.22)$$

A lei do coeficiente de fricção é baseada na equação de fricção de Coulomb  $\vec{F}_{fric}$ .

$$\vec{F}_{fric} = \mu_f \cdot \vec{F}_{normal} \quad (3.23)$$

Na qual  $\mu_f$  é o coeficiente de fricção e  $\vec{F}_{normal}$  é a força normal à superfície. A direção da força de fricção é oposta ao movimento tangencial e pode ou não inibir o movimento tangencial relativo.

O coeficiente de fricção é uma função do módulo da velocidade tangencial relativa ( $\vec{v}_{prt}$ ).

$$\mu_f(v_{pr}) = \mu_{f\ perf} + (\mu_{f\ perf} - \mu_{f\ desl}) \cdot \left( \frac{v_{pr}}{v_{pdesl}} - 2 \right) \cdot \left( \frac{v_{pr}}{v_{pdesl}} \right) \quad (3.24)$$

$$\vec{v}_{p-desl} < \vec{v}_{pr} \leq \vec{v}_{p-lim} \quad (3.25)$$

$\mu_{f\ perf}$  é o coeficiente de atrito de perfuração

$\mu_{f\ desl}$  é o coeficiente de atrito de deslizamento

$\mu_{f\ lim}$  é o coeficiente de atrito de alta velocidade limite

$\vec{v}_{p-desl}$  é a velocidade de deslizamento, para as velocidades mais baixas  $\mu_f$  é interpolado quadraticamente entre  $\mu_{f\ perf}$  e  $\mu_{f\ desl}$ ,  $\vec{v}_{p-lim}$  é a velocidade limite, para velocidades mais altas,  $\mu_f(v_{pr})$  aproxima-se de  $\mu_{f\ lim}$ .

### 3.7.2-Procedimento de solução numérica

As simulações DEM foram feitas utilizando-se malhas construídas em três dimensões. Tanto para a simulação do tambor rotativo de bancada, bem como para o secador rotatório convencional, o conjunto de equações de conservação e constitutivas foi resolvido utilizando-se o método dos volumes finitos. O acoplamento entre velocidade e pressão foi definido pelo algoritmo SIMPLE. Os resíduos utilizados foram menores que  $10^{-3}$ . Na parede foi considerada uma condição de contorno de não deslizamento. Para a discretização espacial foi utilizado o modelo *QUICK* e para a discretização temporal o modelo implícito de primeira ordem.

### 3.7.3-Obtenção do ângulo dinâmico de repouso do fertilizante em tambor rotativo de bancada

#### *Medidas experimentais*

A Figura 3.10 mostra a fotografia do sistema de bancada do tipo tambor rotativo. O experimento foi realizado em um cilindro rotativo de acrílico, com 0,1 m de diâmetro e 0,1 m de altura. A massa interna de fertilizantes introduzida foi 415 g de forma que 50% do volume do tambor fosse preenchido, e a velocidade rotacional do sistema era de 25 rpm.



Figura 3.10 - Unidade experimental com tambor rotativo de acrílico.

O ângulo dinâmico de repouso foi obtido com resultados de 15 fotografias do experimento utilizando-se o *software* GLOBAL Lab<sup>®</sup> IMAGE/2.

#### *Medidas por simulação*

Nesta etapa, foram avaliados os seguintes parâmetros do modelo linear "mola-amortecedor", utilizado-se o *software* FLUENT<sup>®</sup> 14: constante elástica ( $k$ ), coeficiente de fricção ( $\mu_f$ ) e coeficiente de restituição ( $\eta$ ).

A fim de avaliar o efeito dos parâmetros do modelo DEM sobre o ângulo dinâmico de repouso, foram realizadas simulações previstas por meio de um planejamento composto central ortogonal com 7 réplicas no ponto central, conforme mostra a Tabela 3.5.

Os valores dos parâmetros escolhidos tiveram como base a ampla faixa encontrada na revisão da literatura. Sendo assim, nem todas as combinações entre os parâmetros necessariamente conduzem a resultados fisicamente coerentes, mas pode contribuir para verificar o efeito dos parâmetros e suas interações.

Tabela 3.5- Planejamento composto central para avaliação dos parâmetros.

Simulação	Variáveis Codificadas			Valores dos Parâmetros		
	$v_1(k)$	$v_2(\mu_f)$	$v_3(\eta)$	$k$ [N/m]	$\mu_f$	$\eta$
1	-1,00	-1,00	-1,00	400	0,2000	0,2000
2	-1,00	-1,00	1,00	400	0,2000	0,8000
3	-1,00	1,00	-1,00	400	0,8000	0,2000
4	-1,00	1,00	1,00	400	0,8000	0,8000
5	1,00	-1,00	-1,00	1600	0,2000	0,2000
6	1,00	-1,00	1,00	1600	0,2000	0,8000
7	1,00	1,00	-1,00	1600	0,8000	0,2000
8	1,00	1,00	1,00	1600	0,8000	0,8000
9	-1,58	0,00	0,00	<b>54,98</b>	0,5000	0,5000
10	1,58	0,00	0,00	<b>1945</b>	0,5000	0,5000
11	0,00	-1,58	0,00	1000	<b>0,0275</b>	0,5000
12	0,00	1,58	0,00	1000	<b>0,9725</b>	0,5000
13	0,00	0,00	-1,58	1000	0,5000	<b>0,0275</b>
14	0,00	0,00	1,58	1000	0,5000	<b>0,9725</b>
15	0,00	0,00	0,00	1000	0,5000	0,5000
16	0,00	0,00	0,00	1000	0,5000	0,5000
17	0,00	0,00	0,00	1000	0,5000	0,5000
18	0,00	0,00	0,00	1000	0,5000	0,5000
19	0,00	0,00	0,00	1000	0,5000	0,5000
20	0,00	0,00	0,00	1000	0,5000	0,5000
21	0,00	0,00	0,00	1000	0,5000	0,5000

A Tabela 3.6 apresenta as condições utilizadas nas simulações do ângulo dinâmico de repouso do tambor rotativo de bancada.

Tabela 3.6 – Condições adotadas nas simulações do tambor rotativo de acrílico.

<i>time step</i> fase contínua (s)	<b>0,001</b>
<i>time step</i> fase discreta (s)	<b>0,0001</b>
Velocidade rotacional (rpm)	<b>25</b>
Nº de partículas	<b>8670</b>
Nº de células da malha	<b>918</b>
Tempo simulado (s)	<b>12</b>
Nº de suspensores	<b>0</b>
Diâmetro do cilindro (m)	<b>0,1</b>
Comprimento do cilindro (m)	<b>0,1</b>

### 3.7.4- Escoamento de partículas no secador rotativo com suspensores

#### *Medidas experimentais*

Para os experimentos realizados nos secadores rotatórios foi utilizado um secador rotatório convencional com 0,3 m de diâmetro, 1,5 m de comprimento, contendo 6 suspensores de 3 segmentos de 0,7 x 0,7 x 2,0 cm.

Foi utilizada uma massa de 4,75 kg de fertilizante superfosfato simples granulado (SSPG), introduzida no equipamento por uma calha semicircular com um dos suspensores na posição 0°. A Figura 3.11 mostra o fertilizante no tempo zero.

A partir da introdução do fertilizante a rotação do equipamento era ligada em 3,6 rpm e fotografias foram feitas com a finalidade de se obter o ângulo de repouso e a área de ocupação do fertilizante nos suspensores nas posições angulares 0°, 30°, 90° e 120° durante a segunda volta do experimento, ou seja durante os 20 primeiros segundos.



Figura 3.11 - Fertilizante introduzido no início de cada experimento.

As imagens foram analisadas e os ângulos de repouso dos suspensores foram obtidos a partir do *software* GLOBAL Lab<sup>®</sup> IMAGE/2. As áreas de preenchimento dos suspensores também foram obtidas para o cálculo do volume de partículas em cada suspensor nas posições angulares analisadas a partir do *software* GLOBAL Lab<sup>®</sup> IMAGE/2. A área então foi multiplicada pelo comprimento do suspensor (1,5 m) e então se descontando a porosidade (43%) obteve-se o volume e massa de fertilizantes em cada suspensor.

Após a obtenção das imagens o equipamento foi esvaziado e novamente preenchido com a mesma massa de 4,75 kg de fertilizantes para obtenção experimental das massas ou carga de fertilizantes nos suspensores.

A medida de carga ou massa dos suspensores em função da sua posição angular no tambor foi efetuada por meio de paradas repentinas do secador em diversas posições angulares e posterior coleta do material durante a segunda volta do experimento. O equipamento era esvaziado e a massa novamente introduzida para se obter a carga do suspensor em cada posição angular, isto permitiu que os valores de carga de sólidos dos suspensores ( $h$ ) pudessem ser comparados com os obtidos no mesmo tempo simulado. Sendo assim foram retiradas as cargas de sólidos nos suspensores durante a segunda volta do experimento para as posições angulares de 0°, 30°, 60°, 90° e 120°.

#### *Simulação do secador rotatório convencional*

É importante salientar que no caso de escoamento em tanques de mistura, e tambores rotativos, entre outros, na ausência de suspensores, é possível executar os cálculos em um domínio que se move juntamente com a parte que está em rotação colocando-se uma condição de contorno na parede do cilindro de forma a introduzir nesta uma velocidade rotacional. Neste caso, o fluxo é constante em relação à rotação dos quadros (não-inercial), o que simplifica a análise.

Nas simulações do secador rotatório com suspensores não é possível apenas alterar a condição de contorno na parede, visto que os suspensores que se encontram dentro do equipamento também se movem. Neste caso é necessário utilizar uma condição de malha móvel, em que toda a malha se movimenta à uma mesma velocidade rotacional. Para esses casos, o *software* FLUENT ANSYS® modela o fluxo em movimento referencial e deslocamento de células ou nós.

Este deslocamento de células é interpretado como o movimento de um referencial ao qual as zonas celulares estão conectadas. O modelo de movimentação das células pode ser escolhido dependendo do nível de complexidade do movimento, e da física envolvendo o fluxo. O modelo mais geral para o fluxo em zonas móveis com deformação celular no FLUENT ANSYS® é o modelo de malha móvel.

A fim de avaliar o efeito dos parâmetros do modelo DEM sobre o ângulo dinâmico de repouso nos suspensores, bem como na carga de fertilizantes nos suspensores, foram realizadas simulações previstas por meio do mesmo planejamento composto central utilizado anteriormente, conforme mostra a Tabela 3.5.



A Tabela 3.7 apresenta as condições utilizadas nas simulações do ângulo dinâmico de repouso e da carga de partículas de fertilizantes nos suspensores do secador rotatório convencional.

Tabela 3.7 – Condições adotadas nas simulações do secador rotatório convencional.

<i>time step</i> fase contínua (s)	<b>0,001</b>
<i>time step</i> fase discreta (s)	<b>0,0001</b>
Velocidade rotacional (rpm)	<b>3,6</b>
Nº de partículas	<b>20583</b>
Nº de células da malha	<b>9338</b>
Tempo simulado (s)	<b>33</b>
Nº de suspensores	<b>6</b>
Diâmetro do tambor (m)	<b>0,30</b>
Comprimento do tambor (m)	<b>0,15</b>

Para facilitar a simulação do secador rotatório e diminuir o tempo de processamento, devido à grande quantidade de partículas envolvidas e a complexidade do problema, optou-se por utilizar uma malha que representasse uma fatia de um décimo do comprimento do tambor do secador rotatório convencional, ou seja, uma malha com as mesmas dimensões de diâmetro, porém com comprimento igual a 0,15 m.

Nestas simulações foram avaliadas as massas de partículas nos suspensores nas posições 0°, 30°, 60°, 90° e 120°, ou seja, as mesmas posições avaliadas experimentalmente. Para tal, foram coletas as posições das partículas no tempo de simulação correspondente à posição de suspensor desejada, contabilizando a massa em cada suspensor, para as simulações previstas pelo PCC (Tabela 3.5 ).

A malha computacional foi obtida a partir do *software* GAMBIT<sup>®</sup> 2.3.16 e foi construída de forma a se garantir que o tamanho das células fosse no mínimo três vezes maior do que o diâmetro da esfera de igual volume da partícula ( $d_p$ ).

Foram também avaliados os ângulos de repouso dentro de cada suspensor nas posições analisadas. Os valores simulados de massa nos suspensores e os ângulos de repouso foram então comparados com os valores obtidos experimentalmente nas mesmas condições.

Uma análise estatística de regressão múltipla empregando o *software* STATISTICA<sup>®</sup> 7 foi realizada a fim de avaliar a influência de cada parâmetro do modelo "mola-amortecedor" sobre a massa de partículas nos suspensores. O modelo estatístico obtido englobou ainda as posições angulares, permitindo assim prever a

massa simulada de fertilizante em qualquer posição angular de suspensores. A técnica de superfície de resposta possibilitou a visualização do efeito das variáveis e das interações entre os parâmetros avaliados.

Além de avaliar a concordância quantitativa dos resultados de massa e ângulo nos suspensores obtidos nas simulações comparada aos dados experimentais, a escolha dos parâmetros de simulação que melhor caracterizam o escoamento do fertilizante em tambores rotativos baseou-se também na comparação visual qualitativa entre as imagens obtidas durante o experimento e os perfis simulados de posição das partículas.

## CAPÍTULO 4 - RESULTADOS

### 4.1 - Cinética de secagem.

Para a compreensão dos resultados de secagem de um determinado material é importante que se conheça algumas de suas propriedades e também seu comportamento cinético de secagem. O estudo da cinética de secagem do fertilizante super fosfato simples granulado (SSPG) constituiu-se em uma etapa fundamental para a completa caracterização do material. Como o intuito desse trabalho foi de comparar resultados de secagem de fertilizantes no secador rotatório em configurações diferentes das estudadas por ARRUDA (2008) e SILVÉRIO (2010) é importante que se tome o cuidado de utilizar materiais (fertilizantes) com a mesma característica de secagem.

Neste trabalho foi utilizado também o fertilizante super fosfato simples granulado (SSPG 00-20-00). Foram realizados ensaios de cinética de secagem em camada fina para compará-los com a cinética de secagem do material utilizado por ARRUDA (2008) e assim verificar e se os dois materiais possuem características equivalentes.

Com a obtenção dos resultados de umidade do fertilizante em cada instante durante os experimentos de cinética de secagem em camada fina, foi possível fazer o cálculo dos adimensionais de umidade ( $MR$ ) em função do tempo, dado pela equação 3.5. Para a obtenção da umidade de equilíbrio do fertilizante foi utilizada a Equação de HALSEY modificada (OSBORN *et al.*, 1980), ajustada por ARRUDA (2008) para o fertilizante super-fosfato simples granulado.

$$MR \equiv \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (4.1)$$

A Figura 4.1 apresenta os resultados de cinética de secagem dos experimentos realizados para o fertilizante utilizado neste trabalho, juntamente com os modelos de PAGE (1949) e OVERHULTZ *et al.* (1973) ajustados para os resultados de cinética do fertilizante utilizados nos ensaios de ARRUDA (2008). O experimento denominado: SSP 00-20-00 utilizou fertilizante produzido na cidade de Catalão-GO e adquirido em setembro de 2010.

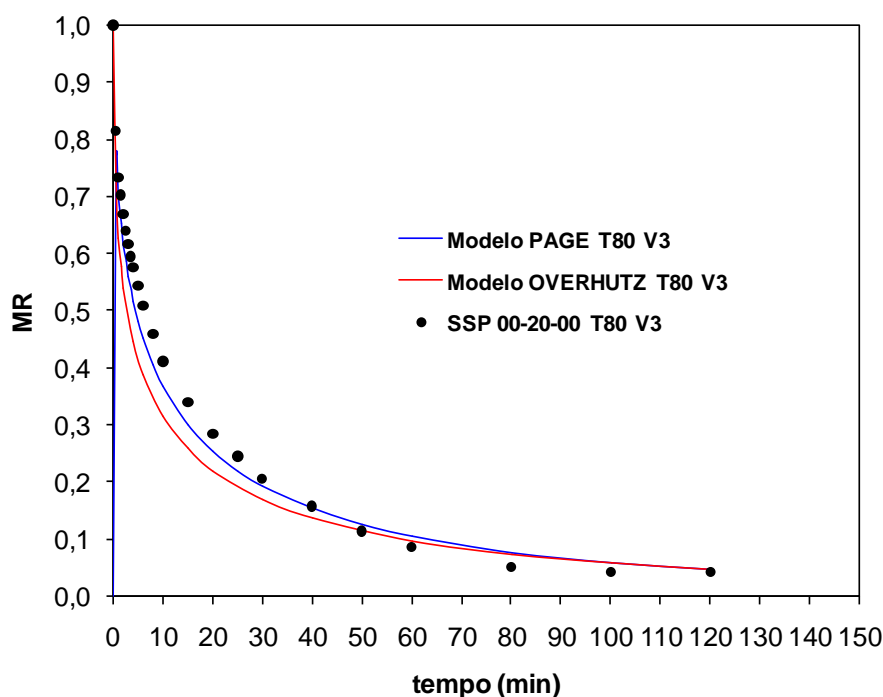


Figura 4.1 - Resultados de cinética de secagem deste estudo juntamente com os obtidos por ARRUDA (2008), [ $T_{ar}=80^{\circ}\text{C}$  e  $v_{ar} = 3,0 \text{ m/s}$ ].

Pode-se visualizar nos resultados da Figura 4.1 que o experimento realizado mostrou o resultado típico de cinética de secagem equivalente aos modelos cujos parâmetros foram ajustados para os experimentos do fertilizante utilizado por ARRUDA (2008).

Sendo assim, é possível utilizar as equações constitutivas do modelo relativas à umidade de equilíbrio e cinética de secagem utilizadas por ARRUDA (2008), visto que se comprovou a equivalência das características de secagem do fertilizante.

## 4.2 - Comparações dos secadores rotoaerados

Os resultados experimentais de tempo médio de residência, água removida e taxa de secagem serão apresentados nos próximos itens.

Para melhor visualização dos resultados, a Tabela 4.1, contendo as 19 diferentes configurações avaliadas, será rerepresentada neste capítulo juntamente com os resultados de tempo médio de residência ( $\bar{\tau}$ ), água removida ( $A_R$ ) e taxa de secagem ( $R_W$ ) para os experimentos realizados nas mesmas condições.

Tabela 4.1- Diferentes configurações de minitubos analisadas.

Características da configuração	$\bar{\tau}$ (min)	AR (kg/min)	$R_w$ ( $10^3 \text{ min}^{-1}$ )
<b>RT-01</b> Rotoaerado com 56 minitubos com 20 mm de diâmetro.	3,71	0,0196	6,06
<b>RT-02</b> Rotoaerado com 56 minitubos com 12 mm de diâmetro.	3,68	0,0179	6,28
<b>RT-03:</b> Rotoaerado com 56 minitubos com 9 mm de diâmetro.	3,88	0,0257	7,96
<b>RT-04:</b> Rotoaerado com 56 minitubos com 6 mm de diâmetro.	5,13	0,0247	7,45
<b>RT-05</b> Rotoaerado com 56 minitubos com 3 mm de diâmetro.	3,86	0,0205	6,03
<b>RT-06:</b> Rotoaerado com 83 minitubos com 9 mm de diâmetro.	4,61	0,0221	6,21
<b>RT-07:</b> Rotoaerado com 83 minitubos com 6 mm de diâmetro.	4,59	0,0294	6,53
<b>RT-08</b> Rotoaerado com 83 tubos de 3 mm.	3,25	0,0201	4,63
<b>RT-09:</b> Rotoaerado com 42 minitubos com 9 mm de diâmetro.	3,88	0,0282	8,24
<b>RT-10:</b> Rotoaerado híbrido com 18 primeiros minitubos com 9 mm, próximos 18 minitubos com 6 mm e os últimos 20 minitubos com 3 mm.	3,94	0,0215	5,83
<b>RT-11:</b> Rotoaerado híbrido com 18 primeiros minitubos com 3 mm, próximos 18 minitubos com 6 mm e os últimos 20 minitubos com 9 mm.	3,71	0,0266	6,59
<b>RT-12:</b> Rotoaerado híbrido com 27 primeiros minitubos com 9 mm, próximos 27 minitubos com 6 mm e os últimos 29 minitubos com 3 mm.	3,68	0,0191	4,73
<b>RT-13:</b> Rotoaerado híbrido com 27 primeiros minitubos com 3 mm, próximos 27 minitubos com 6 mm e os últimos 29 minitubos com 9 mm.	3,88	0,0204	5,01
<b>RT-14:</b> Rotoaerado híbrido com 28 minitubos com 9 mm, 27 minitubos com 6 mm e 28 minitubos com também 9 mm sendo os diâmetros iguais dispostos axialmente e diâmetros diferentes radialmente distribuídos.	5,13	0,0187	5,36
<b>RT-15:</b> Rotoaerado híbrido com 28 minitubos com 6 mm, 27 minitubos com 9 mm e 28 minitubos com também 6 mm sendo os diâmetros iguais dispostos axialmente e diâmetros diferentes radialmente distribuídos.	3,86	0,0187	6,68
<b>RT-16:</b> Rotoaerado híbrido com 28 minitubos com 6 mm, 27 minitubos com 9 mm e 28 minitubos com 3 mm sendo os diâmetros iguais dispostos axialmente e diâmetros diferentes radialmente distribuídos.	4,61	0,0229	6,68
<b>RT-17:</b> Rotoaerado híbrido com 28 minitubos com 6 mm, 28 minitubos com 9 mm sendo a disposição dos tubos disposta de forma intercalada axialmente e radialmente.	4,59	0,0270	7,91
<b>RT-18:</b> Rotoaerado híbrido com 28 minitubos com 9 mm, 28 minitubos com 3 mm sendo a disposição dos tubos disposta de forma intercalada axialmente e radialmente.	3,25	0,0217	6,24
<b>RT-19</b> Rotoaerado híbrido com 28 minitubos com 6 mm, 28 minitubos com 3 mm sendo a disposição dos tubos disposta de forma intercalada axialmente e radialmente.	3,88	0,0228	6,65

Os valores iniciais e finais de umidade absoluta e relativa do ar, de temperatura do fluido e do sólido, e de umidade do sólido, obtidos experimentalmente são apresentados no Apêndice B.

Os resultados apresentados nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4 foram obtidos para os secadores rotoaerados nas diferentes configurações da Tabela 4.1, porém nas mesmas condições experimentais: velocidade do ar na entrada 1,1 m/s, temperatura do ar na entrada 85°C, vazão de alimentação de sólidos ( $G_{su}$ ) 1,0 kg/min.

A Figura 4.2 mostra os resultados dos tempos médios de residência de cada experimento realizados nas configurações da Tabela 4.1.

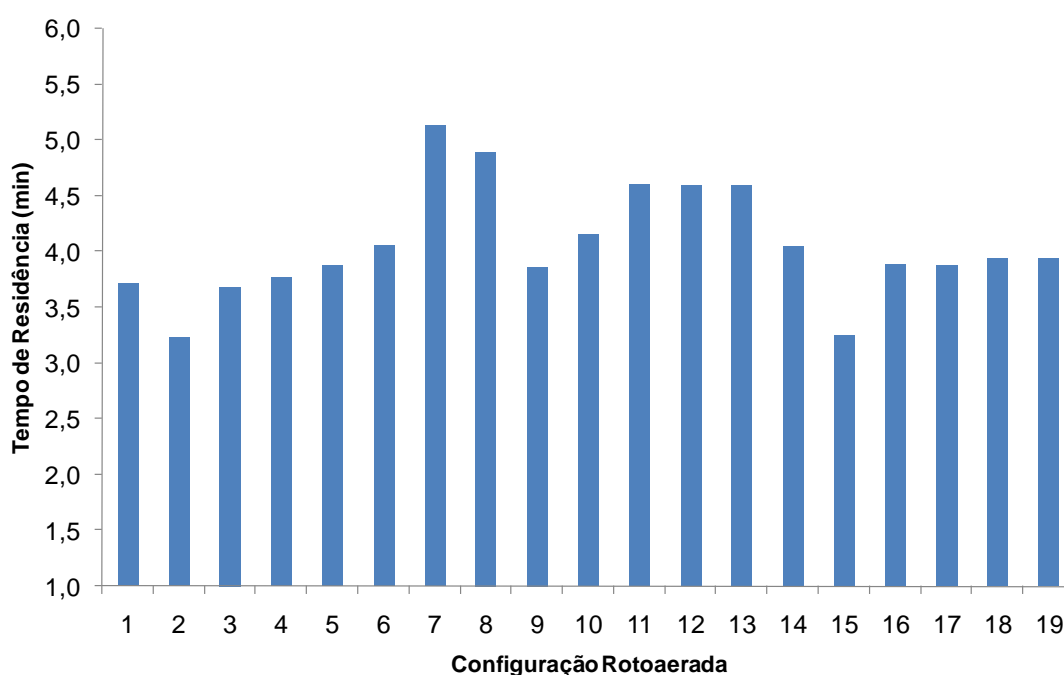


Figura 4.2 – Resultados de tempo médio de residência para as diferentes configurações do secador rotoaerado da Tabela 4.1.

Observa-se nos resultados da Figura 4.2 que o tempo médio de residência das configurações rotoaeradas deste trabalho apresentaram valores variando dentro da faixa de 3,25 a 5,13 minutos. Os resultados mostram que a diferente distribuição, diâmetro e disposição dos minitubos no secador rotoaerado que conseqüentemente leva a uma variação da velocidade do ar na saída dos minitubos pode ter interferido no escoamento das partículas.

Observa-se que para as configurações com diâmetro de saída 9 mm, o aumento na quantidade de minitubos de 42 para 56 observado nas configurações RT-09 e RT-03 (respectivamente) não proporcionou uma diferença estatística no tempo médio de

residência da partícula nessa condição experimental. O mesmo ocorreu observando-se o aumento de 56 para 83 minitubos nas configurações RT-03 e RT-06, os valores de tempo médio de residência foram estatisticamente iguais (utilizando a análise t-student). Porém esses resultados não foram observados nas configurações com 6 e 3 mm de diâmetro de minitubos. Nas configurações RT-04 e RT-07 e também RT-05 e RT-08 os resultados de tempo de residência com o aumento na quantidade de minitubos de 56 para 83 mostraram aumento significativo de 26% para as configurações RT-05 e RT-08 com 3 mm de diâmetro de minitubos e 36% para as configurações RT-04 e RT-07 com 6 mm de diâmetro de minitubos. Observa-se nestes resultados que o aumento na quantidade de minitubos não favoreceu o escoamento das partículas.

