

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

*ANÁLISE DA FLUIDODINÂMICA E
TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITO DE
Jorro COM ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA DE
SÓLIDOS PELA BASE*

PATRÍCIA MOREIRA LIMA

São Carlos –SP

2004

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

*ANÁLISE DA FLUIDODINÂMICA E
TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITO DE
JORRO COM ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA DE
SÓLIDOS PELA BASE*

PATRÍCIA MOREIRA LIMA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos necessários à obtenção de título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientação: Prof. Dr. Ronaldo Guimarães Corrêa

Co-orientação: Prof. Dr. José Teixeira Freire

São Carlos –SP

2004

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

L732af

Lima, Patrícia Moreira.

Análise da fluidodinâmica e transferência de calor em leito de jorro com alimentação contínua de sólidos pela base / Patrícia Moreira Lima. -- São Carlos : UFSCar, 2004.
114 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2004.

1. Indústria química. 2. Fluidodinâmica. 3. Calor - transmissão. 4. Leito de jorro. 5. Operação contínua. I. Título.

CDD: 661 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE **PATRÍCIA MOREIRA LIMA**, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 19 AGOSTO DE 2004.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Ronaldo Guimarães Corrêa
Orientador, PPG-EQ/UFSCar

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

Prof. Dr. Luis Alexandre Pedro de Freitas
FCFRP/USP

“A pior coisa que pode acontecer na vida de uma pessoa não é quando seu projeto não dá certo, seu plano de ação não funciona ou quando a viagem termina no lugar errado. O pior é não começar. Este é o maior naufrágio”.

(Amyr Klink – Mar Sem Fim)

*Aos meus pais Djalma e Maria,
e irmãos Paulo e Marcos*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ronaldo Guimarães Corrêa e ao Prof. Dr. José Teixeira Freire, pelos ensinamentos, pela orientação, pela dedicação e estímulo para o aprendizado e realização deste trabalho.

A todos os professores da área de Sistemas Particulados, em especial a Prof. Dra. Maria do Carmo Ferreira pelas sugestões que enriqueceram este trabalho.

A Prof. Maria Laura de Azevedo Passos pela atenção e disponibilidade em atender com seus conhecimentos específicos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos pelo suporte oferecido para realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de Mestrado.

Aos funcionários Oscar e Walter pela ajuda nos trabalhos de adaptação do equipamento.

Aos colegas de pós-graduação do Departamento de Engenharia Química, em especial Marcelo, Conceição, Leonardo, Fabíola, Alexei e Manoel pela amizade, companheirismo e troca de conhecimentos.

Aos meus amigos Carlos, Lílian, Ana Beatriz e Janete por sempre estarem presente, me dando força e incentivando a seguir em frente.

Aos meus irmãos Paulo e Marcos, que embora estando longe sempre me apoiaram nas escolhas que fiz.

Aos meus pais Djalma e Maria, pela educação dada, pelo estímulo em vencer cada obstáculo e pela dedicação em favor da formação profissional de seus filhos.

A Deus pelo dom da vida e a oportunidade diária de aprendizado e evolução.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	i
SUMÁRIO	ii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	v
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
RESUMO	xv
ABSTRACT.....	xvi
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1) O LEITO DE JORRO	5
2.1.1) Curva Característica.....	6
2.1.2) Estudo do Leito de Jorro em Operação Contínua.....	8
2.2) MODELO GLOBAL	10
2.2.1) Modelo Fluidodinâmico e Térmico	10
2.2.2) Modelo para o Leito de Jorro com Tubo Interno e Alimentação Contínua.....	11
2.3) PARÂMETROS DO MODELO.....	21
2.3.1) Parâmetros Fluidodinâmicos	22
2.3.2) Parâmetros Térmicos	34

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1) MATERIAIS.....	41
3.1.1) Partículas.....	41
3.1.2) Equipamentos.....	42
3.1.2.1) Leito de jorro	43
3.1.2.2) Sistema de Alimentação de Ar.....	44
3.1.2.3) Sistema de Alimentação de Sólidos.....	44
3.2) TÉCNICAS DE MEDIDAS	45
3.2.1) Fluidodinâmica	45
3.2.2) Térmica	47
3.3) PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	50
3.4) MÉTODOS	52
3.4.1) Modelagem Matemática da Fluidodinâmica e Transferência de Calor.....	52
3.4.2) Parâmetros do Modelo	62
3.4.3) Simulação do Modelo	63
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
4.1) RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	66
4.2) ANÁLISE DO MODELO	69
4.2.1) Fluidodinâmica	69
4.2.2) Transferência de Calor.....	93
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES	107
5.1) CONCLUSÕES	107

5.2) SUGESTÕES	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111

LISTA DE SÍMBOLOS

- A – área de escoamento, [L²]
- Cd – coeficiente de arraste fluido-partícula, [--]
- Cp – calor específico, [L²θ⁻³T⁻¹]
- d – diâmetro, [L]
- f – fatores de atrito, [--]
- F – fator de forma ou geométrico, [--]
- G – vazão mássica de gás, [Mθ⁻¹]
- g – aceleração da gravidade, [Lθ⁻²]
- Ho – altura de leito estático, [L]
- h – coeficiente de troca térmica convectivo, [Mθ⁻³T⁻¹]
- IR – índice de turbulência [--]
- K – constante da Lei de Darcy, [ML⁻³θ⁻¹]
- Kf – razão de Janssen (tensão axial nos sólidos/tensão radial na interface), [--]
- K – condutividade térmica, [M Lθ⁻³T⁻¹]
- L_e – distância entre a entrada do leito e o tubo interno, [L]
- L_{je} – distância entre o início da seção de alimentação dos sólidos e a entrada no leito, [L]
- P – pressão, [ML⁻¹ θ⁻²]
- Q – vazão volumétrica de ar, [L³ θ⁻¹]
- Q_e – vazão volumétrica de ar na entrada do sistema, [L³ θ⁻¹]
- R – raio, [L]

T – temperatura, $[\theta]$

U – velocidade superficial do fluido, $[L\theta^{-1}]$

U_t – coeficiente global de troca térmica jorro-tubo interno, $[M\theta^{-3}T^{-1}]$

V – velocidade das partículas, $[L\theta^{-1}]$

W – vazão mássica de sólidos, $[M\theta^{-1}]$

W_e – vazão mássica de sólidos alimentados no sistema, $[M\theta^{-1}]$

W₁ – vazão mássica de pasta alimentada no secador, $[M\theta^{-1}]$

W_g – vazão mássica de gás alimentado no leito, $[M\theta^{-1}]$

W_{rec} – taxa de recirculação das partículas, $[M\theta^{-1}]$

z – coordenada axial

SUBSCRITOS

a – ânulo

aH – topo do ânulo

c – leito cilíndrico

e – entrada no leito

ea – efetiva no ânulo

f – fluido

g – gás

gw – gás-parede

H – topo do leito

i – entrada no leito

j – jorro

je – jorro estável

l – leito

m – máxima de jorro estável

mf – mínima fluidização

mj – mínimo jorro

o – inicial

p – partículas

pa – partícula-fluido no ânulo

pj – partícula-fluido no jorro

pw – partícula-parede

R – recirculação

s- sólidos

t – tubo interno

w – parede

z – coordenada axial

SOBRESCRITOS

t – total

o – condições do fluido estagnado

LETRAS GREGAS

α – fração volumétrica da fase dispersa, [--]

$\beta(v)$ – fração volumétrica de sólidos no transporte pneumático, [--]

Δ – diferença, [--]

ε – porosidade, [--]

ϕ – esfericidade, [--]

μ – viscosidade do fluido, [ML⁻¹θ⁻¹]

ρ – massa específica, [ML⁻³]

σ – constante de Stefan-Boltzmann, [θ⁻¹T⁻¹]

θ – ângulo interno da base cônica, [°]

NÚMEROS ADMENSIONAIS

$$\text{Número de Arquimedes: } Ar = \frac{g(\rho_p - \rho_f)d_p^3\rho_f}{\mu_f^2}$$

$$\text{Número de Nusselt de partícula: } Nu_p = \frac{h_p d_p}{K}$$

$$\text{Número de Nusselt para o tubo: } Nu_t = \frac{h_t d_t}{K}$$

$$\text{Número de Reynolds de partícula: } Re_p = \frac{\rho_f V d_p}{\mu}$$

$$\text{Número de Reynolds para o tubo: } Re_t = \frac{\rho_f U d_t}{\mu}$$

$$\text{Número de Prandtl: } Pr = \frac{\mu C_p}{K}$$

$$\text{Número de Gukhman} = Gu = \frac{T_{ga} - T_{ge,u}}{T_{ge,u}}$$

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Correlações para o coeficiente de atrito gás-parede em tubos lisos	34
Tabela 2.2- Correlações para o coeficiente de troca térmica gás-partícula para o jorro.....	35
Tabela 2.3- Correlações para o coeficiente de troca térmica gás-partícula para outros sistemas particulados	36
Tabela 3.1- Propriedades das esferas de vidro e do leito constituído por elas.....	42
Tabela 3.2- Equações do modelo da fluidodinâmica e transferência de calor na região de entrada (I)	55
Tabela 3.3- Equações do modelo da fluidodinâmica e transferência de calor na região de recirculação (II)	58
Tabela 3.4- Equações do modelo da fluidodinâmica e transferência de calor na região do tubo interno (III).....	60
Tabela 3.5- Parâmetros utilizados no modelo fluidodinâmico e térmico	62
Tabela 3.6- Condições iniciais do modelo fluidodinâmico e térmico na região de entrada do sistema.....	63
Tabela 3.7- Condições iniciais do modelo fluidodinâmico e térmico na região de recirculação (jorro e ânulo)	64
Tabela 4.1- Temperatura dos sólidos e do fluido obtidas experimentalmente na entrada do sistema e na saída do leito	69
Tabela 4.2- Valores experimentais da velocidade dos sólidos no jorro obtidos da literatura e valores preditos neste trabalho.....	82

Tabela 4.3- Valores experimentais da velocidade máxima dos sólidos no jorro obtidos da literatura e valores preditos neste trabalho	83
Tabela 4.4- Dados da velocidade das partículas no ânulo encontrados na literatura.....	85
Tabela 4.5- Valores experimentais da velocidade do fluido obtidos por Freitas (1996) e valores preditos neste trabalho.....	93
Tabela 4.6- Desvios entre as temperaturas obtidas experimentalmente e preditas pelo modelo na saída do leito para os sólidos e para o gás	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Regiões características do leito de jorro.....	6
Figura 2.2- Curva característica do leito de jorro	7
Figura 2.3- Regiões do leito de jorro incluídas no equacionamento do modelo de acordo com Freitas (1996)	13
Figura 3.1- Esquema da unidade experimental do Leito de Jorro.....	45
Figura 3.2- Curva de aferição do medidor Venturi	46
Figura 3.3- Módulo digital utilizado para a leitura das temperaturas	47
Figura 3.4- Esquema de um termopar com proteção para medida da temperatura do fluido	48
Figura 3.5- Tubo coletor instalado na seção de alimentação das partículas	49
Figura 3.6- Esquema do sistema de medida da temperatura dos sólidos por calorimetria	50
Figura 3.7- Esquema do coletor adiabático de sólidos.....	50
Figura 3.8- Esquema das regiões do leito de jorro para modelagem (cotas em cm).....	53
Figura 4.1- Vazão mássica axial dos sólidos no leito em função da coordenada z. (Ho=35cm, $Q_e=2,1 \text{ m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100 \text{ g/min}$).....	73
Figura 4.2- Vazão mássica axial dos sólidos no leito em função da coordenada z. (Ho=35cm, $Q_e=2,5 \text{ m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100 \text{ g/min}$).....	73
Figura 4.3- Vazão mássica axial dos sólidos no leito em função da coordenada z. (Ho=25cm, $Q_e=2,1 \text{ m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100 \text{ g/min}$).....	74
Figura 4.4- Vazão mássica axial dos sólidos no leito em função da coordenada z.	

($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,5\text{ m}^3/\text{min}$ e $W_e=2000\text{ g/min}$).....	74
Figura 4.5- Vazão mássica axial do fluido no leito em função da coordenada z.	
($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{ m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g/min}$).....	76
Figura 4.6- Vazão mássica axial do fluido no leito em função da coordenada z.	
($H_o=25\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{ m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g/min}$).....	77
Figura 4.7- Vazão mássica axial do fluido no leito em função da coordenada z.	
($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,5\text{m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g/min}$).....	77
Figura 4.8- Velocidade axial dos sólidos no leito em função da coordenada z.	
($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g/min}$).....	79
Figura 4.9- Velocidade axial dos sólidos no leito em função da coordenada z.	
($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,5\text{m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g/min}$).....	79
Figura 4.10- Velocidade axial dos sólidos no leito em função da coordenada z.	
($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{m}^3/\text{min}$ e $W_e=2000\text{ g/min}$).....	80
Figura 4.11- Velocidade axial dos sólidos no leito em função da coordenada z.	
($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,5\text{m}^3/\text{min}$ e $W_e=2000\text{ g/min}$).....	80
Figura 4.12- Porosidade axial no leito em função da coordenada z.	
($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{m}^3/\text{min}$ e $W_e=2000\text{ g/min}$).....	85
Figura 4.13- Porosidade axial no leito em função da coordenada z.	
($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,5\text{m}^3/\text{min}$ e $W_e=2000\text{ g/min}$).....	86
Figura 4.14- Porosidade axial no leito em função da coordenada z.	
($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g/min}$).....	86
Figura 4.15- Porosidade axial no leito em função da coordenada z.	
($H_o=25\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g/min}$).....	87
Figura 4.16- Velocidade axial do fluido no leito em função da coordenada z.	

($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g/min}$).....	88
Figura 4.17- Velocidade axial do fluido no leito em função da coordenada z.	
($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,5\text{m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g/min}$).....	89
Figura 4.18- Velocidade axial do fluido no leito em função da coordenada z.	
($H_o=25\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g/min}$).....	89
Figura 4.19- Pressão axial no leito em função da coordenada z.	
($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g/min}$).....	92
Figura 4.20- Pressão axial no leito em função da coordenada z.	
($H_o=25\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g/min}$).....	92
Figura 4.21- Pressão axial no leito em função da coordenada z.	
($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,5\text{m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g/min}$).....	93
Figura 4.22- Temperatura axial dos sólidos no leito em função da coordenada z.	
($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{m}^3/\text{min}$, $W_e=1100\text{ g/min}$ e $T_{ge}=80^\circ\text{C}$)	96
Figura 4.23- Temperatura axial dos sólidos no leito em função da coordenada z.	
($H_o=25\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{m}^3/\text{min}$, $W_e=1100\text{ g/min}$ e $T_{ge}=80^\circ\text{C}$)	97
Figura 4.24- Temperatura axial dos sólidos no leito em função da coordenada z.	
($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,5\text{m}^3/\text{min}$, $W_e=1100\text{ g/min}$ e $T_{ge}=80^\circ\text{C}$)	97
Figura 4.25- Temperatura axial dos sólidos no leito em função da coordenada z.	
($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{m}^3/\text{min}$, $W_e=2000\text{ g/min}$ e $T_{ge}=80^\circ\text{C}$)	98
Figura 4.26- Temperatura axial dos sólidos no leito em função da coordenada z.	
($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,5\text{m}^3/\text{min}$, $W_e=2000\text{ g/min}$ e $T_{ge}=80^\circ\text{C}$)	98
Figura 4.27- Temperatura axial do fluido no leito em função da coordenada z.	
($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{m}^3/\text{min}$, $W_e=1100\text{ g/min}$ e $T_{ge}=80^\circ\text{C}$)	100
Figura 4.28- Temperatura axial do fluido no leito em função da coordenada z.	

($H_o=25\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{m}^3/\text{min}$, $W_e=1100\text{ g/min}$ e $T_{ge}=80^\circ\text{C}$)	101
Figura 4.29- Temperatura axial do fluido no leito em função da coordenada z.	
($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,5\text{m}^3/\text{min}$, $W_e=1100\text{ g/min}$ e $T_{ge}=80^\circ\text{C}$)	101
Figura 4.30- Temperatura axial do fluido no leito em função da coordenada z.	
($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{m}^3/\text{min}$, $W_e=1500\text{ g/min}$ e $T_{ge}=80^\circ\text{C}$)	102
Figura 4.31- Temperatura axial do fluido no leito em função da coordenada z.	
($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{m}^3/\text{min}$, $W_e=2000\text{ g/min}$ e $T_{ge}=80^\circ\text{C}$)	102
Figura 4.32- Temperatura axial do fluido no leito em função da coordenada z.	
($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,5\text{m}^3/\text{min}$, $W_e=2000\text{ g/min}$ e $T_{ge}=80^\circ\text{C}$)	103
Figura 4.33- Temperatura axial do fluido no leito em função da coordenada z.	
($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{m}^3/\text{min}$, $W_e=1100\text{ g/min}$ e $T_{ge}=90^\circ\text{C}$)	103

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo utilizar um alimentador contínuo gravitacional de sólidos pela base para a análise da fluidodinâmica e a transferência de calor no leito de jorro com tubo interno. O interesse por esta configuração deveu-se à sua vantagem de manter a simetria axial do leito, mesmo em operação contínua. Desta forma, o modelo adaptado em nosso estudo considerou apenas variações axiais no leito para as duas fases sólida e fluida, apresentando equações de balanços para as regiões de jorro e anular.

O equipamento utilizado foi um leito cilíndrico-cônico com tubo interno e com uma seção de alimentação de sólidos acoplada ao alimentador gravitacional. O corpo cilíndrico tem 45 cm de altura e 20 cm de diâmetro, a base cônica tem 15 cm de altura e ângulo interno de 60° e o diâmetro de entrada do ar é de 5 cm. Os tubos “draft” têm diâmetro de 5 cm e alturas de 18 e 28 cm. Na realização dos experimentos foram utilizadas esferas de vidro com diâmetro de partícula de 2,6 mm. As condições experimentais estudadas foram: vazão de ar de 2,1 e 2,5 m^3/min ; vazão de alimentação dos sólidos de 1100, 1500 e 2000 g/min; temperatura de entrada do ar de 80 e 90 $^{\circ}\text{C}$; e altura do leito de 25 e 35cm. As equações do modelo foram resolvidas na linguagem Matlab através de funções de tratamento numérico de alta performance.

Os perfis obtidos da simulação do modelo fluidodinâmico e térmico mostraram coerência nos aspectos qualitativos, pois são concordantes com o fisicamente esperado para o jorro. A análise por comparação quantitativa entre o modelo e o experimento mostrou que as temperaturas do gás na saída do leito foram previstas com desvios menores que 3% e as temperaturas dos sólidos com desvios menores que 2%. Portanto, os resultados indicam que o modelo avaliado neste estudo pode ser aplicado em projetos de leitos de jorro com mesmas características e o alimentador gravitacional operou continuamente de forma estável, mantendo a simetria axial do leito.

ABSTRACT

The objective of this work was to develop a theoretical and experimental study of fluid dynamics and heat transfer in a spouted bed with draft tube, which operates in continuous mode with particles feed through the bottom of the bed. This arrangement was chosen in order to maintain axial symmetry inside the bed. The chosen model was a steady-state model with axial variation, where balance equations describe the behavior of the solid and fluid phases both in the spout and annulus regions.

A cylindrical-conical bed was used with draft tube and with a solids feed section attached to a gravitational system. The cylindrical column has 45 cm height and 20 cm diameter. The conical base has 15 cm height and internal angle of 60° , and the air entrance has 5 cm diameter. The draft tubes have 5 cm diameter and two different heights of 18 and 28 cm. In the experiments glass spheres ($d_p=2.6$ mm) were used for fluid dynamics and heat transfer study. The experimental conditions were: air flow rates of 2,1 and 2,5 m³/min; solids flow rates of 1100, 1500 and 2000 g/min; air temperatures of 80 and 90°C; and bed heights of 25 and 35cm. The equations of the model were resolved in the program language Matlab by using numeric functions of high performance.

The obtained profiles of the fluid dynamic and thermal model showed coherence in the qualitative aspects, because they agree physically with the expected for the spout. The analysis for quantitative comparison between the model and the experiment showed that the gas temperatures in the exit of the bed were predicted with smaller deviations than 3% and the solids temperatures with smaller deviations than 2%. Therefore, the results indicate that the investigated model can be applied in projects of spouted beds with similar characteristics and the bottom solids continuous feed by gravity maintained the axial symmetry of the bed.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O leito de jorro é um equipamento que produz um alto grau de contato entre o fluido e os sólidos, o que proporciona altas taxas de transferência de calor e massa entre as fases. Devido a essas vantagens, essa técnica tem sido estudada em diversas aplicações de interesse industrial como: granulação, recobrimento de partículas, reações heterogêneas gás-sólido e na secagem desde materiais granulares até pastas e suspensões.

A operação contínua, por ser mais aplicada industrialmente, motivou alguns estudos sobre a fluidodinâmica e a secagem no leito de jorro nesta condição. O leito de jorro operando continuamente apresenta melhor estabilidade, através da modificação da configuração convencional com o uso do tubo interno (Ojalvo, 1991). No caso de materiais termosensíveis, como grãos, a operação contínua proporciona maior qualidade do produto quando comparado com o leito operando em batelada (Costa, 1997).

O leito de jorro apresenta alguns problemas operacionais e de projeto, principalmente quando estes são operados em regime contínuo, o que vêm limitando sua aplicação em escala industrial. As principais limitações apresentadas nesta técnica são: a alta queda de pressão para o estabelecimento do jorro e a existência de uma altura máxima de jorro estável, o que limita a capacidade do equipamento. Desta forma, alguns estudos sobre a modelagem e a

simulação são essenciais para o desenvolvimento de projetos desse secador, contribuindo através da previsão do processo, sem a necessidade de construção do equipamento em escala industrial.

Para o modo contínuo de operação, a alimentação dos sólidos por gravidade de um reservatório para o leito é o método de aplicação mais comum e simples. Os sólidos podem ser alimentados diretamente no topo do leito, porém este método de alimentação causa altos gradientes radiais e angulares de temperatura (Freitas e Freire, 1993), o que dificultaria o estudo da modelagem e simulação nesta configuração do leito. Desta forma, seria necessário uma solução numérica do modelo mais complexa.

Uma outra configuração apresentada é o leito de jorro com alimentação de sólidos pela base. Neste caso, os sólidos são alimentados diretamente no tubo de entrada, por onde passa o gás de jorro, através de um transportador adequado. Algumas das vantagens que têm sido relatadas desse tipo de configuração são o aumento da estabilidade do jorro e a elevação da altura máxima de jorro (Fane et al., 1985). Além disso, com a alimentação pela base é esperado eliminar os gradientes radiais e angulares de temperatura ao longo do jorro (Freitas e Freire, 1993), proporcionando uma solução numérica do modelo menos complexa.

Uma outra modificação na configuração do leito é realizada através da inserção do tubo “draft” ou comumente conhecido como tubo interno. Esse tubo alocado na região central do leito disciplina a passagem de ar e estabelece uma barreira física entre a região de jorro e a região anular. A principal vantagem dessa configuração é o decréscimo da mínima velocidade de jorro e da queda de pressão

no jorro estável, eliminando a princípio uma das limitações do leito em relação a carga de partículas.

Freitas (1996) realizou um estudo teórico-experimental sobre a fluidodinâmica e transferência de calor no leito de jorro com tubo interno e alimentação contínua de sólidos pela base. Essa configuração assegura a simetria axial do leito, mesmo em operação contínua. Sendo assim, o modelo adaptado em seu estudo foi unidimensional para as fases sólida e fluida nas regiões de jorro e anular. As partículas foram alimentadas através de um parafuso tipo rosca sem-fim. Porém esse alimentador exigia muita atenção do operador para adequação ao material alimentado.

Desta maneira, o objetivo geral deste trabalho consiste em estudar simultaneamente a fluidodinâmica e a transferência de calor no leito de jorro com tubo interno, visando modelar estes fenômenos para o sistema com alimentação contínua de sólidos pela base através de um alimentador efetivamente contínuo, e não aos pulsos como o parafuso de rosca sem-fim. Além disso, testar a validade do modelo via simulação e comparação dos resultados com dados experimentais da temperatura do gás e dos sólidos na saída do leito.

Com o intuito de se atingir o objetivo geral deste trabalho, foram propostas as seguintes etapas:

- adaptação de uma unidade experimental de leito de jorro com alimentação contínua de sólidos pela base através de um alimentador gravitacional;

- desenvolver experimentos para o estudo da fluidodinâmica e da transferência de calor na configuração escolhida, mantendo a simetria axial do leito;
- estudo da influência de diferentes variáveis de processo nas respostas da temperatura do gás e dos sólidos, como altura do leito estático, vazão de ar , vazão de sólidos e temperatura de entrada do ar;
- desenvolvimento e/ou adaptação de um modelo para fluidodinâmica e transferência de calor na configuração de leito de jorro escolhida, e estudo de correlações para estimativas de parâmetros fluidodinâmicos e térmicos que melhor se adequem ao experimento;
- escolha do melhor método para resolução numérica do sistema de equações do modelo, e
- validação do modelo através da comparação dos resultados de temperatura do gás e dos sólidos na saída do leito, via simulação, com os dados experimentais.

O trabalho tem como foco principal a análise e adequação de um modelo teórico que facilite a compreensão dos complexos mecanismos de troca de calor no leito de jorro. Os dados experimentais obtidos foram as variáveis de entrada do leito, usadas diretamente como condições de entrada na simulação do modelo e as variáveis de saída, utilizadas na comparação com os resultados obtidos via simulação.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentadas as características gerais sobre o sistema de leito de jorro e mais detalhadamente, os principais trabalhos experimentais e teóricos realizados sobre a fluidodinâmica e a transferência de calor nesse sistema. Também serão apresentadas correlações, resultantes de trabalhos teóricos e empíricos, usadas na determinação dos parâmetros fluidodinâmicos e térmicos necessários para a modelagem do leito.

2.1) O LEITO DE JORRO

A técnica de leito de jorro foi descoberta ao acaso por Mathur e Gishler (Mathur e Epstein, 1974) no Canadá em 1954, quando estudavam a secagem de trigo em leito fluidizado.

O leito de jorro é obtido pelo jato de uma corrente ascendente de gás (usualmente o ar), através de um leito de partículas sólidas. Quando o fluido atinge uma vazão suficientemente alta, ele aflora no leito provocando um movimento ascendente das partículas. Estas após atingirem uma determinada altura, caem em uma região denominada de região anular.

Desta forma, podemos observar a formação de três regiões distintas, representadas pela Figura 2.1, que são:

- região de jorro (ou central), onde as partículas são arrastadas pelo ar e apresentam um movimento característico do transporte pneumático;
- fonte, onde as partículas oriundas da região de jorro, desaceleram e posteriormente caem na região anular;
- região anular, onde as partículas apresentam um movimento descendente, comportando-se como em um leito deslizante.

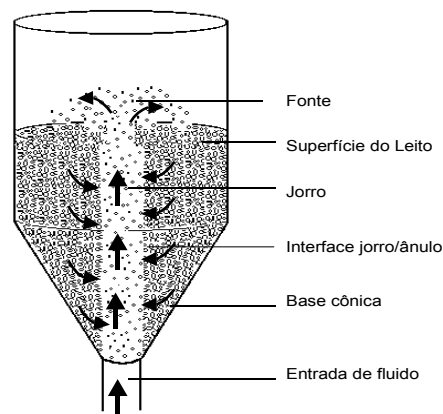


Figura 2.1- Regiões características do leito de jorro.

2.1.1) Curva Característica

O comportamento característico do leito de jorro pode ser observado através de um gráfico, que relaciona a queda de pressão através do leito de partículas em função da vazão ou velocidade do fluido, como mostrado na Figura 2.2.

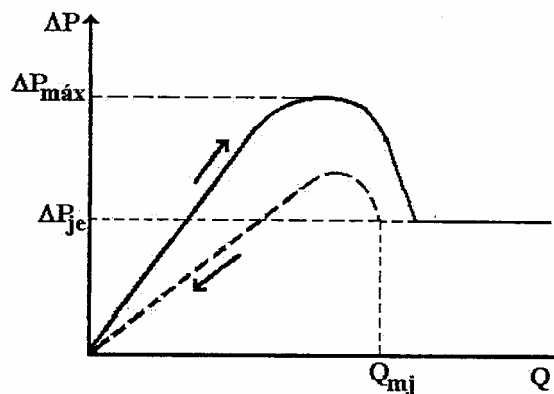


Figura 2.2- Curva característica do leito de jorro.

O comportamento desta curva foi, assim, explicado por Mathur e Epstein (1974). Inicialmente, a baixas vazões de ar, o leito se comporta como um leito fixo, onde o ar passa através deste sem perturbá-lo e a queda de pressão aumenta com a vazão do fluido, praticamente de forma linear.

Aumentando-se a vazão de ar, as partículas situadas nas proximidades do orifício de entrada do fluido, são deslocadas formando uma cavidade acima desta região. As partículas deslocadas são comprimidas contra as partículas acima, formando um arco compacto que oferece resistência ao escoamento do fluido e conseqüentemente, a queda de pressão aumenta até atingir um valor máximo denominado queda de pressão máxima ($\Delta P_{máx}$). É a queda de pressão que antecede o estabelecimento do jorro.

Um aumento da vazão do fluido produz o afloramento do jorro no leito, causando uma diminuição brusca da queda de pressão até atingir uma situação estável, denominada de queda de pressão de jorro estável (ΔP_{je}). Qualquer aumento na vazão de gás provoca um aumento da altura da fonte, mas a queda de

pressão permanece constante. Este parâmetro permite estimar a quantidade de material a ser processada no equipamento.

