

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**ANÁLISE DA SECAGEM DE PASTAS
EM LEITO DE JORRO**

André Ricardo Felkl de Almeida

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, na Área de Concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Prof. Dr. José Teixeira Freire

Co-orientador: Prof. Dr. Fábio Bentes Freire

SÃO CARLOS - SP

2009

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária/UFSCar**

A447as

Almeida, André Ricardo Felkl de.

Análise da secagem de pastas em leite de jorro / André Ricardo Felkl de Almeida. -- São Carlos : UFSCar, 2009.
165 f.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2009.

1. Leite de jorro. 2. Secagem de pastas. 3. Regime transiente. 4. Modelo CST. I. Título.

CDD: 661 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE **ANDRÉ RICARDO FELKL DE ALMEIDA** APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS EM 09 DE MARÇO DE 2009.

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. José Teixeira Freire
Presidente, PPG-EQ/UFSCar



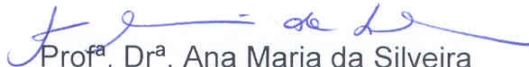
Prof. Dr. Fábio Bentes Freire
co-orientador, CECS/UFABC



Prof. Dr. Wanderley Pereira de Oliveira
FCFRP/USP



Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto
FEQ/UNICAMP



Prof^a. Dr^a. Ana Maria da Silveira
DEQ/UFSCar



Prof^a. Dr^a. Maria do Carmo Ferreira
PPG-EQ/UFSCar

“ ...

Se filhos criados, trabalhos dobrados
Te fazem cansada, o amor não cansou
Seguido eu te vejo com os olhos molhados
Olhando este homem que um dia embalou
Se cresço e me esqueço de tudo falar
É porque a vida me fez já tão quieto
Mas quando no berço enxergo meus piás
Aquece meu peito os teus grandes afetos
E este teu filho que em teu seio cresceu
Conhece o amor, o mundo e a rua
E já se fez pai, sabendo amar os seus
...”

Trecho da música Mãe Campeira

Grupo Querência

DEDICATÓRIA

A minha esposa Bianca da Graça Rosa Coelho.

Aos meus filhos Laura Coelho de Almeida e André Ricardo Felkl de Almeida Filho.

Aos meus pais José Charnesqui de Almeida e Regina Felkl de Almeida.

Aos meus sogros Paulo Roberto Pinto Coelho e Maria da Graça Rosa Coelho.

Ao meu mestre, amigo e paizão Prof. Dr. José Teixeira Freire.

Ao meu mano e amigo Prof. Dr. Fábio Bentes Freire.

A Deus, que me concedeu esta oportunidade.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a minha esposa Bianca e aos meus filhos Laura e André pelo carinho, dedicação, paciência, companheirismo, estímulo e principalmente o amor que vocês dedicaram a mim durante esta jornada. Meus queridos esta conquista também é de vocês.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Teixeira Freire pela amizade, carinho, estímulo e orientação. Um verdadeiro exemplo de ser humano e educador. *“Meu mestre obrigado por fazer parte da minha vida”*.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Fábio Bentes Freire pelo incentivo, amizade e ajuda prestada para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, José e Regina, pela minha educação. Pessoas simples que sempre me ensinaram com muito amor e carinho a ser humilde, sincero e honesto.

Aos meus sogros, Paulo e Maria. Obrigado pelo apoio e também por terem concebido o amor da minha vida.

Aos meus irmãos (José Fernando e Lúcia), aos meus cunhados (Fabio, Cris, Paula, Cícero e Ana Paula) e aos meus afilhados e sobrinhos (Fernanda, Isadora, Estevão, Leonardo, Eduarda, Nathalia, Lucas e Arthur).

Aos professores do Centro de Secagem do DEQ/UFSCar, em especial a Prof^a. Dr^a. Ana Maria da Silveira e a Prof^a. Dr^a. Maria do Carmo Ferreira pela amizade e ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Antonio Carlos Luz Lisbôa (FEQ/UNICAMP) e ao Prof. Dr. Luiz Antonio de Almeida Pinto (DQ/FURG) pelos ensinamentos que contribuíram para que eu chegasse até aqui.

Aos meus colegas de laboratório (Marcos, Marcelo, Roger, Rizzi, Luanda, Fabíola, Leonardo, Manoel, Lucas, Rodrigo, Cezar, Cibele, Bruna, Renata e Robson) pelos momentos de descontração, apoio e companheirismo.

Aos técnicos Oscar, Walter, Adilson e Edilson pela amizade e ajuda com a montagem e operação dos equipamentos.

A todos os amigos das diversas áreas de pesquisa do DEQ/UFSCar.

A CAPES e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFSCar pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa e pela oportunidade de realizar o curso de doutorado.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram para que eu chegasse ao final desta caminhada.

Por fim a Deus, por tudo que me concedeu até hoje tanto no âmbito familiar como profissional.

RESUMO

O objetivo desta tese de doutorado foi realizar uma análise do comportamento fluidodinâmico, térmico e de massa da secagem de pastas em leito de jorro em regime transiente, visando obter dados experimentais detalhados do sistema, em resposta à perturbação causada pela presença do meio líquido. Também foi avaliada neste trabalho a aplicação de um modelo *CST* para a estimativa dos perfis de temperatura e umidade das fases gás e sólida.

As pastas utilizadas neste estudo foram água destilada, lodo de esgoto, leite desnatado, ovo de galinha integral homogeneizado e carbonato de cálcio. Para estas pastas foram conduzidos experimentos de secagem em duas configurações de leito de jorro (uma coluna cheia e uma meia coluna) operando com diferentes vazões de alimentação e sob condições de velocidade do ar na entrada de 15 e 30 % acima da velocidade de mínimo jorro e em dois níveis de temperatura, 80 e 100 °C.

No leito de jorro de coluna cheia foram determinadas as variações na velocidade do ar de entrada, queda de pressão do leito, temperatura do ar de entrada, temperatura do leito de partículas em três posições axiais da região anular, temperatura do ar de saída, temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido na saída do ciclone, umidade do pó produzido e umidade do recobrimento formado nas partículas inertes. Já no leito de jorro em meia coluna foram determinadas as variações na velocidade do ar de entrada, queda de pressão do leito, temperatura do ar de entrada, temperatura do ar de saída, temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido na saída do ciclone, velocidade das partículas nas regiões anular, jorro e fonte, forma e dimensão do canal de jorro e altura da fonte.

As informações obtidas no desenvolvimento deste trabalho mostraram que a análise do regime transiente é uma técnica adequada e promissora na obtenção de novas

informações para o entendimento da secagem de pastas em leito de jorro. Dentre os principais resultados obtidos destaca-se que o tempo necessário para o leito de jorro alcançar o regime permanente pode variar expressivamente dependendo da vazão de alimentação de pasta e da condição de jorro aplicada. Na análise fluidodinâmica foi constatado que dependendo do tipo de pasta, concentração e vazão de alimentação o regime de jorro pode sofrer modificações significativas, indicando a instabilidade do sistema. Na avaliação do modelo *CST*, verificou-se que esse apresentou resultados satisfatórios quando comparados aos dados experimentais obtidos. Contudo, a expressão proposta para descrever a taxa de secagem mostrou-se ser fortemente dependente da concentração e densidade da pasta aplicada.

ABSTRACT

The objective of this Doctoral Thesis was to analyse the fluidynamics and the heat and mass transfer of paste drying in a spouted bed under transient operation and to obtain detailed experimental data on the disturbed response of the system due to the presence of the liquid phase. This work also comprises the application of a *CST* model to predict temperature and moisture profiles in both the gas and solid phases.

The paste-like matter employed in the experiments was distilled water, wastewater sludge, skim milk, homogenized whole egg and calcium carbonate. For each one of these pastes, experiments were done in two different spouted bed configurations (full and half column bed) operating with different feed rates, under inlet spout air flow rate at 15 and 30 % above the minimum spouting velocity and temperatures of 80 and 100 °C.

In the full column spouted bed, measurements of inlet air flow rate variations, pressure drop, inlet air temperature, particle bed temperature at three axial positions in the annulus, outlet air temperature, dry and wet bulb temperatures at the cyclone exhaust and moisture content of powder and paste coat of inert particles were done. For the half column spouted bed, measurements of inlet air flow rate variations, pressure drop, inlet and outlet air temperature, dry and wet bulb temperatures at the cyclone exhaust, particles velocities in the annulus, spout and fountain, spout channel shape and dimensions and fountain high were done.

The results obtained showed that the transient operation analysis was adequate and encouraging as a means to obtain further information on the drying process in spouted bed. Among the main results of this work is the important finding that the time required for the spouted bed to reach steady state may largely vary depending on the feed flow rate and spouting characteristics. The fluidynamics analysis showed that spouting characteristics may

significantly change, indicating system instability, depending on the type of paste and the concentration and flow rate of the feed. As far as the *CST* model is concerned, it was seen that experimental data and predicted values were in good agreement, although the drying kinetic equation was highly dependent on paste concentration and density.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iv
ABSTRACT	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE QUADROS	xxvii
ÍNDICE DE TABELAS	xxviii
NOMENCLATURA	xxix
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Secagem de pastas em leito de jorro	4
2.2 Fluidodinâmica de leitos de jorro na presença de pastas	8
2.2.1 Queda de pressão no leito	12
2.2.2 Altura da fonte	13
2.2.3 Vazão do ar de mínimo jorro	14
2.3 Forças interpartículas	15
2.4 Modelos de secagem de pastas em leitos de jorro	18
2.5 Técnicas de medida	20
2.5.1 Temperatura	20
2.5.2 Pressão	21
2.5.3 Umidade da fase fluida	22
2.5.4 Umidade da fase sólida	23
2.5.5 Velocidade da fase fluida	23

2.5.6	Velocidade da fase sólida	24
2.5.7	Porosidade	26
2.5.8	Forma e dimensão do canal de jorro	29
2.5.9	Altura da fonte	31
2.6	Comentários finais sobre a revisão bibliográfica	32
CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS		33
3.1	Equipamentos e periféricos	33
3.2	Partículas inertes	39
3.3	Pastas	40
3.4	Métodos experimentais	42
3.4.1	Caracterização da unidade experimental	42
3.4.2	Procedimento experimental de secagem	44
3.5	Modelagem e simulação	48
CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÕES		52
4.1	Caracterização das partículas inertes e das pastas	52
4.2	Caracterização fluidodinâmica dos leitos de jorro	53
4.3	Análise da evaporação de água no leito de jorro em meia coluna	61
4.4	Análise fluidodinâmica, térmica e de massa da secagem de pastas em leito de jorro	69
4.5	Análise da simulação com o modelo <i>CST</i>	89
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES		98
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS		102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		103
APÊNDICE A: EQUAÇÕES AUXILIARES DO MODELO <i>CST</i>		112
APÊNDICE B: DADOS EXPERIMENTAIS DE UMIDADE RELATIVA		116

	x
APÊNDICE C: DADOS EXPERIMENTAIS DE UMIDADE ABSOLUTA	120
APÊNDICE D: DADOS EXPERIMENTAIS DA TEMPERATURA DO LEITO DE PARTÍCULAS	127
APÊNDICE E: DADOS EXPERIMENTAIS DA QUEDA DE PRESSÃO DO LEITO	145
APÊNDICE F: DADOS EXPERIMENTAIS DA VELOCIDADE DO AR DE ENTRADA DO LEITO	149
APÊNDICE G: UMIDADE DO PÓ E DO RECOBRIMENTO FORMADO	156
APÊNDICE H: MODELO <i>CST</i> DESENVOLVIDO EM MODO MATLAB	160
APÊNDICE I: DADOS DE ENTRADA USADOS NAS SIMULAÇÕES	164

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1-	Diagrama esquemático do leito de jorro (Mathur e Epstein, 1974).	6
Figura 2.2 -	Formas do canal de jorro observadas pelas técnicas da observação direta e piezoelétrica (Mathur e Epstein, 1974).	31
Figura 3.1 -	Diagrama esquemático da unidade experimental de leito de jorro.	33
Figura 3.2 -	Alimentador de duplo fluido.	35
Figura 3.3 -	Amostradores da região anular. (a) Posição axial dos amostradores e (b) Ilustração dos amostradores.	36
Figura 3.4 -	Posição axial dos termopares na região anular do leito de jorro.	37
Figura 3.5 -	Diagrama esquemático da unidade experimental com a meia coluna.	38
Figura 3.6 -	Exemplos de vídeos gerados no leito de jorro em meia coluna. (a) Região anular, (b) Região de jorro e (c) Fonte.	39
Figura 3.7 -	Exemplo de imagem do leito de jorro em meia coluna obtida com o auxílio da câmera fotográfica digital.	39
Figura 3.8 -	Rotina em modo LabVIEW criada para a fluidodinâmica.	43
Figura 3.9 -	Rotina em modo LabVIEW criada para a secagem no leito de jorro de coluna cheia.	46
Figura 3.10 -	Rotina em modo LabVIEW criada para a secagem no leito de jorro em meia coluna.	46
Figura 4.1 -	Queda de pressão no leito de jorro de coluna cheia sem as partículas inertes em função da velocidade do ar de entrada.	53
Figura 4.2 -	Queda de pressão no leito de jorro em meia coluna sem as partículas inertes em função da velocidade do ar de entrada.	54

- Figura 4.3** - Queda de pressão no leito de jorro de coluna cheia em função da velocidade do ar de entrada para as temperaturas de 80 °C e 100 °C. 55
- Figura 4.4** - Queda de pressão no leito de jorro em meia coluna em função da velocidade do ar de entrada para as temperaturas de 80 °C e 100 °C. 55
- Figura 4.5** - Velocidade das partículas na região anular do leito de jorro em meia coluna em função do eixo radial. 57
- Figura 4.6** - Velocidade das partículas na região anular do leito de jorro em meia coluna em função do eixo axial. 57
- Figura 4.7** - Velocidade das partículas nas regiões de jorro e fonte do leito de jorro em meia coluna em função do eixo axial. 58
- Figura 4.8** - Velocidade das partículas na região de jorro do leito de jorro em meia coluna em função do eixo radial. 59
- Figura 4.9** - Raio do canal de jorro do leito de jorro em meia coluna. 60
- Figura 4.10** - Velocidade das partículas na região anular do leito de jorro em meia coluna em função do eixo radial para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 62
- Figura 4.11** - Velocidade das partículas na região anular do leito de jorro em meia coluna em função do eixo axial para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 62
- Figura 4.12** - Velocidade das partículas nas regiões de jorro e fonte do leito de jorro em meia coluna em função do eixo axial para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 63
- Figura 4.13** - Velocidade das partículas na região anular do leito de jorro em meia coluna em função do eixo radial para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 63

- Figura 4.14** - Velocidade das partículas na região anular do leito de jorro em meia coluna em função do eixo axial para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 64
- Figura 4.15** - Velocidade das partículas nas regiões de jorro e fonte do leito de jorro em meia coluna em função do eixo axial para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 64
- Figura 4.16** - Altura da fonte do leito de jorro em meia coluna em função da vazão de alimentação para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 65
- Figura 4.17** - Altura da fonte do leito de jorro em meia coluna em função da vazão de alimentação para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 65
- Figura 4.18** - Fotografias do leito de jorro em meia coluna para os experimentos de evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 66
- Figura 4.19** - Fotografias do leito de jorro em meia coluna para os experimentos de evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 67
- Figura 4.20** - Raio do canal de jorro do leito de jorro em meia coluna para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 68
- Figura 4.21** - Raio do canal de jorro do leito de jorro em meia coluna para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 68
- Figura 4.22** - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 69
- Figura 4.23** - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 70

- Figura 4.24** - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de lodo de esgoto sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 71
- Figura 4.25** - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de leite desnatado sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 72
- Figura 4.26** - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 72
- Figura 4.27** - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de CaCO₃ - C1 sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 73
- Figura 4.28** - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de CaCO₃ - C2 sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 74
- Figura 4.29** - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de CaCO₃ - C3 sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 74
- Figura 4.30** - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de lodo de esgoto sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 75
- Figura 4.31** - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de lodo de esgoto sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 76
- Figura 4.32** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,12 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de CaCO₃ - C2 sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 77
- Figura 4.33** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,20 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de CaCO₃ - C2 sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 77

- Figura 4.34** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,24 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de CaCO_3 - C2 sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$. 78
- Figura 4.35** - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$. 79
- Figura 4.36** - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de lodo de esgoto sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$. 79
- Figura 4.37** - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de leite desnatado sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$. 80
- Figura 4.38** - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$. 80
- Figura 4.39** - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de CaCO_3 - C1 sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$. 83
- Figura 4.40** - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de CaCO_3 - C2 sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$. 83
- Figura 4.41** - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de CaCO_3 - C3 sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$. 84

- Figura 4.42** - Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de lodo de esgoto sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 85
- Figura 4.43** - Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de CaCO₃ - C3 sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 85
- Figura 4.44** - Dados experimentais e simulados de umidade relativa e temperatura do gás de saída para a secagem de ovo homogeneizado sob vazão de alimentação de 20 ml/min e condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 90
- Figura 4.45** - Dados experimentais e simulados de umidade absoluta e umidade do pó produzido para a secagem de ovo homogeneizado sob vazão de alimentação de 20 ml/min e condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 90
- Figura 4.46** - Dados experimentais e simulados de umidade relativa e temperatura do gás de saída para a secagem de ovo homogeneizado sob vazão de alimentação de 40 ml/min e condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 91
- Figura 4.47** - Dados experimentais e simulados de umidade absoluta e umidade do pó produzido para a secagem de ovo homogeneizado sob vazão de alimentação de 40 ml/min e condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 91
- Figura 4.48** - Dados experimentais e simulados de umidade relativa e temperatura do gás de saída para a secagem de ovo homogeneizado sob vazão de alimentação de 60 ml/min e condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 92
- Figura 4.49** - Dados experimentais e simulados de umidade absoluta e umidade do pó produzido para a secagem de ovo homogeneizado sob vazão de alimentação de 60 ml/min e condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 92

- Figura 4.50** - Análise da variação na concentração do ovo homogeneizado para a secagem sob vazão de alimentação de 20 ml/min e condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 95
- Figura 4.51** - Análise da variação na densidade do ovo homogeneizado para a secagem sob vazão de alimentação de 20 ml/min e condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 96
- Figura B1** - Umidade relativa do leito de jorro em meia coluna em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 116
- Figura B2** - Umidade relativa do leito de jorro em meia coluna em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 116
- Figura B3** - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,30 u_{mj} . 117
- Figura B4** - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,15 u_{mj} . 117
- Figura B5** - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de lodo de esgoto sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 118
- Figura B6** - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de leite desnatado sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 118
- Figura B7** - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 119
- Figura C1** - Umidade absoluta do leito de jorro em meia coluna em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 120
- Figura C2** - Umidade absoluta do leito de jorro em meia coluna em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 120

- Figura C3** - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 121
- Figura C4** - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,30 u_{mj} . 121
- Figura C5** - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,15 u_{mj} . 122
- Figura C6** - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 122
- Figura C7** - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de leite desnatado sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 123
- Figura C8** - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de leite desnatado sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 123
- Figura C9** - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 124
- Figura C10** - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 124
- Figura C11** - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de CaCO₃ - *CI* sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 125

- Figura C12** - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de CaCO_3 - C2 sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\ u_{mj}$. 125
- Figura C13** - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de CaCO_3 - C3 sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\ u_{mj}$. 126
- Figura D1** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de $0,12\text{ m}$ do leito de jorro de coluna cheia para a evaporação de água sob condições de $80\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,15\ u_{mj}$. 127
- Figura D2** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de $0,20\text{ m}$ do leito de jorro de coluna cheia para a evaporação de água sob condições de $80\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,15\ u_{mj}$. 127
- Figura D3** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de $0,24\text{ m}$ do leito de jorro de coluna cheia para a evaporação de água sob condições de $80\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,15\ u_{mj}$. 128
- Figura D4** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de $0,12\text{ m}$ do leito de jorro de coluna cheia para a evaporação de água sob condições de $80\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\ u_{mj}$. 128
- Figura D5** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de $0,20\text{ m}$ do leito de jorro de coluna cheia para a evaporação de água sob condições de $80\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\ u_{mj}$. 129
- Figura D6** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de $0,24\text{ m}$ do leito de jorro de coluna cheia para a evaporação de água sob condições de $80\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\ u_{mj}$. 129

- Figura D7** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,12 m do leito de jorro de coluna cheia para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,15 u_{mj} . 130
- Figura D8** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,20 m do leito de jorro de coluna cheia para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,15 u_{mj} . 130
- Figura D9** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,24 m do leito de jorro de coluna cheia para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,15 u_{mj} . 131
- Figura D10** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,12 m do leito de jorro de coluna cheia para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 131
- Figura D11** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,20 m do leito de jorro de coluna cheia para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 132
- Figura D12** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,24 m do leito de jorro de coluna cheia para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 132
- Figura D13** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,12 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de lodo de esgoto sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 133
- Figura D14** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,20 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de lodo de esgoto sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 133

- Figura D15** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,24 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de lodo de esgoto sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 134
- Figura D16** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,12 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de lodo de esgoto sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 134
- Figura D17** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,20 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de lodo de esgoto sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 135
- Figura D18** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,24 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de lodo de esgoto sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 135
- Figura D19** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,12 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de leite desnatado sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 136
- Figura D20** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,20 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de leite desnatado sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 136
- Figura D21** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,24 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de leite desnatado sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 137
- Figura D22** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,12 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de leite desnatado sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 137

- Figura D23** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,20 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de leite desnatado sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 138
- Figura D24** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,24 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de leite desnatado sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 138
- Figura D25** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,12 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 139
- Figura D26** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,20 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 139
- Figura D27** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,24 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 140
- Figura D28** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,12 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 140
- Figura D29** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,20 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 141
- Figura D30** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,24 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 141

- Figura D31** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,12 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de CaCO_3 - C1 sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$. 142
- Figura D32** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,20 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de CaCO_3 - C1 sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$. 142
- Figura D33** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,24 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de CaCO_3 - C1 sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$. 143
- Figura D34** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,12 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de CaCO_3 - C3 sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$. 143
- Figura D35** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,20 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de CaCO_3 - C3 sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$. 144
- Figura D36** - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,24 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de CaCO_3 - C3 sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$. 144
- Figura E1** - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro em meia coluna em função do tempo para a evaporação de água sob condições de $80\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,15\text{ }u_{mj}$. 145
- Figura E2** - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro em meia coluna em função do tempo para a evaporação de água sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$. 145

- Figura E3** - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 146
- Figura E4** - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,30 u_{mj} . 146
- Figura E5** - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,15 u_{mj} . 147
- Figura E6** - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de lodo de esgoto sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 147
- Figura E7** - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de leite desnatado sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 148
- Figura E8** - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 148
- Figura F1** - Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro em meia coluna em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 149
- Figura F2** - Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro em meia coluna em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 149

- Figura F3 -** Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 150
- Figura F4 -** Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,30 u_{mj} . 150
- Figura F5 -** Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,15 u_{mj} . 151
- Figura F6 -** Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 151
- Figura F7 -** Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de lodo de esgoto sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 152
- Figura F8 -** Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de leite desnatado sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 152
- Figura F9 -** Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de leite desnatado sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 153
- Figura F10 -** Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} . 153

- Figura F11** - Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 154
- Figura F12** - Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de CaCO₃ - C1 sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 154
- Figura F13** - Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de CaCO₃ - C2 sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} . 155

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 -	Pesquisas sobre secagem de pastas em leito de jorro.	7
Quadro 2.2 -	Pesquisas sobre fluidodinâmica de leitos de jorro úmidos.	10
Quadro 2.3 -	Modelos de secagem de pastas em leito de jorro.	18
Quadro 2.4 -	Técnicas de medida da velocidade da fase sólida no leito de jorro.	24
Quadro 2.5 -	Técnicas de medida da porosidade no leito de jorro.	27
Quadro 2.6 -	Técnicas de medida da forma e dimensão do canal de jorro.	30
Quadro 3.1 -	Equações de conversão para os transdutores de pressão.	36
Quadro 3.2 -	Planejamento dos experimentos de secagem.	48
Quadro 4.1 -	Dados obtidos nos testes em branco.	54

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 -	Propriedades físicas das pastas.	53
Tabela 4.2 -	Parâmetros fluidodinâmicos obtidos nos leitos de jorro de coluna cheia e em meia coluna.	56
Tabela 4.3 -	Umidade do pó de ovo homogeneizado em função do tempo.	88
Tabela 4.4 -	Umidade do recobrimento de ovo homogeneizado formado nas partículas inertes.	88
Tabela 4.5 -	Dados de entrada usados nas simulações de secagem de ovo homogeneizado.	94
Tabela G1 -	Umidade do pó produzido em função do tempo.	156
Tabela G2 -	Umidade do recobrimento formado nas partículas inertes.	158
Tabela I1 -	Dados de entrada usados nas simulações.	164

NOMENCLATURA

a	Coeficiente de ajuste	$[M T^{-1}]$
A_j	Área lateral do leito de jorro	$[L^2]$
b	Coeficiente de ajuste	$[T^{-1}]$
cp_{ar}	Calor específico do ar	$[L^2 T^{-3} \theta^{-1}]$
cp_g	Calor específico do gás	$[L^2 T^{-3} \theta^{-1}]$
cp_{ge}	Calor específico do gás na entrada do leito de jorro	$[L^2 T^{-3} \theta^{-1}]$
cp_{gs}	Calor específico do gás na saída do leito de jorro	$[L^2 T^{-3} \theta^{-1}]$
cp_j	Calor específico do leito de jorro	$[L^2 T^{-3} \theta^{-1}]$
$cp_{\acute{a}gua}^l$	Calor específico da água líquida	$[L^2 T^{-3} \theta^{-1}]$
cp_p	Calor específico da pasta	$[L^2 T^{-3} \theta^{-1}]$
cp_{pe}	Calor específico da pasta na entrada do leito de jorro	$[L^2 T^{-3} \theta^{-1}]$
cp_{ps}	Calor específico da pasta na saída do leito de jorro	$[L^2 T^{-3} \theta^{-1}]$
cp_s	Calor específico das partículas inertes	$[L^2 T^{-3} \theta^{-1}]$
$cp_{\acute{a}gua}^v$	Calor específico do vapor d' água	$[L^2 T^{-3} \theta^{-1}]$
C	Concentração da pasta	$[-]$
$C1$	Concentração 1	$[-]$
$C2$	Concentração 2	$[-]$
$C3$	Concentração 3	$[-]$
d_c	Diâmetro da coluna de leito de jorro	$[L]$
d_o	Diâmetro de entrada	$[L]$
d_s	Diâmetro de partícula	$[L]$
F_{pe}	Vazão mássica da pasta na entrada do leito de jorro	$[M T^{-1}]$
F_{ps}	Vazão mássica da pasta na saída do leito de jorro	$[M T^{-1}]$

h	Coeficiente transferência de calor por convecção	$[M T^{-3} \theta^{-1}]$
h_c	Altura da coluna cilíndrica	$[L]$
h_f	Altura da fonte	$[L]$
h_{fmj}	Altura da fonte na condição de mínimo jorro	$[L]$
h_i	Altura do cone inferior	$[L]$
h_s	Altura do cone superior	$[L]$
H	Altura manométrica	$[L]$
H^v	Calor latente de vaporização	$[L^2 \theta^{-3}]$
k	Taxa de secagem	$[M T^{-1}]$
L_1	Largura do leito de jorro bidimensional	$[L]$
L_2	Espessura do leito de jorro bidimensional	$[L]$
L_N	Largura da entrada do leito de jorro bidimensional	$[L]$
$m_{\acute{a}gua}$	Massa de água	$[M]$
m_{as}	Massa da amostra seca	$[M]$
m_f	Massa final	$[M]$
m_g	Massa de gás	$[M]$
m_i	Massa inicial	$[M]$
m_j	Massa do leito de jorro	$[M]$
m_s	Massa das partículas inertes	$[M]$
P	Pressão	$[M L^{-1} T^{-2}]$
P_{atm}	Pressão atmosférica	$[M L^{-1} T^{-2}]$
$PM_{\acute{a}gua}$	Peso molecular da água	$[M Mmol^{-1}]$
PM_{ar}	Peso molecular do ar	$[M Mmol^{-1}]$
P_{mj}	Pressão do leito de jorro na condição de jorro mínimo	$[M L^{-1} T^{-2}]$
P_t	Pressão do leito de jorro no tempo	$[M L^{-1} T^{-2}]$

$P_{t=0}$	Pressão do leito de jorro no tempo zero	$[M L^{-1} T^{-2}]$
P_v	Pressão de vapor	$[M L^{-1} T^{-2}]$
P_{v_s}	Pressão de vapor na saturação	$[M L^{-1} T^{-2}]$
q	Calor perdido pelo leito de jorro	$[M L^2 T^{-3}]$
Q	Vazão mássica do ar no leito de jorro	$[M T^{-1}]$
Q_{mj}	Vazão mássica do ar no leito de jorro na condição de mínimo jorro	$[M T^{-1}]$
Q_p	Vazão de alimentação da pasta	$[L^3 T^{-1}]$
r	Raio	$[L]$
r_i	Raio do bocal de entrada do leito de jorro	$[L]$
r_j	Raio do leito de jorro	$[L]$
r_s	Raio do bocal de saída do leito de jorro	$[L]$
S	Grau de saturação	$[-]$
t	Tempo	$[T]$
T	Temperatura	$[\theta]$
T_{amb}	Temperatura ambiente	$[\theta]$
T_A	Temperatura do leito de partículas na região anular do leito de jorro	$[\theta]$
T_{ge}	Temperatura do gás na entrada do leito de jorro	$[\theta]$
$T_{ge,t=0}$	Temperatura do gás na entrada do leito de jorro no tempo zero	$[\theta]$
T_{gs}	Temperatura do gás na saída do leito de jorro	$[\theta]$
$T_{gs,t=0}$	Temperatura do gás na saída do leito de jorro no tempo zero	$[\theta]$
T_{pe}	Temperatura da pasta na entrada do leito de jorro	$[\theta]$
u	Velocidade do ar na entrada do leito de jorro	$[L T^{-1}]$
u_{mj}	Velocidade do ar na entrada do leito de jorro na condição de jorro mínimo	$[L T^{-1}]$

u_t	Velocidade do ar na entrada do leito de jorro no tempo	$[L T^{-1}]$
$u_{t=0}$	Velocidade do ar na entrada do leito de jorro no tempo zero	$[L T^{-1}]$
U	Umidade em base úmida	$[-]$
UA	Umidade absoluta	$[-]$
UA_t	Umidade absoluta no tempo	$[-]$
$UA_{t=0}$	Umidade absoluta no tempo zero	$[-]$
UR	Umidade relativa	$[-]$
UR_t	Umidade relativa no tempo	$[-]$
$UR_{t=0}$	Umidade relativa no tempo zero	$[-]$
v	Velocidade das partículas inertes	$[L T^{-1}]$
V	Tensão elétrica	$[M L^2 T^{-3} I^{-1}]$
V_j	Volume do leito de jorro	$[L^3]$
V_l	Volume de líquido	$[L^3]$
V_s	Volume de partículas inertes	$[L^3]$
V_t	Volume total	$[L^3]$
W_{ge}	Vazão mássica do gás na entrada do leito de jorro	$[M T^{-1}]$
W_{gs}	Vazão mássica do gás na saída do leito de jorro	$[M T^{-1}]$
x_e	Fração mássica de água líquida na entrada do leito de jorro	$[-]$
x_s	Fração mássica de água líquida na saída do leito de jorro	$[-]$
y	Fração mássica do vapor d' água	$[-]$
y_e	Fração mássica do vapor d' água na entrada do leito de jorro	$[-]$
y_s	Fração mássica do vapor d' água na saída do leito de jorro	$[-]$
$y_{s,t=0}$	Fração mássica do vapor d' água na saída do leito de jorro no tempo zero	$[-]$
z	Altura (cm)	$[L]$

Letras gregas

α	Angulação	[-]
Δ	Diferença	[-]
ε	Porosidade	[-]
ρ_{ar}	Densidade do ar	[M L ⁻³]
ρ_b	Densidade <i>bulk</i>	[M L ⁻³]
ρ_s	Densidade das partículas inertes	[M L ⁻³]
ρ_p	Densidade da pasta	[M L ⁻³]
μ	Viscosidade	[M L ⁻¹ T ⁻¹]

Abreviaturas

$\frac{1}{2}CCSB$	Leito de jorro cônico cilíndrico em meia coluna	[-]
$2DSB$	Leito de jorro bidimensional	[-]
$CCSB$	Leito de jorro cônico cilíndrico	[-]
CSB	Leito de jorro cônico	[-]
CST	Mistura perfeita	[-]
$DTSB$	Leito de jorro com tubo interno	[-]
HSB	Leito de jorro com parafuso helicoidal	[-]
JSB	Leito de jorro diluído	[-]
SFB	Leito de jorro fluido-jorrado	[-]

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A secagem de pastas para a produção de materiais pulverizados é uma operação unitária que nas últimas décadas tem se tornado muito importante nas indústrias químicas, farmacêuticas e alimentícias. Na maioria dos casos o processo de secagem deste tipo de material é realizado com o objetivo de aumentar a resistência do produto ao ataque de bactérias e fungos que se proliferam na presença de umidade, facilitar o transporte, a armazenagem e a padronização.

O leito de jorro pode ser uma alternativa bastante atrativa para a secagem de pastas em pequena escala (Passos e Mujumdar, 2000). Esta técnica, quando aplicada em equipamentos em escala de laboratório, possui amplas vantagens, como baixo custo de montagem, operação e manutenção, demanda de espaço físico pequeno e produto final com baixa umidade (3-10 %) na forma de pó.

Desde o início dos trabalhos sobre a viabilidade do processo de secagem de pastas em leito de jorro com partículas inertes, muito tem sido feito para promover um conhecimento científico e tecnológico detalhado deste equipamento. Diversos trabalhos têm mostrado que o leito de jorro com partículas inertes pode secar vários tipos de pastas orgânicas e inorgânicas. Entretanto, as aplicações deste equipamento também demonstram que o conhecimento de sua fluidodinâmica e dos fenômenos de transferência de calor e massa, envolvidos na operação de secagem, é essencial para o domínio do processo. Essa constatação fica marcante quando se analisa os problemas envolvidos no controle de secadores de leito de jorro (Corrêa *et al.*, 2002; Corrêa *et al.*, 2004).

Em virtude disso encontram-se na literatura diversas pesquisas, que têm como objetivo, buscar um conhecimento mais detalhado dos aspectos fluidodinâmicos envolvidos

na operação do leito de jorro, durante o processo de secagem de pastas. Dentre essas, destacam-se os trabalhos de Patel *et al.*(1986), Passos *et al.* (1990), Schneider e Bridgwater (1993), Reyes (1993), Santana *et al.* (1997), Spitzner Neto (1997, 2001), Cunha (1999), Passos e Mujumdar (2000), Spitzner Neto *et al.* (2002), Medeiros *et al.* (2004) e Bachelos *et al.* (2005). Nesses estudos é possível verificar mudanças nas condições fluidodinâmicas do leito decorrentes da presença da pasta. Essas mudanças são bastante pronunciadas principalmente nos parâmetros fluidodinâmicos de queda de pressão, vazão do ar de mínimo jorro, altura da fonte e taxa de circulação das partículas, o que reflete diretamente na estabilidade do leito e na eficiência do processo de secagem.

Contudo, os dados relatados por estes autores, bem como suas conclusões, foram todas adquiridas e discutidas para o período de regime constante da secagem, ou seja, após o sistema estar em regime permanente e estável. Devido a isto, ainda não se tem um conhecimento experimental das modificações que ocorrem nos parâmetros fluidodinâmicos durante o regime transitório, bem como o comportamento ou o perfil de umidade das fases gás e sólida presentes no leito durante esta etapa.

O Centro de Secagem do DEQ/UFSCar, desde sua concepção em 1980, vêm desenvolvendo inúmeros estudos referentes à secagem de pastas em leito de jorro (Ré, 1986; Morris, 1990; Rodrigues, 1993; Oliveira, 1996; Correia, 1996; Spitzner Neto, 1997; Cunha, 1999; Corrêa, 2000; Abarca, 2001; Spitzner Neto, 2001; Fernandes, 2005; Bachelos, 2006). Dessa forma, continuando os estudos do Centro de Secagem, o presente trabalho tem como objetivo analisar experimentalmente o comportamento fluidodinâmico, térmico e de massa da secagem de pastas em leito de jorro em regime transiente, visando obter dados detalhados do sistema em resposta à perturbação causada pela presença da fase líquida. Também é avaliada a aplicação de um modelo *CST* para a estimativa dos perfis de temperatura e umidade das fases gás e sólida.

O caráter das informações apresentadas nesta tese de doutorado contribui para um melhor entendimento da secagem de pastas em leito de jorro, visto que a metodologia de análise desenvolvida permitiu uma caracterização mais aprofundada das variáveis envolvidas durante o processo. É importante ressaltar também que os dados experimentais obtidos poderão ser de utilidade na implementação de novos modelos e estratégias de controle ao secador, pois fornecem informações dinâmicas do sistema em resposta a perturbação causada pela presença da pasta no seu interior.

Além disso, por ser de fácil adaptação, a metodologia experimental proposta para a análise do regime transiente poderá servir de base para o entendimento da secagem de pastas ou de sólidos particulados em outros tipos de secadores de leitos móveis, como: leito fluidizado, leito vibrofluidizado, esteira fluidizada, transportador pneumático, tambor rotativo, entre outros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica deste trabalho foi embasada na continuidade dos trabalhos já realizados no Centro de Secagem do DEQ/UFSCar. Para tal, é apresentada neste capítulo uma síntese das principais pesquisas existentes sobre secagem de pastas em leito de jorro. Nessa são incluídos os estudos que aplicam o leito de jorro para a secagem de um determinado produto, os trabalhos que analisam o comportamento fluidodinâmico do leito de jorro em presença de substâncias líquidas e/ou pastosas e as principais forças interpartículas que atuam no processo. Com respeito à simulação, realizou-se uma sinopse dos principais modelos existentes na literatura com suas respectivas limitações e vantagens. Também foi efetuada uma análise das principais técnicas de medida das variáveis envolvidas no leito de jorro, os quais incluem temperatura, pressão, umidade, velocidade das fases gás e sólida, porosidade, forma e dimensão do canal de jorro e altura da fonte.

2.1 Secagem de pastas em leito de jorro

Nas últimas décadas as pesquisas sobre a secagem de pastas tem merecido um destaque especial tanto em nível mundial como nacional. De acordo com Weltman (1960), pode-se considerar uma pasta como sendo um sistema constituído de partículas microscópicas ou coloidais dispersas em um meio líquido.

A secagem de pastas é realizada com o objetivo de aumentar a resistência do produto ao ataque de bactérias e fungos que se proliferam na presença de umidade, facilitar o transporte, a armazenagem e a padronização. No entanto, as características do processo aplicado para promover a secagem deste tipo de material geralmente devem estar ligadas à preservação das propriedades físicas, químicas e até mesmo nutricionais (no caso de

alimentos) do produto *in natura*, no produto desidratado gerado. Segundo Spitzner Neto (2001), a escolha do equipamento para a secagem de pastas depende tanto das propriedades e quantidade do material quanto das propriedades que se deseja que o produto seco tenha. Devido a isto, são poucas as técnicas de secagem de pastas que possuem as qualidades necessárias para atender aos requisitos do mercado. Uma análise sobre os tipos de equipamentos para a secagem de pastas e os que melhor se adaptam a um determinado tipo de pasta pode ser encontrado em Strumillo *et al.* (1983).

Atualmente a tecnologia mais conhecida e utilizada no mundo para a secagem de pastas é o sistema de *spray-dryer*. Contudo, a construção envolvida neste tipo de equipamento é bastante complexa e tem um custo de investimento inicial muito alto. Além disso, o sistema de *spray-dryer* não pode ser usado para secagem de substâncias muito consistentes (Spitzner Neto, 2001).

Um processo bastante atrativo que pode ser utilizado para substituir o sistema de *spray-dryer*, é a secagem de pastas com o auxílio de partículas inertes. Este processo foi desenvolvido inicialmente pelo Instituto de Tecnologia de Leningrado no final da década de 1960 (Patel *et al.*, 1986). Segundo Kudra e Mujumdar (2002), dependendo do tipo de secador aplicado, as partículas inertes podem vibrar, fluidizar ou jorrar. Esta tecnologia, além de apresentar custos bastante favoráveis frente ao *spray-dryer*, pode ser usada em qualquer tipo de pasta, desde que seja aplicada com partículas inertes apropriadas.

O leito de jorro, desde a sua criação em 1955, tem sido aplicado para uma ampla variedade de processos industriais que vão desde a secagem até o recobrimento de partículas, mistura de sólidos, limpeza de gases, granulação, gaseificação, combustão e pirólise (Mathur e Epstein, 1974; Freitas e Freire, 2001). Segundo Mathur e Epstein (1974), isto se deve ao fato deste sistema promover, através de movimentos cíclicos, um efetivo contato entre o fluido e o sólido caracterizado por três regiões distintas que são denominadas

de núcleo central (região de jorro), ânulo periférico (região anular) e zona acima do ânulo periférico (fonte), conforme Figura 2.1.

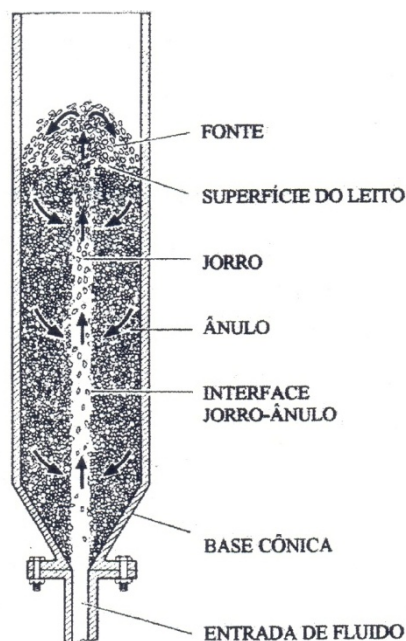


Figura 2.1 - Diagrama esquemático do leito de jorro (Mathur e Epstein, 1974).

Na secagem de pastas o leito de jorro também tem se mostrado bastante atraente e adequado a partir da utilização do leito de partículas inertes, onde inúmeros trabalhos têm testado este sistema para a secagem de uma ampla variedade de pastas orgânicas e inorgânicas.

No Quadro 2.1 é apresentada uma lista dos trabalhos existentes na literatura sobre a secagem de pastas em leitos de jorro com as respectivas pastas testadas e tipos de leitos aplicados.

Quadro 2.1 - Pesquisas sobre secagem de pastas em leite de jorro.

Referências	Pastas secas	Tipos de leite
Schneider e Bridgwater (1989) Schneider e Bridgwater (1993)	Alumina	CCSB
Markowski (1993)	Antibióticos	JSB
Kudra <i>et al.</i> (1989)	Carbonato de cálcio	HSB
Zorana <i>et al.</i> (2004)	Carbonato de cálcio	DTSB
Szentmarjay e Pallai (1989)	Carbonato de cobalto	HSB
Szentmarjay e Pallai (1989)	Carbonato de zinco	HSB
Oliveira (2006)	Cianobactéria (<i>Spirulina platensis</i>)	CCSB
Schneider e Bridgwater (1989)	Cloreto de sódio	CCSB
Kudra <i>et al.</i> (1989)	Dióxido de zinco	HSB
Barrett e Fane (1989)	Efluente de fábrica de goma	CCSB
Cordeiro e Oliveira (2005)	Extrato de folhas	JSB
Tia <i>et al.</i> (1995)	Farinha de arroz	JSB
Marreto <i>et al.</i> (2006)	Fármacos	CSB
Zorana <i>et al.</i> (2004)	Fungicida	DTSB
Cunha (1999) Spitzner Neto <i>et al.</i> (2002)	Goma xantana	CSB
Cunha <i>et al.</i> (2000)	Goma xantana	SFB
Reyes (1993)	Hidróxido de alumínio	CSB
Barrett e Fane (1989)	Leite desnatado	CCSB
Morris, 1990 e Rodrigues (1993)	Levedura	CSB
Rocha <i>et al.</i> (2004)	Levedura	CCSB
Passos <i>et al.</i> (2004) Costa Jr. <i>et al.</i> (2006)	Licor negro	CSB
Cunha (1999) Spitzner Neto (2001) Abarca (2001) Spitzner Neto <i>et al.</i> (2002) Bacelos <i>et al.</i> (2005)	Ovo homogeneizado	CSB
Kudra <i>et al.</i> (1989)	Óxido de zinco	HSB
Shuhama <i>et al.</i> (2003)	Pigmento	CCSB
Markowski (1992)	Plasma de sangue animal	JSB
Kudra <i>et al.</i> (1989)	Plasma de sangue animal,	HSB
Medeiros <i>et al.</i> (2002) Medeiros <i>et al.</i> (2004)	Polpa de fruta	CCSB
Marmo (2007)	Polpa de fruta	SFB
Pham (1983) Ré (1986) Ré e Freire (1989) Oliveira (1996) Spitzner Neto (1997) Spitzner Neto <i>et al.</i> (2002)	Sangue animal	CSB
Correia (1996)	Pasta residual de soja	CSB

O processo consiste em inserir a pasta dentro do leito de jorro para provocar o recobrimento das partículas inertes sob forma de um filme. As partículas recobertas e úmidas, então, são secas diretamente pela corrente de ar quente ou indiretamente pelo contato com as partículas inertes aquecidas até que o conteúdo de umidade atinja um valor crítico. Nesta etapa a pasta seca na superfície da partícula inerte torna-se frágil e quebradiça, o que ocasiona a ruptura e liberação do filme de recobrimento seco através do atrito provocado no leito pelas colisões partícula-partícula e partícula-parede. O produto formado neste processo geralmente é composto por um pó fino com diâmetro médio inferior a $1,0 \times 10^{-4}$ m (Strumillo *et al.*, 1983) sob forma de flocos irregulares (Markowski, 1992; Pham, 1983).

Diferentemente da secagem de sólidos granulares, a secagem de pastas em leitos de jorro ocorre somente a uma taxa constante, isto é, a evaporação é a etapa limitante do processo, uma vez que as pastas que são alimentadas normalmente possuem uma alta umidade e é esperado que o filme formado seja fino bastante para minimizar a etapa da difusão (Spitzner Neto, 2001).

Quanto à viabilidade desta técnica no uso industrial, Epstein e Grace (1997) comentaram que apesar do leito de jorro apresentar custos de capital e de operação bastante favoráveis em relação a outros secadores de pastas, seu uso ainda é muito difícil devido aos problemas de ampliação de escala. Passos *et al.* (1997) também ressaltaram que apesar do leito de jorro ser uma técnica promissora para a secagem de qualquer tipo de pasta, seu uso ainda é muito restrito, visto que esta técnica apresenta diversos problemas operacionais difíceis de serem monitorados e controlados, tais como: instabilidade do jorro, aglomeração de partículas e depósito de pó no interior da coluna.

2.2 Fluidodinâmica de leitos de jorro na presença de pastas

Um dos maiores problemas encontrados na operação e monitoramento de

secadores de leite de jorro, durante a secagem de pastas, se deve a este equipamento apresentar uma complexidade fluidodinâmica muito ampla e de difícil análise. Até o início dos anos 80 a maioria dos pesquisadores postulava que a presença de uma solução líquida ou pastosa não influenciava a fluidodinâmica do leite de jorro. No entanto, Pham (1983) ao efetuar um estudo sobre o comportamento de um secador de leite de jorro cônico para a secagem de sangue animal verificou que essa suposição não era verdadeira. Observou que em determinadas condições experimentais, a inserção da pasta no sistema provocava a existência de regiões estagnadas no leite e dificuldades de movimentação das partículas na região anular.

A partir do estudo realizado por Pham (1983), diversas pesquisas foram desenvolvidas com o objetivo de buscar um conhecimento mais detalhado dos aspectos fluidodinâmicos envolvidos na secagem de pastas em leite de jorro. Dentre estes trabalhos tem-se:

- a análise da influência da fase líquida na fluidodinâmica de leitos de jorro com partículas inertes em experimentos com alimentação em batelada e em experimentos com alimentação contínua, e
- a utilização de modelos físicos e empíricos na análise das forças coesivas existentes entre as partículas inertes durante o processo de secagem de pastas em leite de jorro.

Nos estudos experimentais realizados com alimentação em batelada, os pesquisadores além de utilizarem alguns tipos de substâncias pastosas comumente encontradas em indústrias químicas e alimentícias, também efetuaram análises a partir de substâncias modelo que simulam a presença da pasta no leite, como: água destilada e glicerol.

No Quadro 2.2 são apresentados os trabalhos que estudaram a fluidodinâmica de leitos de jorro úmidos juntamente com os tipos de leitos, partículas inertes, forma de alimentação e variáveis analisadas.

Quadro 2.2 - Pesquisas sobre fluidodinâmica de leitos de jorro úmidos.

Referências	Tipos de leitos	Partículas	Pastas	Alimentação	Variáveis analisadas
Patel <i>et al.</i> (1986)	CCSB $d_c=0,15$ m $d_0=0,02$ m $\alpha=60^\circ$	Esferas de vidro ($d_s=5$ mm, $\rho_s=2836$ kg/m ³) Esferas de resina acrílica ($d_s=5$ mm, $\rho_s=1137$ kg/m ³) Cilindros de PVC ($d_s=4,1$ mm, $\rho_s=1303$ kg/m ³) Partículas de forma irregular ($d_s=4,6$ mm, $\rho_s=935$ kg/m ³)	Glicerol Água destilada	Batelada	$\Delta P=f(V_l)$ $h_f=f(u)$ $u=f(V_s, T)$
Passos <i>et al.</i> (1990)	2DSB $L_I=0,2$ m $L_2=0,015$ m $L_N=0,015$ m	Esferas de vidro ($d_s=3$ mm, $\rho_s=2521$ kg/m ³)	Glicerol	Batelada	$\Delta P/\Delta P_{mj}=f(V_l/V_s)$ $u/u_{mj}=f(V_l/V_s)$
Schneider e Bridgwater (1993)	CCSB $d_c=0,15$ m $d_0=0,02$ m $\alpha=65^\circ$	Esferas de vidro ($d_s=5$ mm, $\rho_s=2840$ kg/m ³) Esferas de vidro ($d_s=2$ mm, $\rho_s=2880$ kg/m ³) Cilindros de PVC ($d_s=4,3$ mm, $\rho_s=1320$ kg/m ³) Esferas de resina acrílica ($d_s=5$ mm, $\rho_s=1140$ kg/m ³)	Glicerol Água destilada	Batelada	$\Delta P/\Delta P_{mj}=f(V_l/V_s, \mu)$ $h_f=f(V_l/V_s, t)$ $u/u_{mj}=f(V_l/V_s)$ $u=f(t)$
Reyes (1993)	CSB $d_c=0,60$ m $d_0=0,053$ m $\alpha=60^\circ$	Poliétileno ($d_s=2,96$ mm, $\rho_s=960$ kg/m ³)	Hidróxido de alumínio Água destilada	Contínua	$\Delta P_{mj}=f(Q_p, C)$ $Q_{mj}=f(Q_p, C)$

Quadro 2.2 - Continuação.

Referências	Tipos de leitos	Partículas	Pastas	Alimentação	Variáveis analisadas
Santana <i>et al.</i> (1997)	$\frac{1}{2}CCSB$ $d_c = 0,6$ m $d_0 = 0,05$ m	Polipropileno ($d_s = 4,12$ mm, $\rho_s = 1082$ kg/m ³)	Glicerol	Batelada	$\Delta P / \Delta P_{mj} = f(V_l / V_s)$ $u / u_{mj} = f(V_l / V_s)$
Spitzner Neto (1997)	CSB $d_c = 0,30$ m $d_0 = 0,05$ m $\alpha = 60^\circ$	Esferas de vidro ($d_s = 2,8$ mm, $\rho_s = 2500$ kg/m ³)	Sangue bovino Água destilada	Contínua	$\Delta P / \Delta P_{mj} = f(Q_p)$ $Q / Q_{mj} = f(Q_p)$
Cunha (1999) Spitzner Neto <i>et al.</i> (2002)	CSB $d_c = 0,30$ m $d_0 = 0,05$ m $\alpha = 60^\circ$	Esferas de vidro ($d_s = 2,6$ mm, $\rho_s = 2500$ kg/m ³)	Ovo homogeneizado Água destilada Goma xantana	Contínua	$\Delta P / \Delta P_{mj} = f(Q_p)$ $Q / Q_{mj} = f(Q_p)$
Passos e Mujumdar (2000)	2DSB $L_I = 0,2$ m $L_2 = 0,015$ m $L_N = 0,015$ m	Pellets de plástico ($d_s = 3,13$ mm, $\rho_s = 1217$ kg/m ³)	Glicerol	Batelada	$\Delta P / \Delta P_{mj} = f(V_l / V_s)$ $u / u_{mj} = f(V_l / V_s)$
Spitzner Neto (2001) Bacelos <i>et al.</i> (2005)	CSB $d_c = 0,30$ m $d_0 = 0,05$ m $\alpha = 60^\circ$	Esferas de vidro ($d_s = 2,6$ mm, $\rho_s = 2490$ kg/m ³)	Glicerol Ovo homogeneizado	Batelada e contínua	$\Delta P / \Delta P_{mj} = f(S)$ $u / u_{mj} = f(S)$ $h_j = f(u / u_{mj}, S)$
Medeiros <i>et al.</i> (2004)	CCSB $d_c = 0,13$ m $d_0 = 0,03$ m $\alpha = 60^\circ$	Polietileno ($d_s = 3,9$ mm, $\rho_s = 950$ kg/m ³)	Polpa de manga <i>in natura</i> e modificada	Batelada	$\Delta P / \Delta P_{mj} = f(t)$ $h_j / h_{fmj} = f(t)$ $u / u_{mj} = f(t)$

Da análise dos trabalhos apresentados no Quadro 2.2 obtêm-se informações sobre a queda de pressão no leito, altura da fonte e vazão do ar de mínimo jorro.

2.2.1 Queda de pressão no leito

A queda de pressão no leito, com exceção aos dados apresentados por Reyes (1993), diminui na presença de pastas ou soluções modelo tanto para alimentação contínua como batelada. Patel *et al.* (1986) e Schneider e Bridgwater (1993) explicaram que isto ocorre devido a vazão de ar na região anular ser reduzida à medida que uma substância pastosa ou líquida é adicionada no leito. Por conseqüência ocorre uma canalização do ar para a região de jorro, reduzindo a queda de pressão global. Esses autores também ressaltam, que outro fator que contribui para isto é que a presença da pasta ou do líquido no leito aumenta as forças de interação entre as partículas. Devido a isto, uma menor quantidade de partículas saem da região anular para a região de jorro, diminuindo assim o movimento global na região anular.

Apesar desta concordância qualitativa entre resultados obtidos pelos autores citados no Quadro 2.2, uma análise mais aprofundada dos trabalhos de Passos *et al.* (1990), Santana *et al.* (1997) e Passos e Mujumdar (2000), onde o glicerol foi usado para simular a presença da pasta no leito, demonstra que o comportamento da curva de queda de pressão obtido por esses autores foi um pouco diferenciado do encontrado pelos demais pesquisadores. Passos *et al.* (1990), Santana *et al.* (1997) e Passos e Mujumdar (2000) verificaram que a queda de pressão do leito teve um aumento inicial antes de começar a diminuir.

