

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
ENGENHARIA DE PROCESSOS**

**FLUIDODINÂMICA E AMPLIAÇÃO DE ESCALA
DE LEITOS DE JORRO BIDIMENSIONAIS**

Autor: Márcio de Alcântara Costa

Orientador: Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto

Campinas
Novembro de 1998

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
ENGENHARIA DE PROCESSOS**

**FLUIDODINÂMICA E AMPLIAÇÃO DE ESCALA
DE LEITOS DE JORRO BIDIMENSIONAIS**

Dissertação submetida à comissão de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Química - UNICAMP como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química.

Autor: Márcio de Alcântara Costa

Orientador: Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto

Campinas
Novembro de 1998



990.92.877

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	
V.	823
TOMBO BC	37340
PROC.	229/99
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	23/04/99
N.º CPU	

CM-00122518-7

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

C823f Costa, Márcio de Alcântara
Fluidodinâmica e Ampliação de Escala de Leitos de Jorro Bidimensionais. / Márcio de Alcântara Costa -- Campinas, SP: [s.n.], 1998.

Orientador Taranto, Osvaldir Pereira.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Processo de Leito de Jorro 2. Dinâmica dos Fluidos
3. Planejamento Experimental. I. Taranto, Osvaldir Pereira. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Para meu pai, Pedro, mentor de minhas grandes decisões e meu ídolo.

Para minha doce mãe, Karminha, cúmplice de meu gênio, conselheira e incentivadora dos meus atos.

E para Max, Frank, Marcelo e Cristiano, meus irmãos, os verdadeiros autores desta tese

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto, pela orientação, apoio e amizade durante o desenvolvimento desta Tese.

Ao estagiário Fábio e ao técnico Levi pela ajuda nos incontáveis problemas encontrados na montagem experimental.

À Virgínia pela contribuição de materiais e dados para a escrita da tese.

Aos amigos e companheiros de república, pelo convívio extremamente agradável e, mais especificamente a Jorge Eduardo pela ajuda computacional e a Cleber Santiago pelas dicas valiosas na escrita da tese.

À Andréa pela ajuda computacional e por suas dicas na escrita da tese, e também por sua presença nos momentos difíceis da realização deste trabalho.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Aos amigos conquistados desde o início do mestrado, em especial: Alexandre Peres, William James, Cristiane Toshie, Mara Heloísa, Ângela Hayashi, Miriam Ambrosio, Sandra Helena, Adirana da Silva, Marcos Moreira, Fábio Moles, Ângela Costela, Fernanda Almeida, Cleideane Gorette, Marlus, Jair, Cleider e a todos que direta ou indiretamente participaram da realização deste trabalho.

E aos velhos amigos de Belém pela eterna amizade: Calandrini, Reimar, Beto, Dinho, Cristiane, Lênio, Fábio, Carla, Wlademir, etc., etc., e etc....

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	I
LISTA DE TABELAS.....	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VI
NOMENCLATURA.....	VII
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 ESTABILIDADE DOS LEITOS DE JORRO	4
2.1.1 <i>Leitos de Jorro Convencionais.....</i>	4
2.1.2 <i>Fluidodinâmica do Processo:</i>	5
2.1.3 <i>Equações para Predizer as Propriedades Médias Sólido-Fluido.....</i>	7
2.1.4 <i>Altura Máxima do Leito.....</i>	8
2.1.5 <i>Queda de Pressão Máxima e Queda de Pressão de Jorro</i>	9
2.1.6 <i>Velocidade de Jorro Mínimo.....</i>	13
2.2 MODIFICAÇÕES DOS LEITOS DE JORRO CONVENCIONAIS	16
2.3 CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE EM LEITOS DE JORRO CONVENCIONAIS ...	20
2.3.1 <i>Fluidização na Região Amular</i>	20
2.3.2 <i>Estrangulamento do Jorro</i>	22
2.3.3 <i>Crescimento da Instabilidade</i>	23
2.4 CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE EM LEITOS DE JORRO BIDIMENSIONAIS ...	24
2.5 AMPLIAÇÃO DE ESCALA	25
2.5.1 <i>Princípio da Similaridade.....</i>	26
2.5.1.1 <i>Considerações Sobre Leitos de Jorro.....</i>	27
3. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....	32
3.1 MATERIAIS.....	32
3.2 EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL	33
3.2.1 <i>Leitos de Jorro Utilizados.....</i>	33