Os experimentos 3, 4 e 5 que correspondem as configurações não híbridas, com diâmetros de saída 9, 6 e 3 mm respectivamente, com total de 56 minitubos e a configuração RT-09 com 9 mm e 42 minitubos apresentaram resultados semelhantes de tempo médio de residência.

A configuração RT-15 foi a que apresentou menor valor de tempo médio de residência com 28 minitubos com 6 mm, 27 minitubos com 9 mm e 28 minitubos com também 6 mm sendo os diâmetros iguais dispostos axialmente. Este resultado mostra que esta disposição de minitubos pode ter favorecido o escoamento das partículas.

A Figura 4.3 mostra a comparação entre os valores de água removida de cada experimento de secagem nas configurações da Tabela 4.1, nas mesmas condições experimentais: velocidade do ar na entrada 1,1 m/s, temperatura do ar na entrada 85°C, vazão de alimentação de sólidos ( $G_{su}$ ) 1,0 kg/min.

Os resultados da Figura 4.3 mostram que nos experimentos realizados com as configurações RT-07, RT-09, RT-11 e RT-17 os valores de água removida foram maiores do que os valores encontrados para as demais configurações. A configuração RT-07, por exemplo, pode ter tido maior resultado de água removida devido ao maior valor de tempo médio de residência da partícula. Os experimentos realizados com as configurações RT-09 e RT-17 apresentaram alto valor de água removida e ao mesmo tempo um baixo valor de tempo médio de residência, mostrando que estas configurações podem ter propiciado um maior contato gás partícula e por isso uma maior remoção da umidade.

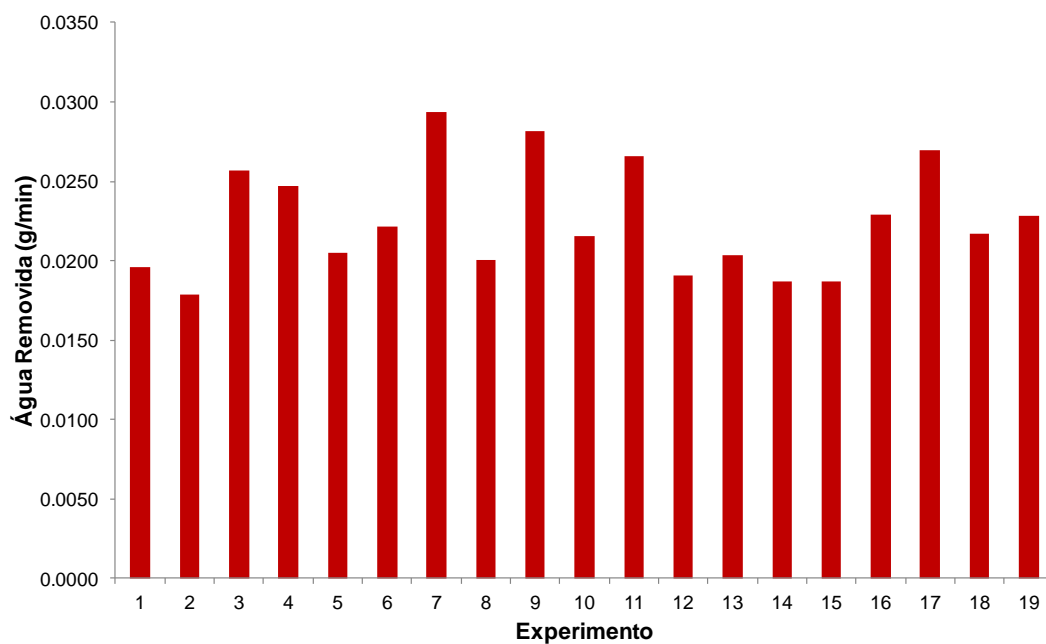


Figura 4.3 – Resultados de água removida na secagem de fertilizantes para as configurações da Tabela 4.1.

A Figura 4.4 apresenta aos resultados das taxas de secagem de cada experimento das configurações da Tabela 4.1 .

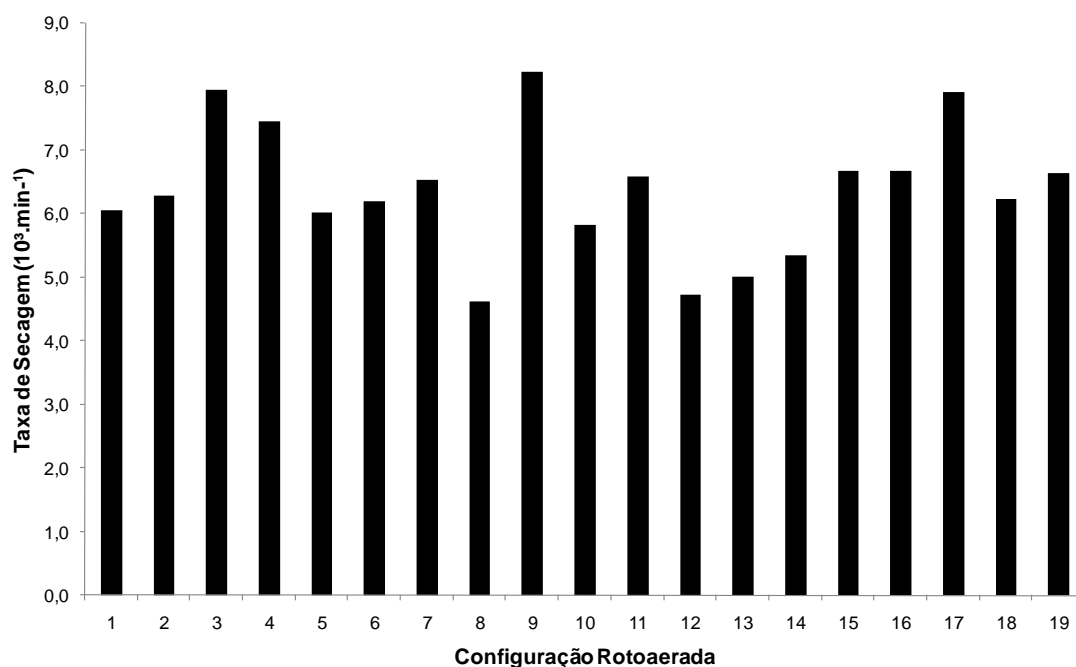


Figura 4.4 – Resultados de taxa de secagem para as configurações da Tabela 4.1.



A mesma análise comparando-se configurações com diferentes quantidades de minitubos de mesmo diâmetro foi feita para os resultados de taxa de secagem. Observa-se que para as configurações com diâmetro de saída 9 mm, o aumento na quantidade de minitubos de 42 para 56, observado quando se passou da configuração RT-09 para a RT-03, não conduziu a uma diferença significativa na taxa de secagem (para essa condição experimental). O mesmo não ocorreu observando-se o aumento de 56 para 83 minitubos nas configurações RT-03 e RT-06. A taxa de secagem foi 22% maior para a configuração RT-03 com menos minitubos. Para as configurações com 6 e 3 mm de diâmetro de minitubos, respectivamente em RT-04 e RT-07, e em RT-05 e RT-08, o aumento da quantidade de minitubos também proporcionou uma redução da taxa de secagem de 23% para as configurações com 3 mm de diâmetro de minitubos e de 12% para as configurações com 6 mm de diâmetro de minitubos. Isto deve ter ocorrido uma vez que o aumento da quantidade de minitubos proporcionou um aumento mais significativo do tempo de residência do que da água removida.

Os resultados da Figura 4.4 mostram que as configurações RT-3, RT-4, RT-9 e RT-17 apresentaram os maiores valores de taxa de secagem. As configurações RT-3 e RT-4, que têm respectivamente 56 minitubos de 9 mm de diâmetro e 56 tubos minitubos de 6 mm de diâmetro, mostram valores altos de água removida (Figura 4.3) e baixos valores de tempo médio de residência (Figura 4.2). Esta combinação levou à elevadas taxas de secagem. As configurações híbridas RT-7 e RT-11 apresentaram valores elevados de água removida por apresentarem também elevados valores de tempo médio de residência, conseqüentemente não conduziram a expressivos valores de taxa de secagem. A configuração RT-17 também se mostrou eficiente dentre às demais por apresentar altos valores de taxa de secagem, também devido à combinação da expressiva quantidade de água removida e o baixo tempo médio de residência das partículas.

Diante desses resultados apresentados observou-se a necessidade de se avaliar mais detalhadamente as configurações que apresentaram melhor desempenho na secagem (ou seja maiores taxas de secagem). Sendo assim, visto que em seu trabalho, ARRUDA (2008) propôs um PCC para avaliação da configuração RT-03 ( 56 minitubos de 9 mm de diâmetro) em diferentes condições experimentais, optou-se por avaliar as melhores configurações, i.e RT-4, RT-9 e RT-17, ou seja, 56 minitubos de 6 mm de diâmetro, 42 minitubos de 9 mm de diâmetro e a configuração híbrida com 28

minitubos de 9 mm e 28 minitubos de 6 mm de diâmetro, dispostos na mesma configuração de forma intercalada, utilizando-se o mesmo planejamento experimental utilizado por ARRUDA (2008).

Sendo assim, as próximas figuras mostram os resultados dos experimentos realizados conforme condições experimentais do PCC proposto por ARRUDA, (2008), mostrado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Planejamento experimental dos ensaios de secagem do fertilizante SSPG para comparação de desempenho dos secadores convencionais e rotoaerados.

Experimento	$v_f$ (m/s)	$T_f$ (°C)	$G_{SU}$ (kg/min)
1	1,5	75	0,8
2	1,5	75	1,2
3	1,5	95	0,8
4	1,5	95	1,2
5	3,5	75	0,8
6	3,5	75	1,2
7	3,5	95	0,8
8	3,5	95	1,2
9	1,1	85	1
10	3,9	85	1
11	2,5	71	1
12	2,5	99	1
13	2,5	85	0,7
14	2,5	85	1,3
15	2,5	85	1
16	2,5	85	1
17	2,5	85	1
18	2,5	85	1

As Figuras 4.5 a 4.8 abaixo apresentam os resultados de tempo de residência, água removida, taxa de secagem e acréscimo na temperatura do sólido, para as configurações convencionais avaliadas em trabalhos anteriores (SILVÉRIO, 2010 e ARRUDA, 2008) e as configurações rotoaeradas deste trabalho que obtiveram maiores valores de taxa de secagem. As configurações rotoaerados avaliadas foram: a

configuração rotoaerada com 56 minitubos de 9 mm de diâmetro (RT-03), avaliada por ARRUDA (2008), e as configurações com 56 minitubos de 6 mm de diâmetro (RT-04), 42 minitubos de 9 mm de diâmetro (RT-09) e a combinação com 28 minitubos com 9 mm e 28 minitubos com 6 mm de diâmetro (RT-17).

A Figura 4.5 mostra que as configurações do secador rotatório convencionais apresentaram maiores valores de tempo médio de residência do que as configurações do secador rotoaerado. Este resultado pode ser explicado pela alta velocidade do ar na saída dos minitubos, que favorece o escoamento das partículas e pode ter viabilizado o transporte das mesmas na configuração não convencional. Nas configurações rotoaeradas estudadas, pode-se verificar ainda que nos experimentos 5, 6, 7, 8 e 10, do PCC (Tabela 4.2), que são os experimentos com maiores velocidades do ar alimentado (3,5 m/s e 3,9 m/s), a diferença entre os valores de tempo médio de residência em comparação com as configurações convencionais, é ainda mais expressiva.

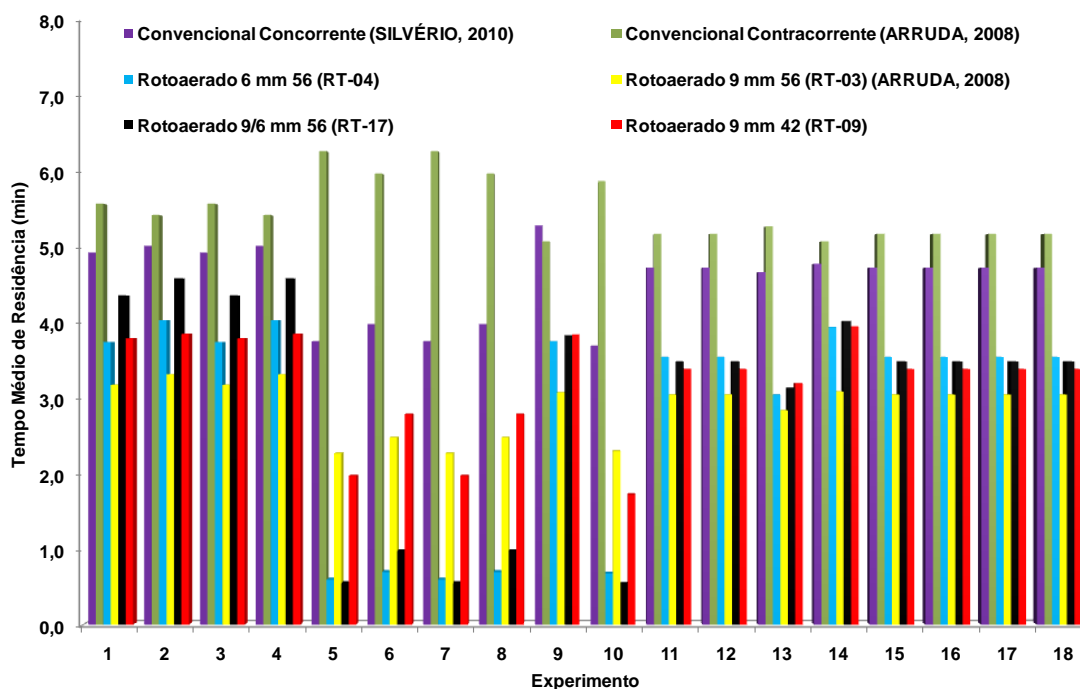


Figura 4.5 – Resultados de tempo médio de residência nas diferentes condições experimentais do PCC.

Enquanto nas demais condições experimentais com velocidades do ar menores o tempo médio de residência para a configuração convencional contracorrente mostrou-se uma a duas vezes maiores que os tempos de residência da configuração rotoaerada RT-17, nas condições de velocidade do ar maiores esses valores sofreram reduções de até

11 vezes com a configuração rotoaerada. Isto confirma a influência da velocidade de saída do ar nos minitubos no transporte e escoamento das partículas.

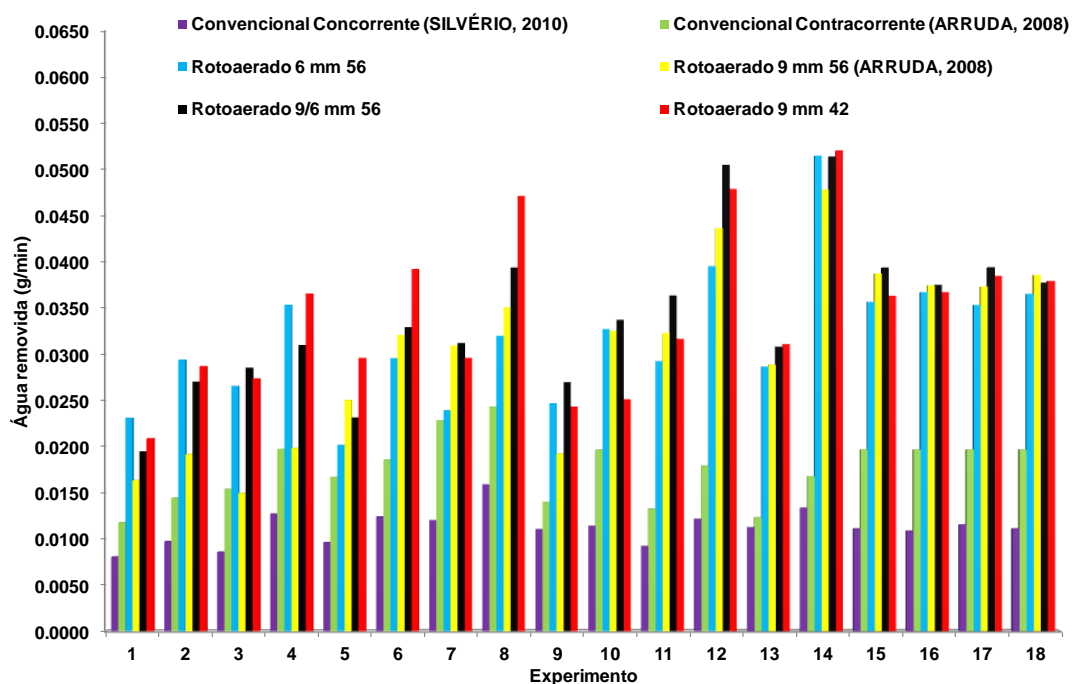


Figura 4.6 – Água removida nas diferentes condições experimentais do PCC.

Na Figura 4.6 é possível verificar que os valores de água removida sofreram pequena influência da velocidade do ar alimentado e maior influência da temperatura e vazão de sólidos alimentados. Observam-se altos valores de água removida nas condições de maior taxa de alimentação de sólidos (experimento 14 com  $G_{su} = 1,3$  kg/min) e maior temperatura (experimentos 12 com  $T=99^{\circ}\text{C}$ ) em relação aos demais experimentos. Em todos os casos a quantidade de água removida foi maior nas versões do secador rotoaerado em relação às versões convencionais.

A partir da Figura 4.7 é possível verificar que a taxa de secagem foi maior para todas as configurações rotoaeradas quando comparada com a taxa de secagem das configurações convencionais. Observa-se claramente pela Figura 4.7 que os mais altos valores de taxa de secagem ocorreram nos experimentos 5, 6, 7, 8, e 10. Nestes experimentos a taxa de secagem foi respectivamente 15, 9, 15,9 e 18 vezes maior para a configuração RT-17 rotoaerada (com 9/6 mm e 56 minitubos) comparada com a configuração convencional contracorrente, enquanto a configuração RT-03 estudada por ARRUDA (2008) apresentou valores de 2 a 3 vezes maior que a configuração convencional contracorrente.

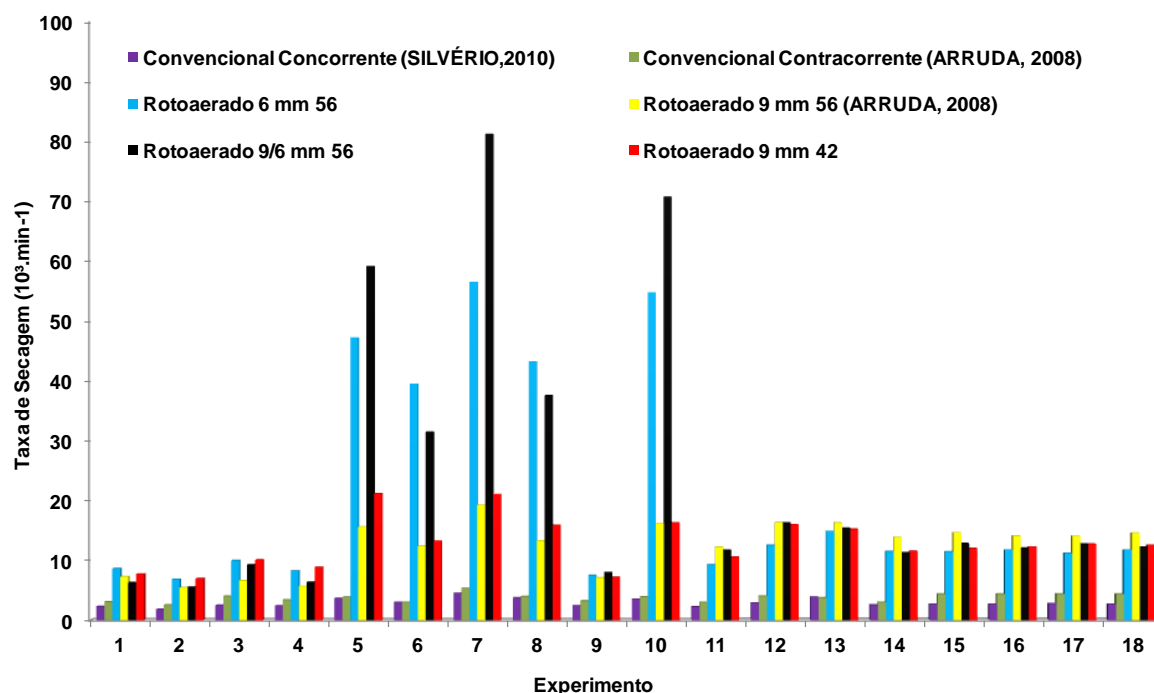


Figura 4.7 – Resultados de taxa de secagem nas diferentes condições experimentais.

Constata-se pela Tabela 4.2 que esses experimentos (5, 6, 7, 8, e 10) foram realizados nas maiores velocidades de ar na alimentação (3,5 m/s e 3,9 m/s). Além disso, esses altos valores de taxa de secagem podem ser explicados pelo fato dessas condições experimentais terem apresentado pela Figura 4.5 baixos valores de tempo médio de residência. Sendo assim, as condições experimentais que proporcionam uma maior velocidade de escoamento das partículas conduziram a resultados que evidenciam o melhor desempenho do secador rotoaerado em comparação com o secador convencional.

Pode-se dizer, então, que as configurações com 56 minitubos de 6 mm de diâmetro (RT-04) e a combinação e a configuração rotoaerada RT-17 com 9/6 mm e 56 minitubos (combinação entre 28 minitubos de 9 mm e 28 de 6 mm de diâmetro) mostraram-se mais eficientes que as demais configurações rotoaeradas estudadas nas condições de maiores vazões de fluido de secagem.

Observa-se, pela Figura 4.8, que os resultados de acréscimo na temperatura do sólido (fertilizante) foram maiores nas configurações rotoaeradas, quando comparados com as configurações convencionais. Isto evidencia o melhor contato fluido-partícula e a maior transferência de calor no secador rotoaerado. Entretanto, cuidados devem ser tomados quando estas configurações forem utilizadas para produtos termicamente

sensíveis. Neste caso devem-se avaliar as condições experimentais para se evitar a degradação do produto.

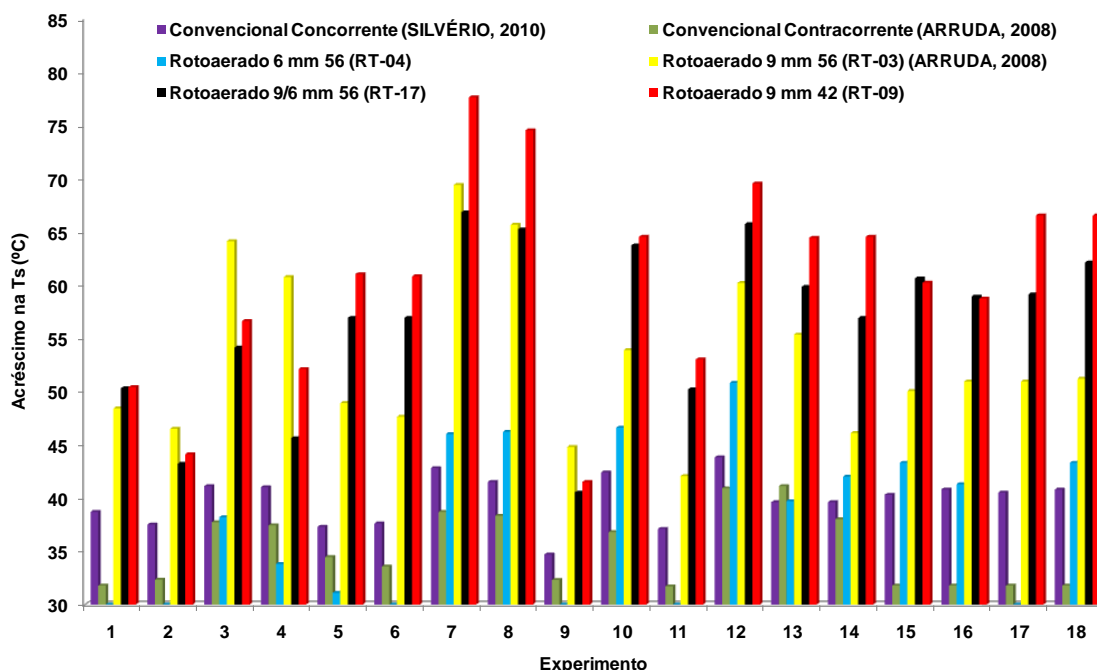


Figura 4.8 – Resultados do acréscimo na temperatura das partículas sólidas nas diferentes condições experimentais.

A partir dos resultados obtidos, verificou-se que o secador rotoaerado apresentou resultados de maior eficiência de secagem quando comparado com as versões convencionais. Esses valores foram ainda mais acentuados nas maiores condições de velocidade do ar alimentado mostrando a maior capacidade da configuração rotoaerada nas condições de maior vazão de ar de secagem.

Como visto nos resultados mostrados nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7, verifica-se que as configurações rotoaeradas avaliadas RT-04, RT-17 e RT-09 apresentaram ótimos resultados de secagem. Observa-se, ainda, que enquanto a configuração RT-03 (56 minitubos de 9mm), avaliada no trabalho de ARRUDA (2008) apresentava acréscimo de no máximo 4,9 vezes a taxa de secagem em comparação à versão convencional contracorrente, as configurações estudadas neste trabalho RT-04 e RT-17 apresentaram resultados ainda melhores. A configuração RT-17 (com 9/6 mm e 56 minitubos), por exemplo, apresentou valores de taxa de secagem até 18 vezes maior do que o encontrado para a configuração convencional contracorrente. Desta forma verificou-se a existência de configurações com desempenho superior aos das configurações já estudadas anteriormente.