Para explicar este fato, Santana *et al.* (1997) postularam a hipótese de que pode haver dois tipos de forças de interação interpartículas agindo em leitos de jorro úmidos. A primeira se refere a baixos conteúdos de líquidos onde a camada de recobrimento é muito fina. Neste caso, segundo Santana *et al.* (1997), as pontes líquidas são muito fracas, e estas

atuam como lubrificante, o que facilita o deslocamento das partículas da região anular para a região de jorro, aumentando assim a queda de pressão. A segunda força de interação ocorre quando o conteúdo de líquido é aumentado acima de um valor limite, aonde a camada de recobrimento na superfície da partícula torna-se espessa o suficiente para promover pontes líquidas mais fortes. De acordo com Santana *et al.*(1997), este fato provoca uma redução tanto na porosidade da região anular como na taxa de circulação das partículas, ocasionando uma diminuição na queda de pressão.

Spitzner Neto (2001) e Bachelos *et al.* (2005) também observaram este comportamento diferenciado da queda de pressão do leite quando o glicerol foi alimentado em batelada. Contudo, segundo estes autores, a pequena elevação inicial da queda de pressão pode estar ligada a erros experimentais e de medidas. Sendo assim, eles admitiram que a queda de pressão no leite é constante e igual a do leite sem a presença da pasta quando o conteúdo de líquido é pequeno.

2.2.2 Altura da fonte

Nos trabalhos que objetivaram medir as modificações da altura da fonte, foi constatado que ela sofre um aumento quando a vazão do gás é aumentada, tanto para o leite seco como para o leite úmido. No entanto, é relatado que para o leite seco é possível manter um jorro estável em baixas alturas da fonte, o que não acontece no leite úmido. Patel *et al.*(1986) e Schneider e Bridgwater (1993) explicaram que este comportamento é causado devido à elevação das forças interpartículas no leite em presença das pastas. Segundo estes autores, quanto maior é o volume de líquido presente no leite maior deve ser a vazão do ar para manter o jorro estável, aumentando assim a altura da fonte.

2.2.3 Vazão do ar de mínimo jorro

Na análise dos trabalhos citados no Quadro 2.2 observou-se que os autores que utilizaram bateladas de glicerol para simular a presença da pasta no leite apresentam algumas contradições com respeito à vazão do ar de mínimo jorro. Schneider e Bridgwater (1993) notaram que este parâmetro inicialmente aumenta com o aumento do conteúdo de glicerol no leite até atingir um máximo, e a partir daí passa a diminuir. Patel *et al.* (1986), Spitzner Neto (2001) e Bachelos *et al.* (2005) verificaram que esta variável somente diminui com o aumento do conteúdo de glicerol. Enquanto Passos *et al.* (1990), Santana *et al.* (1997) e Passos e Mujumdar (2000) observaram que a vazão do ar de mínimo jorro aumenta com o conteúdo de líquido.

Segundo Patel *et al.* (1986) a redução na vazão do ar de mínimo jorro ocorre devido ao líquido presente no leite tornar as condições jorro-ânulo mais rígidas. Devido a isto, uma maior proporção do ar é direcionada para a região de jorro, necessitando uma menor vazão de ar para sustentá-lo. Já Passos e Mujumdar (2000) não relatam nenhuma explicação física para o fato de seus dados divergirem dos relatados pelos demais pesquisadores. Entretanto, Passos *et al.* (1990), Santana *et al.* (1997) e Passos e Mujumdar (2000) trabalharam com leitos de jorro com geometrias diferentes, a bidimensional e a cônica cilíndrica em meia coluna. Esse fato pode evidenciar que o glicerol afeta a fluidodinâmica dessas geometrias de modo diferente, quando comparado com os leitos cônicos e cônicos cilíndricos de coluna cheia.

Quanto à vazão do ar de mínimo jorro obtida nos trabalhos que utilizaram as pastas reais, foi observado que esse parâmetro aumenta à medida que o conteúdo de pasta aumenta, tanto na alimentação em batelada como contínua. Esse comportamento é o oposto ao obtido nos trabalhos que usaram glicerol, alimentando-o em batelada em leitos de geometria cônica e cônica cilíndrica de coluna cheia. Segundo Bachelos *et al.* (2005), esta diferença entre

o comportamento da vazão do ar de mínimo jorro observado para o glicerol e para a pasta real pode ser explicada devido ao glicerol formar pontes líquidas, enquanto a pasta real promove pontes “quase sólidas” com o leito de partículas inertes. Esta explicação foi fundamentada através de uma análise dos dados experimentais de Spitzner Neto (2001) e Spitzner Neto *et al.* (2002), onde esses autores verificaram que as partículas inertes recobertas durante a secagem possuíam uma umidade muito próxima a do pó coletado na saída do sistema, indicando que o filme de recobrimento das pastas reais era formado por partículas de pó e não por um filme líquido.

2.3 Forças interpartículas

O conhecimento das forças interpartículas que atuam no leito de jorro é de fundamental importância para o entendimento da sua fluidodinâmica. Spitzner Neto (2001) efetuou uma revisão bibliográfica bastante aprofunda sobre este tema, e, concluiu que dependendo da forma como as partículas inertes e a pasta interagem, o sistema particulado pode permanecer ligado pela ação de forças de coesão/adesão ou viscosas. Dentre essas forças, as de coesão/adesão são as de maior relevância para a análise da secagem de pastas em leito de jorro.

A coesão é definida como a força de atração existente entre os componentes de um leito de partículas com outro. Já a adesão é definida como sendo a força de atração entre as partículas do meio e a parede do vaso onde essas estão contidas. Ambas são função do tipo de partícula e da natureza do processo de interação.

Baseado na natureza da interação, Rumpf (1962) classificou as forças de coesão/adesão em intermoleculares, eletrostáticas, devido à presença da fase líquida e das pontes sólidas.

Nas forças intermoleculares destaca-se a força de Van der Waals, que é

resultante da interação entre momentos dipolos de átomos e moléculas. A força de Van der Waals atua somente em pequenas distâncias (inferiores a 5×10^{-8} m) e em partículas muito finas. Segundo Schubert (1981) qualquer irregularidade existente na superfície da partícula contribui para a diminuição da força de Van der Waals.

As forças eletrostáticas baseiam-se na atração de partículas com cargas opostas. Este fenômeno é bastante comum em leitos particulados móveis devido ao atrito que ocorre entre partícula-partícula e partícula-parede. Entretanto, Schubert (1981) relata que as forças eletrostáticas são muito fracas quando comparadas às outras e atuam somente na orientação e contato dos sólidos.

As forças devido à presença da fase líquida são as mais relevantes na análise da secagem de pastas em leito de jorro, visto que a presença de uma fase líquida tende a aumentar significativamente a coesão das partículas. Dependendo da quantidade de líquido, que é adicionado no leito, pode-se formar um filme em torno das partículas e esse filme pode tanto diminuir as imperfeições e a distância entre as partículas como também aumentar a superfície de contato. Devido a isso, as forças intermoleculares e eletrostáticas atuam de modo mais efetivo (Sherrington e Oliver, 1981; Schubert, 1981).

Rumpf e Schubert (1974), Capes (1980) e Pietsch (1997) propuseram uma classificação para o estado de saturação de meios particulados que depende exclusivamente da quantidade de líquido presente. Essa classificação consiste nos estados pendular, funicular, capilar e além do capilar.

O estado pendular ocorre quando há uma pequena quantidade de líquido no meio e as partículas ficam ligadas por pontes líquidas isoladas nos pontos de contato. O estado funicular acontece na transição dos estados pendular e capilar. Nesse caso a quantidade de líquido ocupa algumas regiões do sistema. No estado capilar a quantidade de líquido preenche os espaços interpartículas, e as partículas ficam aderidas pela sucção capilar nas

interfaces líquido-ar na superfície. Já no estado além do capilar a quantidade de líquido envolve totalmente as partículas e essas ficam presas somente pela tensão interfacial na superfície convexa do líquido.

Uma forma de avaliar as forças causadas devido à presença da fase líquida no leito de jorro é representar os resultados em termos do grau de saturação. Essa variável, proposta por Schubert (1977), expressa o volume de líquido presente no leito em relação ao volume de partículas inertes, de acordo com a seguinte equação:

$$S = \pi \frac{(1 - \varepsilon) V_l}{\varepsilon V_s} \quad (2.1)$$

onde S é o grau de saturação, ε é a porosidade, V_l é o volume de líquido e V_s é o volume de partículas inertes.

Nos trabalhos de Spitzner Neto (2001) e Bacelos *et. al.* (2005), os adimensionais de queda de pressão do leito e velocidade do ar de entrada foram analisados em função do grau de saturação. De acordo com esses autores, a análise do grau de saturação pode fornecer informações valiosas sobre o comportamento fluidodinâmico do leito. Entretanto, segundo eles, são necessários mais estudos para que seja apresentada uma conclusão mais fundamentada sobre este tipo de análise.

As pontes sólidas são, dentre as forças de coesão/adesão, as mais fortes. Este tipo de força pode ser causada pelos mecanismos de sinterização, reação química, fusão de partículas, recristalização e evaporação (Capes, 1980; Sherrington e Oliver, 1981; Schubert, 1981). Na secagem de pastas em leito de jorro a evaporação é o mecanismo predominante.

O mecanismo da evaporação ocorre quando há um líquido com sólidos dissolvidos presente no sistema. Inicialmente só há a formação de pontes líquidas. Com a

evaporação do líquido as pontes sólidas irão se concentrar cada vez mais, até a formação de cristais com pontes sólidas entre as partículas, o que pode ocasionar a sinterização do leito.

2.4 Modelos de secagem de pastas em leitos de jorro

Com o advento das técnicas computacionais, estudos de modelagem e simulação de leitos de jorro têm-se tornado cada vez mais frequentes. Este tipo de análise é de fundamental importância, visto que através dele é possível prever o comportamento do processo e assim contribuir para um projeto mais eficiente. Além disso, a possibilidade de comparar dados experimentais com dados de simulações tem ajudado os pesquisadores a compreender melhor os fenômenos de transferência envolvidos na operação do leito de jorro.

Na secagem de pastas em leito de jorro, vários modelos já foram propostos visando descrever o comportamento do processo. No Quadro 2.3 são apresentados alguns desses modelos juntamente com as suas características e respectivas limitações.

Quadro 2.3 - Modelos de secagem de pastas em leito de jorro.

Modelo	Característica do modelo	Limitações do modelo
Pham (1983)	Balanço de entalpia para o gás e partículas.	Apenas a região anular é responsável pela secagem. A presença da pasta não afeta a dinâmica do leito. As perdas térmicas são desprezíveis.
Barrett e Fane (1989)	Modelo qualitativo.	A presença da pasta não afeta a dinâmica do leito. Tratamento matemático muito complexo
Reyes e Massarani (1991)	Modelo de equilíbrio termodinâmico.	Válido para materiais com elevada umidade. As fases existentes encontram-se em equilíbrio térmico. A secagem ocorre preferencialmente na região anular. O gás que passa pela região de jorro não realiza troca de massa nem de energia.

Quadro 2.3 - Continuação.

Modelo	Característica do modelo	Limitações do modelo
Markowski (1992)	Balanço global de massa e pontual no eixo radial para a energia.	Admite que o leite seja um tanque perfeitamente agitado. Partículas esféricas com taxa de evaporação constante na superfície.
Reyes (1993)	Modelo a duas regiões composto de balanços de massa e energia para o jorro e ânulo.	A transferência de energia desde a região de jorro até a região anular é desprezível. As partículas reingressam no jorro na parte inferior do leite. Na região anular, as partículas e o gás estão em equilíbrio térmico. Necessidade do conhecimento de pelo menos uma variável de saída.
Oliveira (1995)	Balanços de massa e energia e equações para da dinâmica do leite em n segmentos cilíndricos em série.	A evaporação da água ocorre na região anular. A presença da pasta não afeta a dinâmica do leite. As partículas inertes, ao atingirem o jorro, encontram-se livres do filme de recobrimento. O ar de jorro tem sua umidade constante e igual a da entrada. A troca de calor convectivo entre o ar e os inertes ocorre no ânulo.
Oliveira (1996)	Modelo a três regiões composto de balanços de massa e energia para o jorro, fonte e ânulo.	A presença da pasta não afeta a dinâmica do leite.
Abarca (2001) Fernandes (2005)	Balanço global de massa e energia.	Admite que o leite seja um tanque perfeitamente agitado.

Com exceção dos modelos desenvolvidos por Abarca (2001) e Fernandes (2005), todos os modelos citados no Quadro 2.3 estão apresentados e bem discutidos nos trabalhos de Rodrigues (1993), Oliveira (1996), Spitzner Neto (1997) e Cunha (1999).

Spitzner Neto (1997), em seu estudo, também fez uma análise dos modelos apresentados no Quadro 2.3, concluindo que os modelos de Barrett e Fane (1989) e Oliveira (1996) são os que melhor descrevem fisicamente o processo, mesmo supondo que a introdução da pasta não afeta a fluidodinâmica do leite. Segundo este autor, os demais

modelos não apresentaram bons resultados devido às suposições de que a secagem da pasta ocorre somente em uma ou duas regiões do leito e que a introdução da pasta não afeta a fluidodinâmica do sistema. Posteriormente, Cunha (1999) na tentativa de buscar um conhecimento mais detalhado da influência da presença da pasta nos resultados obtidos por estes modelos, concluiu que não se pode desprezar tanto a existência da pasta no leito como as suas características físicas, principalmente a viscosidade e a tensão superficial.

2.5 Técnicas de medida

Na literatura encontram-se diversas técnicas de medida para as variáveis envolvidas na operação de leitos de jorro. A análise destas técnicas evidencia a preocupação dos pesquisadores em efetuar medidas experimentais confiáveis para que a física do processo seja entendida e os modelos propostos sejam validados. A seguir, são apresentadas as principais técnicas de medida temperatura, pressão, umidade da fase fluida, umidade da fase sólida, velocidade da fase fluida, velocidade da fase sólida, porosidade, forma e dimensão do canal de jorro e altura da fonte, aplicadas ao leito de jorro com suas respectivas limitações e vantagens.

2.5.1 Temperatura

As medidas de temperatura têm sido realizadas no leito de jorro através de termômetros ou termopares. Na atualidade os mais indicados são os termopares, pois consistem em dispositivos de medição de temperatura com alto grau de precisão e com possibilidade de registrar automaticamente a temperatura através de um sistema de aquisição de dados (Pagliuso, 1994).

Narimatsu (2004) realizou uma revisão sobre os termopares mais utilizados para a determinação da temperatura em sistemas gás-sólido e encontrou medidores do tipo:

sem proteção, com proteção, com blindagem na extremidade e protegido com sonda de sucção.

O termopar sem proteção consiste em um termopar simples que é introduzido no leite. Dependendo da aplicação, a medida deste sensor deve ser feita com muito cuidado devido a este poder refletir tanto a temperatura do gás como a da mistura gás-sólido.

O termopar protegido com tela é bastante utilizado pelos pesquisadores para a determinação da temperatura da fase gasosa ou do gás. Esse consiste em um termopar simples inserido dentro de um tubo com tela na extremidade, permitindo assim a passagem do ar sem o contato das partículas.

Com respeito ao termopar com blindagem na extremidade, Narimatsu (2004) verificou que esse é normalmente utilizado para minimizar erros devido à radiação (temperatura acima de 300 °C). Esta blindagem, geralmente feita em ouro ou prata, consiste em uma pequena camada de metal que cobre a junção do termopar.

Já o termopar protegido com sonda de sucção consiste em um termopar simples que é inserido numa sonda, que por sua vez é introduzida no leite. Esta técnica também evita o contato do sensor com a fase sólida, porém requer um cuidado para que a velocidade de sucção seja igual à do escoamento.

2.5.2 Pressão

As medidas de pressão em leitos de jorro normalmente são obtidas através de manômetros de tubo em “U” e/ou inclinados tendo como fluido manométrico a água ou o mercúrio. Entretanto, com o advento das tecnologias de aquisição de dados os manômetros de fluido manométrico estão caindo em desuso e dando lugar aos sensores capacitivos, comumente denominados de transdutores de pressão.

Os transdutores de pressão funcionam medindo a capacitância em função da

distância existente entre placas móveis de um capacitor, onde essa distância varia de acordo com a diferença de pressão. Dessa maneira o sinal de pressão pode ser transformado em um sinal elétrico (corrente ou voltagem), que por sua vez é convertido em pressão manométrica em um sistema de aquisição de dados. A grande vantagem da utilização destes sensores é a possibilidade de obtenção de dados com uma alta frequência de aquisição, onde os desvios padrão das medidas em tempos pré-determinados podem ser obtidos.

2.5.3 Umidade da fase fluida

As técnicas mais usadas para medir a umidade da fase fluida são a psicrometria e a higroscopia. A psicrometria consiste na obtenção de temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar. Essas então devem ser inseridas em cartas psicrométricas para a obtenção dos dados. Já a higroscopia é realizada pela passagem do ar por substâncias higroscópicas sólidas ou líquidas.

Por ser mais simples, a psicrometria é a mais utilizada para medir a umidade do ar na secagem de pastas em leitos de jorro. Contudo, segundo Novais (1990), a precisão e a sensibilidade desta técnica devem estar vinculadas a algumas normas para que as medidas sejam confiáveis, tais como:

- o uso de sensores de temperatura com precisão de $\pm 0,05$ °C;
- mecha de pano para confecção do bulbo úmido;
- para um fluxo de ar contínuo e unidirecional o sensor de bulbo seco deve estar à frente do de bulbo úmido;
- a velocidade mínima do ar deve ser de 3,5 m/s;
- a temperatura da água de alimentação para o bulbo úmido deve estar próxima da temperatura de bulbo úmido do ar, e
- a distância entre o bulbo seco e bulbo úmido deve ser tal que não haja gradiente de

temperatura entre ambos.

2.5.4 Umidade da fase sólida

A determinação do teor de umidade da fase sólida pode ser feita através dos métodos diretos ou indiretos (Sartori, 1990). Na secagem de pastas em leito de jorro os mais utilizados são os diretos. Isto ocorre devido a sua simplicidade, que consiste na retirada da água contida no material através de vaporização por aquecimento da amostra sob condições controladas. Neste método a quantidade de água é avaliada através da variação de massa da amostra, do volume de água evaporada ou por processos químicos. Para tal são utilizados os métodos da estufa, da destilação e os métodos químicos (Instituto Adolfo Lutz, 1976).

2.5.5 Velocidade da fase fluida

A velocidade da fase fluida na entrada de leitos de jorro foi determinada pela grande maioria dos pesquisadores citados no Quadro 2.1 através de medidores do tipo Venturi ou placas de orifício. Para as medidas de velocidade da fase fluida nesses medidores é necessária também a utilização de sensores de pressão. Então, com o auxílio de curvas de calibração (queda de pressão em função da velocidade do fluido) e de informações das dimensões da tubulação os dados são obtidos.

Para a determinação da velocidade local da fase fluida é verificado na literatura que a técnica mais utilizada é a inserção de tubos de Pitot no interior do leito. A aplicação desta técnica encontra-se bem discutida no trabalho de Freitas (1996). Entretanto, na secagem de pastas em leito de jorro o uso deste tipo de medidor é dificultado devido à presença do pó e da fase líquida.

2.5.6 Velocidade da fase sólida

Desde a década de 50, muitas foram as técnicas propostas para a medida da velocidade da fase sólida nas diferentes regiões do leito de jorro. Uma lista das técnicas mais utilizadas para a medida dessa variável é apresentada no Quadro 2.4.

Quadro 2.4 - Técnicas de medida da velocidade da fase sólida no leito de jorro.

Referências	Técnicas de medida
Mathur e Gishler (1955) Thorley <i>et al.</i> (1955) Thorley <i>et al.</i> (1959) Gorshtein e Mukhlenov (1967) Mikhailik e Antanishin (1967) Romankov e Rashkovaskaya (1968) Lefroy e Davidson (1969) Pallai (1971) Suciu e Patrascu (1977) Sullivan <i>et al.</i> (1987)	Observação direta
Gorshtein e Soroko (1964) Mikhailik e Antanishin (1967) Gorshtein e Mukhlenov (1967)	Piezoelétrica
Van Velzen <i>et al.</i> (1974)	Radioativa
Waldie e Wilkinson (1986)	Eletromagnética
Boulos e Waldie (1986) He <i>et al.</i> (1994b) San José <i>et al.</i> (1998b) Olazar <i>et al.</i> (1998) Olazar <i>et al.</i> (2001b)	Ópticas

Das técnicas citadas nesse quadro a observação direta é a mais antiga. Esta técnica fundamenta-se na geração de imagens de leitos de jorro em meia coluna a partir de câmeras de alta velocidade de captura. Devido a isto, diversos autores têm relatado que o seu uso, como forma de obter dados experimentais que possam ser utilizados para representar os fenômenos de transferência de quantidade de movimento que ocorrem em um leito de jorro de coluna cheia, deve ser feito com cuidado. Segundo He *et al.* (1994b), a parede plana longitudinal existente nos leitos de jorro em meia coluna pode causar um atrito adicional ao

sistema, principalmente na região de jorro onde as partículas e o fluido estão em alta velocidade.

Para contornar este problema, são propostas na literatura outras técnicas de medida mais sofisticadas onde os dados são obtidos em leitos de jorro de coluna cheia. Dentre essas técnicas destacam-se a piezoelétrica, a radioativa, a eletromagnética e as ópticas.

Nas técnicas piezoelétrica, radioativa e eletromagnética, partículas traçadoras com propriedades piezoelétricas, radioativas ou de elevada permeabilidade eletromagnética são inseridas no leito de jorro. A técnica piezoelétrica baseia-se no efeito piezoelétrico que ocorre quando alguns materiais (piezoquartzo, titanato de bário e “*Rochelle salt*”) são submetidos a um choque mecânico, gerando assim uma carga elétrica na sua superfície. Na técnica radioativa, a radiação γ emitida pelos traçadores é monitorada continuamente em detectores de cintilação (brilho) situados em torno do leito. Já a técnica eletromagnética está baseada nas modificações de indutância efetiva, que ocorrem quando as partículas traçadoras atravessam uma bobina compactada constituída por dois módulos com distância axial conhecida.

A grande limitação para o uso das técnicas piezoelétricas, radioativas e eletromagnéticas está no fato de que as partículas traçadoras devem possuir a mesma forma, tamanho e densidade das partículas que compõe o leito. Além disso, estas técnicas necessitam de uma calibração bastante minuciosa para que os dados obtidos sejam convertidos em velocidade de partícula. Outro agravante que é encontrado na técnica eletromagnética é que a bobina compactada deve ser inserida no interior do leito, podendo assim causar perturbações na fluidodinâmica do sistema.

As técnicas ópticas têm sido na atualidade as mais utilizadas para a determinação da velocidade da fase sólida em leitos de jorro. Esta técnica baseia-se na reflexão ou emissão de luz para a realização das medidas. Dentre as ferramentas mais

utilizadas para isso destaca-se a inserção de sondas de fibra óptica no interior de leitos de jorro de coluna cheia, exceção para o trabalho de Boulos e Waldie (1986), onde a ferramenta óptica usada foi à anemometria de duplo laser refletida em uma parede plana de um leito de jorro em meia coluna.

Apesar da sonda de fibra óptica ter sido proposta como uma ferramenta promissora para a obtenção de dados da velocidade da fase sólida em leitos particulados, suas medidas também podem acarretar em resultados incorretos. Isto ocorre em virtude da grande dificuldade de calibração desses sensores, da dificuldade na penetração da luz em escoamentos com altas concentrações de sólidos e também a possíveis perturbações fluidodinâmicas que estas sondas podem causar no interior do leito.

2.5.7 Porosidade

A medida da porosidade em leitos de jorro tem sido assunto de inúmeras investigações na literatura, onde constata-se grandes dificuldades na obtenção desta variável devido ao leito de jorro apresentar três regiões distintas (anulo, jorro e fonte) com porosidades diferentes.

Inicialmente, a porosidade da região anular foi postulada como sendo constante e igual à de um leito empacotado expandido (Mathur e Gishler, 1955). Contudo, Thorley *et al.* (1959) verificaram que pequenas variações podem existir nas diferentes partes que compõe essa região. Nas regiões de jorro e fonte, Mathur e Epstein (1974) relataram que essas possuem uma porosidade muito semelhante à de um *riser* de transporte pneumático em fase diluída.

As diversas técnicas propostas pelos pesquisadores para a determinação da porosidade de leitos de jorro são apresentadas no Quadro 2.5.

Quadro 2.5 - Técnicas de medida da porosidade no leito de jorro.

Referências	Técnicas de medida
Mathur e Gishler (1955) Lefroy (1966) Suciu e Patrascu (1977) Olazar <i>et al.</i> (1996)	Observação direta
Mikhailik e Antanishin (1967)	Piezoelétrica
Goltsiker (1967)	Capacitância
Elperin <i>et al.</i> (1969)	Absorção de raios β
Waldie <i>et al.</i> (1986)	Absorção de raios γ
He <i>et al.</i> (1994a) San José <i>et al.</i> (1998a) Olazar <i>et al.</i> (1999) Olazar <i>et al.</i> (2001a) Wang <i>et al.</i> (2001) San José <i>et al.</i> (2005)	Ópticas

Na técnica da observação direta, a porosidade existente nas diferentes regiões do leito de jorro foi determinada pelos autores por três métodos distintos. Mathur e Gishler (1955) e Suciu e Patrascu (1977) determinaram a porosidade da região de jorro considerando o fato de que o fluxo de sólidos que desce na região anular é igual ao fluxo de sólidos que sobe na região de jorro em qualquer nível do leito. Assumindo então que a porosidade na região anular é igual à de um leito empacotado expandido e determinando a velocidade das partículas na região de jorro e o diâmetro do canal de jorro (ambos na parede plana de um leito de jorro em meia coluna), os autores calcularam a densidade *bulk* da suspensão gás-sólido e expressaram os resultados em termos de porosidade.

É importante ressaltar que essa metodologia é bastante contestada entre os pesquisadores devido aos dados de velocidade da fase sólida na região de jorro ter sido obtido no leito de jorro em meia coluna. He *et al.* (1994a) investigaram o efeito da parede longitudinal na porosidade do leito de jorro através de comparações de dados experimentais de uma meia coluna e de uma coluna cheia. Esses autores concluíram que, apesar do perfil global de porosidade ser bastante semelhante para ambos os leitos, na meia coluna a porosidade no topo do jorro é menor que a encontrada na interface jorro-ânulo e esse fato

pode ser uma indicação do efeito da parede na porosidade do sistema.

Lefroy (1966) determinou a porosidade da região de jorro através de imagens estáticas de um leito de jorro em meia coluna. Assumindo que a porosidade na região anular é igual à de um leito empacotado expandido, o autor comparou o número de partículas por unidade de área na região de jorro com o número de partículas por unidade de área na região anular. Contudo, a validade desse método é questionada pelo próprio autor por apresentar erros significativos em leitos com elevadas porosidades.

Três décadas depois, Olazar *et al.* (1996) propuseram uma metodologia experimental e de cálculo bastante complexa para a obtenção da porosidade de leitos de jorro diluídos (*JSB*). O método experimental consiste na geração de imagens de um leito transparente com um vidro espelhado localizado na parte traseira. Já o método de cálculo não foi detalhado pelos autores devido à sua complexidade e também por ter sido desenvolvido em um algoritmo específico.

A técnica piezoelétrica, descrita no item 2.5.6, também foi proposta para medir a porosidade da região de jorro. Nessa técnica, dados da frequência de colisão das partículas sólidas com o piezocristal são adquiridos através do número de picos observados em um osciloscópio por unidade de tempo. Esses dados são então introduzidos em uma equação proposta pelos autores para o cálculo da porosidade.

No método da capacitância, citado por Mathur e Epstein (1974), foi constatado que esse é capaz de determinar a porosidade nas três regiões do leito. Contudo a metodologia experimental envolvida na obtenção dos dados não é relatada pelos autores.

As técnicas de absorção de raios- γ e absorção de raios- β foram utilizadas para determinar a porosidade da fonte e da região de jorro de um leito bidimensional, respectivamente. Ambas as técnicas estão baseadas na emissão e absorção de raios- γ ou raios- β no contorno do leito de jorro. A principal limitação da absorção de raios- γ se deve a esta

medir somente o perfil vertical de porosidade da fonte. Na técnica de absorção de raios- β são encontradas dificuldades práticas em ajustar a profundidade de penetração dos raios, limitando os experimentos a leitos de jorro bidimensionais com baixa espessura.

Nas técnicas ópticas, as sondas de fibra óptica têm sido novamente a ferramenta mais utilizada para a determinação da porosidade nas diferentes regiões do leito de jorro. A metodologia envolvida na utilização dessas sondas consiste na obtenção de uma curva de calibração, onde uma relação linear entre um sinal de tensão fornecido pela sonda e a porosidade de um meio padrão é obtida. Tal como descrito no item 2.5.6, a grande limitação desta técnica se deve ao fato da dificuldade de calibração dos sensores e a possíveis perturbações fluidodinâmicas que as sondas podem causar no interior do leito de jorro.

2.5.8 Forma e dimensão do canal de jorro

O leito de jorro em regime de operação estável implica na existência de um equilíbrio dinâmico entre as forças que atuam na interface jorro-ânulo. De acordo com Mathur e Epstein (1974) a forma do canal de jorro pode fornecer conceitos básicos para o entendimento da dinâmica do leito de jorro, permitindo assim a análise física e a modelagem fluidodinâmica. Determinações experimentais da forma e dimensão do canal de jorro têm sido realizadas através de métodos simples e sofisticados, conforme apresentado no Quadro 2.6.

No método da observação direta, imagens de leitos de jorro em meia coluna ou bidimensionais são utilizadas para a determinação da forma e dimensão do canal de jorro. Entretanto, como verificado nos itens 2.5.6 e 2.5.7, a veracidade dos dados obtidos no leito de jorro em meia coluna é contestada entre os pesquisadores. Para o método piezoelétrico, que é citado em Mathur e Epstein (1974), não foi encontrada nenhuma explicação teórica sobre a metodologia experimental envolvida nesta técnica. As formas do canal de jorro que foram observadas a partir das técnicas da observação direta e piezoelétrica são apresentadas na

Figura 2.2.

Quadro 2.6 - Técnicas de medida da forma e dimensão do canal de jorro.

Referências	Técnicas de medida
Mathur e Gishler (1955) Thorley <i>et al.</i> (1959) Malek <i>et al.</i> (1963) Lefroy e Davidson (1969) Hunt e Brennan (1965) Goltsiker (1967) Volpicelli <i>et al.</i> (1967) McNab (1972)	Observação direta
Mukhlenov e Gorshtein (1965) Mikhailik (1966)	Piezoelétrica
He <i>et al.</i> (1992)	Sondas de pressão
He <i>et al.</i> (1994b) San José <i>et al.</i> (1996) San José <i>et al.</i> (2001) San José <i>et al.</i> (2005)	Ópticas

Nos métodos das sondas de pressão e ópticas, onde para as ópticas a ferramenta utilizada foi às sondas de fibra óptica, a metodologia envolvida para estes métodos é bastante semelhante. Esta consistiu na inserção radial desses sensores ao longo do eixo axial do leito de jorro. A partir daí, a forma e a dimensão do canal de jorro é determinada baseada no fato de que a pressão ou a velocidade da fase sólida na região de jorro é muito mais alta do que a existente na região anular. Então, quando os sensores atravessam a interface jorro-ânulo ocorre uma mudança significativa na pressão (sonda de pressão) ou no pulso elétrico (sonda de fibra óptica), permitindo assim a obtenção dos dados. Ressalta-se novamente que a inserção de corpos estranhos no interior do leito de jorro pode causar modificações significativas na fluidodinâmica do sistema, o que pode ocasionar erros nas medidas.

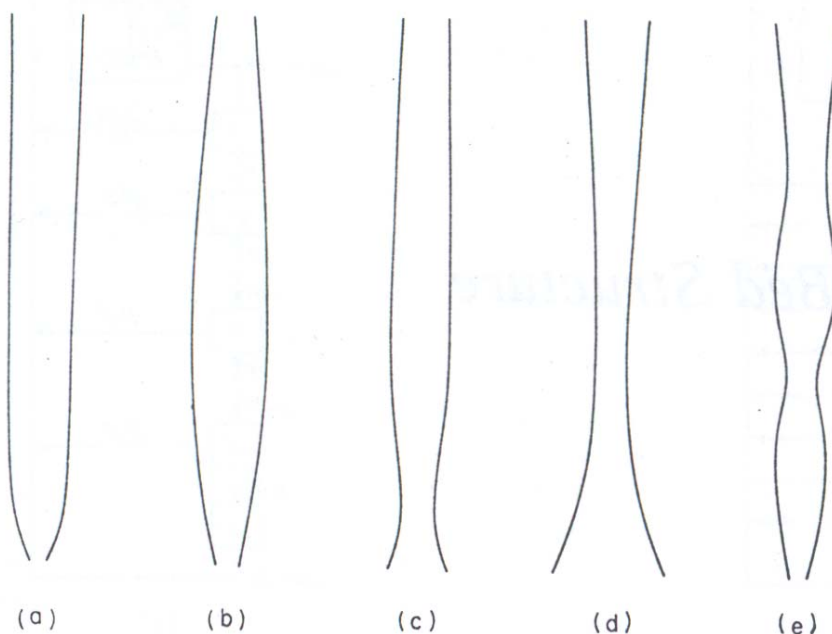


Figura 2.2 - Formas do canal de jorro observadas pelas técnicas da observação direta e piezoelétrica (Mathur e Epstein, 1974).

2.5.9 Altura da fonte

A análise da altura da fonte de leitos de jorro é de fundamental importância para a avaliação da sua fluidodinâmica. Fontes oscilatórias nos eixos axial, radial e angular podem refletir uma instabilidade do sistema. Do mesmo modo, a extinção da fonte representa a inexistência do regime de jorro.

Na análise fluidodinâmica de leitos de jorro em presença de pasta, nos trabalhos citados no Quadro 2.2, os autores efetuaram as medidas de altura da fonte através de duas técnicas de medida, as diretas e as indiretas. A técnica de medida direta consiste na obtenção da altura da fonte através da visualização de leitos de jorro transparentes, bidimensionais ou em meia coluna. Já a técnica indireta consiste na inserção de uma sonda métrica no leito para a realização da medida. Segundo Spitzner Neto (2001), a grande limitação para o uso da técnica indireta é o fato de que o leito de jorro necessariamente deve estar com o topo aberto para a inserção da sonda.

2.6 Comentários finais sobre a revisão bibliográfica

Com base na revisão bibliográfica, constata-se que o estudo da fluidodinâmica de leitos de jorro em presença de pastas ainda apresenta problemas que têm que ser melhor investigados, principalmente na análise do regime transiente. Do mesmo modo a modelagem deste sistema encontra-se em pleno desenvolvimento, visto que os modelos existentes na literatura apresentam dificuldades em descrever o processo devido às simplificações impostas nas suas formulações. Assim, estudos experimentais do processo de secagem de pastas em leito de jorro ainda são necessários para que os fenômenos de transferência envolvidos sejam entendidos e possibilitem o desenvolvimento de novos modelos para o processo.

Ressalta-se também, que essa revisão bibliográfica forneceu fundamentos para a escolha dos equipamentos, materiais e metodologias experimentais de análise, os quais são descritos no próximo capítulo.

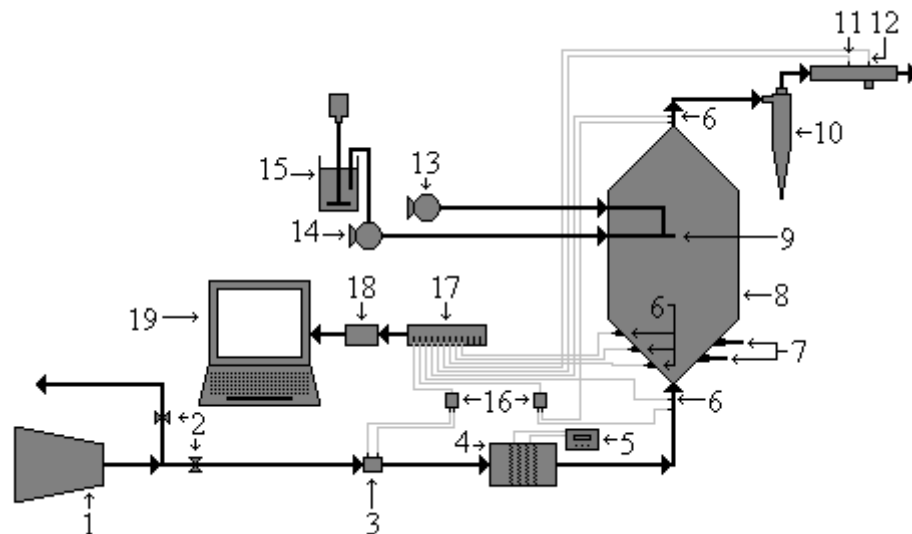
CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos que foram empregados para a realização desta tese.

3.1 Equipamentos e periféricos

A unidade experimental de leito de jorro utilizada para a obtenção dos dados de secagem foi construída, no Centro de Secagem do DEQ/UFSCar, conforme ilustrado na Figura 3.1.



(1) Soprador radial, (2) Válvulas, (3) Placa de orifício, (4) Aquecedor, (5) Controlador de temperatura, (6) Termopares, (7) Coletores de amostra, (8) Leito de jorro, (9) Alimentador de duplo fluido, (10) Ciclone, (11) Termopar de bulbo seco, (12) Termopar de bulbo úmido, (13) Compressor de ar, (14) Bomba peristáltica, (15) Reservatório para a pasta com agitador mecânico, (16) Transdutores de pressão, (17) Condicionador de sinais, (18) Placa de aquisição de dados e (19) Microcomputador.

Figura 3.1 - Diagrama esquemático da unidade experimental de leito de jorro.

A unidade experimental apresentada na Figura 3.1 é formada pelos seguintes sistemas periféricos de fornecimento e aquecimento de ar, medida de vazão de ar, câmara de secagem, alimentação de pasta, coleta de produto, amostragem e instrumentação.

Fornecimento de ar - o ar de secagem foi fornecido por um soprador radial da marca IBRAM com potência de 7,5 HP e vazão máxima de 4 m³/min.

Ajuste da vazão de ar - a vazão do ar de secagem foi regulada por um sistema *by-pass* constituído por duas válvulas gavetas de 2 pol que direcionavam o ar proveniente do soprador em duas direções, tubulação de acesso ao leito e tubulação de descarga do ar em excesso.

Medida da vazão de ar - o ar direcionado ao leito de secagem teve sua vazão mássica determinada através da diferença de pressão em um medidor tipo orifício, cuja aferição foi obtida através de um medidor Venturi padrão. A expressão obtida na aferição com o medidor Venturi padrão é da forma:

$$Q = 1,20192[\Delta H]^{0,5} \quad (3.1)$$

onde Q é a vazão mássica do ar no leito de jorro em kg/min e ΔH é a altura manométrica em cm_{Hg}. A Equação 3.1 apresentou um coeficiente de ajuste R de 0,9997

Aquecimento do ar - após passar pelo medidor de vazão, o ar foi aquecido por um trocador de calor formado por três resistências elétricas de 1000 W de potência cada uma. O conjunto de resistências foi ligado a um sistema de controle Flyever FE50S que permitiu alterar a potência de aquecimento e assim ajustar a temperatura do ar.

Câmara de secagem - a câmara de secagem consiste de um leito de jorro de coluna cheia composto por uma base cônica (angulação de 60°) com 0,5 m de altura e diâmetro do bocal de entrada de 0,03 m, uma coluna cilíndrica de 1,0 m altura e diâmetro de

0,5 m e um cone superior (angulação de 60°) com 0,47 m de altura e diâmetro do bocal de saída de 0,05 m. Todas essas peças foram construídas em aço inox e unidas por flanges.

Alimentação da pasta - a alimentação da pasta na câmara de secagem foi feita através de um alimentador de duplo fluido, conforme ilustrado na Figura 3.2. Este alimentador foi construído em aço inox e ficou posicionado a uma distância axial de 0,6 m da base da coluna cilíndrica. Nas entradas do alimentador, foi acoplado um compressor de ar da marca Emerson 1/3 HP e uma bomba peristáltica Cole Parmer, composta por um cabeçote modelo 7518-10 e um controlador de velocidade MasterFlex Console Drive. A pressão de atomização aplicada no alimentador foi de 5 PSI.



Figura 3.2 - Alimentador de duplo fluido.

Reservatório de pasta - a bomba peristáltica foi conectada a um reservatório de pasta com capacidade para 10 litros, sendo esse homogeneizado por um agitador mecânico da marca Fisatom modelo 713.

Coleta do produto final - para separar o pó do ar de secagem foi acoplado na saída do leito de jorro um ciclone tipo Lapple. Este ciclone foi construído em aço inox com um diâmetro de coluna de 0,13 m.

Amostragem de partículas inertes - na base cônica inferior do leito foram instalados dois pontos de coleta de partículas inertes. As posições axiais dos pontos de coleta e uma ilustração do projeto dos amostradores são apresentadas nas Figuras 3.3 (a) e (b), respectivamente.

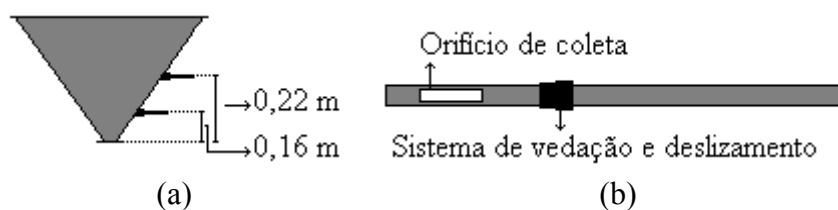


Figura 3.3 - Amostradores da região anular. (a) Posição axial dos amostradores e (b) Ilustração dos amostradores.

Instrumentação - a unidade experimental foi instrumentada de forma a obterem-se simultaneamente dados de pressão e temperatura durante todo o período da secagem.

Os dados de pressão do equipamento foram obtidos através de dois transdutores de pressão da marca Auto Tran Incorporated com faixa de operação de 0 - 5 PSI, um para a medida da velocidade do ar na placa de orifício e outro para a medida da queda de pressão no leito. Esses sensores foram calibrados com o auxílio de um manômetro de tubo em U tendo mercúrio como fluido manométrico. No Quadro 3.1 estão dispostas as equações de conversão dos sinais de tensão elétrica em volts (V) dos transdutores para pressão em altura manométrica.

Quadro 3.1 - Equações de conversão para os transdutores de pressão.

Transdutor	Equação de Conversão	R	Equação
Placa de orifício	$\Delta H = -8,06854 + 7,80249V$	0,9998	(3.2)
Leito de jorro	$\Delta H = -8,03206 + 7,75948V$	0,9998	(3.3)

Para as medidas de temperatura foram utilizados quatro termopares tipo T localizados na entrada do leito e em três posições axiais da região anular, conforme apresentado na Figura 3.4. Também foram medidas a temperatura na saída do leito e as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido na saída do ciclone. A calibração dos termopares foi efetuada em um poço de calibração marca Block Calibrator DB-35L, onde as temperaturas

medidas pelos termopares e a temperatura imposta pelo poço de calibração apresentaram um desvio médio de aproximadamente $\pm 0,2$ °C.

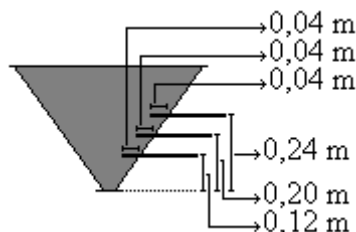
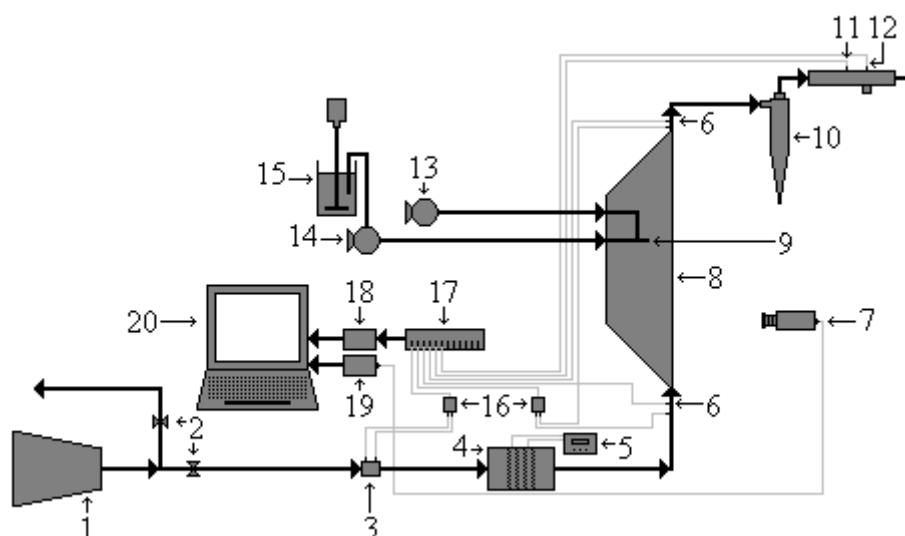


Figura 3.4 - Posição axial dos termopares na região anular do leito de jorro.

Os sensores de pressão e temperatura instalados no equipamento efetuaram a captação de sinais analógicos de cada variável estudada, os quais eram endereçados, filtrados e processados por um sistema de aquisição de dados composto por uma placa condicionadora de sinais, uma placa de aquisição de dados, um microcomputador e um software de aquisição desenvolvido em linguagem de programação gráfica, utilizando LabVIEW.

Para permitir a visualização das fases nas diferentes regiões do leito e possibilitar a medida da velocidade das partículas nas regiões anular, jorro e fonte, da altura da fonte, e da forma e dimensão do canal de jorro, foi construída uma câmara de secagem sob forma de um leito de jorro em meia coluna. Esta câmara de secagem possui uma parede plana de vidro temperado (10 mm) que divide o leito “ao meio” no sentido longitudinal. O leito de jorro em meia coluna também foi confeccionado em aço inox e nas mesmas dimensões do leito de jorro de coluna cheia. Isto tornou possível a utilização da unidade experimental apresentada na Figura 3.1 para ambas as câmaras de secagem.

Um diagrama esquemático da unidade experimental mostrada na Figura 3.1 com a meia coluna instalada é apresentado na Figura 3.5.



- (1) Soprador radial, (2) Válvulas, (3) Placa de orifício, (4) Aquecedor, (5) Controlador de temperatura, (6) Termopares, (7) Câmera de alta velocidade, (8) Leito de jorro, (9) Alimentador de duplo fluido, (10) Ciclone, (11) Termopar de bulbo seco, (12) Termopar de bulbo úmido, (13) Compressor de ar, (14) Bomba peristáltica, (15) Reservatório para a pasta com agitador mecânico, (16) Transdutores de pressão, (17) Condicionador de sinais, (18) Placa de aquisição de dados, (19) Placa de aquisição de imagens e (20) Microcomputador.

Figura 3.5 - Diagrama esquemático da unidade experimental com a meia coluna.

Para a realização das medidas da velocidade das partículas nas regiões anular, jorro e fonte foi instalada na unidade experimental uma câmera filmadora de alta velocidade que possibilitou a aquisição de 2000 imagens por segundo (MotionScope). Esta câmera é composta por um módulo de geração de imagens, uma placa de aquisição dos sinais de imagens, um conjunto de lentes e um software para o tratamento das imagens geradas (MotionScope 2.21.1). Na Figura 3.6 são apresentados exemplos de vídeos gerados nas diferentes posições axiais e radiais do leito de jorro em meia coluna.

Do mesmo modo, a altura da fonte e forma e dimensão do canal de jorro foram obtidas a partir de imagens da parede plana do leito de jorro em meia coluna. Estas imagens foram geradas com o auxílio de uma câmera fotográfica digital (Sony Cyber-Shot 5.0 MP), conforme exemplo da Figura 3.7. Para o tratamento das imagens e obtenção dos dados foi utilizado o software de análise de imagens Image Tool.

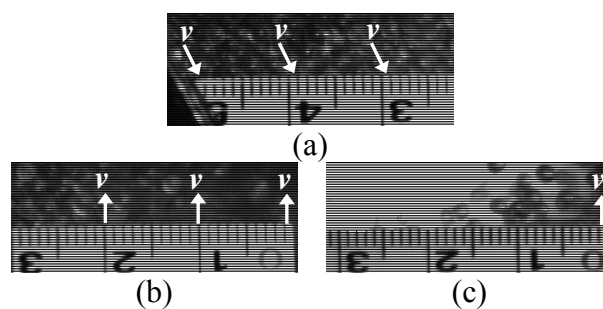


Figura 3.6 - Exemplos de vídeos gerados no leito de jorro em meia coluna. (a) Região anular, (b) Região de jorro e (c) Fonte.



Figura 3.7 - Exemplo de imagem do leito de jorro em meia coluna obtida com o auxílio da câmera fotográfica digital.

3.2 Partículas inertes

Como partículas inertes utilizaram-se esferas de vidro fabricadas pela Potters Industrial Ltda. Essas foram caracterizadas quanto ao diâmetro médio de partícula, densidade real de partícula e porosidade média do leito estático.

Diâmetro médio de partículas - para uniformizar as partículas inertes, utilizou-se um conjunto de peneiras onde foram separadas para a utilização nos experimentos somente as partículas retidas entre as peneiras de 10 mesh (2,00 mm) e 8 mesh (2,36 mm).

Densidade real das partículas - a densidade real das partículas inertes foi determinada através de análises de picnometria a gás hélio em um picnometro da marca Quantachrome Corporation modelo Ultrapycnometer 1000 Version 2.2.

Porosidade média do leito estático - para a obtenção da porosidade média do leito estático preencheu-se o leito de jorro de coluna cheia com uma determinada massa de partículas. A partir daí obteve-se a altura do leito estático ocupado pelas partículas. Essa altura juntamente com as dimensões do equipamento serviu de base para o cálculo da densidade *bulk*. Com os valores da densidade real e densidade *bulk* estimou-se a porosidade média do leito estático através da seguinte equação (3.4).

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (3.4)$$

onde ρ_b é a densidade bulk e ρ_s é a densidade das partículas inertes.

3.3 Pastas

Nos experimentos de secagem foram utilizados como pastas a água destilada, o lodo de esgoto, o leite desnatado, o ovo de galinha integral homogeneizado e o carbonato de cálcio.

A água foi usada por ser considerada uma “pasta” modelo e também por ser o componente principal a ser removido das pastas, 75 a 97% aproximadamente.

O lodo de esgoto foi escolhido por apresentar uma baixa concentração de sólidos, inferior a 5 %, e também por ser um rejeito industrial que ainda necessita de um processo de secagem adequado. Esse foi coletado na purga do reator *UASB* da estação de tratamento de esgoto piloto da USP de São Carlos. O lodo de esgoto foi previamente preparado antes de ser alimentado no leito de jorro devido à presença de grandes aglomerados de sólidos em suspensão e cabelos humanos. A preparação do lodo de esgoto consistiu na trituração da biomassa em um liquidificador de elevada rotação (Metalúrgica 7000) seguido

de um peneiramento para a separação dos cabelos humanos e dos aglomerados ainda existentes.

O leite desnatado foi selecionado por apresentar uma concentração de sólidos superior a 8 % e inferior a 11 % e também por possuir baixo teor de gordura.

Quanto ao ovo de galinha integral homogeneizado, esse foi escolhido por apresentar uma elevada concentração de sólidos, superior a 20 %, e também por já ter sido utilizado em outros trabalhos do Centro de Secagem do DEQ/UFSCar. Sua preparação feita através da homogeneização da clara e da gema no liquidificador de elevada rotação seguido de um peneiramento para retirar os resíduos de casca existentes. Tanto o ovo homogeneizado como o lodo de esgoto foram conservados sob refrigeração para evitar a sua degradação.

Por fim, o carbonato de cálcio foi utilizado para avaliar a influência da concentração de sólidos presentes na pasta durante a secagem. Devido a isto esse foi preparado em três concentrações diferentes denominadas de *C1*, *C2* e *C3*.

A caracterização das pastas foi feita a partir de análises de densidade e concentração de sólidos.

Densidade - a densidade das pastas foi determinada por picnometria líquida em um picnometro com volume de 25 ml. Para a pesagem das amostras utilizou-se uma balança analítica da marca AND modelo FR-200 MKII com precisão de $0,5 \times 10^{-4}$ g.

Concentração de sólidos - a concentração de sólidos foi obtida através do método gravimétrico, deixando em estufa a 105 °C por 24 horas. As massas iniciais e finais das amostras foram determinadas também na balança analítica com precisão de $0,5 \times 10^{-4}$ g.

Cabe ressaltar que as análises de concentração foram realizadas sempre antes de cada experimento de secagem para verificar se as pastas encontravam-se na condição de concentração desejada. O cálculo da concentração de sólidos nas pastas foi feito de acordo com a equação:

$$C = 100 \frac{m_f}{m_i} \quad (3.5)$$

onde C é a concentração da pasta, m_f é a massa final e m_i é a massa inicial.

3.4 Métodos experimentais

3.4.1 Caracterização da unidade experimental

A caracterização da unidade experimental consistiu na obtenção das curvas fluidodinâmicas de ambos os leitos de jorro para as faixas de temperatura que foram empregadas nos experimentos de secagem. Estas curvas foram obtidas de acordo com a metodologia proposta por Mathur e Epstein (1974).

Para as conformações da unidade experimental apresentadas nas Figuras 3.1 e 3.5 foi colocado nas câmaras de secagens uma massa de partículas inertes de 20 kg para o leito de jorro de coluna cheia e 10 kg para o leito de jorro em meia coluna. Ajustou-se então o sistema para operar em regime de jorro estável até a temperatura atingir o valor desejado em regime permanente, fato que foi verificado quando as temperaturas do ar no leito ficaram constantes. A partir deste instante, a vazão de ar foi interrompida rapidamente e na seqüência aumentada gradativamente. Nesse período foram armazenados os dados da vazão do ar e da queda de pressão no leito. Quando o regime de jorro foi novamente estabelecido, realizou-se o processo inverso, ou seja, a vazão do ar no leito foi diminuída até ser zerada.

Para cada par vazão do ar/queda de pressão, foram adquiridos com o auxílio do sistema de aquisição de dados 1024 valores de vazão do ar no leito e da sua queda de pressão correspondente. Estes dados foram adquiridos a uma freqüência de aproximadamente 400 Hz, sendo a média e o desvio padrão fornecidos automaticamente pela própria rotina em modo LabVIEW na tela principal do programa e em uma planilha modo Excel.

Na Figura 3.8 é apresentada uma imagem da rotina em modo LabVIEW criada para a fluidodinâmica.



Figura 3.8 - Rotina em modo LabVIEW criada para a fluidodinâmica.