No sentido inverso da curva, ou seja, para vazões decrescentes do fluido, a queda de pressão permanece constante até uma determinada vazão, conhecida como vazão de jorro mínimo (Q_{mj}). Diminuindo ainda mais a vazão de gás, a queda de pressão segue o comportamento observado no sentido de vazões crescentes, porém com valores menores, pois o leito não se encontra empacotado como anteriormente, não havendo ruptura do mesmo. A vazão de jorro mínimo é a menor vazão de fluido na qual ainda existe jorro. Este parâmetro é fortemente influenciado por fatores geométricos do sistema e por propriedades físicas do fluido e das partículas.

2.1.2) Estudo do Leito de Jorro em Operação Contínua

Ojalvo (1991) propôs em seu estudo, o projeto e a análise da operação de um leito de jorro com entrada e saída controlada de material granular. Ele realizou testes fluidodinâmicos globais e de secagem para avaliar a operação e a estabilidade do sistema como um todo.

Em relação aos aspectos fluidodinâmicos, verificou-se que o leito de jorro com tubo interno apresentava um comportamento mais estável em relação ao leito convencional. No estudo da secagem de grãos de soja, ele verificou que o leito como secador operava em perfeita estabilidade permitindo um grande controle sobre a qualidade do produto, cuja umidade final estava mais relacionada com a cinética de distribuição da umidade no interior do grão.

Freitas (1996) estudou a fluidodinâmica e transferência de calor no leito de jorro com tubo draft e alimentação contínua de sólidos pela base, através do parafuso tipo rosca sem-fim. A escolha dessa configuração foi devido ao fato do leito manter simetria axial, mesmo operando continuamente. Através de um intenso trabalho experimental, ele obteve diferentes perfis fluidodinâmico e térmico no leito, para as partículas e para o fluido em diferentes condições de processo: vazão de entrada dos sólidos e do ar, temperatura de entrada do ar e altura do leito.

O modelo fluidodinâmico e térmico estudado por Freitas (1996) foi desenvolvido por Stocker et al (1990) para um reator tipo-jorro. Esse modelo é unidimensional em regime estacionário, onde são desprezados gradientes radiais e angulares no leito, e é constituído por equações de balanço de massa, de movimento e de energia para as fases sólida e fluida na região de jorro e anular.

Comparando os resultados da simulação do modelo com os obtidos experimentalmente, Freitas (1996) obteve melhores resultados com uso de equações para predição de alguns parâmetros como taxa de recirculação de sólidos e distribuição da vazão de ar, através do ajuste dos seus dados experimentais. Com o uso de correlações empíricas obtidas da literatura, os desvios apresentados foram maiores.

Costa (1997), em seu estudo sobre a secagem contínua de sementes de soja em leito de jorro com tubo interno, constatou que o leito de jorro operando continuamente é menos agressor às sementes que o leito em batelada, apresentando melhores índices de qualidade do produto.

2.2) MODELO GLOBAL

2.2.1) Modelo Fluidodinâmico e Térmico

Stocker et al. (1990) desenvolveram um modelo numérico não isotérmico a regiões múltiplas de um reator tipo-jorro com tubo interno para estudar a pirólise de hidrocarbonetos. O modelo considera de maneira rigorosa balanços de massa, quantidade de movimento e energia nas regiões anular e de jorro acima e abaixo do tubo interno. Além disso, considerou a reação adicional devido ao tempo de residência dos gases na região da fonte.

No equacionamento do modelo fluidodinâmico e térmico a duas fases foram desprezados os gradientes radiais e angulares de massa, energia e quantidade de movimento, considerando também uma expansão linear do jorro desde a entrada do leito até a entrada do tubo interno. O modelo resultante apresentou as seguintes hipóteses:

- modelo unidimensional para ambas as fases onde se considera apenas variação axial no leito (gradientes radiais e angulares desprezíveis);
- regime estacionário;
- propriedades físicas das fases variáveis com a posição no leito (densidade e viscosidade);
- não há variação do diâmetro médio das partículas ao longo do tempo;
- o diâmetro do jorro varia linearmente desde a entrada do leito até a entrada do tubo interno;

- há escoamento cruzado de sólidos do ânulo para o jorro;
- há dispersão de gás do jorro para o ânulo;
- na região do tubo interno não há dispersão do gás e escoamento cruzado dos sólidos;
- no balanço de energia para os sólidos considera-se o ânulo homogêneo e radialmente isotérmico em qualquer posição axial do leito.
- no balanço de energia são considerados os termos de troca de calor por convecção, radiação, geração de calor e perdas através da parede do leito;
- na região da fonte considera-se apenas os termo de geração de calor da reação em fase gasosa tanto para o ânulo como para o jorro.

2.2.2) Modelo para o Leito de Jorro com Tubo Interno e Alimentação Contínua

Freitas (1996) optou pelo modelo de Stocker et al. (1990), pois representava a configuração do leito de jorro escolhida pelo autor, isto é , leito cilíndrico de base cônica com tubo interno.

O modelo escolhido foi, então, adaptado para o estudo de um leito de jorro com alimentação contínua de sólidos, onde foram desprezados alguns termos do balanço de energia e o diâmetro da região de jorro foi considerado constante e igual ao diâmetro do tubo “draft” ao longo de toda sua extensão. O modelo resultante apresentou as seguintes hipóteses:

- modelo unidimensional para ambas as fases onde se considera apenas variação axial no leito (gradientes radiais e angulares desprezíveis);
- propriedades físicas das fases variáveis com a posição no leito (massa específica e viscosidade);
- não há variação do diâmetro médio das partículas ao longo do tempo;
- diâmetro do jorro constante ao longo de todo o sistema (a seção de alimentação de sólidos, a entrada no jorro e o tubo interno têm o mesmo diâmetro);
- há escoamento cruzado de sólidos do ânulo para o jorro;
- há dispersão de gás do jorro para o ânulo;
- na região do tubo interno não há dispersão do gás e escoamento cruzado dos sólidos, e
- no balanço de energia são desprezados os termos de troca de calor por radiação e geração de calor e perdas através da parede do leito.

Freitas (1996), baseado no modelo a múltiplas regiões de Stocker et al. (1990), dividiu a região de jorro em duas regiões: a região do tubo interno (I) propriamente dita e a região de jorro abaixo do tubo interno, representada pela seção de recirculação dos sólidos (IV). A região de alimentação dos sólidos (III) foi incluída no modelo como uma região com características de transporte pneumático. Considerando também a região anular (II), o sistema era constituído por quatro regiões, como pode ser visto na Figura 2.3 a seguir.

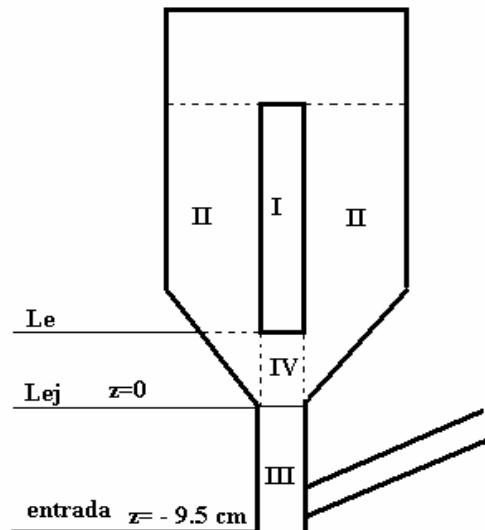


Figura 2.3- Regiões do leito de jorro incluídas no equacionamento do modelo de acordo com Freitas (1996).

Cada região apresentou seu grupo de equações, que foram baseadas nos balanços obtidos por Stocker et al. (1990).

A) Equações do Balanço de Massa e Quantidade de Movimento:

- **Região de Jorro (Regiões I,III e IV)**

No modelo fluidodinâmico apresentado por Freitas (1996) na região de jorro, apenas as equações de balanço de massa não apresentaram todos os termos do modelo original de Stocker et al. (1990), pois em cada uma delas foi desprezado o termo de variação da área da seção transversal do jorro e o termo de variação axial da massa específica da partícula sólida; isto é, o termo $d\rho_{pj}/dz$ é nulo.

Assim, assumindo escoamento pistonado das partículas no jorro, um balanço de massa para fase sólida resultou em uma equação da variação axial da porosidade, em função da variação da velocidade dos sólidos e da vazão de sólidos:

$$\frac{d\varepsilon_j}{dz} = (1 - \varepsilon_j) \left[\frac{dV_j/dz}{V_j} - \frac{dW_j/dz}{W_j} \right] \quad (2.1)$$

O último termo da equação (2.1) está relacionado com a taxa de circulação dos sólidos advindos do ânulo, sendo aplicado somente na região entre a entrada do leito e o tubo interno (IV). Nas regiões do tubo interno (I) e de alimentação dos sólidos (III) este termo foi anulado.

Um balanço de massa similar para o gás em escoamento pistonado determinou a velocidade do gás no jorro como uma função da porosidade, da massa específica do gás e da dispersão do gás do jorro para o ânulo:

$$\frac{dU_j}{dz} = -U_j \left[\frac{d\varepsilon_j/dz}{\varepsilon_j} + \frac{d\rho_{gj}/dz}{\rho_{gj}} - \frac{dG_j/dz}{G_j} \right] \quad (2.2)$$

Este último termo relacionado com a dispersão de gás do jorro para o ânulo foi anulado para as regiões I e III.

Similarmente, um balanço de quantidade de movimento para a fase sólida forneceu o perfil axial das velocidades das partículas no jorro:

$$\frac{dV_j}{dz} = \frac{(V_j^0 - V_j) dW_j}{W_j dz} + \frac{3Cd\rho_{gj}(U_j - V_j) \times \|U_j - V_j\|}{4d_p\rho_p V_j} + \frac{g}{V_j} \left[\frac{\rho_{gj}}{\rho_p} - 1 \right] - \frac{1}{\rho_p V_j} \frac{dP_j}{dz} - \frac{2 \cdot V_j}{d_j} f_{pw} \quad (2.3)$$

Os termos da direita da eq. (2.3) representavam, respectivamente: a contribuição (positiva ou negativa) dos sólidos advindos do ânulo para a quantidade de movimento dos sólidos no jorro, o arraste das partículas pelo gás, a força de empuxo, o efeito do gradiente de pressão e perdas devido ao atrito partícula-parede.

O primeiro termo, que envolve a taxa de recirculação das partículas, foi anulado para as regiões I e III.

O perfil axial de pressão total no jorro foi obtido através de um balanço rearranjado de quantidade de movimento do gás:

$$\frac{dP_j}{dz} = - \frac{U_j}{\varepsilon_j A_{cj}} \frac{dG_j}{dz} - \rho_{gj} U_j \frac{dU_j}{dz} - \frac{3Cd(1 - \varepsilon_j)\rho_{gj}(U_j - V_j)\|U_j - V_j\|}{4\varepsilon_j d_p} + \frac{(1 - \varepsilon_j)g(\rho_{gj} - \rho_p)}{\varepsilon_j} - \rho_{gj}g - \frac{2\rho_{gj}U_j^2}{d_j} f_{gw} \quad (2.4)$$

Os termos representavam, respectivamente: a energia cinética do gás, o arraste sobre as partículas vindas do ânulo, a carga hidrostática sobre as partículas, a carga hidrostática sobre o gás e o fator de atrito entre o gás e as paredes.

O primeiro termo, correspondente à variação da vazão de gás no jorro, foi anulado para as regiões I e III.

▪ **Região Anular (II)**

Na região anular as equações do modelo fluidodinâmico apresentaram-se exatamente como foram propostas por Stocker et al. (1990). Analogamente à região de jorro foram aplicados balanços de massa e quantidade de movimento para a região anular.

Como primeira aproximação, considerou-se a taxa de entrada de sólidos no jorro uniforme ao longo da altura do leito. Assim, teve-se a seguinte equação para a variação da vazão de sólidos no ânulo em função da taxa de circulação dos sólidos:

$$\frac{dW_a}{dz} = \frac{W_{rec}}{L_e} \quad (2.5)$$

e por simples balanço de massa:

$$\frac{dW_j}{dz} = \frac{dW_a}{dz} \quad (2.6)$$

onde ambos os termos são positivos devido a direção oposta do escoamento nas duas regiões.

A vazão mássica de gás na região anular foi determinada a partir da equação:

$$G_a = U_a \rho_{ga} \varepsilon_a A_{ca} \quad (2.7)$$

Assim, a equação resultante da variação axial da vazão de gás no ânulo, devido à entrada de gás advindo do jorro, considerando a porosidade constante na região anular é dada por:

$$\frac{dG_a}{dz} = G_a \times \left[\frac{dU_a/dz}{U_a} + \frac{\rho_{ga}/dz}{\rho_{ga}} + \frac{dA_{ca}/dz}{A_{ca}} \right] \quad (2.8)$$

onde a variação axial da área de seção transversal do ânulo foi considerada apenas na região cônica do leito.

De posse de seus valores experimentais da vazão total de ar desviada para o ânulo, obtidos através de medidas de pressão dinâmica e estática, Freitas (1996) considerou a entrada do gás no ânulo uniforme ao longo da altura do leito:

$$\frac{dG_a}{dz} = \frac{G_a^t}{L_e} \quad (2.9)$$

Como todo gás que entra no ânulo vem do jorro:

$$\frac{dG_j}{dz} = -\frac{dG_a}{dz} \quad (2.10)$$

Freitas (1996), obteve através de dados experimentais uma equação para a variação axial da queda de pressão no ânulo em função da velocidade do gás da forma:

$$-\frac{dP_a}{dz} = K_1 U_a + K_2 U_a^2 \quad (2.11)$$

Através do ajuste de seus dados experimentais da queda de pressão no leito antes da fluidização incipiente em função da velocidade do fluido ele obteve a seguinte equação:

$$-\frac{dP_a}{dz} = 7,76U_a + 0,03U_a^2 \quad (2.12)$$

sendo P_a expresso em cmH_2O e U_a em cm/s .

B) Equações do Balanço de Energia:

A partir da análise feita por Freitas (1996) do modelo de Stocker et al. (1990), as equações resultantes não apresentaram os termos referentes à troca de calor por radiação e geração de calor e o termo referente à troca de calor através da parede do leito.

▪ **Região Anular**

No balanço de energia para os sólidos, considerou-se o ânulo homogêneo e radialmente isotérmico em qualquer posição axial do leito. O balanço rearranjado resultou em uma equação diferencial de segunda ordem para a temperatura dos sólidos

$$\frac{d^2 T_{pa}}{dz^2} = \left[\frac{-W_a C_{p_p}}{K_{ea} A_{ca}} - \frac{dA_{ca}/dz}{A_{ca}} \right] \frac{dT_{pa}}{dz} - \frac{\pi \cdot d_j U_t (T_{pa} - T_{gj})}{K_{ea} A_{ca}} + \frac{6(1 - \epsilon_a) h_{pa} (T_{pa} - T_{ga})}{K_{ea} d_p} \quad (2.13)$$

O primeiro termo à direita da equação representou o fluxo axial de calor, o segundo representou a troca de calor com a parede do tubo “draft”, e o último, descreve a troca de calor entre partículas e o gás na região anular. Cada um desses termos, exceto o primeiro, incluíram coeficientes de troca térmica.

O primeiro termo inclui a vazão de sólidos no ânulo, que é determinada através de dados da taxa de recirculação de partículas, oriundos do modelo fluidodinâmico. O coeficiente de troca térmica entre o ânulo e o jorro através do tubo interno, presente no segundo termo, foi obtido por um sistema de correlações empíricas adotado por Stocker et al. (1990), onde os termos de resistência convectiva foram transformados em um coeficiente global de troca térmica (U_t). Os autores consideram primeiramente que a condutividade térmica do tubo metálico é elevada comparada com às das camadas limites, em ambas as faces do tubo interno, podendo então ser desprezada. Além disso, consideram que a temperatura da parede do tubo interno é igual à temperatura das partículas no ânulo.

Através de um balanço de energia, no qual considerou-se a convecção como mecanismo predominante de transmissão de calor, obteve-se a seguinte equação da variação da temperatura do gás no ânulo:

$$\frac{dT_{ga}}{dz} = \frac{(T_{gj} - T_{ga})}{G_a} \frac{dG_a}{dz} + \frac{6.A_{ca} \cdot (1 - \varepsilon_a) \cdot h_{pa} \cdot (T_{pa} - T_{ga})}{G_a \cdot Cp_{ga} \cdot d_p} \quad (2.14)$$

O primeiro termo considera a troca de calor entre o jorro e o ânulo, o segundo a troca de calor entre partículas e o fluido na região anular. Para a resolução desta equação foi utilizado um dado advindo da simulação fluidodinâmica, que foi a dispersão de gás do jorro para o ânulo (G_a), aplicado somente na região abaixo do tubo interno (IV).

▪ Região de Jorro

O perfil de temperatura dos sólidos no jorro foi resultante de um balanço de energia rearranjado, que forneceu a seguinte equação:

$$\frac{dT_{pj}}{dz} = \frac{(T_{pa} - T_{pj})}{W_j} \frac{dW_j}{dz} - \frac{6 \cdot h_{pj} \cdot (T_{pj} - T_{gj})}{\rho_p \cdot V_j \cdot Cp_p \cdot d_p} \quad (2.15)$$

Neste balanço, a condução axial de calor foi desprezada, e os termos representaram respectivamente a troca de calor devido à entrada de partículas advindas do ânulo e a troca térmica entre partículas e o gás no jorro. O primeiro termo exigiu um dado oriundo do modelo fluidodinâmico que foi a taxa de

recirculação dos sólidos que foi anulado para as regiões do tubo interno (I) e de alimentação dos sólidos (III), isto é, $dW_j/dz=0$.

A equação para o perfil de temperatura do gás representou respectivamente o calor trocado entre as partículas e o gás no jorro e o calor trocado entre o gás e a interface jorro-ânulo

$$\frac{dT_{gj}}{dz} = \frac{6 \cdot h_{pj} \cdot (1 - \varepsilon_j) \cdot (T_{pj} - T_{gj})}{\rho_{gj} \cdot U_j \cdot C_{p_{gj}} \cdot d_p} + \frac{\pi \cdot d_j \cdot U_t \cdot (T_{pa} - T_{gj})}{G_j \cdot C_{p_{gj}}} \quad (2.16)$$

Para solução desta equação foram utilizados dados advindos da resolução do modelo fluidodinâmico como a velocidade dos sólidos, a velocidade e a vazão mássica de gás no jorro.

2.3) PARÂMETROS DO MODELO

A determinação de parâmetros confiáveis tem sido um dos principais desafios encontrados na utilização de modelos matemáticos. A dificuldade em se obter parâmetros confiáveis sobre a dinâmica do escoamento gás-fluido, a transferência de calor e massa pode restringir a aplicabilidade de modelos envolvendo fenômenos de transporte.

Como o leito de jorro é constituído de regiões distintas quanto ao escoamento fluido-partícula, tornou-se necessária a previsão de alguns parâmetros isoladamente para cada região, com auxílio de correlações desenvolvidas para

outros sistemas particulados. No caso da região de jorro, utiliza-se equações obtidas para sistemas de transporte pneumático, ou para partículas isoladas submersas em um fluido em escoamento. Já para região anular pode-se aplicar correlações obtidas para leitos fixos ou para leitos deslizantes.

Portanto reveste de importância a escolha adequada desses parâmetros, batizada, sempre que possível, em dados experimentais confiáveis.

2.3.1) Parâmetros Fluidodinâmicos

- **Coeficiente de arraste fluido-partícula**

O coeficiente de arraste entre um fluido e partículas é um parâmetro muito importante a ser considerado na modelagem fluidodinâmica de um leito de jorro. Uma das formas para obtenção desse coeficiente é considerando o movimento de uma esfera única em um fluido estagnado, obtendo-se assim uma relação entre o coeficiente de arraste e o número de Reynolds de partícula, chamada curva de arraste padrão.

Algumas das correlações existentes para a determinação do coeficiente de arraste padrão são de Turton e Levenspiel (1986), válida para partículas esféricas e $Re_p < 2,6 \times 10^5$:

$$Cd = \frac{24}{Re_p} (1,173 \cdot Re_p^{0,657}) + \frac{0,413}{1 + 16300 \cdot Re_p^{-1,09}} \quad (2.17)$$

e a correlação de Haider e Levenspiel (1989) desenvolvida para partículas esféricas e não esféricas ($Re_p < 2,6 \times 10^5$). Considerando o caso de partículas esféricas esta correlação apresenta a seguinte forma:

$$Cd = \frac{24}{Re_p} (1 + 0,181 \cdot Re_p^{0,646}) + \frac{0,425}{1 + 6881 \cdot Re_p^{-1,0}} \quad (2.18)$$

Coelho e Massarani (1996) desenvolveram uma correlação para esfera isolada e $Re < 5,0 \times 10^4$:

$$Cd = \left[\left(\frac{24}{Re_p} \right)^n + 0,43^n \right]^{\frac{1}{n}} \quad (2.19)$$

onde $n=0,43$

Ferreira et al. (1996), estudando partículas de vidro com diâmetros de 1 a 2 mm em um transportador pneumático com alimentação tipo jorro, verificaram que seus dados experimentais se encontravam acima dos valores da curva padrão. Eles testaram a correlação de Uhlherr e Sinclair (1970) que considera os efeitos de concentração de sólidos e turbulência do fluido, obtendo previsões concordantes com seus dados experimentais. Esta correlação tem a seguinte forma:

$$Cd = 0,133 \left(1 + \frac{150}{Re_p} \right)^{1,565} + 4I_R \quad (2.20)$$

onde I_R é o índice de turbulência obtido pela correlação de Theofanous e Sullivan (1982):

$$\left(\frac{u'}{U}\right)^2 = \left\{ \frac{1}{2} f_f (1 \pm \alpha)(1 - \alpha) + \delta \alpha (1 - \alpha) \left| 1 - \frac{\rho_d}{\rho_c} \right| \frac{R \cdot g}{2U^2} \right\} \left(1 + 1,5\alpha \frac{R}{R_d} \right)^{-1} \quad (2.21)$$

onde:

$$I_R = \left(\frac{u'}{U} \right)$$

u' = velocidade instantânea ;

U = velocidade axial média;

α = fração volumétrica da fase dispersa;

ρ_d = massa específica da fase dispersa;

ρ_c = massa específica da fase contínua;

δ = constante experimental $\cong 4,5$;

f_f = fator de fricção fluido-parede (Fanning);

R = raio do tubo, e

R_d = raio da fase dispersa

Freitas (1996) obteve melhores previsões da velocidade dos sólidos utilizando a correlação do coeficiente de arraste de Uhlherr e Sinclair (1970). Já testando a correlação do coeficiente de arraste padrão de Haider e Levenspiel (1989), ele verificou que os valores previstos pelo modelo eram inferiores aos determinados experimentalmente. Verificou-se também que, para uma vazão de ar

menor, a velocidade dos sólidos no trecho do tubo interno decresceu para um valor nulo, o que não foi observado experimentalmente, e nesta situação não ocorreria o fenômeno do jorro.

Através de um estudo de sensibilidade de importantes variáveis da fluidodinâmica estudadas ao coeficiente de arraste fluido-partícula, Freitas (1996) constatou que a velocidade dos sólidos foi muito sensível a este parâmetro, e também que esta sensibilidade foi influenciada pela posição no leito e pelas condições fluidodinâmicas do sistema. A sensibilidade desta variável foi maior para a menor vazão de ar, e nesta condição ela aumentou desde a entrada do leito até o topo do tubo interno. Já analisando a sensibilidade da velocidade do gás e da porosidade no leito, Freitas (1996) pode constatar que estas variáveis se mostraram pouco sensíveis a este parâmetro. A variação da sensibilidade foi notada apenas para menor vazão de gás, mostrando que para vazões próximas à de jorro mínimo, poderia ocorrer previsões subestimadas da velocidade dos sólidos.

▪ **Distribuições das vazões de gás no leito**

A distribuição do gás de entrada entre as regiões anular e de jorro, influencia os coeficientes convectivos de troca de calor e massa entre o fluido e a partícula, definindo a contribuição efetiva destas duas regiões no processo de secagem em leito de jorro.

Mamuro e Hattori (1968) desenvolveram um modelo para predição da velocidade do gás na região anular em função da posição axial do leito, baseado

em um balanço de forças e assumindo a lei de Darcy para o escoamento do fluido.

Para leitos com altura máxima de jorro (H_m) essa equação tem a forma:

$$\frac{U_a}{U_{aH}} = 1 - \left(1 - \frac{z}{H}\right)^3 \quad (2.22)$$

quando $H = H_m$, $U_{aH} = U_{mf}$.

Já para alturas de leito abaixo da máxima de jorro estável, esta equação não forneceu boas previsões quando comparadas aos dados experimentais. Uma das simplificações feitas por Mamuro e Hattori (1968) foi desprezar as forças de atrito na interface jorro-ânulo e entre o ânulo a parede do leito.

Grbavcic et al. (1976) observaram que para uma geometria fixa do leito, a velocidade ou o gradiente de pressão em qualquer posição axial do ânulo independe da altura do leito (H), propondo desta forma, a seguinte modificação para a eq. (2.22):

$$\frac{U_a}{U_{aH}} = \frac{1 - \left(1 - \frac{z}{H_m}\right)^3}{1 - \left(1 - \frac{H}{H_m}\right)^3} \quad (2.23)$$

Outro modelo da literatura foi proposto por Yokogawa et al. (1972), que diferentemente de Mamuro e Hattori (1968), não desprezaram o atrito na interface jorro-ânulo e entre o ânulo e a parede do leito.

$$\frac{U_a}{U_{aHm}} = \frac{\lambda_1 e^{\lambda_1 Hm} (1 - e^{\lambda_2 z}) - \lambda_2 e^{\lambda_2 Hm} (1 - e^{\lambda_1 z})}{\lambda_1 e^{\lambda_1 Hm} (1 - e^{\lambda_2 Hm}) - \lambda_2 e^{\lambda_2 Hm} (1 - e^{\lambda_1 Hm})} \quad (2.24)$$

onde:

$$\lambda_1 = -\frac{A}{2} + \sqrt{\frac{A^2}{4} - w} \quad (2.25)$$

$$\lambda_2 = -\frac{A}{2} - \sqrt{\frac{A^2}{4} - w} \quad (2.26)$$

$$A = -\frac{4d_c \operatorname{tg} \gamma}{d_c^2 - d_j^2} - \frac{1 - \operatorname{sen} \phi}{1 + \operatorname{sen} \phi} \quad (2.27)$$

$$w = \frac{-Kk_f}{4Cf} \frac{d_c^2 d_j}{(d_c^2 - d_j^2)^2} \quad (2.28)$$

γ - ângulo de fricção interno;

ϕ - ângulo de fricção com a parede ângulo;

$U_{aHm} = U_{mf}$;

K – constante da lei de Darcy;

C_f – coeficiente de arraste fluido-partícula, e

k_f – razão de Jassen (tensão axial nos sólidos/ tensão radial na interface jorro-ânulo).

O parâmetro ajustado Kk_f / C_f foi obtido em uma determinada condição do leito colocando-se $z=H$ na eq. (2.24), resultando na eq. (2.29) abaixo:

$$\frac{U_a}{U_{aH}} = \frac{\lambda_1 e^{\lambda_1 H} (1 - e^{\lambda_2 z}) - \lambda_2 e^{\lambda_2 H} (1 - e^{\lambda_1 z})}{\lambda_1 e^{\lambda_1 H} (1 - e^{\lambda_2 H}) - \lambda_2 e^{\lambda_2 H} (1 - e^{\lambda_1 H})} \quad (2.29)$$

Freitas (1996), através de medidas experimentais de pressão dinâmica e estática, obteve as vazões de ar na região anular calculadas pelos métodos de calibração de Pitot e iterativo, para diferentes alturas de leito, vazões de sólidos e de gás. O método iterativo consistiu basicamente em encontrar a raiz (velocidade) de um sistema de duas equações (Pitot e Ergun) dado um domínio inicial de busca (valores das pressões dinâmica e estática experimentais). Os resultados percentuais da vazão de ar desviada para o ânulo foram calculados com as médias obtidas usando-se o método iterativo. Estes estiveram em concordância com outros trabalhos como os de Clafin e Fane (1984) e Khoe e Van Brackel (1983), que encontraram valores de aproximadamente 30%. Desta forma, Freitas (1996) ajustou seus dados experimentais a uma equação para a distribuição de vazão de ar em função de parâmetros que mostraram maior influência nesta variável. Ele obteve a seguinte equação:

$$Q_a = 26,45.H_o^{0,358} . Q_e^{-1,015} \quad (2.30)$$

onde: Q_a % ; Q_e -m³/min ; H_o - cm

e válida para $2,1 \leq Q_e \leq 2,8 \text{ m}^3/\text{min}$; $1100 \leq W_e \leq 2200 \text{ g}/\text{min}$; $25 \leq Ho \leq 35$; $\theta = 60^\circ$ e com tubo interno.

Comparando seus resultados experimentais com os obtidos através dos modelos de Mamuro e Hattori (1968) e Yokogawa et al. (1972), Freitas (1996) constatou que as correlações subestimaram os valores da vazão de ar no ânulo para o leito com tubo interno. Já a equação ajustada aos dados experimentais apresentou ótimos resultados com desvios de $\pm 10\%$. Ele pode constatar também que, com o uso destas correlações, a previsão do modelo foi ruim, subestimando a queda de velocidade do ar no jorro.