Em continuação houve a necessidade de se avaliar a eficiência deste mesmo secador operando com maiores condições de carregamento (*holdup*), já que o secador convencional apresenta uma limitação nos níveis desta variável. Desta forma foram realizados experimentos extrapolando-se a vazão de alimentação de sólidos úmidos ( $G_{su}$ ) do planejamento da Tabela 3.3. Estes experimentos foram realizados na condição de maior velocidade do ar do PCC da Tabela 3.3 (ou seja  $v_{ar}=3,9$  m/s). As vazões de alimentação de sólidos utilizadas neste próximo estudo foram as da Tabela 3.4, ou seja: 1,0; 1,3; 1,9 e 2,5 kg/min. A temperatura do ar destes experimentos foi de 85°C.

As Figuras 4.9 a 4.11 apresentam os resultados de tempo médio de residência, taxa de secagem e carga de sólidos retida nos secadores rotoaerados nas configurações com 9 mm de diâmetro e 56 minitubos (RT-03), 9/6 mm com 56 minitubos tubos (RT-17) e 9 mm de diâmetro dos 42 minitubos (RT-09), bem como os resultados para o secador rotatório convencional contracorrente.

Observa-se pela Figura 4.9 que o tempo de residência para os secadores rotoaerados aumentou com a vazão de alimentação de sólidos ( $G_{su}$ ), porém mantendo-se sempre menor do que o tempo de residência da configuração contracorrente em todas as condições analisadas. A configuração rotoaerada com 42 minitubos de 9 mm de diâmetro (RT-09) mostrou maior resultado de tempo médio de residência nos menores valores de  $G_{su}$  (1,0 e 1,3 kg/min) e valores próximos as demais configurações do secador rotoaerado (RT-04 e RT-17) nos maiores valores de  $G_{su}$  (1,9 e 2,5 kg/min). A versão rotoaerada com 56 minitubos de 6 mm (RT-04) em geral apresentou baixos valores de tempo médio de residência em relação às demais configurações.

Observa-se um diferente comportamento em relação ao tempo de residência das partículas no secador rotatório convencional contracorrente. O tempo de residência aumenta no secador convencional, passa por um ponto de máximo e diminui com o aumento da  $G_{su}$ . Esse comportamento pode ser explicado pelo aumento da quantidade de partículas de fertilizantes que ficam no fundo do tambor e não são coletadas pelos suspensores. Essas partículas não coletadas tendem a se movimentarem mais facilmente pelo processo de rolagem (*rolling effect*) e são arrastadas até o final do equipamento reduzindo o tempo de residência (KONIDES, 1984).

É importante lembrar que a rolagem das partículas deve ser evitada nos secadores convencionais, uma vez que o tempo efetivo de secagem no equipamento convencional consiste no tempo em que as partículas estão sendo descarregadas dos

suspensores, pois durante o cascadeamento ocorre o maior contato gás-partícula sendo este considerado o período efetivo de secagem.

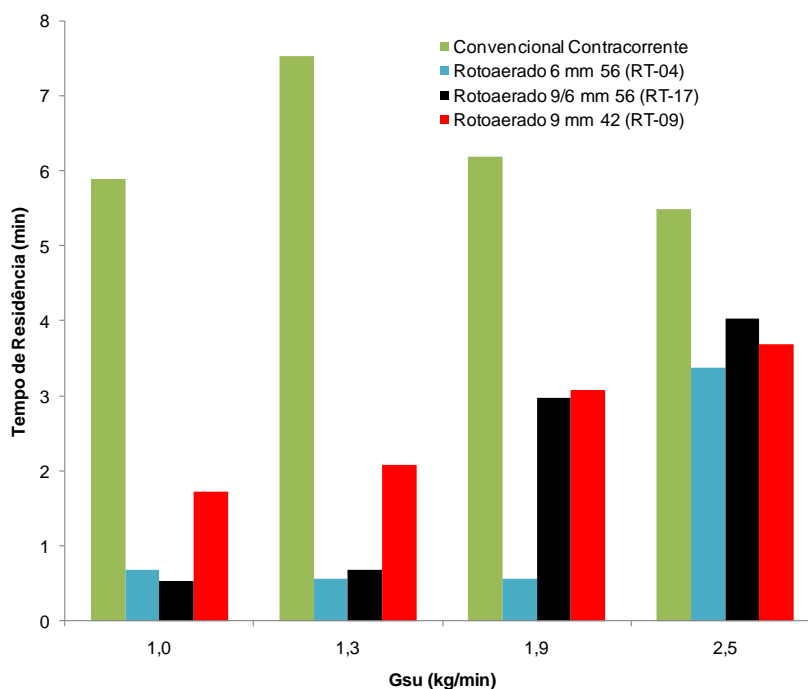


Figura 4.9 – Tempo de residência nas condições de maiores vazões de alimentação de sólidos.

A partir dos resultados da Figura 4.10 é possível visualizar os resultados de taxa de secagem para as configurações destacadas nas maiores vazões de alimentação de sólidos. É possível verificar que em todas as condições de vazão de alimentação, o secador rotoaerado obteve maiores taxas de secagem do que o secador convencional. A versão rotoaerada com 56 minitubos de 6 mm de diâmetro (RT-04) apresentou maiores taxas de secagem nas maiores vazões de sólido estudadas (1,9 e 2,5 kg/min) quando comparada com as outras versões rotoaeradas.

Nas condições de menor vazão de alimentação (1,0 kg/min) observa-se que a versão rotoaerada híbrida, que combina os diâmetros 9 e 6 mm (RT-17), apresentou resultados de taxa de secagem até 18 vezes maior que a versão convencional contracorrente. Na condição de vazão de alimentação igual a 1,3 kg/min a configuração rotoaerada com 56 minitubos de 6 mm de diâmetro (RT-04) apresentou resultados até 14 vezes maior do que a versão convencional.



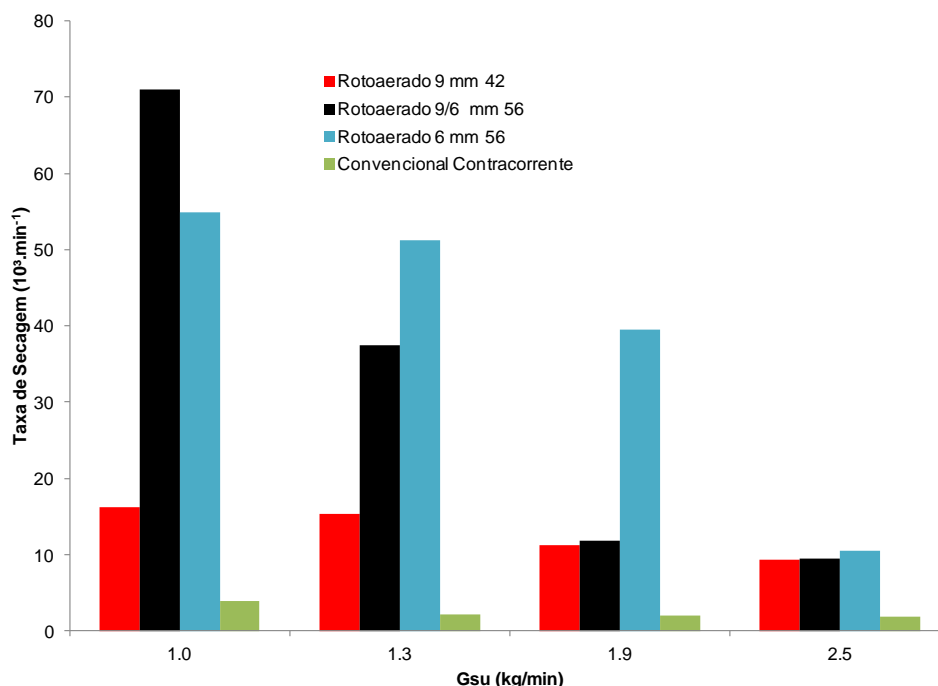


Figura 4.10 – Resultados da taxa de secagem nas condições com maiores vazões de alimentação de sólidos.

No maior valor de  $G_{su}$ , ou seja 2,5 kg/min, observou-se que as versões do secador rotoaerado apresentaram resultados em torno de 4,5 vezes maior do que a versão convencional e próximos entre si. Este menor desempenho pode ter sido resultado da alta condição de carregamento do secador rotoaerado operando com a alimentação de 2,5 kg/min, uma vez que uma maior quantidade de sólidos úmidos disponível acarreta uma redução do potencial de secagem. Além disso, observou-se uma diferença entre o comportamento do tempo médio de residência com o aumento da vazão de alimentação de sólidos para as configurações rotoaeradas e a configuração convencional. O aumento da vazão de alimentação provocou um aumento do tempo de residência para a versão rotoaerada enquanto a partir de 1,3 kg/min houve uma diminuição do tempo de residência para a configuração convencional o que pode ter provocado a redução da diferença entre as taxas de secagem das configurações convencionais e rotoaeradas.

Observa-se pela Figura 4.11 que a carga de sólidos no secador convencional foi maior em todas as condições de  $G_{su}$  analisadas quando comparada com a carga de sólidos nas versões rotoaeradas estudadas. Dentre as versões rotoaeradas observa-se que as configurações que apresentaram menores valores de carga foram as versões com 42

minitubos de 9 mm de diâmetro (RT-09) e com 56 minitubos de 6 mm de diâmetro (RT-04).

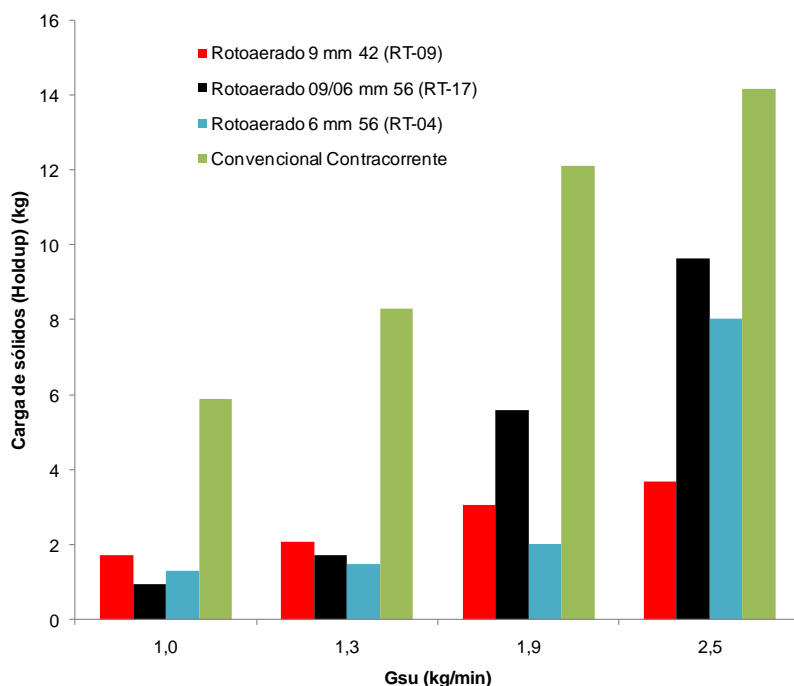


Figura 4.11 – Resultados da carga de sólidos no tambor (*holdup*) nas condições com maiores vazões de alimentação de sólidos.

Diante dos resultados apresentados, pode-se dizer que a versão rotoaerada apresenta bons resultados de eficiência de secagem mesmo operando nas maiores condições de carga de sólidos estudadas.

Uma das desvantagens em se utilizar o secador rotoaerado consiste na alta perda de carga observada neste novo equipamento. A Figura 4.12 traz os resultados da perda de carga das configurações rotoaeradas que apresentaram melhores resultados de taxa de secagem conforme a Figura 4.4, nas condições de velocidade do ar contidas no PCC da Tabela 4.1.

A Figura 4.12 mostra que a configuração com 56 minitubos de 6 mm de diâmetro (RT-04) apresentou maiores valores de perda de carga em relação às demais. A versão rotoaerada que apresentou menores valores de perda de carga foi a com 56 minitubos de 9 mm de diâmetro (RT-03).

Os resultados de perda de carga da versão convencional contracorrente não se encontram no gráfico uma vez que os valores obtidos foram muito pequenos (não sendo visualizados na escala do gráfico).

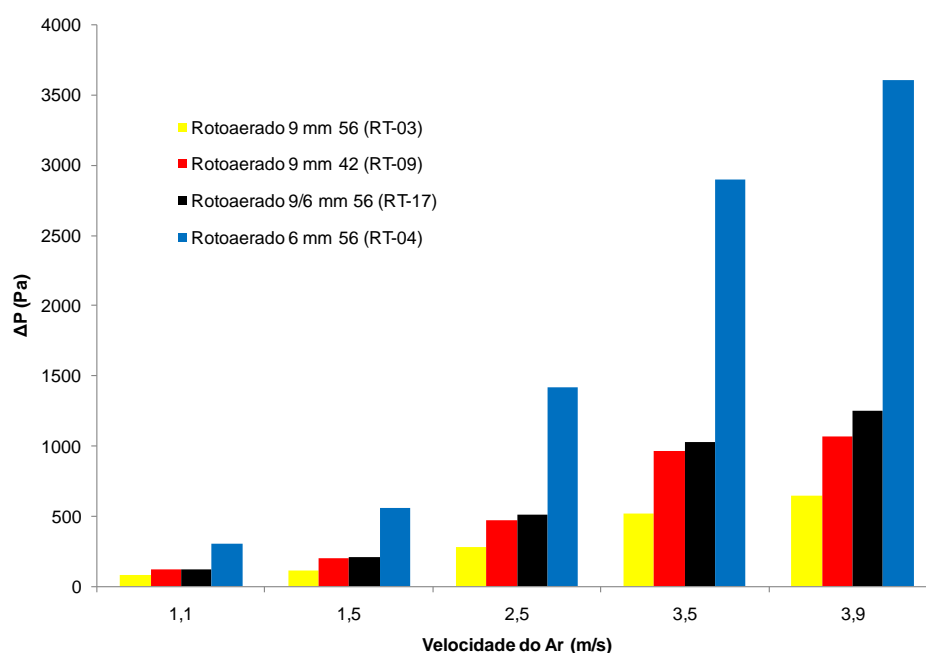


Figura 4.12 – Resultados da perda de carga nas configurações rotoaeradas.

Observando os resultados de perda de carga da Figura 4.12 juntamente com os demais resultados apresentados anteriormente, pode-se dizer que a configuração híbrida rotoaerada com 28 minitubos de 9 mm e 28 minitubos de 6 mm de diâmetro (RT-17) foi a que apresentou a melhor combinação entre taxa de secagem e perda de carga, ou seja, bons resultados de secagem e perda de carga não muito alta, quando comparada com as demais configurações estudadas.

#### 4.3 – Resultados de simulação em CFD da distribuição do ar na saída dos Minitubos nos secadores rotoaerados

Para melhor compreensão dos resultados experimentais nas diferentes configurações de secadores rotatórios rotoaerados, foram utilizadas as técnicas de simulação em Fluidodinâmica Computacional (CFD) para se obter os perfis de velocidade do ar e vazão nos minitubos.

Para validação dos resultados de simulação foram realizados experimentos nas configurações com 56 minitubos de 20 mm de diâmetro (RT-01) e na configuração com 56 minitubos com 9 mm de diâmetro (RT-03) na condição do ponto central do PCC da Tabela 3.3 para a velocidade do ar alimentado, ou seja 2,5 m/s.

As Figuras 4.13 e 4.14 apresentam os resultados experimentais e de simulação em CFD para as razões das vazões de saída dos minitubos pela vazão de entrada no tubo central. Os minitubos foram numerados de forma crescente de acordo com a distância percorrida pelo ar dentro do tubo central.

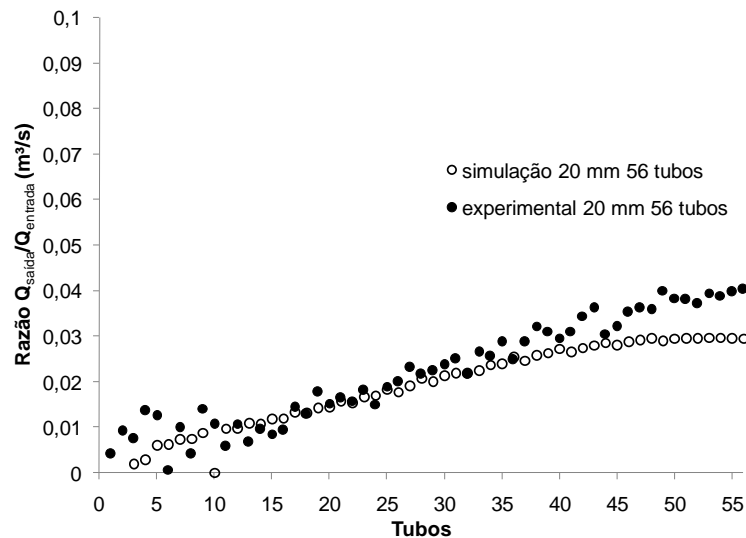


Figura 4.13 - Resultados experimentais e da simulação para razão das vazões de saída e entrada da configuração com minitubos de 20 mm de diâmetro (RT-01), (vazão de entrada de ar =  $0,078 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

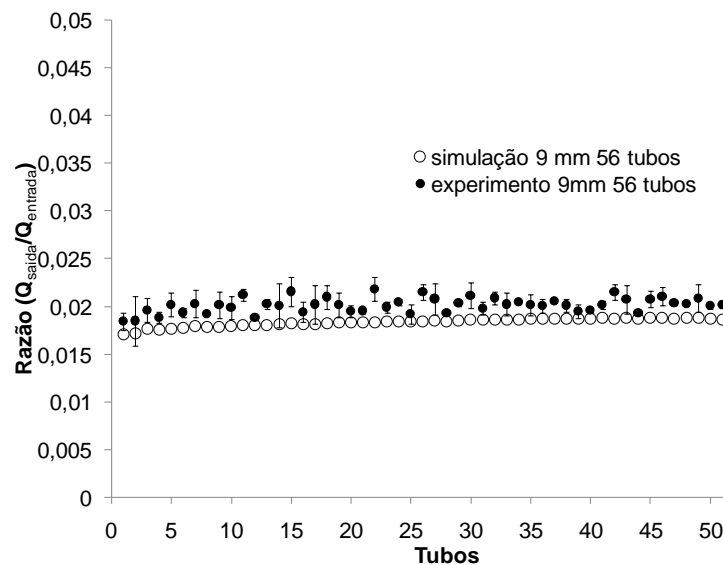


Figura 4.14 - Resultados experimentais e da simulação para razão das vazões de saída e entrada da configuração com minitubos de 9 mm de diâmetro (RT-03), (vazão de entrada de ar =  $0,078 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Na Figura 4.13 é possível ver uma distribuição mais heterogênea do ar nos minitubos, isto pode ter ocorrido devido ao maior diâmetro de minitubos (20 mm) o que

faz com que maiores vazões de ar saiam nos minitubos mais afastados da entrada de ar. A Figura 4.14 mostrou uma distribuição mais homogênea do ar devido ao menor diâmetro de minitubos (9 mm).

Pode-se verificar nas Figuras 4.13 e 4.14 que as simulações foram capazes de prever as vazões com boa concordância com os resultados experimentais, sendo os desvios pequenos tendo em vista a realidade experimental e a incerteza da medida. Sendo assim, os resultados mostram que as técnicas de CFD utilizadas mostraram-se satisfatórias para avaliar o comportamento do fluido em secadores rotoaerados.

As Figuras 4.15 a 4.23 e referem-se aos resultados de simulação em CFD das configurações avaliadas neste trabalho conforme a Tabela 3.2, nos seguintes valores de velocidades do ar na entrada: 1,1 m/s; 2,5 m/s e 3,9 m/s.

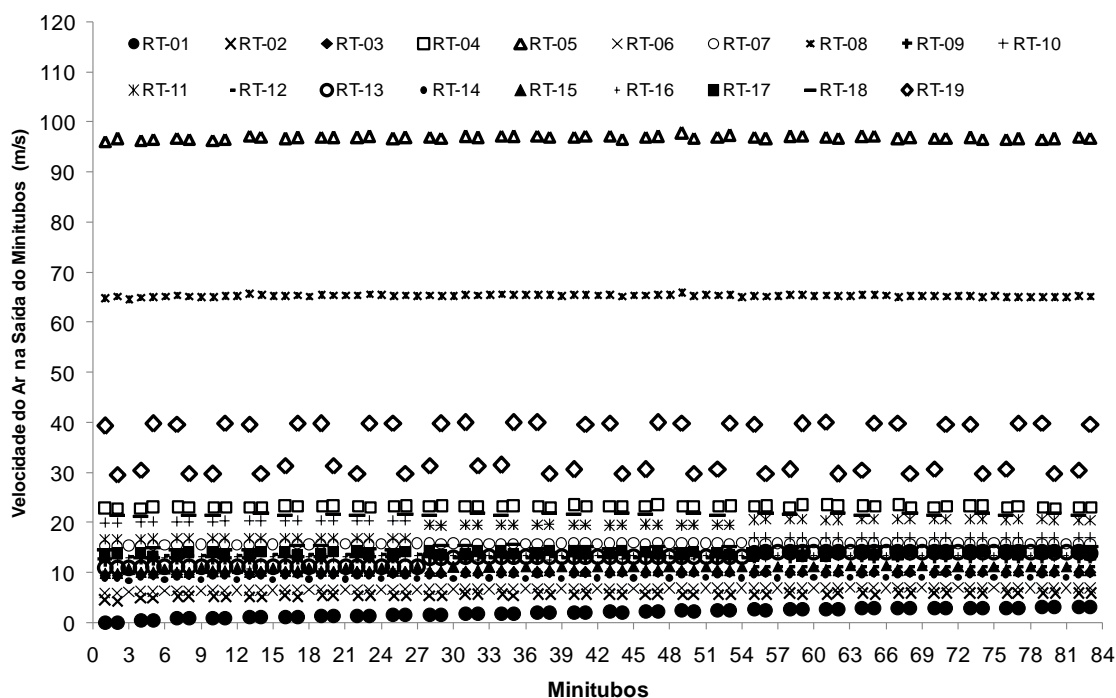


Figura 4.15 - Simulação em CFD das velocidades de saída do ar nos minitubos nas diferentes configurações com velocidade do ar na entrada igual a 1,1 m/s.

Observa-se na Figura 4.15 que as configurações RT-08 e RT-05, que correspondem às configurações com menor diâmetro de minitubos (3 mm) mostrou valores de velocidade média do ar muito maiores do que as demais configurações. Resultado esperado, pois os menores diâmetros de minitubos proporcionam maiores velocidades do ar na saída. Outro resultado esperado é que a configuração RT-01 com o

maior diâmetro de minitubos (20 mm) apresentou os menores valores de velocidade do ar na saída.

Para melhor visualização dos resultados, optou-se por fragmentar a Figura 4.15 nas Figuras 4.16, 4.17, e 4.18. A Figura 4.16 apresenta os resultados da Figura 4.15 difíceis de serem visualizados neste gráfico devido a escala, ou seja, os resultados de velocidade mostrados na Figura 4.15 para velocidades de saída do ar pelos minitubos de até 30 m/s. As Figuras 4.17 e 4.18 correspondem aos resultados de simulação em CFD das configurações não híbridas (que possuem minitubos com o mesmo diâmetro) e das configurações chamadas híbridas (com diferentes diâmetros de minitubos na mesma configuração), respectivamente.

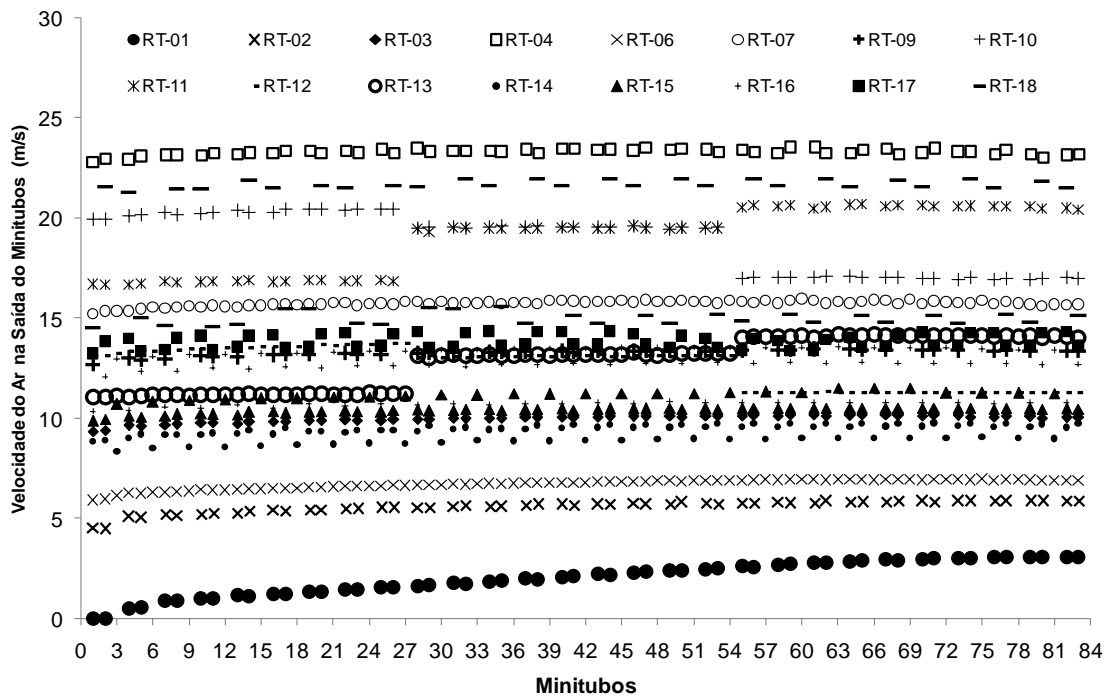


Figura 4.16 – Resultados da simulação em CFD das velocidades de saída do ar nos minitubos (para até 30 m/s) nas diferentes configurações com velocidade do ar na entrada igual a 1,1 m/s.

Conforme mostra a Figura 4.17, para a velocidade do ar na entrada os valores de velocidade de saída nos minitubos das configurações RT-01 a RT-09, tiveram em sua maioria resultados de velocidade de saída do ar moderados, variando em torno de 5 a 23 m/s, com exceção das configurações RT-01 com valores baixos de 0 a 3 m/s a

configuração RT-05 com as maiores velocidades em torno de 97 m/s e a configuração RT-08 com velocidades de saída em torno de 65 m/s.