3.2.2 Sistema de Alimentação - Controle e Medição da Vazão de Ar	34
3.2.3 Descrição do Sistema Experimental	35
3.3 PLANEJAMENTO FATORIAL	37
3.4 MÉTODO EXPERIMENTAL	39
3.4.1 Obtenção dos Dados de Queda de Pressão e Vazão de Ar	39
3.4.1.1 Condições do Processo	39
3.4.1.2 Obtenção dos Dados Experimentais	39
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	44
4.1 OBTENÇÃO DA ALTURA MÁXIMA DE JORRO ESTÁVEL	44
4.2 OBTENÇÃO DOS VALORES DE ΔP_{MAX} E Q_{JM}	45
4.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	51
4.3.1 Análise dos Efeitos do Planejamento Fatorial 2^3 para o Leito Pequeno	57
4.3.2 Análise dos Efeitos do Planejamento Fatorial 2^3 para o Leito Médio	67
4.3.3 Análise dos Efeitos do Planejamento Fatorial 2^3 para o Leito Grande	75
4.3.4 Planejamento Fatorial 2^4 entre os Leitos Pequeno e Médio	83
4.3.5 Planejamento Fatorial 2^4 entre os Leitos Pequeno e Grande	92
4.3.6 Planejamento Fatorial 2^4 entre os Leitos Médio e Grande	100
4.3.7 Resumo dos Principais Resultados do Planejamento Experimental	108
4.4 AMPLIAÇÃO DE ESCALA ATRAVÉS DA ANÁLISE DE SIMILARIDADE	112
4.5 CORRELAÇÃO PARA VELOCIDADE DE JORRO MÍNIMO	120
4.6 CORRELAÇÃO PARA QUEDA DE PRESSÃO MÁXIMA	125
4.7 CORRELAÇÃO PARA ALTURA MÁXIMA DE JORRO ESTÁVEL	129
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	131
5.1 CONCLUSÕES	131
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	133
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134
ANEXO A - Curvas Características dos Leitos de Jorro Bidimensionais	140

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Esquema do Leito de Jorro Bidimensional	2
Figura 2.1 - Diagrama Esquemático de um Leito de Jorro Convencional.....	5
Figura 2.2 - Curva Característica do Leito de Jorro Convencional. Queda de Pressão no Leito vs. vazão de gás.....	6
Figura 3.1 - Esquema dos Leitos de jorro Bidimensionais	33
Figura 3.2 - Diagrama Esquemático da Montagem Experimental	36
Figura 4.1 - Curvas Características do Leito Pequeno ($L_1 = 15 \text{ cm}$)	48
Figura 4.2 - Curvas Características do Leito Médio ($L_1 = 30 \text{ cm}$).....	49
Figura 4.3 - Curvas Características do Leito Grande ($L_1 = 80 \text{ cm}$)	50
Figura 4.4 - Interpretação Geométrica dos Efeitos (Leito Pequeno)	59
Figura 4.5 - Diagramas de Pareto dos Efeitos Padronizados (Leito Pequeno).....	63
Figura 4.6 - Superfícies de Resposta para $\Delta P_{\max}$ (Leito Pequeno).....	65
Figura 4.7 - Superfícies de Resposta para Q_{jm} (Leito Pequeno)	66
Figura 4.8 - Interpretação Geométrica dos Efeitos (Leito Médio)	71
Figura 4.9 - Diagramas de Pareto dos Efeitos Padronizados (Leito Médio)	72
Figura 4.10 - Superfícies de Resposta para $\Delta P_{\max}$ (Leito Médio)	73
Figura 4.11 - Superfícies de Resposta para Q_{jm} (Leito Médio).....	74
Figura 4.12 - Interpretação Geométrica dos Efeitos (Leito Grande)	78
Figura 4.13 - Diagramas de Pareto dos Efeitos Padronizados (Leito Grande).....	79
Figura 4.14 - Superfícies de Resposta para $\Delta P_{\max}$ (Leito Grande).....	81
Figura 4.15 - Superfícies de Resposta para Q_{jm} (Leito Grande)	82
Figura 4.16 - Interpretação Geométrica dos Efeitos em $\Delta P_{\max}$ (Leitos Pequeno e Médio)....	87
Figura 4.17 - Interpretação Geométrica dos Efeitos em Q_{jm} (Leitos Pequeno e Médio)....	88
Figura 4.18 - Diagramas de Pareto dos Efeitos Padronizados (Leitos Pequeno e Médio)....	89
Figura 4.19 - Superfícies de Resposta para $\Delta P_{\max}$ (Leitos Pequeno e Médio).....	90
Figura 4.20 - Superfícies de Resposta para Q_{jm} (Leitos Pequeno e Médio)	91
Figura 4.21 - Interpretação Geométrica dos Efeitos em $\Delta P_{\max}$ (Leitos Pequeno e Grande)... 95	
Figura 4.22 - Interpretação Geométrica dos Efeitos em Q_{jm} (Leitos Pequeno e Grande).....	96
Figura 4.23 - Diagramas de Pareto dos Efeitos Padronizados (Leitos Pequeno e Grande)... 97	
Figura 4.24 - Superfícies de Resposta para $\Delta P_{\max}$ (Leitos Pequeno e Grande).....	98