Analisando a sensibilidade de variáveis fluidodinâmicas estudadas à distribuição de gás no leito, Freitas (1996) observou uma forte dependência da velocidade dos sólidos a este parâmetro quando comparado aos valores nominais de sensibilidade ao coeficiente de arraste fluido-partícula. O mesmo efeito foi verificado no estudo da sensibilidade à velocidade do fluido.

▪ **Taxa de recirculação dos sólidos**

A determinação da taxa de recirculação de sólidos é fundamental no processo de secagem em leito de jorro, pois as partículas atuam como agentes transportadores de massa e energia entre as regiões de jorro e anular.

A maioria dos modelos existentes na literatura para previsão da taxa de recirculação são baseados na velocidade das partículas próximas à parede do leito. Apesar de alguns autores afirmarem que para leitos de jorro convencionais exista

uma grande variação radial da velocidade, a maioria das correlações empíricas consideram este efeito usando a média radial da velocidade para cada posição axial. Já para leitos com tubo interno, este efeito não existe pois, como foi observado no trabalho de Freitas (1996), a velocidade dos sólidos na região anular apresenta pouca variação.

Thorley et al. (1959) determinaram uma correlação para o leito de jorro convencional, baseada na velocidade das partículas próximas à parede. Através dos dados experimentais obtidos, eles observaram que o aumento da altura do leito e da vazão de gás aumenta a taxa de circulação e o escoamento cruzado dos sólidos, segundo:

$$W_{\text{rec}} = K \left(\frac{d_i}{d_c} \right)^{-0,25} \left(\frac{U_i}{U_{mj}} \right)^{1,23} \left(\frac{Ho}{d_c} \right) \quad (2.31)$$

para leitos convencionais W_{rec} em kg/s; $\theta = 60^\circ$; $30 < Ho < 183$ cm, onde:

$K = 0,563$ para $d_c = 61,0$ cm

$K = 0,068$ para $d_c = 15,0$ cm

Clafin e Fane (1984) determinaram a taxa de circulação de sólidos, através da velocidade destes no ânulo, para leitos de jorro com tubo interno. Eles observaram que o aumento da distância entre o tubo interno e a entrada de ar acarretava um aumento na taxa de circulação das partículas.

$$W_{\text{rec}} = 224,2(L_e \times Q_t)^{0,7} M_1^{0,3} d_t^{1,22} \quad (2.32)$$

para: $\theta = 60^\circ$; $0 < H_o < 80\text{cm}$; $5 < d_i < 8\text{cm}$; $5 < L_e < 20\text{cm}$; $d_c = 30\text{cm}$ e $d_p = 3,5\text{mm}$ (trigo).

Freitas (1996) obteve dados experimentais da taxa de recirculação, para o leito de jorro com tubo interno e alimentação contínua de sólidos, através da seguinte equação advinda do balanço de massa:

$$W_{\text{rec}} = \rho_p \times A_a \times V_a \times (1 - \varepsilon_a) \quad (2.33)$$

Nesta equação foi usada a velocidade média das partículas no trecho cilíndrico do ânulo. A porosidade do meio em repouso foi usada como representativo da porosidade da região anular. Através dos dados experimentais obtidos, Freitas (1996) observou que com o aumento da vazão de ar e da altura de leito aumentava-se a taxa de recirculação dos sólidos, o que foi observado também nos trabalhos de Thorley et al. (1959) e Clafin e Fane (1984). Porém, analisando a influência do aumento da vazão de sólidos, ele notou uma diminuição da taxa de recirculação. Esse efeito foi atribuído à resistência adicional ao escoamento cruzado ânulo-jorro devido à alimentação contínua de sólidos.

Desta forma, ele obteve a seguinte correlação empírica em função da vazão de sólidos, da altura do leito e da vazão de ar, para a taxa de recirculação das partículas:

$$W_{\text{rec}} = -0,12 - 0,935.W_e + 0,692.H_o + 9,913.Q_e \quad (2.34)$$

para leitos com tubo interno, W_{rec} kg/s e,
válida para $2,1 \leq Q_e \leq 2,8$ m³/min ; $1100 \leq W_e \leq 2200$ g/min ; $25 \leq H_o \leq 35$ cm e
 $d_p = 2,6$ mm (esfera de vidro).

Freitas (1996) observou que as previsões de ambas correlações da literatura citadas anteriormente fornecem valores abaixo dos obtidos experimentalmente em seu trabalho, o que foi explicado pela diferença da massa específica do vidro que é cerca de duas vezes maior que a do trigo. Já a equação ajustada à partir dos dados experimentais apresentou melhores resultados.

No estudo sobre a sensibilidade de variáveis da fluidodinâmica estudadas, Freitas (1996) observou que a velocidade dos sólidos é pouco sensível a este parâmetro, sendo que esta sensibilidade não é afetada pelas condições dinâmicas do fluido. Somente na região de recirculação dos sólidos, percebe-se uma maior sensibilidade desta variável, pois a velocidade dos sólidos no jorro é afetada pela vazão de partículas advindas do ânulo.

▪ **Fator de atrito partícula-parede**

Caples e Nakamura (1973) estudaram o fator de atrito partícula-parede para o transporte pneumático para partículas de aço, vidro e polietileno de diâmetros variados. Eles afirmaram que este fator poderia ser negativo para velocidades do fluido próximas da velocidade terminal das partículas, e propuseram a seguinte correlação:

$$f_{pw} = 0,206 \left[\frac{V}{(1-\varepsilon)} \right]^{-1,22} \quad (2.35)$$

Yang (1978) obteve as seguintes correlações ajustadas a partir dos dados de Capes e Nakamura (1973) para o transporte pneumático:

$$f_{pw} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)} = 0,0126 \left[(1-\varepsilon) \frac{Re_t}{Re_p} \right]^{-0,979} \quad (2.36)$$

válida para o caso em que a velocidade do fluido é consideravelmente maior que a velocidade terminal das partículas ($U/V_t > 1,5$).

Para velocidades do fluido próximas da velocidade terminal das partículas foi proposta a seguinte equação:

$$f_{pw} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)} = 0,0126 \left[(1-\varepsilon) \frac{Re_t}{Re_p} \right]^{-1,021} \quad (2.37)$$

▪ Fator de atrito gás-parede

O coeficiente de atrito pode ser determinado através de equações previstas na literatura para fluido escoando em tubos (lisos e rugosos) sem a presença de partículas.

Na Tabela 2.1 são apresentadas equações encontradas na literatura para previsão do fator de atrito gás-parede em tubos lisos.

Tabela 2.1- Correlações para o coeficiente de atrito gás-parede em tubos lisos.

Referência	Correlação	Observações
Blasius ¹ (1913)	$f_{gw} = 0,0791 Re^{-0,25}$ (2.38)	$5000 < Re < 10^5$
McAdams ² (1962)	$f_{gw} = 0,046 Re^{-0,2}$ (2.39)	$5000 < Re < 2 \times 10^5$
Konakov ³ (1950)	$\frac{1}{\sqrt{f_{gw}}} = 1,564 \ln Re - 3$ (2.40)	$4000 < Re < 10^8$
Drew e Generaux ⁴ (1936)	$\frac{1}{\sqrt{f_{gw}}} = 1,390 \ln Re \sqrt{f_{gw}} + 1,2$ (2.41)	Regime turbilhonar bem desenvolvido
Nikuradse ⁵ (1932)	$f_{gw} = 0,316 Re^{-0,25}$ (2.42)	

1,2,3,4-apude Gomide (1993) e 5 -apude Bennett e Meyers (1978).

2.3.2) Parâmetros Térmicos

▪ Coeficiente de troca térmica fluido-partícula

Na modelagem de processos de secagem é essencial a determinação do coeficiente de transferência de calor gás-sólido nas condições de secagem: velocidade relativa entre o fluido e a partícula, temperatura e pressão do gás, propriedades físicas do gás (massa específica, viscosidade e condutividade) e diâmetro de partícula. Esse coeficiente é correlacionado da seguinte forma:

$$Nu_p = f(Re_p, Pr) \quad (2.43)$$

onde:

$$Nu_p = \frac{h_p d_p}{K} \tag{2.44}$$

Para o jorro:

Nas Tabelas 2.2 e 2.3 são apresentadas as principais correlações encontradas na literatura para o coeficiente de transferência de calor gás-sólido obtidas para o leito de jorro e para sistemas particulados semelhantes à região de jorro.

Tabela 2.2- Correlações para o coeficiente de troca térmica gás-partícula para o jorro.

Referência	Correlação	Observações
Reger et al. (1967)	$Nu_p = 0,0597 Re_i^{2,0} Gu^{0,61} Ar^{-0,438} \left(\frac{Ho}{d_p}\right)^{-1,0} \tag{2.45}$	secagem de pigmentos $3,1 \times 10^5 \leq Ar \leq 5 \times 10^6$ $Ho/d_p \leq 55$ $935 \leq Re_i \leq 1700$ $0,18 \leq Gu \leq 0,392$
Uemaki e Kugo ¹ (1971)	$Nu_p = 0,0005 Re_{pmj}^{1,46} \left(\frac{U_j}{U_{mj}}\right) \tag{2.46}$	leito de jorro com alimentação contínua
Kmiec (1975)	$Nu_p = 0,897 Re_p^{0,464} Pr^{0,333} Ar^{0,116} \left(\operatorname{tg} \frac{\theta}{2}\right)^{-0,813} \left(\frac{Ho}{d_p}\right)^{-1,19} \phi^{2,26} \tag{2.47}$	secagem de sílica gel e carvão ativado leitos cônicos $\theta = 30$ e 60°

(Continuação da Tabela 2.2)

Kucharski e Kmiec (1983)	$\text{Nu}_p = 0,045 \text{Re}_p^{0,664} \text{Pr}^{0,333} \text{Ar}^{0,226} \left(\text{tg} \frac{\gamma}{2}\right)^{-0,852} \left(\frac{\text{Ho}}{d_p}\right)^{-1,47} \phi^{2,3}$ <p style="text-align: right;">(2.48)</p>	recobrimento de comprimidos
Oliveira et al. (1994)	$\text{Nu}_p = 0,01 \left(\frac{W_1}{W_g}\right)^{1,292} \text{Re}_i^{1,00} \text{Gu}^{-2,096} \left(\frac{d_i}{d_p}\right)^{-0,811}$ <p style="text-align: right;">(2.49)</p>	secagem de sangue bovino leito cônico $\theta = 60^\circ$

1-apude Epstein e Mathur (1971)

Tabela 2.3- Correlações para o coeficiente de troca térmica gás-partícula para outros sistemas particulados.

Referência	Correlação	Observações
Rowe e Claxton (1965)	$\text{Nu}_p = A + B \text{Pr}^{1/3} \text{Re}_p^{0,55}$ <p style="text-align: right;">(2.50)</p> $A = \frac{2}{1 - (1 - \varepsilon)^{1/3}}$ <p style="text-align: right;">(2.51)</p> $B = \frac{2}{3\varepsilon}$ <p style="text-align: right;">(2.52)</p>	troca de calor entre esferas e um fluido percolante $\text{Re}_p > 1000$
Bandrowski e Kaczmarzy (1978)	$\text{Nu}_p = 0,00114 \beta_v^{-0,5984} \text{Re}_p^{0,8159}$ <p style="text-align: right;">(2.53)</p>	transporte pneumático vertical $0,00025 < \beta_v < 0,05$ $180 < \text{Re}_p < 1800$ esferas de cerâmica ($d_p < 2,56 \text{ mm}$)
Torrezan et al. (1983)	$\text{Nu}_p = 2 + \left[(0,4 \text{Re}_p^{0,5})^{1,25} + (B(\beta_v) \text{Re}_p^{0,82})^{1,25} \right]^{0,8}$ <p style="text-align: right;">(2.54)</p> $B(\beta_v) = 0,308 - 74,627 \beta_v$ <p style="text-align: right;">(2.55)</p>	transporte pneumático $2,3 \times 10^{-4} < \beta_v < 10^{-2}$ $20 < \text{Re}_p < 800$ (esferas de vidro)

(Continuação da Tabela 2.3)

Valentin (1986)	$\text{Nu}_p = 2 + \left[(0,4 \text{Re}_p^{0,5})^{12/11} + (B(\beta_v) \text{Re}_p^{0,82})^{12/11} \right]^{12/11}$ (2.56)	transporte pneumático (esferas de vidro)
	$B(\beta_v) = 2,329 \times 10^{-4} \beta_v^{-1,005}$ (2.57)	$f_{pw} = 0$ $2,3 \times 10^{-4} < \beta_v < 10^{-2}$ $20 < \text{Re}_p < 870$ $2 < \text{Nu}_p < 60$
	$\text{Nu}_p = 2 + \left[(0,4 \text{Re}_p^{0,5})^{6/5} + (B(\beta_v) \text{Re}_p^{0,82})^{6/5} \right]^{5/6}$ (2.58)	$f_{pw} = 0,003$ $0,00032 < \beta_v < 0,009$ $6 < \text{Re}_p < 1000$ $1,7 < \text{Nu}_p < 40$
	$B(\beta_v) = 7,131 \times 10^{-4} \beta_v^{-0,8527}$ (2.59)	
	$\text{Nu}_p = 2 + \left[(0,4 \text{Re}_p^{0,5})^{14/5} + (B(\beta_v) \text{Re}_p^{0,82})^{14/5} \right]^{5/14}$ (2.60)	$f_{pw} = \left(\frac{v}{\sqrt{gd_t}} \right)$ $0,00064 < \beta_v < 0,0166$ $86 < \text{Re}_p < 1200$ $1,3 < \text{Nu}_p < 26$
	$B(\beta_v) = 3,958 \times 10^{-3} \beta_v^{-0,4446}$ (2.61)	

Para o ânulo:

Littman e Sliva (1971) desenvolveram uma correlação para o coeficiente de troca térmica entre o gás e a partícula para leitos fixos e números de Reynolds de partícula menores que 100. Esta correlação apresenta a seguinte forma:

$$\text{Nu}_p = 0,42 + 0,35 \text{Re}_p^{0,8} \quad (2.62)$$

Outra correlação que pode ser aplicada para a região anular foi desenvolvida por Sartori et al. (1985) para leitos deslizantes:

$$\text{Nu}_p = aa \text{Pr}^{1/3} \text{Re}_p^{bb} \quad (2.63)$$

onde para escoamentos contracorrentes, $aa=1,54$ e $bb=0,57$

▪ **Coeficiente global de troca térmica entre jorro e o ânulo**

Kmiec (1975), em seu estudo sobre a modelagem da fluidodinâmica e transferência de calor em leito de jorro, utiliza a equação de McAdams (Gomide,1993) para previsão da troca térmica entre o jorro e o ânulo. Esta correlação foi desenvolvida para troca de calor entre a parede de um tubo e o fluido escoando no interior deste, e Kmiec (1975) levou em consideração a resistência à transferência de calor na região anular.

No estudo sobre a troca de calor entre o jorro e o ânulo para o leito de jorro com tubo interno, Stocker et al.(1990) utilizaram, como alternativa, uma correlação para troca de calor entre uma suspensão no transporte pneumático e as paredes do tubo. Dentre as correlações para troca de calor parede-leito pneumático pode-se destacar a de Farbar e Morley (1957):

$$\text{Nu}_t = 0,14 \text{Re}_t^{0,6} \left(\frac{W_p}{G_g} \right)^{0,45} \left(\frac{d_p}{d_t} \right)^{0,4} \quad (2.64)$$

sendo o coeficiente global de troca térmica obtido da seguinte forma:

$$U_t = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_t} \right) + 0,015} \quad (2.65)$$

Sadek (1972) obteve uma equação a partir de dados experimentais de Farbar e Morley (1957). Nesta equação, considerou-se o efeito da concentração de partículas sobre o coeficiente de troca térmica em um transporte pneumático:

$$\frac{\Delta h_w}{h_w^0} = 0,20 \left[\left(n d_t^3 \right) \left(\frac{d_p}{d_t} \right)^2 \right]^{1,19} \quad (2.66)$$

onde:

h_w^0 = coeficiente de troca térmica na ausência de partículas;

Δh_w = aumento no coeficiente devido à presença de partículas, e

n = número de partículas no tubo por volume de gás.

▪ **Condutividade térmica efetiva axial**

A previsão da condutividade térmica de um leito de partículas contendo uma fase fluida em movimento pode ser obtida da equação desenvolvida por Gubulin e Freire (1984):

$$\frac{K_{ea}}{K_f} = \frac{K_{ea}^o}{K_f} + \left\{ 0,05 + 0,1 \times \exp \left[\frac{-3,345 \sqrt{a_p}}{R} \right] \right\} Re Pr \quad (2.67)$$

onde:

a_p = área superficial da partícula;

R = raio do cilindro (leito);

K_{ea}^o = condutividade térmica efetiva axial nas condições de fluido estagnado:

$$\frac{K_{ea}^o}{K_f} = \varepsilon + (1 - \varepsilon) \left[\frac{\ln \left[1 + (\theta - 1) \varepsilon \right] - \left(\frac{\theta - 1}{\theta} \right) \varepsilon}{\frac{\varepsilon (2 - \varepsilon) (\theta - 1)^2}{3}} \right] \quad (2.68)$$

onde:

$$\theta = \frac{K_p}{K_f}$$

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com objetivo geral deste trabalho, nesse capítulo serão descritos e caracterizados os materiais, o equipamento, bem como o procedimento experimental utilizado no estudo da fluidodinâmica e da transferência de calor. Além disso, será apresentado o modelo estudado e a metodologia utilizada para resolução numérica deste. Assim, esse capítulo mostrará como foram obtidas as informações necessárias para a modelagem e a simulação do sistema e os dados experimentais para validação do modelo.

3.1) MATERIAIS

3.1.1) Partículas

As partículas utilizadas foram esferas de vidro, a escolha deste material baseou-se no fato destas serem de fácil aquisição, e também, terem sido amplamente usadas em estudos térmicos no DEQ/UFSCar como no trabalho de Freitas (1996).

As esferas de vidro foram caracterizadas através do (a):

- diâmetro (diâmetro médio de peneira): as partículas foram peneiradas e colhidas entre peneiras da série 5 e 6 da ABNT (2,83 mm e 2,38 mm respectivamente);
- densidade (picnometria);
- calor específico e condutividade térmica: da literatura (Perry,1963), e
- porosidade (massa contida em um recipiente de volume conhecido): técnica empregada por Freitas (1996);

A Tabela 3.1 mostra algumas características das esferas vidro e do meio poroso constituído por elas obtidas através das técnicas apresentadas anteriormente.

Tabela 3.1- Propriedades das esferas de vidro e do leito constituído por elas.

d_p (mm)	ρ_p (g/cm ³)	ϵ	C_{pp} (Kg/m ³)	K_p (W/m ^o C)
2,6	2,50	0,36	0,76	1,05

3.1.2) Equipamentos

O equipamento utilizado foi desenvolvido no Centro de Secagem do DEQ-UFSCar e está representado na Figura 3.1. A adaptação desse equipamento foi realizada modificando-se o sistema de alimentação de sólidos, onde o sistema de alimentação tipo rosca sem-fim utilizado por Freitas (1996) foi substituído pelo alimentador gravitacional. Essa mudança objetivou ter um escoamento de sólidos

mais contínuo, já que o sistema de alimentação tipo rosca sem-fim mostrou-se inadequado, possibilitando sua operação apenas por curtos períodos de tempo. Darcie (1999), observou que o transporte de partículas era constantemente interrompido devido ao travamento interno do motor. Estas interrupções eram causadas devido ao atrito das partículas que se alojavam no pequeno espaço entre a rosca sem-fim e a parede, impedindo o seu movimento.

3.1.2.1) Leito de Jorro

A configuração de leito de jorro estudada é o leito cilíndrico-cônico com tubo “draft”, ou comumente chamado de tubo interno, e alimentação contínua pela base. O corpo cilíndrico tem 0,20m de diâmetro e 0,45m de altura, e está acoplado à uma base cônica de ângulo interno de 60° , altura de 0,15m e diâmetro de entrada do ar 0,05m. Os tubos internos têm diâmetro de 0,05m e alturas de 0,18 e 0,28m. A distância entre a extremidade do tubo e a entrada do leito é de 0,07m.

As partículas foram “drenadas” na parte cilíndrica do leito em duas alturas diferentes: a 0,10 e 0,20m da base. Os drenos das partículas consistem de quatro fendas diametralmente opostas, onde pequenas calhas são parafusadas para facilitar o escoamento, a estas estão acopladas quatro mangueiras flexíveis translúcidas de aproximadamente 1m de comprimento. A base cônica está conectada ao sistema de alimentação de ar e de sólidos através de flanges.

3.1.2.2) Sistema de Alimentação de Ar

O sistema de alimentação de ar é composto por um soprador marca IBRAM de 7,5 CV de potência. A tubulação de alimentação do ar conectada ao soprador tem diâmetro de 2". Na saída do soprador está acoplada uma válvula gaveta de 2" para o ajuste de vazão, em seguida um aquecedor elétrico ligado a um variador de tensão e um medidor de vazão de ar tipo Venturi acoplado a um manômetro em "U", que utiliza água como fluido manométrico.

3.1.2.3) Sistema de Alimentação de Sólidos

O alimentador parafuso tipo rosca sem-fim, estudado por Freitas (1996), por apresentar com frequência problemas operacionais, foi substituído por um alimentador gravitacional. Esse alimentador gravitacional consiste na adaptação do reservatório existente de partículas, que tem capacidade de 110 litros, o qual foi interligado à seção de entrada do leito através de uma mangueira. A vazão dos sólidos foi controlada por uma válvula tipo guilhotina.

O esquema da unidade experimental do leito de jorro está representado pela Figura 3.1.

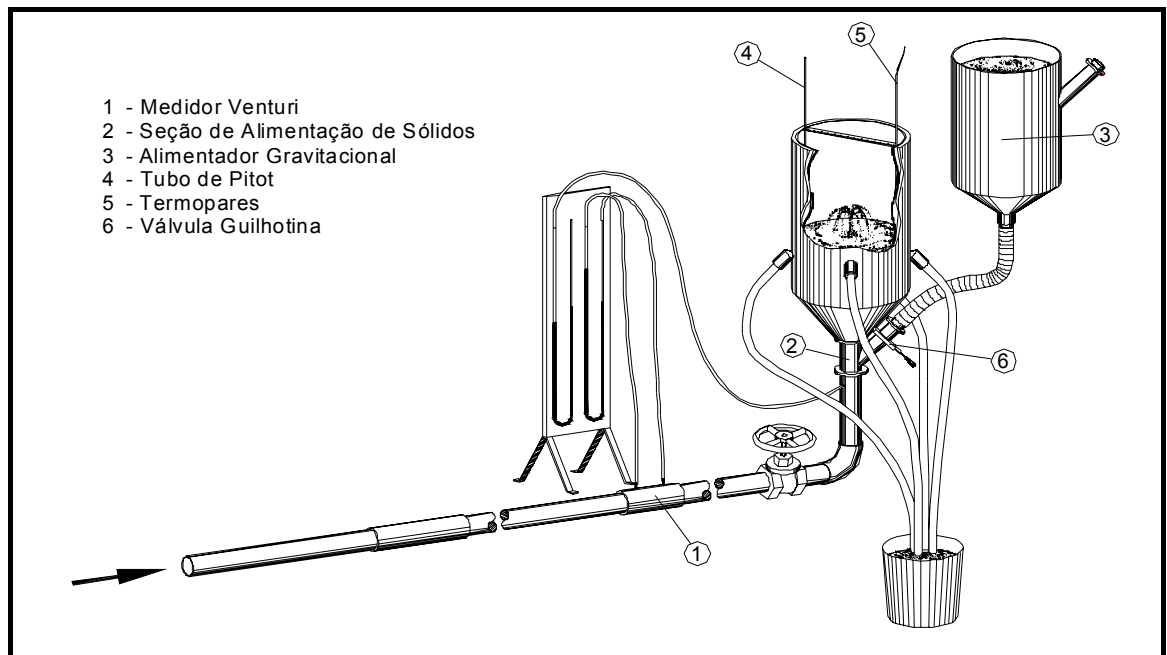


Figura 3.1- Esquema da unidade experimental do Leito de Jorro.

3.2) TÉCNICAS DE MEDIDAS

3.2.1) Fluidodinâmica

A vazão de ar na entrada do leito de jorro foi obtida através da medida da vazão de ar alimentada ao sistema. A vazão de ar fornecida pelo soprador foi determinada através de um medidor Venturi acoplado a um manômetro tipo “U”, utilizando água como fluido manométrico, onde foram feitas as leituras de diferença de altura entre as colunas (ΔH). A aferição desse medidor foi feita utilizando um medidor Venturi padrão.

A Figura 3.2 apresenta a curva obtida na aferição do medidor.

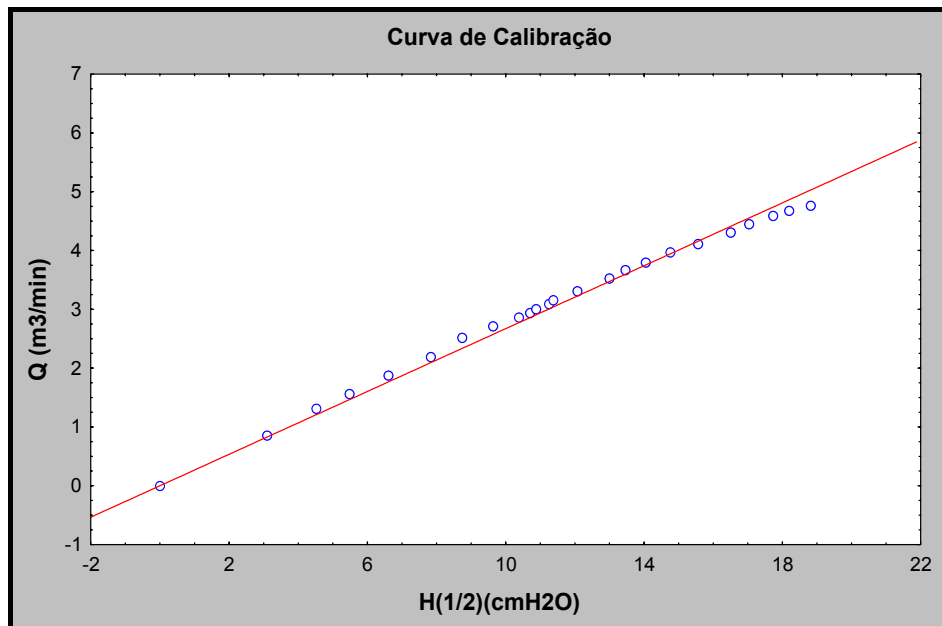


Figura 3.2- Curva de aferição do medidor Venturi.

A equação de aferição foi obtida com um coeficiente de ajuste $R^2=99,54\%$ e apresentou-se da seguinte forma:

$$Q = 0,2672\sqrt{\Delta H} \quad (3.1)$$

onde:

Q=vazão volumétrica fornecida ao sistema (m³/min);

ΔH =diferença de altura entre as colunas de água no manômetro (cmH₂O).

A determinação da vazão mássica de sólidos foi realizada coletando-se as partículas que saíam do leito durante um tempo cronometrado e pesando a massa coletada com 8 repetições.

A queda de pressão total do sistema foi obtida com a utilização de um manômetro em “U”, com mercúrio como fluido manométrico. A tomada de

pressão foi alocada na linha do ar, logo abaixo da entrada na seção de alimentação de partículas.

3.2.2) Térmica

Para realização das medidas de temperaturas foram sempre utilizados termopares tipo T (cobre-constantan). Estes termopares foram acoplados a um módulo digital de 12 canais da marca Cole-Parmer, o qual permitia selecionar o tipo do termopar (J,T,E ou K) e a escala de medida ($^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{F}$, K ou R). Este instrumento determinava, através de um sistema eletrônico, as medidas de temperatura em relação a uma temperatura de referência (ponto de congelamento da água, 0°C). A precisão das medidas era de $\pm 0,1\%$ da leitura. Este instrumento pode ser visto na Figura 3.3 a seguir.



Figura 3.3- Módulo digital utilizado para a leitura das temperaturas.

A temperatura do fluido na entrada do sistema foi medida através de um termopar desprotegido alocado radialmente no tubo de alimentação de ar, antes da seção de alimentação dos sólidos. Para medida de temperatura do fluido na saída do sistema, utilizou-se um termopar protegido num tubo de aço inox com tela em uma das extremidades, a fim de evitar o contato das partículas com a junção do termopar. Este termopar foi sempre alocado em uma posição axial de 5 cm acima das alturas de leito estudadas, devido à alta concentração de partículas no topo do leito. Através de medidas realizadas no topo do leito e na posição axial especificada anteriormente, com o leito operando em regime, não observou-se variação na temperatura do gás. A Figura 3.4 mostra o esquema de um termopar com proteção utilizado para medidas de temperatura do fluido na saída do leito.

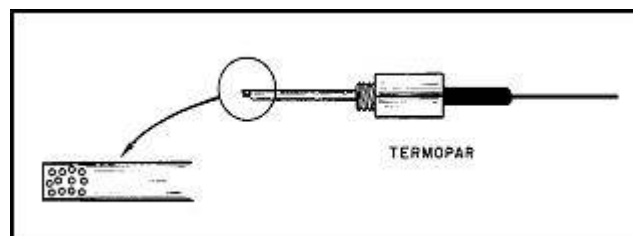


Figura 3.4- Esquema de um termopar com proteção para medida da temperatura do fluido.