Nestes experimentos, a queda de pressão registrada no sistema de aquisição de dados foi causada não somente pelo leito de partículas inertes, mas também pelo equipamento. Devido a isto, seguindo o mesmo procedimento de determinação das curvas características, foi obtida também a queda de pressão provocada pelo leito de jorro sem as partículas inertes. Posteriormente, através de uma equação de ajuste da queda de pressão do equipamento em função da velocidade do ar no leito, esses valores foram descontados da queda de pressão total, resultando na queda de pressão causada somente pelo leito de partículas inertes.

Com as medidas da queda de pressão do leito de partículas em função da velocidade do ar foram determinados a queda de pressão em jorro estável e a velocidade de

mínimo jorro para ambos os leitos. Também foram obtidos nesta etapa os dados de velocidade das partículas nas diferentes regiões do leito, forma e dimensão do canal de jorro e altura da fonte para as duas faixas de temperatura e velocidade do ar de entrada que foram empregadas nos experimentos de secagem. Estes dados foram determinados a partir dos vídeos e das imagens gerados no leito de jorro em meia coluna.

3.4.2 Procedimento experimental de secagem

Os experimentos de secagem foram feitos para o leito de jorro operando sob duas condições de velocidades do ar de entrada, correspondentes a 15 e 30 % acima da velocidade de mínimo jorro, e em duas faixas de temperatura, 80 e 100 °C. Para cada uma dessas condições especificadas, velocidade e temperatura do ar na entrada, esperava-se o sistema entrar em regime permanente, e então iniciava-se a alimentação de 20 ml/min (coluna cheia) ou 10 ml/min (meia coluna) de pasta. O sistema era então monitorado de forma *on-line* pela aquisição de dados, e quando atingia-se um novo regime permanente aumentava-se a vazão de alimentação da pasta em mais 20 ml/min (coluna cheia) ou 10 ml/min (meia coluna) e assim sucessivamente. O processo terminava na vazão de pasta na qual o ar na saída já estivesse saturado e/ou o leito apresentasse problemas operacionais e de instabilidade.

Após cada nível de alimentação de pasta aplicado, foi efetuada uma limpeza no leito e troca das partículas inertes recobertas por partículas limpas a fim de evitar que a película de pasta aderida nas partículas causasse interferência nos parâmetros fluidodinâmicos medidos durante os experimentos de secagem, conforme observado no trabalho de Medeiros *et al.* (2004).

As variáveis medidas durante os experimentos foram comuns e diferenciadas para os leitos de jorro de coluna cheia e em meia coluna. No leito de jorro de coluna cheia foram determinadas, durante o regime transiente e permanente, as variações na velocidade do

ar de entrada, queda de pressão do leito, temperatura do ar de entrada, temperatura do leito de partículas nas três posições da região anular, temperatura do ar de saída, temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido na saída do ciclone, umidade do pó produzido e umidade do recobrimento formado nas partículas inertes. Para o leito de jorro em meia coluna esta metodologia foi aplicada somente para a evaporação de água, onde determinou-se, durante o regime transiente e permanente, as variações na velocidade do ar da entrada, queda de pressão do leito, temperaturas do ar de entrada, do ar de saída, de bulbo seco e bulbo úmido na saída do ciclone, velocidade das partículas nas regiões anular, jorro e fonte, forma e dimensão do canal de jorro e altura da fonte.

Para a realização de todas estas medidas nas condições de secagem estudadas e vazões de alimentação aplicadas, foram usadas metodologias de análises específicas para cada variável.

Velocidade do ar de entrada, queda de pressão do leito e temperaturas - foram adquiridos a cada 30 segundos pelo sistema de aquisição de dados 1024 valores de velocidade do ar de entrada, queda de pressão do leito e temperaturas a uma frequência de aproximadamente 400 Hz. A partir dos valores coletados em cada intervalo de tempo a própria rotina em modo LabVIEW fornecia a média e o desvio padrão dos dados na tela principal do programa e em uma planilha modo Excel. De posse dos resultados de temperatura do ar de saída e temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido na saída do ciclone foi obtida a umidade relativa e absoluta do ar na saída do leito de jorro e também na saída do sistema experimental.

Nas Figuras 3.9 e 3.10 são apresentadas imagens das rotinas em modo LabVIEW criadas para a secagem nos leitos de jorro de coluna cheia e meia coluna, respectivamente.



Figura 3.9 - Rotina em modo LabVIEW criada para a secagem no leito de jorro de coluna cheia.



Figura 3.10 - Rotina em modo LabVIEW criada para a secagem no leito de jorro em meia coluna.

Umidade do pó produzido - foram efetuadas de 10 em 10 minutos amostragens do pó produzido na saída do ciclone. A umidade destas amostras foi determinada através do método gravimétrico. A pesagem das amostras foi feita na mesma balança analítica usada nas análises de concentração de sólidos, sendo o cálculo da umidade do pó coletado em base úmida realizada através da equação:

$$U = 100 \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{as}} + m_{\text{água}}} \quad (3.6)$$

onde U é a umidade em base úmida, $m_{\text{água}}$ é a massa de água e m_{as} é a massa da amostra seca.

Umidade do recobrimento formado - após o sistema entrar em regime permanente foram efetuadas amostragens das partículas inertes recobertas pela pasta nos pontos de coleta mostrados na Figura 3.3. Para determinar a umidade do recobrimento formado, primeiramente mediu-se o conteúdo de água existente nas amostras através do método gravimétrico. Em seguida as partículas presentes nas amostras foram lavadas com água para a remoção do filme e então colocadas para secar na estufa para a determinação da massa de sólido seco. A pesagem das amostras também foi efetuada na balança analítica usada nas análises de concentração de sólidos e o cálculo da umidade do recobrimento formado em base úmida feito utilizando a Equação (3.6).

Velocidade das partículas nas regiões anular, jorro e fonte, forma e dimensão do canal de jorro e altura da fonte - após o sistema atingir o regime permanente foram gerados, para algumas condições experimentais estudadas na evaporação de água, imagens e vídeos do leito de jorro em meia coluna. Estas imagens e vídeos foram utilizados para avaliar o comportamento da dinâmica dos sólidos no leito de jorro em presença da solução modelo, neste caso a água destilada.

O procedimento experimental de secagem descrito aqui foi aplicado em ambos os leitos de jorro seguindo o planejamento apresentado no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Planejamento dos experimentos de secagem.

Pasta	Condição experimental	Leito de jorro	Objetivo da análise
Sem pasta	80 °C - 1,15 u_{mj} 80 °C - 1,30 u_{mj} 100 °C - 1,15 u_{mj} 100 °C - 1,30 u_{mj}	Coluna cheia Meia coluna	Avaliar o comportamento do leito de jorro sem a presença de pasta.
Água destilada	80 °C - 1,15 u_{mj} 80 °C - 1,30 u_{mj} 100 °C - 1,15 u_{mj} 100 °C - 1,30 u_{mj}	Coluna cheia Meia coluna	Avaliar o comportamento do leito de jorro na presença de uma pasta ideal.
Lodo de esgoto	80 °C - 1,15 u_{mj} 100 °C - 1,30 u_{mj}	Coluna cheia	Avaliar o comportamento do leito de jorro na presença de uma pasta real de baixa concentração.
Leite desnatado	80 °C - 1,15 u_{mj} 100 °C - 1,30 u_{mj}	Coluna cheia	Avaliar o comportamento do leito de jorro na presença de uma pasta real de média concentração.
Ovo homogeneizado	80 °C - 1,15 u_{mj} 100 °C - 1,30 u_{mj}	Coluna cheia	Avaliar o comportamento do leito de jorro na presença de uma pasta real de alta concentração.
CaCO ₃	100 °C - 1,30 u_{mj}	Coluna cheia	Avaliar o comportamento do leito de jorro na presença de uma pasta real em diferentes concentrações.

3.5 Modelagem e simulação

Conforme exposto no Quadro 2.3, existem na literatura inúmeros modelos que visam a simulação da secagem de pastas em leito de jorro. Porém, muitos deles levam em consideração a hipótese que a pasta não altera a fluidodinâmica do leito durante a secagem e esse fato não é verificado experimentalmente. Por outro lado, aplicações de modelos mais complexos, tais como os diferenciais, também apresentam dificuldades na descrição deste processo. Isto ocorre porque esses modelos apresentam muitos parâmetros de ajuste e de difícil verificação, uma vez que medidas locais durante o processo de secagem de pastas em leito de jorro são complicadas e ainda de baixa precisão.

Nesta tese, além das dificuldades que os pesquisadores vêm encontrando para incorporar a presença da pasta nas simulações, tem-se também a situação do regime transiente. Para contornar este problema, optou-se por utilizar nesta fase inicial um modelo *CST* por acreditar que o mesmo possa fornecer informações úteis sobre a resposta do sistema face à concentração da fase líquida no seu interior. A base teórica do modelo *CST* está fundamentada em balanços macroscópicos de transferência de calor e massa para as fases gás, sólida e líquida e em uma expressão exponencial para descrever a taxa de secagem, onde o tratamento matemático desses balanços foi baseado nas seguintes hipóteses simplificadoras:

- o leito de jorro comporta-se como um tanque perfeitamente agitado;
- a mistura gasosa é considerada como um gás ideal;
- a temperatura do sólido na saída é igual à temperatura do gás de exaustão;
- o acúmulo de pasta no interior do leito não é significativo, e
- a difusão da água no interior do filme é desprezível.

Com base nessas hipóteses, as variações na umidade das fases gás e líquida foram calculadas a partir dos balanços globais de conservação de massa, conforme as equações:

$$\frac{dy_s}{dt} = \frac{1}{m_g} \{W_{ge}y_e - W_{gs}y_s + k\} \quad (3.7)$$

$$x_s = \frac{F_{pe}x_e - k}{F_{ps}} \quad (3.8)$$

onde y_s é a fração mássica do vapor d' água na saída do leito de jorro, t é o tempo, m_g é a massa de gás, W_{ge} é a vazão mássica do gás na entrada do leito de jorro, y_e é a fração mássica

do vapor d' água na entrada do leito de jorro W_{gs} é a vazão mássica do gás na saída do leito de jorro, k a taxa de secagem, x_s é a fração mássica de água líquida na saída do leito de jorro, F_{pe} é a vazão mássica da pasta na entrada do leito de jorro, x_e é a fração mássica de água líquida na entrada do leito de jorro e F_{ps} é a vazão mássica da pasta na saída do leito de jorro

A variação na temperatura do ar de exaustão foi calculada através do balanço global de conservação de energia, de acordo com a equação:

$$\frac{dT_{gs}}{dt} = \frac{W_{ge} cp_{ge} T_{ge} + F_{pe} cp_{pe} T_{pe} - W_{gs} cp_{gs} T_{gs} - F_{ps} cp_{ps} T_{gs} - k\Delta H^v - q}{m_g cp_{gs} + m_s cp_s + m_j cp_j} \quad (3.9)$$

onde T_{gs} é a temperatura do gás na saída do leito de jorro, cp_{ge} é o calor específico do gás na entrada do leito de jorro, T_{ge} é a temperatura do gás na entrada do leito de jorro, cp_{pe} é o calor específico da pasta na entrada do leito de jorro, T_{pe} é a temperatura da pasta na entrada do leito de jorro, cp_{gs} é o calor específico do gás na saída do leito de jorro, cp_{ps} é o calor específico da pasta na saída do leito de jorro, ΔH^v é o calor latente de vaporização, q é calor perdido pelo leito de jorro, m_s é a massa das partículas inertes, cp_s é o calor específico das partículas inertes, m_j é a massa do leito de jorro e cp_j é o calor específico do leito de jorro.

Nas Equações (3.7), (3.8) e (3.9), k foi calculado através da expressão exponencial:

$$k = a(1 - e^{-bt}) \quad (3.10)$$

onde a e b são coeficientes de ajuste.

A solução do modelo *CST* foi obtida através da integração numérica das Equações (3.7) e (3.9) pelo método de Runge-Kutta em uma rotina construída em modo

MATLAB. As condições iniciais aplicadas em $t = 0$ foram $y_s = y_{s,t=0}$ e $T_s = T_{gs,t=0}$, sendo $y_{s,t=0}$ a fração mássica do vapor d' água na saída do leito de jorro no tempo zero e $T_{gs,t=0}$ a temperatura do gás na saída do leito de jorro no tempo zero. Também fazem parte deste modelo várias equações auxiliares, as quais estão descritas no Apêndice A.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os principais resultados obtidos e as respectivas discussões. Primeiramente, são mostrados os dados da caracterização das partículas inertes e das pastas utilizadas. Após, apresentam-se os resultados experimentais obtidos na caracterização fluidodinâmica de ambos os leitos de jorro operando sem a presença das pastas. Em seguida são descritos os resultados obtidos na secagem de pastas, a análise da evaporação de água no leito de jorro em meia coluna e a análise fluidodinâmica, térmica e de massa da secagem de pastas em leito de jorro. Por fim, é apresentada uma comparação dos resultados experimentais com os dados obtidos na simulação numérica com o modelo *CST*.

4.1 Caracterização das partículas inertes e das pastas

Uma amostra de 11,634 g das partículas inertes peneiradas foi utilizada para a análise de picnometria a gás hélio, onde dez corridas seqüenciais foram realizadas. O resultado de densidade real obtido nesta análise foi de $2512,6 \pm 0,1 \text{ kg/m}^3$. A porosidade média do leito estático foi avaliada a partir de uma massa de 20 kg de esferas de vidro. Esta massa preencheu o leito de jorro de coluna cheia até uma altura de aproximadamente 0,31 m. Estes valores, juntamente com as dimensões do equipamento, corresponderam a uma densidade *bulk* de $1573,4 \text{ kg/m}^3$ e a uma porosidade média do leito estático de 0,37.

Para caracterizar as pastas utilizadas foram efetuadas análises de densidade e concentração de sólidos. A análise de densidade foi realizada em triplicata para garantir a reprodutibilidade dos dados. Do mesmo modo, as análises de concentração também foram feitas em triplicata e sempre antes de cada experimento de secagem. A Tabela 4.1 apresenta

os valores das propriedades físicas obtidas para as pastas utilizadas, à temperatura de 28 °C, exceto para o lodo de esgoto.

Tabela 4.1 - Propriedades físicas das pastas.

Pasta	ρ_p (kg/m ³)	C (%)	T (°C)
Água destilada	996,26	-	28,0
Lodo de esgoto	1021,01 ±4,63	4,81 ±0,05	20,5
Leite desnatado	1032,83 ±0,13	8,90 ±0,05	28,0
Ovo homogeneizado	1035,48 ± 0,80	23,87 ±0,16	28,0
CaCO ₃ - C1	1015,35 ±0,33	3,02 ±0,02	28,0
CaCO ₃ - C2	1034,96 ±0,18	5,74 ±0,07	28,0
CaCO ₃ - C3	1056,07 ±0,29	9,24 ±0,05	28,0

4.2 Caracterização fluidodinâmica dos leitos de jorro

Inicialmente avaliou-se a queda de pressão proporcionada somente pelos leitos sem as partículas inertes (testes em branco). As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam as curvas dos testes em branco dos leitos de jorro de coluna cheia e em meia coluna, respectivamente.

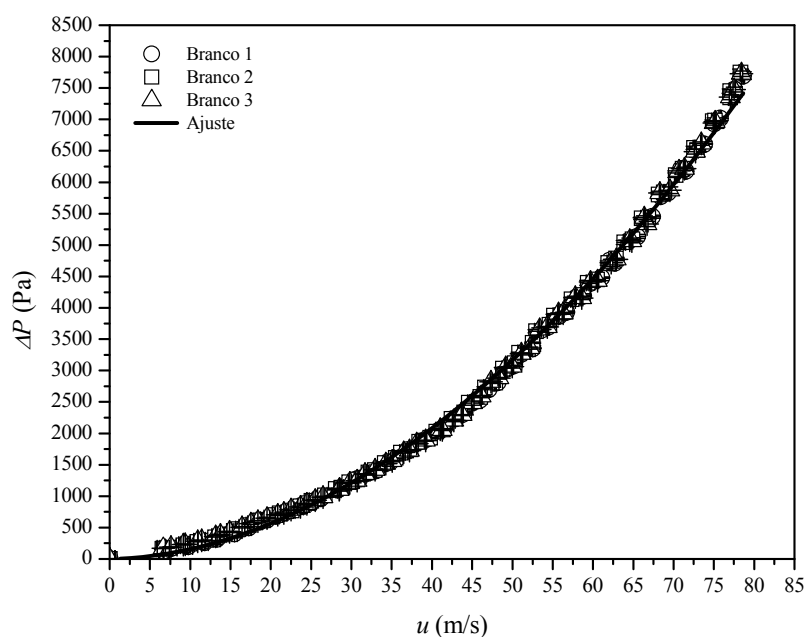


Figura 4.1 - Queda de pressão no leito de jorro de coluna cheia sem as partículas inertes em função da velocidade do ar de entrada.

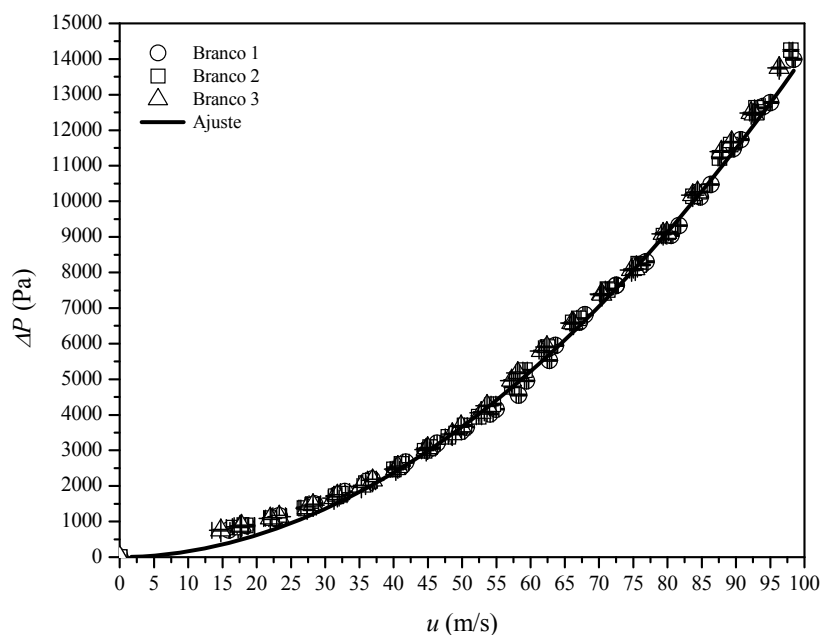


Figura 4.2 - Queda de pressão no leito de jorro em meia coluna sem as partículas inertes em função da velocidade do ar de entrada.

Para facilitar a aplicação das curvas das Figuras 4.1 e 4.2, ajustou-se aos dados experimentais um modelo sob a forma de uma função potência, gerando os dados apresentados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Dados obtidos nos testes em branco.

Leito de jorro	Função potência	R^2	Equação
Coluna Cheia	$\Delta P = 2,0304 u^{1,87944}$	0,99814	(4.1)
Meia coluna	$\Delta P = 1,82715 u^{1,94362}$	0,99748	(4.2)

Auxiliados pelas Equações (4.1) e (4.2), determinou-se as curvas fluidodinâmicas dos leitos de jorro de coluna cheia e em meia coluna nas temperaturas do ar de entrada de 80 °C e 100°C. Estas curvas são apresentadas nas Figuras 4.3 e 4.4.

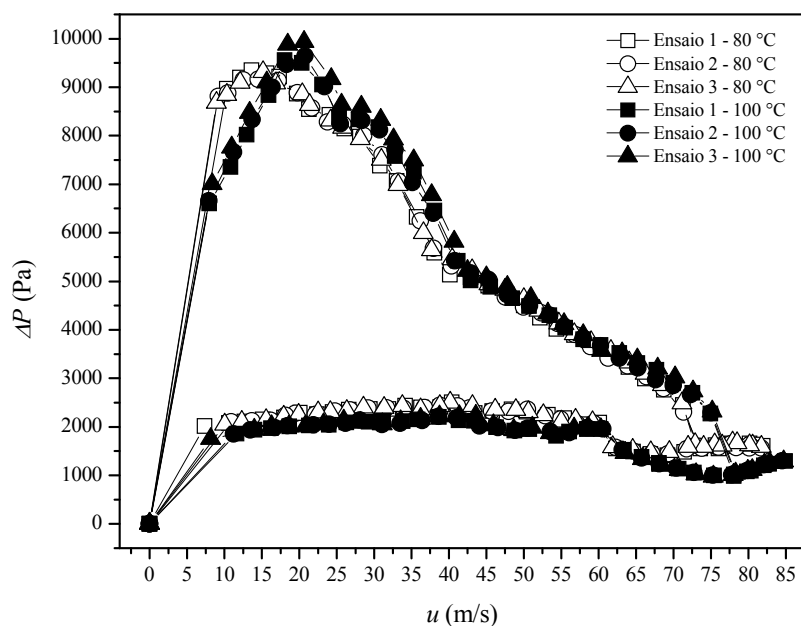


Figura 4.3 - Queda de pressão no leito de jorro de coluna cheia em função da velocidade do ar de entrada para as temperaturas de 80°C e 100°C.

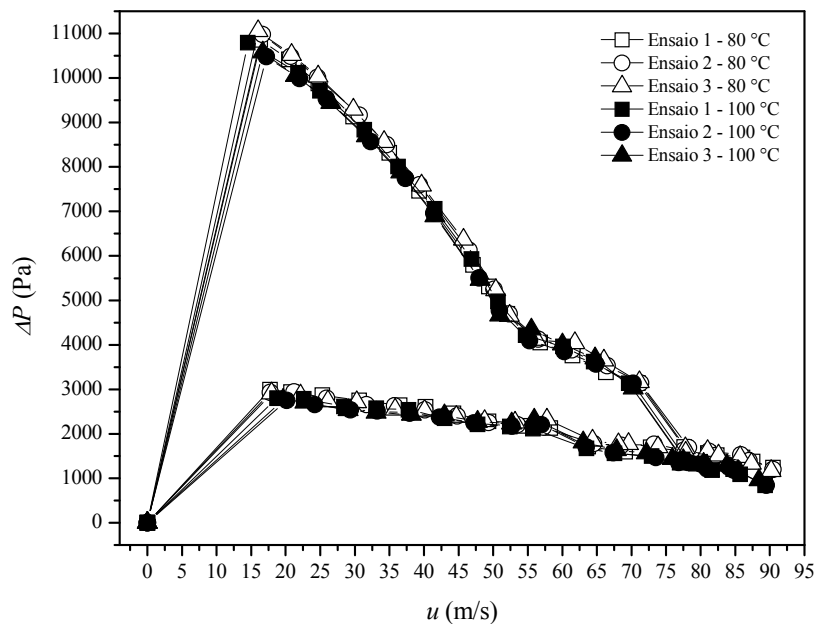


Figura 4.4 - Queda de pressão no leito de jorro em meia coluna em função da velocidade do ar de entrada para as temperaturas de 80°C e 100°C.

Os dados fluidodinâmicos mostrados nessas figuras foram obtidos em triplicata para cada temperatura e configuração de leito com o objetivo de determinar a velocidade de

mínimo jorro e a queda de pressão na condição de mínimo jorro. Nota-se que as curvas apresentadas têm a configuração típica de leito de jorro (Mathur e Epstein, 1974) e que os dados obtidos para ambas as temperaturas foram reprodutíveis. Na Tabela 4.2 são apresentados os dados experimentais obtidos para a u_{mj} e ΔP_{mj} nas temperaturas 80 e 100 °C.

Tabela 4.2 - Parâmetros fluidodinâmicos obtidos nos leitos de jorro de coluna cheia e em meia coluna.

Leito de jorro	T (°C)	ΔP_{mj} (Pa)	u_{mj} (m/s)
Coluna cheia	80	1568,7 (\pm 17,4)	62,1 (\pm 0,3)
Coluna cheia	100	1507,0 (\pm 36,1)	63,3 (\pm 0,2)
Meia coluna	80	1778,3 (\pm 69,0)	64,1 (\pm 0,4)
Meia coluna	100	1727,0 (\pm 73,9)	63,3 (\pm 0,3)

Os resultados reunidos nessa tabela mostram que a parede plana longitudinal existente na meia coluna causou um aumento na queda de pressão no mínimo jorro de aproximadamente 200 Pa. Cabe ressaltar que este aumento já era esperado, visto que a parede plana pode estar causando um atrito adicional no leito, principalmente na região de jorro onde o ar e as partículas estão em alta velocidade, conforme descrito por He *et al.* (1994b).

Na Figura 4.5 são apresentadas as curvas de velocidade das partículas na região anular do leito de jorro em meia coluna, para diferentes posições axiais em função do eixo radial. Os dados experimentais foram obtidos com o leito operando nas condições de 80 °C - $1,15 u_{mj}$ e 100 °C - $1,30 u_{mj}$.

De acordo com os dados apresentados nessa figura, os maiores valores de velocidade das partículas na região anular encontram-se na região de entrada do leito ($z= 8$ cm) e nas proximidades da interface jorro-ânulo ($r= 3$ cm), tendo seu valor diminuído significativamente na superfície do leito de partículas ($z= 28$ cm) junto à parede cônica ($r= 15$ cm). Este comportamento também pode ser visualizado na Figura 4.6, onde os dados de velocidade das partículas são analisados para diferentes posições radiais em função do eixo

axial.

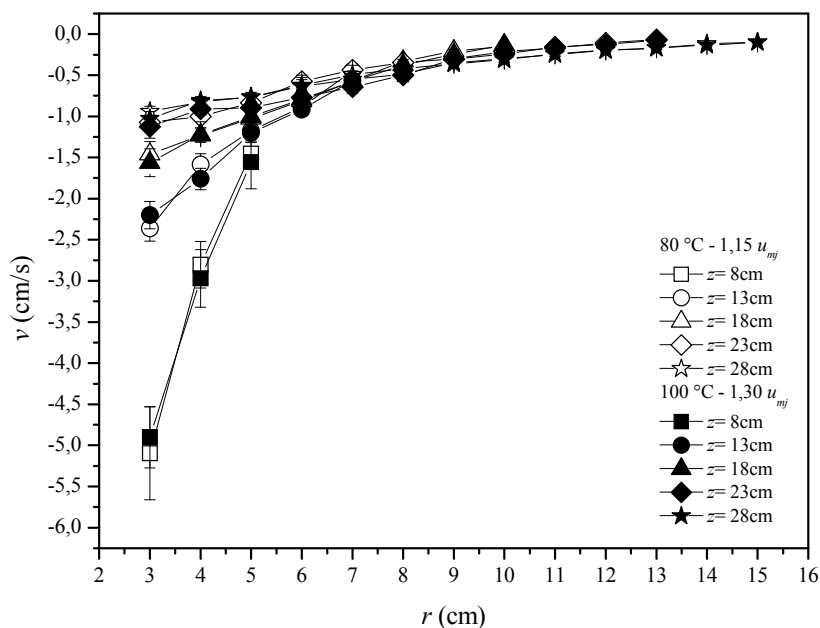


Figura 4.5 - Velocidade das partículas na região anular do leito de jorro em meia coluna em função do eixo radial.

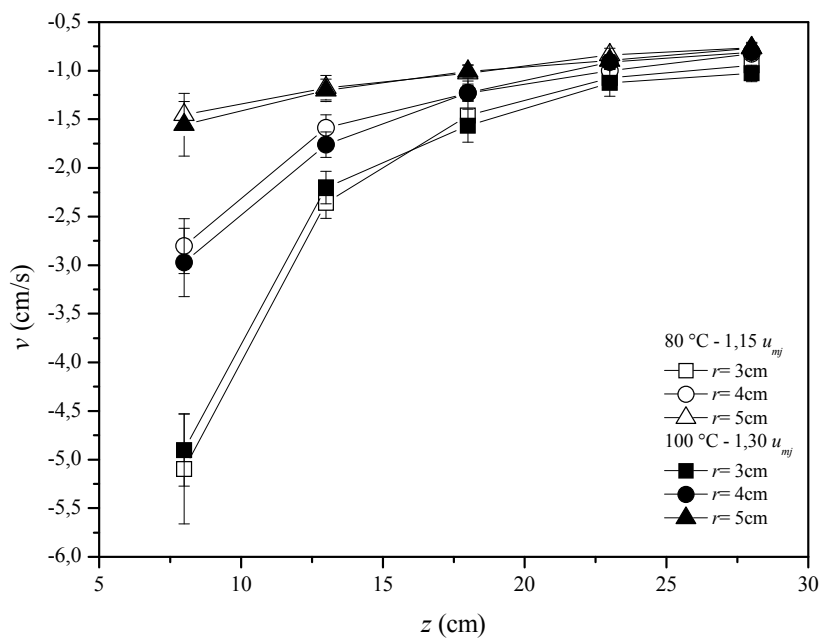


Figura 4.6 - Velocidade das partículas na região anular do leito de jorro em meia coluna em função do eixo axial.

Nessa figura, tal como verificado na Figura 4.5, a movimentação das partículas

na região de entrada do leito de jorro e na interface jorro-ânulo é mais intensa do que a existente nas proximidades da superfície do leito de partículas junto à parede cônica. Segundo He *et al.* (1994b), a explicação para isso está na estrutura do leito de jorro. Quanto mais próximo da região de entrada do leito menor é a área de seção transversal para o movimento descendente das partículas. Um aspecto importante também observado nas Figuras 4.5 e 4.6 foi que a velocidade das partículas na região anular do leito não sofreu modificações quando a temperatura e velocidade do ar de entrada foram alteradas, visto que os desvios padrões das medidas para ambas as condições operacionais estão sobrepostos.

A Figura 4.7 apresenta as curvas de velocidade das partículas, nas regiões de jorro e fonte do leito de jorro em meia coluna, para diferentes posições radiais em função do eixo axial. Os dados foram obtidos para o leito de jorro em meia coluna operando nas condições de $80\text{ °C} - 1,15 u_{mj}$ e $100\text{ °C} - 1,30 u_{mj}$.

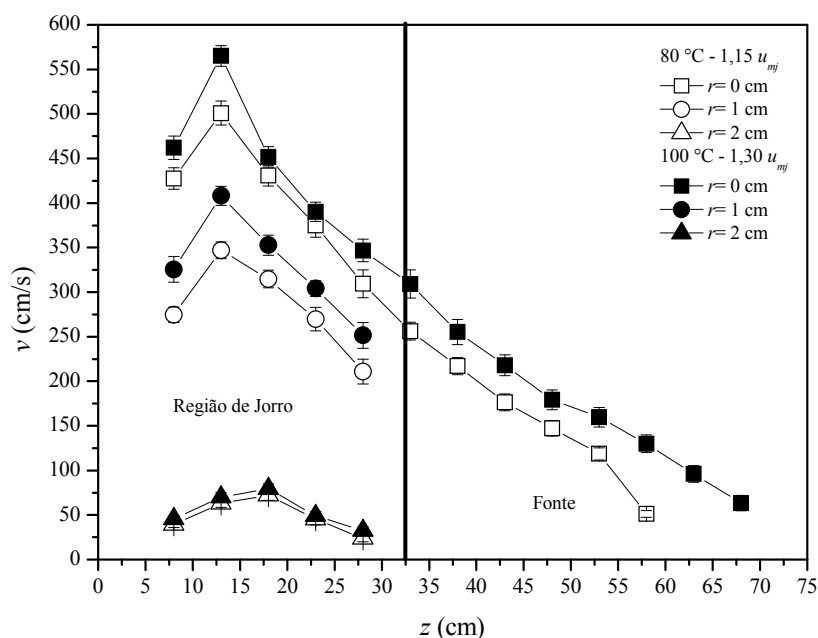


Figura 4.7 - Velocidade das partículas nas regiões de jorro e fonte do leito de jorro em meia coluna em função do eixo axial.

Nessa figura, verifica-se que a velocidade das partículas na região de jorro rapidamente acelera até um valor máximo em $z=13$ cm para as posições radiais $r=0$ e 1 cm e $z=18$ cm para a posição radial $r=2$ cm, e então desacelera gradativamente de forma linear até o topo do leito de partículas e posteriormente a fonte. Observa-se também que a velocidade das partículas nas posições radiais $r=0$ e 1 cm sofreu um aumento quando a temperatura e velocidade do ar de entrada foram modificadas. Este aumento, aliado ao comportamento que foi observado para a velocidade das partículas na região anular, quando temperatura e velocidade do ar de entrada foram modificadas (Figuras 4.5 e 4.6), evidencia o fato de que um aumento na velocidade do ar de entrada normalmente é mais canalizado para o centro da região de jorro, tendo pouca influência nas proximidades da interface jorro-ânulo e região anular.

Na Figura 4.8, os dados de velocidade das partículas na região de jorro da Figura 4.7 são apresentados em função do eixo radial para diferentes posições axiais.

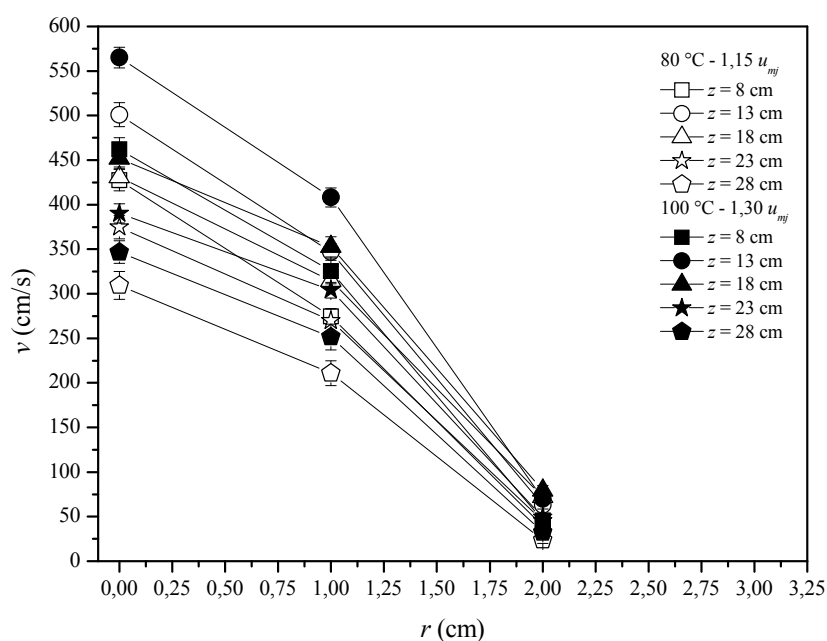


Figura 4.8 - Velocidade das partículas na região de jorro do leito de jorro em meia coluna em função do eixo radial.

De acordo com essa figura, a velocidade das partículas na região de jorro, em todas as posições axiais analisadas, diminui de um valor máximo no eixo radial central até zero na interface jorro-ânulo. Tal como observado por Mathur e Epstein (1974), He *et al.* (1994b) e Olazar *et al.* (1998, 2001b), a variação da velocidade das partículas na região de jorro ocorre segundo um perfil parabólico, que é mais pronunciado na região de entrada do leito onde a velocidade das partículas é maior.

A Figura 4.9 apresenta o raio do canal de jorro, do leito de jorro em meia coluna, em um gráfico de posição axial em função do eixo radial para os experimentos realizados sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} e 100 °C - 1,30 u_{mj} .

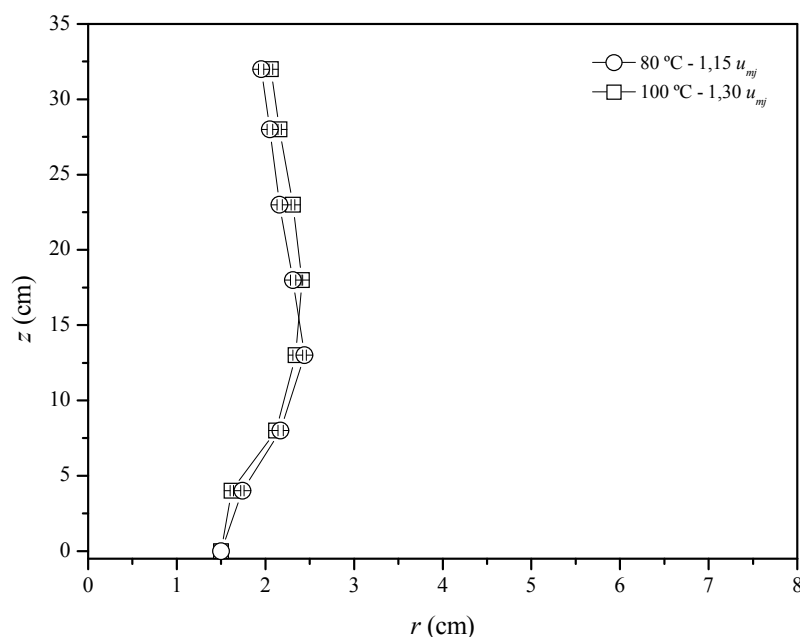


Figura 4.9 - Raio do canal de jorro do leito de jorro em meia coluna.

Nessa figura, verifica-se que o raio do canal de jorro obtido neste trabalho primeiramente sofre uma expansão logo acima do orifício de entrada do leito, e então se contrai gradativamente até a região de saída na superfície do leito de partículas. Este comportamento do canal de jorro corresponde ao tipo “b” da classificação de Mathur e

Epstein (1974). De acordo com estes autores, o canal de jorro do tipo “b” é característico de leitos de jorro cônico e cônico-cilíndrico tanto em coluna cheia como em meia coluna.

Outro aspecto observado nessa figura foi que o aumento na temperatura e velocidade do ar de entrada não causaram modificações significativas no raio e na forma do canal de jorro, visto que os dados obtidos para ambas as condições operacionais estudadas estão quantitativamente sobrepostos pelos desvios padrões das medidas.

4.3 Análise da evaporação de água no leito de jorro em meia coluna

Nas Figuras 4.10 a 4.15 são apresentadas a velocidade das partículas em diferentes regiões do leito de jorro em meia coluna para duas das condições experimentais de evaporação de água estudadas neste trabalho. Nas Figuras 4.10 a 4.12 os dados foram obtidos com o leito operando sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} sem a presença de água e na presença de água sob vazão de alimentação de 20 ml/min. Nas Figuras 4.13 a 4.15 os dados foram obtidos com o leito operando sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} sem a presença de água e na presença de água sob vazão de alimentação de 30 ml/min.

De acordo com os dados obtidos para as condições operacionais estudadas e vazões de alimentação aplicadas, a presença da água no leito de jorro em meia coluna não causou alterações na velocidade das partículas na região anular, visto que o comportamento das curvas para o leito seco e úmido foram semelhantes, conforme mostrado nas Figuras 4.10, 4.11, 4.13, e 4.14.

Para as regiões de jorro e fonte, Figuras 4.12 e 4.15, constatou-se que a velocidade das partículas nas posições radiais $r=0$ e 1 cm diminuiu na presença do meio líquido. A explicação para isto pode estar ligada ao fato de que o recobrimento de água causa um aumento na massa das partículas inertes, e por conseqüência seu peso tenderá a desacelerá-la mais rapidamente quando comparada com as partículas secas.

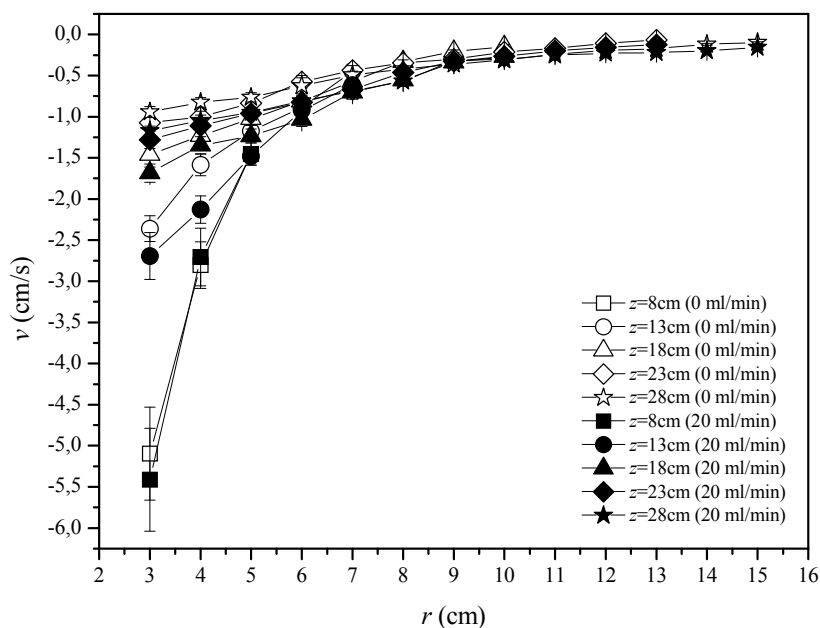


Figura 4.10 - Velocidade das partículas na região anular do leito de jorro em meia coluna em função do eixo radial para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

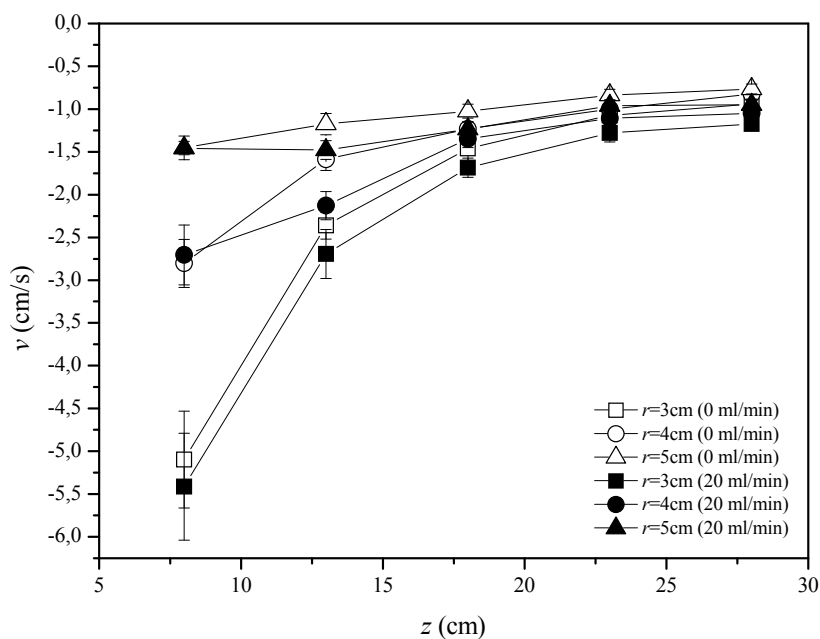


Figura 4.11 - Velocidade das partículas na região anular do leito de jorro em meia coluna em função do eixo axial para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

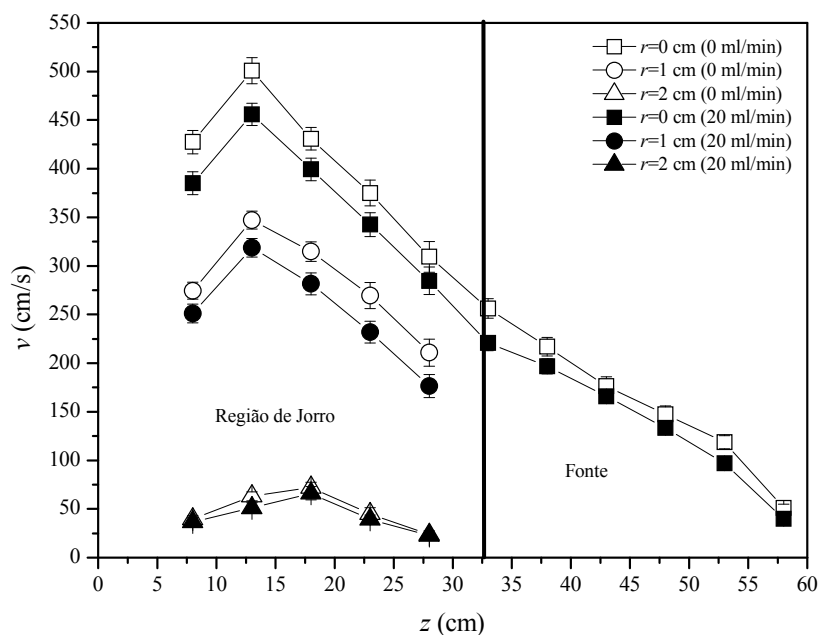


Figura 4.12 - Velocidade das partículas nas regiões de jorro e fonte do leito de jorro em meia coluna em função do eixo axial para a evaporação de água sob condições de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $1,15 u_{mj}$.

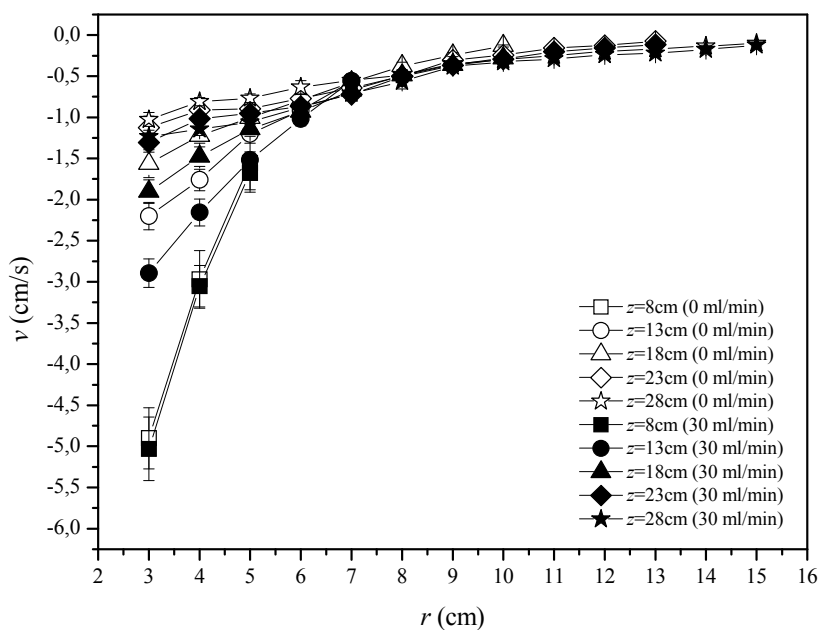


Figura 4.13 - Velocidade das partículas na região anular do leito de jorro em meia coluna em função do eixo radial para a evaporação de água sob condições de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $1,30 u_{mj}$.

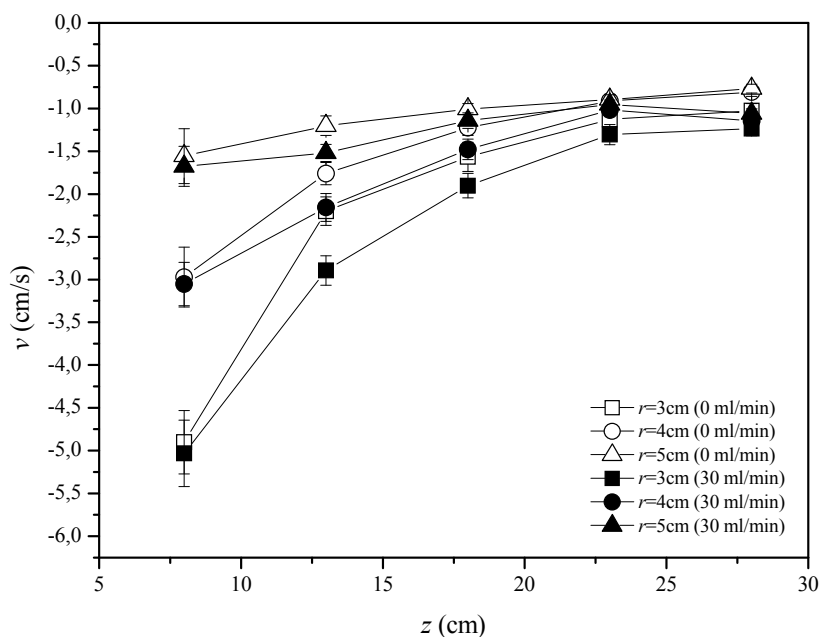


Figura 4.14 - Velocidade das partículas na região anular do leito de jorro em meia coluna em função do eixo axial para a evaporação de água sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30 u_{mj}$.

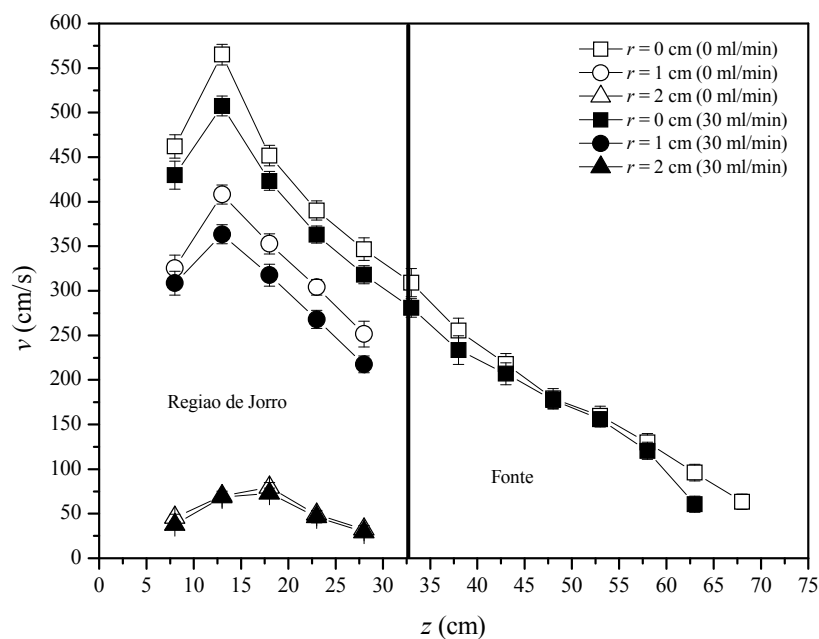


Figura 4.15 - Velocidade das partículas nas regiões de jorro e fonte do leito de jorro em meia coluna em função do eixo axial para a evaporação de água sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30 u_{mj}$.

Nas Figuras 4.16 e 4.17 são apresentados os dados de altura da fonte em função vazão de alimentação de água para os experimentos realizados no leito de jorro em meia

coluna sob condições operacionais de 80 °C - 1,15 u_{mj} e 100 °C - 1,30 u_{mj} .

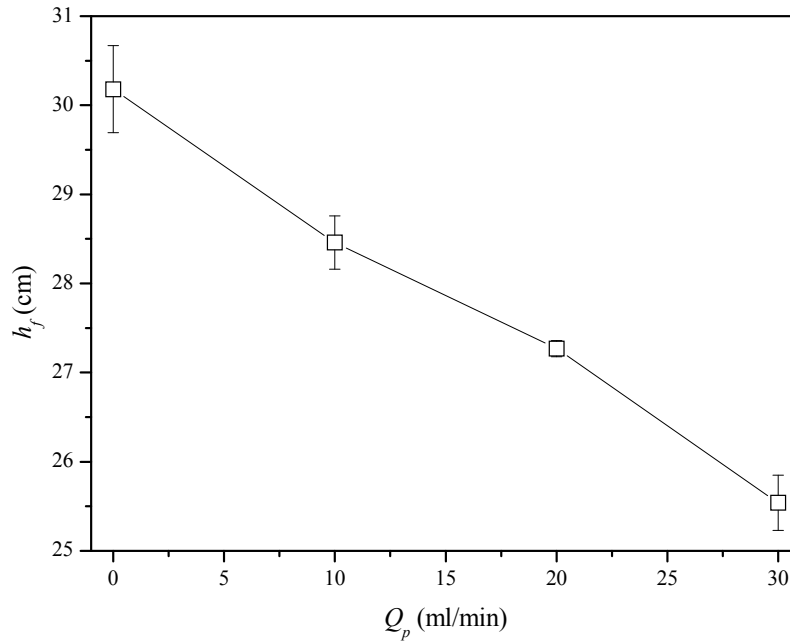


Figura 4.16 - Altura da fonte do leito de jorro em meia coluna em função da vazão de alimentação para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

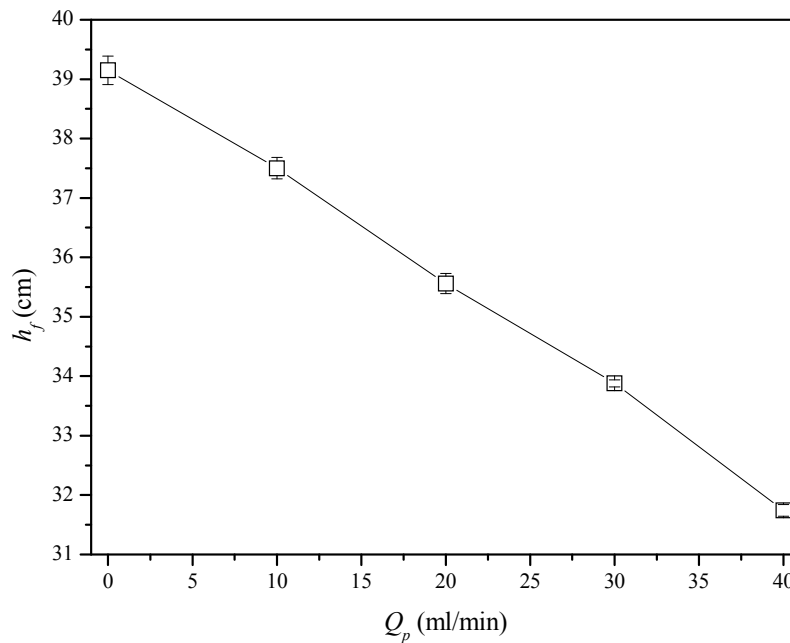


Figura 4.17 - Altura da fonte do leito de jorro em meia coluna em função da vazão de alimentação para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

Avaliando-se os resultados apresentados nessas figuras, verifica-se que a altura da fonte diminui linearmente com o aumento da vazão de alimentação de água. A comparação dos resultados experimentais de altura da fonte e velocidade das partículas nas posições radiais $r=0$ e 1 cm (Figuras 4.12 e 4.15) demonstra uma boa concordância entre os dados, visto que a redução na velocidade das partículas nestas regiões provoca também uma redução na altura da fonte.

A título de ilustrar o comportamento da altura da fonte obtido nas Figuras 4.16 e 4.17, são mostrados nas Figuras 4.18 e 4.19 fotografias da parede plana do leito de jorro em meia coluna em operação de evaporação de água.