Figura 4.25 - Superfícies de Resposta para Q_{jm} (Leitos Pequeno e Grande).....	99
Figura 4.26 - Interpretação Geométrica dos Efeitos em ΔP_{max} (Leitos Médio e Grande)....	103
Figura 4.27 - Interpretação Geométrica dos Efeitos em Q_{jm} (Leitos Médio e Grande)	104
Figura 4.28 - Diagramas de Pareto dos Efeitos Padronizados (Leitos Médio e Grande).....	105
Figura 4.29 - Superfícies de Resposta para ΔP_{max} (Leitos Médio e Grande).....	106
Figura 4.30 - Superfícies de Resposta para Q_{jm} (Leitos Médio e Grande).....	107
Figura 4.31 - Comparação dos Resultados de Q_{jm} Adimensionalizado.....	117
Figura 4.32 - Comparação dos Resultados de ΔP_{max} Adimensionalizado.....	117
Figura 4.33 - Valores Preditos versus Valores Observados para U_{jm}	121
Figura 4.34 - Comparação entre Valores Experimentais de Taranto (1992) e os Valores Preditos pela Equação 4.5.....	124
Figura 4.35 - Valores Preditos versus Valores Observados para ΔP_{max}	125
Figura 4.36 - Comparação entre Valores Experimentais de Taranto (1992) e os Valores Preditos pela Equação 4.6.....	128
Figura 4.37 - Comparação entre Valores Experimentais e os Valores Preditos de H_{max}	130
Figura A.1 - Curvas Características dos Leitos Pequenos ($L_1 = 0,15$ m).....	141
Figura A.1 - Curvas Características dos Leitos Pequenos ($L_1 = 0,15$ m) (Cont.).....	142
Figura A.1 - Curvas Características dos Leitos Pequenos ($L_1 = 0,15$ m) (Cont.).....	143
Figura A.1 - Curvas Características dos Leitos Pequenos ($L_1 = 0,15$ m) (Cont.).....	144
Figura A.1 - Curvas Características dos Leitos Pequenos ($L_1 = 0,15$ m) (Cont.).....	145
Figura A.2 - Curvas Características dos Leitos Médios ($L_1 = 0,30$ m).....	146
Figura A.2 - Curvas Características dos Leitos Médios($L_1 = 0,30$ m) (Cont.).....	147
Figura A.2 - Curvas Características dos Leitos Médios($L_1 = 0,30$ m) (Cont.).....	148
Figura A.2 - Curvas Características dos Leitos Médios($L_1 = 0,30$ m) (Cont.).....	149
Figura A.2 - Curvas Características dos Leitos Médios($L_1 = 0,30$ m) (Cont.).....	150
Figura A.2 - Curvas Características dos Leitos Médios($L_1 = 0,30$ m) (Cont.).....	151
Figura A.3 - Curvas Características dos Leitos Grandes ($L_1 = 0,80$ m).....	152
Figura A.3 - Curvas Características dos Leitos Grandes($L_1 = 0,80$ m) (Cont.).....	153
Figura A.3 - Curvas Características dos Leitos Grandes ($L_1 = 0,80$ m) (Cont.).....	154
Figura A.3 - Curvas Características dos Leitos Grandes ($L_1 = 0,80$ m) (Cont.).....	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Correlações para $\Delta P_{\max}$ e ΔP_j em Leitos de Jorro Convencionais.....	11
Tabela 2.2 - Correlações para U_{jm} em Leitos de Jorro Convencionais.....	15
Tabela 2.3 - Leitos de Jorro não Convencionais: Mudanças na Geometria do Leito (Passos et al., 1994)......	18
Tabela 2.4 - Leitos de Jorro não Convencionais: Mudanças na Operação de Jorro (Passos et al., 1994)......	19
Tabela 2.5 - Mecanismo de Terminação do Jorro: Fluidização no Topo do Ânulo ⁽¹⁾ (Passos et al., 1994)......	21
Tabela 2.6 - Mecanismo de Terminação do Jorro: Estrangulamento do Jorro ⁽²⁾ (Passos et al., 1994)......	22
Tabela 2.7 - Critérios de Estabilidade - Equações Fluidodinâmicas para Leitos de Jorro Bidimensionais (Passos et al., 1994)......	25
Tabela 3.1 - Características das Partículas.....	32
Tabela 3.2 - Valores dos Fatores Utilizados no Planejamento Fatorial e seus Níveis Superior e Inferior.	37
Tabela 3.3 - Características das Corridas Experimentais.....	40
Tabela 4.1 - Altura Máxima dos Leitos de Jorro Bidimensionais.	44
Tabela 4.2 - Valores de Queda de Pressão Máxima e Vazão de Jorro Mínimo Extraídos das Corridas Experimentais	45
Tabela 4.3 - Planejamento Fatorial 2^3 - Leito Pequeno ($L_1 = 15$ cm)	52
Tabela 4.4 - Planejamento Fatorial 2^3 - Leito Médio ($L_1 = 30$ cm).....	52
Tabela 4.5 - Planejamento Fatorial 2^3 - Leito Grande ($L_1 = 80$ cm)	53
Tabela 4.6 - Planejamento Fatorial 2^4 - Leito Pequeno e Leito Médio.	54
Tabela 4.7 - Planejamento Fatorial 2^4 - Leito Pequeno e Leito Grande.....	55
Tabela 4.8 - Planejamento Fatorial 2^4 - Leito Médio e Leito Grande.	56
Tabela 4.9 - Estimativa dos Efeitos sobre $\Delta P_{\max}$ (Leito Pequeno)	57
Tabela 4.10 - Estimativa dos Efeitos sobre Q_{jm} (Leito Pequeno).	57
Tabela 4.11 - Estimativa dos Efeitos sobre $\Delta P_{\max}$ (Leito Médio).	67
Tabela 4.12 - Estimativa dos Efeitos sobre Q_{jm} (Leito Médio)......	67
Tabela 4.13 - Estimativa dos Efeitos sobre $\Delta P_{\max}$ (Leito Grande).	75