A medida da temperatura dos sólidos foi realizada de forma indireta através da técnica de calorimetria. Para a medida da temperatura de entrada dos sólidos no sistema, estes foram coletados e transportados, através de um tubo coletor, até uma caixa termicamente isolada construída de isopor. Este tubo foi instalado radialmente ao tubo de alimentação dos sólidos após a válvula guilhotina, como pode ser visto na Figura 3.5 a seguir. Neste tubo de alimentação

de sólidos não observou-se diferença na medida de pressão realizada entre dois pontos, o que comprova que não ocorreu dispersão do ar de entrada para alimentação.



Figura 3.5- Tubo coletor instalado na seção de alimentação das partículas.

No interior desta caixa termicamente isolada foi inserido um termopar desprotegido. Para medida da temperatura dos sólidos na saída do sistema, empregou-se a mesma técnica sendo que estes foram coletados diretamente através dos drenos existentes na parte cilíndrica do leito desconectando uma das mangueiras ligadas às calhas. As Figuras 3.6 e 3.7 representam, respectivamente, o esquema de medida de temperatura dos sólidos por calorimetria empregado no tubo de alimentação dos sólidos e o esquema do coletor adiabático de sólidos.

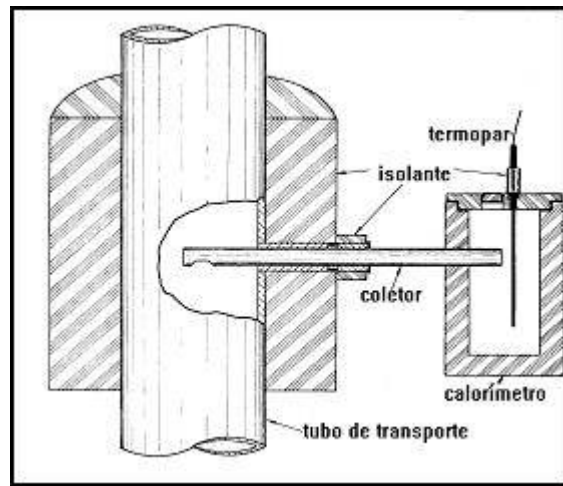


Figura 3.6- Esquema do sistema de medida da temperatura dos sólidos por calorimetria.

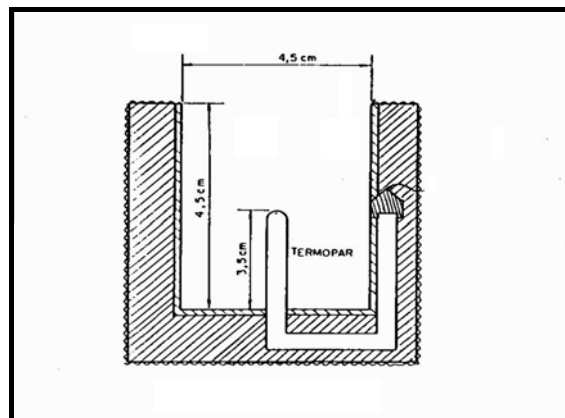


Figura 3.7-Esquema do coletor adiabático de sólidos.

3.3) PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Decidida a condição fluidodinâmica a ser estudada, iniciava-se o jorro e então regulava-se a vazão de ar através da válvula tipo gaveta, analisando a diferença de altura indicada no manômetro correspondente à vazão desejada.

Obtida essa vazão, ligava-se o aquecedor elétrico ajustando a temperatura de entrada do ar no leito ao valor desejado, com auxílio do variador de tensão. Após o estabelecimento das condições de vazão e temperatura do ar desejadas, iniciava-se a alimentação de partículas, ajustando sua vazão com o auxílio da válvula guilhotina. A medida da vazão era realizada coletando-se as partículas que saíam do leito pelas mangueiras do dreno em um recipiente, em intervalos de 2 minutos, e pesando a massa coletada, com mais 8 repetições para obtenção de uma média. Após o ajuste da vazão de sólidos, anotava-se a queda de pressão total no leito, antes da seção de alimentação de partículas.

Após a fixação das condições fluidodinâmicas desejadas, aguardava-se o sistema entrar em regime estacionário através do monitoramento da temperatura do ar na saída do leito. Essa temperatura atingia um valor constante depois de transcorridos cerca de 180 minutos do início da operação. Atingido o estado estacionário, anotava-se as medidas de temperatura do ar na entrada e na saída do sistema, através da seleção digital do canal referente ao termopar em questão. A temperatura era anotada quando permanecia estacionária por pelo menos 5 min. Feito isso, coletava-se várias vezes (cerca de 4 coletas) as partículas no tubo de alimentação e na saída dos drenos para medida da temperatura calorimétrica de entrada e saída das partículas no sistema. A temperatura dos sólidos foi obtida através da média das medidas realizadas.

3.4) MÉTODOS

Este item apresentará as equações do modelo proposto para cada região do leite a ser estudada, bem como o procedimento de resolução numérica e comentários sobre os programas e rotinas empregados.

3.4.1) Modelagem Matemática da Fluidodinâmica e Transferência de Calor

Serão apresentados neste item, os conjuntos de equações do modelo proposto para o estudo fluidodinâmico e térmico do leite de jorro com tubo interno e alimentação contínua. Esse modelo é baseado naquele desenvolvido por Stocker et al. (1990), incluindo as modificações propostas por Freitas (1996). Ele envolve equações de balanço de massa, de movimento e de energia para as fases sólida e fluida.

Para um melhor equacionamento do modelo, o leite de jorro foi dividido de acordo com a metodologia de Stocker et al. (1990) nas regiões anular e de jorro acima e abaixo do tubo interno. Isso foi feito levando-se em conta as diferentes interações entre essas regiões. Além destas regiões, considerou-se também a região de entrada do leite, onde as partículas são alimentadas continuamente. Essa região foi incluída na modelagem de Freitas (1996).

Assim, para um melhor estudo dos fenômenos de transferência de calor, massa e quantidade de movimento dividiu-se o sistema nas seguintes regiões:

- **Região de entrada (I):** região caracterizada pelo transporte pneumático das partículas continuamente alimentadas até a entrada do leito;
- **Região de recirculação (II):** região de interação entre o jorro (caracterizado pelo transporte pneumático) e o ânulo (escoamento deslizante), abaixo do tubo interno;
- **Região do tubo interno (III):** região de interação entre o jorro (região do tubo interno) e o ânulo (escoamento deslizante), acima do tubo interno;

As regiões propostas para a análise e a simulação dos modelos, estão representadas na Figura 3.8.

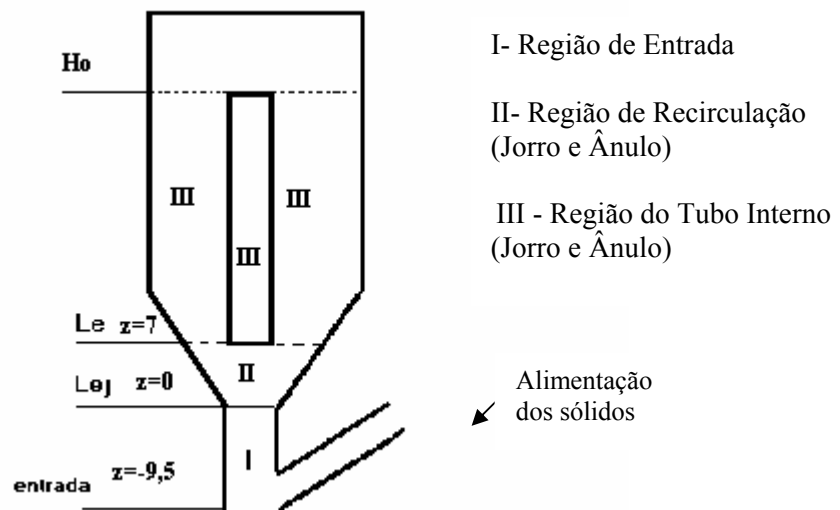


Figura 3.8- Esquema das regiões do leito de jorro para modelagem (cotas em cm).

Para as regiões II e III foram empregadas as equações gerais para região de jorro e do ânulo do modelo de Stocker et al. (1990) adaptado por Freitas (1996). Para a região de entrada (I), caracterizada pelo transporte pneumático dos sólidos

alimentados, foram empregadas as equações gerais do jorro. As equações do modelo nas regiões de entrada (I) e do tubo interno (III) não apresentaram os termos relacionados à variação mássica de sólidos e de fluido. Já na região II, as simplificações anteriores não foram consideradas, pois nessa região ocorre a variação mássica dos sólidos e do fluido devido à recirculação das partículas advindas do ânulo e à dispersão do gás do jorro para o ânulo.

No desenvolvimento do modelo foram assumidas as seguintes hipóteses:

- regime estacionário;
- modelo unidimensional para as fases sólida e fluida onde se considera apenas variação axial no leito (gradientes radiais e angulares desprezíveis);
- propriedades físicas das fases variáveis com a posição no leito (massa específica e viscosidade);
- não há variação do diâmetro médio das partículas ao longo do processo;
- diâmetro do jorro constante ao longo de todo o sistema;
- há escoamento cruzado de sólidos do ânulo para o jorro;
- há dispersão de gás do jorro para o ânulo;
- na região do tubo interno não há dispersão do gás e escoamento cruzado dos sólidos;
- as interações partícula-partícula na transferência de quantidade movimento são desprezíveis;
- a transferência de quantidade de movimento devido às forças de atrito podem ocorrer entre as fases fluida e sólida e a parede do tubo e entre ambas as fases fluida e sólida;

- no balanço de energia são desprezados os termos de troca de calor por radiação e geração de calor e perdas através da parede do leito;
- no balanço de energia para a região anular considera-se a condução axial de calor.

Cada região a seguir a apresentará seu sistema de equações, assim como foi empregado no desenvolvimento do programa simulador.

- **Região de Entrada (I):**

Essa região é caracterizada pelo transporte pneumático das partículas que são continuamente alimentadas ao sistema. Nesta seção foram empregadas as equações de jorro do modelo da fluidodinâmica (eqs. 2.1 a 2.4) e do modelo da transferência de calor (eqs. 2.15 e 2.16) já detalhadas anteriormente no Capítulo 2 e com as devidas simplificações apresentadas acima.

Tabela 3.2- Equações do modelo da fluidodinâmica e transferência de calor na região de entrada (I).

Variável	Equação
Vazão mássica de partículas	$\frac{dW_e}{dz} = 0$
Vazão mássica de gás	$\frac{dG_e}{dz} = 0$
Porosidade	$\frac{d\varepsilon_e}{dz} = (1 - \varepsilon_e) \cdot \left[\frac{dV_e/dz}{V_e} - \frac{dW_e/dz}{W_e} \right]$

(Continuação da Tabela 3.2)

Velocidade do gás	$\frac{dU_e}{dz} = -U_e \cdot \left[\frac{d\varepsilon_e/dz}{\varepsilon_e} + \frac{d\rho_{ge}/dz}{\rho_{ge}} - \frac{dG_e/dz}{G_e} \right]$
Velocidade das partículas	$\frac{dV_e}{dz} = \frac{3Cd_e \rho_{ge} (U_e - V_e) \times \ U_e - V_e\ }{4d_p \rho_p V_t} + \frac{g}{V_t} \left[\frac{\rho_{ge}}{\rho_p} - 1 \right] - \frac{1}{\rho_p V_e} \frac{dP_e}{dz} - \frac{2 \cdot V_e}{d_e} f_{pwe}$
Pressão total	$\frac{dP_e}{dz} = -\rho_{ge} U_e \frac{dU_e}{dz} - \frac{3Cd_e (1 - \varepsilon_e) \rho_{ge} (U_e - V_e) \ U_e - V_e\ }{4\varepsilon_e d_p} + \frac{(1 - \varepsilon_e) g (\rho_{ge} - \rho_p)}{\varepsilon_e} - \rho_{ge} g - \frac{2\rho_{ge} U_e^2}{d_e} f_{gwe}$
Temperatura das partículas	$\frac{dT_{pe}}{dz} = - \frac{6 \cdot h_{pe} \cdot (T_{pe} - T_{ge})}{\rho_p \cdot V_e \cdot Cp_p \cdot d_p}$
Temperatura do gás	$\frac{dT_{ge}}{dz} = \frac{6 \cdot h_{pe} \cdot (1 - \varepsilon_e) \cdot (T_{pe} - T_{ge})}{\rho_{ge} \cdot U_e \cdot Cp_{ge} \cdot d_p}$

Nesta região os parâmetros estimados foram: o coeficiente de arraste fluido-partícula, o fator de atrito partícula-parede do tubo de entrada, o fator de atrito gás-parede do tubo de entrada e o coeficiente de troca térmica fluido-partícula.

Observe que o sistema formado pelas equações diferenciais da porosidade, da velocidade do gás, da velocidade das partículas e da pressão total na região de entrada, bem como as equações diferenciais semelhantes para as demais regiões de jorro, não podem ser resolvidas de forma explícita. Nesse caso, a cada passo de integração numérica, os gradientes $d\varepsilon_e/dz$, dU_e/dz , dV_e/dz e dP_e/dz deverão obedecer ao sistema de equações correspondentes. Para tanto, utilizou-se o

método de Newton-Raphson na solução das equações algébricas formadas por estas equações diferenciais, movendo-se o lado direito à esquerda das mesmas, formando assim um sistema de equações do tipo $f(x)=0$.

▪ **Região de Recirculação (II):**

Nessa região ocorre a interação direta entre a região de jorro e anular, ocasionando a variação da vazão mássica do fluido e dos sólidos, devido à circulação das partículas e ao desvio de uma parte do gás de entrada para o ânulo. Assim, esta região apresentou as equações características tanto do jorro quanto da região anular que já foram apresentadas no Capítulo 2 (eqs. 2.1 a 2.16).

Os parâmetros do modelo da fluidodinâmica estimados nesta região foram: o coeficiente de arraste fluido-partícula, o fator de atrito entre as partículas e a interface jorro-ânulo, o fator de atrito entre o gás e a interface jorro-ânulo, a taxa de recirculação dos sólidos e a vazão mássica total de fluido desviada para o ânulo. Já os parâmetros térmicos envolvidos nessa região foram o coeficiente global de troca térmica entre a região de jorro e o ânulo, os coeficientes de troca térmica entre as partículas e o gás no jorro e no ânulo e a condutividade térmica efetiva axial.

A área da seção anular é sempre variável nessa região, pois o ânulo está todo situado na parte cônica do leito.

Tabela 3.3- Equações do modelo da fluidodinâmica e transferência de calor na região de recirculação (II).

Variável	Equação
Vazão mássica de partículas no ânulo	$\frac{dW_{aR}}{dz} = \frac{W_{rec}}{L_e}$
Vazão mássica de partículas no jorro	$\frac{dW_R}{dz} = -\frac{dW_{aR}}{dz}$
Vazão mássica de gás no ânulo	$\frac{dG_{aR}}{dz} = \frac{G_a^t}{L_e}$
Vazão mássica de gás no jorro	$\frac{dG_R}{dz} = -\frac{dG_{aR}}{dz}$
Porosidade no jorro	$\frac{d\varepsilon_R}{dz} = (1 - \varepsilon_R) \cdot \left[\frac{dV_R/dz}{V_R} - \frac{dW_R/dz}{W_R} \right]$
Velocidade do gás no jorro	$\frac{dU_R}{dz} = -U_R \cdot \left[\frac{d\varepsilon_R/dz}{\varepsilon_R} + \frac{d\rho_{gR}/dz}{\rho_{gR}} - \frac{dG_R/dz}{G_R} \right]$
Velocidade das partículas no jorro	$\frac{dV_R}{dz} = \frac{(V_R^0 - V_R)}{W_R} \frac{dW_R}{dz} + \frac{3Cd\rho_{gR}(U_R - V_R) \times \ U_R - V_R\ }{4d_p\rho_p V_R} + \frac{g}{V_R} \left[\frac{\rho_{gR}}{\rho_p} - 1 \right] - \frac{1}{\rho_p V_R} \frac{dP_R}{dz} - \frac{2 \cdot V_R}{d_R} f_{pWR}$
Pressão total no jorro	$\frac{dP_R}{dz} = -\frac{U_R}{\varepsilon_R A_{cR}} \frac{dG_R}{dz} - \rho_{gR} U_R \frac{dU_R}{dz} - \frac{3Cd(1 - \varepsilon_R)\rho_{gR}(U_R - V_R)\ U_R - V_R\ }{4\varepsilon_R d_p} + \frac{(1 - \varepsilon_R)g(\rho_{gR} - \rho_R)}{\varepsilon_R} - \rho_{gR}g - \frac{2\rho_{gR}U_R^2}{d_R} f_{gwR}$
Porosidade no ânulo	$\frac{d\varepsilon_a}{dz} = 0$
Velocidade do gás no ânulo	$\frac{dU_{aR}}{dz} = U_{aR} \times \left[\frac{dG_{aR}/dz}{G_{aR}} - \frac{\rho_{ga}/dz}{\rho_{ga}} - \frac{dA_{ca}/dz}{A_{ca}} \right]$

(Continuação da Tabela 3.3)

Velocidade das partículas no ânulo	$dV_{aR} = V_{aR} \times \left[\frac{dW_{aR}/dz}{W_{aR}} + \frac{d\varepsilon_a/dz}{(1-\varepsilon_a)} - \frac{dA_{ca}/dz}{A_{ca}} \right]$
Pressão total no ânulo	$-\frac{dP_{aR}}{dz} = 7,76U_{aR} + 0,03U_{aR}^2$
Temperatura das partículas no jorro	$\frac{dT_{pR}}{dz} = \frac{(T_{paR} - T_{pR})}{W_R} \frac{dW_R}{dz} - \frac{6 \cdot h_{pR} \cdot (T_{pR} - T_{gR})}{\rho_p \cdot V_R \cdot Cp_p \cdot d_p}$
Temperatura do gás no jorro	$\frac{dT_{gR}}{dz} = \frac{6 \cdot h_{pR} \cdot (1 - \varepsilon_R) \cdot (T_{pR} - T_{gR})}{\rho_{gR} \cdot U_R \cdot Cp_{gR} \cdot d_p} + \frac{\pi \cdot d_R \cdot Ut \cdot (T_{paR} - T_{gR})}{G_R \cdot Cp_{gR}}$
Temperatura das partículas no ânulo	$\frac{d^2 T_{paR}}{dz^2} = \left[\frac{-W_{aR} Cp_p}{K_{ea} A_{ca}} - \frac{dA_{ca}/dz}{A_{ca}} \right] \frac{dT_{paR}}{dz} - \frac{\pi \cdot d_j \cdot Ut \cdot (T_{paR} - T_{gR})}{K_{ea} A_{ca}} + \frac{6(1 - \varepsilon_a) h_{pa} (T_{paR} - T_{gaR})}{K_{ea} d_p}$
Temperatura do gás no ânulo	$\frac{dT_{gaR}}{dz} = \frac{(T_{gR} - T_{gaR})}{G_{aR}} \frac{dG_{aR}}{dz} + \frac{6 \cdot A_{ca} \cdot (1 - \varepsilon_a) \cdot h_{pa} \cdot (T_{paR} - T_{gaR})}{G_{aR} \cdot Cp_{ga} \cdot d_p}$

▪ **Região do Tubo Interno (III):**

Nessa região não ocorreu o contato direto do jorro com o ânulo devido à presença do tubo interno. Assim, nos balanços de massa para o jorro e para o ânulo, a vazão mássica de fluido e de sólidos foi considerada constante.

Os parâmetros do modelo da fluidodinâmica estimados nesta região foram o coeficiente de arraste fluido-partícula, o fator de atrito partícula-parede do tubo interno e o fator de atrito gás-parede do tubo interno. Já os parâmetros térmicos

envolvidos nessa região foram o coeficiente global de troca térmica entre o jorro e o ânulo através do tubo interno, os coeficientes de troca térmica entre as partículas e o gás no jorro e no ânulo e a condutividade térmica efetiva axial.

A área da seção anular é variável apenas no trecho situado na parte cônica do leito. Na parte cilíndrica do mesmo, a área de escoamento não varia, dessa forma, a velocidade do fluido foi considerada constante já que, a variação da massa específica do ar foi pequena na faixa de temperatura estudada. Deve-se, também, destacar que a porosidade do leito, no ânulo foi considerada constante e igual à porosidade do leito em repouso.

Tabela 3.4- Equações do modelo da fluidodinâmica e transferência de calor na região do tubo interno (III).

Variável	Equação
Vazão mássica de partículas no jorro	$\frac{dW_t}{dz} = 0$
Vazão mássica de gás no jorro	$\frac{dG_t}{dz} = 0$
Porosidade no jorro	$\frac{d\varepsilon_t}{dz} = (1 - \varepsilon_t) \cdot \left[\frac{dV_t/dz}{V_t} - \frac{dW_t/dz}{W_t} \right]$
Velocidade do gás no jorro	$\frac{dU_t}{dz} = -U_t \cdot \left[\frac{d\varepsilon_t/dz}{\varepsilon_t} + \frac{d\rho_{gt}/dz}{\rho_{gt}} - \frac{dG_t/dz}{G_t} \right]$
Velocidade das partículas no jorro	$\frac{dV_t}{dz} = \frac{(V_t^0 - V_t)}{W_t} \frac{dW_t}{dz} + \frac{3Cd\rho_{gt}(U_t - V_t) \times \ U_t - V_t\ }{4d_p\rho_p V_t} + \frac{g}{V_t} \left[\frac{\rho_{gt}}{\rho_p} - 1 \right] - \frac{1}{\rho_p V_t} \frac{dP_t}{dz} - \frac{2 \cdot V_t}{d_t} f_{pwt}$

(Continuação da Tabela 3.4)

Pressão total no jorro	$\frac{dP_t}{dz} = -\frac{U_t}{\varepsilon_t A_{ct}} \frac{dG_t}{dz} - \rho_{gt} U_t \frac{dU_t}{dz} - \frac{3Cd(1-\varepsilon_t)\rho_{gt}(U_t - V_t)\ U_t - V_t\ }{4\varepsilon_t d_p} +$ $+ \frac{(1-\varepsilon_t)g(\rho_{gt} - \rho_t)}{\varepsilon_t} - \rho_{gt} g - \frac{2\rho_{gt} U_t^2}{d_t} f_{gwt}$
Vazão mássica de partículas no ânulo	$\frac{dW_{at}}{dz} = 0$
Vazão mássica de gás no ânulo	$\frac{dG_{at}}{dz} = 0$
Porosidade no ânulo	$\frac{d\varepsilon_a}{dz} = 0$
Velocidade do gás no ânulo	$\frac{dU_{at}}{dz} = U_{at} \times \left[\frac{dG_{at}/dz}{G_{at}} - \frac{\rho_{gt}/dz}{\rho_{gt}} - \frac{dA_{ca}/dz}{A_{ca}} \right]$
Velocidade das partículas no ânulo	$dV_{at} = V_{at} \times \left[\frac{dW_{at}/dz}{W_{at}} + \frac{d\varepsilon_a/dz}{(1-\varepsilon_a)} - \frac{dA_{ca}/dz}{A_{ca}} \right]$
Pressão total no ânulo	$-\frac{dP_{at}}{dz} = 7,76U_{at} + 0,03U_{at}^2$
Temperatura das partículas no jorro	$\frac{dT_{pt}}{dz} = \frac{(T_{pat} - T_{pt})dW_t}{W_t dz} - \frac{6.h_{pt}(T_{pt} - T_{gt})}{\rho_p \cdot V_t \cdot Cp_p \cdot d_p}$
Temperatura do gás no jorro	$\frac{dT_{gt}}{dz} = \frac{6.h_{pt}(1-\varepsilon_t)(T_{pt} - T_{gt})}{\rho_{gt} \cdot U_t \cdot Cp_{gt} \cdot d_p} + \frac{\pi \cdot d_t \cdot U_t (T_{pat} - T_{gt})}{G_t \cdot Cp_{gt}}$
Temperatura das partículas no ânulo	$\frac{d^2 T_{pat}}{dz^2} = \left[\frac{-W_{at} Cp_p}{K_{ea} A_{ca}} - \frac{dA_{ca}/dz}{A_{ca}} \right] \frac{dT_{pat}}{dz} - \frac{\pi \cdot d_t \cdot U_t (T_{pat} - T_{gt})}{K_{ea} A_{ca}}$ $+ \frac{6(1-\varepsilon_a)h_{pa}(T_{pat} - T_{gat})}{K_{ea} d_p}$
Temperatura do gás no ânulo	$\frac{dT_{gat}}{dz} = \frac{(T_{gt} - T_{gat})dG_{at}}{G_{at} dz} + \frac{6 \cdot A_{ca} \cdot (1-\varepsilon_a) \cdot h_{pa} \cdot (T_{pat} - T_{gat})}{G_{at} \cdot Cp_{ga} \cdot d_p}$

3.4.2) Parâmetros do Modelo

As correlações utilizadas para previsão dos parâmetros do modelo fluidodinâmico e térmico proposto são apresentadas na tabela 3.5.

Tabela 3.5- Parâmetros utilizados no modelo fluidodinâmico e térmico.

Parâmetros	Referências	Equações
Coeficiente de arraste fluido-partícula	Coelho e Massarani (1996)	(2.19)
Dispersão da vazão de gás para o ânulo	Freitas (1996)	(2.30)
Taxa de recirculação dos sólidos	Freitas (1996)	(2.34)
Fator de atrito partícula-parede	Yang (1978)	(2.36)
Fator de atrito gás-parede	Nikuradase (1932)	(2.42)
Coeficiente de troca térmica partícula- fluido no jorro	Valentin (1986)	(2.58) (2.59)
Coeficiente de troca térmica partícula- fluido no ânulo	Sartori et al. (1985)	(2.63)
Coeficiente global de troca térmica entre jorro e o ânulo	Farbar e Morley (1957)	(2.64) (2.65)
Condutividade térmica efetiva axial	Gubulin e Freire (1984)	(2.67) (2.68)

3.4.3) Simulação do Modelo

Para simulação a numérica foi considerada a mesma divisão do leito de jorro detalhada no equacionamento do modelo.

A solução do sistema de equações do modelo iniciou-se pela região de entrada do sistema (I) em $z = -9,5$ cm (definida como a posição axial da alimentação das partículas). Algumas condições de entrada dessa região foram obtidas através de dados experimentais (vazão de alimentação dos sólidos e do ar, temperatura de alimentação do ar e das partículas, queda de pressão no leito). Para a porosidade o valor inicial foi estimado. As velocidades iniciais dos sólidos e do fluido foram calculadas a partir dos dados obtidos experimentalmente de vazão de sólidos e do fluido, sabendo-se a área de escoamento e a porosidade inicial do leito.

Tabela 3.6- Condições iniciais do modelo fluidodinâmico e térmico na região de entrada do sistema.

Região de Entrada do Sistema ($z = -9,5$ cm):
$\varepsilon = \varepsilon_i$
$W = W_i$
$V = V_i$
$G = G_i$
$U = U_i$
$P = P_i$
$T_g = T_{gi}$
$T_p = T_{pi}$

Resolvendo estas equações foram obtidas as condições finais em $z = 0$, que corresponde a posição axial da entrada do leito. Essas condições finais foram

utilizadas como as condições iniciais para a resolução numérica de todas as equações do jorro e das equações de pressão e temperatura do gás do ânulo na região de recirculação (II). A porosidade inicial na região anular foi considerada como sendo a porosidade do leito em repouso. A temperatura inicial das partículas na região anular foi estimada a partir do valor obtido experimentalmente na altura do leito. De acordo com o perfil de temperatura das partículas no ânulo obtido por Freitas (1996), considerou-se o valor da temperatura em $z=0$ superior em 1°C em relação à temperatura das partículas no topo do leito. Ele observou através de seus dados experimentais, que a temperatura das partículas manteve-se constante ao longo do trecho cilíndrico do leito, usando como estimativa inicial a média entre essas temperaturas e as temperaturas experimentais do ar no ânulo em $z=5\text{cm}$. As condições iniciais da vazão mássica e da velocidade tanto para os sólidos como para fluido têm valor igual a zero, pois em $z=0$, não existe o ânulo. Assim as condições iniciais na entrada do leito ($z=0$) foram:

Tabela 3.7- Condições iniciais do modelo fluidodinâmico e térmico na região de recirculação (jorro e ânulo).

Jorro (condições finais da região I)	Ânulo
$\varepsilon_j(0) = \varepsilon_{j0}$	$\varepsilon_a(0) = \varepsilon_{a0}$
$W_j(0) = W_{j0}$	$W_a(0) = 0$
$V_j(0) = V_{j0}$	$V_a(0) = 0$
$G_j(0) = G_{j0}$	$G_a(0) = 0$
$U_j(0) = U_{j0}$	$U_a(0) = 0$
$P_j(0) = P_{j0}$	$P_a(0) = P_{j0}$
$T_{gj}(0) = T_{gj0}$	$T_{ga}(0) = T_{gj0}$
$T_{pj}(0) = T_{pj0}$	$T_{pa}(0) = T_{pa0}$

As condições finais obtidas para o jorro e o ânulo na região de recirculação foram as condições iniciais em $z=7\text{cm}$ (posição axial da entrada do tubo interno), para a resolução das equações do jorro e do ânulo da região do tubo interno (III). Assim, obteve-se os perfis fluidodinâmicos e térmicos até a altura de leito estudada.