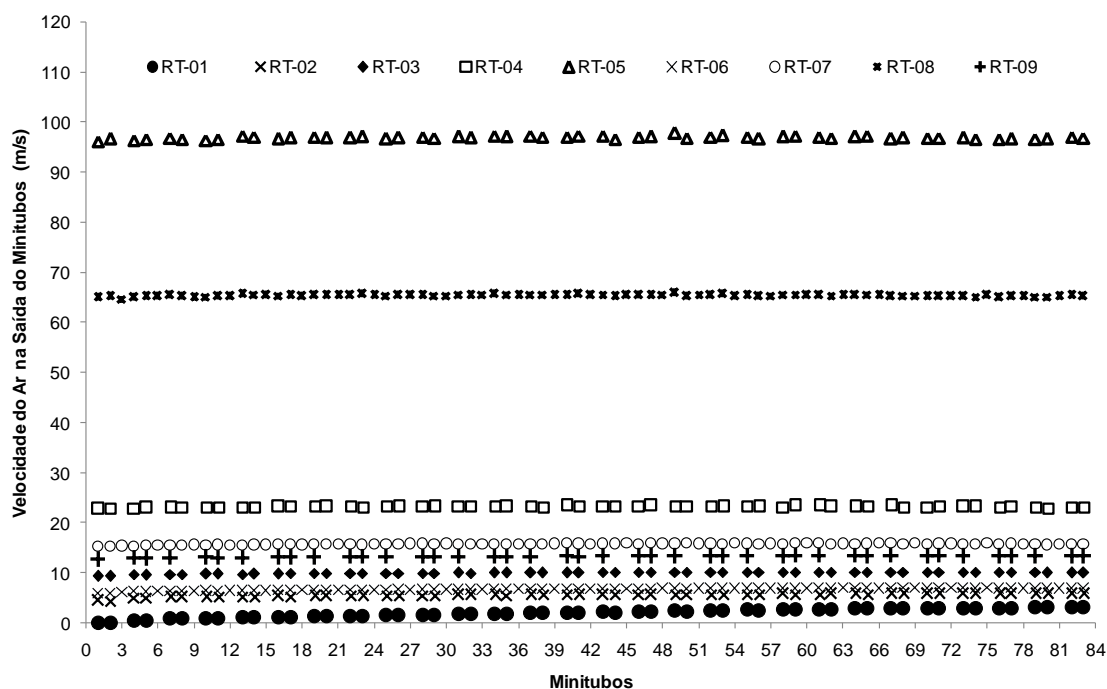


Figura 4.17 - Simulação em CFD das velocidades de saída do ar nos minitubos nas configurações não híbridas com velocidade do ar na entrada igual a 1,1 m/s.

Como apresentado anteriormente, a Figura 4.17 também mostra que as configurações RT-05 e RT-08 apresentaram resultados de velocidade de saída do ar muito maiores do que as demais configurações. As configurações RT-01 com velocidade variando entre 0 a 3 m/s e RT-02 com velocidade chegando a apenas 6 m/s mostraram os menores resultados de velocidade do ar na saída dos minitubos.

Como mostra a Figura 4.18, dentre as configurações híbridas os resultados de velocidade do ar na saída dos minitubos variaram entre 8 a 40 m/s. A configuração híbrida RT-19, mostrou uma maior diferença nos resultados de velocidade do ar na saída dos minitubos de diâmetros diferentes, em torno de 10 m/s a mais nas velocidades de saída dos minitubos com 6 mm em relação aos minitubos com 3 mm de diâmetro.

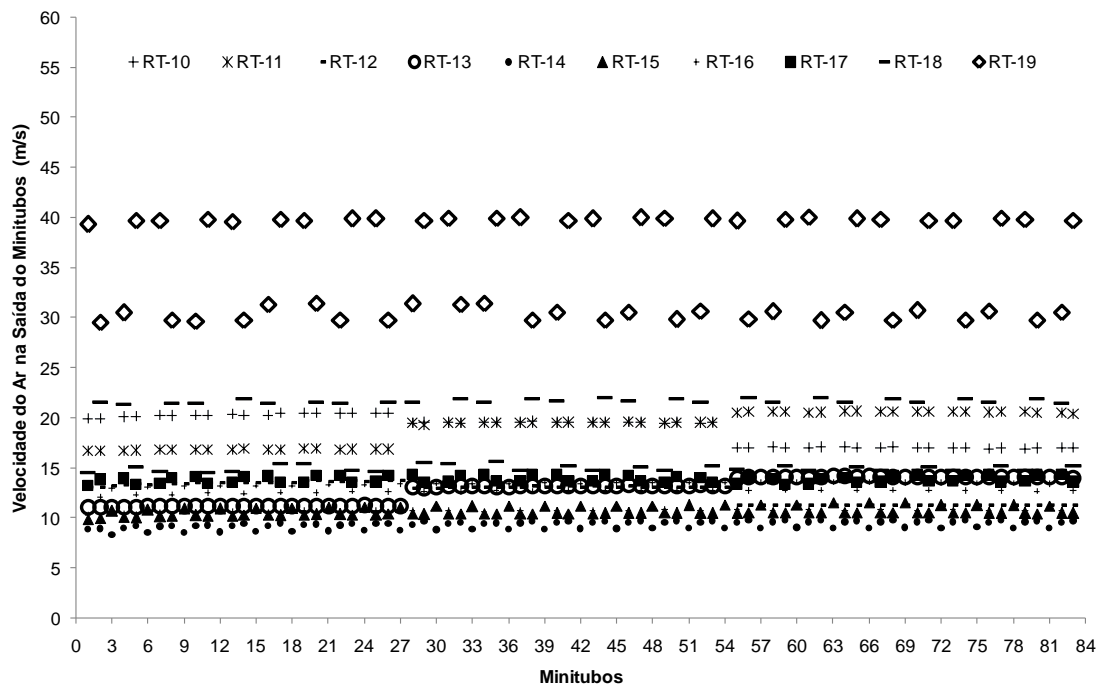


Figura 4.18 - Simulação em CFD das velocidades de saída do ar nos minitubos nas configurações híbridas com velocidade do ar na entrada igual a 1,1 m/s.

As Figuras 4.19 a 4.21 mostram os resultados para velocidade do ar na entrada igual a 3,9 m/s.

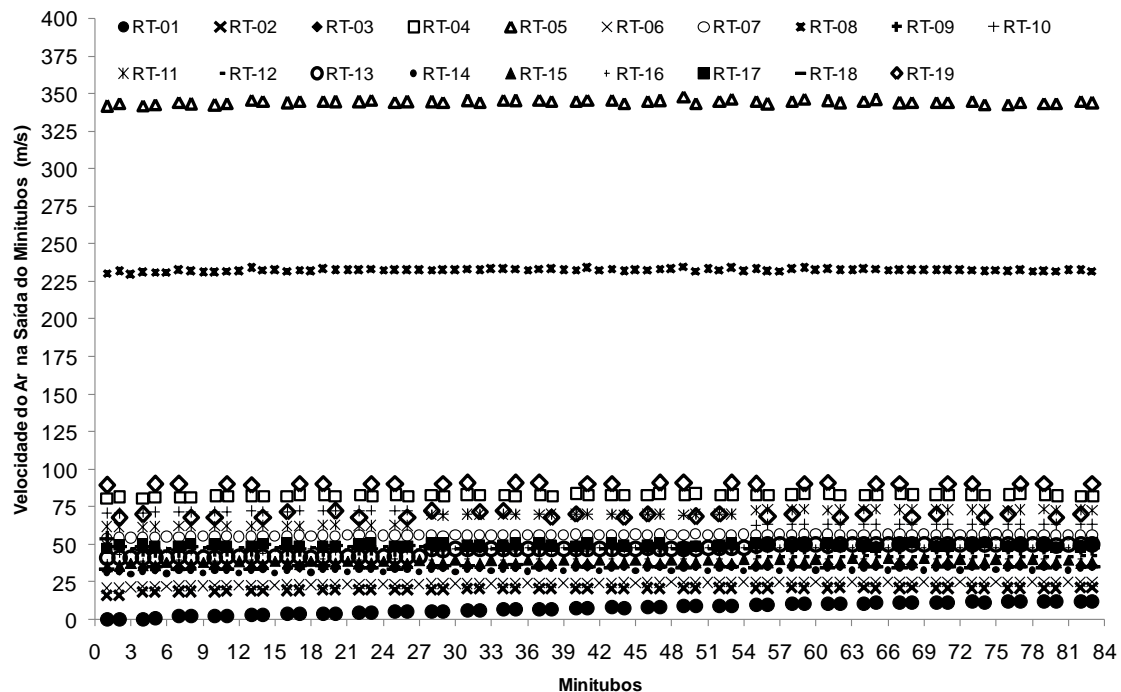


Figura 4.19 - Simulação em CFD das velocidades de saída do ar nos minitubos nas diferentes configurações da Tabela 3.2 com velocidade do ar na entrada igual a 3,9 m/s.



A Figura 4.19 mostra que as configurações RT-05 e RT-08 novamente apresentaram resultados de velocidade de saída do ar muito maiores do que as demais configurações. A configuração RT-01 mostrou baixos valores chegando a até 12 m/s.

A Figura 4.19 mostra que os valores de velocidade de saída nos minitubos das configurações RT-01 a RT-09, tiveram em sua maioria resultados de velocidade de saída do ar altos, a configuração RT-05 com as maiores velocidades em torno de 345 m/s e a configuração RT-08 com velocidades de saída em torno de 233 m/s.

Para melhor visualização dos resultados, optou-se por fragmentar a Figura 4.19 nas Figuras 4.20, 4.21, e 4.22.

A Figura 4.20 apresenta os resultados da Figura 4.19 que são difíceis de serem visualizados no gráfico devido a escala, ou seja, os resultados de velocidade mostrados na Figura 4.19 para velocidades de saída do ar pelos minitubos de até 30 m/s. As Figuras 4.21 e 4.22 correspondem aos resultados de simulação em CFD das configurações não híbridas (que possuem minitubos com o mesmo diâmetro) e das configurações chamadas híbridas (com diferentes diâmetros de minitubos na mesma configuração), respectivamente, para as simulações realizadas na velocidade do ar na entrada igual a 3,9 m/s.

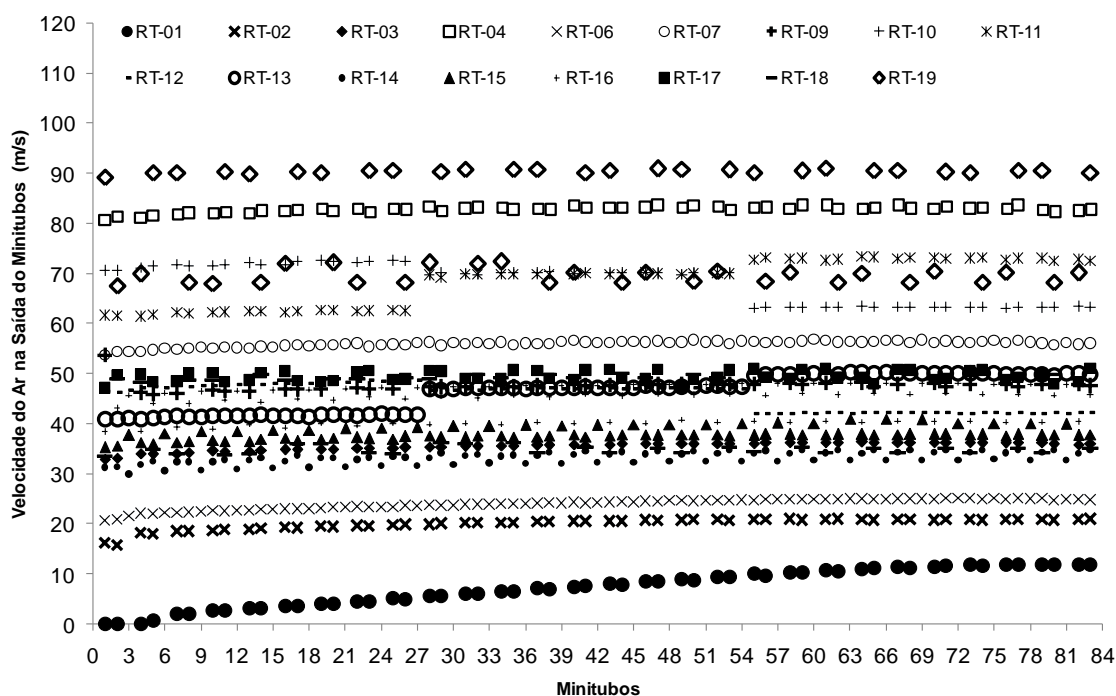


Figura 4.20 – Resultados da simulação em CFD das velocidades de saída do ar nos minitubos (para até 30 m/s) nas diferentes configurações com velocidade do ar na entrada igual a 3,9 m/s.

Observa-se ainda nas Figuras 4.19 e 4.20 que a configuração RT-17 dentre as configurações híbridas apresentou menor diferença entre as velocidades de saída dos diâmetros 9 mm e 6 mm.

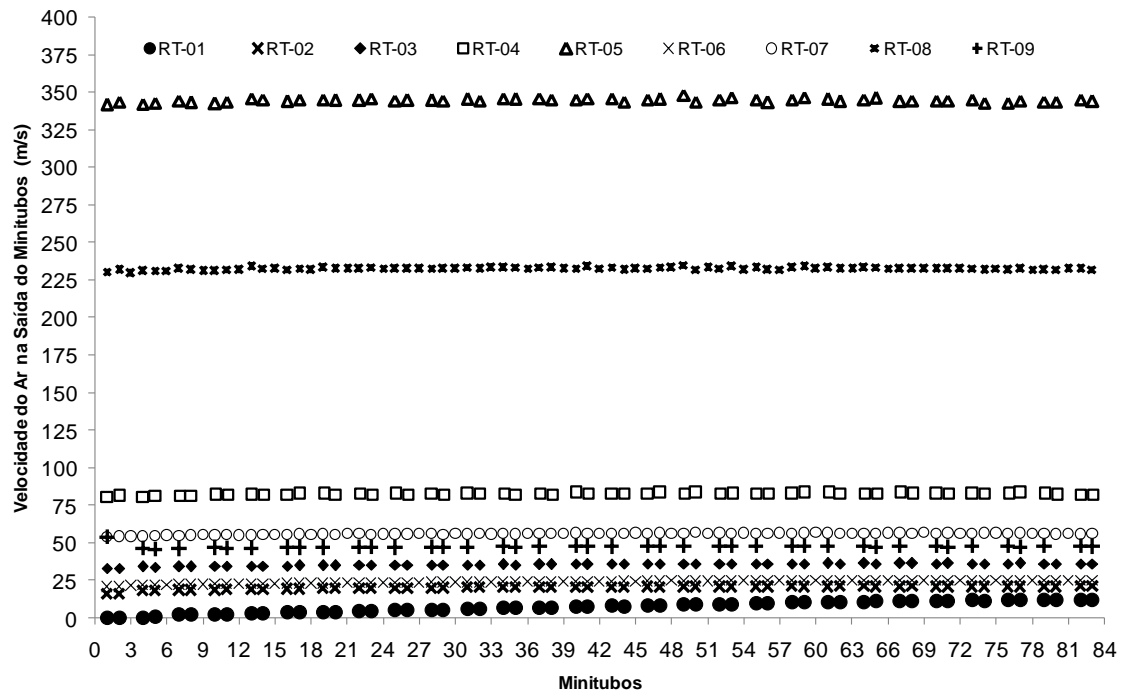


Figura 4.21 - Simulação em CFD das velocidades de saída do ar nos minitubos nas configurações não híbridas com velocidade do ar na entrada igual a 3,9 m/s.

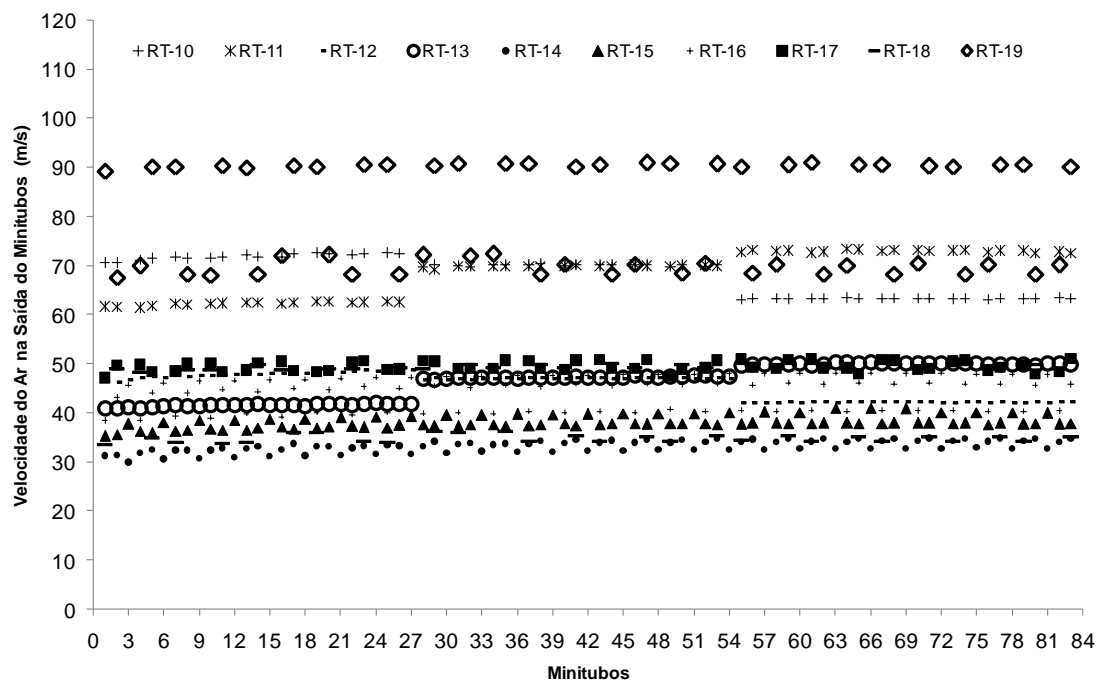


Figura 4.22 - Simulação em CFD das velocidades de saída do ar nos minitubos nas configurações híbridas da Tabela 3.2 com velocidade do ar na entrada igual a 3,9 m/s.

No Apêndice G são mostrados os resultados de simulação do secador rotoaerado para velocidade do ar na entrada igual a 2,5 m/s, uma vez que o comportamento observado em geral foi similar para as outras velocidades do ar na entrada.

Uma vez que as configurações que obtiveram melhores resultados experimentais de taxa de secagem foram as configurações RT-03, RT-04, RT-09 e RT-17, optou-se por montar em um mesmo gráfico os resultados de velocidade do ar na saída dos minitubos para essas configurações nas três diferentes velocidades do ar na alimentação: 1,1 m/s; 2,5 m/s e 3,9 m/s. A Figura 4.23 mostra esses resultados agrupados.

Observa-se pela Figura 4.23 que as configurações RT-09 e RT-17 mostraram resultados sempre próximos de velocidade de saída do ar, quando comparadas com as demais configurações, inclusive na maior velocidade do ar alimentado.

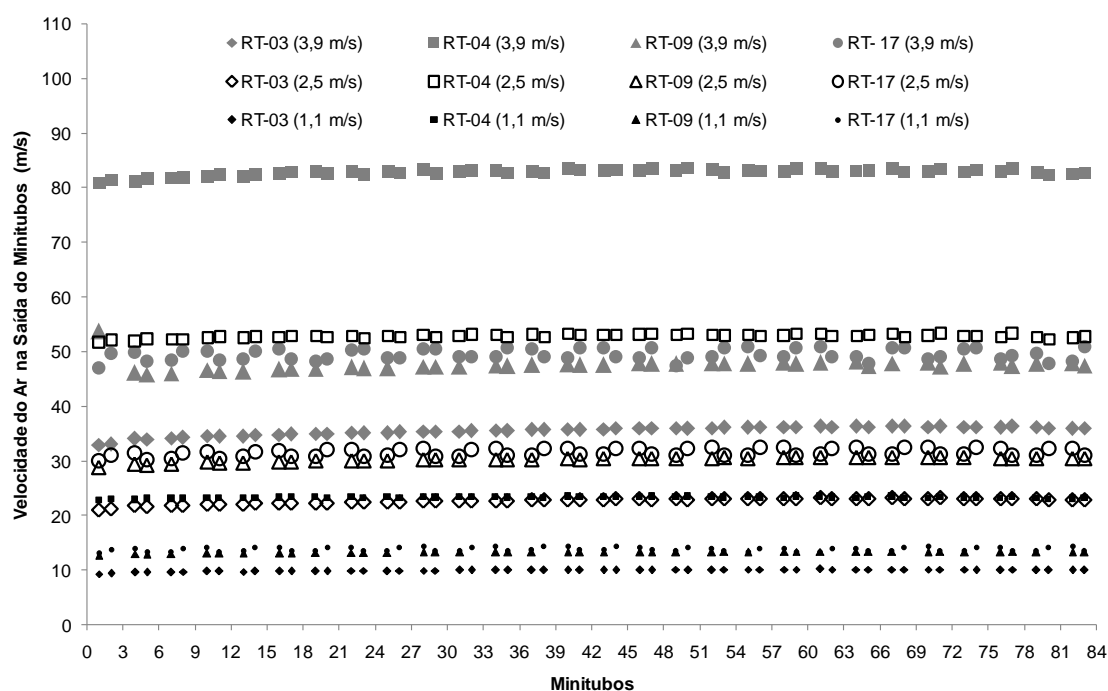


Figura 4.23 - Velocidades de saída do ar nos minitubos obtidas por CFD para as configurações RT-03, RT-04, RT-09 e RT-17.

Podemos verificar também que as demais configurações obtiveram as diferenças nos resultados acentuadas com o aumento da vazão de alimentação de fluido.

Esses resultados podem explicar, por exemplo, porque os tempos médios de residência da partícula nessas configurações da Figura 4.23 foram bem menores nas condições com velocidade do ar alimentado de 3,9 m/s.

Ao observar a Figura 4.23 os resultados das velocidades na saída dos minitubos na condição de velocidade de alimentação do ar de 1,1 m/s, percebe-se que os valores são próximos. As configurações RT-03, RT-09 e RT-17 com velocidades de saída nos minitubos em torno de 8 a 13 m/s e a configuração RT-04 com os valores maiores em torno de 23 m/s.

Desta forma nessa condição de baixa velocidade do ar alimentado (1,1 m/s), pode ter ocorrido pouca interferência das velocidades de saída do ar pelos minitubos para as configurações destacadas, por isso observa-se também nos resultados experimentais (Figuras 4.4 e 4.6) pouca interferência nos tempos médio de residência e consequentemente na taxa de secagem.

Como as diferenças nas velocidades de saída do ar nos minitubos foi acentuada com o aumento da vazão de alimentação, pode-se verificar que o tempos médios de residência obtidos experimentalmente (Figura 4.7) para essa condição foram bem menores nas configurações RT-04,e RT-17 , desta forma a interferência da velocidade do ar na saída dos minitubos pode ter sido maior.

Observa-se ainda na Figura 4.23 que a configuração RT-03 apresentou os mais altos valores de velocidade de saída do ar pelos minitubos, o que deve ter favorecido o escoamento das partículas e proporcionado um baixo tempo médio de residência para a condição de maior vazão de ar ( $v_{ar} = 3,9$  m/s).

A outra configuração que obteve baixos valores experimentais de tempo médio de residência da partícula para a maior vazão de ar na alimentação foi a RT-17 que apresentou velocidade de saída do ar nos minitubos em torno de 69% menor do que a configuração RT-04. Porém, a disposição dos 56 minitubos intercalados com 9 mm e 6 mm pode ter ajudado no escoamento da partícula, com as velocidades de saída em torno de 50 e 47 m/s, permitindo que a partícula percorra o equipamento com menor tempo de residência.

Já a configuração RT-09, mesmo apresentando valores de velocidade de saída do ar pelos minitubos (em torno de 47 m/s) próximos aos da configuração RT-17, não obteve valores experimentais no tempo de residência das partículas próximos aos das configurações RT-17 e RT-04. Isto pode ter ocorrido devido ao fato desta configuração possuir apenas 42 minitubos com 9 mm de diâmetro, enquanto as configurações RT-17 e RT-04 continham 56 minitubos.

A diminuição da quantidade de minitubos ocasionou um aumento nas velocidades do ar na saída dos minitubos quando comparadas com as da configuração RT-03 (com 56 minitubos com 9mm de diâmetro). Porém esse aumento não foi suficiente para favorecer o escoamento e resultar numa diminuição significativa no tempo de residência da partícula, mostrando que não só a velocidade do ar na saída, mas também as quantidades de minitubos influenciam nos resultados fluidodinâmicos do secador rotoaerado.

#### 4.4 – Resultados de simulação em CFD utilizando o modelo para fase discreta DEM

##### *Resultados da análise dos parâmetros na simulação DEM em tambores rotativos*

A Figura 4.25 mostra a fotografia do tambor rotativo de bancada utilizado. O ângulo de repouso foi obtido para 15 fotografias do experimento. Observou-se que o ângulo de repouso médio do material obtido através de fotografias foi de  $38,6^\circ$  com desvio de 3,5%.



Figura 4.25 - Unidade experimental com tambor rotativo de acrílico.

Para avaliação dos parâmetros relacionados ao coeficiente de fricção, constante elástica, e coeficiente de restituição, nas simulações DEM do tambor rotativo de acrílico utilizou-se o PCC da Tabela 3.5, reproduzido na Tabela 4.3, com os resultados simulados do ângulo dinâmico de repouso  $\phi$ .

A Figura 4.26 mostra os resultados das simulações do método DEM utilizando-se o modelo “mola-amortecedor”, nas diferentes combinações de parâmetros do PCC. Nela, no canto superior está o número da simulação correspondente ao planejamento e no canto inferior direito o ângulo de repouso obtido.