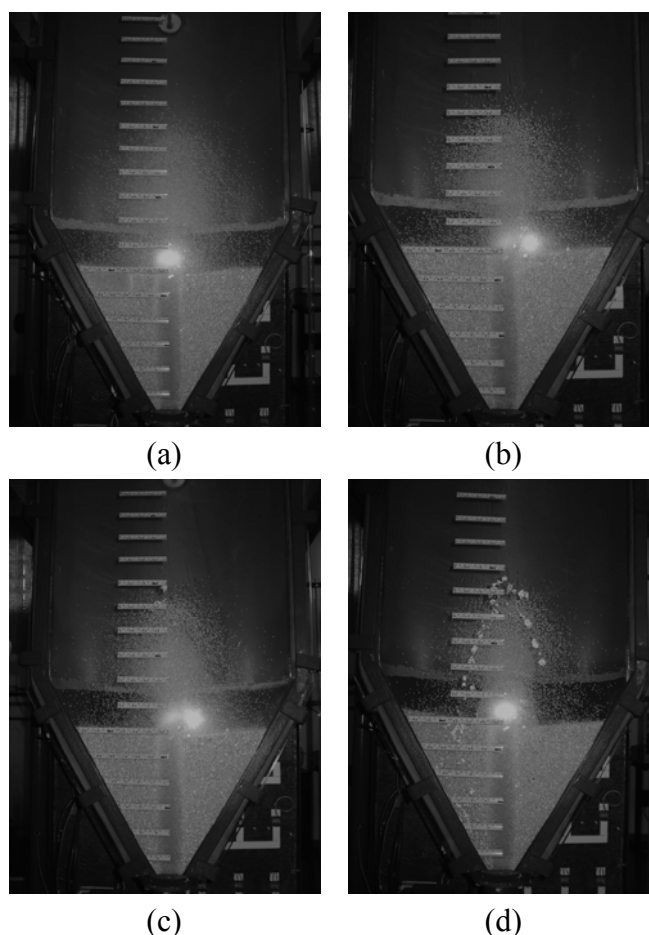


Figura 4.18 - Fotografias do leito de jorro em meia coluna para os experimentos de evaporação de água sob condições de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $1,15\text{ }u_{mj}$.
(a) 0 ml/min , (b) 10 ml/min , (c) 20 ml/min e (d) 30 ml/min .

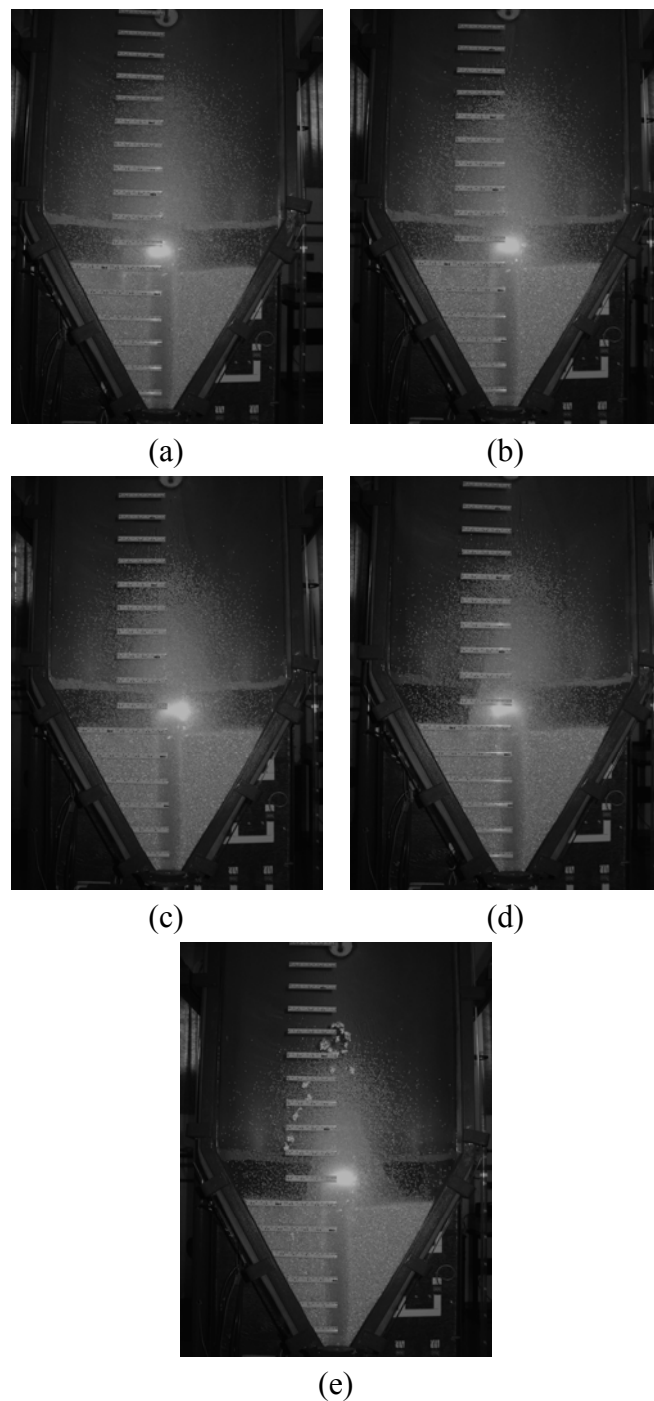


Figura 4.19 - Fotografias do leito de jorro em meia coluna para os experimentos de evaporação de água sob condições de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$.
(a) 0 ml/min, (b) 10 ml/min, (c) 20 ml/min, (d) 30 ml/min e (e) 40 ml/min.

Nas Figuras 4.20 e 4.21 é apresentado o raio do canal de jorro, em um gráfico de posição axial em função do eixo radial, para o leito de jorro em meia coluna operando seco e em evaporação de água sob condições de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $1,15\text{ }u_{mj}$ e $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$.

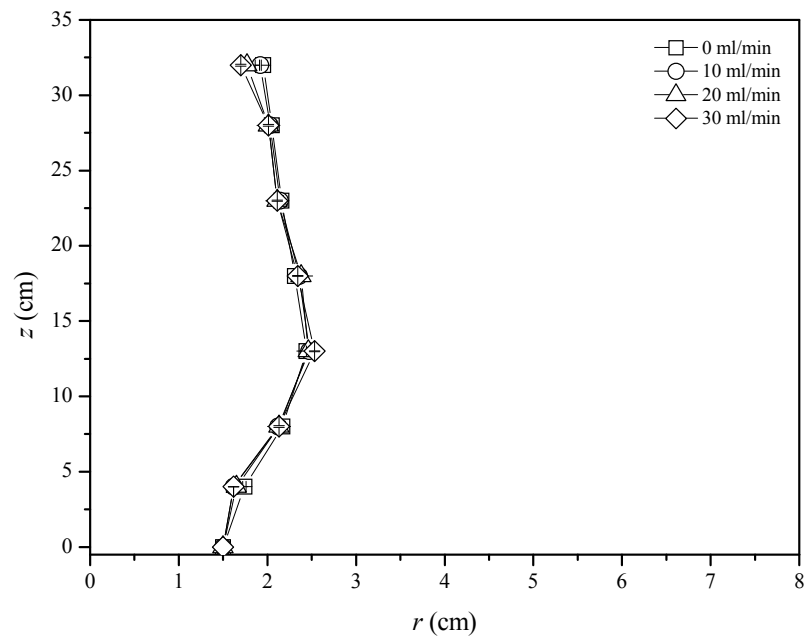


Figura 4.20 - Raio do canal de jorro do leito de jorro em meia coluna para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

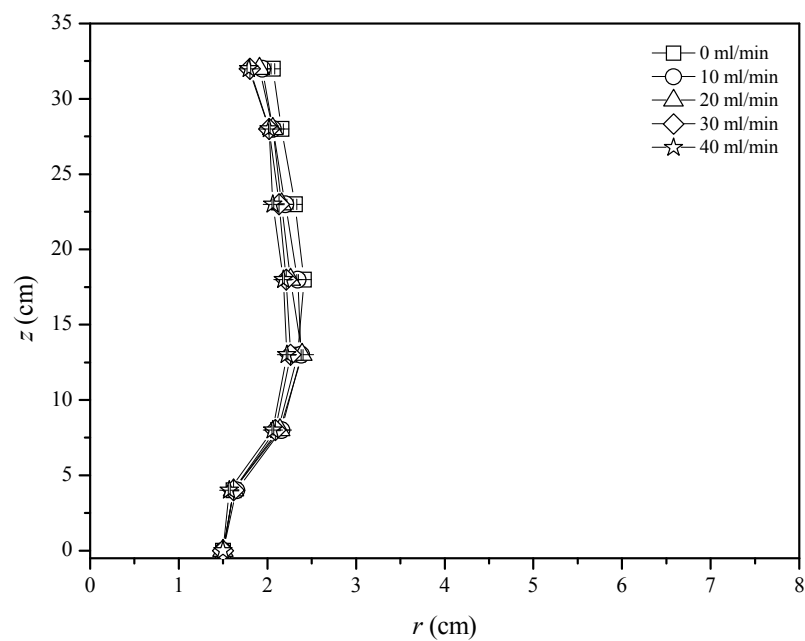


Figura 4.21 - Raio do canal de jorro do leito de jorro em meia coluna para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

Contata-se pela observação dos dados contidos nessas figuras que o raio do canal de jorro sofre uma contração quando a água é adicionada ao leito. A razão para isto pode estar relacionada com a interação das partículas no leito, que, conforme será explicado mais adiante, é de fundamental importância para a manutenção da estabilidade do regime de jorro quando esta técnica é empregada para a secagem de pastas.

4.4 Análise fluidodinâmica, térmica e de massa da secagem de pastas em leito de jorro

Nas Figuras 4.22 e 4.23 são apresentados os dados de umidade relativa em função do tempo para os experimentos de evaporação de água realizados no leito de jorro de coluna cheia sob condições de $80\text{ °C} - 1,15 u_{mj}$ e $100\text{ °C} - 1,30 u_{mj}$, respectivamente.

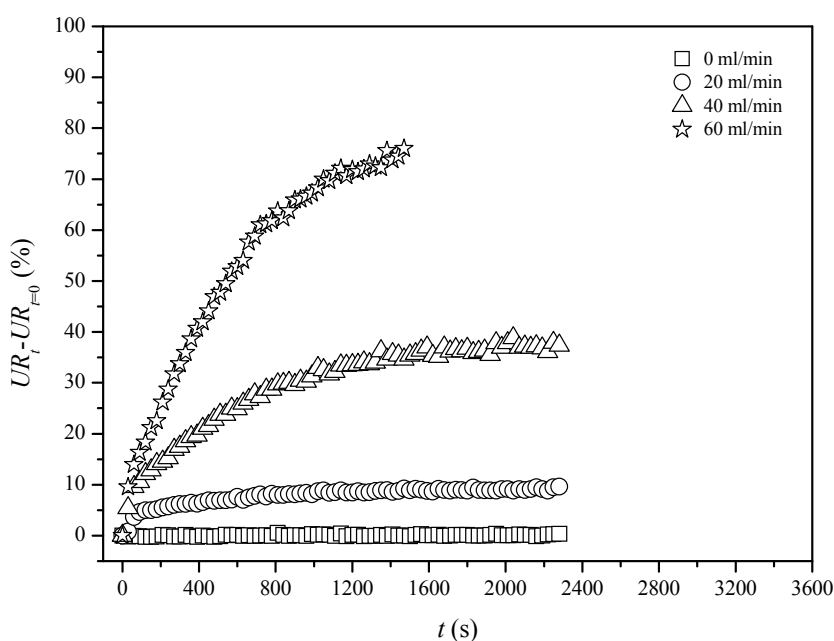


Figura 4.22 - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de $80\text{ °C} - 1,15 u_{mj}$.

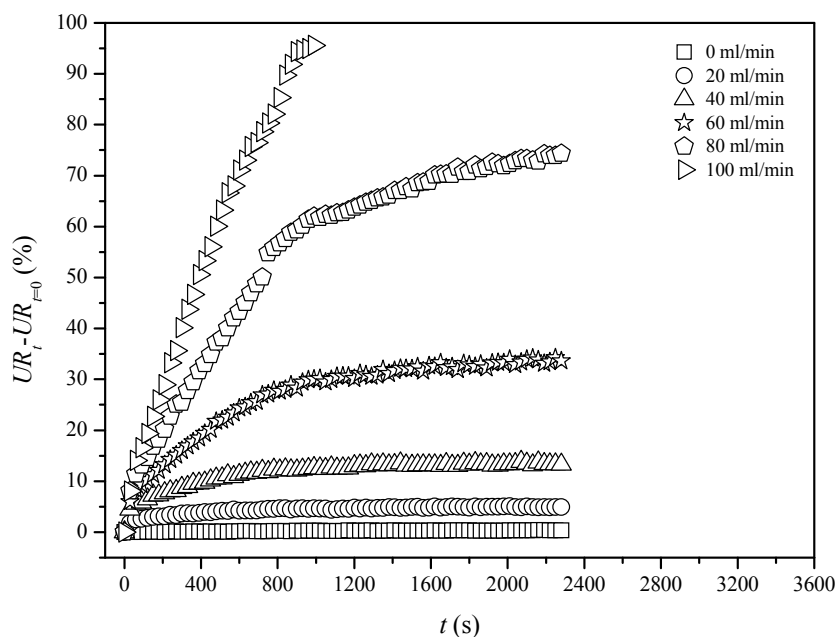


Figura 4.23 - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

Os dados de umidade relativa obtidos na evaporação de água foram bastante semelhantes para ambos os leitos de jorro e condições experimentais estudadas. Pode-se constatar que o tempo necessário para o sistema alcançar o regime permanente pode variar significativamente dependendo das condições temperatura, velocidade do ar de entrada e vazão de alimentação aplicada.

De acordo com os dados da Figura 4.22, onde o leito operou sob condições de 80 °C - 1.15 u_{mj} , o tempo necessário para o sistema entrar em regime permanente foi de aproximadamente 1200 s para a vazão de alimentação de 20 ml/min e 1800 s para a vazão de alimentação de 40 ml/min. Para o leito operando sob condições de 100 °C - 1.30 u_{mj} , Figura 4.23, este tempo foi de aproximadamente em 800 s para a vazão de alimentação de 20 ml/min e 1400 s para a vazão de alimentação de 60 ml/min.

Outro aspecto importante verificado nos dados de umidade relativa da evaporação de água foi que essa alcançou seus maiores valores na temperatura de 80 °C e

velocidade do ar de entrada $1,15 u_{mj}$. Neste caso o potencial de evaporação do ar foi melhor aproveitado. A possível explicação para isso está na estrutura do leito de jorro com suas regiões anular e de jorro. Um aumento na velocidade do ar de entrada normalmente é mais canalizado para a região de jorro, tendo pouca influência na região anular. Este fenômeno, já relatado na análise dos dados de velocidade das partículas nas regiões de jorro e fonte (Figura 4.7), também foi verificado no trabalho de Oliveira *et al.* (1994). De acordo com esses autores, a fração de água evaporada na região anular tende a diminuir com o aumento na relação u/u_{mj} e também com o aumento da temperatura.

Os dados de umidade relativa obtidos para a evaporação de água nas outras condições operacionais estudadas estão apresentados nas Figuras B1 a B4 do Apêndice B.

Nas Figuras 4.24 a 4.27 são apresentados os dados de umidade relativa em função do tempo para as secagens de lodo de esgoto, leite desnatado, ovo homogeneizado e $\text{CaCO}_3 - CI$ realizadas no leito de jorro de coluna cheia sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C} - 1,30 u_{mj}$.

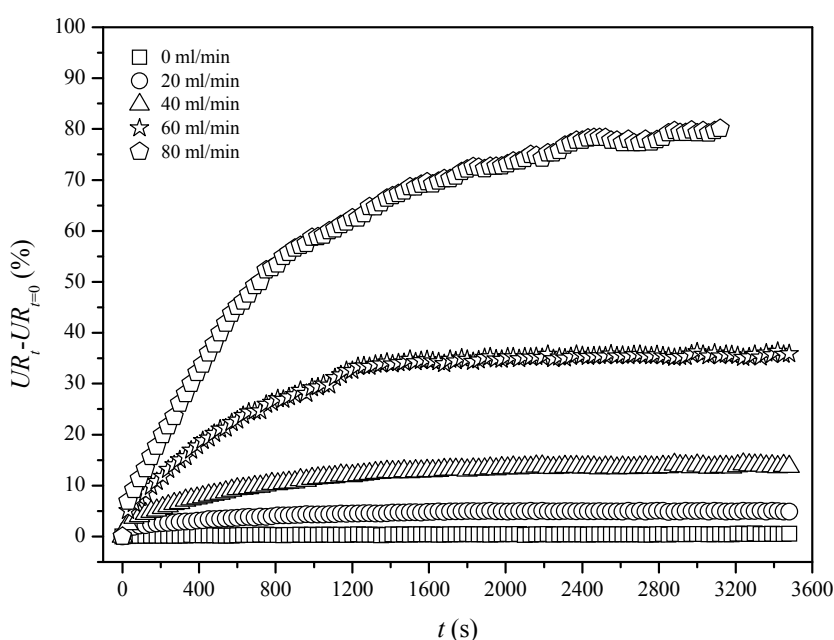


Figura 4.24 - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de lodo de esgoto sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C} - 1,30 u_{mj}$.

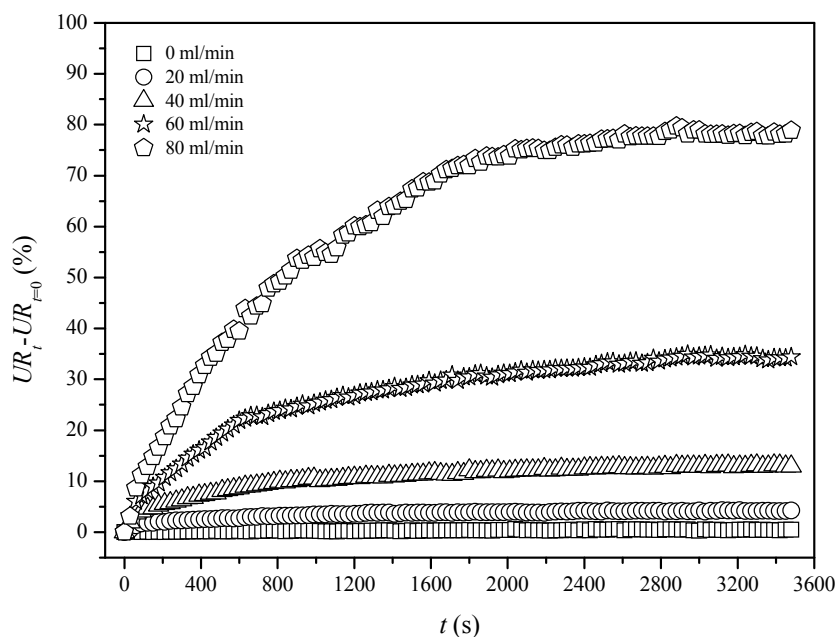


Figura 4.25 - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de leite desnatado sob condições de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $1,30 u_{mj}$.

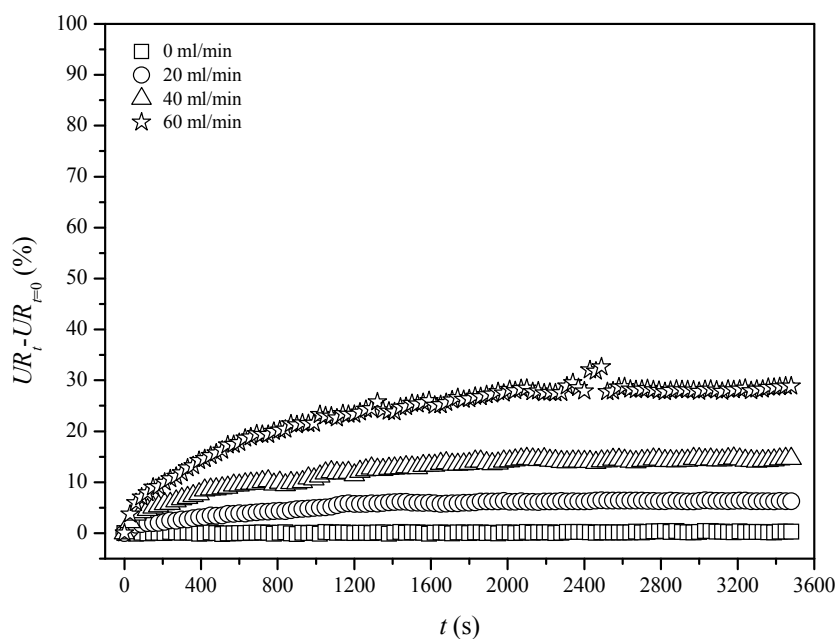


Figura 4.26 - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $1,30 u_{mj}$.

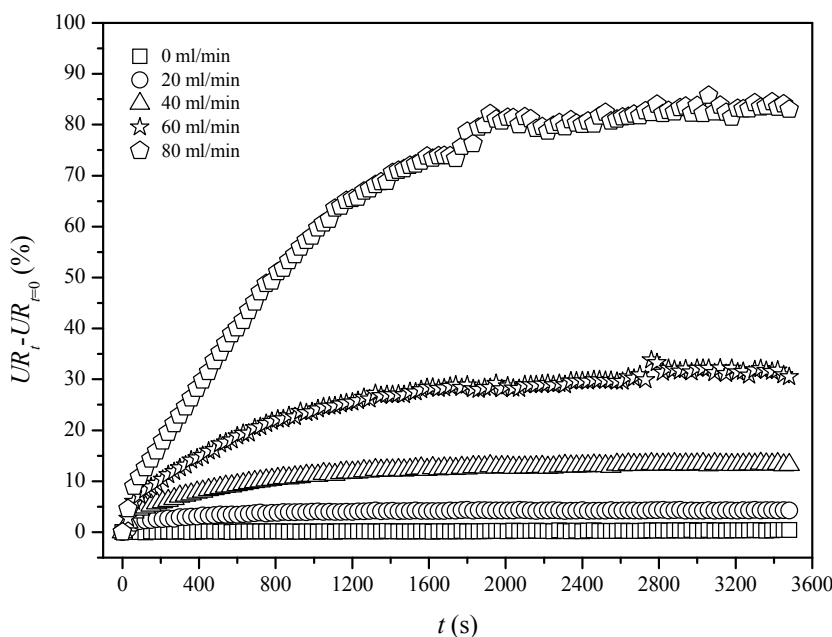


Figura 4.27 - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de $\text{CaCO}_3 - CI$ sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C} - 1,30 u_{mj}$.

A comparação dos dados contidos nas Figuras 4.24 a 4.27 com os dados apresentados na Figura 4.23 mostram que o comportamento da umidade relativa foi bastante similar para a água, lodo de esgoto, leite desnatado, ovo homogeneizado e $\text{CaCO}_3 - CI$. Esta semelhança é verificada tanto no tempo em que o sistema levou para atingir o regime permanente, como na umidade relativa máxima alcançada para cada vazão de alimentação aplicada. Sob condições de $80\text{ }^\circ\text{C} - 1,15 u_{mj}$ a umidade relativa máxima alcançada foi de 10 % para vazão de alimentação de 20 ml/min e 35 % para vazão de alimentação de 40 ml/min, conforme exemplo da Figura 4.22. Para as condições de $100\text{ }^\circ\text{C} - 1,30 u_{mj}$, Figuras 4.23 a 4.27, a umidade relativa máxima atingida foi de 5 % para vazão de alimentação de 20 ml/min e 30 % para vazão de alimentação de 60 ml/min.

A similaridade nos dados de umidade relativa foi obtida também para o CaCO_3 mesmo alimentado em diferentes concentrações. Isto é verificado na comparação da Figura

4.27 com as Figuras 4.28 e 4.29, onde são mostrados os dados da umidade relativa em função do tempo para secagens de $\text{CaCO}_3 - \text{C2}$ e $\text{CaCO}_3 - \text{C3}$ sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C} - 1,30 u_{mj}$.

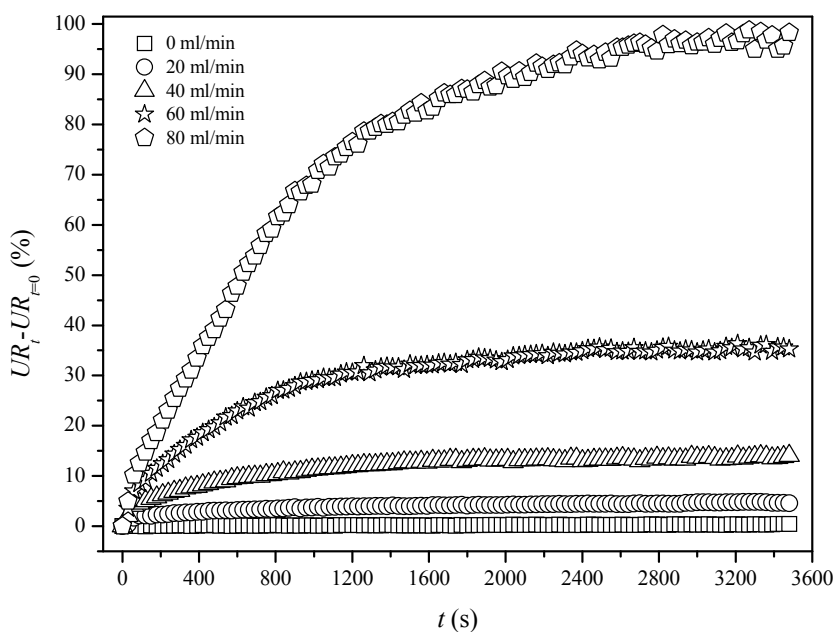


Figura 4.28 - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de $\text{CaCO}_3 - \text{C2}$ sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C} - 1,30 u_{mj}$.

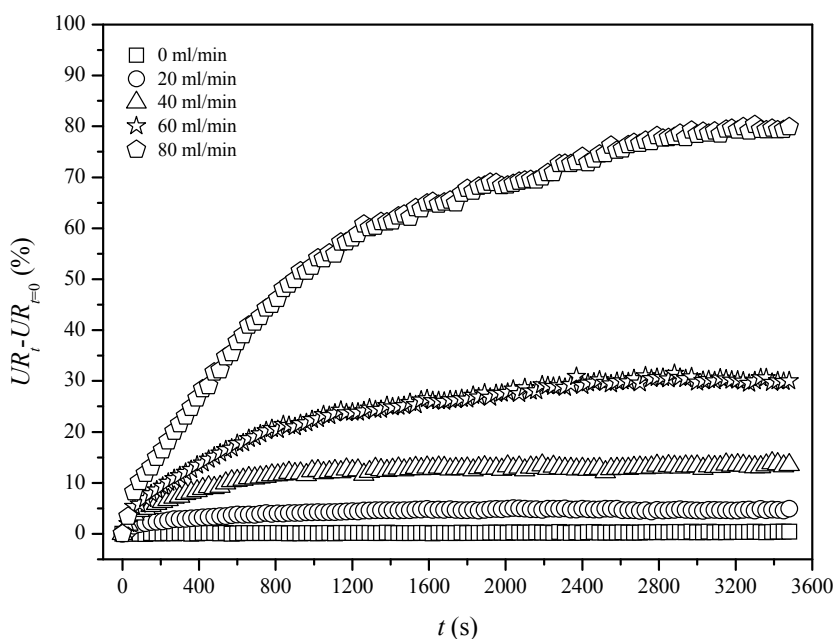


Figura 4.29 - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de $\text{CaCO}_3 - \text{C3}$ sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C} - 1,30 u_{mj}$.

Os dados de umidade relativa obtidos nas secagens de lodo de esgoto, leite desnatado e ovo homogeneizado realizadas no leito de jorro de coluna cheia sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} estão apresentados nas Figuras B5 a B7 do Apêndice B

Nas Figuras 4.30 e 4.31 são mostrados os resultados da umidade absoluta em função do tempo para as secagens de lodo de esgoto realizadas no leito de jorro de coluna cheia sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} e 100 °C - 1,30 u_{mj} .

Tal como observado nas curvas de umidade relativa (Figuras 4.22 a 4.29), o comportamento da umidade absoluta também foi semelhante para todas as pastas e condições operacionais estudadas. Constatou-se, por simples observação dos dados, que independente da vazão do ar de entrada no leito, para uma dada temperatura há sempre uma quantidade máxima de água que o ar de jorro pode absorver (0,018 $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$ para a temperatura de 80 °C e 0,023 $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$ para a temperatura de 100 °C, aproximadamente), e esses valores são atingidos logo nos primeiros instantes da secagem.

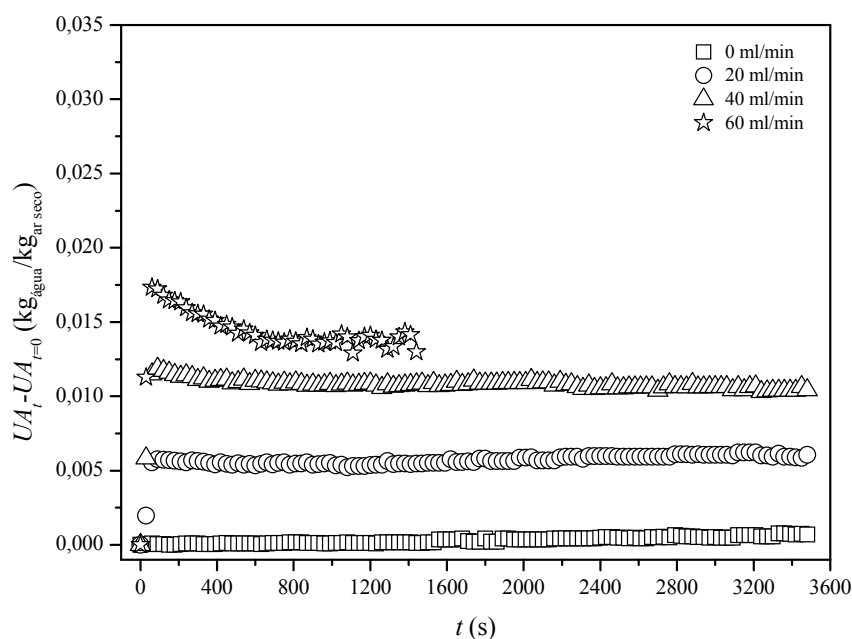


Figura 4.30 - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de lodo de esgoto sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

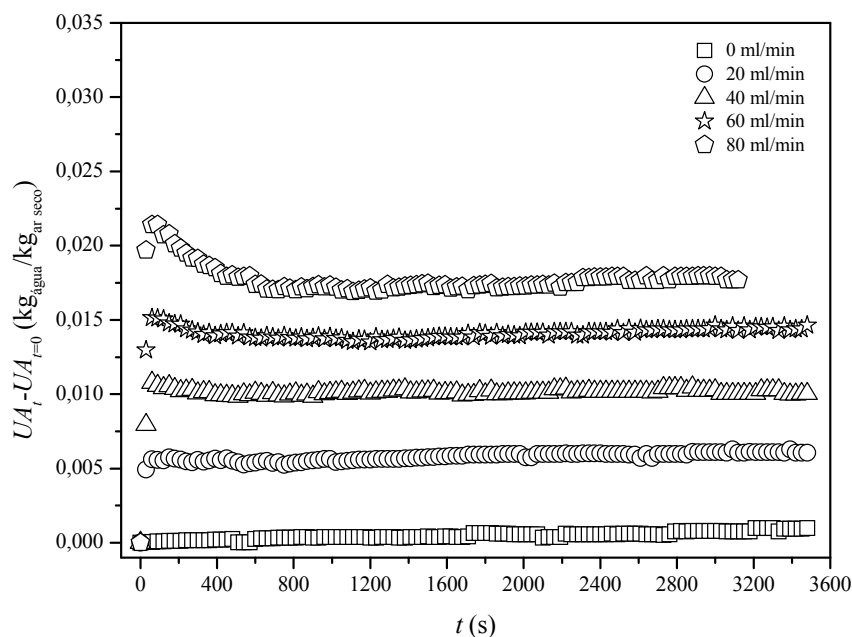


Figura 4.31 - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de lodo de esgoto sob condições de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $1,30 u_{mj}$.

Outro fenômeno verificado na análise dos dados de umidade absoluta foi uma diminuição no valor desse parâmetro ao longo do tempo nos níveis superiores de vazão de alimentação aplicados. Essa diminuição pode ter sido causada por uma redução na porosidade do leito na região anular, que conseqüentemente provoca uma canalização do ar para a região de jorro. Com isto o ar de secagem terá uma menor área de contato para a transferência de massa.

Os dados de umidade absoluta obtidos na evaporação de água e secagens de leite desnatado, ovo homogeneizado, CaCO_3 - C1, CaCO_3 - C2 e CaCO_3 - C3 estão apresentados nas Figuras C1 a C13 do Apêndice C.

As Figuras 4.32 a 4.34 apresentam a temperatura do leito de partículas em função do tempo nas posições axiais de 0,12, 0,20 e 0,24 m do leito de jorro de coluna cheia, respectivamente, para as secagens de CaCO_3 - C2 sob condições de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $1,30 u_{mj}$.

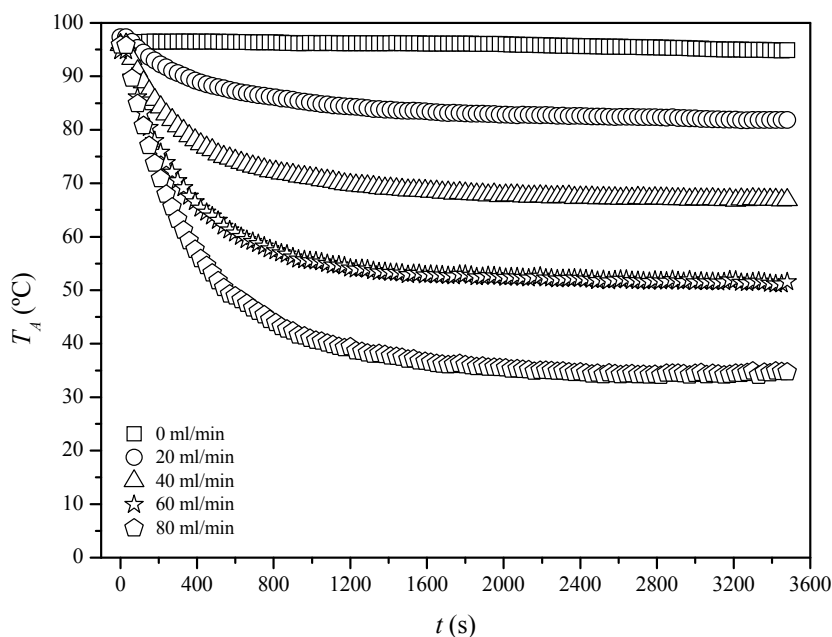


Figura 4.32 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,12 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de CaCO_3 - C2 sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$.

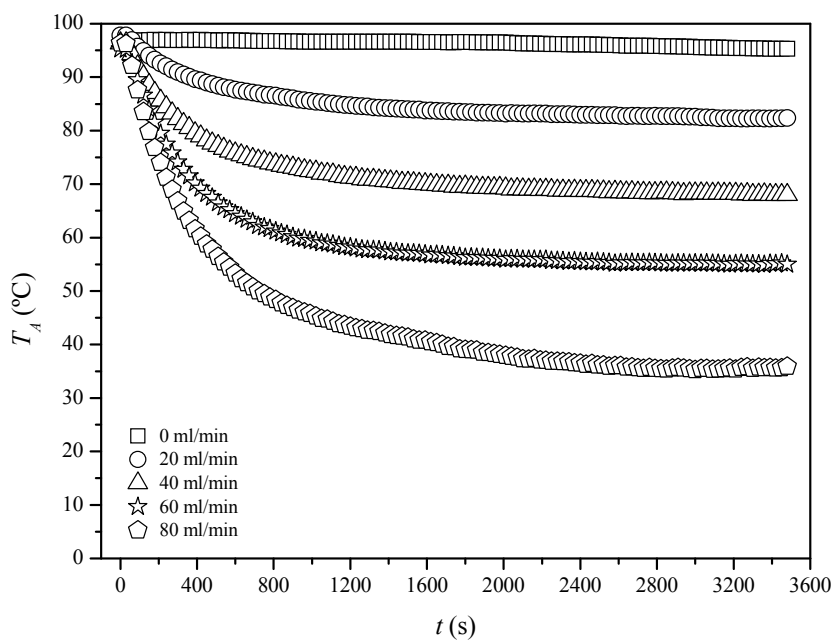


Figura 4.33 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,20 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de CaCO_3 - C2 sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$.

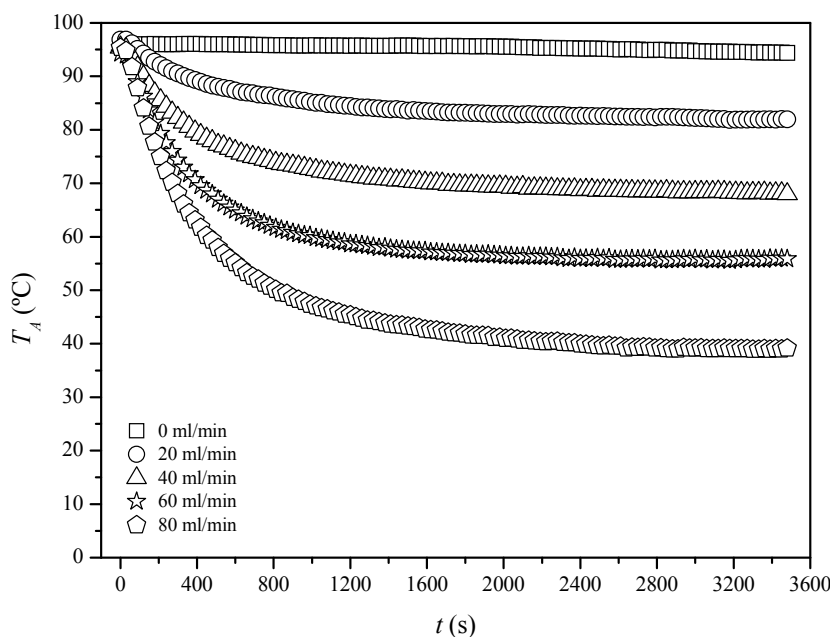


Figura 4.34 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,24 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de $\text{CaCO}_3 - \text{C2}$ sob condições de $100^\circ\text{C} - 1,30 u_{mj}$.

Os dados obtidos para a temperatura do leito de partículas foram, novamente, semelhantes para todas as pastas e condições operacionais estudadas, conforme exemplos das Figuras 4.32 a 4.34. De acordo com os resultados, a diferença de temperatura entre as três posições axiais analisadas não foram significativas. Para as vazões de alimentação inferiores a 40 ml/min o ΔT_A nos eixos axiais de 0,12, 0,20 e 0,24 m foi inferior $1,5^\circ\text{C}$. Nas vazões de alimentação superiores a 60 ml/min o ΔT_A foi de aproximadamente 4°C . Este comportamento também foi obtido nos trabalhos de Guo *et al.* (1996), Xu *et al.* (1998) e Spitzner Neto (2001) e indica, mais uma vez, que o leito de jorro em operação de secagem comporta-se como um tanque perfeitamente agitado, tal como sugerido por Mathur e Epstein (1974).

No Apêndice D estão apresentados os dados da temperatura do leito de partículas obtidos para as outras pastas e condições operacionais estudadas, Figuras D1 a D36.

As Figuras 4.35 a 4.38 apresentam os adimensionais de queda de pressão, do leito de jorro de coluna cheia, em função do tempo para a evaporação de água e secagens de

lodo de esgoto, leite desnatado e ovo homogeneizado, respectivamente, sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

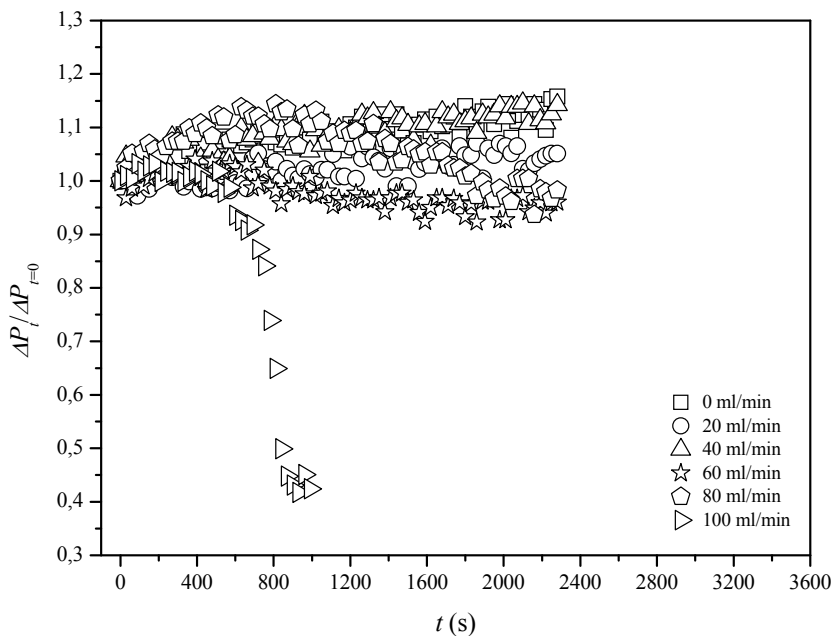


Figura 4.35 - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

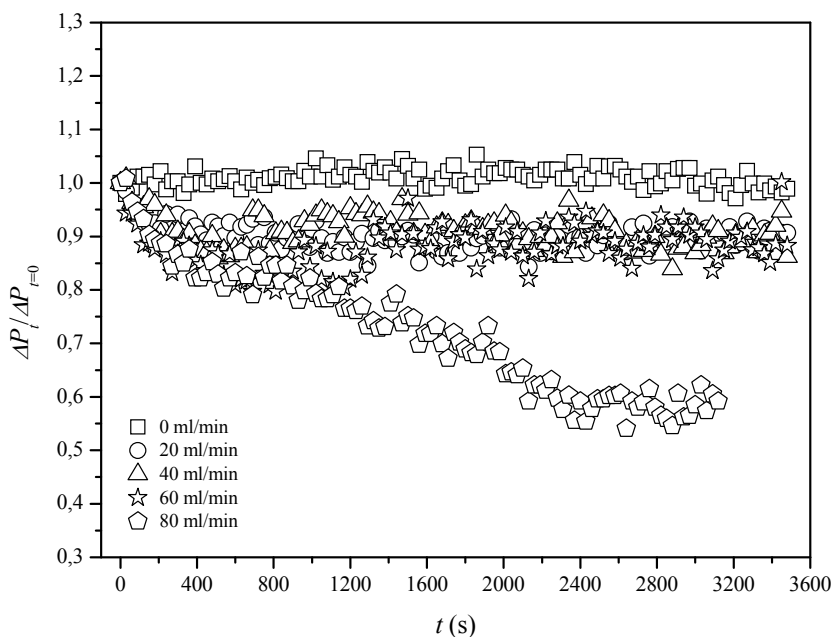


Figura 4.36 - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de lodo de esgoto sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

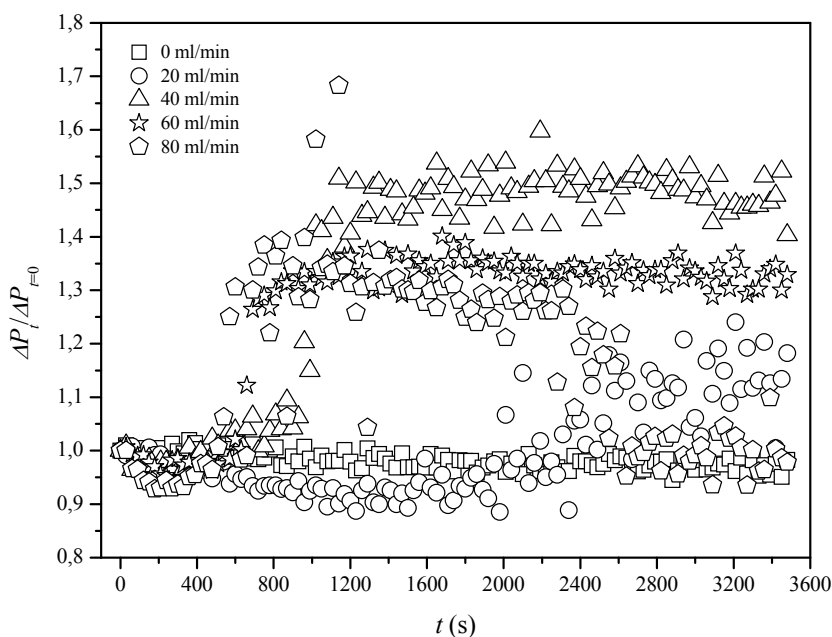


Figura 4.37 - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de leite desnatado sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

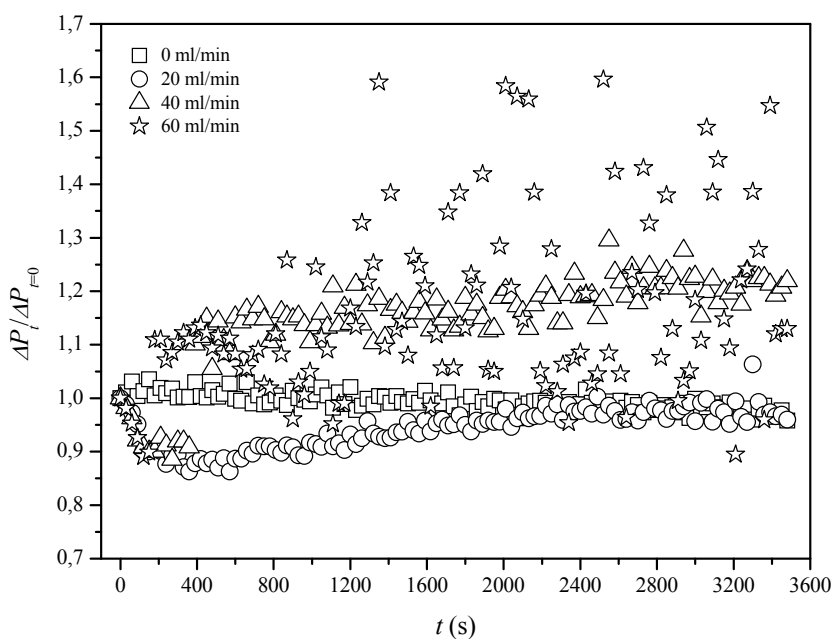


Figura 4.38 - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

De acordo com os dados apresentados nessas figuras, a queda de pressão no leito de jorro pode sofrer modificações significativas que dependem tanto das características

físicas da pasta como da vazão de alimentação aplicada. Para os experimentos de evaporação de água e secagem de lodo, Figuras 4.35 e 4.36, foi observado que o $\Delta P_t/\Delta P_{t=0}$ teve uma queda significativa nas maiores vazões de alimentação aplicadas. Por outro lado, os experimentos de secagem de leite desnatado e ovo homogeneizado, Figura 4.37 e 4.38, mostraram que o $\Delta P_t/\Delta P_{t=0}$ sofreu um aumento no seu valor para todas as vazões de alimentação inseridas. Este comportamento também foi obtido nas outras condições experimentais estudadas nos leitos de jorro em meia coluna e coluna cheia e estão apresentados na Figuras E1 a E8 do apêndice E.

Os resultados experimentais de queda de pressão obtidos para a evaporação de água e secagem de lodo concordam com os dados apresentados nos trabalhos de Patel *et al.* (1986), Schneider e Bridgwater (1993), Spitzner Neto (1997, 2001), Cunha (1999), Passos e Mujumdar (2000), Spitzner Neto *et al.* (2002), Medeiros *et al.* (2004) e Bacelos *et al.* (2005). Tal como exposto no Capítulo 2, a redução na queda de pressão do leito pode ter sido causada pelo fato da vazão do ar na região anular ser reduzida à medida que uma substância líquida ou pastosa é adicionada ao leito. Por consequência ocorre uma canalização do ar para a região de jorro, reduzindo a queda de pressão global. Ressalta-se também que outro fator que pode ter contribuído para isto é que a presença da pasta ou do líquido no leito aumenta as forças de interação entre as partículas. Assim, uma menor quantidade de partículas saem da região anular para a região de jorro, diminuindo então o movimento global na região anular.

Com relação ao aumento na queda de pressão obtido nos experimentos de secagem de leite desnatado e ovo homogeneizado, foi verificado que os trabalhos de Passos *et al.* (1990), Santana *et al.* (1997) e Passos e Mujumdar (2000) apresentaram comportamentos semelhantes em determinadas condições operacionais onde o conteúdo de líquido presente no leito era baixo.

Até o momento discutiu-se os resultados da queda de pressão de quatro pastas distintas (água, lodo de esgoto, leite desnatado e ovo homogeneizado) com concentrações de sólidos diferentes. A fim de analisar o efeito da concentração de sólidos, são mostrados nas Figuras 4.39 a 4.41 os adimensionais de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para as secagens de CaCO_3 nas concentrações $C1$, $C2$, $C3$ sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30 u_{mj}$.

Segundo os dados mostrados na Figura 4.39, o $\Delta P_t/\Delta P_{t=0}$ sofreu uma diminuição no seu valor inicial quando CaCO_3 foi alimentado com concentração $C1= 3,02\%$. Para o CaCO_3 sendo alimentado com concentrações $C2= 5,74$ e $C3= 9,24\%$, Figuras 4.40 e 4.41, respectivamente, foi observado que o $\Delta P_t/\Delta P_{t=0}$ teve um aumento significativo no seu valor inicial no decorrer das secagens.

Este comportamento da queda de pressão do leito para o CaCO_3 nas concentrações $C1$, $C2$, $C3$ está de acordo com as discussões apresentadas por Santana *et al.* (1997), onde esses autores postularam a hipótese de que pode haver dois tipos de forças de interação interpartículas agindo em leitos de jorro úmidos.

A primeira força se refere a baixos conteúdos de líquidos onde a camada de recobrimento é muito fina. Neste caso, as pontes líquidas são muito fracas e estas atuam como lubrificante, o que facilita o deslocamento das partículas da região anular para a região de jorro, aumentando assim a queda de pressão. A segunda força de interação ocorre quando o conteúdo de líquido é aumentado acima de um valor limite onde a camada de recobrimento na superfície da partícula torna-se espessa o suficiente para promover pontes líquidas mais fortes. Este fato provoca uma redução tanto na porosidade da região anular como na taxa de circulação das partículas, ocasionando uma diminuição na queda de pressão.

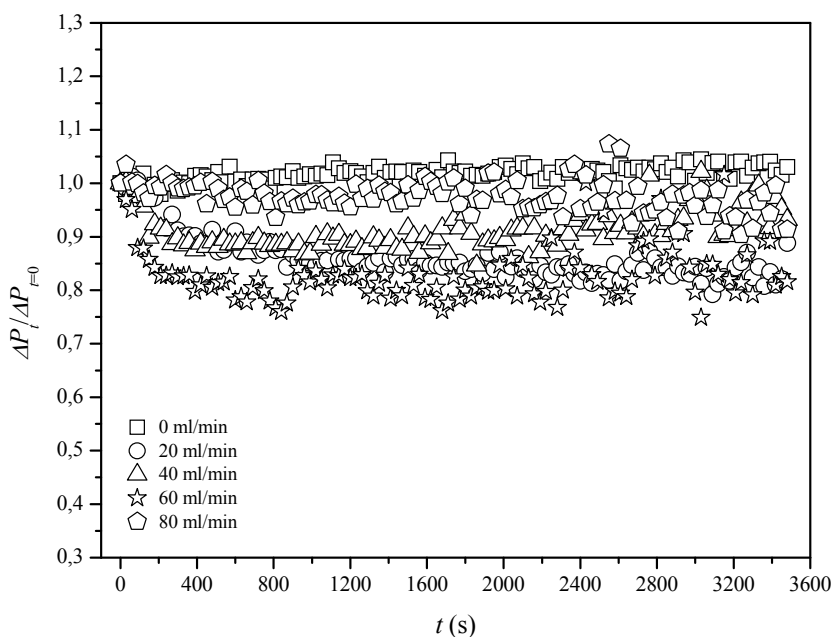


Figura 4.39 - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de CaCO_3 - C1 sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$.

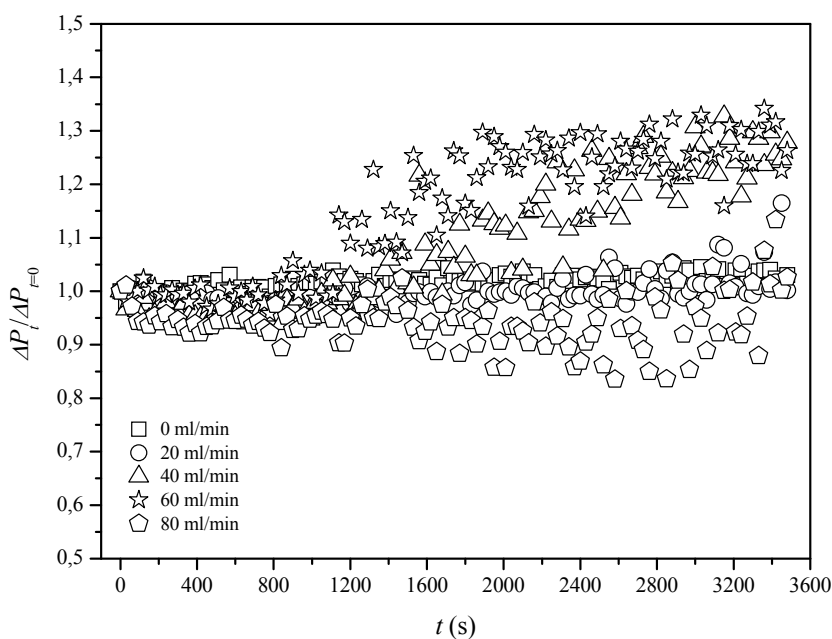


Figura 4.40 - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de CaCO_3 - C2 sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$.

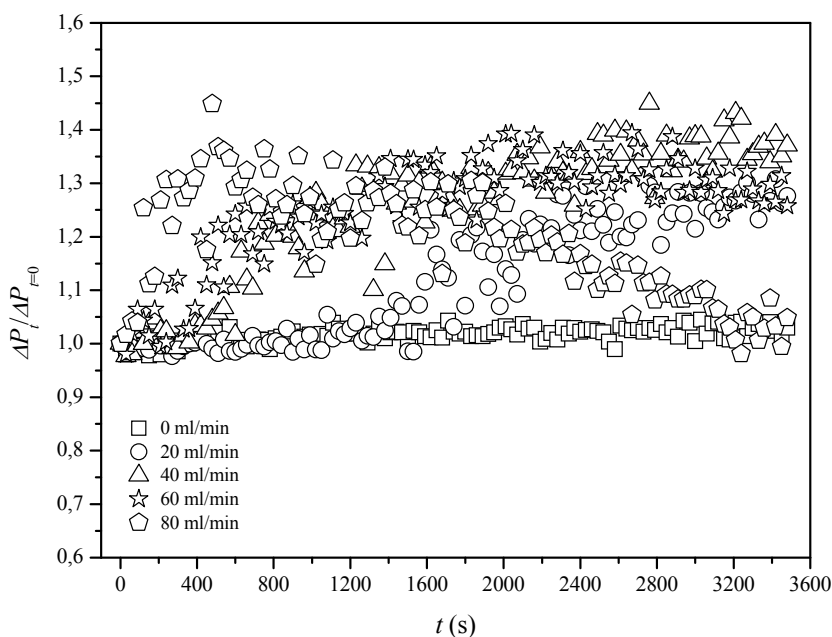


Figura 4.41 - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de $\text{CaCO}_3 - \text{C3}$ sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C} - 1,30 u_{mj}$.

As modificações ocorridas na queda de pressão do leito provocaram também alterações no comportamento da velocidade do ar de entrada. Essas alterações podem ser visualizadas nas Figuras 4.42 e 4.43, onde são apresentados os adimensionais de velocidade do ar de entrada, do leito de jorro de coluna cheia, em função do tempo para as secagens de lodo de esgoto e $\text{CaCO}_3 - \text{C3}$, respectivamente, sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C} - 1,30 u_{mj}$.