O modelo em cada região é composto por equações diferenciais ordinárias de primeira ordem, sendo apenas uma equação de segunda ordem advinda do balanço de energia dos sólidos no ânulo. Esta equação de segunda ordem foi transformada em duas equações de primeira ordem. Portanto, para a sua resolução foram necessárias duas condições de contorno. Além das equações diferenciais, o modelo numérico foi composto pelas equações constitutivas para predição dos parâmetros.

Para a solução do sistema de equações foi utilizada a técnica numérica para equações diferenciais ordinárias de Runge Kutta de 4ª ordem. O programa foi desenvolvido na linguagem Matlab.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo serão apresentados os valores experimentais obtidos na saída do leito e na entrada do sistema, os quais foram utilizados como condições iniciais na resolução do modelo. Além disso, faz-se uma análise qualitativa e quantitativa da solução do modelo comparando os resultados via simulação com os dados experimentais e de literatura.

4.1) RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A tabela 4.1 apresenta os valores experimentais obtidos para a temperatura dos sólidos e do fluido. Esses valores foram obtidos através da média de 4 medidas realizadas para cada temperatura do ar de entrada. Conforme pode ser observado nesta tabela, para uma mesma condição de vazão de sólidos, altura de leito e temperatura de entrada do gás, com o aumento da vazão de ar a queda de temperatura do gás no leito tornou-se menor. Apesar da convecção térmica favorecer a troca de calor fluido-partícula, deve-se notar entretanto, que o leito de jorro é constituído de regiões muito distintas: as regiões de jorro e a anular. Quando aumenta-se a vazão, depois do jorro estar em operação estável, a maioria do acréscimo da vazão de ar passa pela região de jorro, onde a concentração de partículas é muito pequena. Já a região anular, muito densa ($\varepsilon \approx 42\%$), quase não

recebe esse acréscimo da vazão. Assim, a resposta global do leito de jorro conduz a um decréscimo na queda de temperatura do gás, fato este também observado por Freitas (1996).

Analisando o efeito da vazão de alimentação de sólidos para uma mesma condição estudada, pode-se notar maiores quedas na temperatura do ar no leito para maiores vazões de sólidos. Este resultado era esperado, pois o aumento da vazão de sólidos significou uma redução na razão entre a massa de gás e de partículas. Além disso, com aumento da vazão aumentou-se a área de troca térmica, reduzindo a temperatura do ar.

O efeito da temperatura de entrada do ar também foi notado na temperatura do gás no leito. Para uma mesma condição estudada a queda de temperatura do ar foi maior para a temperatura inicial do ar mais alta. Este resultado pode ser explicado pela maior diferença de temperatura entre o gás e os sólidos, já que a temperatura de entrada das partículas não variou muito.

Tabela 4.1- Temperatura dos sólidos e do fluido obtidas experimentalmente na entrada do sistema e na saída do leito.

Experimento	H _o (cm)	Q _e (m ³ /min)	W _e (g/min)	T _{ge} (°C)	T _{gs} (°C)	T _{pe} (°C)	T _{ps} (°C)
1	25	2,1	1100	80	73	55	69
2	25	2,1	1500	80	72	57	68
3	25	2,1	2000	80	72	58,5	67,5
4	25	2,5	1100	80	75	56	71
5	25	2,5	1500	80	74	57	70
6	25	2,5	2000	80	74	59	69,5
7	25	2,1	1100	90	80	57,5	74
8	25	2,1	1500	90	80	59,5	74
9	25	2,1	2000	90	79	61	73
10	25	2,5	1100	90	82	58	76
11	25	2,5	1500	90	82	62	75
12	25	2,5	2000	90	81	63	74
13	35	2,1	1100	80	72	56	70
14	35	2,1	1500	80	71	57,5	69
15	35	2,1	2000	80	70	59,5	68
16	35	2,5	1100	80	74	57	71,5
17	35	2,5	1500	80	73	58,5	71
18	35	2,5	2000	80	73	60,5	70
19	35	2,1	1100	90	79	58,5	75,5
20	35	2,1	1500	90	79	62	75
21	35	2,1	2000	90	78	64	74
22	35	2,5	1100	90	81	59,5	77
23	35	2,5	1500	90	80	63	76
24	35	2,5	2000	90	79	65	75

4.2) ANÁLISE DO MODELO

Primeiramente serão apresentados e discutidos os resultados da solução numérica do modelo fluidodinâmico em estudo através de uma análise qualitativa dos perfis obtidos. Em seguida, apresentam-se os resultados obtidos da solução do modelo térmico comparando os dados obtidos via simulação com os resultados experimentais.

4.2.1) Fluidodinâmica

Através da resolução numérica do modelo fluidodinâmico foram obtidos os perfis axiais da porosidade no leito, da pressão total, da velocidade dos sólidos e os perfis de distribuição de gás no leito.

Os principais parâmetros envolvidos na resolução do modelo foram: o coeficiente de arraste fluido-partícula, o fator de atrito partícula-parede, o fator de atrito gás-parede, a distribuição da vazão de gás jorro-ânulo e a taxa de recirculação dos sólidos. Os três primeiros parâmetros foram obtidos através de correlações da literatura. Já os dois últimos foram estimados através das correlações ajustadas a partir dos dados experimentais de Freitas (1996), para o mesmo leito em estudo.

Para a estimativa do coeficiente de arraste fluido-partícula várias correlações foram desenvolvidas considerando diferentes situações, como o caso de uma esfera isolada em um fluido estagnado. Dentre essas correlações, podemos citar uma desenvolvida por Coelho e Massarani (1996) que foi escolhida para

nosso estudo por ser uma correlação mais recente e válida para uma ampla faixa do número de Reynolds.

Vazão mássica dos sólidos:

No modelo em estudo, a taxa de entrada de sólidos no jorro provenientes do ânulo foi considerada uniforme ao longo do trecho situado entre a entrada do leito e a extremidade do tubo interno. Assim, obteve-se uma variação linear da vazão de sólidos no ânulo em função da taxa de recirculação das partículas. Este parâmetro foi estimado através de uma correlação empírica obtida por Freitas (1996) pelo ajuste de seus dados experimentais para o mesmo leito em estudo. A equação resultante é função da vazão de entrada do ar e dos sólidos e da altura do leito, sendo válida para as condições estudadas nesse trabalho. Freitas (1996) observou que, com uso das equações de Thorley et al. (1959) e Clafin e Fane (1984) as previsões do modelo fluidodinâmico foram ruins. Já o uso da correlação ajustada aos seus dados experimentais apresentou melhores resultados na simulação do modelo, o que justifica o uso desta correlação em nosso estudo. Fisicamente, espera-se que o aumento da vazão de entrada do ar provoque um aumento na taxa de circulação de partículas. Uma maior quantidade de partículas arrastadas faz aumentar a taxa de circulação das mesmas. Da mesma forma, um aumento da altura do leito, aumenta a carga do leito, fazendo aumentar, também, a mesma taxa de circulação das partículas.

As Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 apresentam os perfis axiais obtidos para a vazão de sólidos no leito em diferentes condições. Nota-se que na região de

recirculação a vazão de sólidos no jorro aumentou devido à contribuição da vazão de sólidos advindos da região anular, sendo esta variação linear de acordo com o modelo apresentado. Esses perfis mostram coerência no balanço de massa dos sólidos no leito operando continuamente em regime. A vazão de entrada dos sólidos foi igual à vazão de saída no leito.

As Figuras 4.1 e 4.2 mostram a comparação entre os perfis de vazão mássica dos sólidos quando variou-se a vazão de entrada do ar. Conforme pode ser observado para uma mesma condição, o aumento da vazão de gás ocasionou um aumento na vazão de sólidos na região de recirculação. Este resultado foi esperado devido ao aumento na taxa de recirculação das partículas com a vazão de gás, o que foi observado no trabalho de Freitas (1996). Este resultado também está de acordo com outros trabalhos como os de Thorley et al. (1959), para leitos convencionais, Clafin e Fane (1984), Yang e Keairns (1983) e Silva e Freire (1989), para leitos com tubo interno. Berruti et al. (1988) estudaram a influência da velocidade do gás na taxa de circulação dos sólidos para diferentes posições do tubo “draft” acima da entrada do leito. Esses autores também observaram em todos os casos, um aumento da taxa de circulação com o aumento da velocidade do fluido. Porém, maiores taxas de recirculação foram observadas para maiores distâncias entre o tubo interno e a entrada do leito. Tais situações não foram consideradas em nosso estudo.

As Figuras 4.1 e 4.3 mostram os perfis obtidos da vazão de sólidos para as duas alturas de leito estudadas. Observa-se que, para maior altura de leito, a taxa de entrada das partículas na região de jorro foi maior, o que já era esperado de

acordo como os dados experimentais de Freitas (1996). Este efeito também foi observado nos trabalhos citados anteriormente.

O efeito da vazão de alimentação dos sólidos pode ser observado comparando os perfis das Figuras 4.2 e 4.4. Nota-se que com o aumento da vazão de alimentação diminui-se a taxa de recirculação dos sólidos advindos do ânulo. Esse efeito pode ser atribuído à resistência adicional ao fluxo cruzado ânulo-jorro devido às colisões das partículas da alimentação com a interface jorro-ânulo. Apesar disso, esse efeito foi pouco pronunciado em relação às outras variáveis analisadas anteriormente. Freitas (1996) observou através da análise de variância que 90% da variação da taxa de recirculação foi explicada somente pelo efeito da vazão de ar.

Vazão mássica do gás:

No modelo a variação da vazão de ar no leito foi considerada linear ao longo do trecho da região de recirculação. Essa variação foi obtida em função da distribuição da vazão de gás jorro-ânulo. Para a determinação deste parâmetro foi utilizada uma correlação empírica resultante do ajuste dos dados experimentais de Freitas (1996). Essa correlação determina a fração percentual do gás de entrada que foi desviada para o ânulo em função das variáveis que mostraram maior influência sobre a mesma: vazão de entrada do ar e altura do leito. A escolha por essa correlação é justificada, pois esta foi desenvolvida para o mesmo leito em estudo e é válida para as condições experimentais deste trabalho. Além disso, Freitas (1996) obteve melhores previsões da velocidade do ar no jorro com o uso

desta correlação, em relação a outras advindas de outras referências que normalmente subestimaram a vazão desviada para o ânulo.

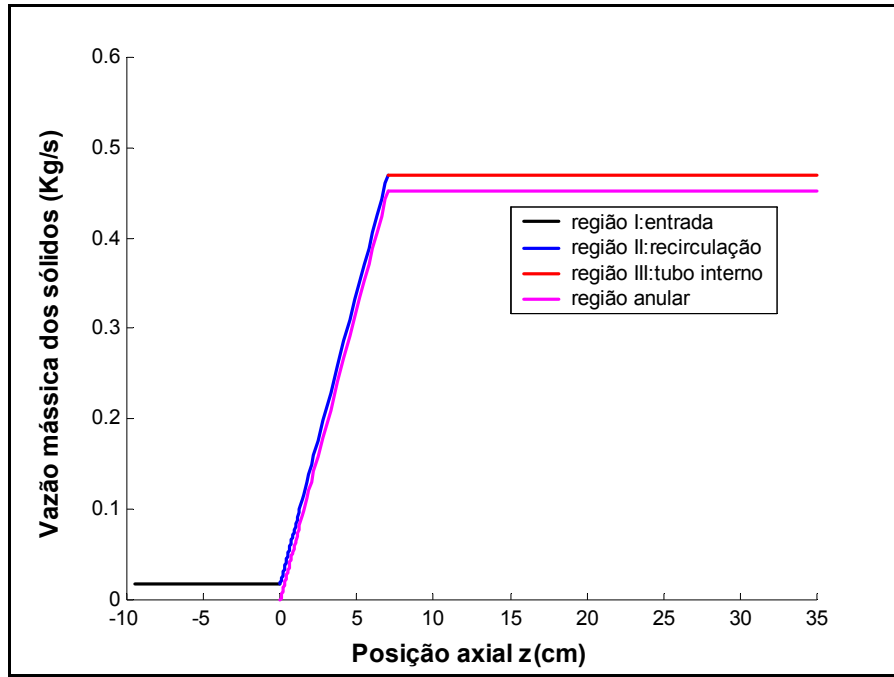


Figura 4.1- Vazão mássica axial dos sólidos no leito em função da coordenada z ($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{ m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g}/\text{min}$).

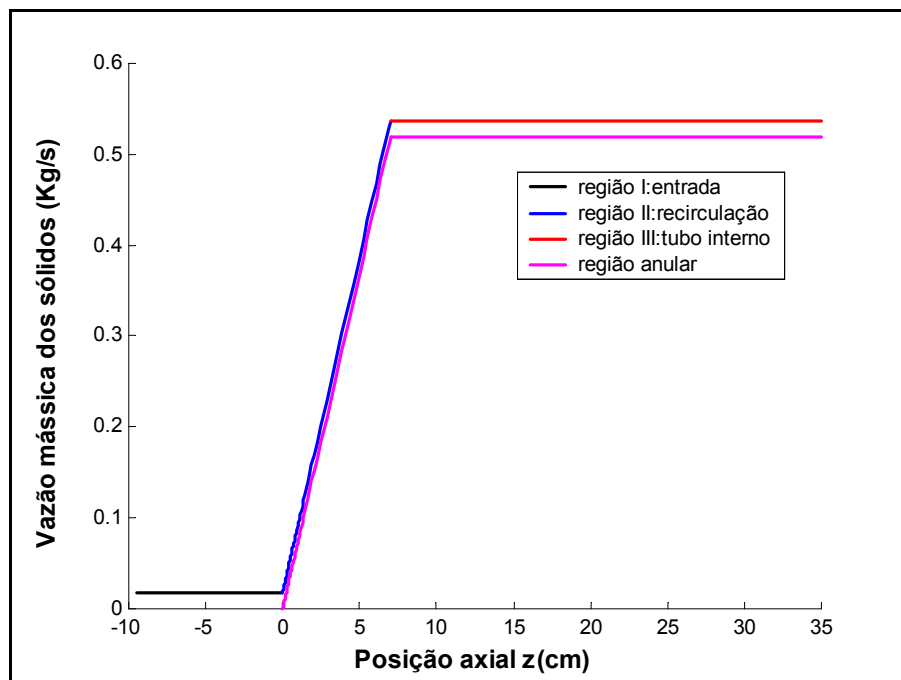


Figura 4.2- Vazão mássica axial dos sólidos no leito em função da coordenada z ($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,5\text{ m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g}/\text{min}$).

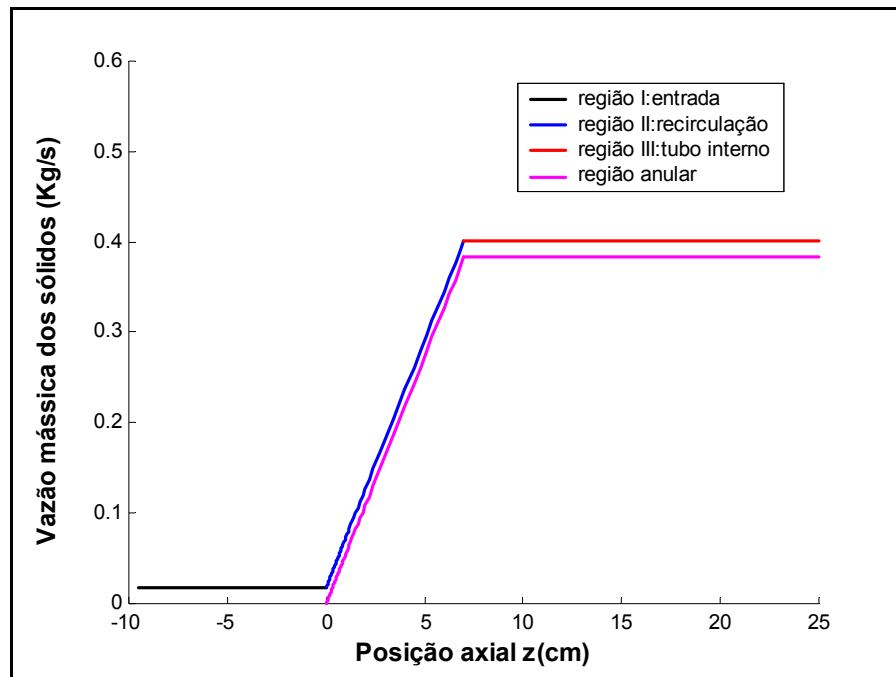


Figura 4.3- Vazão mássica axial dos sólidos no leito em função da coordenada z ($H_o=25\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{ m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g/min}$).

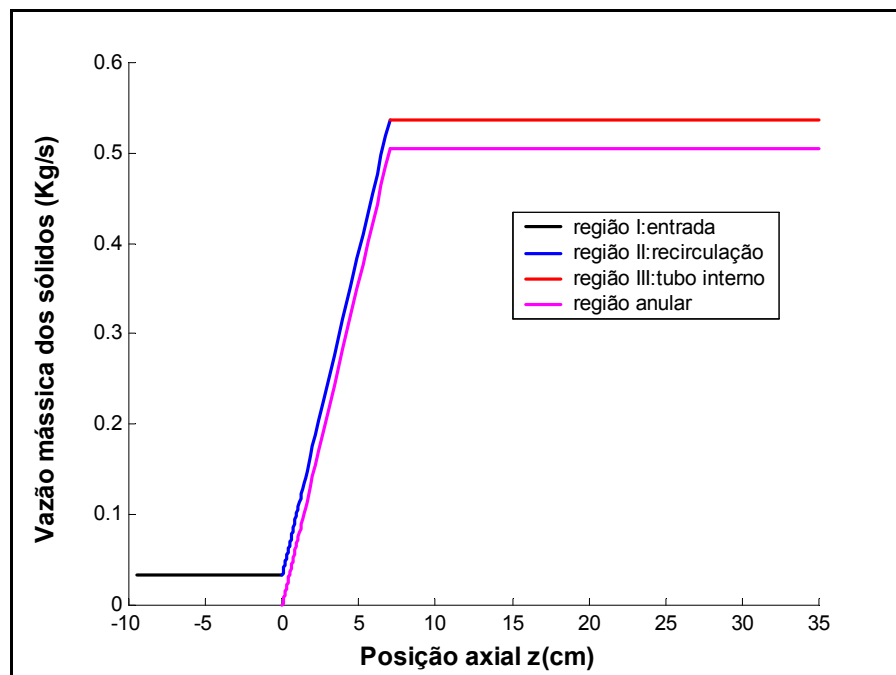


Figura 4.4- Vazão mássica axial dos sólidos no leito em função da coordenada z ($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,5\text{ m}^3/\text{min}$ e $W_e=2000\text{ g/min}$).

As Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam os perfis axiais obtidos da vazão mássica de gás no leito em diferentes condições de estudo. Pode-se observar que em todos os perfis o balanço de massa do gás no leito é respeitado. A vazão de gás na saída da região do tubo interno é igual à vazão de gás de entrada descontada a vazão desviada para a região anular. Nota-se que a fração percentual da vazão de gás desviada para o ânulo foi de aproximadamente 40 % , o que também foi observado a partir dos dados experimentais de Freitas (1996). Este resultado também está de acordo com os trabalhos de Clafin e Fane (1983), Khoe e Van Brackel (1983) e Charbel et al. (1998) para leitos de jorro com tubo interno.

As Figuras 4.5 e 4.6 mostram os perfis obtidos para as duas alturas de leito estudadas. Com o aumento da altura do leito observou-se um aumento na vazão de ar desviada para o ânulo. Este resultado pode ser explicado pelo aumento da taxa de recirculação das partículas que ocasiona uma maior resistência à passagem de ar na região de jorro para o ânulo. O mesmo efeito foi observado através das Figuras 4.5 e 4.7 que mostram uma maior fração da vazão de ar desviada para o ânulo quanto maior for a vazão de entrada do gás. A variação da vazão de alimentação dos sólidos não afetou os perfis de distribuição de gás no leito, o que pode ser explicado pela pequena variação da taxa de recirculação dos sólidos com esta variável. Em ambas situações, entretanto, o aumento verificado da vazão de ar para o ânulo foi bem pequeno.

Velocidade dos sólidos:

As Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 apresentam os perfis obtidos a para velocidade dos sólidos em diferentes condições operacionais. Em todos os perfis, observa-se que, na região de entrada, as partículas são aceleradas atingindo um valor máximo da velocidade até a entrada do leito. Uma alta desaceleração neste trecho é esperada, pois a velocidade de escorregamento dos sólidos (relativa ao gás) ainda é bem maior que a sua velocidade terminal. No jorro a partícula está acelerada em relação ao leito e em desaceleração em relação ao gás. Esse comportamento foi observado por Freitas (1996) que também considerou em sua análise a região de alimentação das partículas no desenvolvimento do modelo.

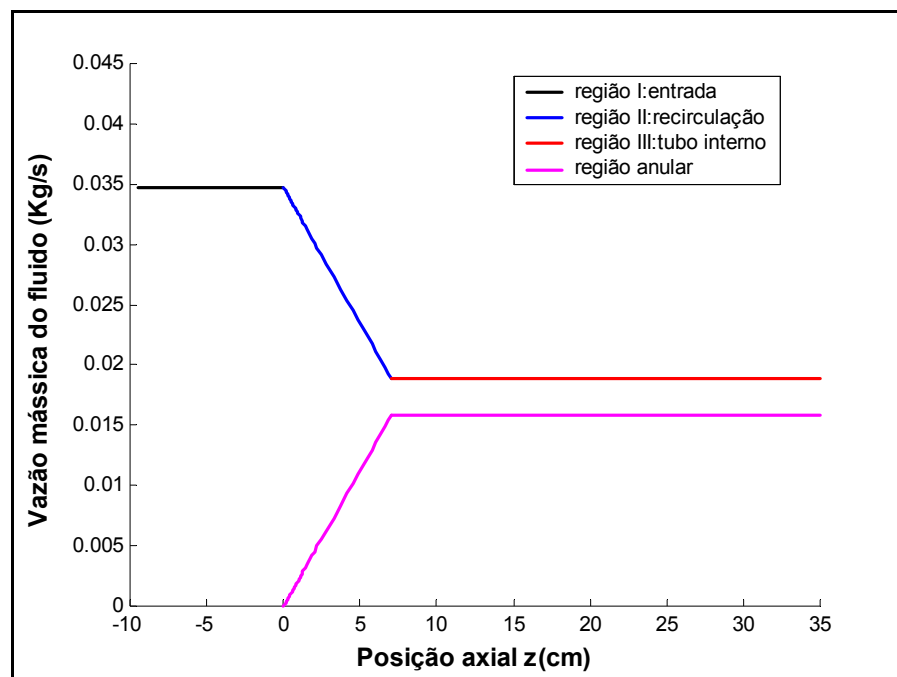


Figura 4.5- Vazão mássica axial do fluido no leito em função da coordenada z ($H_0=35\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{g}/\text{min}$).

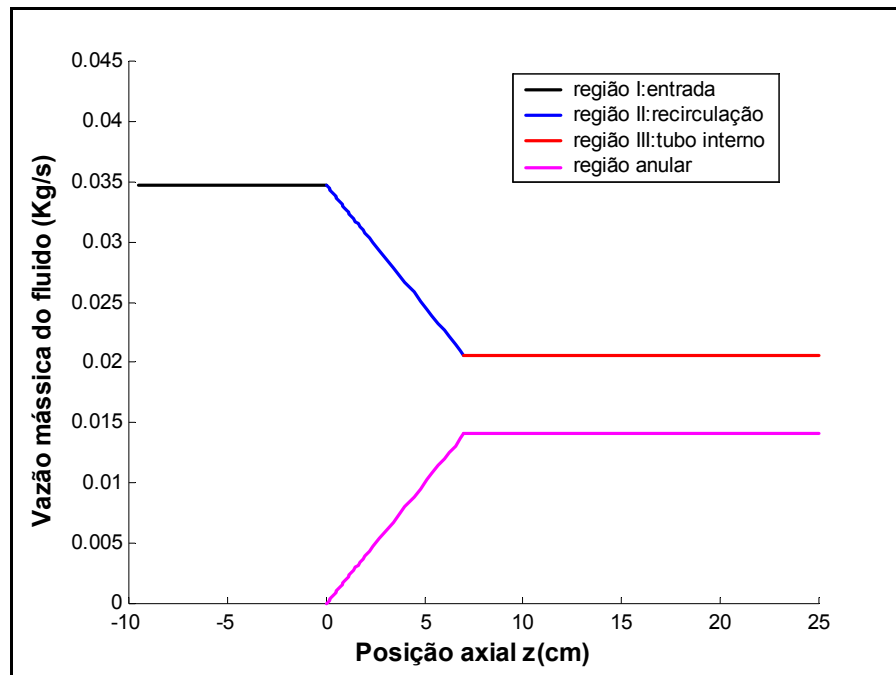


Figura 4.6- Vazão mássica axial do fluido no leito em função da coordenada z ($H_o=25\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{g}/\text{min}$).

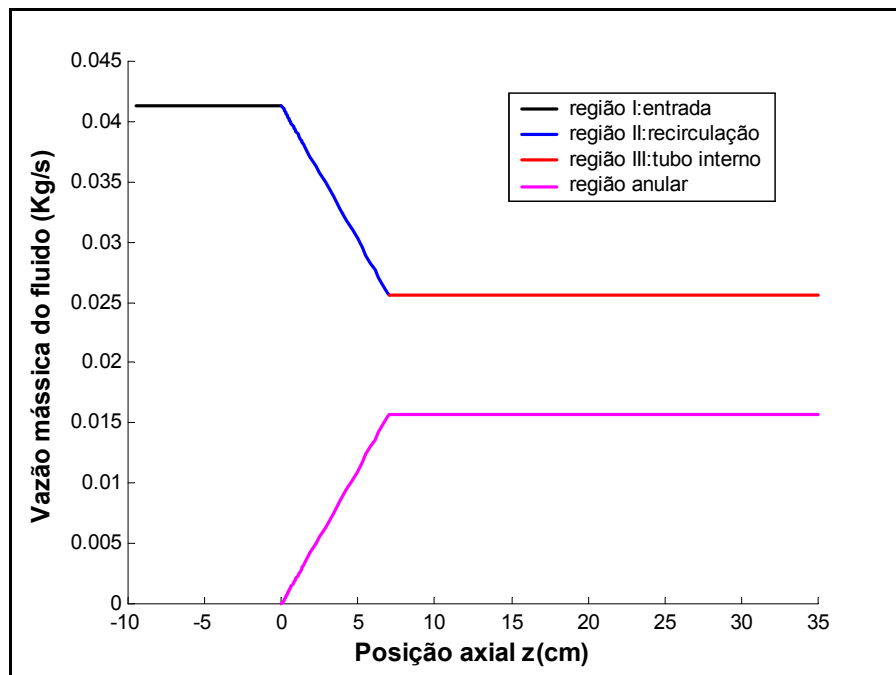


Figura 4.7- Vazão mássica axial do fluido no leito em função da coordenada z ($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,5\text{m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{g}/\text{min}$).

Na região de recirculação, a velocidade diminui sensivelmente devido à contribuição dos sólidos advindos da região anular sobre a velocidade média observada no jorro. Esse resultado também foi observado nos trabalhos de Stocker et al. (1990) e Freitas (1996). Já na região do tubo interno era esperado um novo aumento da velocidade. Mas de modo geral, observou-se uma suave desaceleração das partículas. Djeridane et al. (1998) observaram, através dos perfis axiais obtidos experimentalmente para um leito convencional, um aumento da velocidade de forma linear no trecho correspondente à parte cônica do leito. A partir desse trecho foi notada uma desaceleração progressiva das partículas na parte cilíndrica do mesmo.

As Figuras 4.8 e 4.9 mostram os perfis obtidos para as vazões de entrada do gás estudadas. As velocidades dos sólidos foram maiores quanto maior for a maior vazão de ar, pois é maior o arraste entre os sólidos e o gás. Este resultado está coerente com os trabalhos de He et al. (1994), Freitas (1996) e Djeridane et al. (1998).

O efeito da vazão de alimentação dos sólidos pode ser observado nas Figuras 4.8 e 4.10. Nota-se que os perfis na região de entrada e na região de recirculação foram muito semelhantes. Apenas na região de tubo interno a velocidade das partículas foi maior para a condição de maior vazão de alimentação. Este resultado pode ser explicado pela maior quantidade de partículas aceleradas desde a seção de alimentação, influenciando a velocidade média. Já nas Figuras 4.9 e 4.11 não foi notado esse efeito da vazão de alimentação dos sólidos sobre a velocidade dos mesmos, já que é maior a vazão de entrada do gás.

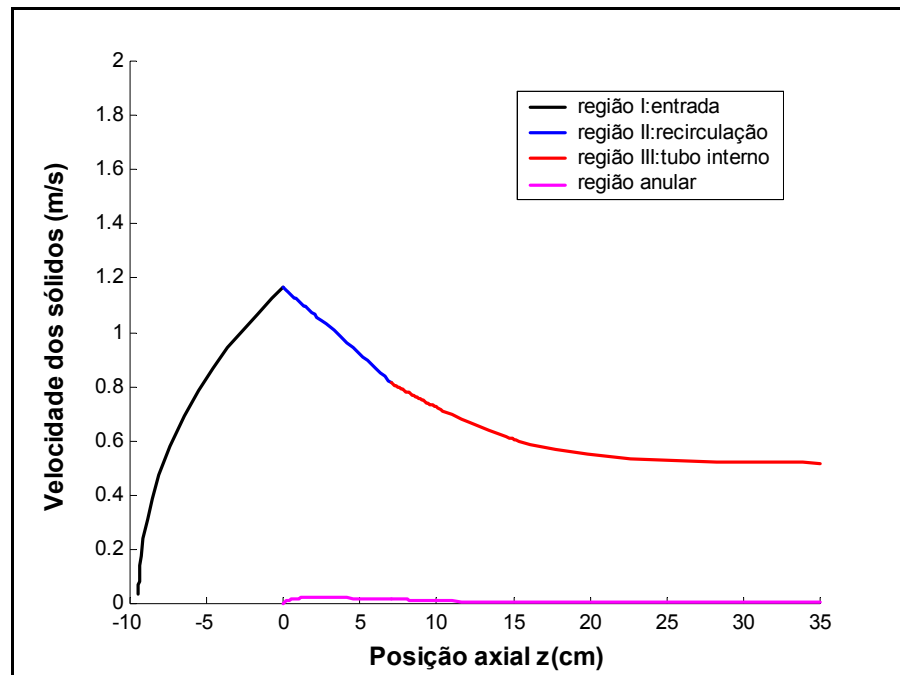


Figura 4.8- Velocidade axial dos sólidos no leito em função da coordenada z ($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{ m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g/min}$).