A Tabela 4.3 mostra os resultados de ângulo dinâmico de repouso para as simulações realizadas com diferentes valores de parâmetros conforme o PCC apresentado.

Tabela 4.3 - Resultados do ângulo dinâmico de repouso para as simulações do PCC.

Simulação	Variáveis Codificadas			Valores dos Parâmetros			$\phi$ (°)	erro(%)
	$v_1(k)$	$v_2(\mu_f)$	$v_3(\eta)$	$k$ [N/m]	$\mu_f$	$\eta$		
1	-1,00	-1,00	-1,00	400	0,2000	0,2000	37,2	3,8
2	-1,00	-1,00	1,00	400	0,2000	0,8000	37,2	3,8
3	-1,00	1,00	-1,00	400	0,8000	0,2000	66,8	72,9
4	-1,00	1,00	1,00	400	0,8000	0,8000	65,4	69,3
5	1,00	-1,00	-1,00	1600	0,2000	0,2000	39,2	1,6
6	1,00	-1,00	1,00	1600	0,2000	0,8000	34,9	9,7
7	1,00	1,00	-1,00	1600	0,8000	0,2000	39,6	2,5
8	1,00	1,00	1,00	1600	0,8000	0,8000	60,2	55,7
9	-1,58	0,00	0,00	<b>54,98</b>	0,5000	0,5000	62,2	61,0
10	1,58	0,00	0,00	<b>1945</b>	0,5000	0,5000	63,9	65,5
11	0,00	-1,58	0,00	1000	<b>0,0275</b>	0,5000	5,8	85
12	0,00	1,58	0,00	1000	<b>0,9725</b>	0,5000	59,9	55,2
13	0,00	0,00	-1,58	1000	0,5000	<b>0,0275</b>	63,9	65,5
14	0,00	0,00	1,58	1000	0,5000	<b>0,9725</b>	56,6	46,5
15	0,00	0,00	0,00	1000	0,5000	0,5000	61,6	59,5
16	0,00	0,00	0,00	1000	0,5000	0,5000	63,2	63,6
17	0,00	0,00	0,00	1000	0,5000	0,5000	61,1	58,2
18	0,00	0,00	0,00	1000	0,5000	0,5000	63,8	65,2
19	0,00	0,00	0,00	1000	0,5000	0,5000	61,4	58,9
20	0,00	0,00	0,00	1000	0,5000	0,5000	62,1	60,8
21	0,00	0,00	0,00	1000	0,5000	0,5000	62,4	61,5

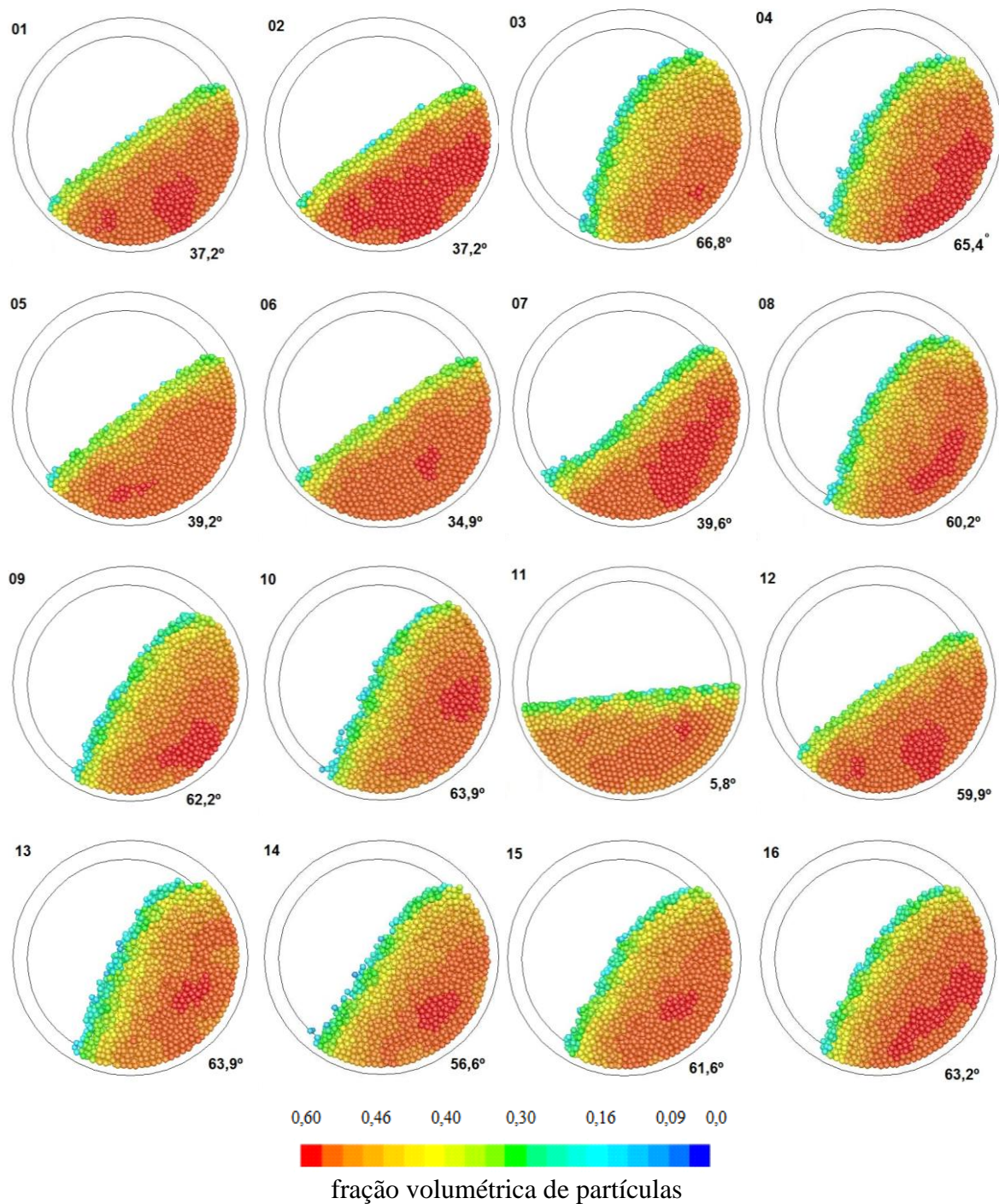


Figura 4.26 - Simulações DEM do tambor rotativo nas condições do PCC estudadas.

Esses resultados mostram uma visível sensibilidade do ângulo dinâmico de repouso para as diferentes combinações de parâmetros propostas. Enquanto algumas simulações apresentaram ângulos de repouso muito grandes, como a simulação 3 com 66,8°, outra simulação apresentou ângulo de repouso muito pequeno, simulação 11 com



5,8° sendo estas as simulações que apresentaram maiores erros relacionados ao valor experimental.

A partir da análise das simulações observa-se que às simulações 01, 02 e 05 foram as que apresentaram valores mais próximos ao ângulo de repouso experimental.

#### *Resultados da análise dos parâmetros da simulação DEM no secador rotatório convencional com suspensores*

A Figura 4.27 mostra as fotografias do secador rotatório convencional operando com 6 suspensores de três segmentos com suspensores nas posições angulares de 0°, 30°, 60°, 90° e 120°.



(a) Secador rotativo com suspensores nas posições 0°, 60° e 120°.



(b) Secador rotativo com suspensores nas posições 30° e 90°.

Figura 4.27 - Fotografias do secador rotativo convencional operando nas condições do experimento.

É possível visualizar a presença de partículas de fertilizante nos suspensores presentes nas posições angulares 0°, 30°, 60°, 90° e 120° observando-se apenas a metade superior do equipamento. Porém a quantidade de fertilizante no suspensor da posição angular 120° é muito pequena e a presença de fertilizante não é continuamente observada em todo o comprimento do suspensor.

As Figuras 4.28 e 4.29 mostram os resultados da simulação para cada conjunto de parâmetros do PCC da Tabela 3.5 (reproduzido na Tabela 4.3). As imagens das



simulações contidas na Figura 4.27, assim como no experimento, foram obtidas durante a segunda volta do equipamento, ou seja, com um tempo simulado de aproximadamente 17 s quando os suspensores da metade superior do equipamento estavam nas posições angulares  $0^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $120^\circ$ . A Figura 4.28 contém as imagens das simulações com um tempo simulado de 18,5 segundos, quando os suspensores da metade superior do equipamento estavam nas posições angulares de  $30^\circ$  e  $90^\circ$ .

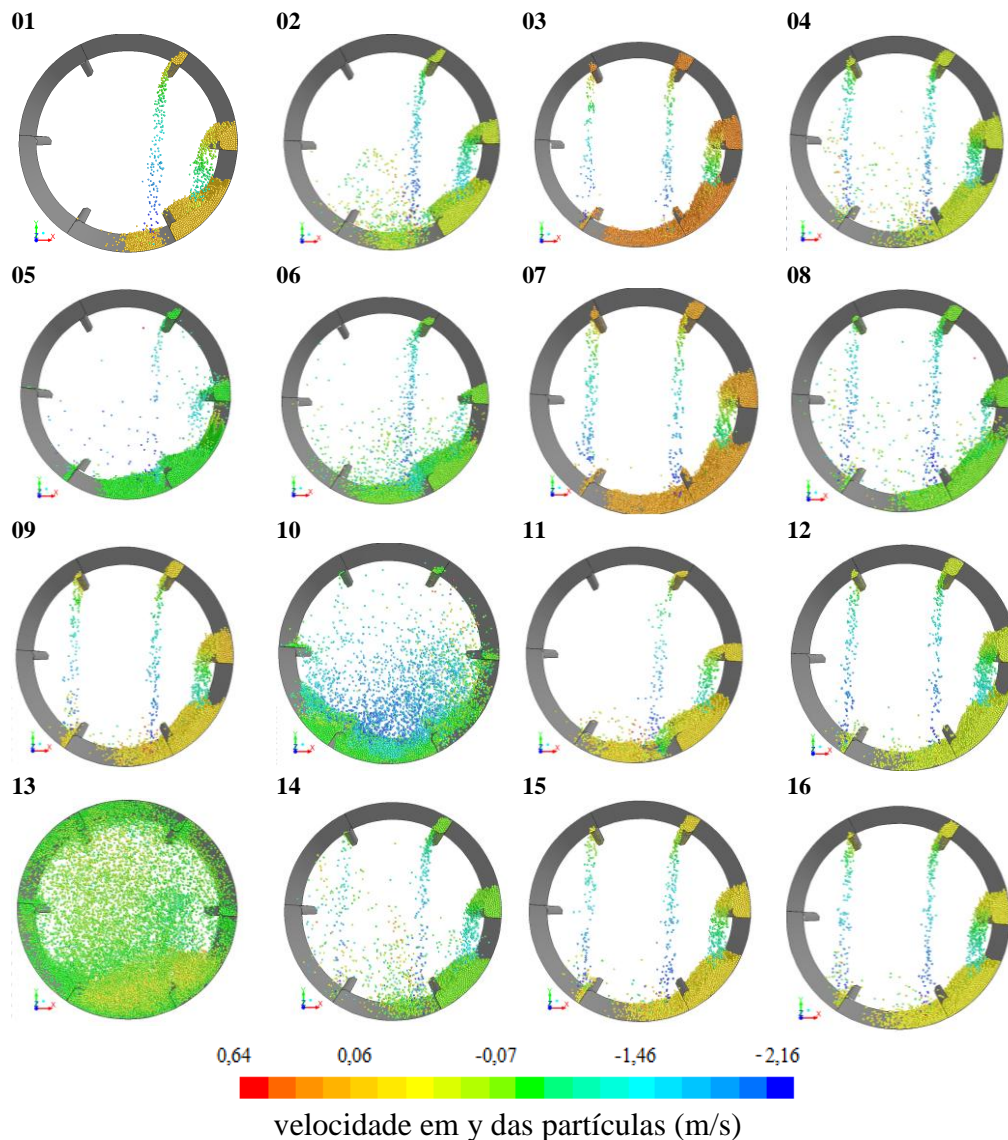


Figura 4.28 - Simulações DEM do secador convencional com suspensores nas posições angulares  $0^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $120^\circ$  nas condições do PCC estudadas.

Observa-se a partir da análise qualitativa das Figuras 4.28 e 4.29 que as simulações 10 e 13 apresentaram uma visível inconsistência física de resultados ao

compará-las qualitativamente com a Figura 4.24, que contém as imagens do experimento.

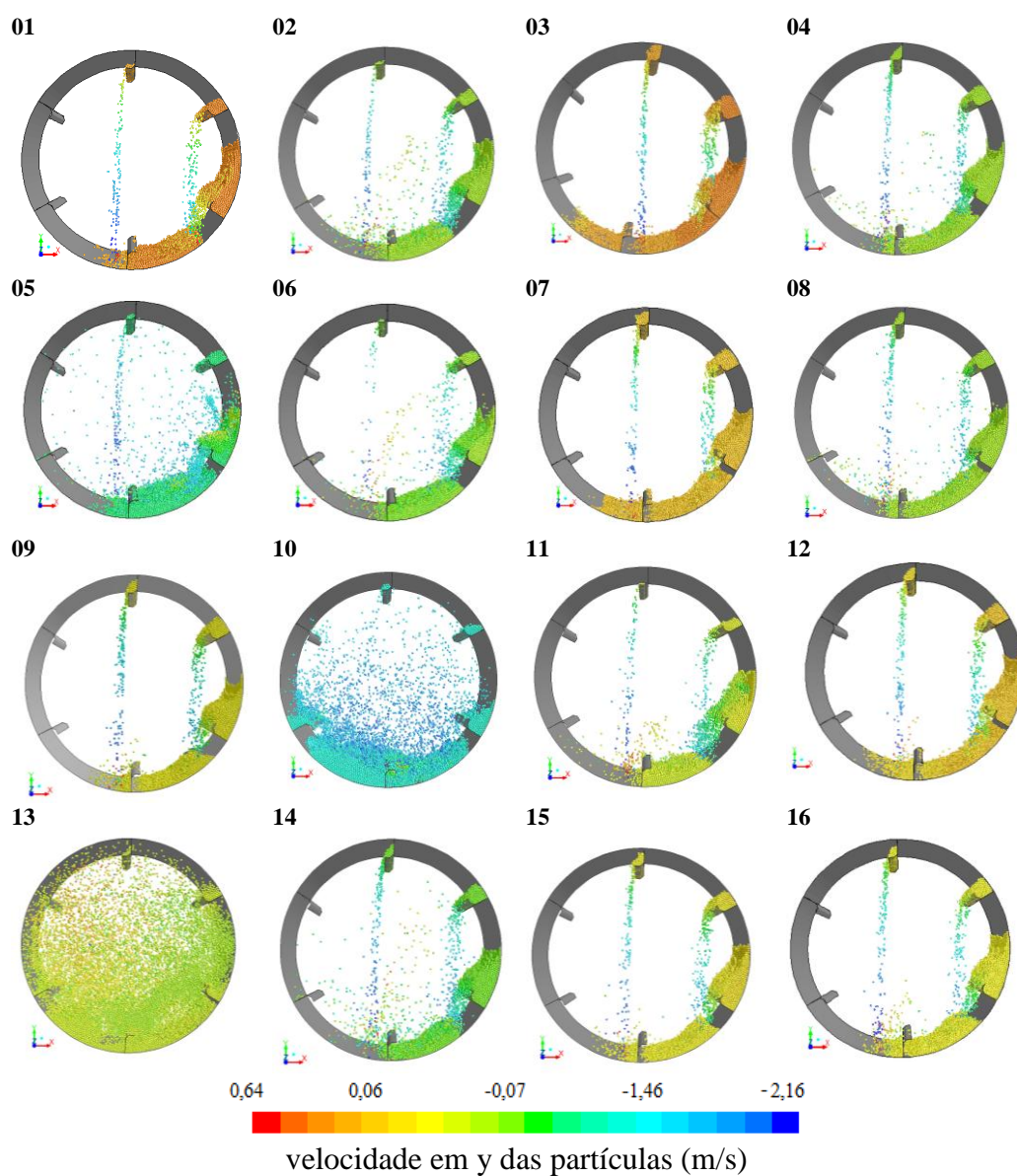


Figura 4.29 - Simulações DEM do secador convencional com suspensores nas posições angulares 30° e 90° nas condições do PCC estudadas.

Observa-se muita semelhança nas imagens correspondentes as simulações 15 e 16 que são o ponto réplicas do ponto central do planejamento, por isso as demais réplicas 17,18, 19,20 e 21 não foram mostradas nas Figuras 4.28 e 4.29.

Fazendo uma análise qualitativa das Figuras 4.28 e 4.29, observa-se que as imagens que correspondem às simulações 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 11, 12, 15 (ou 16) foram as que apresentaram uma reprodução mais coerente com o resultado físico observado nas fotografias do experimento contidas na Figura 4.27.

Buscando uma melhor avaliação dos parâmetros utilizados nas simulações foi feita uma comparação dos resultados experimentais e simulados da carga de fertilizante ( $h^*$ ) e os ângulos de repouso do fertilizante nos suspensores nas posições angulares 0°, 30°, 60°, 90° e 120°.

A Tabela 4.4 mostra os resultados dos ângulos dinâmico de repouso nos suspensores obtidos através de medidas por fotografias do experimento para cada posição angular. Os ângulos dinâmico de repouso nos suspensores foram obtidos das fotografias do experimento.

Tabela 4.4 – Ângulos de repouso obtidos através das fotografias.

<b>posição angular ( ° )</b>	<b>Média(°)</b>	<b>desvio ( ° )</b>
<b>0</b>	43,5	1,0
<b>30</b>	43,9	1,3
<b>60</b>	43,5	1,4
<b>90</b>	46,7	0,7
<b>120</b>	45,5	2,0
<b><i>ângulo dinâmico de repouso</i></b>	<b>44,5</b>	<b>1,7</b>

Os resultados dos ângulos dinâmicos de repouso obtidos das simulações são mostrados na Tabela 4.5, que inclui também os resultados experimentais para comparação.

Os números das simulações correspondem aos mesmos números do PCC da Tabela 3.5. Observa-se nos resultados da Tabela 4.5, que os menores desvios do ângulo dinâmico de repouso médio da simulação em relação ao experimental foram os das simulações 01, 02 e 08.

Nos resultados das simulações 10, 11 e 13 observou-se que em algumas posições angulares não foi possível medir o ângulo de repouso, devido à ausência de partículas de fertilizantes suficientes para se fazer a medida do ângulo.

Tabela 4.5 – Ângulos de repouso obtidos através das imagens das simulações.

<b>posição angular (°)</b>	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>média</b>	<b>Erro (%)</b>
<b>experimento</b>	43,5	43,9	43,5	46,7	44,5 ( $\pm 1,7$ )	-
simulação 01	46	43	45	45	45	1,1
simulação 02	46	45	48	47	46,5	4,5
simulação 03	56	63	62	63	62,5	40,4
simulação 04	51	52	58	55	53,5	20,2
simulação 05	42	38	41	37	39,5	11,2
simulação 06	31	32	33	32	32	28,1
simulação 07	59	56	61	58	58,5	31,5
simulação 08	47	45	46	44	45,5	2,2
simulação 09	51	55	49	54	52,5	18,0
simulação 10	0	21	21	35	21	52,8
simulação 11	18	19	18	0	18	59,6
simulação 12	60	45	58	61	59	32,6
simulação 13	0	44	29	5	17	61,8
simulação 14	49	54	51	56	52,5	18,0
simulação 15	57	55	56	52	55,5	24,7
simulação 16	58	54	57	58	57,5	29,2
simulação 17	57	55	58	54	56	25,8
simulação 18	58	52	55	56	55,5	24,7
simulação 19	59	57	58	59	58,5	31,5
simulação 20	58	61	57	56	57,5	29,2
simulação 21	57	54	59	58	57,5	29,2

A Tabela 4.6 mostra os resultados experimentais de massa retida nos suspensores nas posições angulares estudadas, bem como os resultados obtidos através da técnica de análise de imagens a partir das fotografias dos experimentos, utilizando-se o *software* GLOBAL LAB<sup>®</sup> Image/2.

A técnica de análise de imagens permite calcular as massas de partículas de fertilizante retidas nos suspensores através de medidas das áreas ocupadas pelo fertilizante obtidas das fotografias do experimento. Os valores das áreas foram multiplicados pelo comprimento dos suspensores e pela densidade da partícula levando-se em conta também a porosidade do material.

Comparando os valores de carga obtidos através da coleta da massa em cada suspensor e os valores de carga inferidos por meio da técnica de análise de imagens do experimento, pode-se observar que a técnica de imagem subestimou a massa de partículas nas posições 0, 30 e 60 °, enquanto esta superestimou a carga no suspensor na posição de 90°. De forma geral, o erro entre a medida direta da massa e a inferência pela técnica de imagem variou de 7% a 30%.

Tabela 4.6 – Resultados experimentais da massa de fertilizantes em cada posição angular dos suspensores.

Experimento			Imagens experimentais	
posição angular ( ° )	média (g)	desvio (%)	média (g)	desvio (%)
<b>0</b>	1124,4	8,7	788,7	5,3
<b>30</b>	590,7	11,3	552,4	10,4
<b>60</b>	407,1	2,8	362,7	14,1
<b>90</b>	149,6	5,5	188,9	32,0

A Tabela 4.7 mostra os resultados das massas ou carga de partículas de fertilizante retidas nos suspensores para cada simulação do PCC da Tabela 3.5. Observa-se que dentre as simulações do PCC os menores desvios tanto do ângulo dinâmico de repouso, quanto para a massa ou carga retida nos suspensores ( $h^*$ ), foram obtidos com os valores dos parâmetros definidos nas simulações 1, 2 e 8; sendo que dentre estas, a simulação 1 destaca-se por apresentar menores desvios de  $h^*$ .

O conjunto de resultados de simulação pelo método dos elementos discretos (DEM) através do *software* FLUENT ANSYS® 14 comparados aos resultados experimentais mostraram que os melhores resultados foram obtidos para a condição 1 do PCC da Tabela 3.5, e o segundo melhor foi para a condição 2. Sendo assim, pode-se inferir que os melhores valores para os parâmetros são os seguintes: constante de elasticidade  $k = 400$  N/m, coeficiente de fricção ( $\mu_f$ ) igual 0,2 e coeficiente de restituição ( $\eta$ ) dentro da faixa de 0,2 a 0,8, sendo que o melhor resultado (condição 1) foi para  $\eta = 0,2$ . Cabe ainda ressaltar que novos estudos compreendendo uma faixa mais estreita desses parâmetros devem ser conduzidos em futuros trabalhos.

Segundo DI RENZO (2004) o uso de baixos valores de  $k$  pode ser justificado, pela simplicidade do modelo linear. O valor encontrado como melhor no presente trabalho está próximo de alguns trabalhos da literatura (ANAND et al. 2009; KETTERHAGEN et al 2008; LI et al. 2012; LI et al. 2013; ZHONG et al. 2006). Entretanto, cabe ressaltar que o melhor depende intrinsecamente do material e do sistema utilizado.

Tabela 4.7 – Resultados dos desvios das massas das simulações em relação as massas experimentais em cada posição angular ( $\theta$ ) dos suspensores.

posição $\theta$ (°)	Massa nos suspensores ( $h^*$ ) (g)				Erro em relação ao experimento (%)			
	0	30	60	90	0	30	60	90
<b>experimento</b>	1124,4	590,7	407,1	149,6	-	-	-	-
simulação 01	1115,75	691,61	396,92	101,99	0,8	4,2	2,5	31,8
simulação 02	984,68	641,99	363,69	78,46	12,4	11,1	10,7	47,5
simulação 03	1676,75	863,53	802,60	328,84	49,1	19,6	97,1	120,0
simulação 04	1326,90	833,30	563,76	267,23	18,0	15,4	38,5	78,7
simulação 05	765,91	561,68	288,46	84,00	31,9	22,2	29,2	43,8
simulação 06	756,91	545,30	218,30	47,31	32,7	24,5	46,4	68,4
simulação 07	1440,44	887,06	623,76	330,46	28,1	22,9	53,2	121,0
simulação 08	1113,91	765,91	524,30	240,00	0,9	6,1	28,8	60,5
simulação 09	1354,83	835,37	562,61	273,46	20,5	15,7	38,2	82,9
simulação 10	206,77	226,38	76,85	69,46	81,6	68,6	81,1	53,5
simulação 11	871,60	503,53	215,07	25,62	22,5	30,3	47,2	82,9
simulação 12	1366,60	841,37	582,22	284,53	21,5	16,5	43,0	90,3
simulação 13	156,23	170,54	30,92	58,38	86,1	76,4	92,4	60,9
simulação 14	1259,06	756,91	494,07	206,77	12,0	4,8	21,4	38,3
simulação 15	1330,83	816,45	544,61	246,92	18,4	13,1	33,8	65,2
simulação 16	1345,83	815,30	549,68	242,77	19,7	12,9	35,0	62,4
simulação 17	1344,90	846,68	560,30	265,38	19,6	17,3	37,6	77,5
simulação 18	1293,21	846,91	523,84	256,84	15,0	17,3	28,7	71,8
simulação 19	1363,13	808,83	552,92	239,07	21,2	12,0	35,8	59,9
simulação 20	1316,75	817,83	550,38	243,00	17,1	13,3	35,2	62,5
simulação 21	1355,52	818,07	548,53	228,69	20,6	13,3	34,7	53,0

O valor encontrado como melhor para o coeficiente de fricção ( $\mu_f=0,2$ ) foi próximo da grande maioria dos trabalhos da literatura, como mostra a Tabela 2.4 apresentada na Revisão Bibliográfica.

A Figura 4.30 mostra os resultados da simulação 01 e 02, que apresentaram os menores desvios, juntamente com os resultados da técnica de análise de imagem experimental, bem como os dados experimentais de massa de sólidos retida nos suspensores. Observa-se que os resultados dessas simulações tiveram uma boa concordância com os dados experimentais de  $h^*$  (medido pela massa), sendo os desvios equivalentes aos da técnica de análise de imagem experimental.