Os dados experimentais de velocidade do ar de entrada obtidos para as outras pastas e condições experimentais estudadas nos leitos de jorro em meia coluna e coluna cheia foram semelhantes aos mostrados nas Figuras 4.42 e 4.43 e estão apresentados nas Figuras F1 a F13 do Apêndice F.

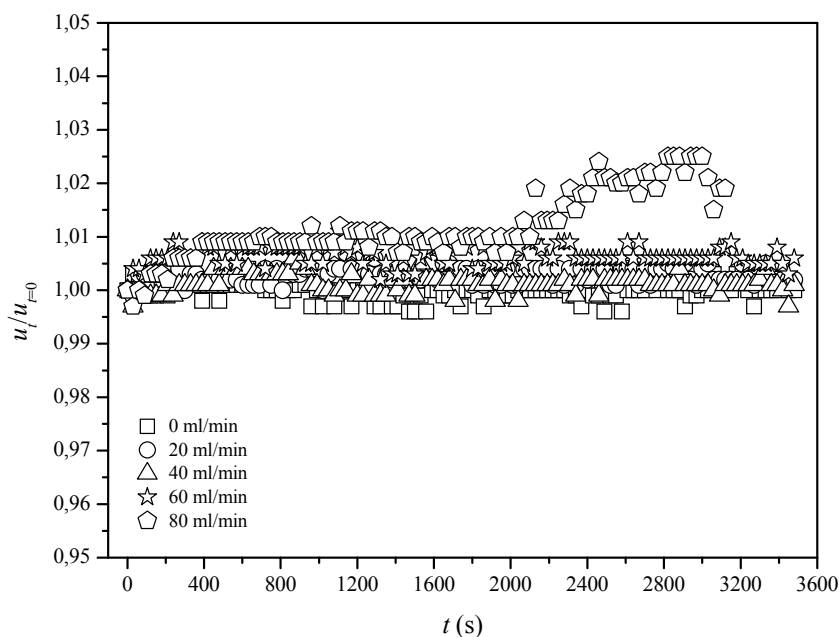


Figura 4.42 - Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de lodo de esgoto sob condições de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $1,30 u_{mj}$.

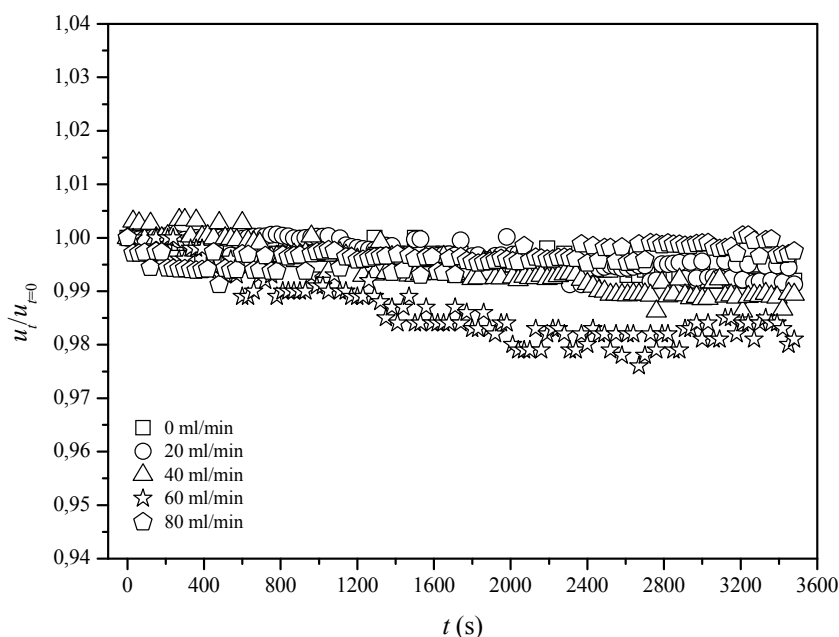


Figura 4.43 - Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de CaCO_3 - C3 sob condições de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $1,30 u_{mj}$.

Para melhor explicar o comportamento da queda de pressão do leito e da velocidade do ar de entrada, pode-se fazer uma analogia com a lei de *Ohm*. Nesta é conhecido

que a força motriz do processo (ΔP) está vinculada à corrente (u) através da resistência do meio (estrutura do leito de partículas). Desse modo, comparações entre os dados de queda de pressão do leito e velocidade do ar de entrada mostram que quando o $\Delta P_t/\Delta P_{t=0}$ diminuiu (Figura 4.36), $u_t/u_{t=0}$ aumentou (Figura 4.42). Por outro lado, quando o $\Delta P_t/\Delta P_{t=0}$ aumentou (Figura 4.41), $u_t/u_{t=0}$ diminuiu (Figuras 4.43). Este comportamento fluidodinâmico do sistema mostra coerência física nos dados experimentais obtidos, visto que uma diminuição no $\Delta P_t/\Delta P_{t=0}$ possivelmente está relacionado com uma redução no fluxo de sólidos na região de jorro, que conseqüentemente aumenta a área de seção transversal dessa região e a relação $u_t/u_{t=0}$. O comportamento inverso também é verdadeiro, um aumento no $\Delta P_t/\Delta P_{t=0}$ pode ter sido provocado por um acréscimo no fluxo de sólidos na região de jorro, o que ocasiona uma diminuição na área de seção transversal dessa região e na relação $u_t/u_{t=0}$. Assim, para todas as situações analisadas a consistência de uma lei *Ôhmica* foi verificada.

Na literatura existe uma discordância nos dados de velocidade do ar de jorro entre os pesquisadores que utilizaram o glicerol para simular a presença da fase líquida no interior do leito (Patel *et al.*, 1986; Passos *et al.*, 1990; Schneider e Bridgwater, 1993; Santana *et al.*, 1997; Passos e Mujumdar, 2000; Spitzner Neto, 2001; Spitzner Neto *et al.*, 2002; Bachelos *et al.*, 2005) e os que avaliaram o comportamento desta variável com pastas reais (Reyes, 1993; Spitzner Neto, 1997 e 2001; Cunha, 1999; Spitzner Neto *et al.*, 2002; Bachelos *et al.*, 2005; Medeiros *et al.*, 2004).

Nos trabalhos que usaram o glicerol foi verificado que a relação $u_t/u_{t=0}$ diminui com o aumento do conteúdo de líquido, enquanto os trabalhos que utilizaram pastas reais foi observado que esta variável aumenta à medida que o conteúdo de pasta é aumentado.

Como exposto na revisão bibliográfica, Bachelos *et al.* (2005) relataram que esta diferença entre o comportamento da velocidade do ar de jorro observado para o glicerol e para

a pasta real pode ser explicada devido ao glicerol formar pontes líquidas, enquanto a pasta real promove pontes “quase sólidas” com o leito de partículas inertes. Esta explicação foi fundamentada através da análise dos dados experimentais de Spitzner Neto (2001) e Spitzner Neto *et al.* (2002), onde esses autores verificaram que as partículas inertes recobertas durante a secagem possuem uma umidade muito próxima a do pó coletado na saída do sistema, indicando que o filme de recobrimento das pastas reais é formado por partículas de pó e não por um filme líquido.

As observações experimentais de Spitzner Neto (2001) e Spitzner Neto *et al.* (2002) sobre a umidade do recobrimento formado nas partículas inertes e umidade do pó coletado também foram verificadas neste trabalho.

Nas Tabelas 4.3 e 4.4 são mostradas a umidade do pó de ovo homogeneizado em função do tempo e a umidade do recobrimento formado nas partículas inertes, respectivamente. Os dados de umidade obtidos para as outras pastas estudadas são apresentados nas Tabelas G1 e G2 do Apêndice G.

A comparação dos resultados apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4 mostram que a umidade do recobrimento formado nas partículas inertes é muito próxima à do pó coletado na saída do sistema experimental, com exceção para as maiores vazões de alimentação de pasta onde o leito apresentou problemas operacionais e de instabilidade.

O comportamento da umidade da fase sólida presente no leito além de ressaltar que o filme de recobrimento das pastas reais é formado por partículas de pó também reforça o que foi obtido anteriormente nos perfis de temperatura das partículas, onde detectou-se que o leito de jorro em operação de secagem estável comporta-se como um tanque perfeitamente agitado.

Contudo, a semelhança entre as umidades do pó produzido e do recobrimento formado geram uma grande incógnita. Se o material injetado é uma pasta com elevado teor de

umidade e ela torna-se rapidamente um pó com baixo conteúdo de umidade, onde ocorre a secagem?

Tabela 4.3 - Umidade do pó de ovo homogeneizado em função do tempo.

Pasta	Q_p (ml/min)	Condições	U (%)				
			0-10 min	10-20 min	20-30 min	30-40 min	40-60 min
Ovo homogeneizado	20	80 °C - 1,15 u_{mj}	5,63	5,11	4,67	4,33	4,38 ±0,10
			5,83	6,22	-	-	-
	40	100 °C - 1,30 u_{mj}	3,96	3,93	3,68	3,30	3,34 ±0,12
			4,48	3,86	3,91	4,15	4,22 ±0,09
	60		4,26	4,56	5,08	5,03	5,11 ±0,11

Tabela 4.4 - Umidade do recobrimento de ovo homogeneizado formado nas partículas inertes.

Pasta	Q_p (ml/min)	Condições	U (%)		
			Amostragem em 0,16 m	Amostragem em 0,22 m	Amostragem em 0,22 m
Ovo homogeneizado	20	80 °C - 1,15 u_{mj}	6,16 ±0,84	7,02 ±0,60	7,02 ±0,60
			6,86 ±0,54	7,33 ±0,28	7,33 ±0,28
	40	100 °C - 1,30 u_{mj}	4,69 ±0,46	3,53 ±0,26	3,53 ±0,26
			5,18 ±0,22	6,22 ±0,50	6,22 ±0,50
	60		3,49 ±0,17	4,86 ±0,17	4,86 ±0,17

Para explicar este fato, Spitzner Neto (2001) postulou duas hipóteses. Na primeira, explica que a secagem pode estar ocorrendo rapidamente em uma pequena altura de leito e na segunda, que a secagem pode ocorrer ao longo de todo o leito, visto que se o sistema comporta-se como um tanque perfeitamente agitado a inserção de uma pequena quantidade de pasta provoca a sua diluição imediata. Neste caso, a presença do filme líquido é mascarada pela presença do filme sólido, dando a impressão que a secagem ocorre instantaneamente.

4.5 Análise da simulação com o modelo *CST*

Para verificar aplicabilidade do modelo *CST* na descrição do comportamento térmico e mássico do leito de jorro foram realizadas simulações para as secagens de lodo de esgoto, leite desnatado, ovo homogeneizado e CaCO_3 - *C1*, *C2* e *C3*. Um exemplo do programa desenvolvido em modo MATLAB é mostrado no Apêndice H.

Nas Figuras 4.44 a 4.49, referentes às secagens de ovo homogeneizado sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\ u_{mj}$, são apresentadas comparações entre os dados experimentais e simulados para as umidades das fases gás e sólida e temperatura do gás de saída. Observa-se nessas figuras que o modelo *CST* descreve bem os resultados experimentais obtidos. Entretanto, foi verificado que à medida que a vazão de alimentação de ovo homogeneizado foi aumentada os dados fornecidos pelo modelo sofreram alguns desvios em relação aos experimentais, principalmente na descrição das umidades relativa e absoluta do gás de saída. Resultados semelhantes também foram obtidos para as simulações das secagens de ovo homogeneizado sob condições de $80\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,15\ u_{mj}$.

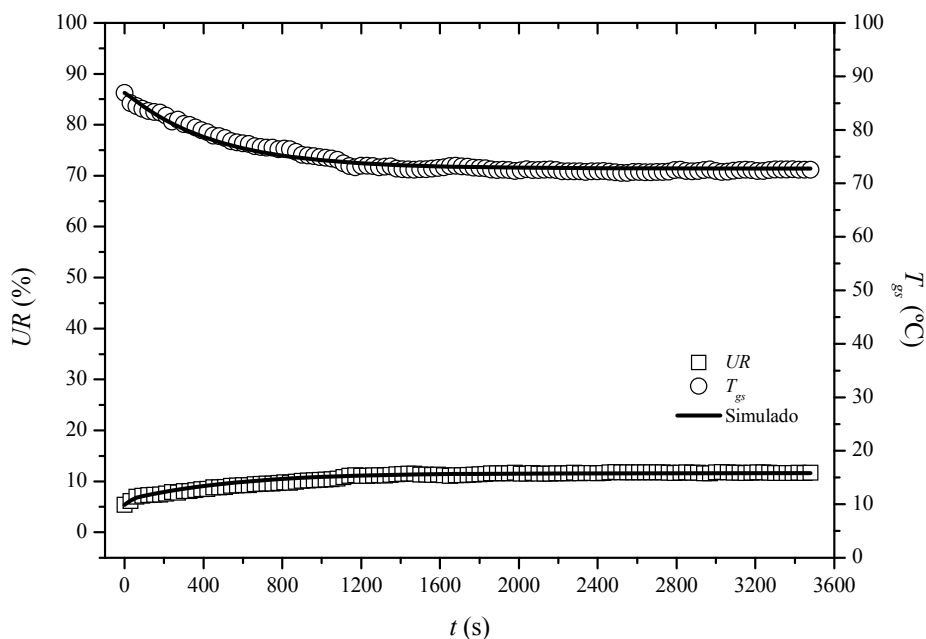


Figura 4.44 - Dados experimentais e simulados de umidade relativa e temperatura do gás de saída para a secagem de ovo homogeneizado sob vazão de alimentação de 20 ml/min e condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

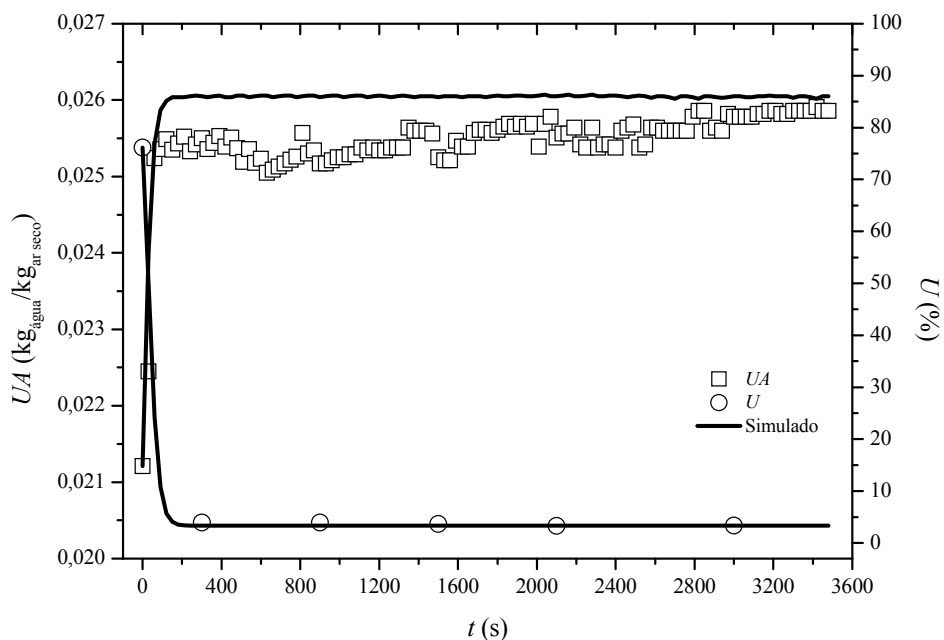


Figura 4.45 - Dados experimentais e simulados de umidade absoluta e umidade do pó produzido para a secagem de ovo homogeneizado sob vazão de alimentação de 20 ml/min e condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

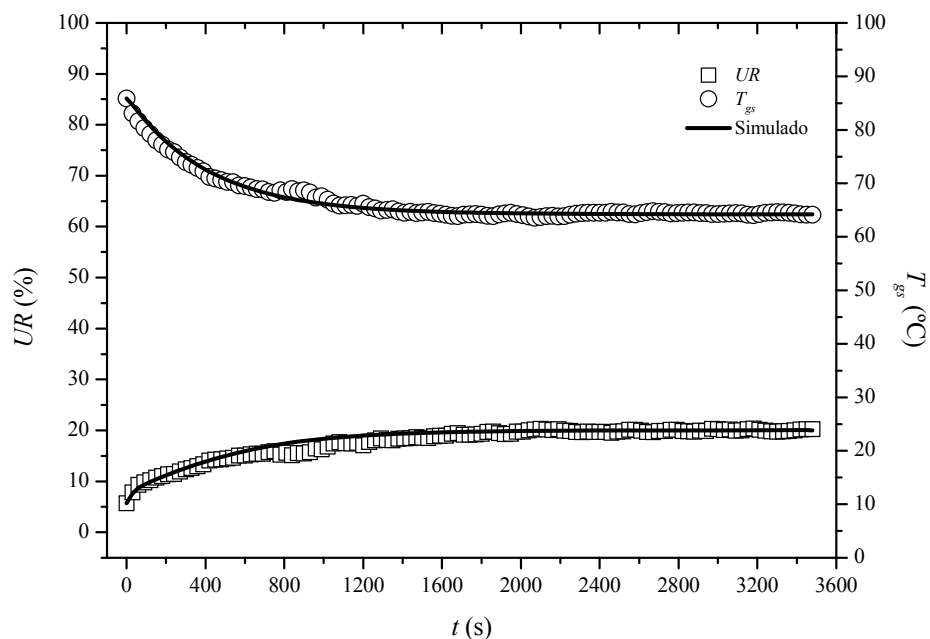


Figura 4.46 - Dados experimentais e simulados de umidade relativa e temperatura do gás de saída para a secagem de ovo homogeneizado sob vazão de alimentação de 40 ml/min e condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

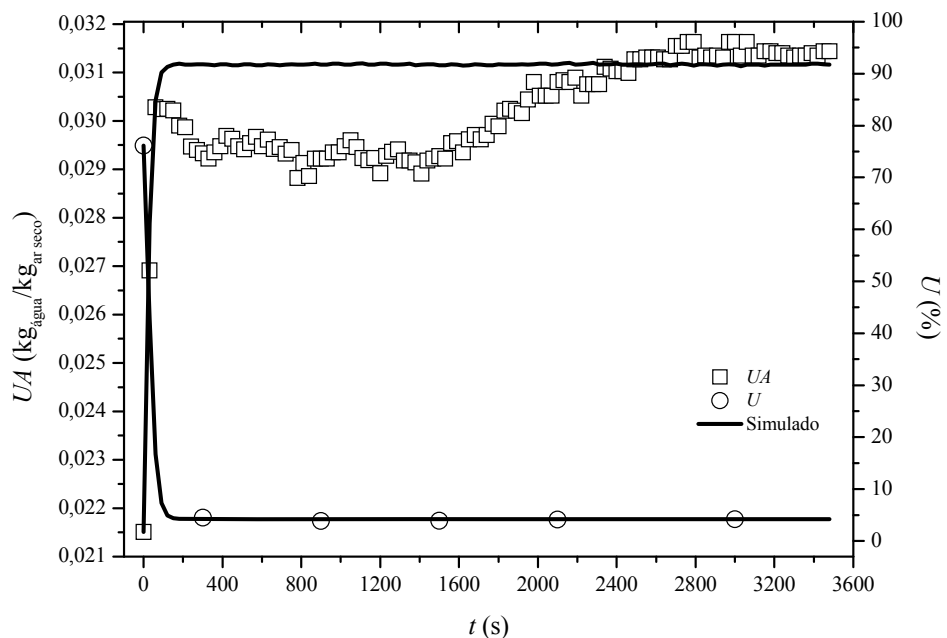


Figura 4.47 - Dados experimentais e simulados de umidade absoluta e umidade do pó produzido para a secagem de ovo homogeneizado sob vazão de alimentação de 40 ml/min e condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

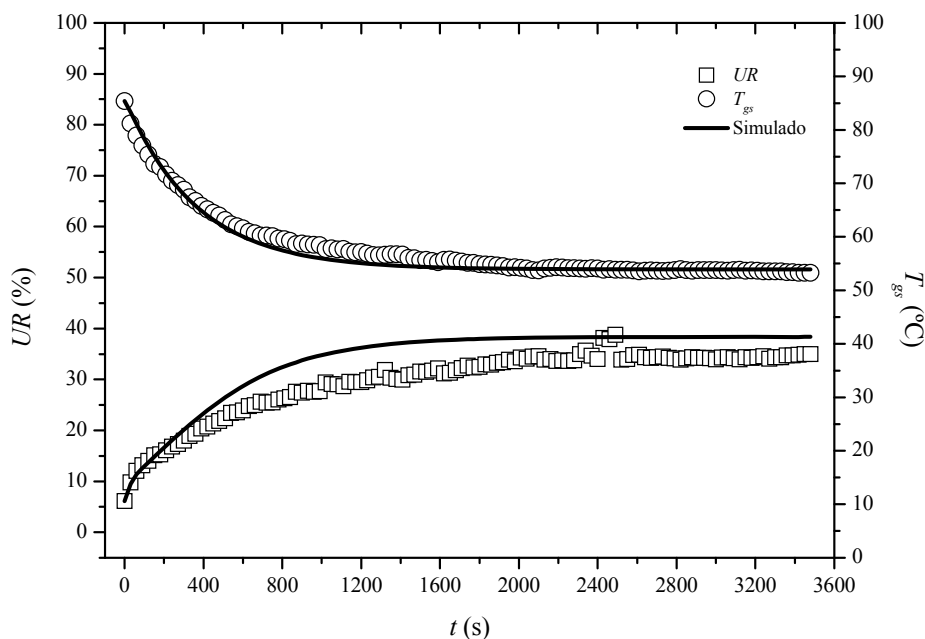


Figura 4.48 - Dados experimentais e simulados de umidade relativa e temperatura do gás de saída para a secagem de ovo homogeneizado sob vazão de alimentação de 60 ml/min e condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

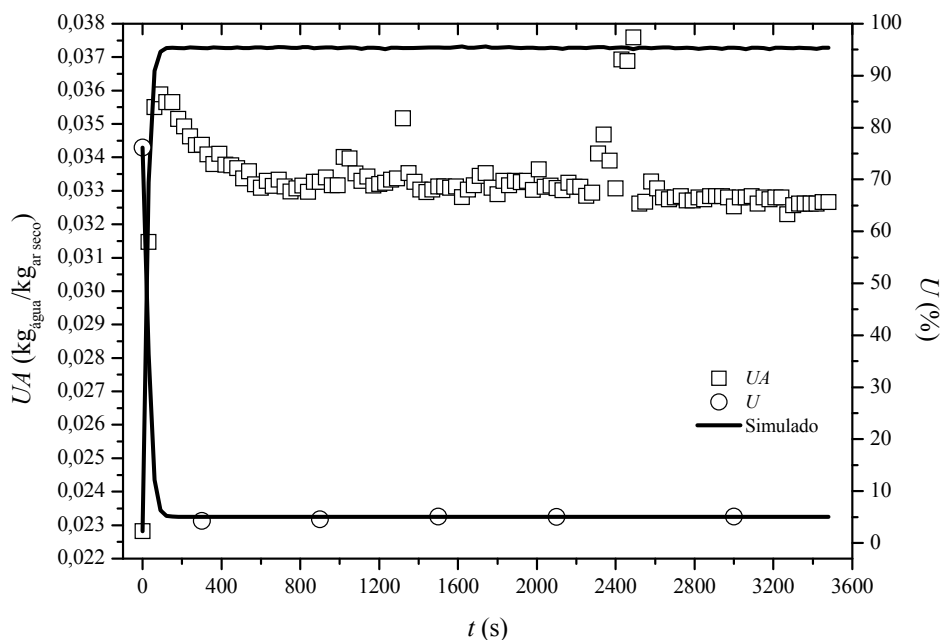


Figura 4.49 - Dados experimentais e simulados de umidade absoluta e umidade do pó produzido para a secagem de ovo homogeneizado sob vazão de alimentação de 60 ml/min e condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

A divergência encontrada entre os dados simulados e experimentais para as maiores vazões de alimentação de ovo homogeneizado pode ser explicada devido ao fato de que sob essas condições o leito apresentou grandes instabilidades fluidodinâmicas, conforme mostrado na análise dos adimensionais de queda de pressão e velocidade do ar de entrada. Devido a isto, a hipótese de que o leito de jorro em operação de secagem comporta-se como um tanque perfeitamente agitado pode não satisfazer mais o sistema.

Conforme apresentado no Capítulo 3, uma expressão exponencial que possui dois coeficientes de ajuste (a e b) foi usada para descrever o comportamento da taxa de secagem, Equação (3.8). Na Tabela 4.5 são apresentados os valores de a e b utilizados para ajustar os dados simulados aos experimentais da secagem de ovo homogeneizado. Encontram-se também nesta tabela os dados de entrada para as simulações e os valores usados para quantificar o coeficiente de transferência de calor por convecção do leito de jorro de coluna cheia com o ambiente.

Na Tabela 4.5 constata-se que os coeficientes de ajuste a e b são dependentes da temperatura do ar de entrada, velocidade do ar de jorro e vazão de alimentação de ovo homogeneizado. Essa dependência fica marcante quando se analisa o comportamento do coeficiente de ajuste a em função da vazão de alimentação, onde um aumento de 20 ml/min na vazão de ovo homogeneizado causou um aumento de aproximadamente 100 % nos valores de a . Da mesma maneira, coeficiente de ajuste b sofreu um aumento linear de 25 % para cada aumento de 20 ml/min na vazão de alimentação do ovo homogeneizado.

Tabela 4.5 - Dados de entrada usados nas simulações de secagem de ovo homogeneizado.

Pasta	Q_p (ml/min)	Condições	$UA_{t=0}$ (kg _{água} /kg _{ar seco})	$UR_{t=0}$ (%)	$T_{ge,t=0}$ (°C)	$T_{gs,t=0}$ (°C)	h (J/s cm ² K)	a (g/s)	b (1/s)
	0		0,019330	10,46	78,76	68,49	0,0005	-	-
	20	80 °C - 1,15 u_{mj}	0,016470	8,22	81,13	70,47	0,0008	0,25899	0,4 10 ⁻¹
	40		0,017660	9,44	79,04	68,83	0,0015	0,51460	0,5 10 ⁻¹
Ovo homogeneizado	0		0,019990	5,26	102,06	85,94	0,0007	-	-
	20	100 °C - 1,30 u_{mj}	0,021210	5,37	102,27	86,88	0,0011	0,25992	0,4 10 ⁻¹
	40		0,021510	5,67	100,21	85,83	0,0014	0,51828	0,5 10 ⁻¹
	60		0,022820	6,11	99,16	85,39	0,0019	0,77521	0,6 10 ⁻¹

Outro aspecto importante observado durante a execução das simulações foi uma grande dependência do parâmetro a com a concentração e densidade da pasta, onde pequenas variações nessas variáveis modificavam significativamente o valor da umidade do produto final.

Para avaliar a influência das propriedades físicas da pasta nos resultados simulados de umidade da fase sólida foi efetuada uma análise de sensibilidade paramétrica no modelo CST , onde a concentração da pasta foi variada em $\pm 4\%$ e a densidade da pasta variada em $\pm 1\%$.

Nas Figuras 4.50 e 4.51, referentes aos experimentos de secagem de ovo homogeneizado sob vazão de alimentação de 20 ml/min e condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} , são apresentados os dados obtidos na análise de sensibilidade paramétrica para a concentração e densidade da pasta, respectivamente.

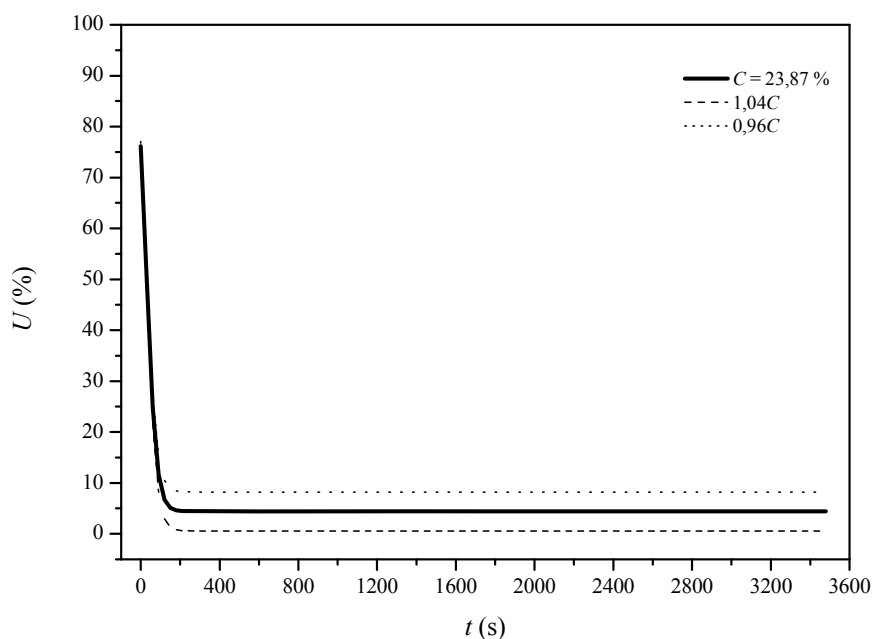


Figura 4.50 - Análise da variação na concentração do ovo homogeneizado para a secagem sob vazão de alimentação de 20 ml/min e condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

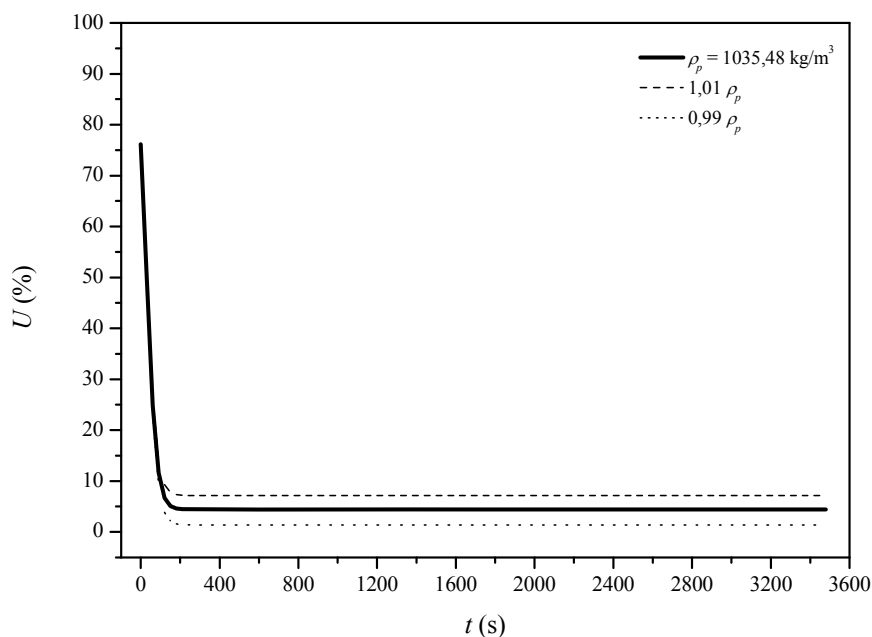


Figura 4.51 - Análise da variação na densidade do ovo homogeneizado para a secagem sob vazão de alimentação de 20 ml/min e condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

Na Figura 4.50 é observado que uma variação na concentração da pasta na ordem de ± 4 % provoca um desvio significativo nos resultados de umidade da fase sólida. Segundo cálculos, o desvio médio para este caso foi de aproximadamente ± 87 %. Do mesmo modo, uma variação na densidade da pasta na ordem de ± 1 % ocasiona um desvio médio nos resultados de umidade da fase sólida de aproximadamente ± 69 %. Assim, comprova-se que a Equação (3.8) proposta para descrever a taxa de secagem possui uma forte dependência também com as propriedades físicas da pasta.

Os dados obtidos nas simulações da secagem de ovo homogeneizado foram bastante similares aos obtidos nas simulações das secagens das outras pastas, que encontram-se na Tabela I1 do Apêndice I, onde tem-se os dados de entrada, os valores do coeficiente de transferência de calor por convecção e os coeficientes de ajuste a e b utilizados nas simulações das secagens de lodo de esgoto, leite desnatado e CaCO_3 - C1, C2 e C3.

A partir dos resultados obtidos, constatou-se que o modelo *CST* é capaz de descrever o comportamento térmico e de massa da secagem de pastas em leito de jorro. Entretanto, para que esse modelo seja aplicado na descrição do processo é necessário que a Equação (3.8) seja melhor investigada para que o coeficiente de ajuste a seja expresso também em termos das propriedades físicas da pasta, pois a grande dependência deste coeficiente com a concentração e densidade da pasta tornam o uso do modelo *CST* restrito a casos específicos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho com respeito à caracterização fluidodinâmica dos leitos de jorro de coluna cheia e meia coluna, análise da evaporação de água no leito de jorro em meia coluna, análise fluidodinâmica, térmica e de massa da secagem de pastas em leito de jorro e análise da simulação com o modelo *CST*.

Os dados obtidos na caracterização fluidodinâmica dos leitos de jorro de coluna cheia e em meia coluna apresentam boa concordância com os apresentados na literatura. Nesses, foi verificado que a coluna cheia e a meia coluna possuem um comportamento fluidodinâmico bastante semelhante nas condições experimentais estudadas. Entretanto, a parede plana longitudinal existente na meia coluna causou um aumento na queda de pressão no mínimo jorro de aproximadamente 200 Pa.

Na análise da dinâmica dos sólidos foi observado que a movimentação das partículas na região anular do leito de jorro em meia coluna é mais intensa nas regiões de entrada do leito e nas proximidades da interface jorro-ânulo, tendo seu valor diminuído significativamente na superfície do leito de partículas. Para esta região também foi verificado que o aumento na temperatura e velocidade do ar de entrada não causou alterações na velocidade das partículas.

Em relação às regiões de jorro e fonte do leito de jorro em meia coluna, foi observado que as partículas presentes nestas regiões rapidamente se aceleram até um valor máximo em aproximadamente 1/3 do leito de partículas, e então se desaceleram gradativamente e de forma linear até o topo da fonte. Verificou-se também que nessas regiões o aumento na temperatura e velocidade do ar de entrada causou um aumento significativo na velocidade das partículas. Este comportamento mostra, mais uma vez, que um aumento na

velocidade do ar de entrada normalmente é mais canalizado para o centro da região de jorro.

Outro aspecto importante observado na região de jorro, do leito de jorro em meia coluna, foi que a velocidade das partículas diminui de um valor máximo no eixo radial central até zero na interface jorro-ânulo e esta redução ocorre segundo um perfil parabólico.

Para o canal de jorro do leito de jorro em meia coluna foi constatado um comportamento correspondente ao do tipo “*b*” da classificação de Mathur e Epstein (1974). Segundo dados obtidos, o aumento na temperatura e velocidade do ar de entrada não causou modificações significativas nesta variável.

Na análise da evaporação de água no leito de jorro em meia coluna foi observado que a presença da água não causou alterações na velocidade das partículas na região anular. Contudo, nas regiões de jorro e fonte a presença da água diminuiu a velocidade das partículas.

Com respeito à altura da fonte, observou-se uma diminuição quando a velocidade do ar de entrada foi reduzida e também quando a água foi adicionada ao leito. Já para o canal de jorro foi verificado uma redução no seu raio quando o leito de jorro operou em presença de água.

Na análise do comportamento fluidodinâmico, térmico e de massa foi constatado que o estudo do regime transiente é uma técnica adequada e promissora na obtenção de novas informações para o entendimento da secagem de pastas em leito de jorro.

De acordo com os dados de umidade relativa, o tempo necessário para o leito de jorro alcançar o regime permanente pode variar dependendo das condições de temperatura, velocidade do ar de entrada e vazão de alimentação aplicada. Estes dados também mostraram que o leito de jorro alcançou seu maior potencial de evaporação na menor temperatura e velocidade do ar de entrada, evidenciando, novamente, que o aumento na velocidade do ar de entrada é mais canalizado para o centro da região de jorro.

Na análise da umidade absoluta, verificou-se que independente da velocidade do ar na entrada e pasta aplicada, para uma dada temperatura há sempre uma quantidade máxima de água que o ar de jorro pode absorver, e essa é detectada nos primeiros instantes da secagem. Outro aspecto importante observado nos dados de umidade absoluta foi uma diminuição no seu valor nos níveis superiores de vazão de alimentação. Este fenômeno pode estar relacionado a um decréscimo na porosidade do leito na região anular, que conseqüentemente provoca uma canalização do ar de secagem para a região de jorro e reduz a área de contato para a transferência de massa.

Para as temperaturas do leito de partículas foi observado um comportamento bastante similar nas três posições analisadas. Isto indica, mais uma vez, que o leito de jorro em operação de secagem comporta-se como um tanque perfeitamente agitado.

Nos resultados fluidodinâmicos foi constatado que dependendo do tipo de pasta, concentração e vazão de alimentação aplicada os parâmetros de queda de pressão (ΔP) e velocidade do ar de jorro (u) podem sofrer modificações significativas. Tanto para o ΔP como para o u , há situações onde esses parâmetros podem ser menores ou maiores que as encontradas com o leito de jorro sem a presença da pasta. Devido a isto, há a necessidade de obtenção desses valores para um maior número e tipos de pastas.

Em relação à umidade do pó produzido e do recobrimento formado, observou-se que esses possuem valores muito próximos durante toda a operação de secagem. Este fato indica que o filme de pasta formado em torno das partículas inertes é composto por um pó e não por um filme líquido.

Na análise da simulação foi constatado que o modelo *CST* representa bem o comportamento térmico e de massa da secagem de pastas em leito de jorro em regime de operação estável. Para os regimes de operação instável constatou-se que os dados fornecidos pelo modelo *CST* apresentaram alguns desvios em relação aos experimentais. Para estes

casos, a hipótese de que o leito de jorro em operação de secagem comporta-se como um tanque perfeitamente agitado pode não estar mais satisfazendo o sistema.

Em relação à expressão proposta para descrever a taxa de secagem foi verificado uma forte dependência com a temperatura do ar de entrada, velocidade do ar de jorro e vazão de alimentação da pasta. Além disso, os dados obtidos na análise de sensibilidade paramétrica mostraram que o coeficiente de ajuste a , pertencente à expressão da taxa de secagem, é dependente também da concentração e densidade da pasta, em função deste fato, novos estudos sobre a expressão de taxa de secagem devem ser realizados, pois esta dependência tornou o uso do modelo *CST* restrita a casos específicos.

Finalmente, conclui-se que o sistema experimental desenvolvido e utilizado para a realização desta tese de doutorado foi adequado para o estudo da inércia fluidodinâmica, térmica e de massa da secagem de pastas em leito de jorro, visto que pequenas variações nas condições de secagem foram captadas pelos sistemas de medida. Isto possibilitará que novos estudos sobre este tema sejam realizados, tendo como foco principal as propriedades físicas da pasta. Esta necessidade fica marcante quando se analisa os dados obtidos nas secagens de CaCO_3 , onde uma modificação na concentração desta pasta causou comportamentos fluidodinâmicos bastantes distintos. Além disso, novos estudos acerca da geometria do leito e das propriedades físicas das partículas inertes também poderão ser de suma importância, pois permitirão analisar a influência destes parâmetros no comportamento da secagem.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a continuidade deste trabalho são dadas as seguintes sugestões:

- estudar o comportamento fluidodinâmico, térmico e de massa do leito de jorro de coluna cheia para outros tipos de pastas;
- estudar o comportamento fluidodinâmico, térmico e de massa do leito de jorro em meia coluna na presença de pastas reais;
- analisar a influência do tipo e da quantidade de inerte, do ângulo do cone, do tipo de bocal de entrada nos parâmetros fluidodinâmicos, térmicos e de massa, e
- analisar mais detalhadamente a simulação da secagem de pastas em leito de jorro via modelagem *CST*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABARCA, A. Modelagem, simulação e verificação experimental da secagem contínua de pastas em leito de jorro, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 2001, 111p. (Dissertação de Mestrado).
- BACELOS, M.S. Análise do comportamento da fluidodinâmica do leito de jorro com misturas de tamanho de partículas, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 2006, 113p. (Tese de Doutorado).
- BACELOS, M.S.; SPITZNER NETO, P.I.; SILVEIRA, A.M.; FREIRE, J.T. Analysis of fluid dynamics behavior of conical spouted bed in presence of pastes, Drying Technology, v. 23, p. 427-453, 2005.
- BARRETT, N.; FANE, A. Drying liquid materials in a spouted bed. In MUJUMDAR, A.S., ROQUES, M.A. Drying'89, eds. Hemisphere Publishing Corporation, New York, p. 415-420, 1989.
- BOULOS, M.I.; WALDIE, B. High resolution measurement of particle velocities in a spouted bed using laser-doppler anemometry, The Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 64, p. 939-943, 1986.
- CAPEL, C.E. Agglomerate bonding. In: Particle Size Enlargement, Elsevier, New York, p. 23-43, 1980. In SPITZNER NETO, P.I. Estudo da secagem de pastas e da fluidodinâmica do leito de jorro na presença de pastas e líquidos, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 2001, 284p. (Tese de Doutorado).
- CORDEIRO, D.S.; OLIVEIRA, W.P. Technical aspects of the production of dried extract of *maytenus ilicifolia* leaves by jet spouted bed drying, International Journal of Pharmaceutics, v. 299, p. 115-126, 2005.
- CORRÊA, N.A. Controle da secagem de pastas em leito de jorro, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 2000, 201p. (Tese de Doutorado).
- CORRÊA, N.A.; CORRÊA, R.G.; FREIRE, J.T. Self-tuning control of egg drying in spouted bed using the GPC algorithm, Drying Technology, v. 20 (4), p. 813-828, 2002.
- CORRÊA, N.A.; FREIRE, F.B.; CORRÊA, R.G.; FREIRE, J.T. Industrial Trials of paste drying in spouted beds under QDMC, Drying Technology, v. 22 (5), p. 1087-1105, 2004.
- CORREIA, E.S. Secagem de pasta residual de soja em leito de jorro, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 1996, 91p. (Dissertação de Mestrado).
- COSTA JR., E.F.; FREIRE, F.B.; FREIRE, J.T.; PASSOS, M.L. Spouted beds of inert particles for drying suspension, Drying Technology, v. 24 (3), 315-325, 2006.

- CUNHA, F.O. Contribuições à análise da secagem de pastas em leito de jorro com partículas inertes, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 1999, 103p. (Dissertação de Mestrado).
- CUNHA, R.L.; MAIALLE, K.G.; MENEGALLI, F.C. Evaluation of the drying process in spouted bed and spout fluidized bed of xanthan gum: focus on product quality, Powder Technology, v. 107, p. 234-242, 2000.
- ELPERIN, I.T.; YEFREMTSEV, V.S.; DOLIDOVICH, A.F. The effect of velocity pulsations on the interfacial heat transfer and structure of a spouting bed, Heat Transfer Sov. Res., v. 1, p. 23, 1969. In MATHUR, K.B.; EPSTEIN, N. Spouted Bed, Academic Press, New York, 1974.
- EPSTEIN, N.; GRACE, J.R. Spouting of particles solids. In FAYED, M.E & OTTEN, L. Handbook of Powder Science & Technology, Chapman & Hall, New York, p. 532-567, 1997.
- FERNANDES, C.F. Análise da eficiência energética da secagem de pastas em leito de jorro, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 2005, 80p. (Dissertação de Mestrado).
- FREITAS, L.A.P. Fluidodinâmica e transferência de calor em leito de jorro com alimentação contínua, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 1996, 225p. (Tese de Doutorado).
- FREITAS, L.A.P; FREIRE, J.T. Heat transfer in a draft tube spouted bed with bottom solids feed, Powder Technology, v. 114, p. 152-162, 2001.
- GOLTSIKER, A.D. Doctoral dissertation, Lensovet Technol. Inst. Leningrad, 1967. In MATHUR, K.B.; EPSTEIN, N. Spouted Bed, Academic Press, New York, 1974.
- GORSHTEIN, A.E.; MUKHLENOV, I.P. The movement of solid material in the spouting bed, Zh. Prikl. Khim. (Leningrad), v. 40, p. 2469, 1967. In MATHUR, K.B.; EPSTEIN, N. Spouted Bed, Academic Press, New York, 1974.
- GORSHTEIN, A.E.; SOKORO, V.E. Piezoelectric method of studying a suspended layer, Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol., v. 4 (1), p. 137, 1964. In MATHUR, K.B.; EPSTEIN, N. Spouted Bed, Academic Press, New York, 1974.
- GUO, Q.; HIKIDA, S.; TAKAHASHI, Y.; NAKAGAWA, N.; KATO, K. Drying of microparticle slurry and salt-water solution by a powder-particle spouted bed, Journal of Chemical Engineering of Japan, v. 29 (1), p. 152-158, 1996.
- HE, Y.L.; LIM, C.J.; GRACE, J.R. Spouted bed and spout-fluid behavior in a column of diameter 0.91 m, The Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 70, p. 848-857, 1992.
- HE, Y.L.; LIM, C.J.; GRACE, J.R.; ZHU, J.X.; QIN, S.Z. Measurements of voidage profiles in spouted beds, The Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 72, p. 229-234, 1994a.

- HE, Y.L.; QIN, S.Z.; LIM, C.J.; GRACE, J.R. Particle velocity profiles and solid flow patterns in spouted beds, The Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 72, p. 561-568, 1994b.
- HIMMELBLAU, D.M. Engenharia Química. Princípios e Cálculos, Prentice-Hall do Brasil Ltda, Rio de Janeiro, 1998.
- HUNT, C.H.; BRENNAN, D. Estimation of spout diameter in a spouted bed, Aust. Chem. Eng., v. 5, p. 9, 1965. In MATHUR, K.B.; EPSTEIN, N. Spouted Bed, Academic Press, New York, 1974.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Métodos Químicos e Físicos para Análise de Alimentos. Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz, v.1, São Paulo, 1976.
- KUDRA, T.; MUJUMDAR, A.S. Advanced Drying Technologies, Marcel Dekker, New York, 2002.
- KUDRA, T.; PALLAI, E.; BARTCZAK, Z.; PETER, M. Drying of paste-like materials in screw-type spouted bed and spin-flash dryers, Drying Technology, v. 7, p. 583-597, 1989.
- LEFROY, G.A The mechanics of spouted beds, Univ. of Cambridge, Cambridge, England, 1966 (PhD Thesis). In MATHUR, K.B.; EPSTEIN, N. Spouted Bed, Academic Press, New York, 1974.
- LEFROY, G.A.; DAVIDSON, J.F. The mechanics of spouted beds, Transactions of the Institution of Chemical Engineers, v.47, p. 120-128, 1969.
- MALEK, M.A.; MADONNA, L.A.; BENJAMIN, C.; LU, Y. Estimation of spout diameter in a spouted bed, I&EC Process Design and Development, v. 2 (1), p. 30-34, 1963.
- MARKOWSKI, A.S. Drying characteristics in jet spouted bed, The Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 70, p. 938-944, 1992.
- MARKOWSKI, A.S. Quality interaction in a jet-spouted bed dryer for bioproducts, Drying Technology, v. 11 (2), p. 369-387, 1993.
- MARMO, L. Low temperature drying of pomace in spout and spout-fluid beds, Journal of Food Engineering, v. 79, p. 1179-1190, 2007.
- MARRETO, R.N.; FREIRE, J.T.; FREITAS, L.A.P. Drying of pharmaceuticals: the applicability in spouted beds, Drying Technology, v. 24 (3), p. 327-338, 2006.
- MATHUR, K.B.; EPSTEIN, N. Spouted Bed, Academic Press, New York, 1974.
- MATHUR, K.B.; GISHLER, P.E. A technique for contacting gases with coarse solid particles, AIChE Journal, v. 1, p. 157-164, 1955.

- MCNAB, G.S. Prediction of spout diameter, Brit. Chem. Eng. Proc. Tech., v. 17, p.532-541, 1972.
- MEDEIROS, M.F.D.; ROCHA, S.C.S.; ALSINA, O.L.S.; JERÔNIMO, C.E.M.; MEDEIROS, U.K.L.; MATA, A.L.M.L. Drying of pulps of tropical fruits in spouted bed: effect of composition on dryer performance, Drying Technology, v. 20 (4&5), p. 855-881, 2002.
- MEDEIROS, M.F.D; ROCHA, S.C.S; ALSINA, O.L.S.; JERÔNIMO, C.E.M. Secagem de polpas de frutas em leito de jorro: efeito da adição da polpa na fluidodinâmica do leito. In Anais do XXXI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Uberlândia, MG, 2004.
- MIKHAILIK, V.D. The pattern of change of spout diameter in a spouting bed, Collected Works on Research on Heat and Mass Transfer in Technological Processes, p. 37, 1966. In MATHUR, K.B.; EPSTEIN, N. Spouted Bed, Academic Press, New York, 1974.
- MIKHAILIK, V.D.; ANTANISHIN, M.V. The speed of particles and voidage in the core of the spouted bed. Vesti Akad. Nauk. BSSR Minsk Ser. Fiz. Takhn. Nauk, v. 3, p. 81-86, 1967. In MATHUR, K.B.; EPSTEIN, N. Spouted Bed, Academic Press, New York, 1974.
- MORRIS, J.A. Análise da taxa de evaporação de água de um secador de leito de jorro com partículas inertes, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 1990, 106p. (Dissertação de Mestrado).
- MUKHLENOV, I.P.; GORSHTAIN, A.E. investigation of a spouted bed, Khim. Prom., v. 41, p. 443, 1965. In MATHUR, K.B.; EPSTEIN, N. Spouted Bed, Academic Press, New York, 1974.
- NARIMATSU, C.P. Contribuições ao estudo da secagem em um leito pneumático vertical, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 2004, 257p. (Tese de Doutorado).
- NOVAIS, A.F. Análise da aplicação do leito deslizante e escoamentos cruzados na secagem de sementes, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 1990, 97p. (Dissertação de Mestrado).
- OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M.J.; AGUADO, R.; BILBAO, J. Solid flow in jet spouted beds, Ind. Eng. Chem. Res., v. 35, p. 2716-2724, 1996.
- OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M.J.; AGUADO, R.; GAISAN, B.; BILBAO, J. Bed voidage in conical sawdust beds in the transition regime between spouting and jet spouting, Ind. Eng. Chem. Res., v. 38, p. 4120-4122, 1999.
- OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M.J.; ALVAREZ, S.; MORALES, A.; BILBAO, J. Measurement of particle velocities in conical spouted beds using an optical fiber probe, Ind. Eng. Chem. Res., v. 37, p. 4520-4527, 1998.
- OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M.J.; IZQUIERDO, M.A.; ALVAREZ, S.; BILBAO, J. Local bed voidage in spouted beds, Ind. Eng. Chem. Res., v. 40, p. 427-433, 2001a.

- OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M.J.; IZQUIERDO, M.A.; SALAZAR, A.O.; BILBAO, J. Effect of operation conditions on solid velocity in the spout, annulus and fountain of spouted beds, Chemical Engineering Science, v. 56, p. 3585-3594, 2001b.
- OLIVEIRA, E.G., Secagem de *spirulina platensis*: análise das técnicas de leito de jorro e camada delgada, PPG-ECA/FURG, Rio Grande, RS, 2006, 92p. (Dissertação de Mestrado).
- OLIVEIRA, I.M. Simulação da secagem de pastas em leito de jorro cônico, EE/UFGM, Belo Horizonte, MG, 1995, 102p. (Dissertação de Mestrado).
- OLIVEIRA, W.P. Estudo da secagem de pastas em leito de jorro cônico, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 1996, 200p. (Tese de Doutorado).
- OLIVEIRA, W.P.; SILVEIRA, A.M.; FREIRE, J.T. Transferência simultânea de calor e massa nas três regiões do leito de jorro durante a secagem de pastas. In Anais do XXII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Florianópolis, SC, 1994.
- PAGLIUSO, J.D. Determinação do coeficiente de transferência de calor em leito circulante: influência da distribuição granulométrica, EESC/USP, São Carlos, SP, 1994 (Tese de Doutorado).
- PALLAI, I.V.E. Research on the fluid mechanics of spouted beds. In Res. Inst. For Tech. Chem., Hung. Acad. of Sci., Budapest, 1971. In MATHUR, K.B.; EPSTEIN, N. Spouted Bed, Academic Press, New York, 1974.
- PASSOS, M.A.; TRINDADE, A.L.G.; D'ANGELO, J.V.H.; CARDOSO, M. Drying of black liquor in spouted bed of inert particles, Drying Technology, v. 22 (5), p. 1041-1067, 2004.
- PASSOS, M.L.; MASSARANI, G.; FREIRE, J.T.; MUJUMDAR, A.S. Drying of pastes in spouted bed of inert particles: design criteria and modeling, Drying Technology, v. 15 (2), p. 605-624, 1997.
- PASSOS, M.L.; MUJUMDAR, A.S. Effect of cohesive forces on fluidized and spouted beds of wet particles, Powder Technology, v. 110, p. 222-238, 2000.
- PASSOS, M.L.; MUJUMDAR, A.S.; RAGHAVAN G.S.V. Spouting and spout-fluidization of dry-wet particles in a two dimensional bed. In MUJUMDAR, A.S. Drying of solids, eds Sarita Prakashan, New Delhi, p. 211-202, 1990.
- PATEL, K.; BRIDGWATER, J.; BAKER, C.G.J.; SCHNEIDER, T. Spouting behavior of wet solids. In MUJUMDAR, A.S., ROQUES, M.A. Drying'86, eds. Hemisphere Publishing Corporation, New York, p. 183-189, 1986.
- PHAM, Q.T. Behavior of a conical spouted bed dryer for animal blood, The Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 61, p. 426-434, 1983.

- PIETSCH, W. Size Enlargement by agglomeration. In FAYED, M.E. & OTTEN, L. Handbook of Powder Science & Technology, Chapman & Hall, New York, p. 202-377, 1997.
- RÉ, M.I. Secagem de sangue animal em leito de jorro, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 1986, 73p. (Dissertação de Mestrado).
- RÉ, M.I.; FREIRE, J.T. Drying of pastelike materials in spouted bed. In MUJUMDAR, A.S., ROQUES, M.A. Drying'89, eds. Hemisphere Publishing Corporation, New York, p. 426-432, 1989.
- REYES, A.E. Secagem de suspensões em leito de jorro cônico, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1993, 169p. (Tese de Doutorado).
- REYES, A.E.; MASSARANI, G. Secado de pastas em lecho de chorro. In Anais do XIX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Campinas, SP, 1991.
- ROCHA, A.P.T.; SILVA, V.S.; SILVA, F.L.H.; ALSINA, O.L.S. Secagem de leveduras: estudo do desempenho de um secador de leito de jorro. In Anais do XXXI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Uberlândia, MG, 2004.
- RODRIGUES, C.C. Análise da secagem de suspensões em leito de jorro com partículas inertes, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 1993, 116p. (Dissertação de Mestrado).
- ROMANKOV, P.G., RASHKOVASKAYA, N.B. Drying in a suspended state. In Chem. Publ. House, Leningrad Branch, 1968. In MATHUR, K.B.; EPSTEIN, N. Spouted Bed, Academic Press, New York, 1974.
- RUMPF, H. The strength of granules and agglomerates. In KNEPPER, W.A. Agglomeration, John Wiley, New York, p. 379-414, 1962. In SPITZNER NETO, P.I. Estudo da secagem de pastas e da fluidodinâmica do leito de jorro na presença de pastas e líquidos, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 2001, 284p. (Tese de Doutorado).
- RUMPF, H.; SCHUBERT, H. The behavior of agglomerates under tensile strain, Journal of Chemical Engineering of Japan, v. 7 (4), p. 294-298, 1974.
- SAN JOSÉ, M.J.; ALVAREZ, S.; SALAZAR, A.O.; OLAZAR, M.; BILBAO, J. Spout geometry in shallow spouted beds with solids of different density and different sphericity, Ind. Eng. Chem. Res., v. 44, p. 8393-8400, 2005.
- SAN JOSÉ, M.J.; OLAZAR, M.; ALVAREZ, S.; BILBAO, J. Local bed voidage in conical spouted beds, Ind. Eng. Chem. Res., v. 37, p. 2553-2558, 1998a.
- SAN JOSÉ, M.J.; OLAZAR, M.; ALVAREZ, S.; IZQUIERDO, M.A.; BILBAO, J. Solid cross-flow into the spout and particle trajectories in conical spouted beds, Chemical Engineering Science, v. 53 (20), p. 3561-3570, 1998b.