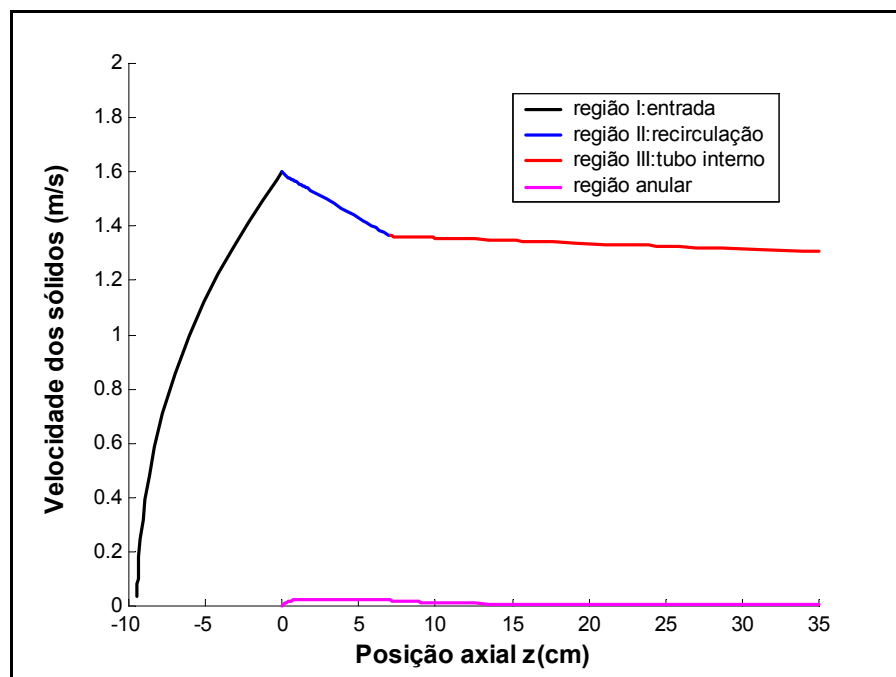


Figura 4.9- Velocidade axial dos sólidos no leito em função da coordenada z ($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,5\text{ m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g/min}$).

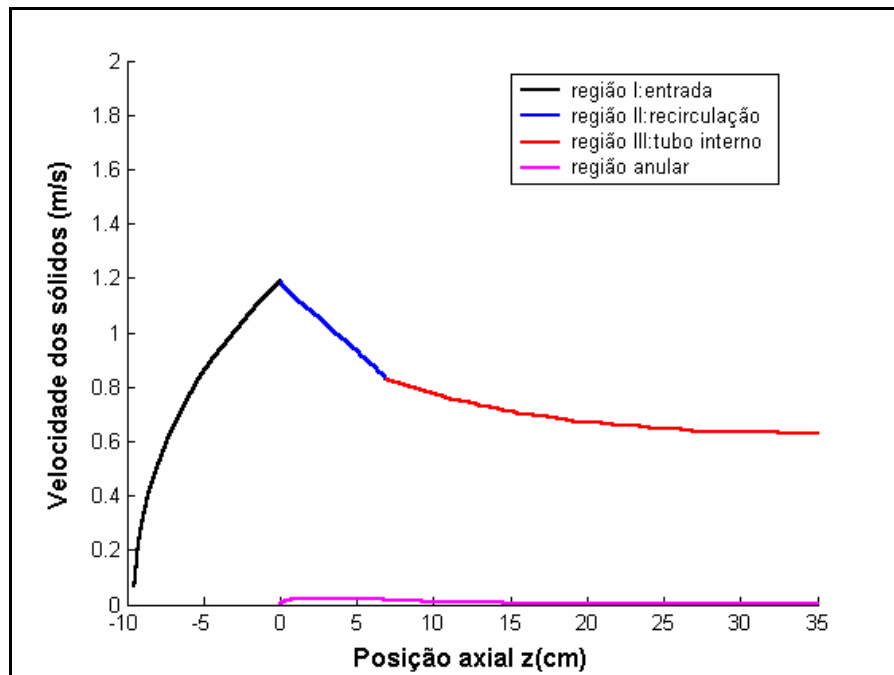


Figura 4.10- Velocidade axial dos sólidos no leito em função da coordenada z ($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,1 \text{ m}^3/\text{min}$ e $We=2000 \text{ g/min}$).

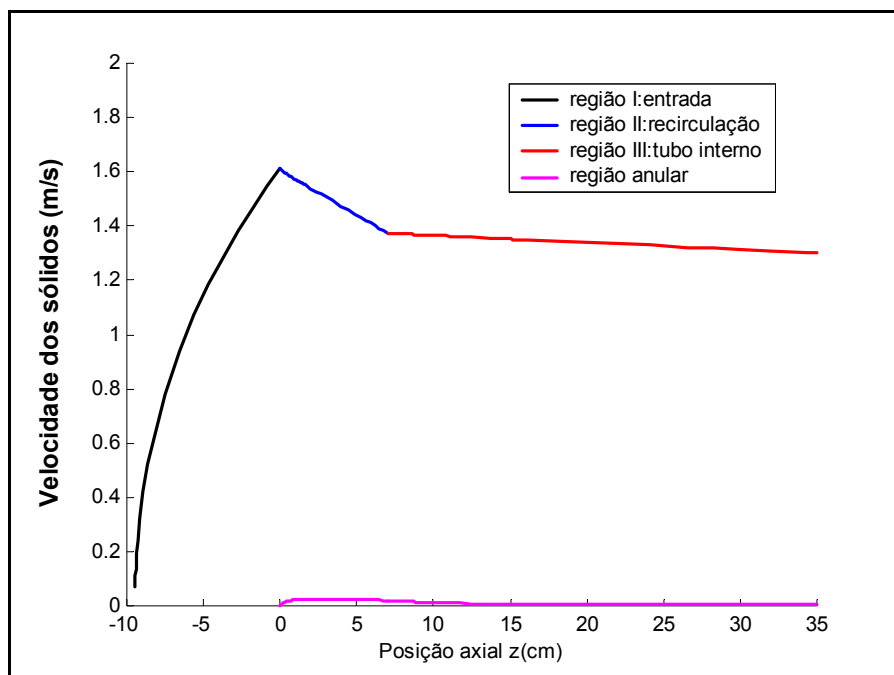


Figura 4.11- Velocidade axial dos sólidos no leito em função da coordenada z ($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,5 \text{ m}^3/\text{min}$ e $We=2000 \text{ g/min}$).

Freitas (1996), através da técnica de filmagem das partículas no jorro em meio leito, determinou a velocidade média no trecho correspondente ao tubo interno em cada condição estudada. Ele observou que os valores previstos pelo modelo, em todas as condições avaliadas, foram bem inferiores aos obtidos experimentalmente, relacionando esse efeito à má previsão do coeficiente de arraste fluido-partícula.

Neste trabalho, observou-se que os valores preditos na região do tubo interno foram inferiores aos valores médios experimentais obtidos por Freitas (1996). Mas para a condição de maior vazão de entrada do ar, os valores estiveram bem próximos, o que pode ser observado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2- Valores experimentais da velocidade dos sólidos no jorro obtidos da literatura e valores preditos neste trabalho.

Q_e (m ³ /min)	W_e (g/min)	V_j (m/s)	V_j (m/s)
		Freitas (1996)	Este trabalho
2,1	1100	1,2	0,6-0,8
	2000	1,4	0,7-0,8
2,5	1100	1,5	~1,4
	2000	1,7	~1,4

Djeridane et al. (1998) utilizando uma técnica moderna de rastreamento de partícula por radiação, obtiveram, experimentalmente, os perfis axiais das velocidades médias das partículas no jorro para um leito convencional. Os valores preditos neste trabalho para velocidade máxima das partículas no jorro estão próximos dos valores experimentais obtidos por esses autores, o que pode ser observado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3- Valores experimentais da velocidade máxima dos sólidos no jorro obtidos da literatura e valores preditos neste trabalho.

Referência	Material	d_p (mm)	d_c (m)	d_o (m)	H_o (m)	U/U_{mj}	V_{jmax} (m/s)
Djeridane et al. (1998)	Vidro	3,0	0,152	0,019	0,2 -0,27	1,01-1,12	1,3-2,2
Este trabalho	Vidro	2,6	0,2	0,05	0,25-0,35	1,1-1,3	1,2-1,6

A velocidade das partículas na região anular apresenta valores bem baixos, da ordem de 1cm/s, o que está de acordo com os dados experimentais obtidos por Freitas (1996) e com outros trabalhos da literatura citados na Tabela 4.4.

Nota-se de maneira geral nos perfis obtidos, que a velocidade dos sólidos no ânulo aumenta no trecho entre a entrada do leito e o tubo interno, pois prevalece o efeito da taxa de recirculação. Após esse trecho, a velocidade diminui com o aumento da área da seção de escoamento na parte cônica, permanecendo constante na região cilíndrica do leito.

Tabela 4.4- Dados de velocidade das partículas no ânulo encontrados na literatura.

Referência	Partículas			Ho (m)	d _c (m)	d _o (m)	d _t (m)	L _e (m)	Q _c (m ³ /min)	V _a (cm/s)
	Material	d _p (mm)	ρ (g/m ³)							
Clafin e Fane (1983)	Trigo	3,5	1,3	0,4-0,8	0,3	0,05	0,058	0,05-0,2	2,4-4,2	0,5-1,7
Khoe e Van Brackel (1983)	Arroz		1,2	0,6	0,3	0,05	0,027	0,05-0,2	2,4-3,6	0,42-1,39
Yang e Keairns (1983)	Polietileno	2,8	0,907		0,28	0,042	0,095	0,14-0,22	1,0-3,2	0,8-3,3
	Epóxi	2,8	0,21							
Silva e Freire (1989)	Vidro	1,8	2,5	0,15-0,3	0,14	0,046	0,05	0,025-0,12	0,49-2,0	0,2-5,8
	Vidro	3,1	2,5							
	Poliestireno	2,7	1,07							
	Polipropileno	3,6	0,92							
	Soja	6,2	1,19							

Porosidade no leito

Os perfis obtidos da porosidade no jorro em diferentes condições operacionais estão representados nas Figuras 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15. De maneira geral, os perfis apresentaram um comportamento semelhante. Na região de entrada, a porosidade sofreu um aumento desde a seção de alimentação das partículas até a entrada do leito, devido à alta aceleração das partículas nesta região. Na região de recirculação, a porosidade diminuiu sensivelmente devido à contribuição da vazão de sólidos oriundos da região anular para o aumento da concentração de sólidos nesta região. Já na região do tubo interno, o perfil da porosidade se manteve praticamente constante, o que já era esperado devido aos perfis apresentados das velocidades dos sólidos nesta região. A porosidade da região anular foi considerada constante em todas as condições estudadas. Esta foi obtida experimentalmente por Freitas (1996) como sendo a porosidade do leito em repouso.

As Figuras 4.12 e 4.13 mostram o efeito da vazão de entrada do ar nos perfis obtidos da porosidade, para a mesma altura de leito e vazão de alimentação de partículas. Observou-se que para maior vazão de ar, as porosidades nas regiões de recirculação e do tubo interno foram maiores. De acordo com o modelo, esse resultado é o esperado devido às maiores velocidades dos sólidos observadas nestas regiões em consequência da maior vazão de gás. A região de alimentação não apresentou diferenças nos perfis obtidos da porosidade. Os valores apresentados foram altos, o que corresponde às porosidades encontradas em transportadores pneumáticos.

O efeito da vazão de alimentação dos sólidos foi praticamente imperceptível como pode ser observado nas Figuras 4.12 e 4.14. Esse resultado é explicado pela pequena variação da taxa de recirculação e da velocidade das partículas com o aumento da vazão de alimentação de sólidos. Apenas na região do tubo interno, as porosidades foram ligeiramente maiores para maior vazão de alimentação estudada.

As Figuras 4.14 e 4.15 mostram os perfis obtidos para diferentes alturas de leito na mesma condição de vazão de alimentação dos sólidos e do gás. Na região de entrada, as porosidades obtidas foram muito próximas. Apenas na região de recirculação e do tubo interno, estas apresentaram maiores valores para menor altura de leito. Este resultado pode ser explicado pela menor recirculação das partículas para menor altura de leito, o que foi constatado experimentalmente por Freitas (1996).

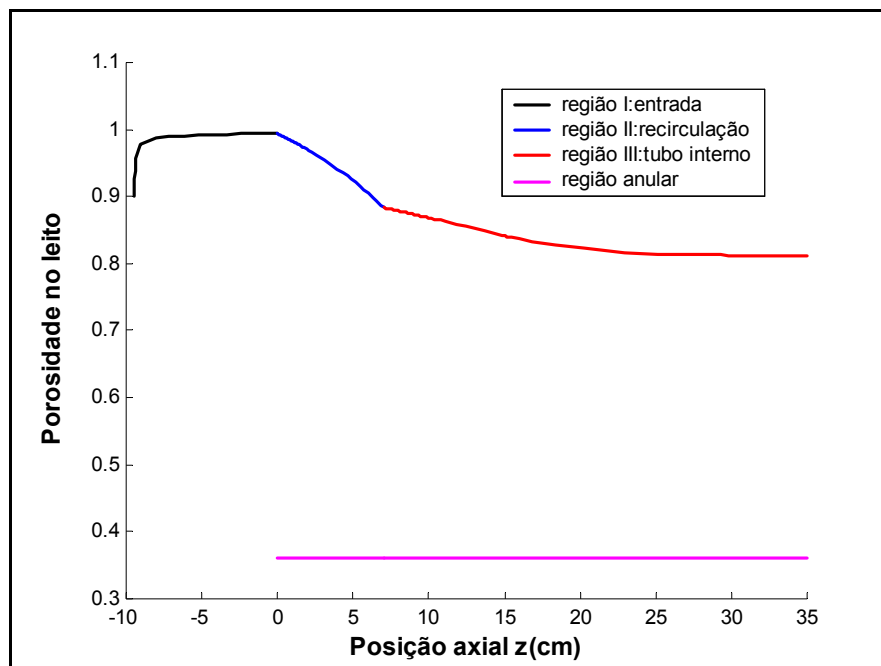


Figura 4.12- Porosidade axial no leito em função da coordenada z ($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{ m}^3/\text{min}$ e $W_e=2000\text{ g/min}$).

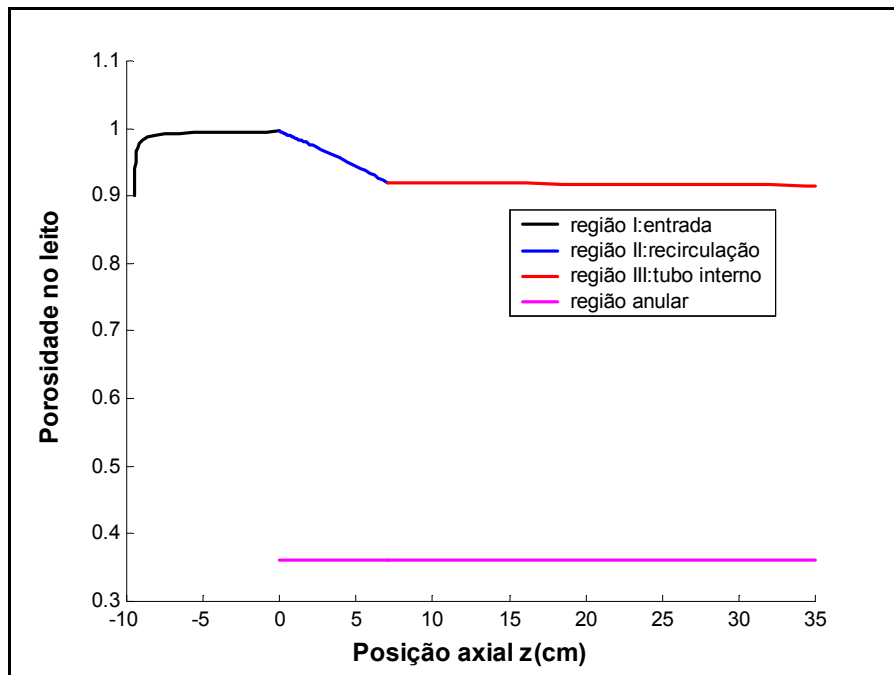


Figura 4.13- Porosidade axial no leito em função da coordenada z ($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,5\text{ m}^3/\text{min}$ e $W_e=2000\text{ g}/\text{min}$).

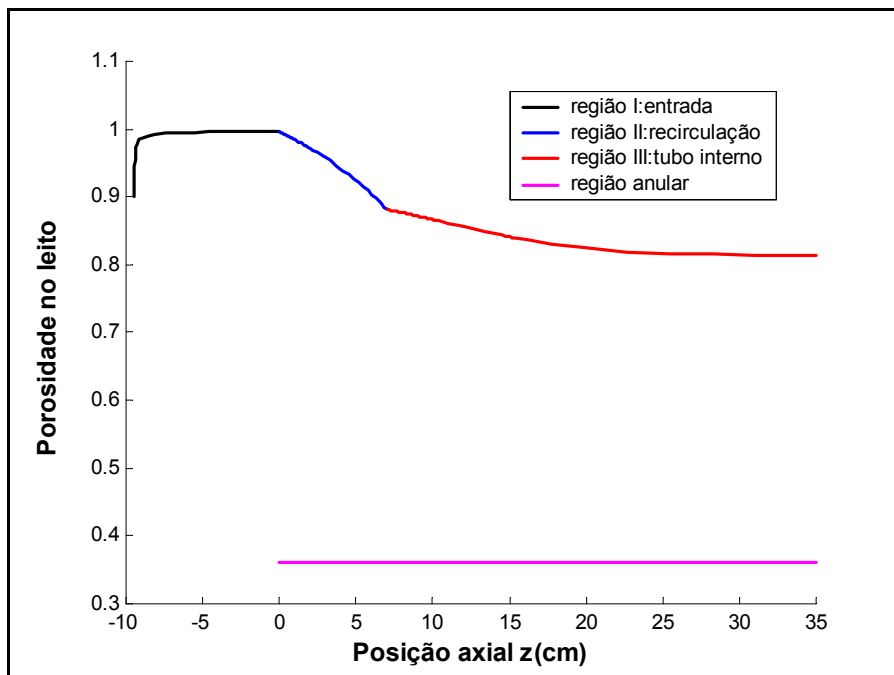


Figura 4.14- Porosidade axial no leito em função da coordenada z ($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{ m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g}/\text{min}$).

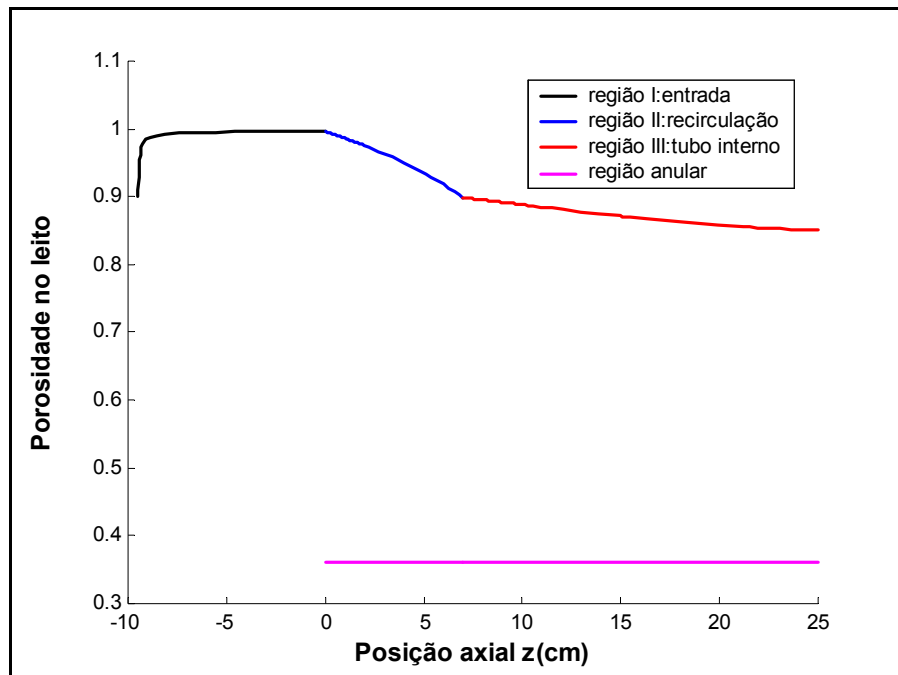


Figura 4.15- Porosidade axial no leito em função da coordenada z ($H_o=25\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{ m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g}/\text{min}$).

Velocidade do fluido

Os perfis obtidos da velocidade do fluido no leito estão apresentados nas Figuras 4.16, 4.17 e 4.18 em diferentes condições operacionais. Esses perfis mostram que a velocidade do ar no jorro sofre uma queda significativa no trecho entre a entrada do leito e o início do tubo interno, onde ocorre a dispersão do ar para o ânulo. Além disso, a velocidade do fluido sofreu uma pequena queda no início da região de entrada devido ao efeito da alimentação dos sólidos, mantendo-se constante ao longo desse trecho.

As Figuras 4.16 e 4.17 fazem uma comparação dos perfis obtidos através da variação da vazão de entrada do ar. Pode-se notar, que a velocidade do gás no

orro sofre maior queda na região de recirculação sob efeito da maior vazão. Através da comparação das Figuras 4.17 e 4.18 observou, também, maior redução na velocidade do gás para maior altura de leito. Estes resultados estão de acordo com as observações experimentais de Freitas (1996), que constatou que para maiores vazões e alturas de leito ocorreram maiores dispersões do gás para o ânulo.

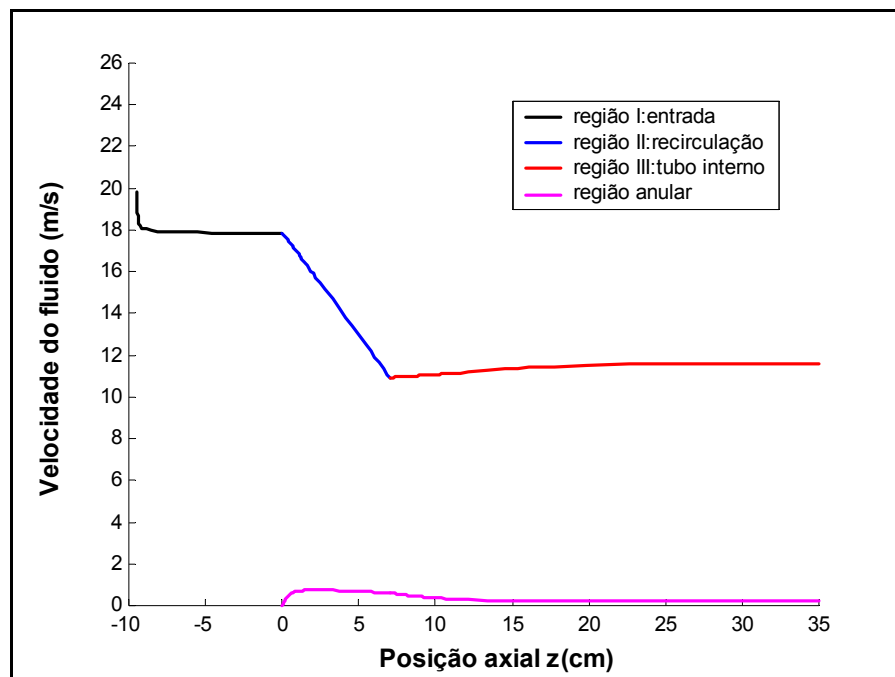


Figura 4.16- Velocidade axial do fluido no leito em função da coordenada z ($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{ m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g/min}$).

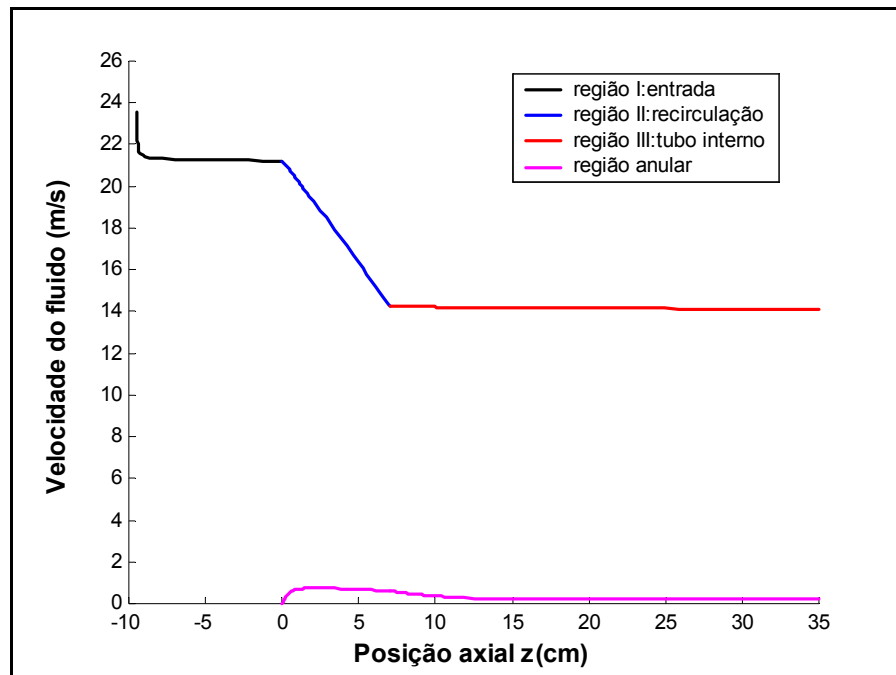


Figura 4.17- Velocidade axial do fluido no leito em função da coordenada z ($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,5\text{ m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g/min}$).

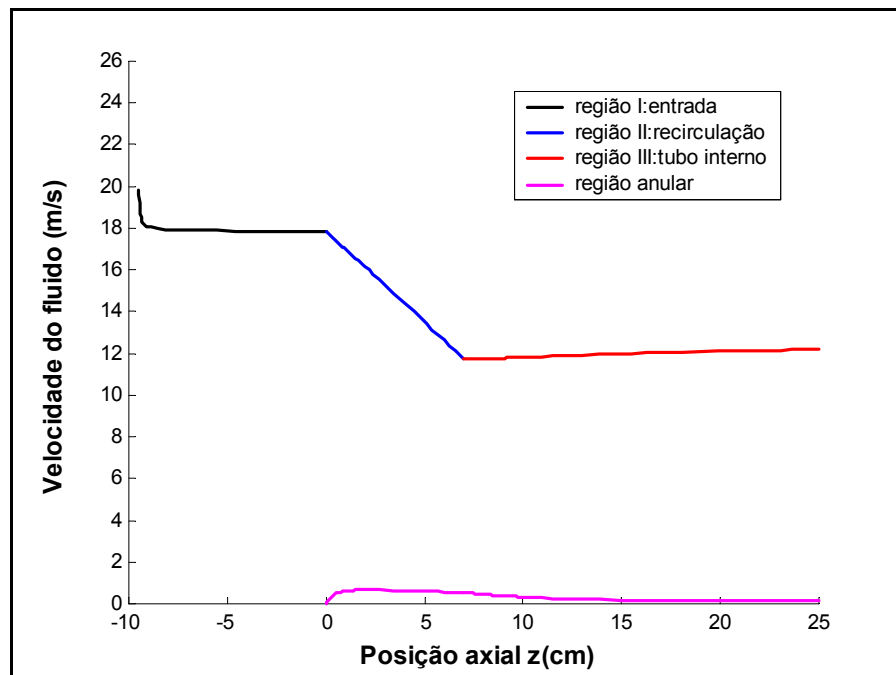


Figura 4.18- Velocidade axial do fluido no leito em função da coordenada z ($H_o=25\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{ m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g/min}$).

A redução da velocidade do fluido na região de recirculação foi de aproximadamente 40%, valor em acordo com as previsões do modelo para fração mássica de ar desviada para o ânulo. Além disso, observou-se que os valores previstos pelo modelo se aproximaram dos valores obtidos experimentalmente por Freitas (1996) no interior do tubo interno, conforme está apresentado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5- Valores experimentais da velocidade do fluido obtidos por Freitas (1996) e os valores preditos neste trabalho.