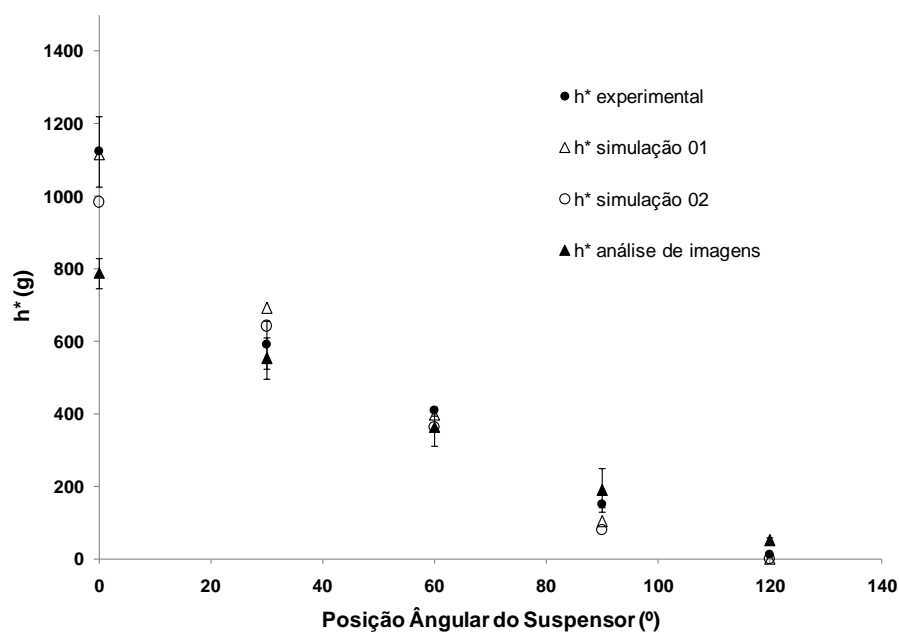


Figura 4.30 – Massa de fertilizantes ( $h^*$ ) nas posições angulares dos suspensores.

As Figuras 4.31 e 4.32 mostram imagens dos experimentos no secador rotativo e as imagens obtidas pela simulação 1.

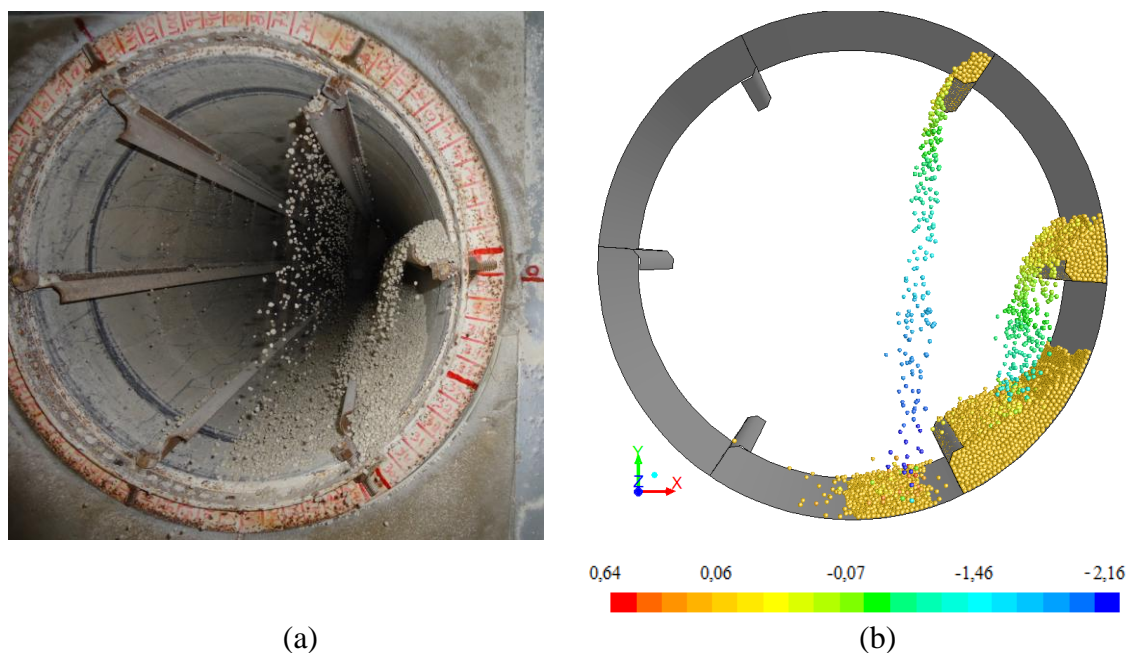


Figura 4.31 - Secador rotativo convencional com os suspensores nas posições 0°, 60° e 120°: (a) experimento e (b) imagem obtida da simulação 1 do PCC.



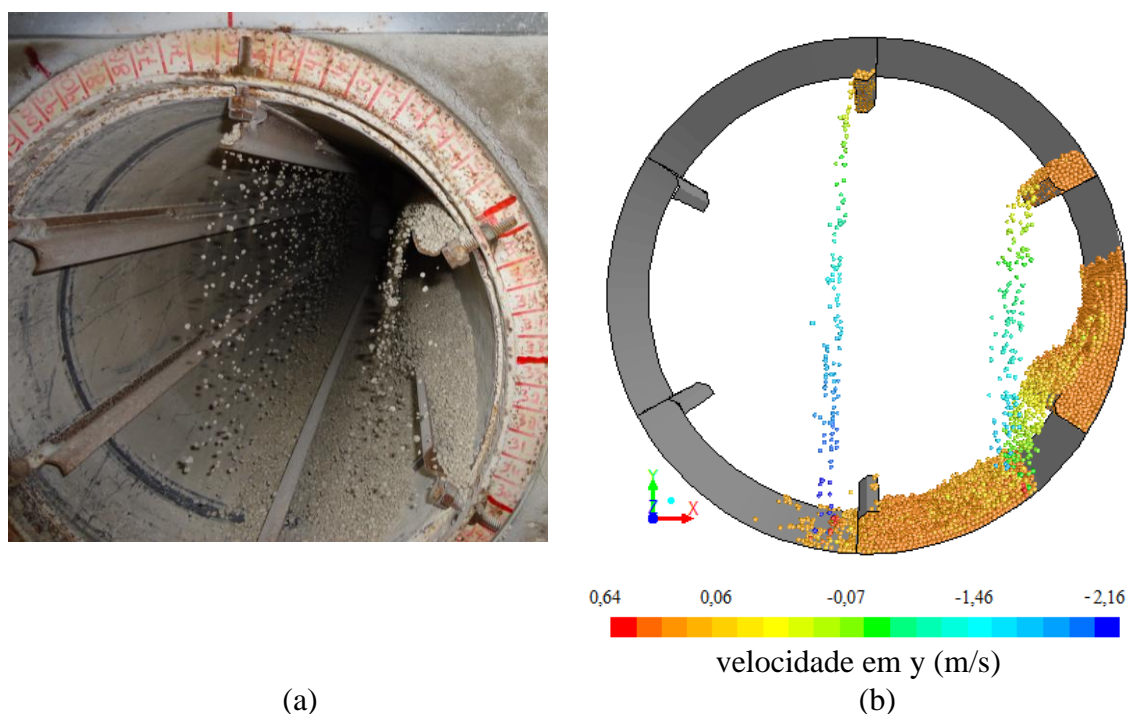


Figura 4.32 - Secador rotativo convencional com os suspensores nas posições 30° e 90°: (a) experimento e (b) imagem obtida da simulação 1 do PCC.

Sendo assim, para melhor compreensão dos resultados de simulação, bem como para quantificação do efeito dos parâmetros e das respectivas interações sobre a previsão da carga nos suspensores, foi feita uma regressão múltipla dos resultados das simulações nos secadores convencionais com suspensores. Nesta regressão foi também introduzida como variável ( $x_4$ ), além dos parâmetros analisados, a posição angular.

O modelo apresentou resíduos aleatoriamente distribuídos, com média zero e variância constante. O valor de  $R^2$  foi igual a 0,982, indicando que 98,2% da variabilidade da carga nos suspensores foi explicada pelas variáveis analisadas.

A Tabela 4.8 mostra as variáveis que foram significativas para um nível de significância de 5% (probabilidade máxima de erro do teste estatístico).

Os resultados da Tabela 4.8 mostram que todos parâmetros estudados foram significativos e houve interação entre os parâmetros relacionados à fricção e ao coeficiente de restituição. Observa-se também que o parâmetro do modelo DEM que exerceu a maior influência foi o coeficiente de fricção ( $\mu_f$ ) e o de menor influência foi o coeficiente de restituição ( $\eta$ ).



Tabela 4.8 – Resultados da regressão múltipla para os parâmetros avaliados.

Variáveis codificadas	Coefficientes	desvios (%)	p
Coef. Linear B	51.6613	1.285521	0.000000
$k (x_1)$	-5.2147	0.948015	0.000000
$\mu_f (x_2)$	12.1565	0.793429	0.000000
$\eta (x_3)$	-4.4880	0.895545	0.000003
$\theta (x_4)$	-28.9812	0.466300	0.000000
$x_1^2$	-2.9521	1.056471	0.006441
$x_2^2$	-5.1313	0.858027	0.000000
$x_4^2$	4.2150	0.391633	0.000000
$x_1 \cdot x_4$	2.1780	0.627836	0.000826
$x_2 \cdot x_3$	-2.9319	1.009928	0.004719
$x_2 \cdot x_4$	-3.3469	0.561039	0.000000

O modelo obtido é mostrado na Equação 4.1.

$$h^* = 51,66 - 5,21x_1 + 12,15x_2 - 4,48x_3 - 28,98x_4 - 2,95x_1^2 - 5,13x_2^2 + 4,21x_4^2 + 2,17x_1x_4 - 2,93x_2x_3 - 3,35x_2x_4 \quad (4.1)$$

As equações das variáveis codificadas foram as Equações 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5.

$$x_1 = (k - 100) / 600 \quad (4.2)$$

$$x_2 = (\mu_f - 0,5) / 0,3 \quad (4.3)$$

$$x_3 = (\eta - 0,5) / 0,3 \quad (4.4)$$

$$x_4 = (\theta - 60) / 30 \quad (4.5)$$

A Figura 4.30 mostra as superfícies de respostas feitas para a posição angular  $\theta = 0^\circ$  para dois valores fixos de  $k$ ,  $k=400$  (equivalente ao nível codificado -1, o melhor resultado) e  $k=1600$  (equivalente ao nível codificado 1).

Observa-se pela Figura 4.33 que para menores valores do coeficiente de fricção ( $\mu_f$ ) houve pouca influência do aumento do coeficiente de restituição, já em valores maiores de  $\mu_f$  a variação da resposta com o coeficiente de restituição foi notável, mostrando uma forte interação entre os parâmetros relacionados ao coeficiente de

fricção e de restituição. Os maiores valores de carga nos suspensores foram obtidos para baixos níveis do coeficiente de restituição e elevados do coeficiente de fricção, para os dois valores de  $k$  apresentados.

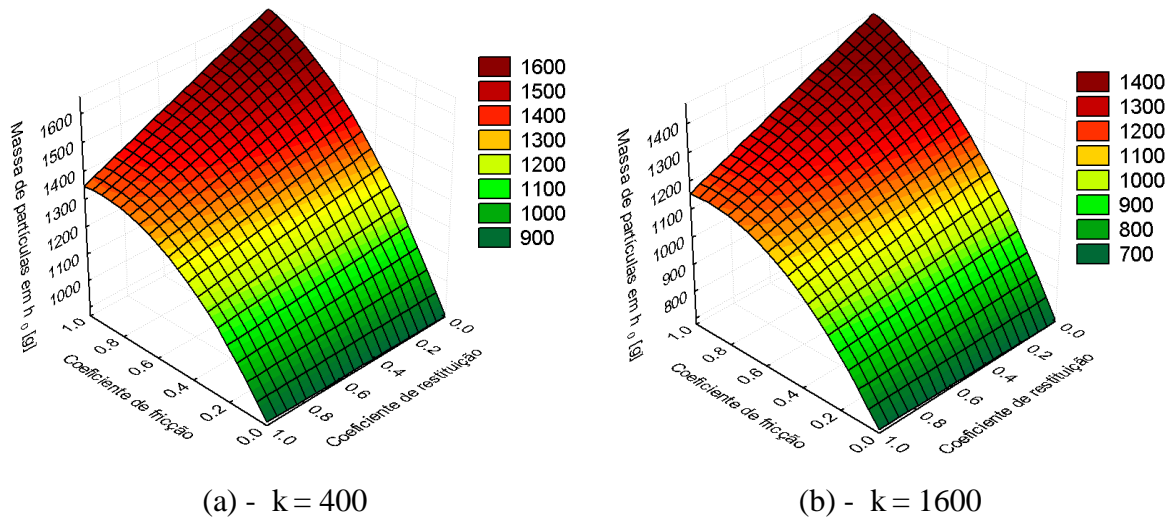


Figura 4.33 – Superfícies de resposta para valores fixos de  $k$  na posição  $\theta = 0^\circ$ .

A Figura 4.34 mostra as superfícies de respostas feitas para a posição angular  $\theta = 0^\circ$  para dois valores fixos de  $\mu_f$ ,  $\mu_f = 0,2$  (equivalente ao nível codificado -1, o melhor resultado) e  $\mu_f = 0,8$  (equivalente ao nível codificado 1).

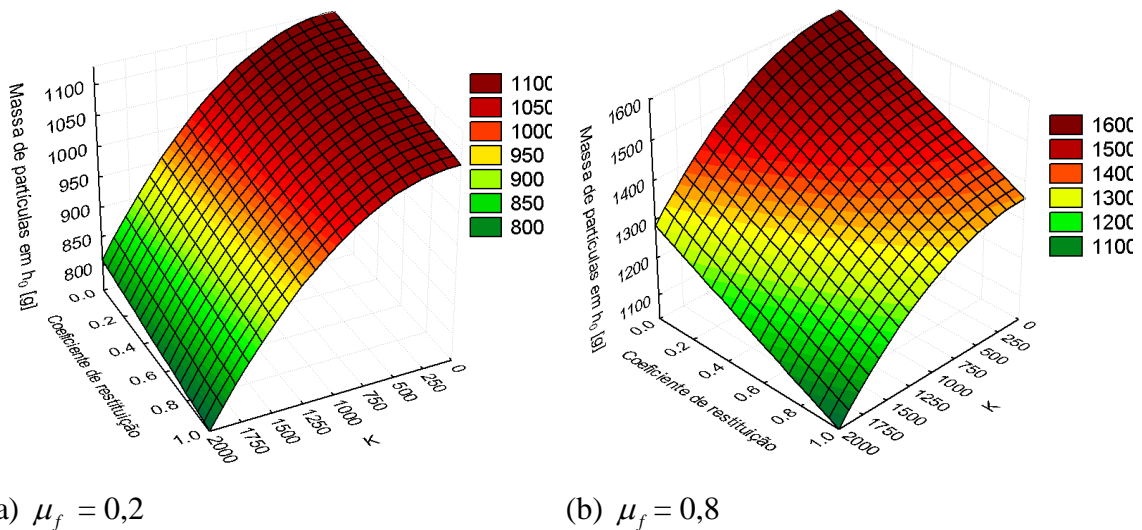


Figura 4.34 – Superfícies de resposta para valores fixos do parâmetro  $\mu_f$  em  $\theta = 0^\circ$ .

Os resultados da Figura 4.34 mostram a ausência de interação entre os parâmetros relacionados ao coeficiente de elasticidade  $k$  e o coeficiente de restituição ( $\eta$ ). Além disso, verifica-se a mais expressiva influência do parâmetro relacionado à elasticidade na resposta quando comparada à do parâmetro relacionado ao coeficiente de restituição.



## **CAPITULO 5 - CONCLUSÕES**

O estudo das versões convencionais do secador rotatório realizados em trabalhos anteriores por SILVÉRIO (2010) e ARRUDA (2008) possibilita a comparação das mesmas com versões não convencionais que estão em desenvolvimento na FEQUI/UFU.

Neste trabalho os desempenhos de 19 dessas novas configurações denominadas de secadores rotoaerados desenvolvidos pela FEQUI/UFU foram comparados com o secador rotatório convencional com cascadeamento na versão contracorrente e concorrente.

Observou-se que a distribuição e o diâmetro dos minitubos das diferentes configurações de secadores rotoaerados avaliados tiveram influência nos resultados de tempo médio de residência, água removida e taxa de secagem como observado nos experimentos de secagem de fertilizantes.

No primeiro estudo avaliando-se as configurações rotoaeradas em uma mesma condição experimental, observou-se que as configurações RT-03 (com 56 minitubos de 9 mm), RT-04 (com 56 minitubos de 6 mm), RT-09 (com 42 minitubos de 9 mm) e RT-17 (híbrida com 65 minitubos de 9 e 6 mm) apresentaram os maiores valores de taxa de secagem.

Posteriormente, foi feito um estudo a fim de se comparar os desempenhos das novas configurações rotoaeradas RT-04, RT-17 e RT-09 com a configuração rotoaerada RT-03, já estudada por ARRUDA(2008) e as configurações convencionais. Os resultados obtidos mostraram ótimos resultados de secagem para as novas configurações avaliadas (RT-04, RT-17 e RT-09).

Observou-se que, enquanto a configuração RT-03 (56 minitubos de 9 mm), avaliada no trabalho de ARRUDA (2008) apresentava valores em torno de 4 vezes a taxa de secagem em comparação à versão convencional contracorrente, as configurações estudadas neste trabalho RT-04 e RT-17 apresentaram resultados ainda melhores, principalmente nos experimentos realizados com maiores velocidade do ar alimentado. A configuração RT-17 (com 56 minitubo de 9 e 6 mm), por exemplo, apresentou valores de taxa de secagem até 18 vezes maior do que o encontrado para a configuração convencional contracorrente. Desta forma verificou-se a existência de

configurações novas (RT-04 e RT17) com desempenho superior aos das configurações já estudadas anteriormente.

Enquanto nas demais condições experimentais com velocidades do ar menores, o tempo médio de residência para a configuração convencional contracorrente mostrou-se uma a duas vezes maiores que os tempos de residência da configuração rotoaerada RT-17, nas condições de velocidade do ar maiores esses valores chegaram a até 11 vezes menor para a configuração rotoaerada. Isto confirma a influência da velocidade de saída do ar nos minitubos no transporte e escoamento das partículas.

Tendo em vista o melhor desempenho da configuração rotoaerada frente à configuração convencional, principalmente nas condições de maior velocidade do ar alimentado, foi possível avaliar o desempenho dessas configurações operando em condições de maior vazão de sólidos na alimentação.

Observou-se que o tempo de residência para os secadores rotoaerados aumentou com a vazão de alimentação de sólidos ( $G_{su}$ ), porém mantendo-se sempre menor do que o tempo de residência da configuração contracorrente em todas as condições analisadas.

Verificou-se que, em todas as condições de maior vazão de alimentação, o secador rotoaerado obteve maiores taxas de secagem do que o secador convencional. Porém, reduzindo-se a diferença em relação ao secador convencional com o aumento da vazão de alimentação de sólidos. Este menor desempenho pode ter sido resultado da alta condição de carregamento do secador rotoaerado operando com alta taxa de alimentação, uma vez que uma maior quantidade de sólidos úmidos disponível acarreta uma redução do potencial de secagem.

Observou-se que a carga de sólidos no secador convencional foi maior em todas as condições de  $G_{su}$  analisadas quando comparada com a carga de sólidos nas versões rotoaeradas estudadas.

Dentre as configurações que apresentaram melhores resultados de secagem, a configuração que apresentou maior perda de carga foi a RT-04 com 56 minitubos de 6 mm de diâmetro.

Observando os resultados de taxa de secagem pode-se afirmar que a configuração híbrida rotoaerada com 28 minitubos de 9 mm e 28 minitubos de 6 mm de diâmetro (RT-17) foi a que apresentou resultados que melhor combinaram taxa de secagem e perda de carga quando comparada com as demais configurações estudadas.

A partir dos resultados de simulação do ar na saída dos minitubos observou-se que as configurações RT-09 e RT-17 mostraram resultados sempre próximos de velocidade de saída do ar, quando comparadas com as demais configurações, inclusive na maior velocidade do ar alimentado.

Verificou-se também que as demais configurações obtiveram as diferenças nos resultados acentuadas com o aumento da vazão de alimentação de fluido.

A configuração RT-03 apresentou elevados valores de velocidade de saída do ar pelos minitubos, o que deve ter favorecido o escoamento das partículas e proporcionado um baixo tempo médio de residência para a condição de maior vazão de ar ( $v_{ar} = 3,9$  m/s). A outra configuração que obteve baixos valores experimentais de tempo médio de residência da partícula, para a maior vazão de ar na alimentação, foi a RT-17 que apresentou velocidade de saída do ar nos minitubos menor do que a configuração RT-04. Porém, a disposição dos 56 minitubos intercalados com 9 mm e 6 mm pode ter ajudado no escoamento da partícula, permitindo que a partícula percorra o equipamento com menor tempo de residência.

Para a configuração RT-09, a diminuição da quantidade de minitubos em relação a configuração RT-03 ocasionou um aumento nas velocidades do ar na saída dos minitubos mas esse aumento não foi suficiente para favorecer o escoamento e resultar numa diminuição significativa no tempo de residência da partícula, mostrando que não só a velocidade do ar na saída mas também a quantidade de minitubos influencia nos resultados fluidodinâmicos do secador rotoaerado.

Em geral, a técnica de simulação pelo DEM (método dos elementos discretos) mostrou resultados satisfatórios para a simulação do ângulo dinâmico de repouso em tambores rotativos e para a carga de sólidos nos suspensores em secadores rotatórios convencionais.

O conjunto de resultados de simulação pelo método dos elementos discretos (DEM) através do *software* FLUENT ANSYS® 14 quando comparados aos resultados experimentais de carga dos suspensores e ângulo dinâmico de repouso, mostraram melhores resultados para a seguinte combinação de parâmetros: constante de elasticidade  $k$  igual a 400 N/m e os parâmetros relacionados à fricção ( $\mu_f$ ) e à restituição ( $\eta$ ) iguais a 0,2; ou seja, a simulação 01 do PCC.

### *Sugestões para Trabalhos Futuros.*

Como trabalhos futuros sugere-se:

- Utilização e avaliação do secador rotoaerado para outros tipos de materiais.
- O estudo de novas versões do secador rotatório e comparação com as versões já estudadas.
- Providenciar o registro das patentes das configurações que apresentaram bons resultados de secagem.
- Prever por simulações os resultados de novas configurações de secadores.
- Estudo do secador rotoaerado utilizando fluidodinâmica computacional (CFD) permitindo, assim, uma melhor compreensão do escoamento e dos perfis de temperatura e umidade além de proporcionar a comparação entre os resultados obtidos neste trabalho e em trabalhos anteriores.
- Estudo de uma nova faixa de parâmetros do modelo linear DEM estudado, próxima à faixa encontrada para melhores resultados encontrados neste trabalho.
- Relacionar os diâmetros de minitubos para cada estágio de secagem nas configurações rotoaeradas.
- Estudar a carga ótima do secador rotoaerado.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AJAYI, O. O.; SHEHAN, M. E. Application of image analysis to determine design loading in flighted rotary dryers. Powder Technology. v. 223, p. (123-130), 2012.
- ALMEIDA, C. A. K. Comportamento do hidrociclone filtrante frente às modificações no diâmetro de underflow e no tubo de vortex finder, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG. Dissertação de mestrado, 2008.
- ALVAREZ, P. I. e SHENE, C.. Experimental Study of Residence Time in the Direct Rotary Dryer, Drying Technology, n. 12 v. 7-p. 1629-1651, 1994.
- ANAND, A.; CURTIS, J. S.; WASSGREN, C.R.; HANCOCK, B.C.; KETTERHAGEN, W.R.- Predicting discharge dynamics of wet cohesive particles from a rectangular hopper using the discrete element method (DEM). Chemical Engineering Science. . V. 64 p.( 5268–5275), 2009.
- ANDA, Associação Nacional para Difusão de Adubos, [www.anda.org.br/estatistica/comentarios.pdf](http://www.anda.org.br/estatistica/comentarios.pdf) , 01/10/2012, 15h.
- ARRUDA, E. B. Comparação do Desempenho do Secador Roto-Fluidizado com o Secador Rotatório Convencional: Secagem de Fertilizantes, Tese de Doutorado, UFU, Uberlândia/MG, 2008.
- ARRUDA, E. B.; FAÇANHA, J. M. F.; PIRES, L. N.; ASSIS, A. J. and BARROZO, M. A. S.. Fluid Dynamics of Cascading Rotary Dryer with Different Flight Configurations. Mater. Sci. Forum, v. 591, p. 368, 2008.
- ARRUDA, E. B.; FAÇANHA, J. M. F.; PIRES, L. N.; ASSIS, A. J. and BARROZO, M.A.S.. Conventional and modified rotary dryer: Comparison of performance in fertilizer drying. Chemical Engineering and Process 2009-b.
- ARRUDA, E. B.; LOBATO, F. S.; ASSIS, A. J. and BARROZO, M. A. S., Modeling of Fertilizer Drying in Roto-Aerated and Conventional Rotary Dryers. Drying Technology, 2009-a.
- BAKER, C. G. J. The design of flights in cascading rotary dryers. Drying Technology, v. 6, p. 631-653, 1988.
- BAKER, C. G. J.. Cascading rotary dryers. In: MUJUMDAR, A. S. Advances in Drying, Hemisphere, New York, (ed), v. 2, 1983, p. 1-51.
- BARROZO, M. A. S., Transferência de Calor e Massa entre o Ar e Sementes de Soja em Leito Deslizante e Escoamentos Cruzados, Tese de Doutorado, UFSCar, São Carlos-SP, 1995.