- SAN JOSÉ, M.J.; OLAZAR, M.; ALVAREZ, S.; MORALES, A.; BILBAO, J. Local porosity in conical spouted beds consisting of solids of varying density, Chemical Engineering Science, v. 60, p. 2017-2025, 2005.
- SAN JOSÉ, M.J.; OLAZAR, M.; IZQUIERDO, M.A.; ALVAREZ, S.; BILBAO, J. Spout geometry in shallow spouted beds, Ind. Eng. Chem. Res., v. 40, p. 420-426, 2001.
- SAN JOSÉ, M.J.; OLAZAR, M.; LLAMOSAS, R.; IZQUIERDO, M.A.; BILBAO, J. Study of dead zone and spout diameter in shallow spouted beds of cylindrical geometry, The Chemical Engineering Journal, v. 64, p. 353-359, 1996.
- SANTANA, J.D.A.; CHARBEL, A.L.T.; PASSOS, M.L.; MASSARANI, G. Effect of interparticles forces on the spouted bed flow behavior. In Proceedings of the Inter-American Drying Conference, Itu, SP, p. 135-142, 1997.
- SARTORI, D.J.M. Secagem de sementes em leito deslizante e escoamentos cruzados. In FREIRE, J.T. & GUBULIN, J.C. Tópicos Especiais em Sistemas Particulados, Ed. da UFSCar, São Carlos, SP, v. 3, p. 293-382, 1990.
- SCHNEIDER, T.; BRIDGWATER, J. Drying of solutions and suspensions in spouted bed. In MUJUMDAR, A.S., ROQUES, M.A. Drying'89, eds. Hemisphere Publishing Corporation, New York, p. 421-425, 1989.
- SCHNEIDER, T.; BRIDGWATER, J. The stability of wet spouted beds, Drying Technology, v. 11 (2), p. 277-301, 1993.
- SCHUBERT, H. Principles of agglomeration, International Chemical Engineering, v. 21 (3), p. 363-377, 1981.
- SCHUBERT, H. Tensile strength and capillary pressure of moist agglomerates. In SASTRY, K.V.S. Agglomeration 77, New York, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, v. 1, p. 144-155, 1977.
- SHERRINGTON, P.J.; OLIVIER, R. Granulation, Heyden & Sons, London, 1981.
- SHUHAMA, I.K.; AGUIAR, M.L.; OLIVEIRA, W.P.; FREITAS, L.A.P. Experimental production of annatto powders in spouted bed dryer, Journal of Food Engineering, v. 59, p. 93-97, 2003.
- SPITZNER NETO, P.I. Estudo da secagem de pastas e da fluidodinâmica do leito de jorro na presença de pastas e líquidos, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 2001, 284p. (Tese de Doutorado).
- SPITZNER NETO, P.I. Secagem de pastas em leito de jorro, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 1997, 201p. (Dissertação de Mestrado).
- SPITZNER NETO, P.I.; CUNHA, F.O.; FREIRE, J.T. Effect of the presence of paste in a conical spouted bed dryer with continuous feeding, Drying Technology, v. 20 (4&5), p. 789-811, 2002.

- STRUMILLO, C.; MARKOWSKI, A.; KAMINSKI, W. Modern developments in drying of patelike materials. In MUJUNDAR, A.S. Advances in Drying, McGraw Hill, Washington, v. 2, p. 193-231, 1983.
- SUCIU, G.C.; PATRASCU, M.H. Phase distribution and residence time in a spouted bed, AIChE Journal, v. 23, p. 312-318, 1977.
- SULLIVAN, C.; BENKRID, A.; CARAM, H. Prediction of solids circulation patterns in a spouted bed, Powder Technology, v. 53, p. 257-271, 1987.
- SZENTMARJAY, T.; PALLAI, E. Drying of suspensions in a modified spouted bed drier with an inert packing, Drying Technology, v. 7 (3), p. 523-536, 1989.
- THORLEY, B.; MATHUR, K.B.; KLASSEN, J.; GISHLER, P.E. The effect of design variables on flow characteristics in a spouted bed, Rep. Nat. Res. Council of Can., Ottawa, 1955. In MATHUR, K.B.; EPSTEIN, N. Spouted Bed, Academic Press, New York, 1974.
- THORLEY, B.; SAUNBY, J.B.; MATHUR, K.B.; OSBERG, G.L. An analysis of air and solid flow in a spouted bed, The Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 37, p. 184-192, 1959.
- TIA, S.; TANGSATITKULCHAI, C.; DUMRONGLAOHAPUN, P. Continuous drying of slurry in a jet spouted bed, Drying Technology, v. 13 (8&9), p. 1825-1840, 1995.
- VAN VELZEN, D.; FLAMM, H.J.; LANGENKANP, H.; CASILE, A. Motion of solids in spouted beds, The Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 52, p. 156-161, 1974.
- VOLPICELLI, G.; RASO, G.; MASSIMILLA, L. Gas and solid in bidimensional spouted beds. In Proc. Eindhoven Fluidizn. Symp., Amsterdam, 1967. In MATHUR, K.B.; EPSTEIN, N. Spouted Bed, Academic Press, New York, 1974.
- WALDIE, B.; WILKINSON, D. Measurement of particle movement in a spouted bed using a new microprocessor based technique, The Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 64, p. 944-949, 1986.
- WALDIE, B.; WILKINSON, D.; MCHUGH, T.G.P. Measurement of voidage in the fountain of a spouted bed, The Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 64, p. 950-953, 1986.
- WANG, Z.; CHEN, P.; LI, H.; WU, C.; CHEN, Y.; LI, B. Study on the hydrodynamics of a spouting-moving bed, Ind. Eng. Chem. Res., v. 40, p. 4983-4989, 2001.
- WELTMAN, R.N. Reology, v. 3, Academic Press, New York, 1960. In OLIVEIRA, W.P. Estudo da secagem de pastas em leito de jorro cônico, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 1996, 200p. (Tese de Doutorado).
- WILHELM, L.R. Numerical calculation of psychrometrical properties in SI units, Trans. of the ASAE, v. 19, p. 318-325, 1976.

XU, J.; OSADA, S.; KATO, K. Limiting efficiency for continuous drying of microparticle slurry in a powder-particle spouted bed, Journal of Chemical Engineering of Japan, v. 31 (1), p. 35-40, 1998.

ZORANA, L.J.; GRBAVCIC, Z.B.; GARIC-GRULOVIC, R.V. Drying of suspensions in the draft tube spouted bed, The Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 82, p. 450-464, 2004.

APÊNDICE A
EQUAÇÕES AUXILIARES DO MODELO CST

Vazão mássica da pasta na entrada do leito de jorro

$$F_{pe} = Q_p \rho_p \frac{1}{60} \quad (\text{A1})$$

Vazão mássica da pasta na saída do leito de jorro

$$F_{ps} = F_{pe} - k \quad (\text{A2})$$

Vazão mássica do gás na entrada do leito de jorro

$$W_{ge} = Q \frac{1000}{60} \quad (\text{A3})$$

Vazão mássica do gás na saída do leito de jorro

$$W_{gs} = W_{ge} + k \quad (\text{A4})$$

Fração mássica de água líquida na pasta na entrada do leito de jorro

$$x_e = 1 - C \quad (\text{A5})$$

Fração mássica do vapor d'água

$$y = \frac{UA}{1+UA} \quad (\text{A6})$$

Massa de gás

$$m_g = (V_j - V_s)\rho_{ar} \quad (\text{A7})$$

Calor perdido pelo leite de jorro

$$q = hA_j(T_{gs} - T_{amb}) \quad (\text{A8})$$

Área lateral do leite de jorro

$$A_j = 2\pi r_j h_c + \pi(r_j + r_i)\sqrt{h_i^2 + (r_j - r_i)^2} + \pi(r_j + r_s)\sqrt{h_s^2 + (r_j - r_s)^2} \quad (\text{A9})$$

Volume do leite de jorro

$$V_j = \pi r_j^2 h_c + \frac{\pi h_i (r_j^2 + r_j r_i + r_i^2)}{3} + \frac{\pi h_s (r_j^2 + r_j r_s + r_s^2)}{3} \quad (\text{A10})$$

Volume de partículas inertes

$$V_s = \frac{(1 - \varepsilon)m_s}{\rho_s} \quad (\text{A11})$$

Calor específico do ar (Himmelblau, 1998)

$$cp_{ar} = \frac{28,94 + 0,4147 \times 10^{-2} T + 0,3191 \times 10^{-5} T^2 - 1,965 \times 10^{-9} T^3}{PM_{ar}} \quad (\text{A12})$$

Calor específico do vapor d'água (Himmelblau, 1998)

$$cp_{\acute{a}gua}^v = \frac{33,46 + 0,6880 \times 10^{-2} T + 0,7604 \times 10^{-5} T^2 - 3,593 \times 10^{-9} T^3}{PM_{\acute{a}gua}} \quad (\text{A13})$$

Calor específico da água líquida (Himmelblau, 1998)

$$cp_{\acute{a}gua}^l = \frac{75,4}{PM_{\acute{a}gua}} \quad (\text{A14})$$

Calor específico do gás

$$cp_g = ycp_{\acute{a}gua}^v + (1 - y)cp_{ar} \quad (\text{A15})$$

Calor específico da pasta

$$cp_p = ycp_{\text{água}}^l + (1-y)cp_p \quad (\text{A16})$$

Pressão de vapor (Wilhelm,1976)

$$P_v = \frac{UAP_{\text{atm}}}{0,62198 + UA} \quad (\text{A17})$$

Pressão de vapor na saturação (Wilhelm,1976)

$$P_{v_s} = e^{\left(\frac{-7511,52}{T} + 8963121 + 0,023998977T - 1,154551 \times 10^{-5} T^2 \dots \right)} \quad (\text{A18})$$

Umidade relativa (Wilhelm,1976)

$$UR = \frac{P_v}{P_{v_s}} 100 \quad (\text{A19})$$

APÊNDICE B

DADOS EXPERIMENTAIS DE UMIDADE RELATIVA

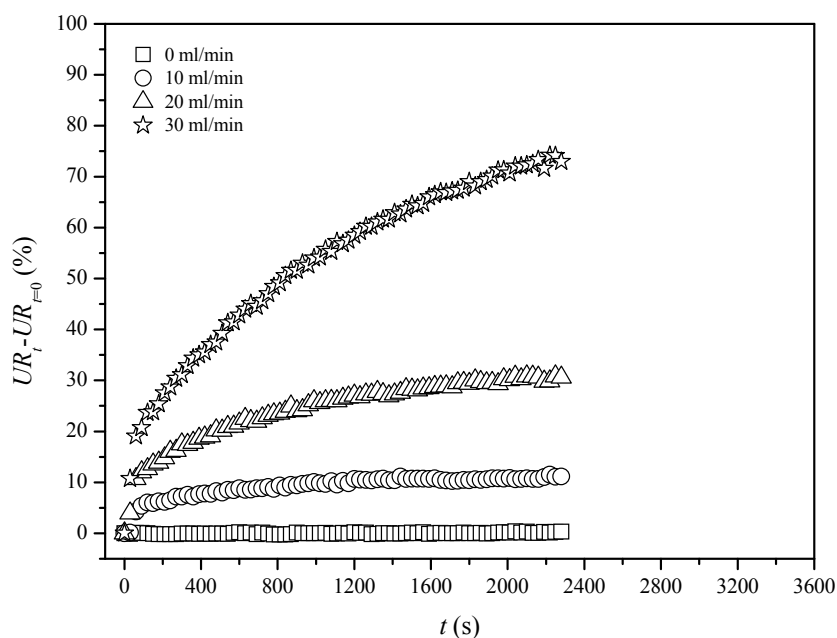


Figura B1 - Umidade relativa do leito de jorro em meia coluna em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 80 °C - $1,15 u_{mj}$.

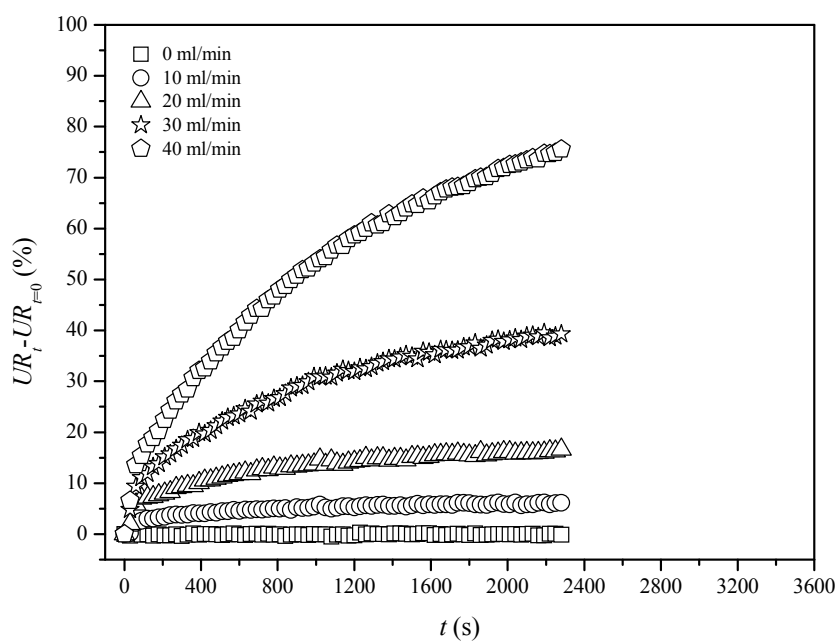


Figura B2 - Umidade relativa do leito de jorro em meia coluna em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 100 °C - $1,30 u_{mj}$.

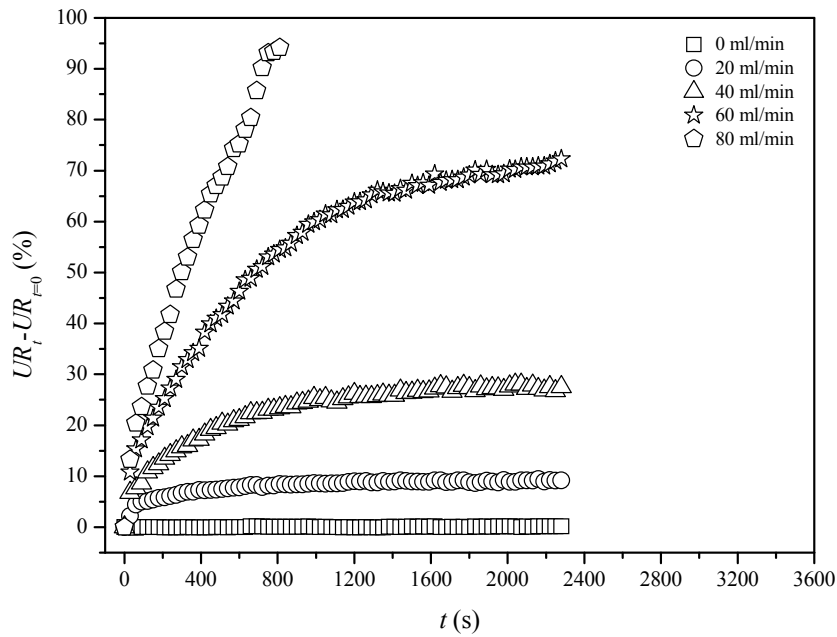


Figura B3 - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,30 u_{mj} .

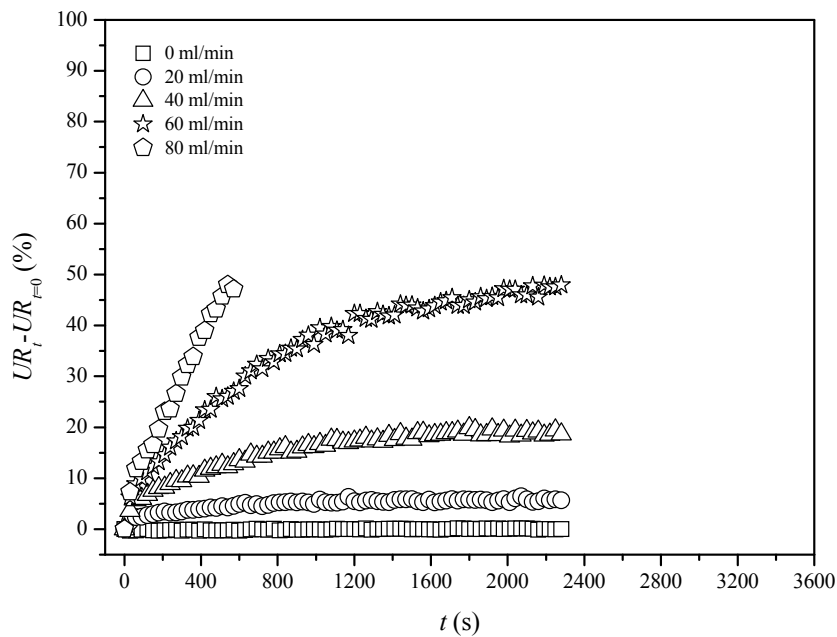


Figura B4 - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,15 u_{mj} .

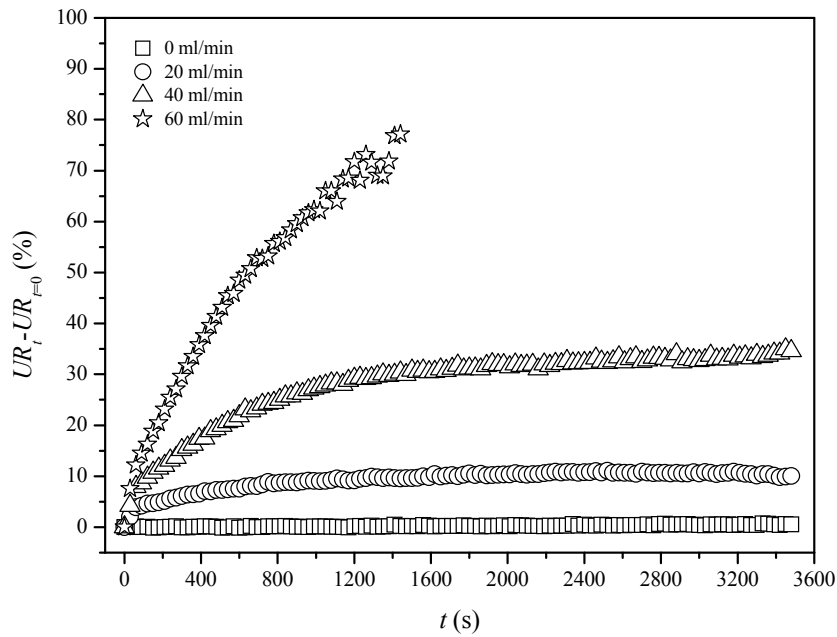


Figura B5 - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de lodo de esgoto sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

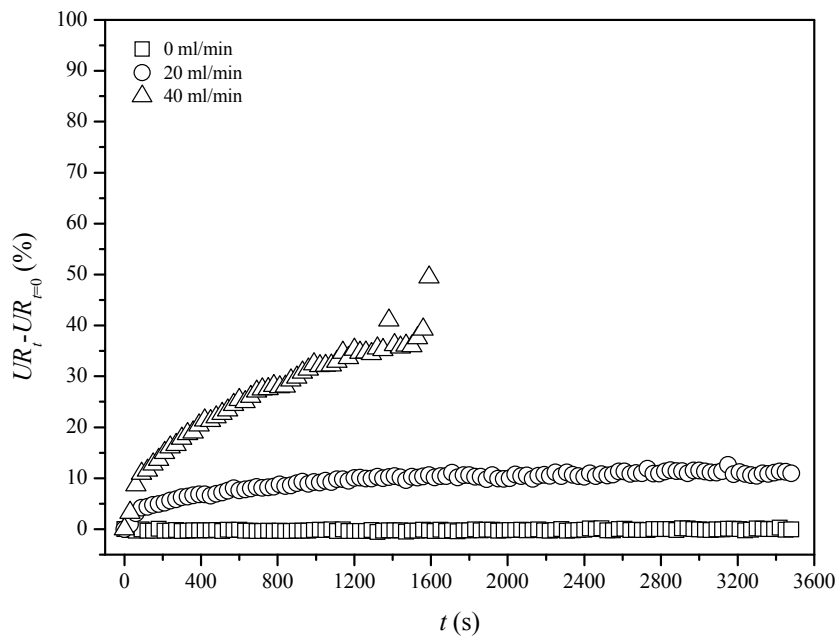


Figura B6 - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de leite desnatado sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

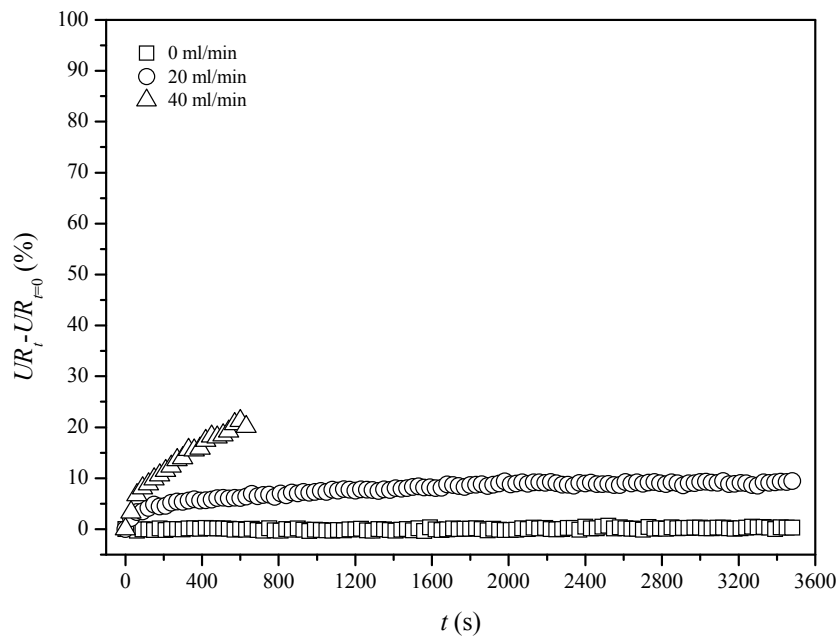


Figura B7 - Umidade relativa do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $1,15\text{ }u_{mj}$.

APÊNDICE C

DADOS EXPERIMENTAIS DE UMIDADE ABSOLUTA

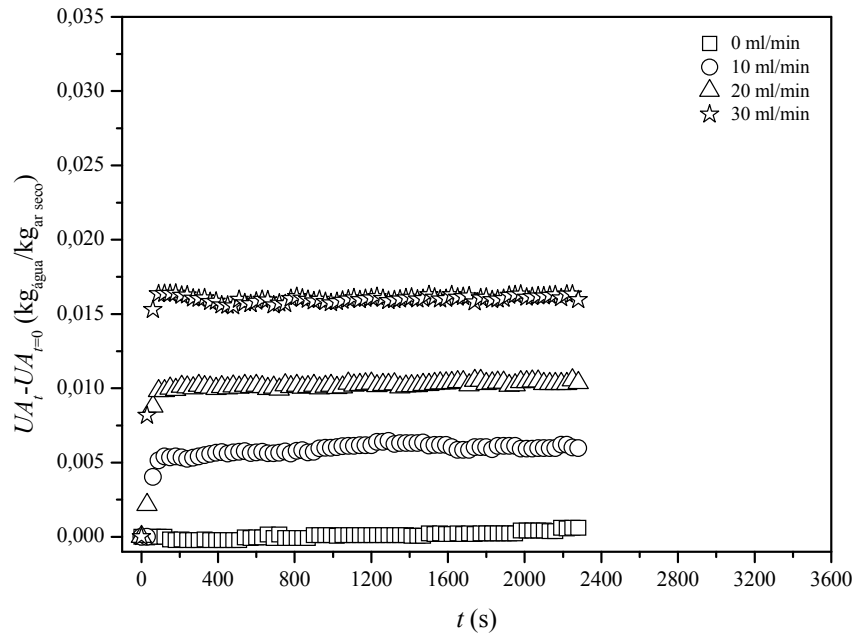


Figura C1 - Umidade absoluta do leito de jorro em meia coluna em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 80 °C - $1,15\text{ }u_{mj}$.

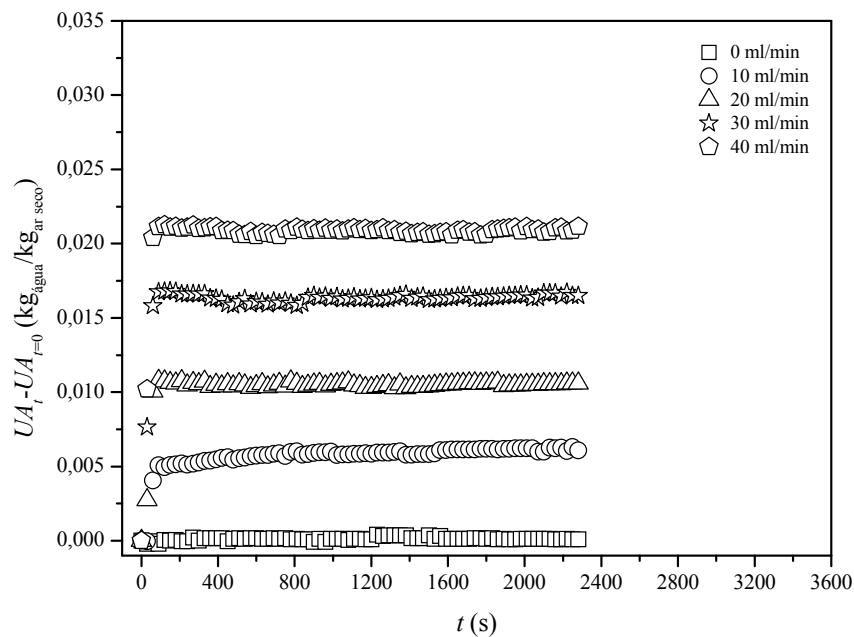


Figura C2 - Umidade absoluta do leito de jorro em meia coluna em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 100 °C - $1,30\text{ }u_{mj}$.

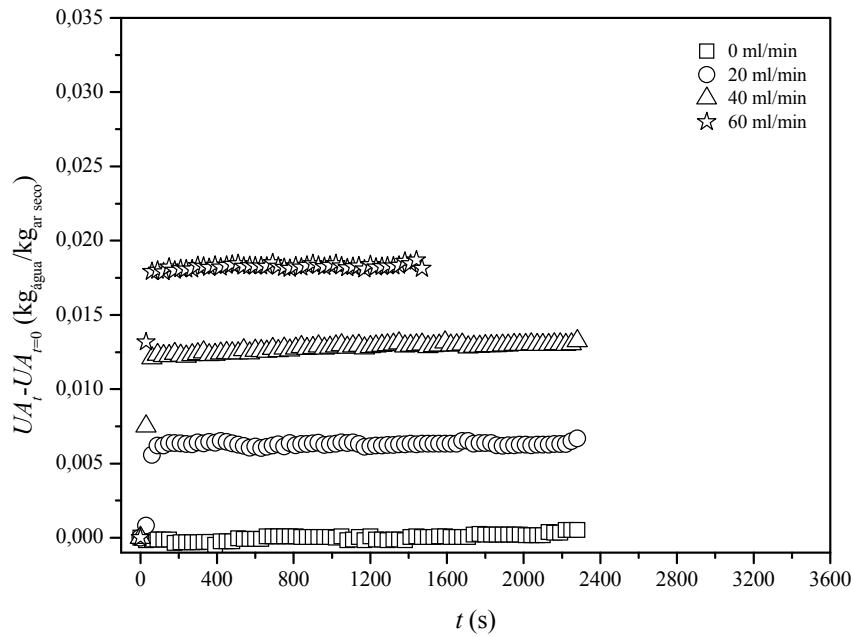


Figura C3 - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

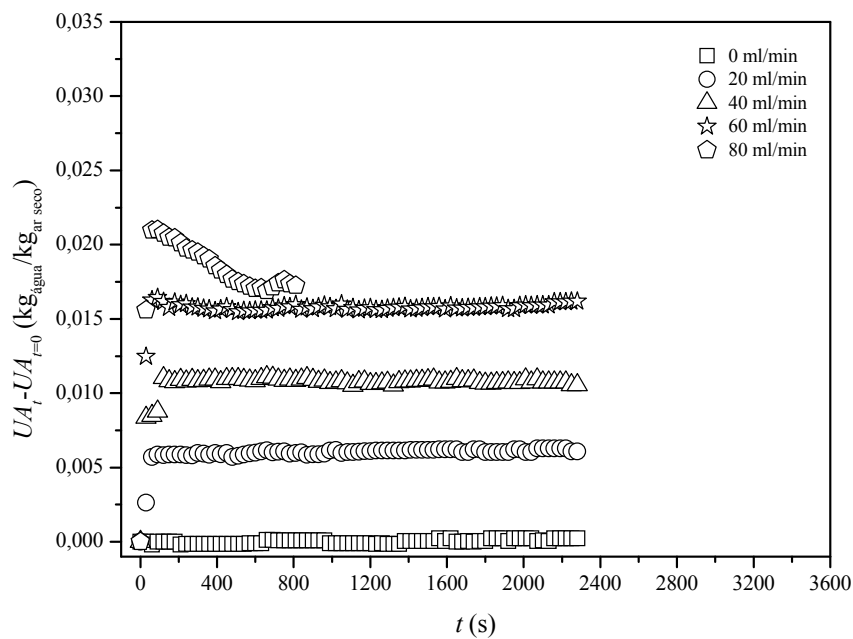


Figura C4 - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,30 u_{mj} .

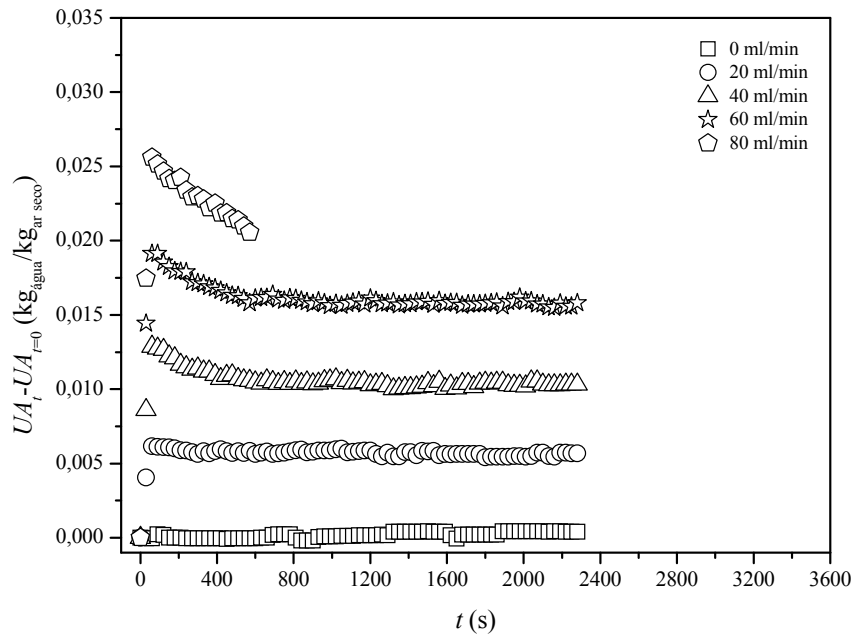


Figura C5 - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,15 u_{mj} .

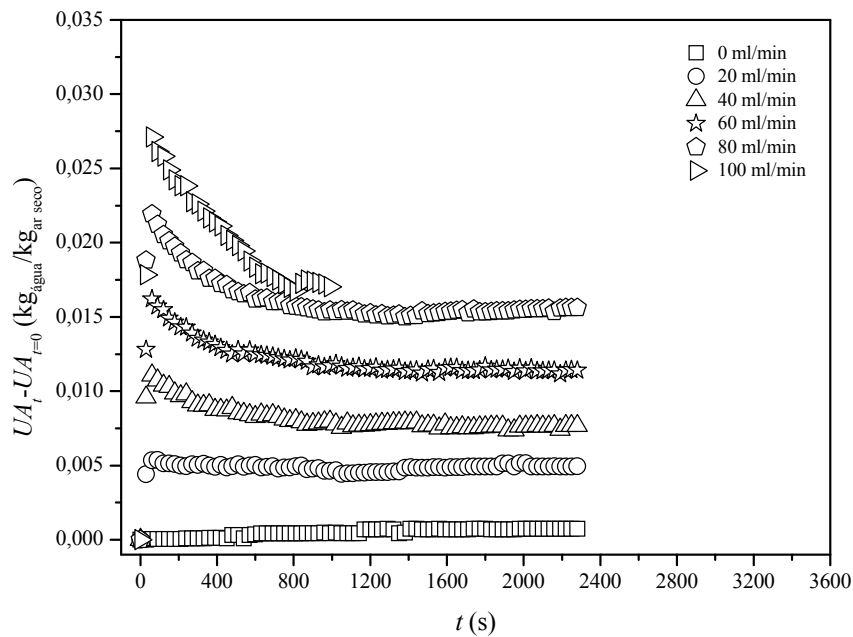


Figura C6 - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

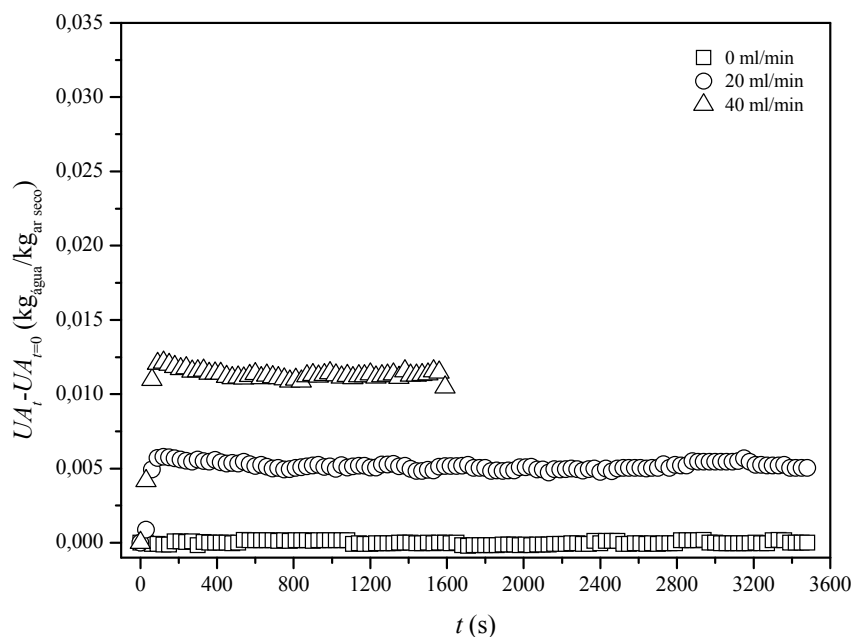


Figura C7 - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de leite desnatado sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

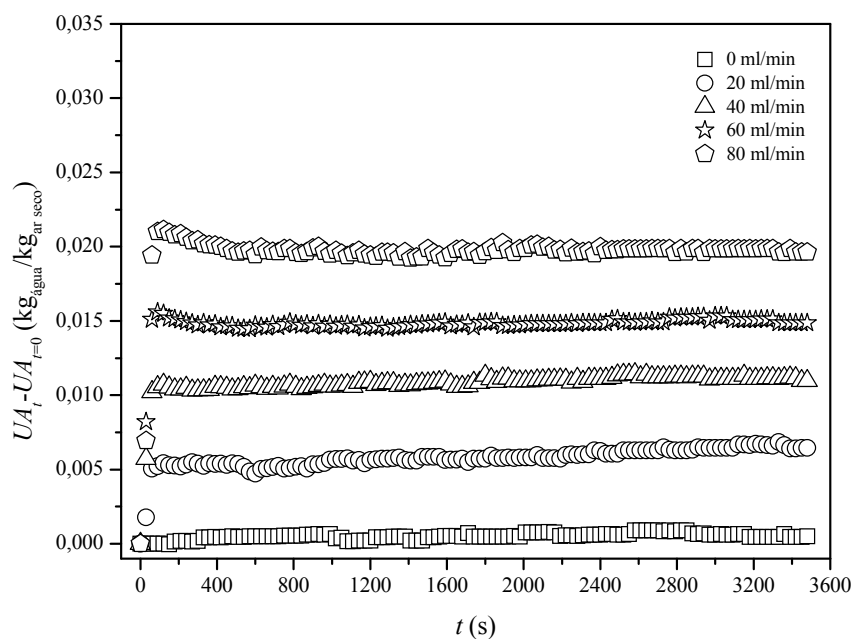


Figura C8 - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de leite desnatado sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

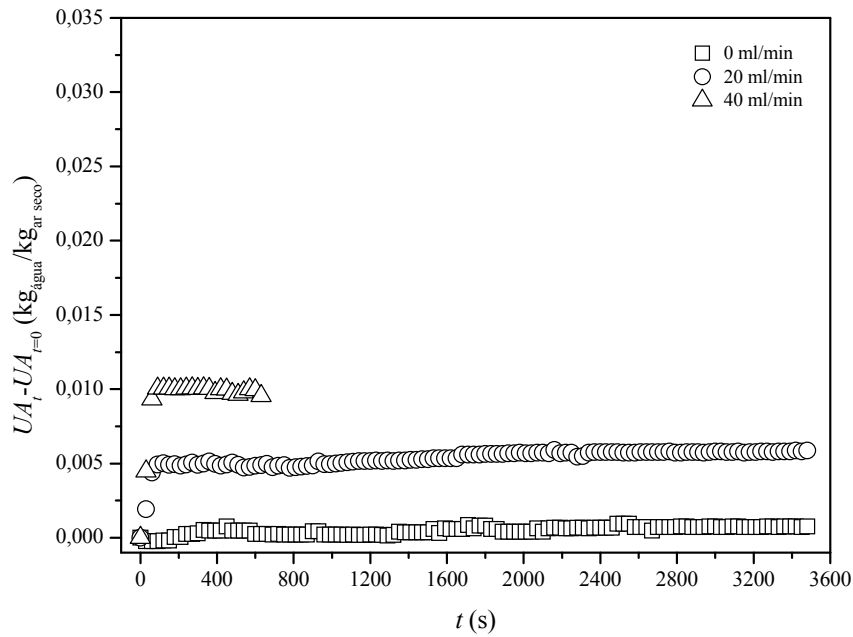


Figura C9 - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

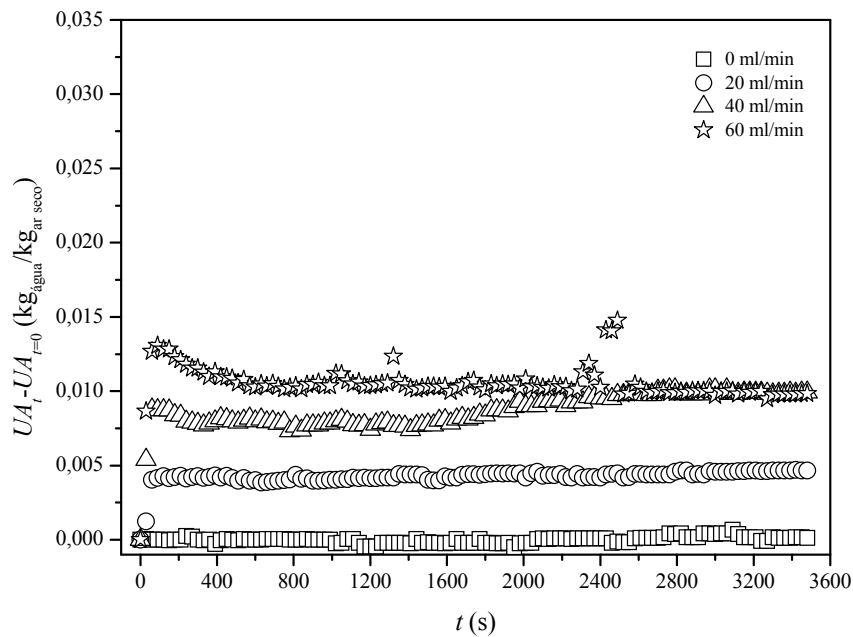


Figura C10 - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

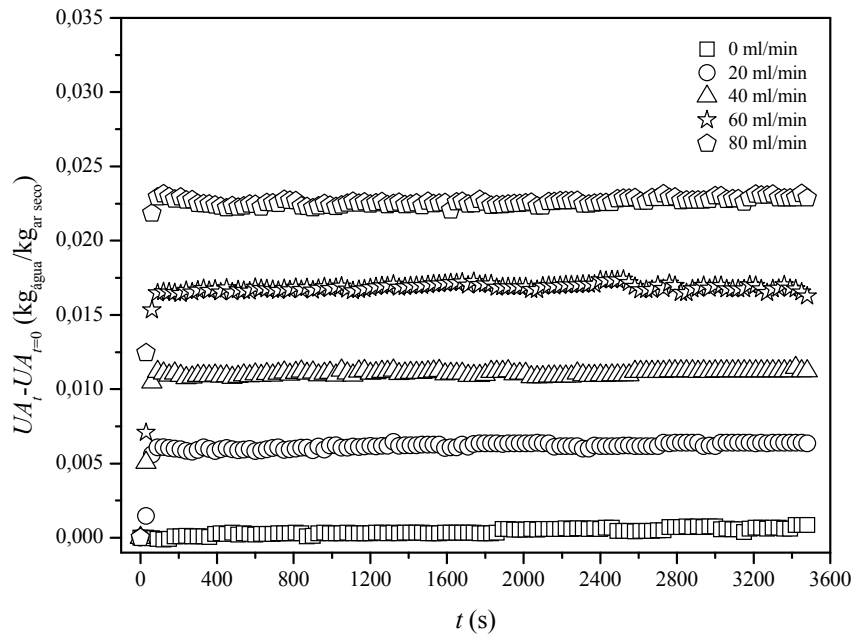


Figura C11 - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de CaCO_3 - C1 sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30 u_{mj}$.

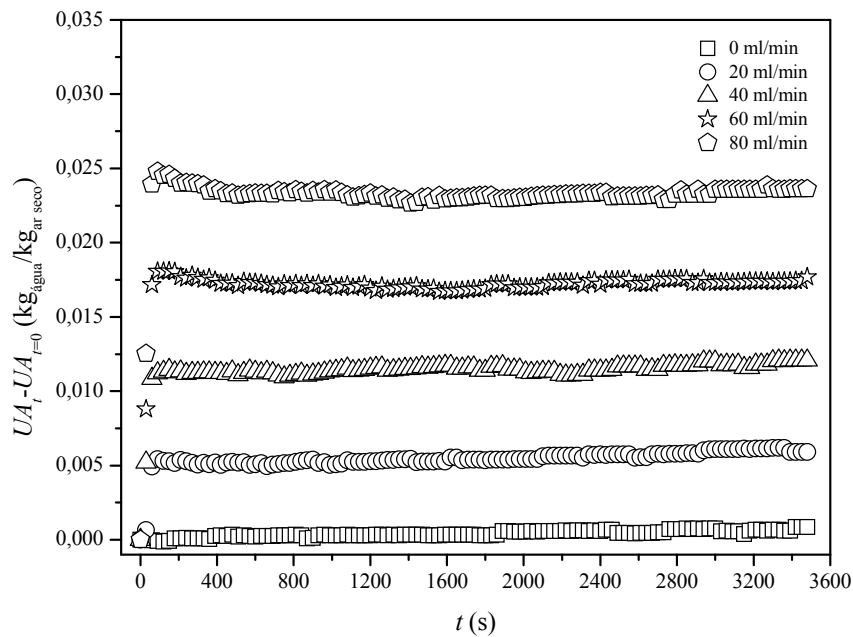


Figura C12 - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de CaCO_3 - C2 sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30 u_{mj}$.

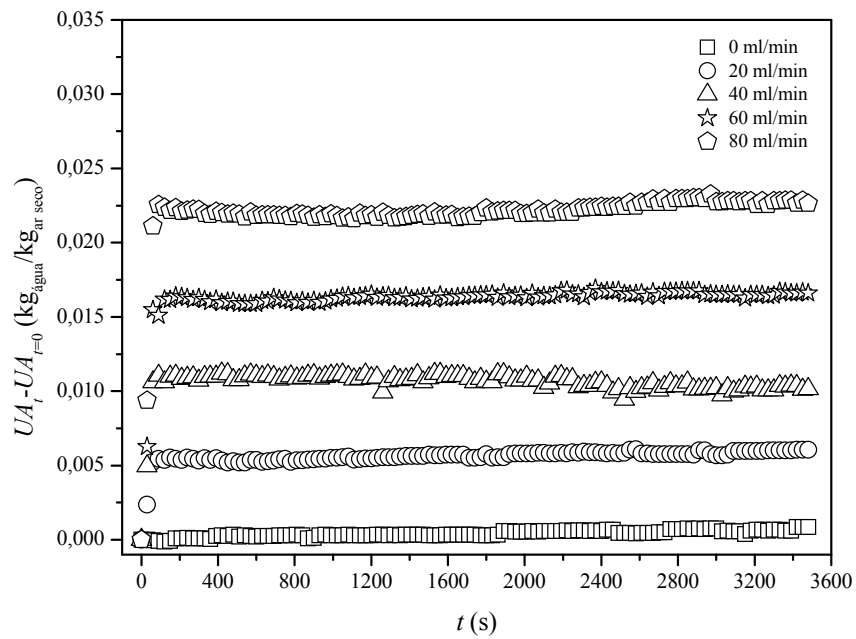


Figura C13 - Umidade absoluta do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de $\text{CaCO}_3 - \text{C3}$ sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$.

APÊNDICE D

DADOS EXPERIMENTAIS DA TEMPERATURA DO LEITO DE PARTÍCULAS

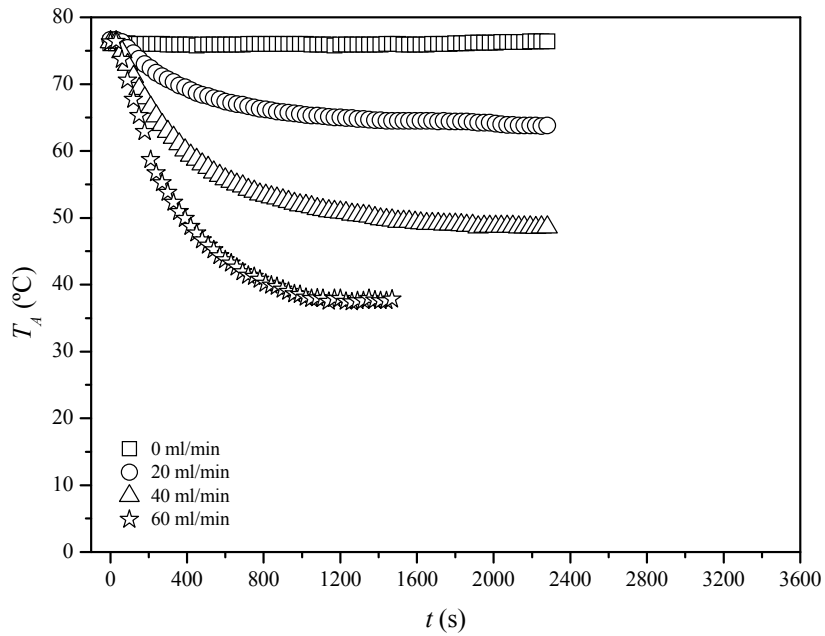


Figura D1 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,12 m do leito de jorro de coluna cheia para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

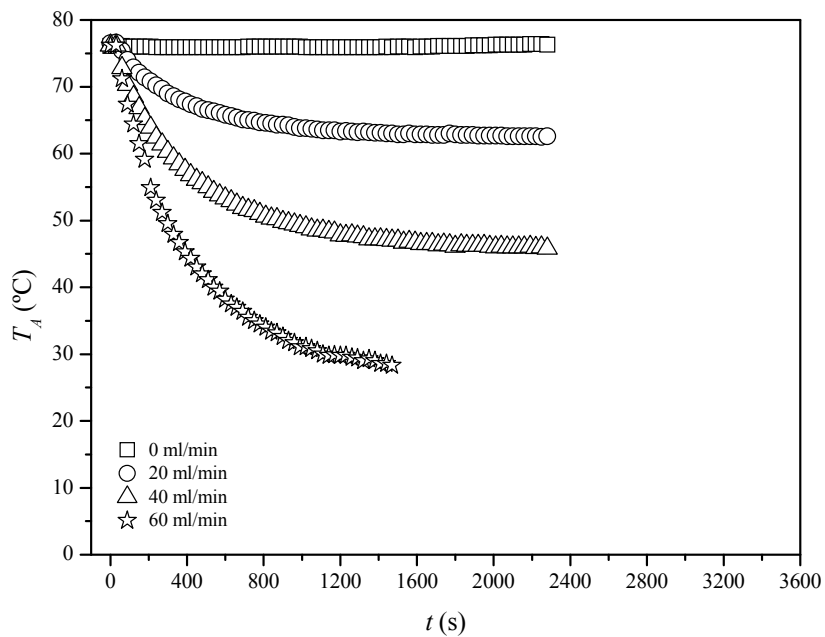


Figura D2 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,20 m do leito de jorro de coluna cheia para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

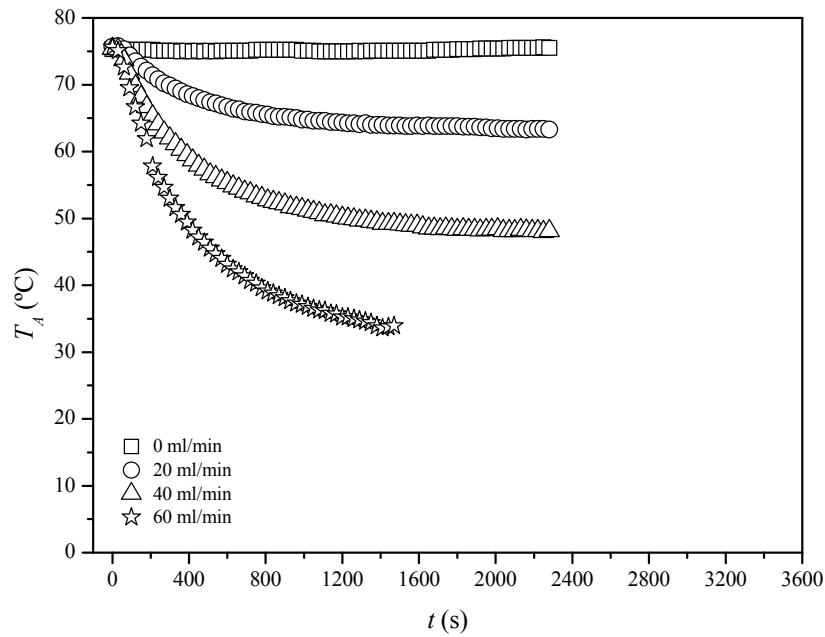


Figura D3 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,24 m do leito de jorro de coluna cheia para a evaporação de água sob condições de $80\text{ }^\circ\text{C} - 1,15\text{ }u_{mj}$.

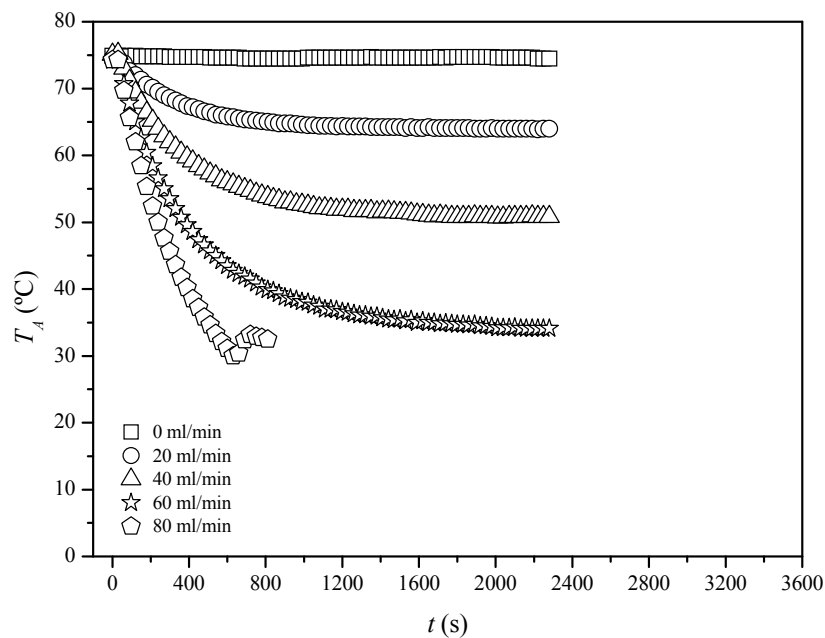


Figura D4 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,12 m do leito de jorro de coluna cheia para a evaporação de água sob condições de $80\text{ }^\circ\text{C} - 1,30\text{ }u_{mj}$.

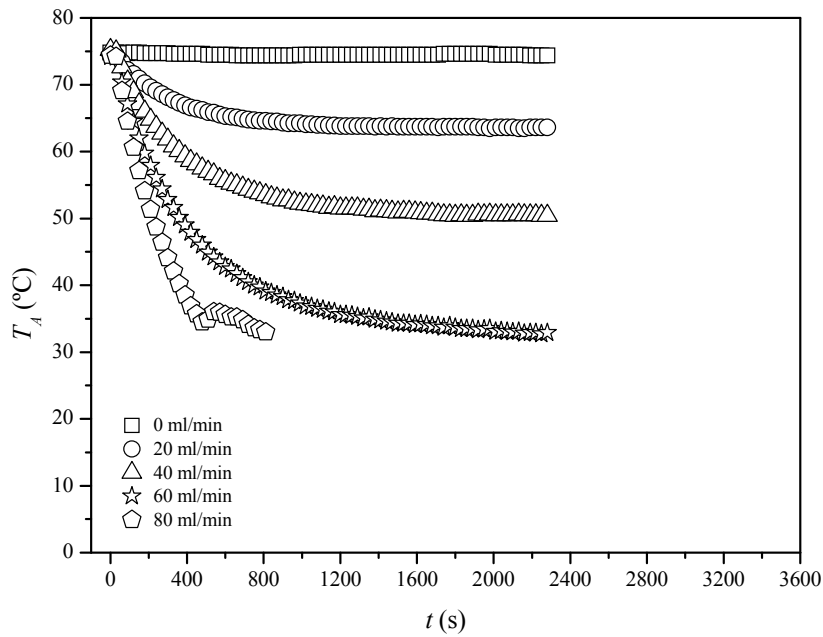


Figura D5 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,20 m do leito de jorro de coluna cheia para a evaporação de água sob condições de $80\text{ }^\circ\text{C} - 1,30\text{ }u_{mj}$.