Q_e (m ³ /min)	W_e (g/min)	U_j (m/s) Freitas (1996)	U_j (m/s) Este trabalho
2,1	1100	12	11-12
	2000	11,5	11-11,5
2,5	1100	14	~14
	2000	14	~14

Nos perfis obtidos, nota-se que a velocidade do fluido na região anular aumenta no trecho referente à região de recirculação devido a maior influência no modelo da vazão de gás desviada para o ânulo. A partir desse trecho, a velocidade diminui com o aumento da área de escoamento na parte cônica do leito, mantendo-se constante na parte cilíndrica do mesmo. Estas previsões estão de acordo com os resultados experimentais obtidos por Freitas (1996), apresentando valores bem próximos na faixa de 0,5 a 1,0 m/s.

Pressão total no leito

Alguns exemplos dos perfis obtidos da variação axial da pressão estática ao longo do leito estão apresentados nas Figuras 4.19, 4.20 e 4.21. Através de uma análise qualitativa, observou-se um aumento da pressão na região de recirculação, devido ao desvio do ar de jorro para o ânulo e a conseqüente redução na velocidade média do gás no jorro. Já na região do tubo interno ocorreu uma queda de pressão, fato que pode estar relacionado com os efeitos de entrada no tubo. Contudo, através de uma análise dos valores numéricos da pressão total, nota-se que a mesma manteve-se praticamente constante ao longo do jorro, o que é observado em sistemas de transporte pneumático. Esse resultado também foi observado por Freitas (1996) através de seus dados experimentais, apesar de não terem sido realizadas medidas confiáveis de pressão estática na região de recirculação, devido aos efeitos de entrada no leito e no próprio tubo interno. Nesses perfis, observou-se que o aumento da altura do leito ocasionou um aumento da pressão no jorro, função de uma maior resistência oferecida ao fluxo de gás nessa região.

A pressão na região anular manteve-se praticamente constante, mas em patamares diferentes, independente do aumento na vazão de fluido. Isto significa que o excesso de fluido alimentado no leito (acima da condição de jorro mínimo) escoava preferencialmente na região de jorro (Mathur e Epstein, 1974).

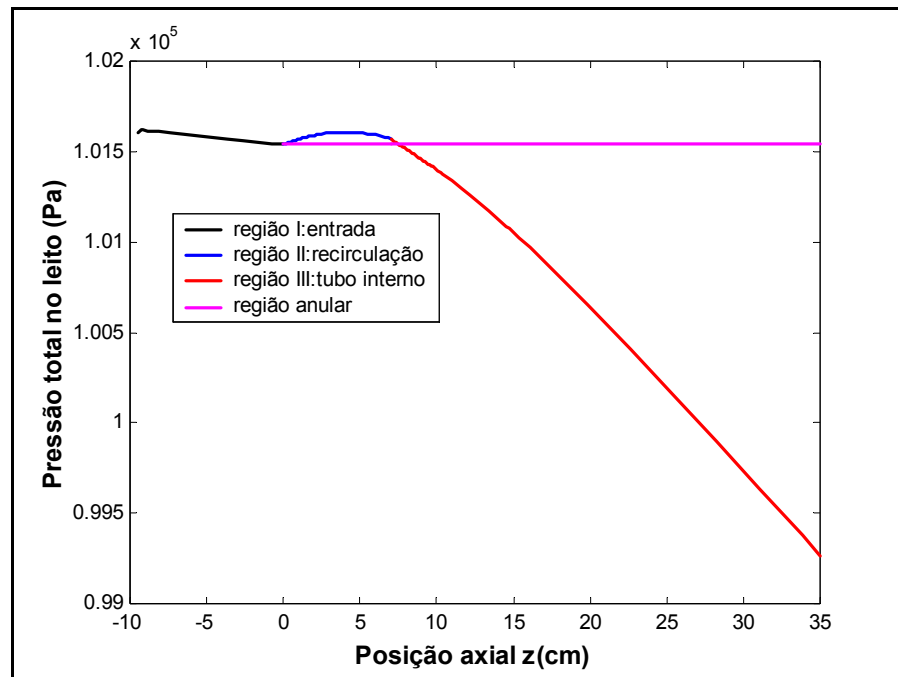


Figura 4.19- Pressão axial no leito em função da coordenada z ($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{ m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g/min}$).

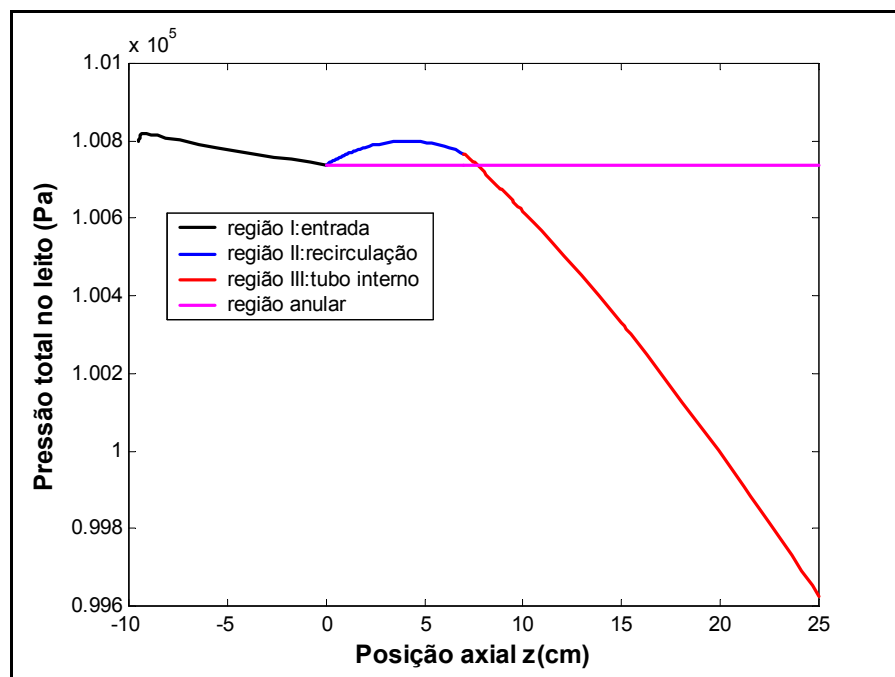


Figura 4.20- Pressão axial no leito em função da coordenada z ($H_o=25\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{ m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g/min}$).

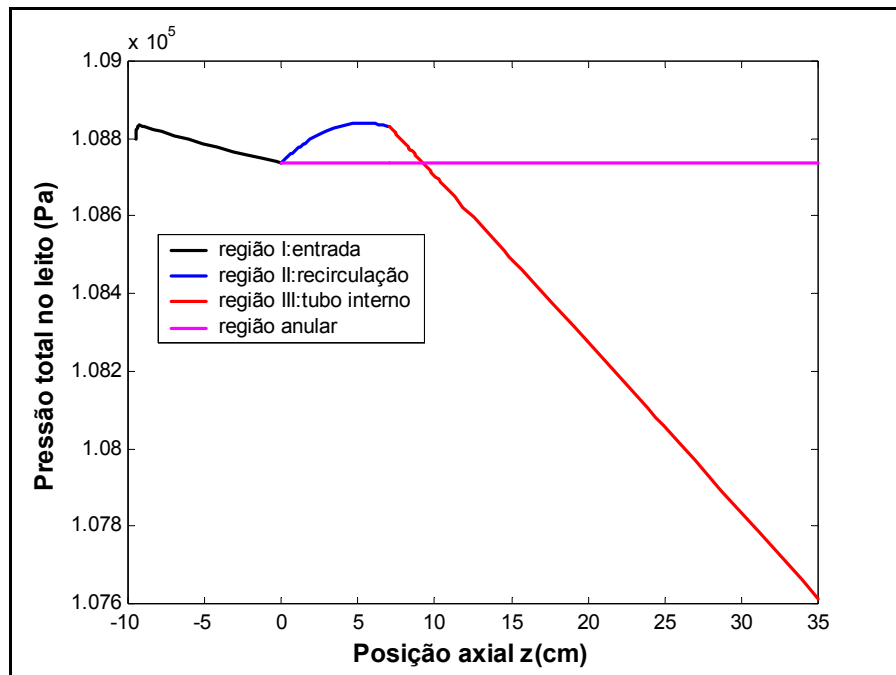


Figura 4.21- Pressão axial no leito em função da coordenada z ($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,5\text{ m}^3/\text{min}$ e $W_e=1100\text{ g}/\text{min}$).

4.2.2) Transferência de Calor

Neste item serão apresentados os perfis de temperatura para os sólidos e para o fluido nas regiões de jorro e anular. Os valores obtidos na simulação da temperatura dos sólidos e do fluido na saída do leito serão comparados com os dados obtidos experimentalmente. As condições iniciais para a resolução do modelo foram obtidas através de medidas experimentais como descrito no Capítulo 3.

Para efeito de comparação dos resultados, é necessário ressaltar que a temperatura dos sólidos obtida experimentalmente através dos drenos do leito, corresponde à temperatura de saída dos sólidos na região anular. Já a temperatura do gás obtida na saída do leito, corresponde à temperatura no jorro.

As Figuras 4.22, 4.23, 4.24, 4.25 e 4.26 mostram alguns exemplos dos perfis de temperatura dos sólidos no leito obtidos via simulação, em diferentes condições experimentais estudadas. Em todos perfis, foi observado um significativo aumento da temperatura das partículas na região de jorro situada abaixo do tubo interno. Esse resultado pode ser explicado pelas grandes diferenças de temperatura entre o gás e as partículas que são alimentadas a temperaturas bem inferiores que as do ar de entrada. Outro fator a ser ressaltado é a taxa de recirculação das partículas advindas do ânulo. Essas partículas entram no jorro a temperaturas bem superiores as das partículas que são constantemente alimentadas. Além disso, a vazão mássica de recirculação pode ser até 20 vezes maior que a vazão de alimentação das partículas, o que explicaria a maior troca de calor na região situada entre a entrada do leito e a extremidade do tubo “draft”. Já a temperatura dos sólidos na região anular manteve-se praticamente constante em todos os casos investigados. Este resultado está concordante com as observações experimentais de Freitas (1996) para o mesmo leito em estudo, e de outros autores como Silva e Freire (1989) e Freitas e Freire (1993).

Um aspecto importante verificado nestes perfis é a aproximação da temperatura dos sólidos do jorro e do ânulo no topo leito. Este resultado comprova que a condição imposta por Stocker et al. (1990) para solução do modelo foi satisfeita. Estes autores consideraram que, a condição de igualdade dessas temperaturas no topo do leito seria razoável para o caso em que as temperaturas dos sólidos e do gás de jorro fossem próximas no topo do leito e para altas taxas de recirculação de partículas.

Analisando as Figuras 4.22 e 4.23 pode-se notar o efeito da altura do leito para uma mesma condição de vazão de alimentação do ar e dos sólidos e temperatura de entrada do ar. Para maior altura do leito, as temperaturas preditas dos sólidos no topo foram maiores, o que também foi observado através dos dados experimentais deste trabalho, apresentados no início desse capítulo (Tabela 4.1). Esse resultado pode ser explicado, principalmente, pelo maior tempo de contato entre as fases, ocasionando desta forma uma maior troca térmica.

As Figuras 4.22 com 4.24 e 4.25 com 4.26 mostram os perfis de temperatura dos sólidos obtidos sob o efeito da variação da vazão de entrada do gás no leito. Maiores temperaturas no topo do leito foram preditas pelo modelo para maior vazão de ar na mesma condição de vazão de sólidos, altura do leito e temperatura do ar. Estas observações estão em concordância com os dados experimentais deste trabalho.

Comparações feitas entre os perfis das Figuras 4.22 e 4.25 e também entre os perfis das Figuras 4.24 e 4.26 comprovaram também o efeito da vazão de alimentação dos sólidos. Com o aumento da vazão de sólidos observou-se que as temperaturas dos sólidos no topo do leito foram reduzidas, o que também foi observado experimentalmente.

Os perfis obtidos da temperatura do gás no leito em diferentes condições experimentais investigadas são mostrados nas Figuras 4.27, 4.28, 4.29, 4.30, 4.31, 4.32 e 4.33. De forma geral, observou-se que a temperatura do ar decresce significativamente com a posição axial no jorro. A queda de temperatura passa a ser menos significativa no final do trecho correspondente ao tubo interno, onde a temperatura das partículas no jorro se aproxima da temperatura do gás, indicando

o quase equilíbrio térmico com o ar. Esse efeito foi observado através dos perfis de temperatura do ar no jorro obtidos experimentalmente por Freitas (1996) para as mesmas condições experimentais estudadas.

Quanto aos perfis de temperatura na região anular, notou-se que a temperatura do ar cai rapidamente no trecho correspondente à entrada do leito até a entrada do tubo interno, quando então permanece constante ao longo de todo ânulo, atingindo um valor bem próximo da temperatura dos sólidos. Este comportamento pode ser observado comparando a temperatura na região anular dos sólidos e do gás nas Figuras 4.22 e 4.27. Esse resultado está de acordo com os dados experimentais obtidos por Freitas (1996).

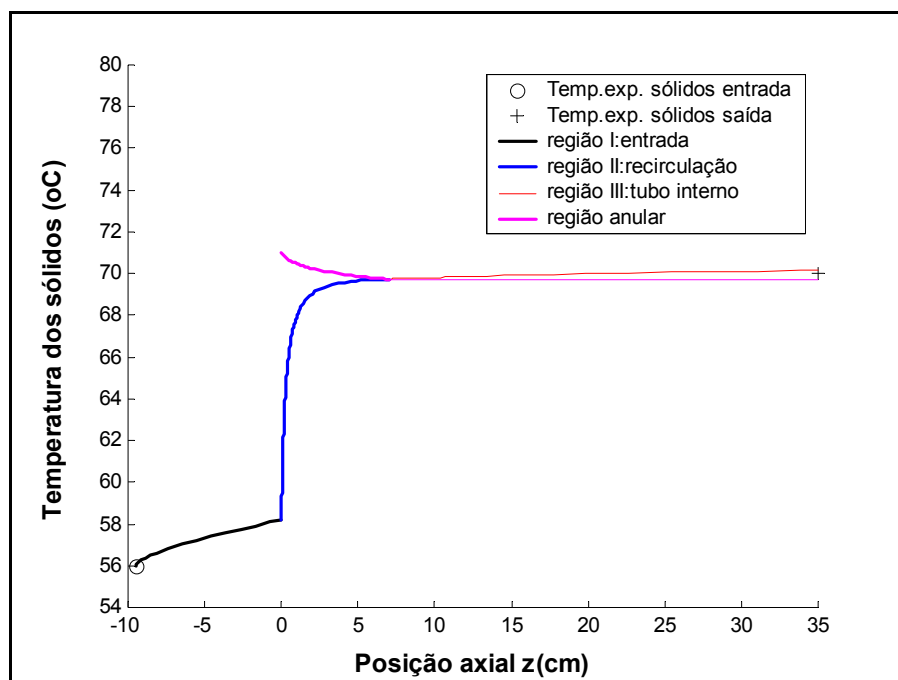


Figura 4.22- Temperatura axial dos sólidos no leito em função da coordenada z ($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{ m}^3/\text{min}$, $W_e=1100\text{ g/min}$ e $T_{ge}=80^\circ\text{C}$).

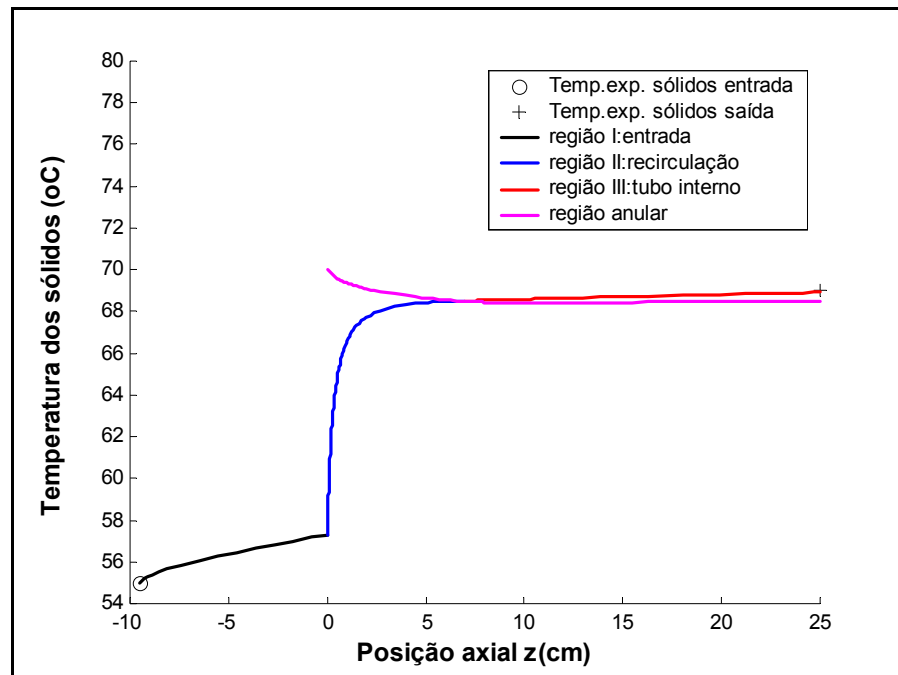


Figura 4.23- Temperatura axial dos sólidos no leito em função da coordenada z ($H_o=25\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{ m}^3/\text{min}$, $W_e=1100\text{ g/min}$ e $T_{ge}=80^{\circ}\text{C}$).

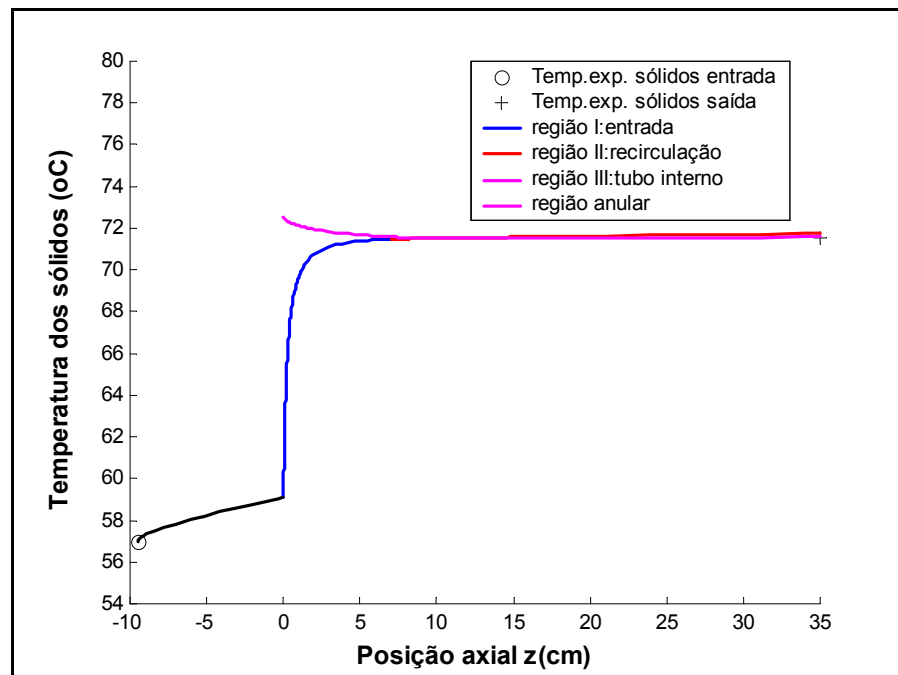


Figura 4.24- Temperatura axial dos sólidos no leito em função da coordenada z ($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,5\text{ m}^3/\text{min}$, $W_e=1100\text{ g/min}$ e $T_{ge}=80^{\circ}\text{C}$).

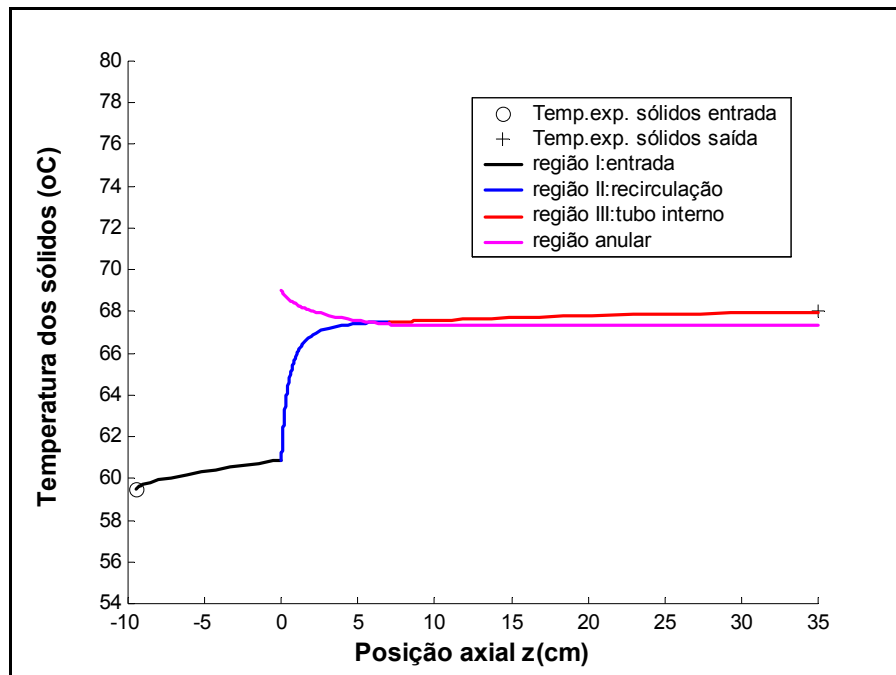


Figura 4.25- Temperatura axial dos sólidos no leito em função da coordenada z ($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,1 \text{ m}^3/\text{min}$, $W_e=2000 \text{ g}/\text{min}$ e $T_{ge}=80^{\circ}\text{C}$).

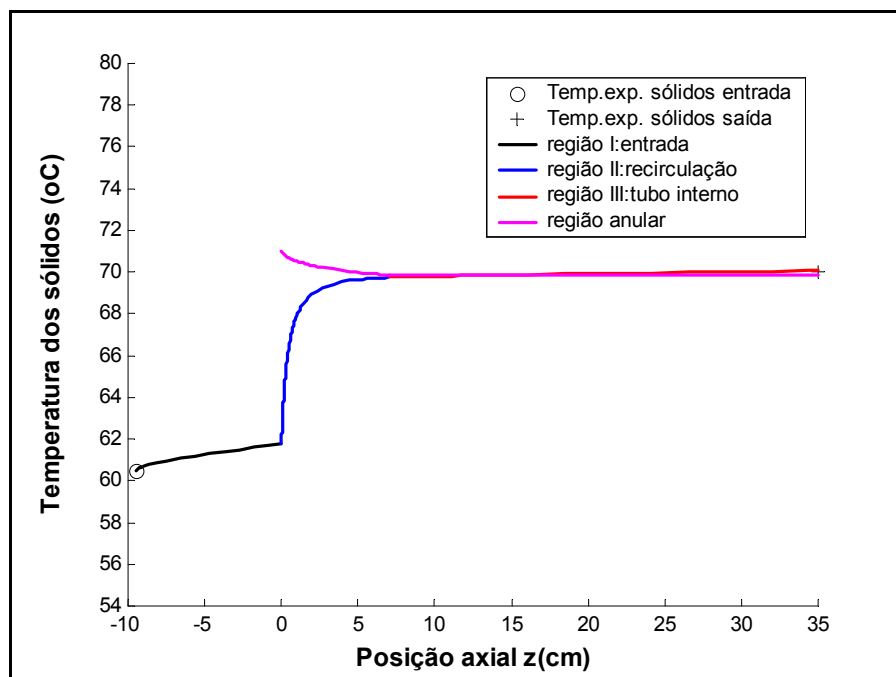


Figura 4.26- Temperatura axial dos sólidos no leito em função da coordenada z ($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,5 \text{ m}^3/\text{min}$, $W_e=2000 \text{ g}/\text{min}$ e $T_{ge}=80^{\circ}\text{C}$).

Uma diferença significativa entre a temperatura do gás no jorro e no ânulo observada em todos os perfis obtidos, mostra que está ocorrendo uma significativa troca de calor através da parede do tubo interno. Como não foi observado um aumento da temperatura do ar no ânulo, pode-se concluir que calor transmitido através da parede do tubo “draft” para o ar na região anular foi transferido para as partículas. Esse mecanismo foi previamente descrito por Mathur e Epstein (1974). Freitas (1996) observou através dos perfis radiais que as temperaturas do ar medidas eram diferentes para as posições radiais $r=0$ e $r=2,0$ cm no trecho correspondente ao tubo interno, o que comprovaria a troca de calor entre o jorro e o ânulo.

As Figuras 4.27, 4.30 e 4.31 mostram os perfis preditos da temperatura do gás no leito para três vazões de alimentação dos sólidos consideradas. Pode-se notar que com o aumento da vazão de sólidos, as temperaturas preditas no topo do leito foram menores. Portanto, este resultado está em concordância com os dados experimentais deste trabalho apresentados no início deste capítulo. Através destas figuras pode-se observar, também, que a qualidade das previsões das temperaturas no topo do leito foi semelhante para as três vazões de alimentação dos sólidos.

Comparações entre os perfis de temperatura do gás no leito em diferentes vazões de ar podem ser feitas entre as Figuras 4.27 e 4.29 e também entre as Figuras 4.31 e 4.32. Notou-se nestas figuras, que a temperatura predita do ar no topo do leito foi maior para a condição de maior vazão de ar. Esse resultado também foi observado através dos dados experimentais discutidos no início deste capítulo. A qualidade das previsões foi semelhante para as duas vazões de ar estudadas, e os maiores desvios foram observados para a maior vazão. De maneira

geral, as temperaturas no topo do leito foram subestimadas para a menor vazão e superestimada para a maior vazão de ar estudada.

As Figuras 4.27 e 4.33 apresentam os perfis de temperatura do ar no leito para as duas temperaturas de entrada do ar e para a mesma altura de leito, vazão de gás e vazão de alimentação dos sólidos. Como pode ser notado, para uma maior temperatura de entrada do ar ocorreu uma maior queda de temperatura do ar no jorro. Este resultado está de acordo com as observações experimentais deste trabalho. As previsões foram piores para maior temperatura de entrada do ar.

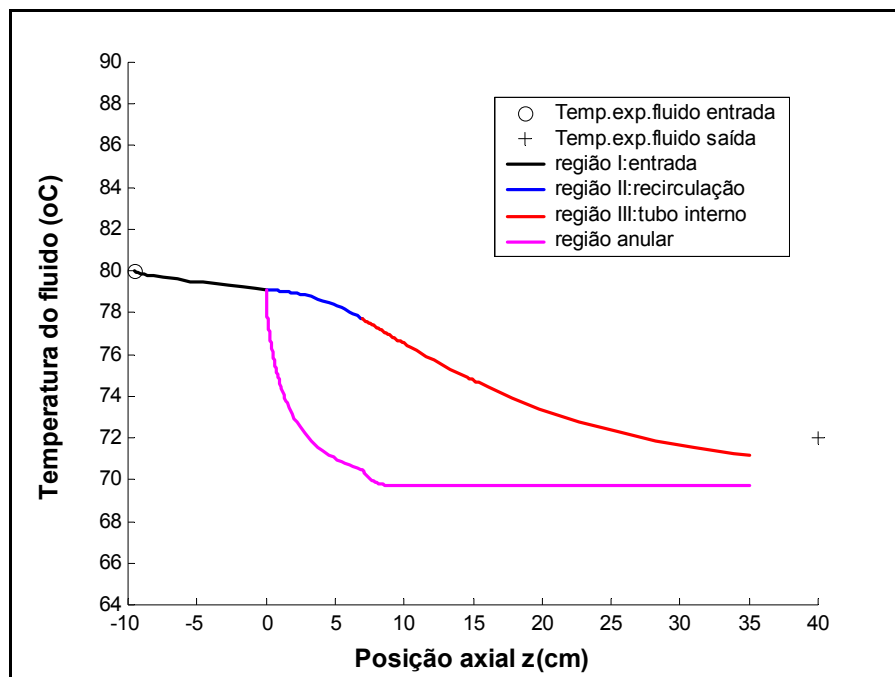


Figura 4.27- Temperatura axial do fluido no leito em função da coordenada z ($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{ m}^3/\text{min}$, $W_e=1100\text{ g}/\text{min}$ e $T_{ge}=80^\circ\text{C}$).

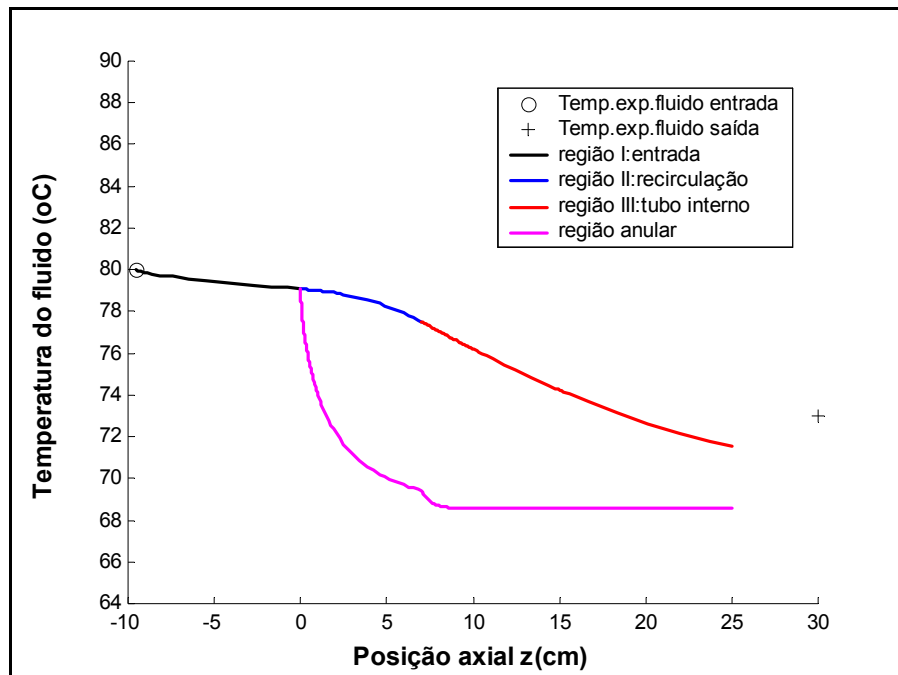


Figura 4.28- Temperatura axial do fluido no leito em função da coordenada z ($H_o=25\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{ m}^3/\text{min}$, $W_e=1100\text{ g/min}$ e $T_{ge}=80^{\circ}\text{C}$).