- BOX, M. J., HUNTER, W. G. e HUNTER, J. S. Statistics for Experimenters. An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building, John Wiley and Sons, New York, 1978.
- BRASIL. Instituto de Economia Agrícola. Análise e Indicadores do Agronegócio. São Paulo, 2008. v. 3, n.7.
- BRITTON P.F.; SHEEHAN, M.E.; SCHNEIDER, P.A.. A Physical Description of Solids Transport in Flighted Rotary Dryers, Powder Technology, v 165 p.153-160, 2006.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W. e HALL, C. W., Drying Cereal Grains. The Avi Publishing Company, Inc., Westport, 1974.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W. e HALL, C. W., Drying Cereal Grains. The Avi Publishing Company, Inc., Westport, 1974.
- CHAUDHURI, B.; MUZZIO F. J; TOMASSONE, M. S. Experimentally validated computations of heat transfer in granular materials in rotary calciners, Powder Technology v.198, p.(6–15), 2010.
- CHEN, C.S. e CLAYTON, J.T., The Effect of Temperature on Sorption Isotherms of Biological Materials. Transactions of the ASAE, Vol. 14(5), p. 927-929, 1971.
- CHUNG, D.S. e PFOST, H.B., Adsorption and desorption of Water Vapour by cereal grains and their products Part II. Transactions of the ASAE, Vol. 10(4), p. 549-551, 1967.
- CUNDALL P. A.; STRACK, O. D. L.. A discrete numerical model for granular assemblies. Geotechnique. V. 29, P. (47-65), 1979.
- CUNHA, F.G., Extração mecânica da bixina de sementes de urucum em leito de jorro, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 92p. Dissertação de mestrado, 2008.
- DI RENZO, A.; DI MAIO, F. P. Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes, Chemical Engineering Science v. 59, p.(525 – 541), 2004.
- DUARTE, C. R. Estudo Experimental e de Simulação da Fluidodinâmica e Recobrimento em Leito de Jorro, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 197 p. Tese de doutorado, 2006.
- DUARTE, C. R., Murata, V. V., Barrozo, M.A.S., A Study of the Fluid Dynamics of the Spouted Bed Using CFD, Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 22, p. 263–270, 2005.
- FERNANDES, N. J. Estudo da Fluidodinâmica e de Secagem de um Secador rotatório da Indústria de Fertilizantes. Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia/MG, 2008.

- FLUENT ANSYS, 2006. FLUENT user's manual. Lebanon, NH: Software Release 6.3.
- FRIEDMAN, S. J.; MARSHAL, W. R.. Studies in rotary drying, Part. I: Holdup and Dusting . Chemical Engineering Progress, v.45, p. 482-573, 1949-a.
- FRIEDMAN, S. J.; MARSHAL, W. R.. Studies in rotary drying. Part II: Heat and mass transfer. Chemical Engineering Progress, 45(9), 573–588, 1949-b.
- FRIES, L.; ANTONYUK, S.; HEINRICH, S.; DOPFER, D.; PALZER, S.. Colision dynamics in fluidized bed granulators: a DEM-CFD study. Chemical Engineering Science. In Press (2012).
- GAMA, M. S. C. Estudo de um sistema de limpeza de gases usando um lavador Venturi de seção circular, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG. Dissertação de mestrado, 2008.
- GENG F.; YUAN, Z.; YAN, Y.; LUO, D.; WANG, H.; LI, B., CHYANG, C. S.. An experimental study on residence time of tobacco particles in Rotary Dryers. Drying Technology, p. 1-22, Accepted, 2009.
- GLIKIN, P. G. Transport of Solids Through Flighted Rotation Drums. Trans IchemEv. 56, p. 120-126, 1978.
- GRACE J.R., TAGHIPOUR, F., Verification and validation of CFD models and dynamic similarity for fluidized beds, Powder Technol., v.139, p. (99-110), 2004.
- HENDERSON, J. M. e HENDERSON, S. M. A Computational Procedure for Deep-bed Drying Analysis. Journal of Agricultural Engineerig Research, v. 13, p. 85-95, 1968.
- HENDERSON, S. M. A Basic Concept of Equilibrium Moisture Content. Agricultural Engineerig, v. 33(2), p. 29-31, 1952.
- HOBBS A.. Simulation of an Aggregatin Dryer Using Coupled CFD and DEM Methods. International Journal of Computational Fluid Dynamics, v. 23 n°. 2 , p (199-207), 2009.
- IGUAZ, A., ESNOZ, A., MARTINEZ, G., LÓPEZ, A., VÍRSEDA, P., Mathematical Modelling and Simulation for the Drying Process of Vegetable Wholesale by-products in a Rotary Dryer. Journal of Food Engineering, v.59, p. 151-160, 2003.
- JIANG, M.; ZHAO, Y.; LIU, G.; ZHENG, J.. Enhancing mixing of larticles by baffles in a rotating drum mixer. Particuology. v. 9. p. (270-278), 2011.
- JOHNSTONE, H. F. and SINGH A. D., Bull. University ILL, v. 324, p. 56, 1940.
- KAMKE, F. A. e WILSON, J. B. Computer simulation of a Rotary Dryer – Part II: “Heat and Mass Transfer”, AIChE Journal, v. 32, p. 269-275, 1986.
- KEEY, R. B. Transport Phenomena. In: Drying Principles and Practice. 1 ed. Pergammon Press, Oxford, England, p. 50 a 76, 1972.

- KELLY, J. J. Bull. Inst. Ind.. Res. Standards, 1968, vol. 5, p. 361.
- KELLY, J. J., Flight design in rotary dryers, Drying Technology, v. 10. p. 979-993, 1992.
- KELLY, J. J.; O'DONNELL, J. P. Chemical Engineering Symposium Series, p. 29 - 38, 1968.
- KEMP, I. C.; OAKLEY, D. E., Modeling of Particulate Drying in Theory and Practice. Drying Technology, v. 20, p. 1699-1750, 2002.
- KETTERHAGENA, W.R.; CURTIS, J.S.; WASSGREN, C.R.; HANCOCK, B.C.. Modeling granular segregation in flow from quasi-three-dimensional wedge shaped hoppers. Powder Technology. v. 179, p. (126-143), 2008.
- KONIDIS, J. Design of Direct Heated Rotary Dryers, A Major Technical Report, The Department of Mechanic Engineering. Concordia University, Montreal/Quebec, p. (23), 1984.
- LABUZA, T. P.; KAAANANE, A.; CHEN, J. Y., Effect of Temperature on the Moisture Sorption Isotherms and Water Activity Shift of Two Dehydrated Foods. Journal of Food Science, v. 50, p. 385-390, 1985.
- LACERDA, A. F., Estudo do efeito das variáveis geométricas no desempenho de ciclones convencionais e filtrantes, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG. Tese de doutorado, 2007.
- LEWIS, W. K. The rate of Drying of Solid Material. Ind. Eng. Chem., Vol. 13, p. 427, 1921.
- LI, S.L.; HSIAU, S. S.. DEM simulation of particle mixing in a sheared granular flow; Particuology v.6 p.( 445–454), 2008.
- LI, T.; GARG, R.; GALVIN, J.; PANNALA, S. Open-source MFI-X-Dem software for gas-solids flows: Part II — Validation studies, Powder Technology v.220 p.(138–150), 2012.
- LI, Y., XU, Y.; JIANG, S.. DEM simulations and experiments of pebble flow with monosized spheres. Powder Technology. v 193 p.(312–318), 2009.
- LISBOA, M. H. Estudo de Secadores Rotatórios na Secagem de Fertilizantes, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia/MG, 2005.
- LISBOA, M. H.; VITORINO, D. S.; DELAIBA, W. B.; FINZER, J. R. D. and BARROZO, M. A. S.. A Study of Particle Motion in Rotary Dryer. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 24, p. 365, 2007.
- LIU, P. Y.; YANG, N.; YU, A. B. DEM study of the transverse mixing of particles in rotating drums. Chemical Engineering Science. 2012.

- LIU,P.Y.; YANG, R.Y.; YU, A.B.. DEM study of the transverse mixing of wet particles in rotating drums. Chemical Engineering Science. In Press (2013).
- LOURENÇO, R. O., Identificação e monitoramento de regimes de escoamento em leito de jorro, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG. Dissertação de mestrado, 2006.
- LUZ, G. R.; JORGE, L.M.M.; PARAISO, P.R. e ANDRADE, C. M. G., Modeling and Energetic Analysis of Soybean Meal Drying in the Indirect Rotary Dryer. Chemical Product and Process Modeling, v. 4, Issue 1, 2009.
- MATCHETT, A. J., BAKER, C. G. J. Particle residence times in Cascading rotary dryers. Part 2: Application of the two-stream model to experimental and industrial data, Journal of Separation Process Technology, v. 9, 1988.
- MBAgro, Oferta e demanda de fertilizantes no Brasil: uma avaliação da dependência externa da agricultura brasileira, novembro 2007, [http://www.abmra.org.br/marketing/insumos/fertilizantes/oferta\\_demanda\\_fertilizantes\\_mbagro.pdf](http://www.abmra.org.br/marketing/insumos/fertilizantes/oferta_demanda_fertilizantes_mbagro.pdf), 15/11/2009.
- McCORMIK, P. Y. Gas Velocity Effects on Heat Transfer in Direct Heat Rotary Dryers. Chemical Engineering Progress, v. 56, p. 57-61, 1962.
- MELO, F. R. G., Fluidodinâmica de esferas leves e bolhas em líquidos, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG. Tese de doutorado, 2007.
- MILLER, C. O., SMITH, B. A., SCHUETTE, W. H. Factor Influencing the operation of Rotary Dryers, Trans AIChE, v. 38, p. 841, 1942.
- MOYERS, C. G. and BALDWIN, G. W.. Psychrometry, Evaporative Cooling and Solids Drying. In: PERRY, R. H.; GREEN, D. W.. Perry's Chemical Engineers' Handbook. Nova York, Estados Unidos, Ed. Mac Graw-Hill, 7 th edition, 1999, Cd-ROM, p. 12-1: 12-90.
- MUJUMDAR A.S.; KROKIDA M. and MARINOS-KOURIS D., Rotary Drying. In:\_\_\_\_. Handbook of Industrial Drying, 3<sup>th</sup> edition, p 151-172, 2007.
- MYSKLESTAD, O. Heat and Mass transfer in rotary dryers. Chemical Engineering Progress, v. 13, p. 129-137, 1963.
- NEUWIRTH, J.; ANTONYUK, S.; HEINRICH, S.; JACOB,M.. CFD-DEM Study and direct measurement of the granular flow in a rotary granulator. Chemical Engineering Science. In Press (2012). CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE IN PRESS
- NOGUEIRA, A. C. L. Agricultura: O Mercado de Fertilizantes no Brasil, Informações FIPC, p 1-4, 2008.

- NONHEBEL, M. A. G. & MOSS, A. A. H.. Drying of Solids in the Chemical Industry. Butterworths, Londres, Inglaterra, 1971, p. 301.
- OSBORN, G. S.; WHITE, G.M.; SULAIMAN, A.H.; WELTON, L. R., Predicting Equilibrium Moisture Proportions of Soybeans. Transactions of the ASAE. Vol. 32 (6), p. 2109-2113. 1989.
- OVERHULTS, D. G., WHITE, G. M., HAMILTON, H. E., ROSS, I. J., Drying Soybeans with Heated Air. Transactions of the ASAE. p. 112-113, 1973.
- PAGE, G. E., Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin-Layer. Indiana-USA, Purdue University, MSc. Dissertation, 1949.
- PEREIRA, F. A. R. Escoamento laminar de líquidos não-Newtonianos em seções anulares: estudos de CFD e abordagem experimental, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 229p. Tese de doutorado, 2006.
- PERRY, R.H. e CHILTON, C. H. (eds), Chemical Engineers' Handbook, Section 20, 5<sup>th</sup> ed, McGraw-Hill, Nova York, 1974.
- PLANETA ORGÂNICO, Breve História da Agricultura, <http://www.planetaorganico.com.br/histor.htm> , 20/02/2009.
- PORTER, S. J., The design of Rotary Dryers and Coolers, Transport Institute of Chemical Engineering, v. 41, p. 272-287, 1963.
- PRUTTON, C. F., MILLER, C. O., SCHUETTE, W. H., Trans. AIChE, v. 38, p. 123-141, 1942.
- RADL, S.; KALVODA, E.; GLASSER, B.J.; KHINAST, J.G.. Mixing characteristics of wet granular matter in a bladed mixer. Powder Technology. v. 200, p. (171-189), 2010.
- RANS, W. E., MARSHALL, W. R., Evaporation from drops, Chemical Engineering Process, v. 48, p. 141-146, 1952.
- REMY, B.; KHINAST, J. G.; GLASSER, B. J.; Polydisperse granular flow sinabladed mixer: Experiment sand; Chemical Engineering Science. V.66 p.(1811–1824), 2011.
- REN, B.; ZHONG, W.; CHEN, Y.; CHEN, X.; JIN, B.; YUAN, Z.; LU, Y.. CFD-DEM simatation of spouting of corn shaped particles. Particology. In Press. (2012).
- REVOL, D. BRIENS, C. L., CHABAGNO, J. M., The Design of Flights in Rotary Dryers, Powder Technology, v.121, p. 230-238, 2001.
- ROCHA, S. M. S. (2010) Estudo da influência da velocidade e dos ciclos de filtração na formação da torta na limpeza de gases em filtro de mangas, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 143p. Dissertação de mestrado.

- SAEMAN, W. C.; MITCHELL, T. R. Jr.. Analysis of Rotary Dryer and Cooler performance, Chemical Engineering Progress, v. 50, p. 467-475, 1954.
- SAHNI, E.; YAU, R.; CHAUDHURI, B.. Understanding granular mixing to enhance coating performance in a pan coater experiments and simulations. Powder Technology, v. 205, p. (231-241), 2011.
- SANTOS, D. A. Contribuições ao estudo da Fluidodinâmica em leito de jorro – Estudos experimentais e de simulação via CFD. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 107p. Dissertação de mestrado, 2011-a.
- SANTOS, K. G. Aspectos Fundamentais da pirólise de biomassa em leito de jorro: fluidodinâmica e cinética do processo., Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 235 p. Tese de doutorado, 2011-b.
- SCHOFIELD, F. R.; GLIKIN, P. G.. Rotary coolers for granular fertilizer, Chemical and Process Engineering Resources, v. 40, p. 183, 1962.
- SILVÉRIO, B. C.. Estudo fluidodinâmico e de secagem de fertilizantes em secadores rotatórios concorrentes. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 120p. Dissertação de Mestrado, 2010.
- SILVÉRIO, B. C.; FAÇANHA J. M. F.; ARRUDA, E. B.; MURATA, V. V.; BARROZO, M. A. S.. Fluid Dynamics in a Concurrent Rotary Dryer and a Comparison of Their Performance with a Modified Dryer. Chemical Engineering Technology, v. 34, nº01, p. (81-86), 2011.
- SONG, Y.. Solid Transportation, Heat and Mass Transfer in Rotary Dryers, University of Ottawa, Ottawa. M.Sc. Dissertation, p 85 :87, 2003.
- THOMPSON, T. L.; PEART, T. M.; FOSTER, G. H. Mathematical Simulation of Corn Drying – a New Model. Transactions of the ASAE, v.11, p.582-586, 1968.
- VAN-PUYVELD, D. R. Modelling the Hold-up of Lifters in Rotary Dryers. Chemical Engineering Research and Design, Granular Flow Research, Canberra, Australia, p. 226-232, 2009.
- VIEIRA, L.G.M., Otimização dos processos de separação em hidrociclones filtrantes, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 298p. Tese de doutorado, 2006.
- VIEIRA NETO, J. L. Otimização da Separação Sólido-Líquido na Perfuração de Poços de Petróleo e Gás e Modelagem e Simulação Numérica de Escoamento de Fluidos em Seções Anulares. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, p. Tese de doutorado, 2011.

- WANG, F. Y.; CAMERON, I. T; LITSTER, J. D.; RUDOLPH, V.. A Fundamental Study on Particle Transport Through Rotary Dryers for Flight Design and System Optimisation. Drying Technology, v. 13 (5-7), p. 1261-1278, 1995.
- ZHONG, W.; XIONG, Y.; YUAN, Z.; ZHANG, M.. DEM simulation of gas-solid flow behaviors in spouted-fluid bed. Chemical Engineering Science.. v. 61, p.( 1571-1584), 2006.



## **ANEXO A**

**Resultados experimentais do secador rotatório convencional contracorrente  
ARRUDA (2008)**



Tabela Anexo A1 - Resultados experimentais de secagem para o secador rotatório convencional contracorrente com 6 suspensores de 3 segmentos (2x0,7x0,7cm) operando com rotação  $N_R = 3,6$  rpm e inclinação  $\alpha = 3^\circ$ .

Exp.	$v_{AR}$	$T_{f0}$	$G_{SU}$	$\bar{\tau}$	$Y_0$	$Y$	$UR_0$	$UR$	$T_f$	$T_{S0}$	$T_S$	$M_0$	$M$	$R_W$
	m/s	°C	kg/min	min	g <sub>vp</sub> /kg <sub>AS</sub>	g <sub>vp</sub> /kg <sub>AS</sub>	(-)	(-)	°C	°C	°C	kg/kg	kg/kg	10 <sup>3</sup> min <sup>-1</sup>
1	1,5	75	0,8	5,6	24,32	37,82	0,59	0,74	52,2	26,72	35,06	0,1557	0,1387	3,04
2	1,5	75	1,2	5,45	19,79	39,72	0,528	0,87	50,8	26,72	32,85	0,1567	0,1427	2,57
3	1,5	95	0,8	5,6	18,68	22,82	0,425	0,51	70,4	24,77	37,71	0,1596	0,1373	3,98
4	1,5	95	1,2	5,45	18,27	22,63	0,419	0,51	67,1	26,72	37,42	0,1581	0,1404	3,25
5	3,5	75	0,8	6,3	12,45	18,18	0,395	0,64	55,4	25,99	34,45	0,1536	0,1295	3,83
6	3,5	75	1,2	6,0	15,89	18,82	0,464	0,63	54,5	25,87	33,56	0,1495	0,1317	2,97
7	3,5	95	0,8	6,3	15,06	17,56	0,388	0,49	70,9	25,87	38,68	0,1697	0,1363	5,30
8	3,5	95	1,2	6,0	15,89	18,57	0,384	0,51	68,1	26,03	38,32	0,1588	0,1353	3,92
9	1,1	85	1	5,1	9,11	16,25	0,282	0,6	54,3	22,49	29,53	0,1594	0,145	2,82
10	3,9	85	1	5,9	7,9	16,17	0,252	0,63	60,3	22,45	30,51	0,1636	0,1407	3,88
11	2,5	71	1	5,2	13,18	19,76	0,432	0,68	51,8	25,43	32,44	0,1542	0,1389	2,94
12	2,5	99	1	5,2	10,88	19,37	0,279	0,56	68,6	25,43	38,85	0,1496	0,129	3,96
13	2,5	85	0,7	5,3	10,61	19,51	0,314	0,59	63,8	27,93	40,42	0,1409	0,1183	4,26
14	2,5	85	1,3	5,1	10,21	17,81	0,306	0,64	54,7	24,32	30,19	0,1391	0,1242	2,92
15	2,5	85	1	5,2	12,34	18,45	0,28	0,61	58,9	28,97	36,66	0,1372	0,1203	3,25
16	2,5	85	1	5,2	12,44	18,92	0,355	0,61	58,7	24,16	31,54	0,1375	0,1207	3,23
17	2,5	85	1	5,2	12,44	18,92	0,355	0,61	58,7	25,03	32,58	0,1374	0,1209	3,17
18	2,5	85	1	5,2	12,44	18,92	0,355	0,61	58,7	24,20	32,13	0,137	0,1204	3,19



## **ANEXO B**

**Resultados experimentais do secador rotatório convencional concorrente  
SILVÉRIO (2010)**



Tabela Anexo B1 - Resultados experimentais de secagem para o secador rotatório convencional concorrente com 6 suspensores de 3 segmentos (2x0,7x0,7cm) operando com rotação  $N_R = 3,6$  rpm e inclinação  $\alpha = 3^\circ$ .

Exp.	$v_{AR}$	$T_{f0}$	$G_{SU}$	$\bar{\tau}$	$Y_0$	$Y$	$UR_0$	$UR$	$T_f$	$T_{S0}$	$T_S$	$M_0$	$M$	$R_W$
	m/s	°C	kg/min	min	g <sub>vp</sub> /kg <sub>AS</sub>	g <sub>vp</sub> /kg <sub>AS</sub>	(%)	(%)	°C	°C	°C	kg/kg	kg/kg	10 <sup>3</sup> min <sup>-1</sup>
1	1,5	75	0,8	4,95	8,6	16,1	0,52	0,70	53,0	26,0	38,7	0,1662	0,1521	2,2828
2	1,5	75	1,2	5,04	8,2	17,7	0,56	0,70	49,5	24,0	37,5	0,1216	0,1095	1,8056
3	1,5	95	0,8	4,95	10,4	25,3	0,78	0,78	61,8	25,4	41,1	0,1743	0,1547	2,4646
4	1,5	95	1,2	5,04	20,6	29,4	0,65	0,65	57,9	25,4	41,0	0,1360	0,1166	2,3810
5	3,5	75	0,8	3,77	11,9	24,6	0,57	0,73	53,9	26,2	37,3	0,1329	0,1175	3,6074
6	3,5	75	1,2	4,00	11,9	21,8	0,57	0,71	51,6	26,8	37,6	0,1510	0,1326	2,9500
7	3,5	95	0,8	3,77	12,1	32,3	0,49	0,72	66,1	26,7	42,8	0,1226	0,0996	4,4562
8	3,5	95	1,2	4,0	12,1	24,4	0,49	0,65	65,2	26,1	41,5	0,1646	0,1386	3,7000
9	1,1	85	1	5,3	8,9	18,3	0,74	0,76	56,0	25,9	34,7	0,1676	0,1505	2,3540
10	3,9	85	1	3,71	12,9	19,9	0,67	0,70	58,2	25,5	42,4	0,1451	0,1260	3,4501
11	2,5	71	1	4,75	13,1	20,4	0,60	0,71	52,0	27,1	37,1	0,1470	0,1311	2,1895
12	2,5	99	1	4,75	12,9	43,7	0,67	0,83	71,6	23,0	43,8	0,1452	0,1161	2,8421
13	2,5	85	0,7	4,69	9,9	17,8	0,41	0,64	62,2	25,5	39,6	0,1220	0,1010	3,8380
14	2,5	85	1,3	4,8	9,9	16,1	0,41	0,64	62,1	25,5	39,6	0,1214	0,1010	2,5000
15	2,5	85	1	4,75	13,1	18,7	0,60	0,67	60,8	23,2	40,3	0,1647	0,1417	2,6316
16	2,5	85	1	4,75	11,5	23,7	0,50	0,68	60,4	23,1	40,8	0,1415	0,1188	2,6316
17	2,5	85	1	4,75	11,5	27,5	0,50	0,72	60,4	28,6	40,5	0,1521	0,1290	2,7368
18	2,5	85	1	4,75	11,5	19,7	0,50	0,64	60,8	23,2	40,8	0,1347	0,1138	2,6526





## **ANEXO C**

**Resultados experimentais do secador rotoaerado RT-03**

**ARRUDA (2008)**



Tabela Anexo C1 - Resultados experimentais de secagem para o secador rotoaerado RT-03 ARRUDA (2008).

Exp.	$v_{AR}$	$T_{f0}$	$G_{SU}$	$\bar{\tau}$	$Y_0$	$Y$	$UR_0$	$UR$	$T_f$	$T_{S0}$	$T_S$	$M_0$	$M$	$R_w$
	m/s	°C	kg/min	min	g <sub>vp</sub> /kg <sub>AS</sub>	g <sub>vp</sub> /kg <sub>AS</sub>	(%)	(%)	°C	°C	°C	kg/kg	kg/kg	10 <sup>3</sup> min <sup>-1</sup>
1	1,5	75	0,8	3,19	19,89	30,4	53,36	83,43	75,13	23,29	48,4	0,1322	0,1091	7,2611
2	1,5	75	1,2	3,33	23,54	37,29	58,24	90,	75,21	23,5	46,5	0,1322	0,1141	5,4372
3	1,5	95	0,8	3,19	20,73	36,03	45,75	71,95	95,1	27,02	64,1	0,1269	0,1058	6,6055
4	1,5	95	1,2	3,33	19,09	40,3	43,5	77,0	95,14	23,2	60,72	0,1317	0,1130	5,6234
5	3,5	75	0,8	2,28	10,37	13,71	35,34	55,36	75,05	23,36	48,9	0,1374	0,1017	15,6364
6	3,5	75	1,2	2,49	11,22	16,59	37,42	60,1	74,97	23,36	47,61	0,1503	0,1195	12,3695
7	3,5	95	0,8	2,28	14,81	18,65	36,72	50,7	95,43	24,15	69,37	0,1356	0,0916	19,2900
8	3,5	95	1,2	2,49	16,58	22,6	39,65	53,02	95,37	24,21	65,63	0,1279	0,0949	13,2620
9	1,1	85	1	3,09	23,13	40,38	52,95	85,	85,14	30,02	44,78	0,1355	0,1136	7,0755
10	3,9	85	1	2,31	8,33	12,42	26,57	55,44	85,73	27,59	53,88	0,1437	0,1064	16,1385
11	2,5	71	1	3,06	18	25,52	52,62	84,68	70,98	26,29	42,05	0,1554	0,1180	12,2143
12	2,5	99	1	3,06	22,95	34	47,02	80,1	99,21	27,02	60,17	0,1424	0,0924	16,3201
13	2,5	85	0,7	2,85	18,78	25,78	47,03	69,1	85,1	26,29	55,33	0,1507	0,1044	16,2699
14	2,5	85	1,3	3,10	23,54	34,25	53,48	84,14	85,05	23,44	46,1	0,1502	0,1073	13,8509
15	2,5	85	1	3,06	20,2	29,72	49,13	79,13	85,01	27,54	50,04	0,1551	0,1103	14,6430
16	2,5	85	1	3,06	19,7	28,99	48,38	79,27	85,1	27,5	50,92	0,1504	0,1073	14,0938
17	2,5	85	1	3,06	19,29	28,82	47,85	79,32	84,97	27,5	50,92	0,1528	0,1097	14,0754
18	2,5	85	1	3,06	19,89	30,4	49,	78,0	85,14	27,59	51,2	0,1533	0,1087	14,5632



## **APÊNDICE A**

**Fotografias de algumas configurações de secadores rotoaerados contidas na Tabela 3.2**



Figura Apêndice A1 – Fotografias de das configurações RT-09, RT-12, RT-13, RT14 e RT-15 de secadores rotoaerados.