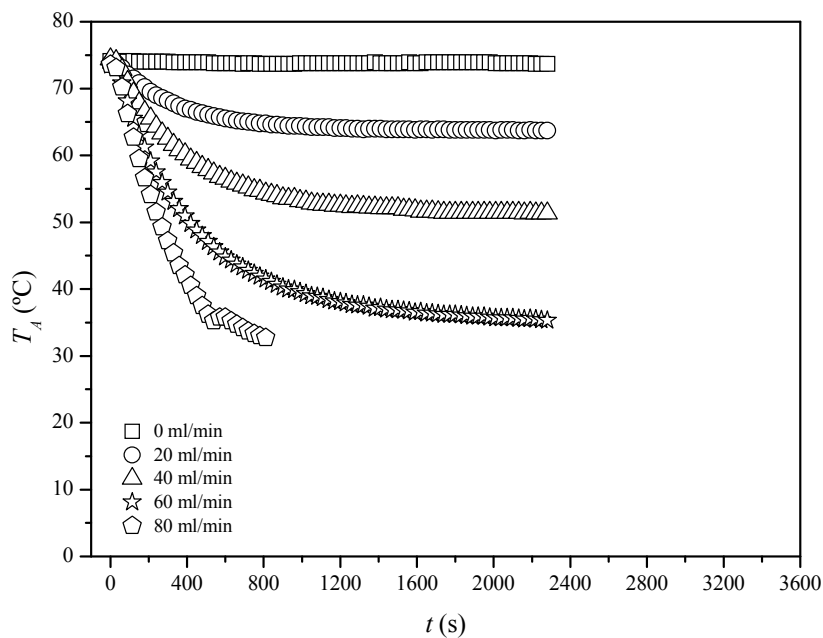


Figura D6 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,24 m do leito de jorro de coluna cheia para a evaporação de água sob condições de $80\text{ }^\circ\text{C} - 1,30\text{ }u_{mj}$.

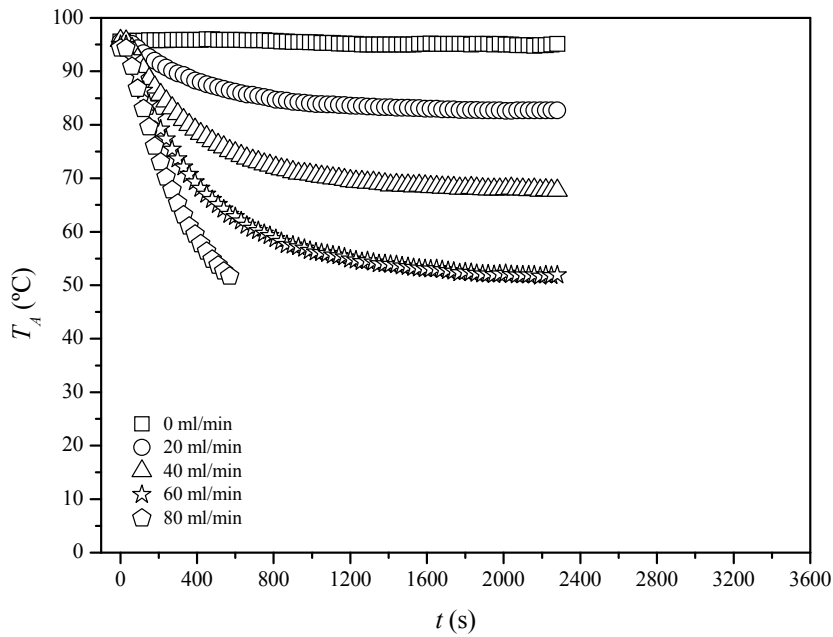


Figura D7 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,12 m do leito de jorro de coluna cheia para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,15 u_{mj} .

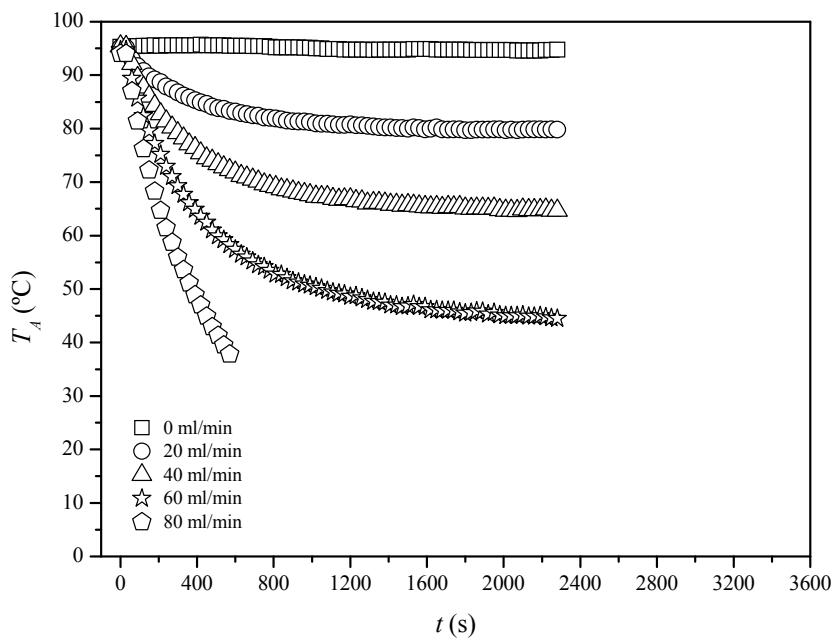


Figura D8 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,20 m do leito de jorro de coluna cheia para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,15 u_{mj} .

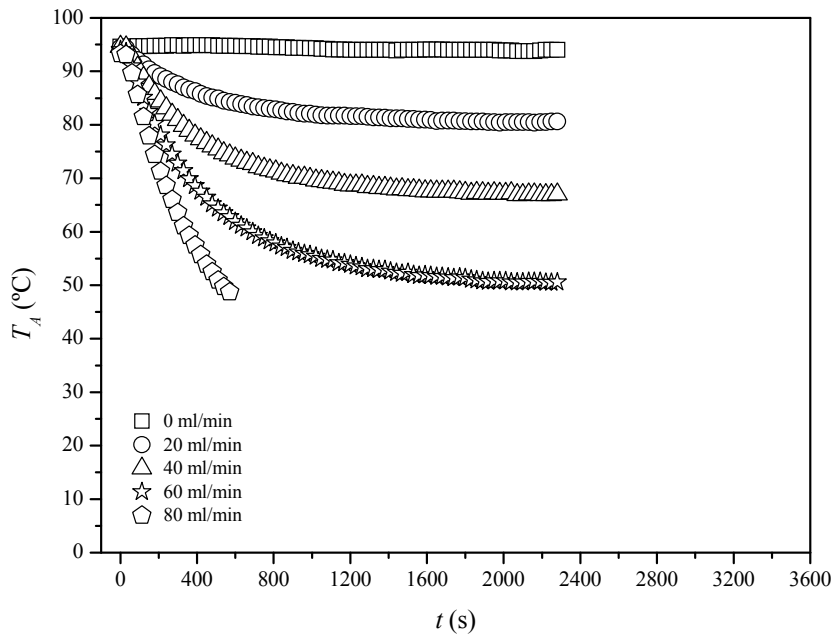


Figura D9 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,24 m do leito de jorro de coluna cheia para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,15 u_{mj} .

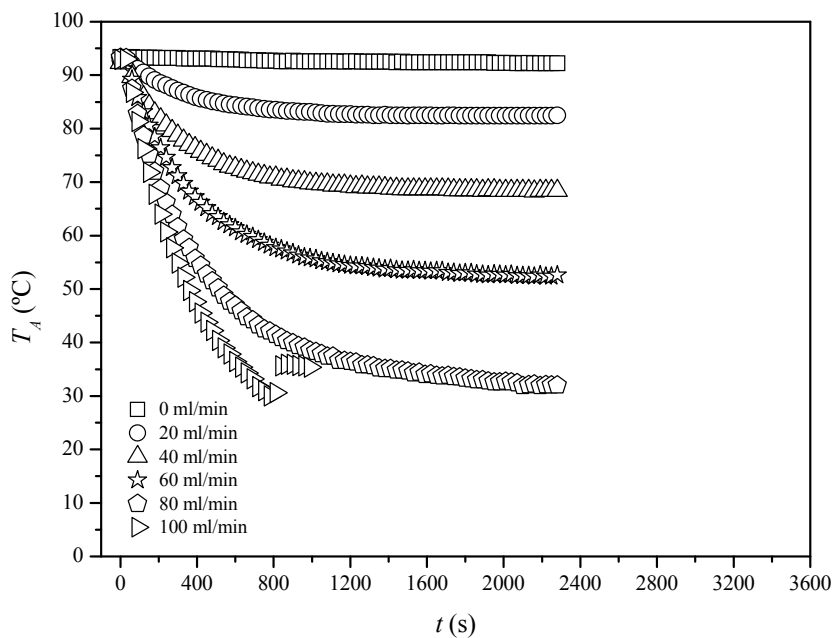


Figura D10 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,12 m do leito de jorro de coluna cheia para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

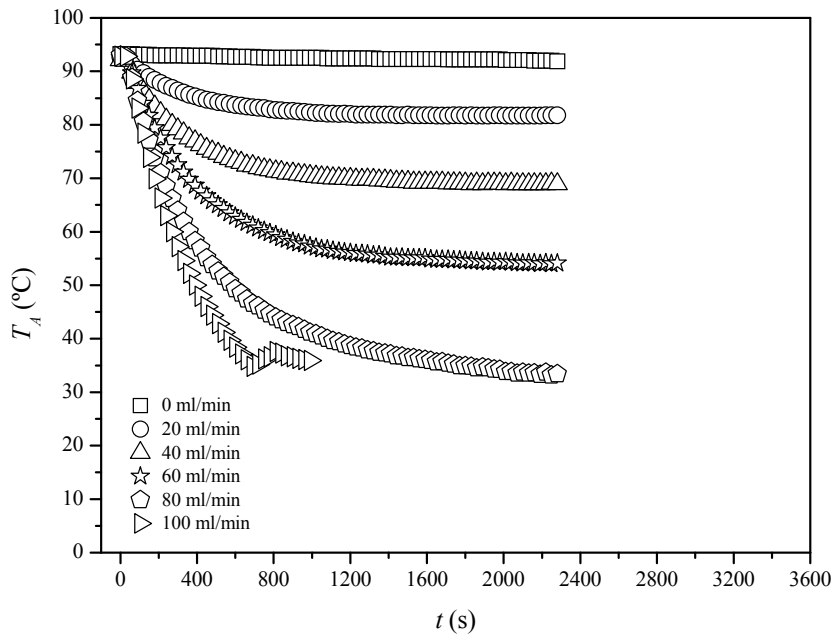


Figura D11 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,20 m do leito de jorro de coluna cheia para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

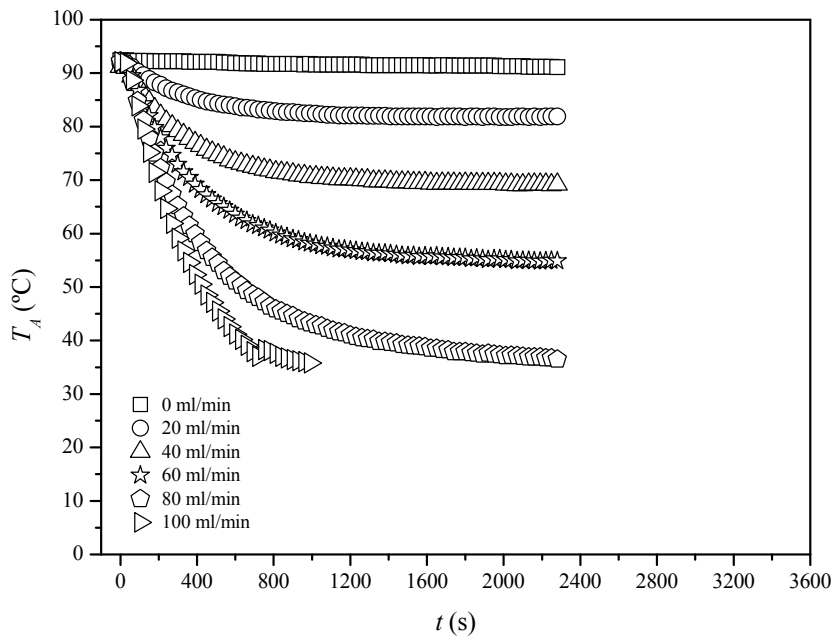


Figura D12 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,24 m do leito de jorro de coluna cheia para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

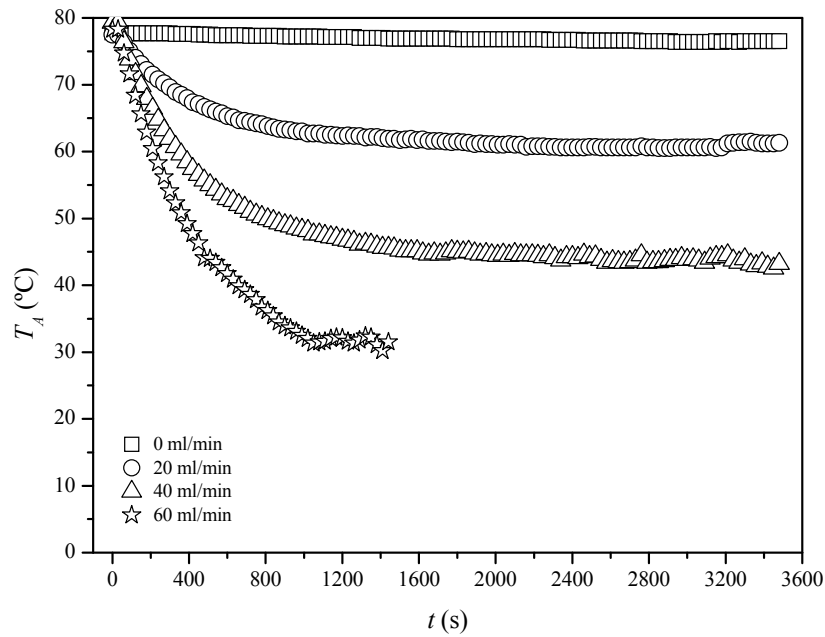


Figura D13 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,12 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de lodo de esgoto sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

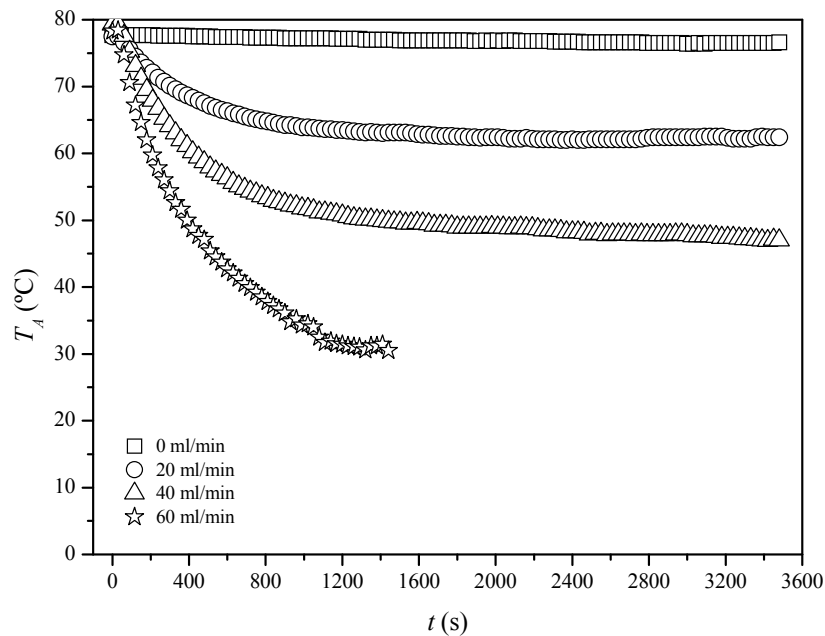


Figura D14 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,20 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de lodo de esgoto sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

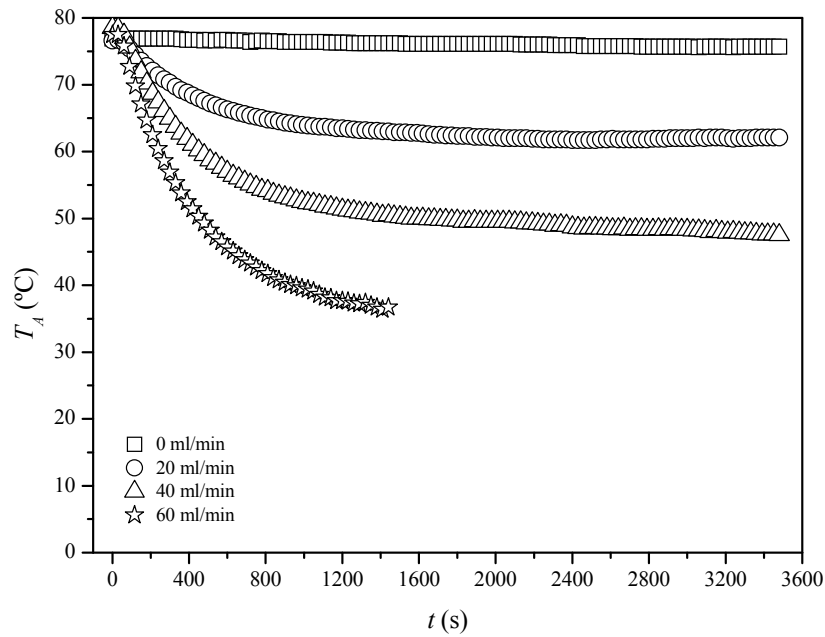


Figura D15 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,24 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de lodo de esgoto sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

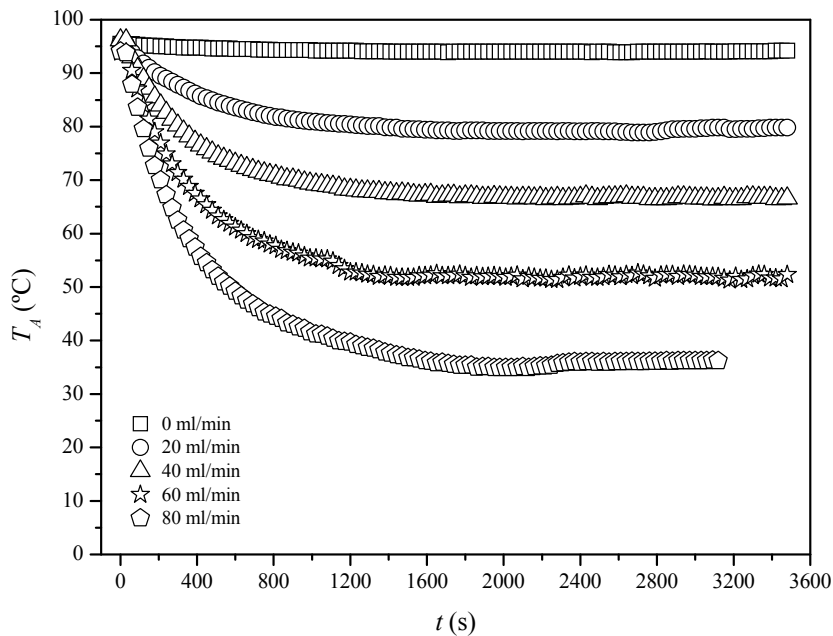


Figura D16 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,12 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de lodo de esgoto sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

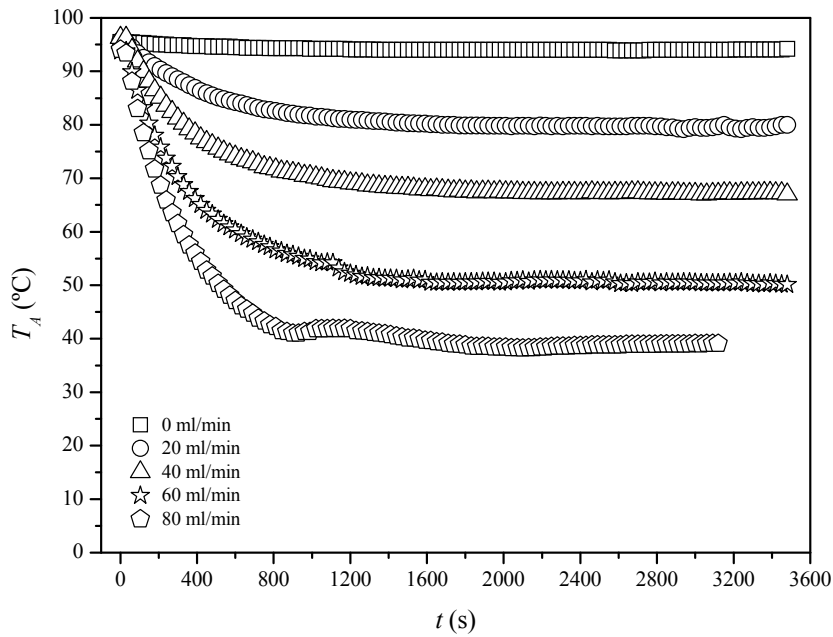


Figura D17 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,20 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de lodo de esgoto sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

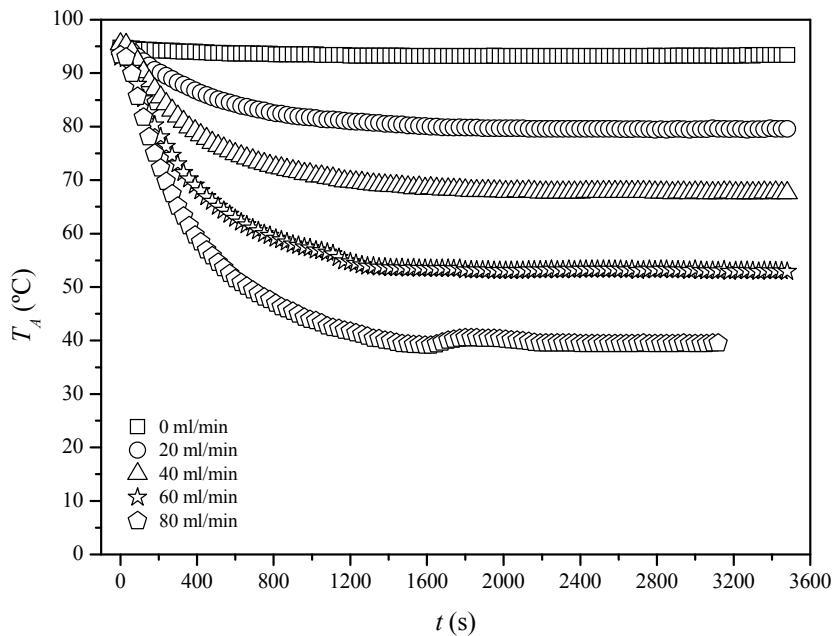


Figura D18 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,24 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de lodo de esgoto sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

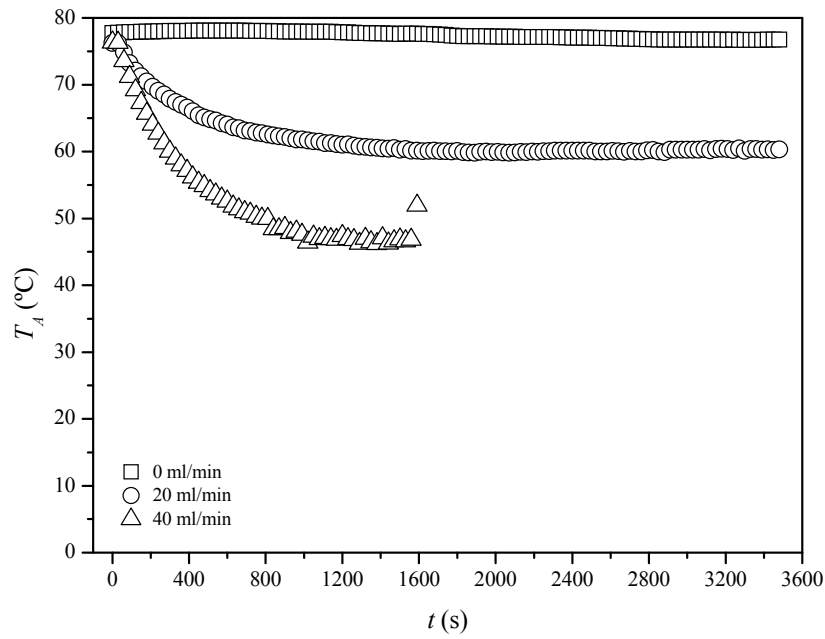


Figura D19 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,12 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de leite desnatado sob condições de $80 \text{ }^\circ\text{C} - 1,15 u_{mj}$.

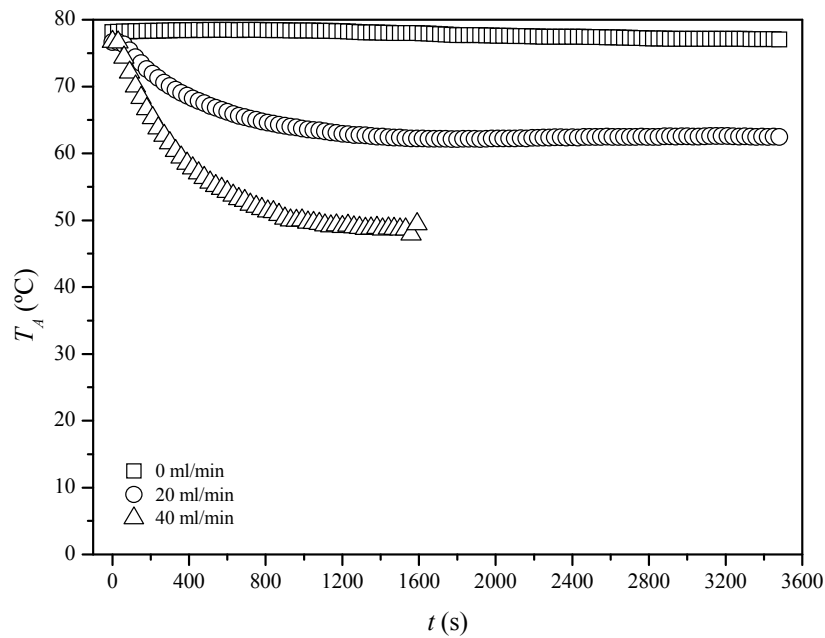


Figura D20 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,20 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de leite desnatado sob condições de $80 \text{ }^\circ\text{C} - 1,15 u_{mj}$.

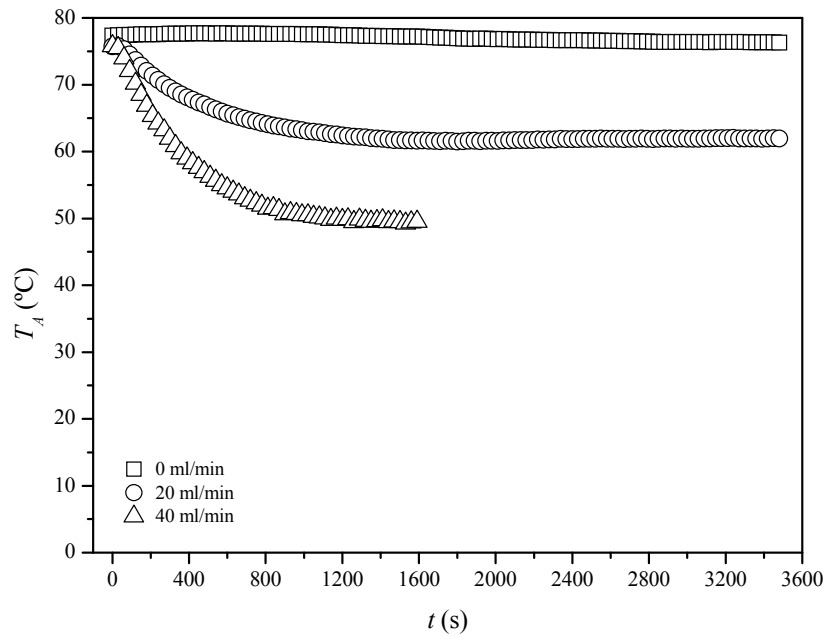


Figura D21 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,24 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de leite desnatado sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

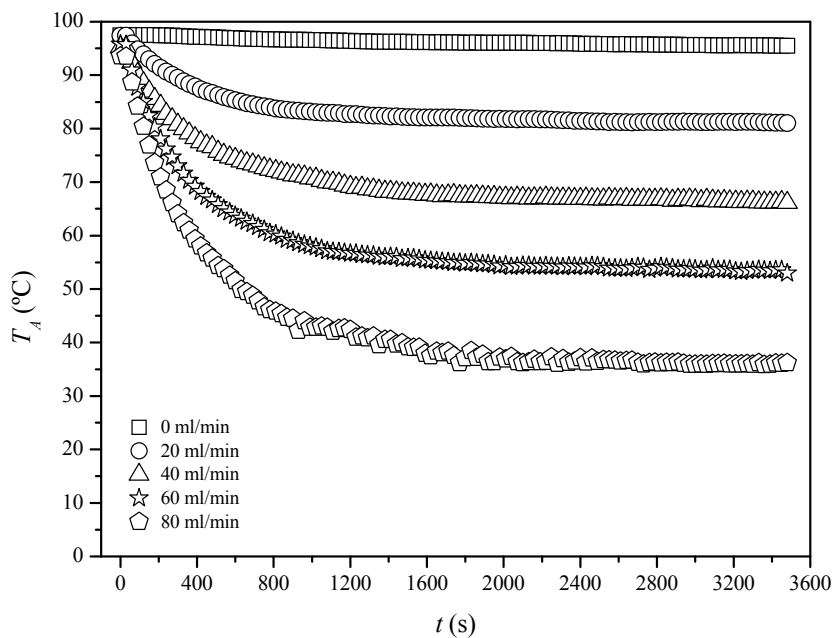


Figura D22 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,12 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de leite desnatado sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

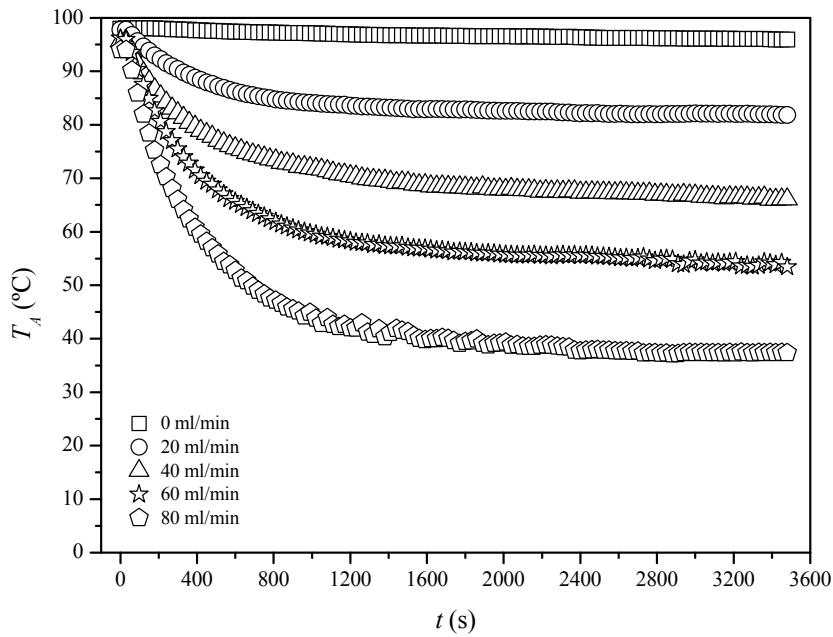


Figura D23 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,20 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de leite desnatado sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

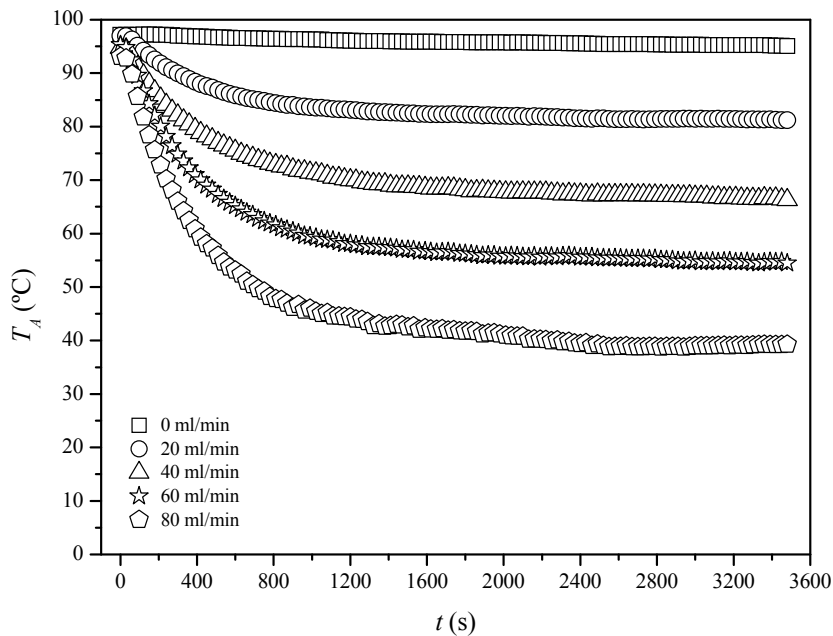


Figura D24 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,24 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de leite desnatado sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

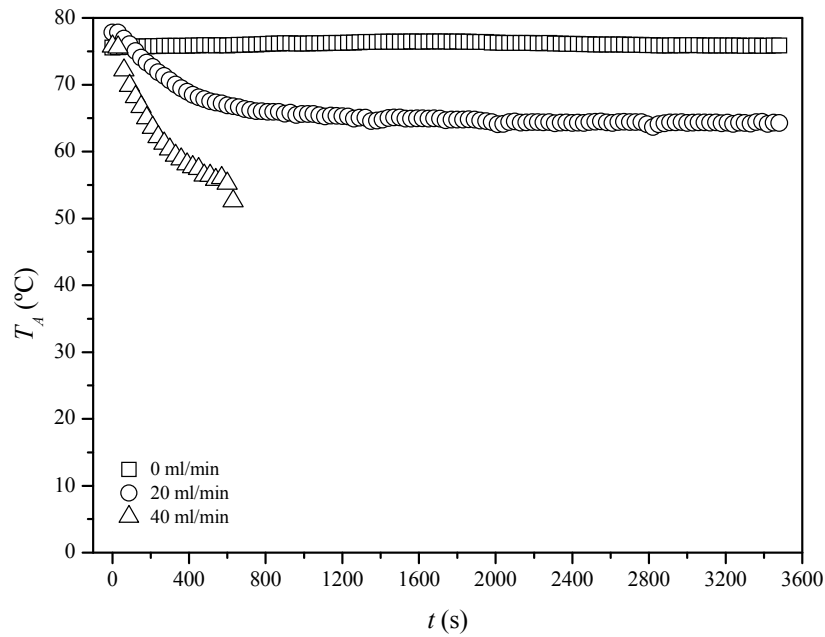


Figura D25 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,12 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

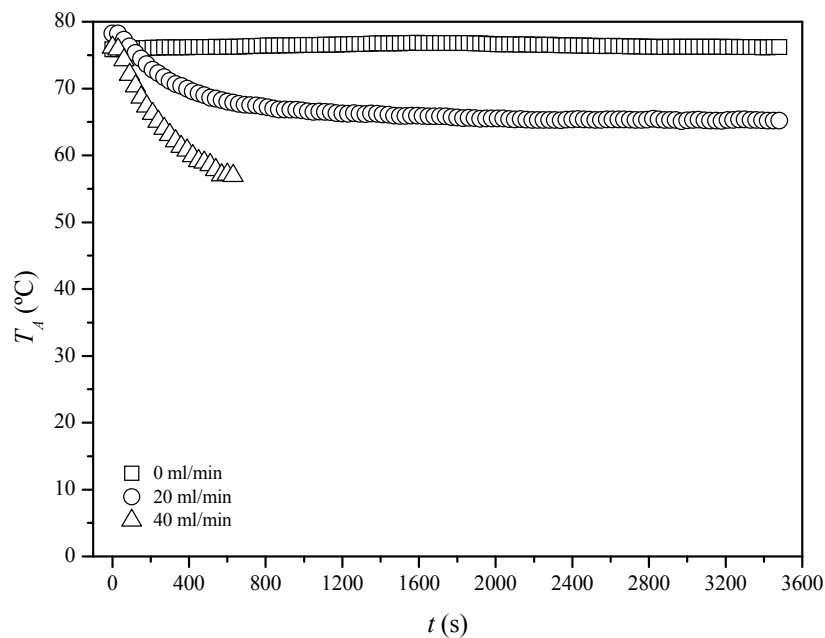


Figura D26 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,20 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

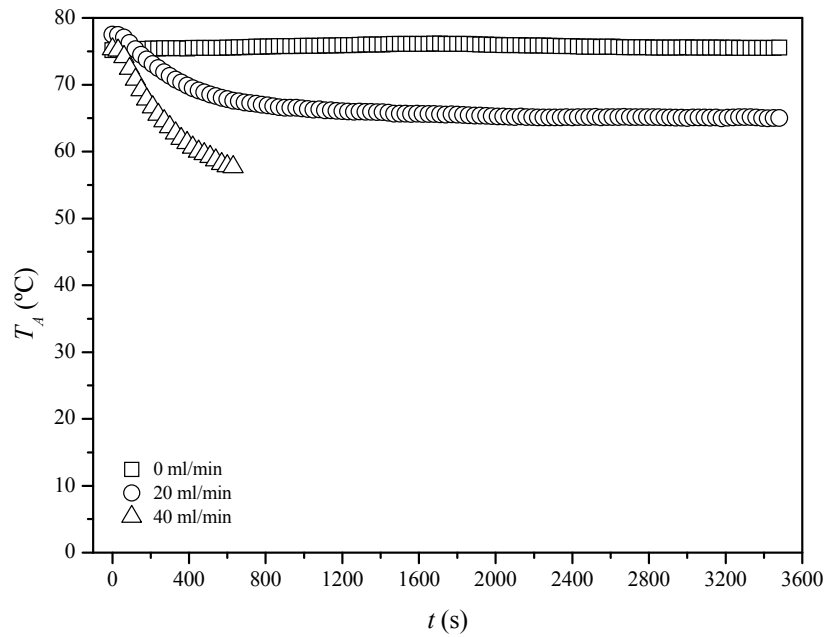


Figura D27 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,24 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

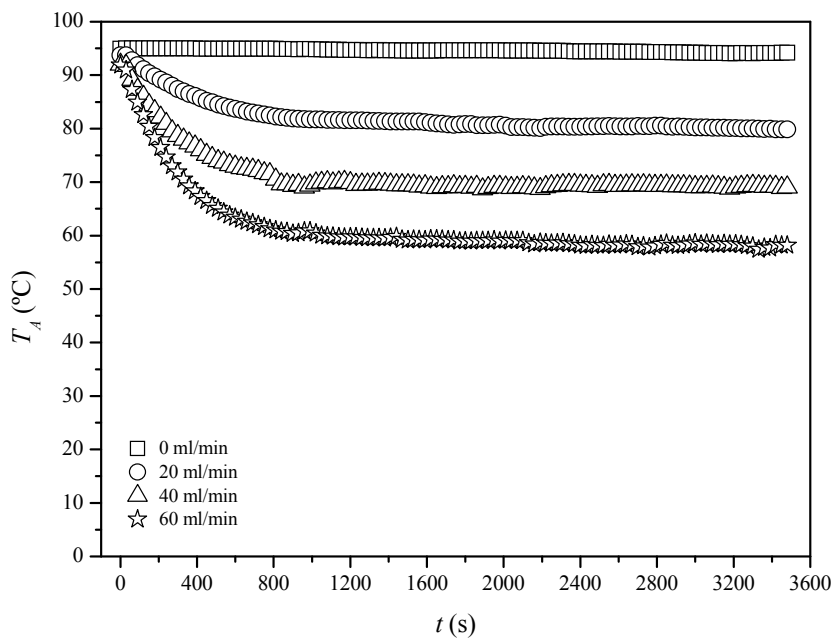


Figura D28 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,12 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

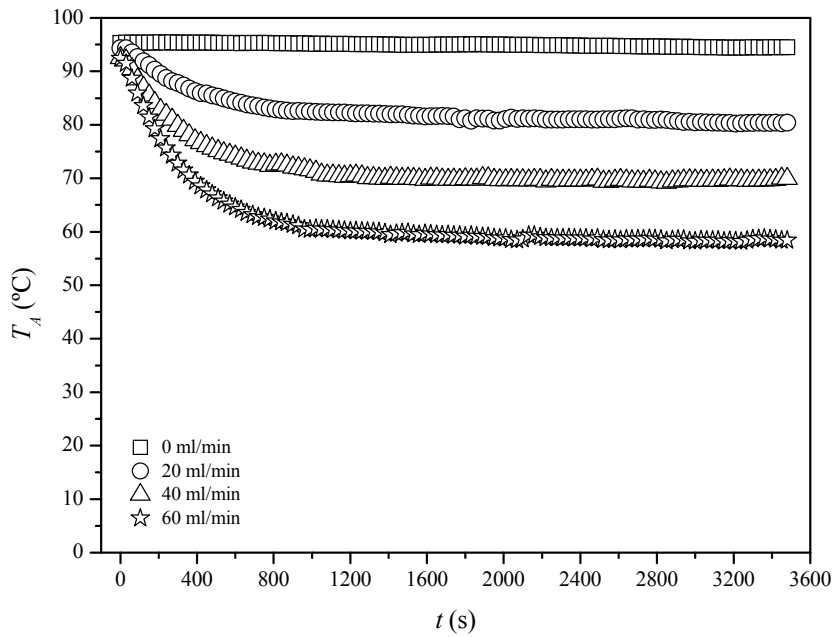


Figura D29 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,20 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

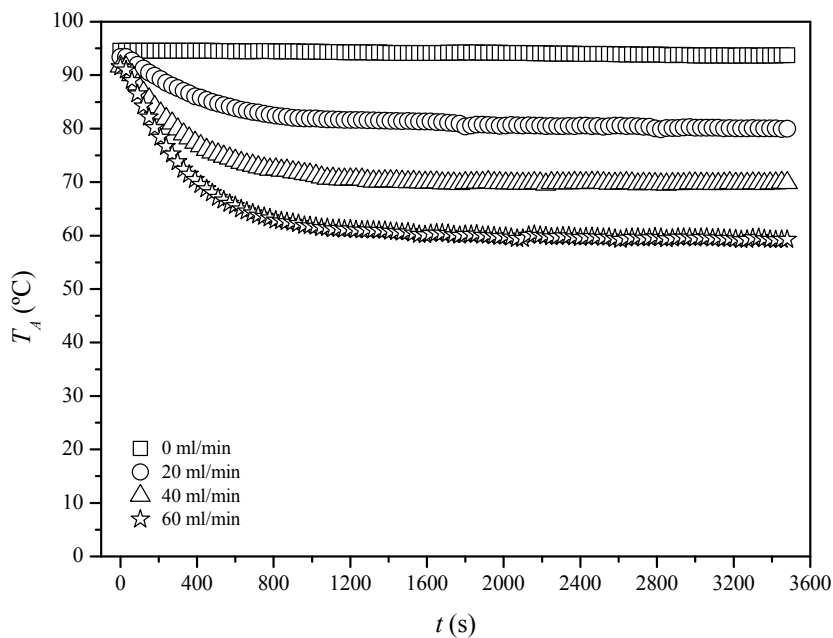


Figura D30 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,24 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

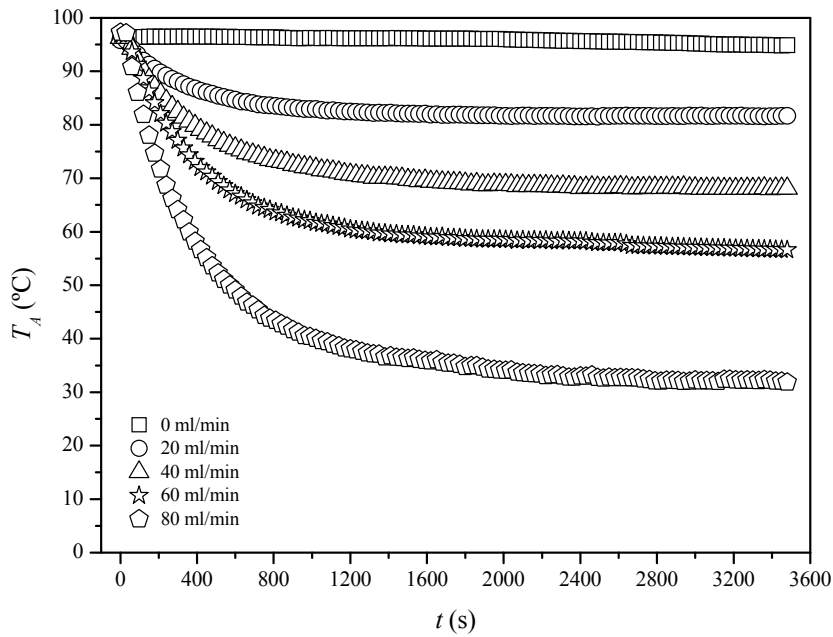


Figura D31 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,12 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de $\text{CaCO}_3 - \text{CI}$ sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C} - 1,30\text{ } u_{mj}$.

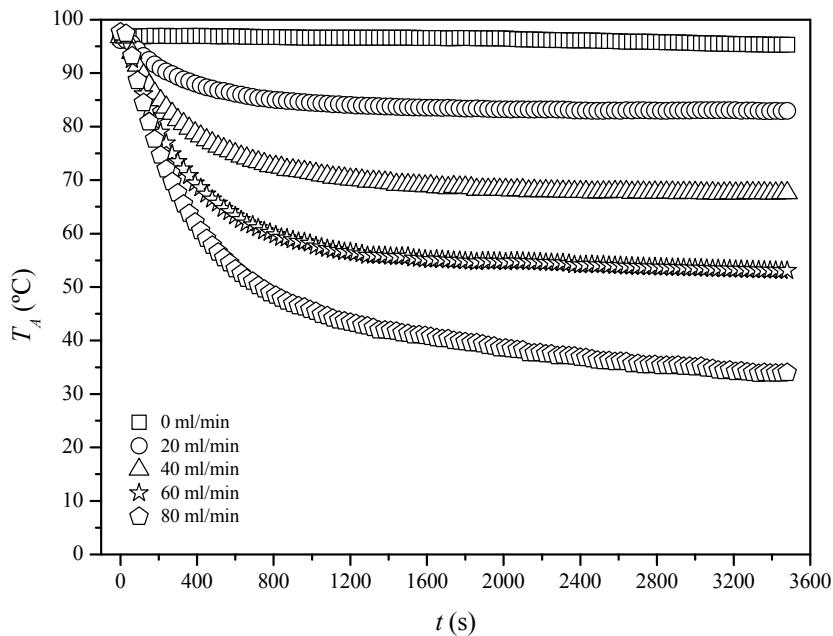


Figura D32 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,20 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de $\text{CaCO}_3 - \text{CI}$ sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C} - 1,30\text{ } u_{mj}$.

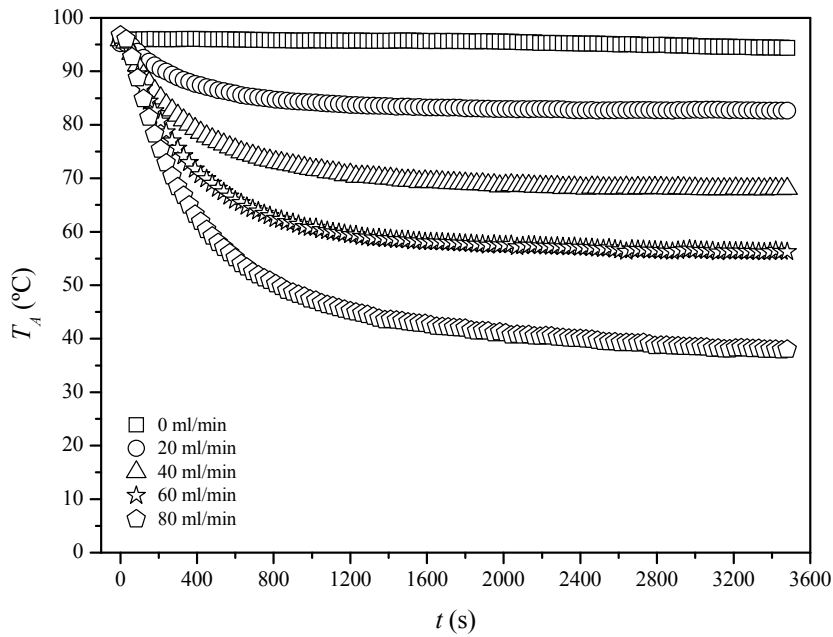


Figura D33 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,24 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de CaCO_3 - CI sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$.

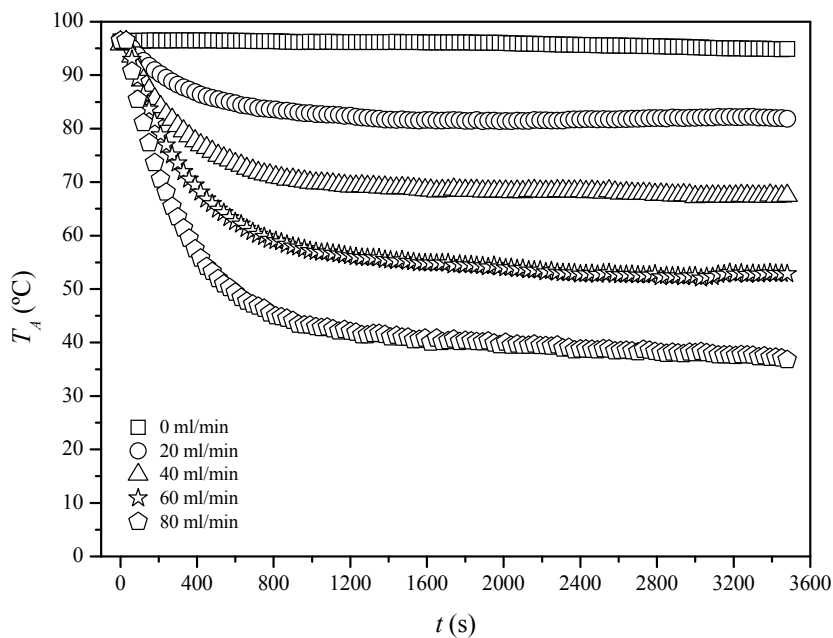


Figura D34 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,12 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de CaCO_3 - C3 sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$.

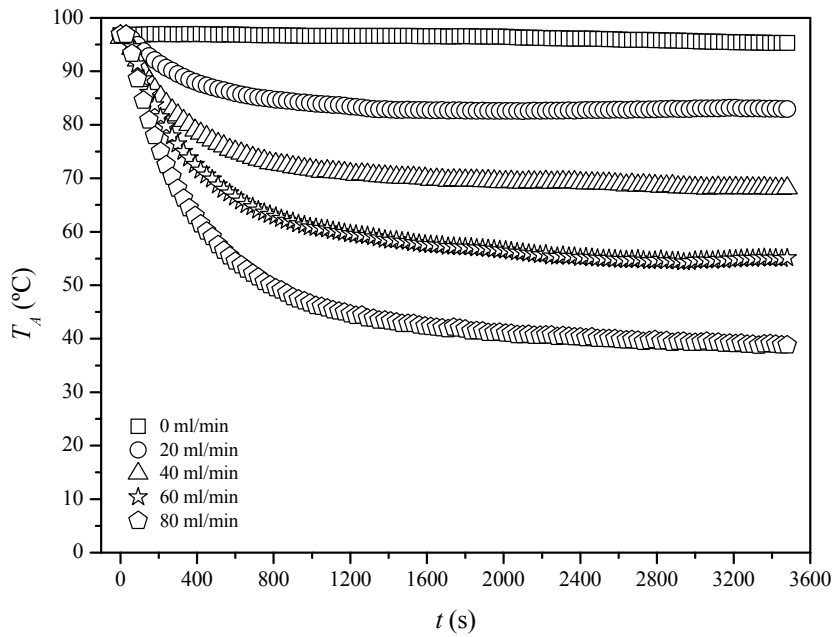


Figura D35 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,20 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de CaCO_3 - C3 sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$.

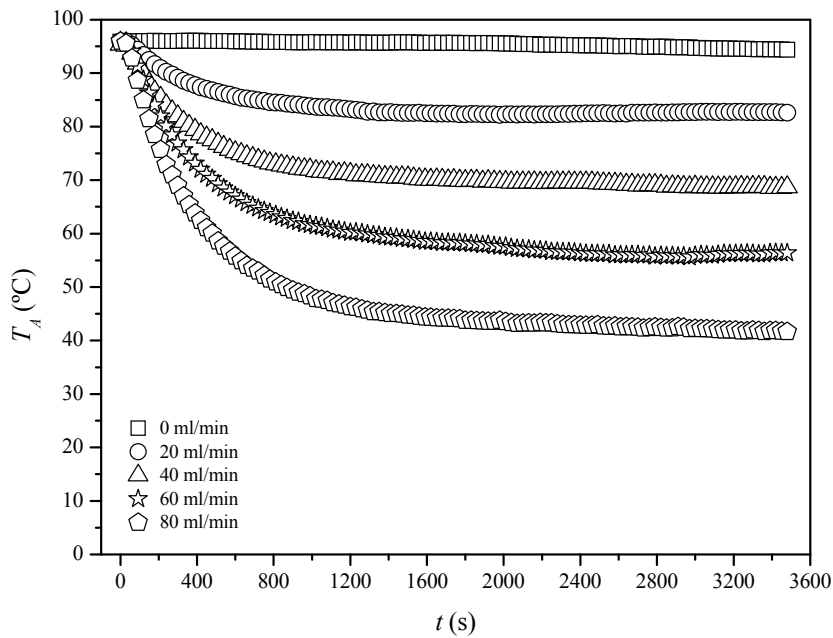


Figura D36 - Temperatura do leito de partículas em função do tempo na posição axial de 0,24 m do leito de jorro de coluna cheia para a secagem de CaCO_3 - C3 sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1,30\text{ }u_{mj}$.