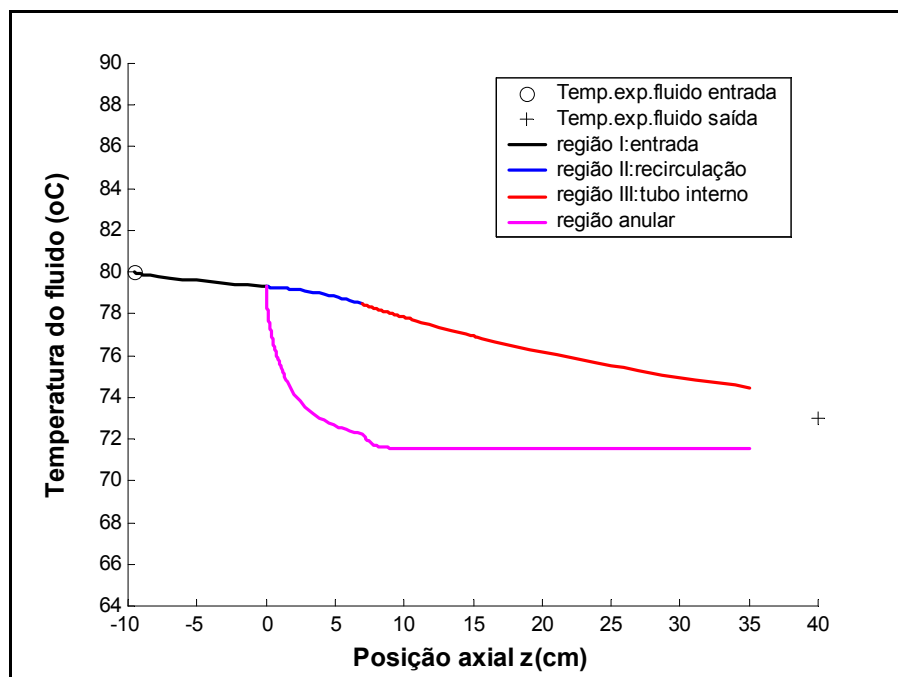


Figura 4.29- Temperatura axial do fluido no leito em função da coordenada z ($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,5\text{ m}^3/\text{min}$, $W_e=1100\text{ g/min}$ e $T_{ge}=80^{\circ}\text{C}$).

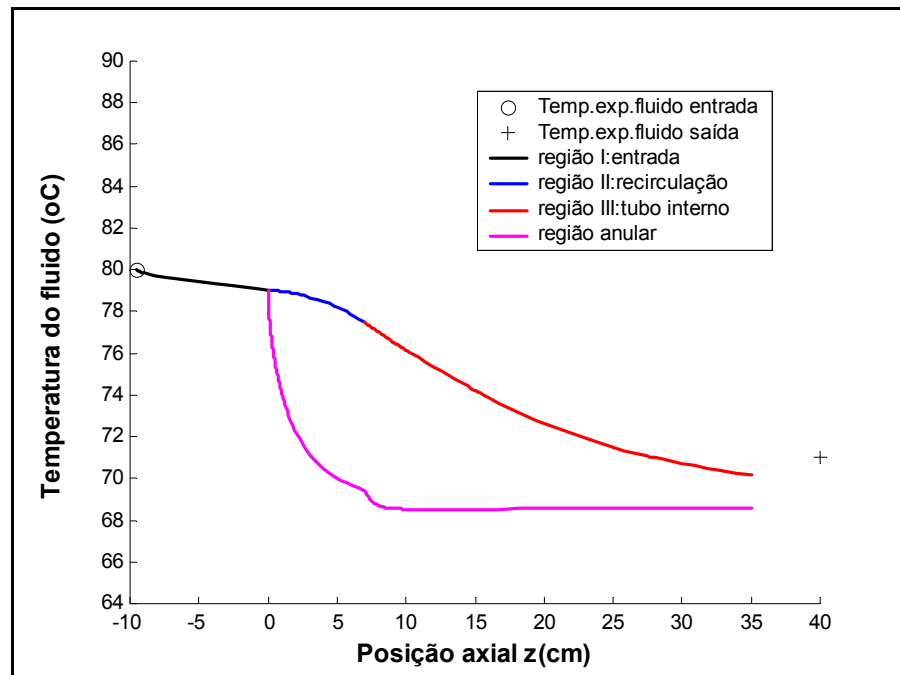


Figura 4.30- Temperatura axial do fluido no leito em função da coordenada z ($H_o=35$ cm, $Q_e=2,1$ m³/min, $W_e=1500$ g/min e $T_{ge}=80^\circ$ C).

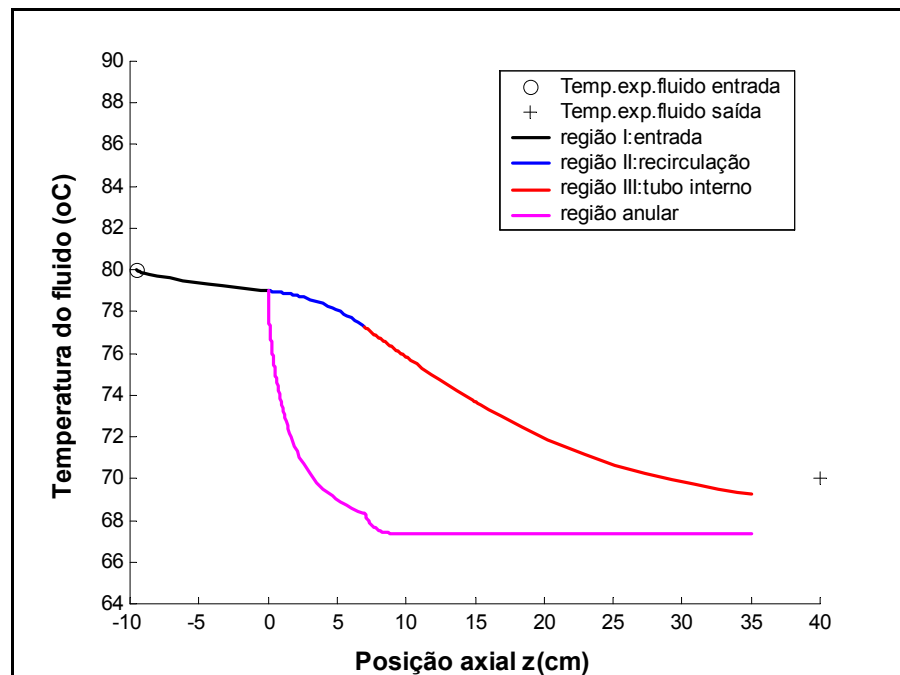


Figura 4.31- Temperatura axial do fluido no leito em função da coordenada z ($H_o=35$ cm, $Q_e=2,1$ m³/min, $W_e=2000$ g/min e $T_{ge}=80^\circ$ C).

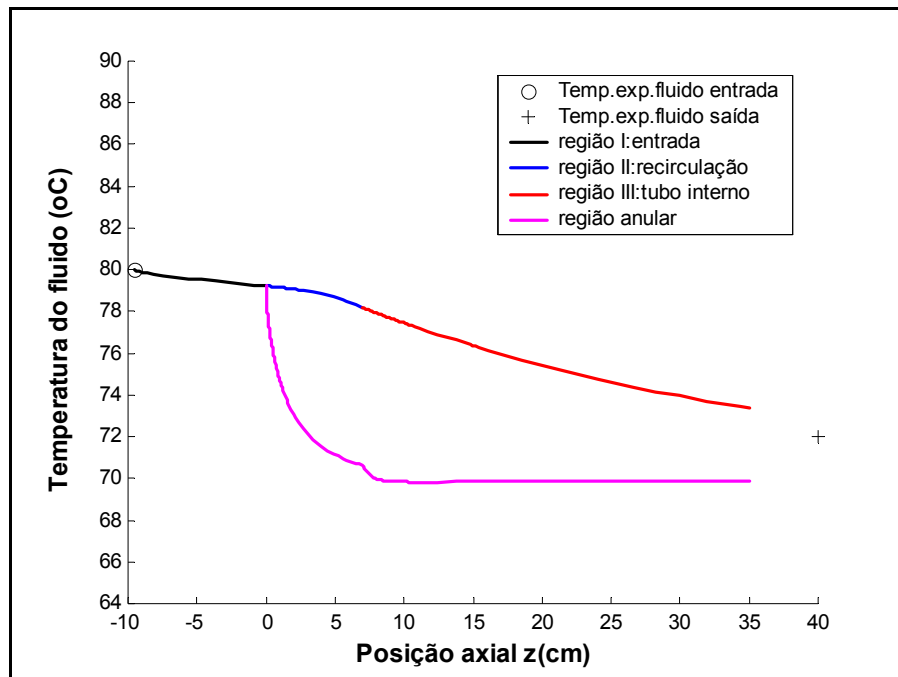


Figura 4.32- Temperatura axial do fluido no leito em função da coordenada z ($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,5\text{m}^3/\text{min}$, $W_e=2000\text{ g/min}$ e $T_{ge}=80^\circ\text{C}$).

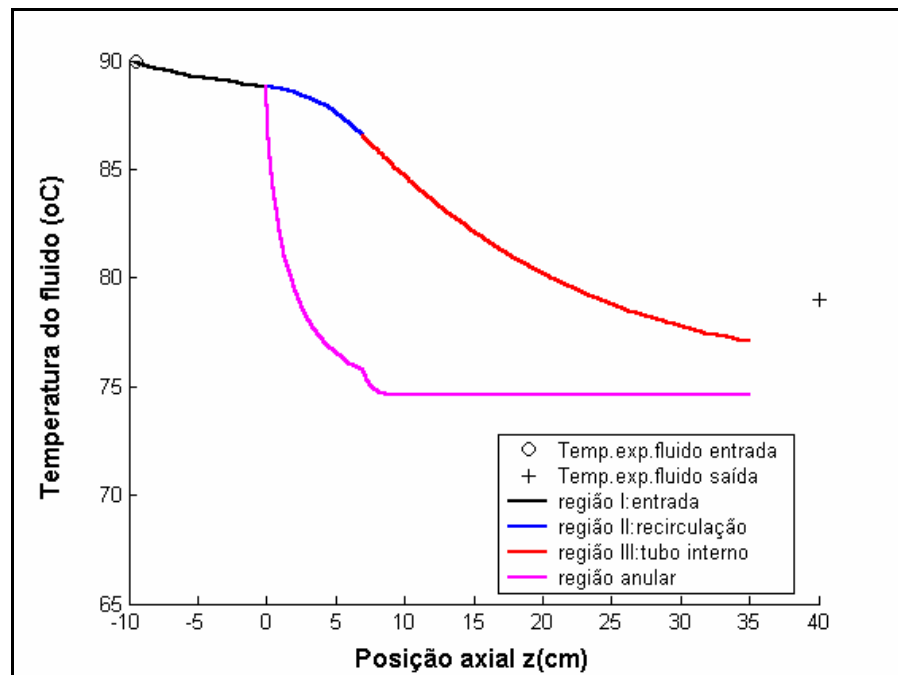


Figura 4.33- Temperatura axial do fluido no leito em função da coordenada z ($H_o=35\text{cm}$, $Q_e=2,1\text{m}^3/\text{min}$, $W_e=1100\text{ g/min}$ e $T_{ge}=90^\circ\text{C}$).

Os desvios obtidos entre as temperaturas preditas pelo modelo e as temperaturas obtidas experimentalmente na saída do leito para todas as condições experimentais estudadas são mostrados na Tabela 4.6. De forma geral, os desvios apresentados foram baixos. Os valores máximos obtidos foram de 3% para a temperatura do gás no jorro e de 2% para a temperatura dos sólidos no ânulo.

As temperaturas dos sólidos no ânulo preditas pelo modelo foram inferiores as temperaturas obtidas experimentalmente e os desvios obtidos variaram de acordo com as condições estudadas. Para uma mesma condição de altura de leito, vazão de gás e temperatura de entrada do ar, observou-se que os desvios foram maiores para uma maior vazão de alimentação de sólidos. Tal fato pode estar relacionado à previsão do coeficiente de troca térmica entre o jorro e o ânulo através do tubo interno. Neste trabalho, este parâmetro foi representado pelo coeficiente de troca entre uma suspensão no transporte pneumático e as paredes do tubo. Possivelmente este coeficiente foi sensível à concentração de partículas, efeito que não foi considerado neste estudo. O efeito da temperatura de entrada do ar também foi notado. Para a maior temperatura estudada os desvios obtidos foram maiores. O que também pode ser atribuído ao valor subestimado do coeficiente de troca térmica jorro-tubo interno.

As temperaturas do gás na saída preditas pelo modelo nas diferentes condições estudadas foram inferiores as temperaturas experimentais para a menor vazão de ar e superiores para a maior vazão. Os desvios apresentados variaram de forma inconstante de acordo com essas diferentes condições experimentais investigadas.

Os resultados do modelo mostraram que este pode ser aplicado ao tipo de configuração considerada neste trabalho. Mas alguns parâmetros envolvidos podem prejudicar as previsões do modelo, pois não foram determinados em condições como as encontradas no jorro.

Tabela 4.6- Desvios entre as temperaturas obtidas experimentalmente e preditas pelo modelo na saída do leito para os sólidos e para o gás.

	H_o (cm)	Q_e (m³/min)	W_e (g/min)	T_{ge} (°C)	T_{gs} Exper. (°C)	T_{gs} Simul. (°C)	Desvio (%)	T_{ps} Exper. (°C)	T_{ps} Simul. (°C)	Desvio (%)
1	25	2,1	1100	80	73	72,7	-0,41	69	68,4	-0,87
2	25	2,1	1500	80	72	72	0,0	68	67,2	-1,17
3	25	2,1	2000	80	72	71,6	-0,55	67,5	66,6	-1,33
4	25	2,5	1100	80	75	75,7	+0,93	71	71	0,0
5	25	2,5	1500	80	74	75,2	+1,62	70	69,8	-0,28
6	25	2,5	2000	80	74	75	+1,3	69,5	69,2	-0,43
7	25	2,1	1100	90	80	78,7	-1,62	74	72,7	-1,75
8	25	2,1	1500	90	80	78,6	-1,75	74	72,7	-1,75
9	25	2,1	2000	90	79	77,8	-1,51	73	71,5	-2,05
10	25	2,5	1100	90	82	83,1	+1,34	76	75,3	-0,92
11	25	2,5	1500	90	82	82,6	+0,73	75	74,1	-1,2
12	25	2,5	2000	90	81	82	+1,23	74	73	-1,35
13	35	2,1	1100	80	72	71,5	-0,69	70	69,7	-0,43
14	35	2,1	1500	80	71	70,5	-0,70	69	68,5	-0,72
15	35	2,1	2000	80	70	69,6	-0,57	68	67,4	-0,88
16	35	2,5	1100	80	74	74,7	+0,95	71,5	71,6	+0,14
17	35	2,5	1500	80	73	74,3	+1,78	71	71	0,0
18	35	2,5	2000	80	73	73,6	+0,82	70	69,8	-0,28
19	35	2,1	1100	90	79	77,1	-2,40	75,5	74,6	-1,19
20	35	2,1	1500	90	79	76,6	-3,04	75	74	-1,33
21	35	2,1	2000	90	78	75,6	-3,07	74	72,8	-1,62
22	35	2,5	1100	90	81	81,4	+0,50	77	76,5	-0,65
23	35	2,5	1500	90	80	80,7	+0,87	76	75,4	-0,79
24	35	2,5	2000	90	79	80	+1,26	75	74,2	-1,06

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Nesse capítulo serão apresentadas as principais conclusões deste trabalho obtidas a partir da análise dos resultados realizada no capítulo anterior, e também as sugestões para trabalhos futuros nesta área.

5.1) CONCLUSÕES

A partir dos experimentos realizados pode-se concluir que para a configuração do leito e para as faixas de operação estudadas:

- o alimentador gravitacional mostrou-se adequado para a operação contínua de sólidos pela base, não apresentando problemas para o tipo de material que foi processado, como foi observado através do sistema de alimentação tipo rosca sem-fim utilizado por Freitas (1996). Durante todos os experimentos a alimentação dos sólidos não apresentou nenhum tipo de problema, este fato é determinante para uma boa experimentação. Além disso, com o uso desse alimentador manteve-se a simetria axial do leito;

- a técnica por calorimetria utilizada para a medida das temperaturas dos sólidos na entrada e na saída do leito mostrou-se adequada para o tipo de operação implementada. O tubo coletor acoplado à seção de alimentação dos sólidos não

apresentou problemas quanto ao tempo de coleta por ser uma região de alta concentração de partículas;

- o termopar com proteção em uma de suas extremidades foi adequado para a medida da temperatura do gás no topo do leito. Apesar de estar posicionado em uma região de alta concentração de partículas, não apresentou problemas de leitura;

- com o aumento da vazão de ar, a queda de temperatura do gás no leito foi menor. Este fato, provavelmente, está relacionado com a natureza altamente heterogênea do leito, proporcionada pela existência de duas regiões muito distintas: o jorro e o ânulo.

- notou-se maiores quedas na temperatura do ar no leito para maiores vazões de alimentação dos sólidos. Este resultado era esperado, pois o aumento da vazão de sólidos significou um aumento na razão entre a massa de partículas e do gás. Além disso, com aumento da vazão, aumentou-se a área de troca térmica, reduzindo a temperatura do ar;

- a queda de temperatura do ar foi maior para a temperatura inicial do ar mais alta, devido a maior diferença de temperatura entre o gás e os sólidos, já que a temperatura de entrada das partículas não variou muito;

A partir dos resultados obtidos da análise do modelo, pode-se concluir:

- de modo geral as previsões do modelo fluidodinâmico e térmico mostraram coerência nos aspectos qualitativos, pois são concordantes com o fisicamente esperado para o jorro;

- os perfis simulados da velocidade dos sólidos e do gás no leito apresentam boa concordância com os perfis experimentais obtidos por Freitas (1996);

- o uso das correlações empíricas de Freitas (1996) para determinação da taxa de recirculação das partículas e da distribuição da vazão de ar no leito, foi essencial para a obtenção de bons resultados dos perfis fluidodinâmicos, já que estas foram desenvolvidas para o mesmo leito e faixa de operações em estudo;

- os perfis simulados das temperaturas do gás no jorro e no ânulo e das temperaturas das partículas do ânulo mostraram concordância com os perfis experimentais obtidos por Freitas (1996);

- a análise por comparação quantitativa, entre os resultados obtidos via simulação e no experimento, mostrou que as temperaturas das partículas na saída do leito foram preditas com desvios menores que 2%. Já, o maior desvio apresentado para a temperatura do gás na saída do leito foi de 3%.

- portanto, os resultados indicam que o modelo estudado pode ser aplicado em projetos de leitos de jorro com mesmas características.

5.2) SUGESTÕES

Algumas sugestões foram propostas para trabalhos futuros nesta área:

- realização de um estudo experimental, utilizando técnicas de medidas mais modernas para a obtenção dos perfis de velocidade dos sólidos e do gás, porosidade e pressão no leito;

- determinar experimentalmente os parâmetros mais importantes do sistema como o coeficiente de troca térmica partícula-fluido no jorro e no ânulo e o coeficiente de troca entre o jorro e o ânulo através do tubo interno, já que estes nunca foram determinados em condições similares;

- desenvolver uma metodologia experimental para o estudo da secagem de sólidos alimentados continuamente pela base e;

- adaptar o modelo em estudo para a análise da fluidodinâmica e da secagem nesta configuração de leito de jorro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BANDROWSKI, J.; KACZMARZYK, G. – Gas to particle heat transfer in vertical pneumatic conveying of granular materials. Chem. Eng. Sci., 33: 1303-310, 1978.

BENNETT, C.O.; MYERS, J.E.- Fenômenos de Transporte. Editora McGraw-Hill, São Paulo, 1978, 812p.

BERRUTI, F.; MUIR, J.R.; BEHIE, L.A. – Solids circulation in a spout-fluid bed with draft tube. Can. J.Chem. Eng., 66:919-23, 1988.

BLASIUS, H. – Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, 131, 1913. In: GOMIDE, R. Operações Unitárias – Fluidos na Indústria. Edição do Autor, vol.2, 448 p., 1993.

CAPES, C.E.; NAKAMURA, K. – Vertical pneumatic conveying: An experimental study with particles in the intermediate and turbulent flow regimes. Can. J.Chem. Eng., 51:31-8, 1973.

CHARBEL, A.; MASSARANI G.; PASSOS, M.L. – Fluidodinâmica do leito cônico. Anais XXV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Vol. 2, p. 368-374, 1998, São Carlos-SP.

CLAFIN, J.K.; FANE, A.G.- Gas distribution and heat transfer in a draft tube spouted bed. AIChE Symp. Ser., 241: 17-23, 1984.

COELHO, R.M.L.; MASSARANI, G. – Fluidodinâmica de Partículas: Ainda sobre Correlações em Base aos Dados Experimentais de Pettyjohn e Christiansen. Relatório LSP/COPPE 1/96, 1996.

COSTA, I.A. – Secagem de sementes de soja em leito de jorro em operação contínua. Dissertação de Mestrado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 1997, 73p.

DJERIDANE, T.; LARACHI, F.; ROY, D.; CHAOUKI, J.; LEGROS, R. – Investigation of de mean and turbulent particle velocity fields in a spouted bed using radioactive particle tracking. Can. J.Chem. Eng., 76:190-195, 1998.

DREW, T.B.; GENERAUX, R.P. - Trans. AIChE, 32, 17, 1936. In: GOMIDE, R. Operações Unitárias – Fluidos na Indústria. Edição do Autor, vol.2, 448 p., 1993).

EPSTEIN, N.; MATHUR, K.B. - Heat and mass transfer in spouted beds - A review. Can. J. Chem. Eng., 49: 467-75, 1971.

FANE, A.G.; WONG, C.W.P.; FIREK, A.E. - Spouting with a solids-laden gas stream. Chemeca 85: 465-469, Perth, Australia, 1985.

FARBAR, L.; MORLEY, M.W. – Heat transfer to flowing gas-solids mixtures in circular tube. Ind. Eng. Chem., 49:1143-50, 1957.

FERREIRA, M.C.; SILVA, E.M.V.; FREIRE, J.T.- Mean voidage measurement and fluid dynamics analysis in a pneumatic bed with a spouted bed type solid feeding system. Braz. J. Chem. Eng., 13(01): 29-39, 1996.

FREITAS, L.A.P; FREIRE, J.T. - Heat transfer in spouted beds. - Drying Technol. J., 11(2): 303-317, 1993.

FREITAS, L.A.P. - Fluidodinâmica e transferência de calor em leito de jorro com alimentação contínua. Tese de Doutorado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 1996, 225p.

GUBULIN, J.C.; FREIRE, J.T. - Transferência de calor em meios porosos: esquema prático operacional visando aplicações. Anais do XII ENEMP, 2: 245-58, 1984, Maringá, PR.

GRBAVNIC, Z.B.; VUKOVIC, D.V.; ZADANSKI, F.K.; LITTMAN, H. – Fluid flow pattern, minimum spouting velocity and pressure drop in spouted beds. Can. J. Chem. Eng., 54:33-42, 1976.

HAIDER, A.; LEVENSPIEL, O. - Drag coefficient and terminal velocity of spherical and non-spherical particles. Powder Technol., 58: 63-70, 1989.

HE, Y. L.; QUIN, S.Z.; LIM, C.J.; GRACE, J.R – Particle velocity profiles and solid flow patterns in spouted beds. Can. J.Chem. Eng., 72:561-568, 1994.

KHOE, G.K.; VAN BRACKEL, J. – Drying characteristics of draft tube spouted bed. Can. J.Chem. Eng., 61:411-418, 1983.

KMIEC, A. – Simultaneous heat and mass transfer in spouted beds. Can. J. Chem. Eng., 53: 18-21, 1975.

KONAKOV, V.K. Dok.Akad. Nauk. SSSr, 25,5, p.14, 1950. In: GOMIDE, R. Operações Unitárias – Fluidos na Indústria. Edição do Autor, vol.2, 448 p., 1993.

KUCHARSKI, S.; KMIEC, A. – Hydrodynamics, heat and mass transfer during coating of tablets in spouted beds. Can. J. Chem. Eng., 61:435-439, 1983.

LITTMAN, H.; SLIVA, D.E. – Gas to particle heat transfer coefficients in packed beds at low Reynolds number. Heat Transfer 1970, Paris-Versailles, Elsevier, Amsterdam, 7:CTP.4, 12 p., 1971.

MAMURO, T.; HATTORI, H. - Flow pattern of fluid in spouted beds. J.Chem. Eng. Japan, 1:1-5,1968.

MATHUR, K.B.; EPSTEIN, N. - Spouted Beds. Academic Press Inc., New York, 1974, 304p.

MATHUR, K.B.; GISHLER, P.E. - A technique for contacting gases with coarse solid particles. A.I.Ch.E.J.1, 157, 1955.

McADAMS, loc.cit. p. 155. In: GOMIDE, R. Operações Unitárias – Fluidos na Indústria. Edição do Autor, vol.2, 448 p., 1993.

OJALVO, J.G.O. - Leito de jorro com aeração complementar: projeto de um sistema para operação contínua e aspectos fluidodinâmicos e de secagem. Dissertação de Mestrado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 1991, 69p.

OLIVEIRA, W.P.; SILVEIRA, A.M.; FREIRE, J.T. – Analysis of the drying of pastes in conical spouted beds. Drying 94, Gold Coast, Australia, Hemisphere Publ. Co., Vol.B, pp 495-502, 1994.

PERRY, J.H. – Chemical Engineers' Handbook, 4th edition, Mc Graw Hill Book Co., N. York, 1963.

REGER, E.O.; ROMANKOV, P.G.; RASHKOVSKAYA, N.B. – Drying of paste like materials on inert bodies in a spouting bed. Zh. Prikl. Khim., 40 (10): 2189-2191, 1967.

ROWE, P.N.; CLAXTON, K.T. – Heat and mass transfer from a single sphere to fluid flowing through an array. Trans. Inst. Chem. Eng., 43:T321-T331, 1965.

SADEK, S.E. – Heat transfer to air solids suspensions in turbulent flow. Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev., 11(1): 133-135, 1972.

SARTORI, D.J.M.; FREIRE, J.T.; MASSARANI, G. – Transferência de calor gás-grão em leito deslizante. Anais do V Encontro Nacional de Secagem em Lavras, MG, pg 318-341, 1985.

SILVA, E.L.; FREIRE, J.T. – Determinação do coeficiente de transferência de calor parede-leito em sistemas de leito convencional e com tubo interno. Rev. Bras. de Eng. – Cad. Eng. Química, 6(2):31-57, 1989.

STOCKER, R.K.; ENG., J.H.; BEHIE, L.A. – Hydrodynamic and thermal modeling of a high temperature spouted bed reactor with draft tube. Can. J.Chem. Eng. 68:302-11, 1990.

THEOFANOUS, T.G.; SULLIVAN, J. –Turbulence in two phase-dispersed flows. J. Fluid Mech., 116: 343-62, 1982.

THORLEY, B.; SAUNBY, J.B.; MATHUR, K.B.- An analysis of air and solid flow in spouted wheat bed. Can. J. Chem. Eng.; 37:184-92, 1959.

TORREZAN, L.M.B.; SARTORI, D.L.M.; SANTANA, C.C- Coeficiente global de transferência de calor gás-sólidos no transporte pneumático. Anais do XI ENEMP, 1:94-106, Rio de Janeiro, RJ, 1983.

TURTON, R.; LEVENSPIEL, O. - A short note on the drag correlation to spheres. Powder Technol., 47: 83-86, 1986.

UHLHERR, P.H.T.; SINCLAIR, C.G. – The effect of free stream turbulence on the drag coefficient of spheres. Proceedings of the 6th Australasian Hydraulics and Fluid Mech. Conf., Australian, 541-545, 1970.

VALENTIN, L.M.T. – Transferência de calor no transporte pneumático vertical de partículas. PPG/FEQ, Campinas, SP, Dissertação de Mestrado, 130p., 1986.

YANG, W.C.– A correlation for solid friction factor in vertical pneumatic conveying lines. AIChE J., 24(3): 548-51, 1978.

YANG, W.C.; KEAIRNS, D.L. – Studies on the solid circulation rate and gas bypassing in spouted fluid bed with a draft tube. Can. J. Chem. Eng., 61: 349-355, 1983.

YOKOGAWA, A.; OGINO, E.; YOSHI, N – Flow pattern of fluid in the annulus of the spouted bed. Trans. Japan Soc. Mec. Engrs, 38:148-157, 1972.