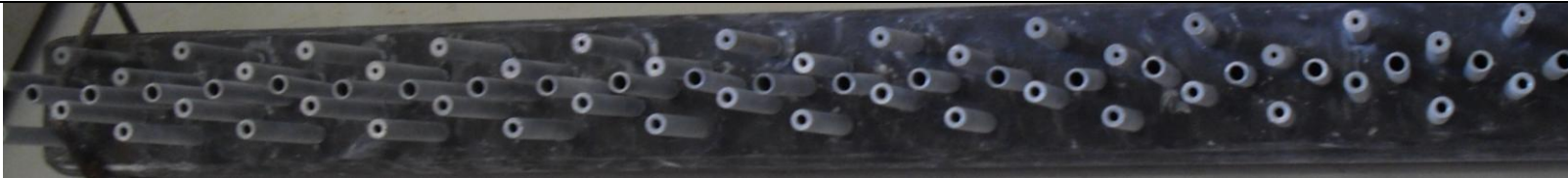

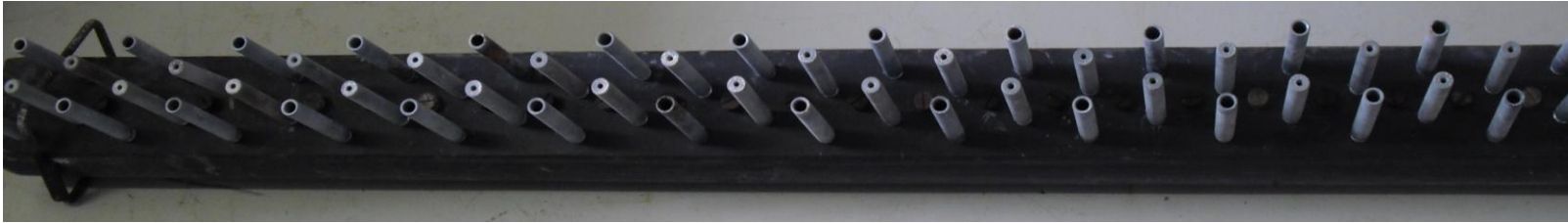

Configuração	Fotografia do tubo central contendo os Minitubos
RT-09	
RT-12	
RT-13	
RT-14	
RT-15	

Figura Apêndice A2 – Fotografias das configurações RT-16, RT-17, RT-18 e RT-19 dos secadores rotoaerados híbridos.

Configuração	Fotografia do tubo central contendo os minitubos
RT-16	
RT-17	
RT-18	
RT-19	



## **APÊNDICE B**

**Resultados experimentais dos secadores rotoaerados operando em iguais condições  
experimentais**



Tabela Apêndice B1 - Resultados experimentais de secagem para as configurações de secador rotoaerado da Tabela 3.2.

Configuração.	$v_{AR}$	$T_{f0}$	$G_{SU}$	$\bar{\tau}$	$UR_0$	$UR$	$T_f$	$T_{S0}$	$T_S$	$M_0$	$M$	$R_W$
	m/s	°C	kg/min	min	(-)	(-)	°C	°C	°C	kg/kg	kg/kg	10 <sup>3</sup> min <sup>-1</sup>
1	1,1	85	1,0	3,71	13,1	64	85,62	23,6	32,88	0,1474	0,1249	6,06
2	1,1	85	1,0	3,23	44,17	79,14	84,9	25,3	38,7	0,1369	0,1166	6,28
3	1,1	85	1,0	3,68	37,7	82,53	84,9	30	40	0,142	0,1127	7,96
4	1,1	85	1,0	3,77	41,7	89,09	84,9	27	41	0,1372	0,1091	7,45
5	1,1	85	1,0	3,88	32,55	85,45	84,9	24,9	36,4	0,14	0,1166	6,03
6	1,1	85	1,0	4,06	26,04	77,02	85	18,3	37,1	0,1384	0,1132	6,21
7	1,1	85	1,0	5,13	20,31	79,46	85	25,2	40,9	0,141	0,1075	6,53
8	1,1	85	1,0	4,90	33	79,36	84,1	25,3	37,9	0,1305	0,1078	4,63
9	1,1	85	1,0	3,86	33,93	84,97	84,8	30,6	46,6	0,1293	0,0975	8,24
10	1,1	85	1,0	4,15	27,28	82,32	84,7	26,3	38,3	0,1234	0,0992	5,83
11	1,1	85	1,0	4,61	69,81	86,72	85,1	23	45	0,1423	0,1119	6,59
12	1,1	85	1,0	4,59	32,15	80,28	85,4	23	41	0,1382	0,1165	4,73
13	1,1	85	1,0	4,59	24,84	84,78	85,2	28,5	38,8	0,1282	0,1052	5,01
14	1,1	85	1,0	4,05	43,04	88,21	85,8	31,2	39,6	0,1584	0,1367	5,36
15	1,1	85	1,0	3,25	43,04	88,31	86	28,1	38,1	0,1584	0,1367	6,68
16	1,1	85	1,0	3,89	40,49	88,99	85,9	26,3	39,9	0,1351	0,1091	6,68
17	1,1	85	1,0	3,88	32,88	85,15	85,4	26,3	40,5	0,1377	0,107	7,91
18	1,1	85	1,0	3,94	37,67	85,82	85,7	29,7	40,4	0,1326	0,108	6,24



## **APÊNDICE C**

**Resultados experimentais do secador rotoaerado RT-04,**



Tabela Apêndice C1 - Resultados experimentais de secagem para o secador rotoaerado RT-04.

Exp.	$v_{AR}$	$T_{j0}$	$G_{SU}$	$\bar{\tau}$	$Y_0$	$Y$	$UR_0$	$UR$	$T_f$	$T_{S0}$	$T_S$	$M_0$	$M$	$R_W$
	m/s	°C	kg/min	min	g <sub>vp</sub> /k <sub>gAS</sub>	g <sub>vp</sub> /k <sub>gAS</sub>	(-)	(-)	°C	°C	°C	kg/kg	kg/kg	10 <sup>3</sup> min <sup>-1</sup>
1	1,5	75	0,8	3,19	8,6	16,1	0,52	0,70	74,9	22,1	38,7	0,1202	0,1089	8,62
2	1,5	75	1,2	3,33	8,2	17,7	0,56	0,70	73,7	28,3	37,5	0,1216	0,1125	6,79
3	1,5	95	0,8	3,19	10,4	25,3	0,78	0,78	97	25,4	41,1	0,1350	0,1228	9,97
4	1,5	95	1,2	3,33	20,6	29,4	0,65	0,65	93,6	30,4	41,0	0,1325	0,1205	8,21
5	3,5	75	0,8	2,28	11,9	24,6	0,57	0,73	74,5	26,8	37,3	0,1311	0,1175	47,33
6	3,5	75	1,2	2,49	11,9	21,8	0,57	0,71	74,3	26,8	37,6	0,1406	0,1288	39,57
7	3,5	95	0,8	2,28	12,1	32,3	0,49	0,72	92,5	26,7	42,8	0,1211	0,1043	56,67
8	3,5	95	1,2	2,49	12,1	24,4	0,49	0,65	94,4	26,7	41,5	0,1170	0,1022	43,29
9	1,1	85	1	3,09	8,9	18,3	0,45	0,76	84,2	21,4	34,7	0,1356	0,1231	7,45
10	3,9	85	1	2,31	12,9	19,9	0,67	0,70	83,8	22,7	42,4	0,1257	0,1129	54,85
11	2,5	71	1	3,06	13,1	20,4	0,60	0,71	69,8	25,8	37,1	0,1309	0,1205	9,24
12	2,5	99	1	3,06	12,9	43,7	0,67	0,83	97,4	25,8	43,8	0,1106	0,0971	12,53
13	2,5	85	0,7	2,85	9,9	17,8	0,41	0,64	84	25,3	39,6	0,1500	0,1320	14,84
14	2,5	85	1,3	3,10	9,9	16,1	0,41	0,64	83	25,3	39,6	0,1534	0,1414	11,49
15	2,5	85	1	3,06	13,1	18,7	0,60	0,67	85,2	23,2	40,3	0,1249	0,1124	11,43
16	2,5	85	1	3,06	11,5	23,7	0,50	0,68	86,2	28,2	40,8	0,1514	0,1389	11,71
17	2,5	85	1	3,06	11,5	27,5	0,52	0,70	86,7	24,5	40,5	0,1261	0,1131	11,18
18	2,5	85	1	3,06	8,6	16,1	0,56	0,70	85,8	24,50	40,8	0,1327	0,1201	11,71





## **APÊNDICE D**

**Resultados experimentais do secador rotoaerado RT-09,**



Tabela Apêndice D1 - Resultados experimentais de secagem para o secador rotoaerado RT-09.

Exp.	$v_{AR}$	$T_{f0}$	$G_{SU}$	$\bar{\tau}$	$Y_0$	$Y$	$UR_0$	$UR$	$T_f$	$T_{S0}$	$T_S$	$M_0$	$M$	$R_W$
	m/s	°C	kg/min	min	g <sub>vp</sub> /kg <sub>AS</sub>	g <sub>vp</sub> /kg <sub>AS</sub>	(-)	(-)	°C	°C	°C	kg/kg	kg/kg	10 <sup>3</sup> min <sup>-1</sup>
1	1,5	75	0,8	3,19	11,9	19,4	0,39	0,73	75	24,7	50,4	0,1207	0,0914	7,69
2	1,5	75	1,2	3,33	11,7	23	0,38	0,83	74,5	26,9	44,1	0,1226	0,0957	6,95
3	1,5	95	0,8	3,19	15,8	22,6	0,38	0,76	95,1	24,1	56,6	0,1211	0,0827	10,08
4	1,5	95	1,2	3,33	6,6	22,6	0,29	0,80	94,9	24,1	52,1	0,1211	0,0869	8,84
5	3,5	75	0,8	2,28	15,8	16,8	0,47	0,63	73,8	24,4	61	0,1333	0,0913	21,21
6	3,5	75	1,2	2,49	11,8	17,5	0,38	0,69	74,8	24,4	60,8	0,1305	0,0935	13,21
7	3,5	95	0,8	2,28	20,3	25,3	0,51	0,59	95	26,9	77,6	0,1256	0,0839	21,06
8	3,5	95	1,2	2,49	-	-	0,00	0,00	94,6	23,8	74,5	0,1287	0,0843	15,86
9	1,1	85	1	3,09	12,6	26,6	0,36	0,87	83,9	24,6	41,5	0,1342	0,1066	7,15
10	3,9	85	1	2,31	14	27,8	0,51	0,58	84,9	24	64,5	0,1215	0,0933	16,30
11	2,5	71	1	3,06	16,8	19,9	0,55	0,71	71,3	27,4	53	0,1324	0,0965	10,56
12	2,5	99	1	3,06	25,6	39,4	0,62	0,73	99,5	27,4	69,5	0,1324	0,0781	15,97
13	2,5	85	0,7	2,85	15,4	18,8	0,41	0,64	85,2	28,1	64,4	0,127	0,0781	15,23
14	2,5	85	1,3	3,10	21,1	25,1	0,50	0,79	85,6	28,1	64,5	0,127	0,0812	11,54
15	2,5	85	1	3,06	15,8	22	0,51	0,63	85,7	24	60,2	0,122	0,0812	12,00
16	2,5	85	1	3,06	14	18,2	0,38	0,68	85,7	27,4	58,7	0,1314	0,0898	12,24
17	2,5	85	1	3,06	18,4	24,4	0,39	0,73	84,4	28,1	66,5	0,124	0,0807	12,74
18	2,5	85	1	3,06	11,9	19,4	0,38	0,83	84,4	28,1	66,5	0,124	0,0813	12,56



## **APÊNDICE E**

**Resultados experimentais do secador rotoaerado RT-17,**



Tabela Apêndice E1 - Resultados experimentais de secagem para o secador rotoaerado RT-17.

Exp.	$v_{AR}$	$T_{j0}$	$G_{SU}$	$\bar{\tau}$	$Y_0$	$Y$	$UR_0$	$UR$	$T_f$	$T_{S0}$	$T_S$	$M_0$	$M$	$R_W$
	m/s	°C	kg/min	min	g <sub>vp</sub> /kg <sub>AS</sub>	g <sub>vp</sub> /kg <sub>AS</sub>	(%)	(%)	°C	°C	°C	kg/kg	kg/kg	10 <sup>3</sup> min <sup>-1</sup>
1	1,5	75	0,8	3,19	15,6	20,2	45,79	79,03	74,8	20,8	50,3	0,1248	0,0974	6,26
2	1,5	75	1,2	3,33	10,4	23,4	34,11	89,52	77,4	20,8	43,2	0,1268	0,1014	5,51
3	1,5	95	0,8	3,19	8,9	21,8	25,07	74,5	93,8	22,6	54,1	0,1343	0,0938	9,25
4	1,5	95	1,2	3,33	23,8	24,3	12,08	84,74	94,2	22,2	45,6	0,1329	0,1036	6,36
5	3,5	75	0,8	2,28	10,4	13,9	54,42	35,52	73,7	29,5	56,9	0,1266	0,094	59,27
6	3,5	75	1,2	2,49	11,3	18,6	37,69	69,68	74	29,5	56,9	0,1249	0,094	31,53
7	3,5	95	0,8	2,28	10,5	183,9	28,49	98,73	94,6	24,7	66,8	0,1475	0,1027	81,45
8	3,5	95	1,2	2,49	11,4	22,3	29,95	71,55	95,8	29,5	65,2	0,1229	0,086	37,65
9	1,1	85	1	3,09	11,1	23,9	32,88	85,15	85,4	26,3	40,5	0,1377	0,107	7,97
10	3,9	85	1	2,31	9,8	14,7	29,45	56,94	85,9	24,3	63,7	0,1341	0,0958	70,93
11	2,5	71	1	3,06	8,7	15,1	32,13	71,7	71,2	22,7	50,2	0,1258	0,0848	11,71
12	2,5	99	1	3,06	9,4	21,1	24,89	72,94	99,1	22,7	65,7	0,1269	0,0699	16,29
13	2,5	85	0,7	2,85	9,9	86,7	30,05	-	84,7	20	59,8	0,1291	0,0805	15,43
14	2,5	85	1,3	3,10	10,2	22,7	30,61	82,61	85,5	24,2	56,9	0,1368	0,0912	11,29
15	2,5	85	1	3,06	8,5	20	26,87	75,31	84,2	24,2	60,6	0,1389	0,094	12,83
16	2,5	85	1	3,06	6,6	17,2	19,99	71,23	85,2	21,4	58,9	0,1234	0,0812	12,06
17	2,5	85	1	3,06	17,3	61,4	44,34	-	85,1	20	59,1	0,1303	0,0857	12,74
18	2,5	85	1	3,06	15,6	20,2	34,02	73,2	85,4	23,6	62,1	0,1299	0,0872	12,20





## **APÊNDICE F**

**Resultados experimentais dos secador rotoaerado RT-04, RT-09, RT-17 e convencional contracorrente com maiores condições de carga de sólidos.**



Tabela Apêndice F1 - Resultados experimentais de secagem para os secadores rotoaerados RT-04, RT-09, RT-17 e convencional contracorrente.

Exp.	$v_{AR}$	$T_{f0}$	$G_{SU}$	$\bar{\tau}$	$H$	$T_{ambiente}$	$UR_0$	$UR$	$T_f$	$T_{S0}$	$T_S$	$M_0$	$M$	$R_w$
	m/s	°C	kg/min	min	kg	°C	(%)	(%)	°C	°C	°C	kg/kg	kg/kg	10 <sup>3</sup> min <sup>-1</sup>
RT-04 (1,0)	3,9	85	1,0	0,68	1,323	24,1	65,6	61,03	85,6	20	66,6	0,1381	0,1008	54,85
RT-04 (1,3)	3,9	85	1,3	0,57	1,5	25,2	37,2	58,87	84,6	20,2	61,2	0,1416	0,1124	51,23
RT-04 (1,9)	3,9	85	1,9	0,57	2,03	28,1	33	63,99	85,6	20,2	62	0,1413	0,1188	39,47
RT-17 (2,5)	3,9	85	2,5	3,38	8,05	25,9	37,6	78,1	84,5	25,3	57,6	0,1403	0,1045	10,59
RT-17 (1,0)	3,9	85	1,0	0,54	0,95	24	35,6	56,94	85,9	24,3	63,7	0,1341	0,0958	70,93
RT-17 (1,3)	3,9	85	1,3	0,69	1,723	28,1	30,5	51,72	85,2	23,1	66,4	0,1514	0,1255	37,54
RT-17 (1,9)	3,9	85	1,9	2,98	5,615	25,7	30,5	73,71	85,5	23,1	66,3	0,1484	0,113	11,88
RT-17 (2,5)	3,9	85	2,5	4,03	9,667	25,6	34,1	79,19	85,3	23,1	57,1	0,1556	0,1176	9,43
RT-09 (1,0)	3,9	85	1,0	1,73	1,74	24,5	35,8	58,17	84,9	24	64,5	0,1215	0,0933	16,30
RT-09 (1,3)	3,9	85	1,3	2,09	2,18	28,4	34,3	61,28	85,5	27,3	68,2	0,137	0,1049	15,36
RT-09 (1,9)	3,9	85	1,9	3,08	5,97	28,7	34,1	75	84,3	27,3	66,3	0,1403	0,1057	11,23
RT-09 (2,5)	3,9	85	2,5	3,69	8,72	27,1	30,9	84,1	85	27,8	59,6	0,1338	0,0995	9,30
CContra. (1,0)	3,9	85	1,0	5,9	5,9	-	25,2	63	84,9	27,2	36,8	0,1636	0,1407	3,88
CContra. (1,3)	3,9	85	1,3	7,54	8,32	25,9	45,8	59,31	84,4	27	33,5	0,1497	0,1333	2,18
CContra. (1,9)	3,9	85	1,9	6,19	12,12	27,5	33,4	57,9	84,5	27,5	33,4	0,148	0,1353	2,05
CContra. (2,5)	3,9	85	2,5	5,50	14,18	25,7	44,6	78,46	85,2	27	36,3	0,1313	0,1208	1,91



## **APÊNDICE G**

**Resultados de simulação em CFD das velocidades de saída do ar nos minitubos nas  
diferentes configurações estudadas**



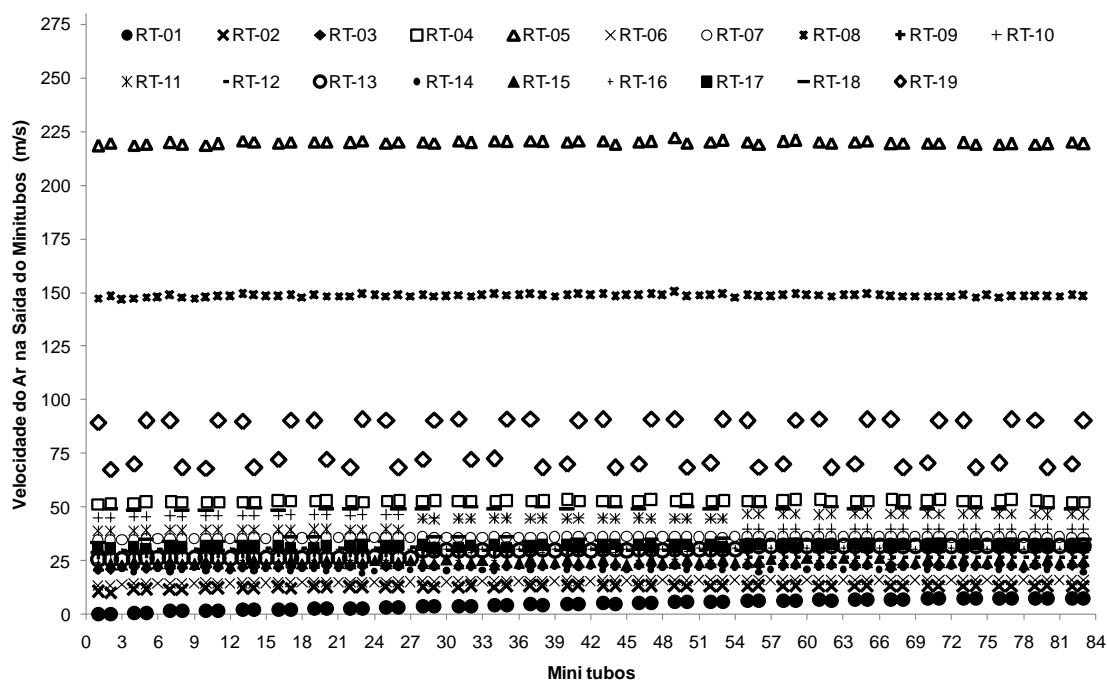


Figura Apêndice G1- Simulação em CFD das velocidades de saída do ar nos minitubos nas diferentes configurações da Tabela 3.2 com velocidade do ar na entrada igual a 2,5 m/s.

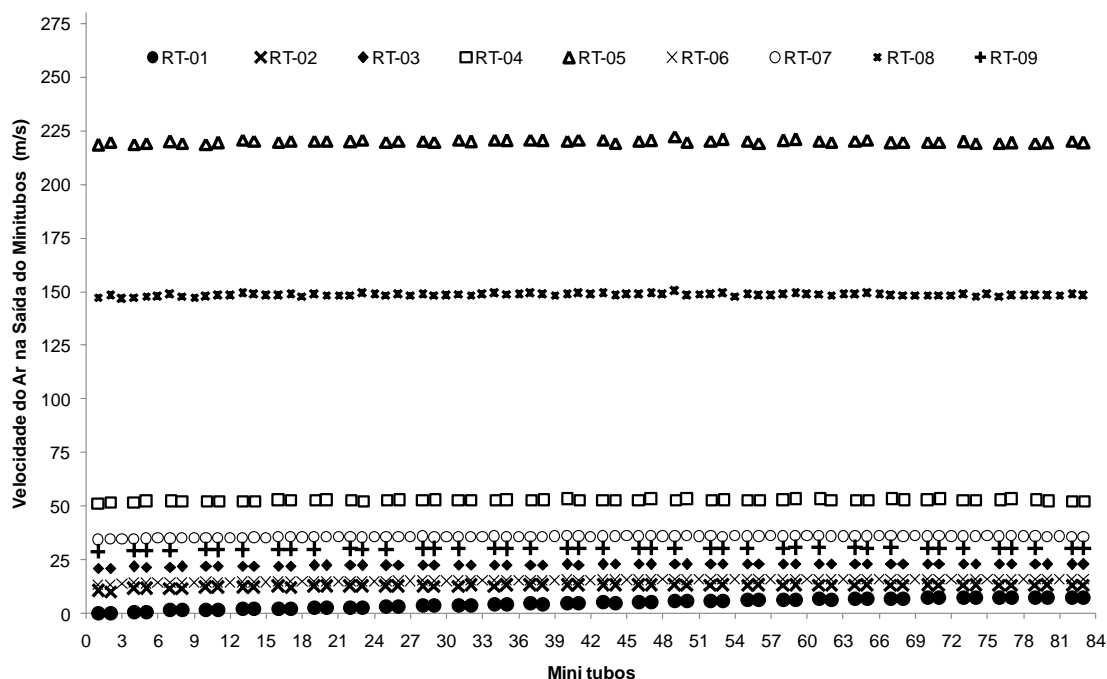


Figura Apêndice G2- Simulação em CFD das velocidades de saída do ar nos minitubos nas configurações não híbridas da Tabela 3.2 com velocidade do ar na entrada igual a 2,5 m/s.

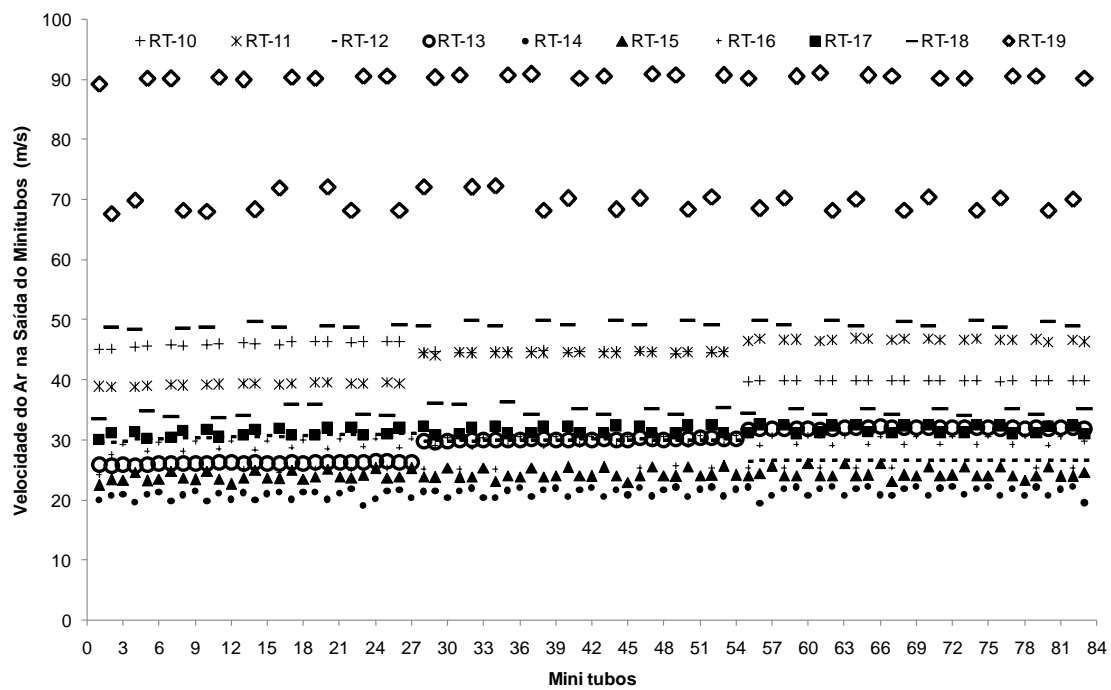


Figura G3- Simulação em CFD das velocidades de saída do ar nos minitubos nas configurações híbridas da Tabela 3.2 com velocidade do ar na entrada igual a 2,5 m/s.