APÊNDICE E

DADOS EXPERIMENTAIS DA QUEDA DE PRESSÃO DO LEITO

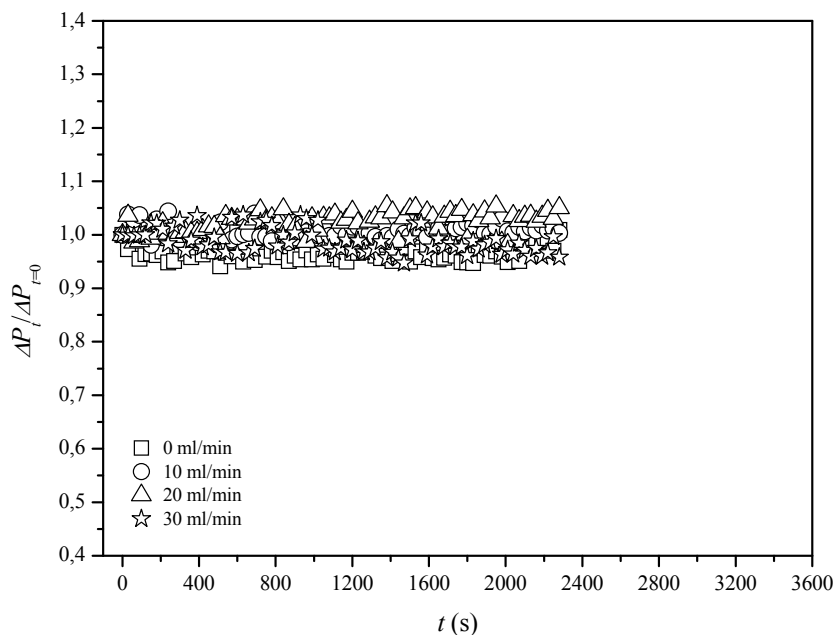


Figura E1 - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro em meia coluna em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

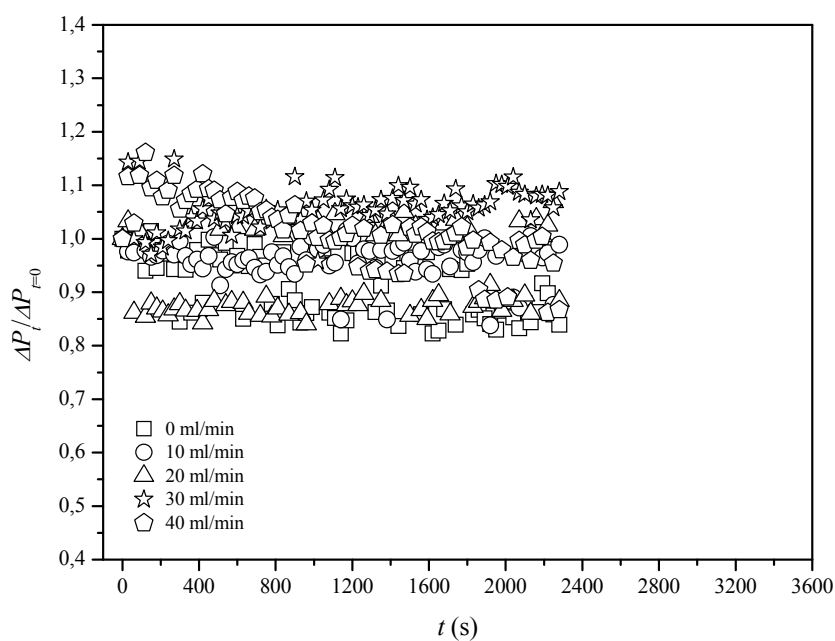


Figura E2 - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro em meia coluna em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

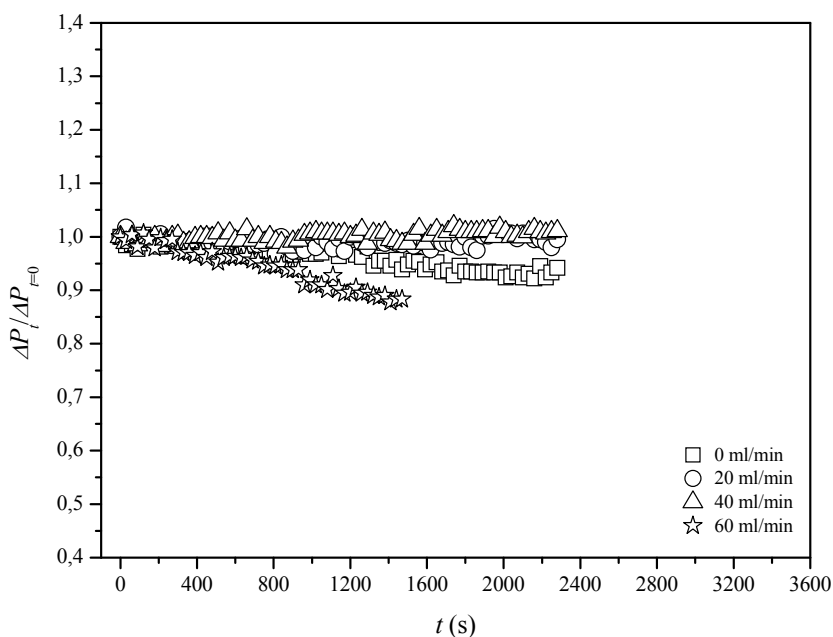


Figura E3 - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

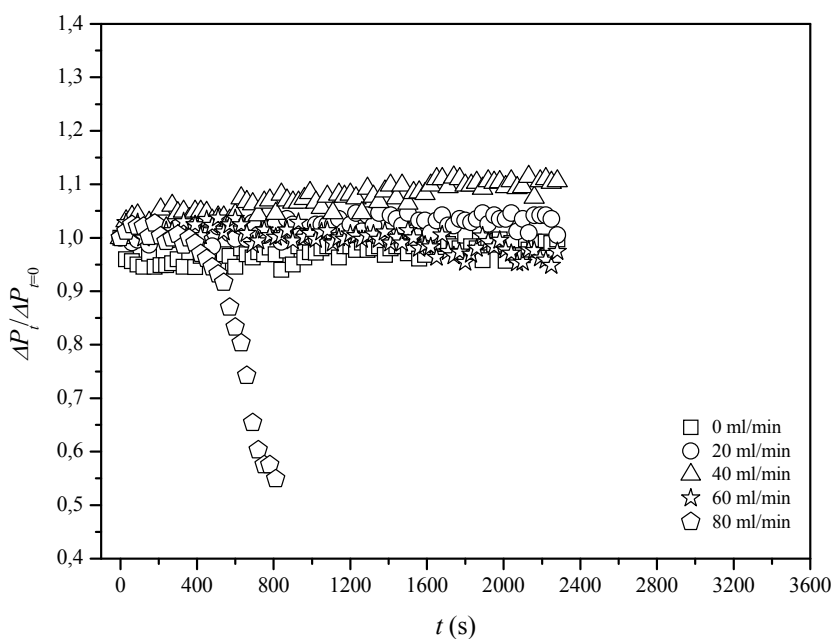


Figura E4 - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,30 u_{mj} .

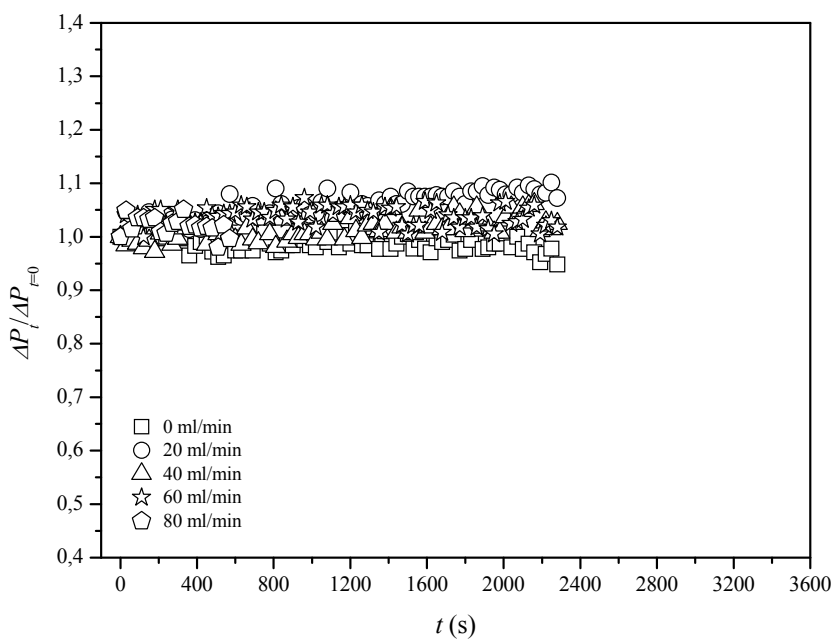


Figura E5 - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,15 u_{mj} .

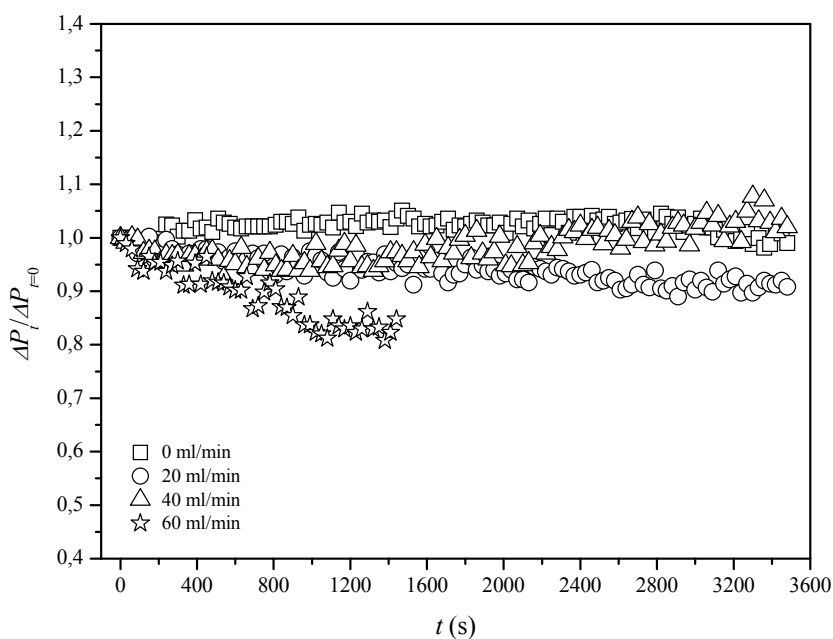


Figura E6 - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de lodo de esgoto sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

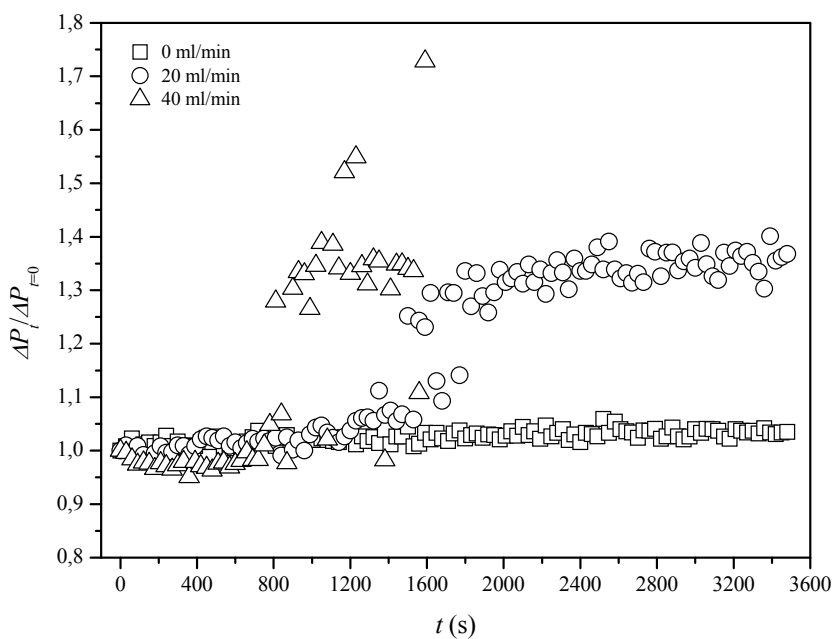


Figura E7 - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de leite desnatado sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

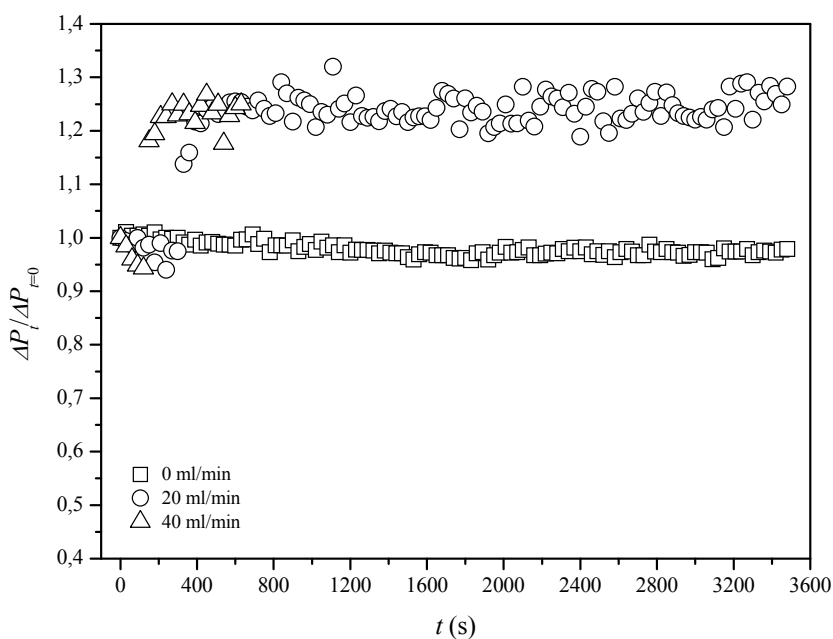


Figura E8 - Adimensional de queda de pressão do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

APÊNDICE F

DADOS EXPERIMENTAIS DA VELOCIDADE DO AR DE ENTRADA DO LEITO

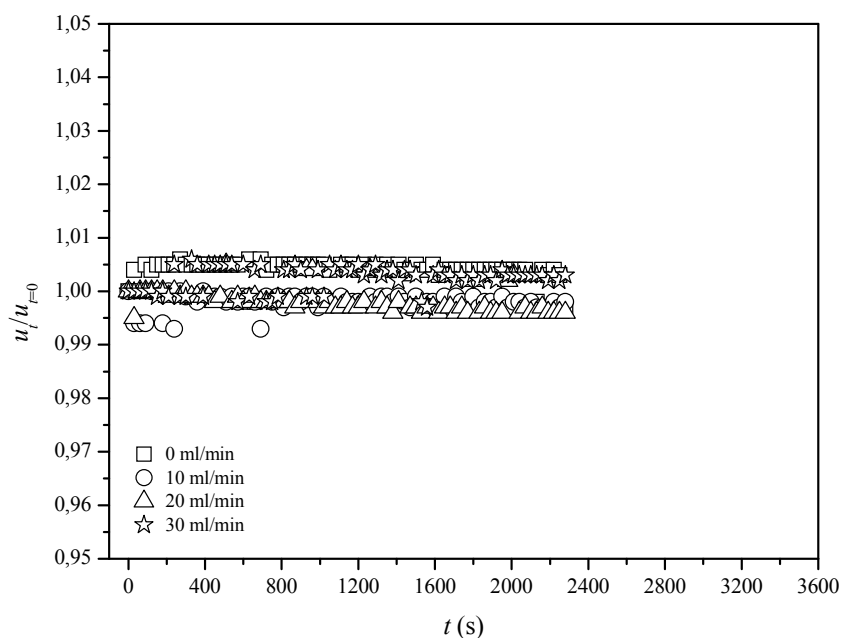


Figura F1 - Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro em meia coluna em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 80 °C - $1,15 u_{mj}$.

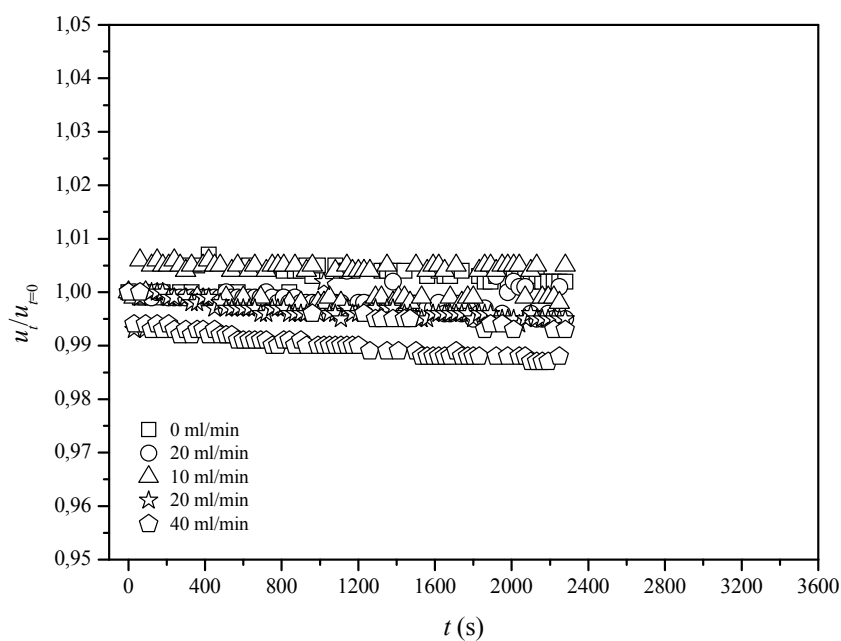


Figura F2 - Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro em meia coluna em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 100 °C - $1,30 u_{mj}$.

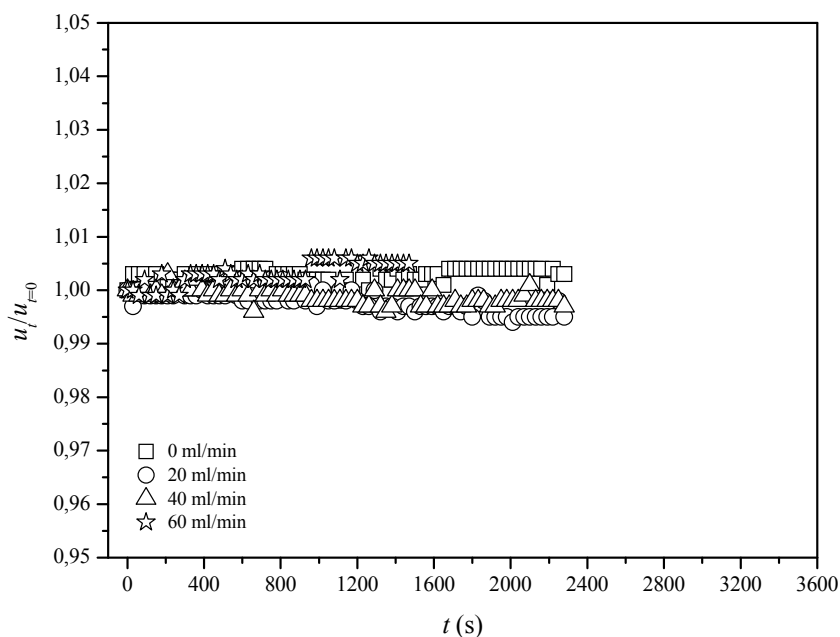


Figura F3 - Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

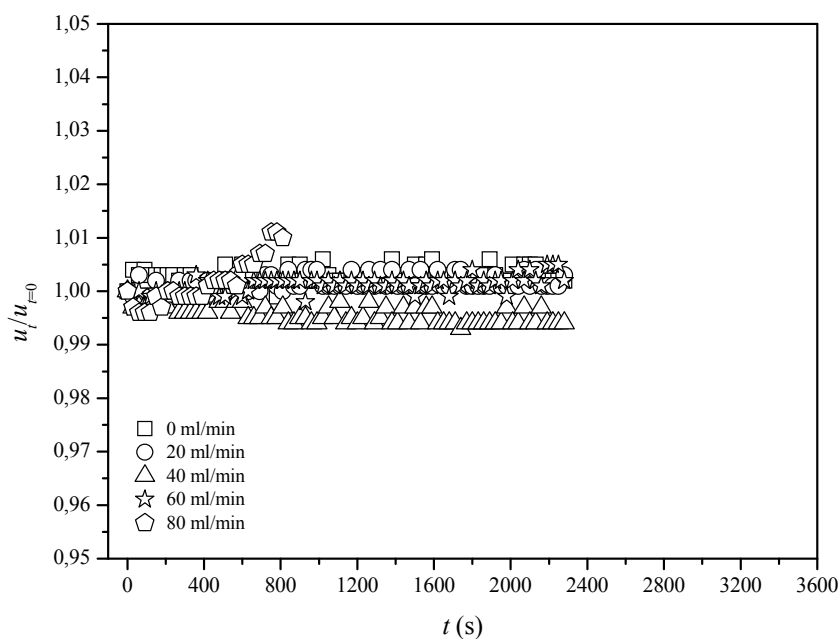


Figura F4 - Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 80 °C - 1,30 u_{mj} .

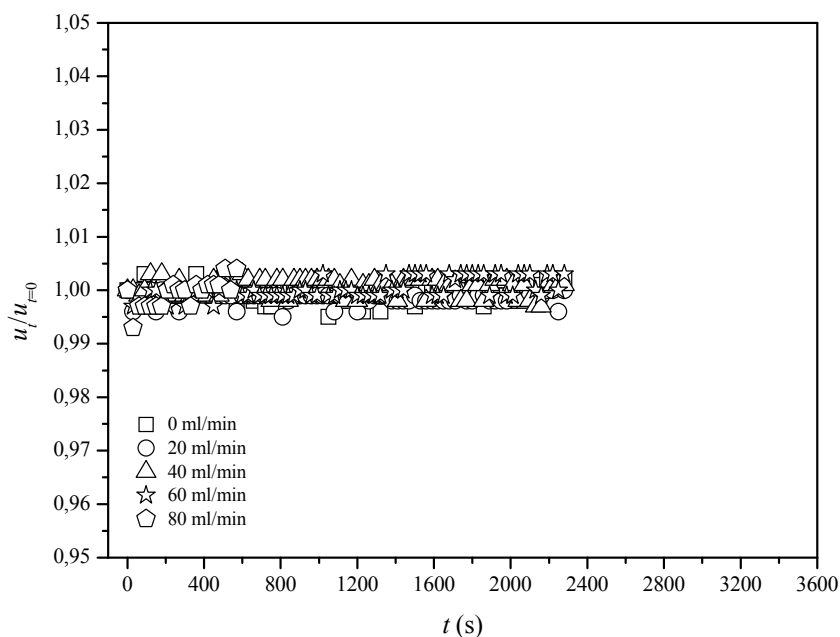


Figura F5 - Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,15 u_{mj} .

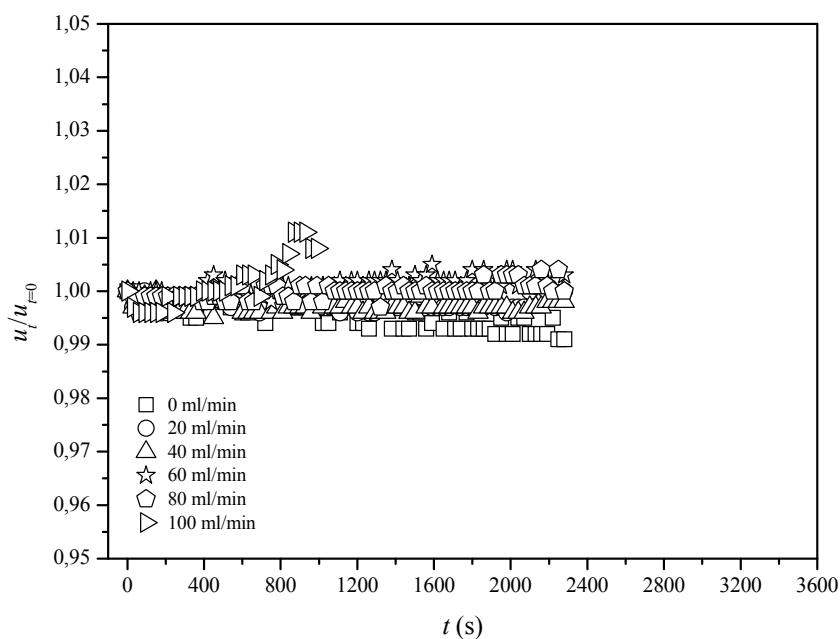


Figura F6 - Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a evaporação de água sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

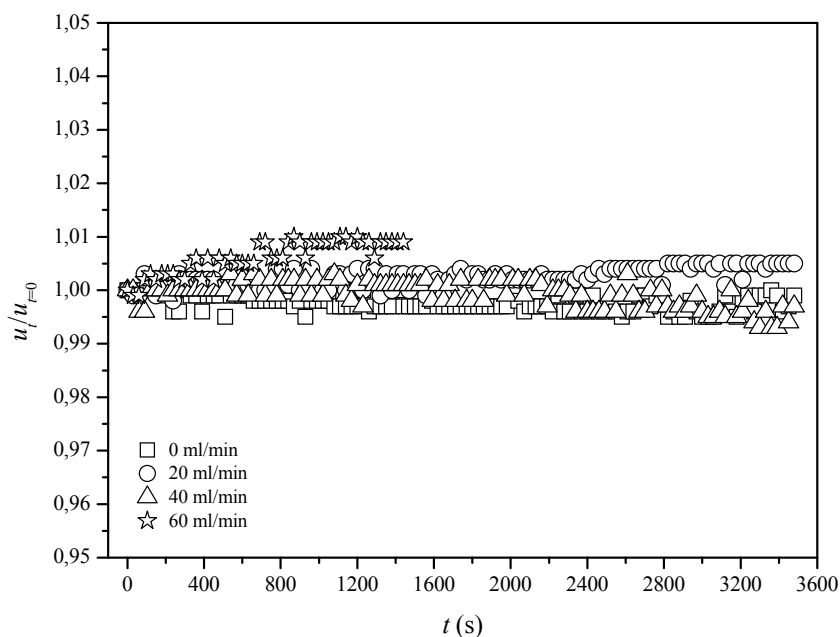


Figura F7 - Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de lodo de esgoto sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

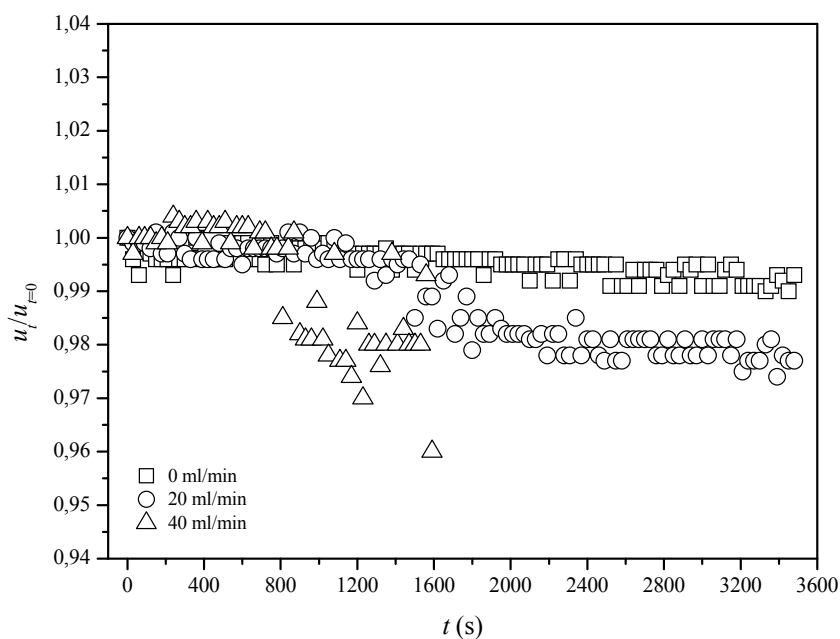


Figura F8 - Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de leite desnatado sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

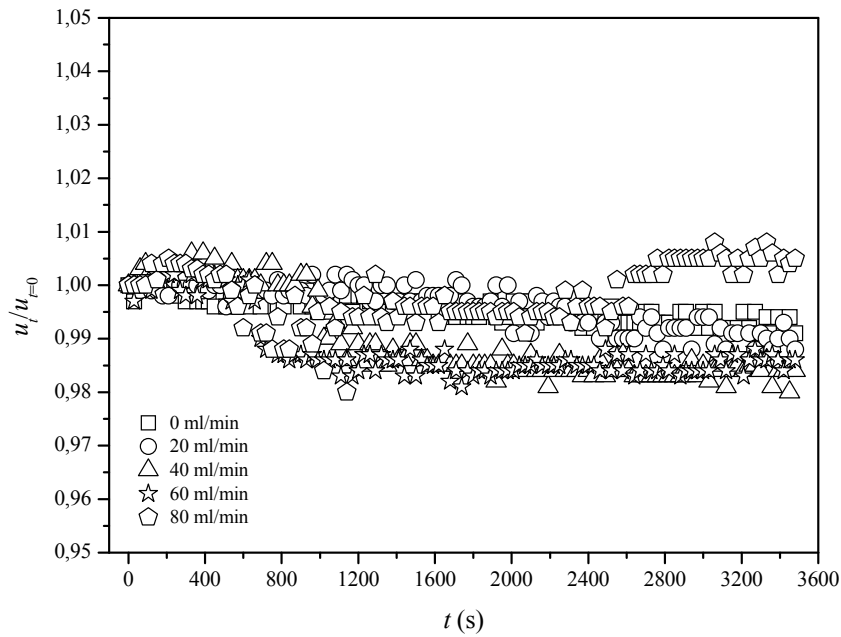


Figura F9 - Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de leite desnatado sob condições de 100 °C - 1,30 u_{mj} .

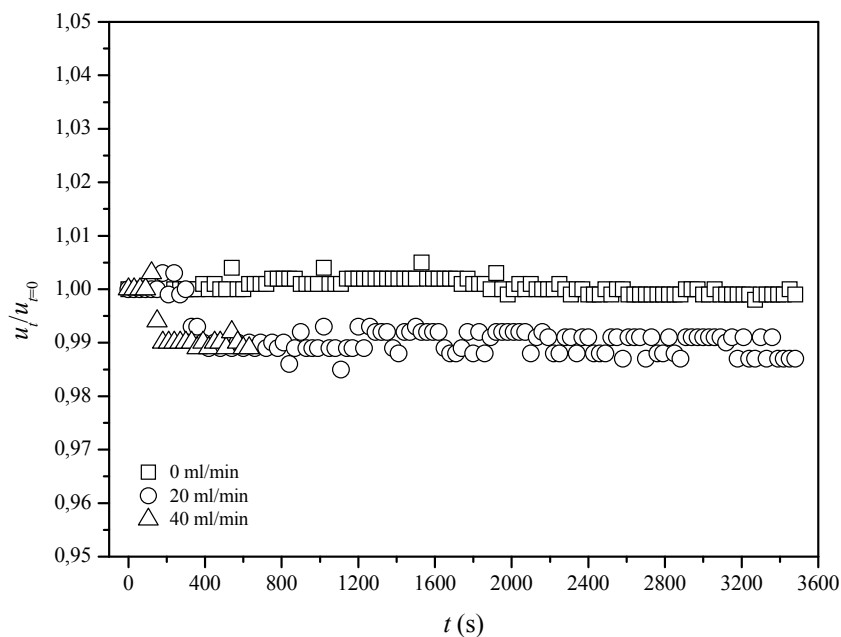


Figura F10 - Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de 80 °C - 1,15 u_{mj} .

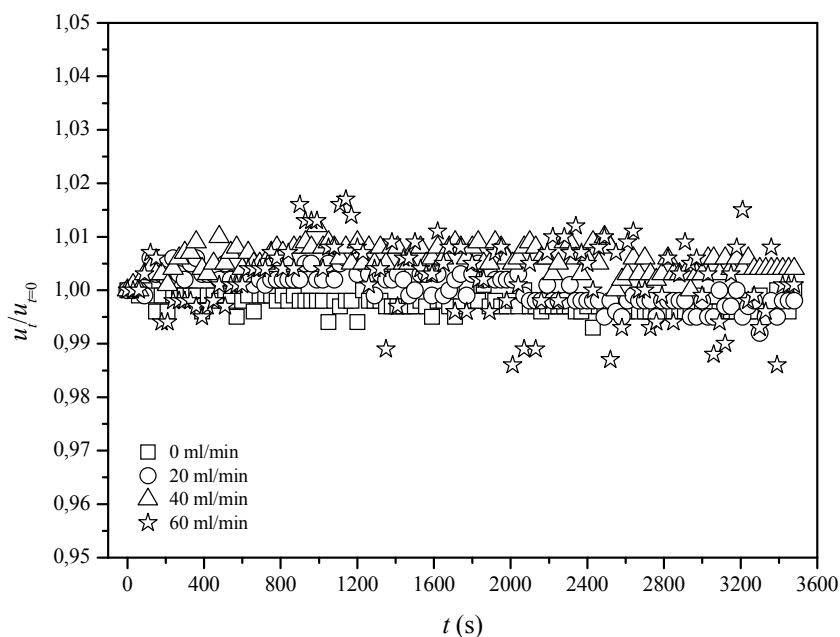


Figura F11 - Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de ovo homogeneizado sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C} - 1,30 u_{mj}$.

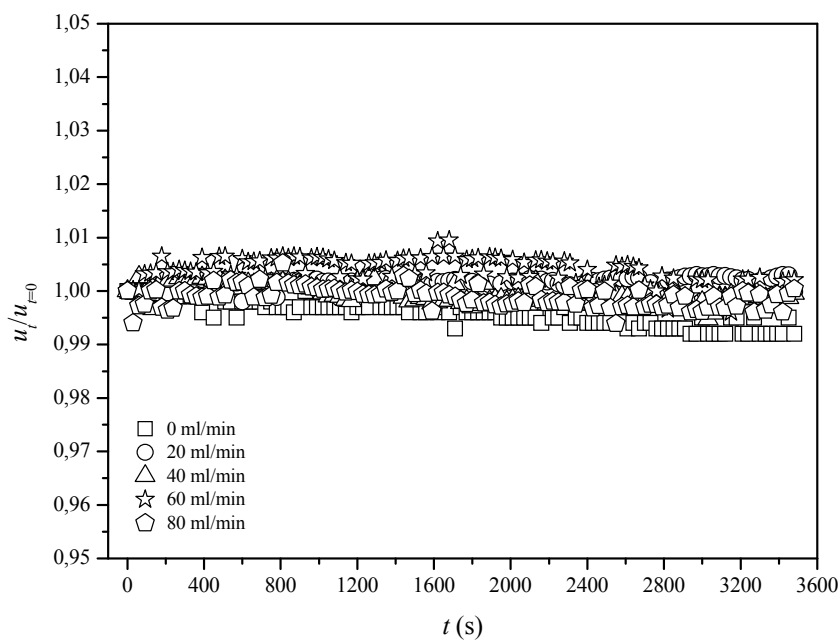


Figura F12 - Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de $\text{CaCO}_3 - CI$ sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C} - 1,30 u_{mj}$.

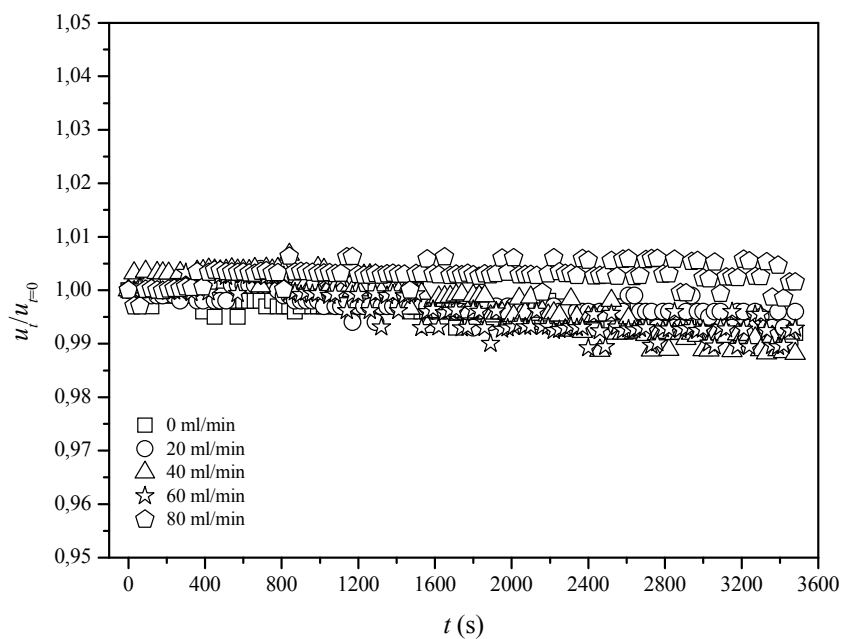


Figura F13 - Adimensional de velocidade do ar de entrada do leito de jorro de coluna cheia em função do tempo para a secagem de $\text{CaCO}_3 - \text{C2}$ sob condições de $100\text{ }^\circ\text{C} - 1,30 u_{mj}$.

APÊNDICE G

UMIDADE DO PÓ E DO RECOBRIMENTO FORMADO

Tabela G1 - Umidade do pó produzido em função do tempo.

Pasta	Q_p (ml/min)	Condições	U (%)					
			0-10 min	10-20 min	20-30 min	30-40 min	40-60 min	
Lodo de esgoto	20	80 °C - 1,15 u_{mj}	3,94	4,05	4,15	3,98	3,76 ±0,04	
	40		4,41	5,16	5,65	5,77	5,85 ±0,03	
	60		5,81	7,76	8,90	-	-	
	20	100 °C - 1,30 u_{mj}	2,88	2,71	2,71	2,66	2,51 ±0,02	
	40		3,06	3,41	3,67	3,79	3,56 ±0,12	
	60		4,43	5,53	6,08	6,21	6,01 ±0,11	
	80		5,43	7,60	9,24	13,42	16,59 ±1,99	
	20	80 °C - 1,15 u_{mj}	5,28	5,41	5,26	5,09	4,99 ±0,08	
	40		5,36	7,37	7,37	-	-	
	Leite desnatado	20	100 °C - 1,30 u_{mj}	4,72	4,09	3,79	3,59	3,41 ±0,02
		40		5,18	4,95	4,70	5,52	4,33 ±0,04
		60	80 °C - 1,15 u_{mj}	5,03	7,21	7,34	7,44	7,55 ±0,02
80		6,83		8,97	9,83	10,07	17,57	

Tabela G1 - Continuação.

Pasta	Q_p (ml/min)	Condições	U (%)				
			0-10 min	10-20 min	20-30 min	30-40 min	40-60 min
CaCO ₃ - C1	20	100 °C - 1,30 u_{mj}	0,43	0,46	0,44	0,44	0,44 ±0,02
	40		0,50	0,44	0,48	0,49	0,50 ±0,01
	60		0,44	0,46	0,49	0,55	0,58 ±0,03
	80		0,48	0,43	0,56	0,64	0,63 ±0,04
CaCO ₃ - C2	20	100 °C - 1,30 u_{mj}	0,57	0,44	0,45	0,39	0,41 ±0,03
	40		0,41	0,38	0,40	0,41	0,46 ±0,01
	60		0,41	0,41	0,36	0,44	0,51 ±0,04
	80		0,43	0,48	0,51	0,59	0,57 ±0,04
CaCO ₃ - C3	20	100 °C - 1,30 u_{mj}	0,41	0,38	0,39	0,42	0,42 ±0,03
	40		0,50	0,36	0,40	0,46	0,44 ±0,03
	60		0,39	0,38	0,43	0,46	0,45 ±0,01
	80		0,45	0,42	0,46	0,48	0,74 ±0,05

Tabela G2 - Umidade do recobrimento formado nas partículas inertes.

Pasta	Q_p (ml/min)	Condições	U (%)		
			Amostragem em 0,16 m	Amostragem em 0,22 m	
Lodo de esgoto	20	80 °C - 1,15 u_{mj}	5,13 ±0,27	4,34 ±0,35	
	40		8,69 ±0,26	7,95 ±0,23	
	60		6,45 ±0,58	67,56 ±10,89	
	20	100 °C - 1,30 u_{mj}	4,31 ±0,04	3,72 ±0,61	
	40		6,59 ±0,34	6,54 ±0,26	
	60		6,39 ±0,15	6,60 ±0,30	
	80		8,38 ±0,15	8,68 ±0,20	
	20		80 °C - 1,15 u_{mj}	6,62 ±0,58	7,01 ±0,67
	40			7,02 ±0,50	7,11 ±0,49
Leite desnatado	20	100 °C - 1,30 u_{mj}	5,52 ±0,04	5,16 ±0,43	
	40		4,94 ±0,02	5,11 ±0,07	
	60		6,86 ±0,12	7,32 ±0,08	
	80		8,62 ±0,12	12,28 ±0,40	

Tabela G2 - Continuação.

Pasta	Q_p (ml/min)	Condições	U (%)	
			Amostragem em 0,16 m	Amostragem em 0,22 m
CaCO ₃ - C1	20	100 °C - 1,30 u_{mj}	3,66 ±0,36	3,47 ±0,10
	40		4,21 ±0,23	3,40 ±0,31
	60		5,44 ±0,68	5,34 ±0,23
	80		5,57 ±0,71	5,02 ±0,80
CaCO ₃ - C2	20	100 °C - 1,30 u_{mj}	5,52 ±0,25	3,86 ±0,92
	40		4,81 ±0,35	4,01 ±0,47
	60		3,15 ±0,02	2,55 ±0,20
	80		3,91 ±0,16	11,88 ±1,59
CaCO ₃ - C3	20	100 °C - 1,30 u_{mj}	4,50 ±0,36	3,91 ±0,09
	40		3,67 ±0,51	3,01 ±0,64
	60		2,74 ±0,09	2,28 ±0,10
	80		2,45 ±0,41	10,17 ±2,40

APÊNDICE H

MODELO CST DESENVOLVIDO EM MODO MATLAB

```
%Secagem de CaCO3 no leito de jorro:
%-----
clear all
clc
%-----
%Transposição de variáveis:
global Fe Xe We Ye a b Ys Xs Tg Fs Ws
global Tge Tpe PMar PMagua cpge cppe cpps cpgs ...
    cpi cpj cpa cps Mi Mj DH Al Vl Vi hj Tamb roar rop Mg Q Ws
%-----
%Formato para impressão:
%-----
format short g
%-----
%Dados de entrada:
%-----
a=0.65636;
b=0.5e-1;
Qp=40;           %Vazão de alimentação da pasta(ml/min)
Qar=3.29;        %Vazão mássica do ar na entrada (kg/min)
rop=1.01535;     %Densidade da pasta(g/cm3)
C=0.0302;        %Concentração da pasta(-)
UAe=0.01007;     %Umidade absoluta do ar na entrada (g H2O / g ar seco)
rl=25.0;         %Raio do leito de jorro(cm)
hc=100.0;        %Altura da coluna cilíndrica(cm)
hi=50.0;         %Altura do cone inferior(cm)
ri=1.5;          %Raio do bocal de entrada(cm)
hs=47.0;         %Altura do cone superior(cm)
rs=2.5;          %Raio do bocal de saída(cm)
E=0.37;          %Porosidade do leito de partículas(-)
Mi=20000;        %Massa de inertes(g)
roi=2.512;       %Densidade dos inertes(g/cm3)
roar=0.001;      %Densidade do ar(g/cm3)
Tamb=25+273.15;  %Temperatura ambiente (K)
hj=0.0017;       %Coeficiente de transferência de calor(J/scm2 K)
PMar=29.0;       %Peso molecular do ar (g/gmol)
PMagua=18.0;     %Peso molecular da água (g/gmol)
P=101.321;       %Pressão atmosférica (KPa)
Tge=104.77+273.15; %Temperatura do gás na entrada (K)
Tpe=25+273.15;  %Temperatura da pasta na entrada (K)
DH=2342.0;       %Calor latente de vaporização (J/g)
cpi=0.835;       %Capacidade calorífica das partículas inertes (J/g K)
cpj=0.557;       %Capacidade calorífica do aço inox (J/g K)
Mj=40000;        %Massa do leito de jorro (g)
cps=0.810;       %Capacidade calorífica da pasta seca na saída (J/g K)
Tgs0=87.38+273.15; %Temperatura do ar de saída no t=0 s (K)
%-----
%Equações auxiliares:
%-----
Fe=(Qp*rop)/60;   %Vazão mássica da pasta na entrada (g/s)
Xe=1-C;           %Fração mássica de água líquida na pasta na entrada (-)
We=(Qar*1000)/60; %Fração mássica de água vapor no ar (-)
Ye=UAe/(1+UAe);  %Fração mássica de água vapor no ar (-)
Vi=((1-E)*Mi)/roi; %Volume dos inertes (cm3)
```

```

Vl=(pi*(rl^2)*hc)+... %Volume do leito (cm3)
    (pi*hi*((rl^2)+(rl*ri)+(ri^2)))+...
    (pi*hs*((rl^2)+(rl*rs)+(rs^2)));
Al=2*pi*rl*hc... %Área do leito (cm2)
    +pi*(rl+ri)*sqrt((hi^2)+((rl-ri)^2))+...
    +pi*(rl+rs)*sqrt((hs^2)+((rl-rs)^2));
Mg=(Vl-Vi)*roar;
cpare=((28.94)... %Cp do ar puro na entrada(J/g K)
    +(0.4147e-2*(Tge-273.15))...
    +(0.3191e-5*((Tge-273.15)^2))...
    -(1.965e-9*((Tge-273.15)^3)))/PMar;
cpave=((33.46)... %Cp da água vapor na entrada(J/g K)
    +(0.6880e-2*(Tge-273.15))...
    +(0.7604e-5*((Tge-273.15)^2))...
    -(3.593e-9*((Tge-273.15)^3)))/PMagua;
cpge=((Ye*cpave)+((1-Ye)*cpare)); %Cp do ar+água vapor na entrada (J/g K)
cpa=75.4/PMagua; %Cp da água líquida (J/g K)
cppe=((Xe*cpa)+((1-Xe)*cps)); %Cp da pasta na entrada (J/g K)
%-----
%Parâmetros de integração:
%-----
tspan=[0:30:3480]; %Intervalo de tempo na integração (s)
Ys0=[Ye]; %Fração mássica de água vapor
%no ar de secagem (-)
Tg0=[Tgs0]; %Temperatura do ar na saída (K)
var_t=[Ys0 Tg0];
[t,var]=ode45('fSCaCO3LJ',tspan,var_t);
%-----
% Respostas:
%-----
tt=[0:30:3480];
r=a*(1-exp(-b.*tt));
Fs=Fe-r;
Xs1=(Fe*Xe-r)./Fs;
Xs=Xs1';
UA=var(:,1)./(1-var(:,1));
Pvssim=exp((-7511.52./var(:,2))... %Pressão de Vapor na Saturação (KPa)
    +(89.63121)+(0.02399897.*var(:,2))...
    -(1.1654551e-5.*(var(:,2).^2))...
    -(1.2810336e-8.*(var(:,2).^3))...
    +(2.0998405e-11.*(var(:,2).^4))...
    -(12.150799.*(log(var(:,2)))));
Pvsim=(UA.*P)./(0.62198+UA); %Pressão de Vapor (KPa)
UR_sim=(Pvsim./Pvssim).*100; %Umidade Relativa (%)
load('SCaCO3_100C_30JM_40ml_C1.txt');
tempo=SCaCO3_100C_30JM_40ml_C1(:,1);
UAexp=SCaCO3_100C_30JM_40ml_C1(:,2);
Tgexp=SCaCO3_100C_30JM_40ml_C1(:,3);
UR_exp=SCaCO3_100C_30JM_40ml_C1(:,4);
load('SCaCO3_Xsexp_100C_30JM_40ml_C1.txt');
tempoXs=SCaCO3_Xsexp_100C_30JM_40ml_C1(:,1);
Xsexp=SCaCO3_Xsexp_100C_30JM_40ml_C1(:,2);
Res_t=[t UA UR_sim var(:,2)-273.15 Xs.*100 UAexp UR_exp Tgexp]
Rsimu=[t UA UR_sim var(:,2)-273.15 Xs.*100 UAexp UR_exp Tgexp]';
fid=fopen('teste.txt','w');
fprintf(fid,'%6.0f %6.5f %6.2f %6.2f %6.5f %6.5f %6.2f %6.2f\n',Rsimu);
fclose(fid);
%-----
%Gráficos:
%-----

```

```

figure('name','Temperatura do Gás de Saída');
plot(t,var(:,2)-273.15,tempo,Tgexp,'o');
axis([0 3600 0 100]);
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Tg (C)');
figure('name','Umidade do Produto Final (BU)');
plot(t,Xs.*100,tempoXs,Xsexp,'o');
axis([0 3600 0 100]);
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Xs (%)');
figure('name','Umidade Absoluta');
plot(t,UA,tempo,UAexp,'o');
axis([0 3600 0 0.05]);
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('UA(gH2O/gAR SECO)');
figure('name','Umidade Relativa');
plot(t,UR_sim,tempo,UR_exp,'o');
axis([0 3600 0 100]);
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('UR(%)');
%-----
%FIM

function df = fSCaCO3LJ(t,var)
%-----
%Transposição de variáveis:
%-----
global Fe Xe We Ye a b Ys Xs Tg Fs Ws
global Tge Tpe PMar PMagua cpge cppe cpps cpgs ...
      cpi cpj cpa cps Mi Mj DH Al Vl Vi hj Tamb roar rop Mg Q Ws
%-----
%Variáveis:
%-----
Ys=var(1);
Tg=var(2);
%-----
%Equações:
%-----
r=a*(1-exp(-b*t));
Fs=Fe-r; %Fração mássica de pasta seca na saída
(g/s)
Ws=We+r; %Fração mássica de gás na saída (g/s)
Xs=(Fe*Xe-r)/Fs;
cpars=((28.94)... %Cp do ar puro na saída (J/g K)
      +(0.4147e-2*(Tg-273.15))...
      +(0.3191e-5*((Tg-273.15)^2))...
      -(1.965e-9*((Tg-273.15)^3)))/PMar;
cpavs=((33.46)... %Cp da água vapor na saída(J/g K)
      +(0.6880e-2*(Tg-273.15))...
      +(0.7604e-5*((Tge-273.15)^2))...
      -(3.593e-9*((Tg-273.15)^3)))/PMagua;
cpgs=((Ys*cpavs)+((1-Ys)*cpars)); %Cp do ar+água vapor na saída (J/g K):
cpps=((Xs*cpa)+((1-Xs)*cps)); %Cp da pasta na saída (J/g K)
Q=hj*Al*(Tg-Tamb);
dYs=(1/Mg)*(We*Ye-Ws*Ys+r);
dTg=(We*cpge*Tge+Fe*cppe*Tpe-Ws*cpgs*Tg-Fs*cpps*Tg-r*DH-Q)...
      /(Mg*cpgs+Mi*cpi+Mj*cpj);
%-----

```

```
% Respostas:
```

```
%-----  
df=[dYs dTg]';
```

```
%-----  
% FIM
```


APÊNDICE I

DADOS DE ENTRADA USADOS NAS SIMULAÇÕES

Tabela II - Dados de entrada usados nas simulações.

Pasta	Q_p (ml/min)	Condições	$UA_{t=0}$ (kg _{água} /kg _{ar seco})	$UR_{t=0}$ (%)	$T_{ge,t=0}$ (°C)	$T_{gs,t=0}$ (°C)	h (J/s cm ² K)	a (g/s)	b (1/s)
	0		0,012960	6,49	81,50	70,50	0,0006	-	-
	20	80 °C - 1,15 u_{mj}	0,012600	6,13	81,50	71,20	0,0010	0,32333	0,4 10 ⁻¹
	40		0,013870	6,62	83,30	71,60	0,0018	0,64590	0,5 10 ⁻¹
	60		0,017360	8,56	82,50	70,70	0,0035	0,96710	0,6 10 ⁻¹
Lodo de esgoto	0		0,014750	3,59	102,50	88,20	0,0007	-	-
	20		0,013170	3,23	104,30	88,00	0,0010	0,32354	0,4 10 ⁻¹
	40	100 °C - 1,30 u_{mj}	0,012910	3,05	104,70	89,00	0,0016	0,64672	0,5 10 ⁻¹
	60		0,016450	4,43	102,30	85,50	0,0025	0,96876	0,6 10 ⁻¹
	80		0,021390	5,54	102,5	86,30	0,0045	1,28284	0,7 10 ⁻¹
	0		0,014090	7,44	82,32	69,26	0,0006	-	-
	20	80 °C - 1,15 u_{mj}	0,013660	7,56	81,41	68,20	0,0011	0,31203	0,5 10 ⁻¹
	40		0,014640	8,20	80,19	67,87	0,0019	0,62239	0,6 10 ⁻¹
Leite desnatado	0		0,015240	3,47	105,27	89,90	0,0007	-	-
	20		0,010190	2,44	104,91	88,76	0,0009	0,31255	0,4 10 ⁻¹
	40	100 °C - 1,30 u_{mj}	0,010030	2,53	103,94	87,43	0,0015	0,62450	0,5 10 ⁻¹
	60		0,014430	3,62	103,21	87,43	0,0025	0,93340	0,6 10 ⁻¹
	80		0,011170	3,03	101,64	85,48	0,0065	1,22838	0,7 10 ⁻¹

Tabela II - Continuação.

Pasta	Q_p (ml/min)	Condições	$UA_{t=0}$ (kg _{água} /kg _{ar seco})	$UR_{t=0}$ (%)	$T_{ge,t=0}$ (°C)	$T_{gs,t=0}$ (°C)	h (J/s cm ² K)	a (g/s)	b (1/s)
CaCO ₃ - C1	0		0,009865	2,45	104,95	87,86	0,0007	-	-
	20		0,009945	2,49	104,65	87,60	0,0011	0,32818	0,4 10 ⁻¹
	40	100 °C - 1,30 u_{mj}	0,010070	2,55	104,77	87,38	0,0017	0,65636	0,5 10 ⁻¹
	60		0,009702	2,35	105,98	88,55	0,0028	0,98451	0,6 10 ⁻¹
	80		0,010540	2,54	104,40	88,56	0,0066	1,31266	0,7 10 ⁻¹
CaCO ₃ - C2	0		0,009865	2,45	87,86	104,95	0,0007	-	-
	20		0,012940	3,02	89,37	105,02	0,0011	0,32510	0,4 10 ⁻¹
	40	100 °C - 1,30 u_{mj}	0,011290	2,78	88,02	104,35	0,0017	0,65018	0,5 10 ⁻¹
	60		0,013360	3,36	87,40	102,67	0,0028	0,97525	0,6 10 ⁻¹
	80		0,017400	4,27	87,84	104,58	0,0066	1,30028	0,7 10 ⁻¹
CaCO ₃ - C3	0		0,009865	2,45	87,86	104,95	0,0007	-	-
	20		0,016100	4,03	87,40	104,16	0,0009	0,31918	0,4 10 ⁻¹
	40	100 °C - 1,30 u_m	0,015040	3,70	87,85	103,98	0,0014	0,63834	0,5 10 ⁻¹
	60		0,011170	2,80	87,57	105,19	0,0023	0,95752	0,6 10 ⁻¹
	80		0,010780	2,63	88,25	105,04	0,0061	1,27630	0,7 10 ⁻¹