Tabela 4.14 - Estimativa dos Efeitos sobre Q_{jm} (Leito Grande).	75
Tabela 4.15 - Estimativa dos Efeitos sobre ΔP_{max} (Leitos Pequeno e Médio).	84
Tabela 4.16 - Estimativa dos Efeitos sobre Q_{jm} (Leitos Pequeno e Médio).	85
Tabela 4.17 - Estimativa dos Efeitos sobre ΔP_{max} (Leitos Pequeno e Grande).	92
Tabela 4.18 - Estimativa dos Efeitos sobre Q_{jm} (Leitos Pequeno e Grande).	93
Tabela 4.19 - Estimativa dos Efeitos sobre ΔP_{max} (Leitos Médio e Grande).	100
Tabela 4.20 - Estimativa dos Efeitos sobre Q_{jm} (Leitos Médio e Grande).	101
Tabela 4.21 - Resumo dos Principais Efeitos dos Planejamentos Fatoriais 2^3 .	109
Tabela 4.22- Resumo dos Principais Efeitos dos Planejamentos Fatoriais 2^4 .	110
Tabela 4.23 - Teste experimental das variáveis Adimensionais (leitos pequeno e médio).	113
Tabela 4.24 - Teste experimental das variáveis Adimensionais (leitos pequeno e grande).	113
Tabela 4.25 - Teste experimental das variáveis Adimensionais (leitos médio e grande).	114
Tabela 4.26 - Conjunto simplificado dos Parâmetros Adimensionais.	115
Tabela 4.27 - Combinação dos Parâmetros Adimensionais e Equivalências a serem satisfeitas.	115
Tabela 4.28 - Comparação das Variáveis Dependentes Adimensionais Experimentais com as Calculadas nas Equações 4.3 e 4.4.	118
Tabela 4.29 - Comparação dos Dados Experimentais com os Calculados na Equação 4.5.	121
Tabela 4.30 - Comparação dos Dados Experimentais com os Calculados na Equação 4.6.	126
Tabela 4.31 - Comparação dos Dados Experimentais com os Calculados na Equação 4.7.	130

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar uma análise consistente sobre a fluidodinâmica dos leitos de jorro bidimensionais, apontando os mecanismos que governam o jorro propriamente dito. A influência das principais variáveis independentes sobre a queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo foi quantificada através de um planejamento experimental envolvendo três leitos geometricamente similares, com colunas medindo 0,15, 0,30 e 0,8m de largura. Os dados experimentais obtidos permitiram que a geometria bidimensional fosse avaliada quanto à sua capacidade de ampliação de escala, através da análise de similaridade fluidodinâmica.

A metodologia utilizada, baseada no planejamento experimental e análise de superfície de resposta, otimizou o processo, indicando valores máximos e mínimos de queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo pela variação dos parâmetros independentes do jorro. Tais parâmetros de escala independentes foram adimensionalizados, testados e validados pela análise de similaridade, com a proposta de equações capazes de predizer os valores das propriedades dependentes a serem seguidas no protótipo de um leito real.

O estrangulamento do jorro foi o principal mecanismo de instabilidade no processo de obtenção da altura máxima de jorro estável dos leitos. E através dos dados obtidos das curvas características dos leitos jorro foi possível estabelecer correlações para predizer os valores de queda de pressão máxima, vazão de jorro mínimo e altura máxima de jorro estável, em função dos parâmetros adimensionais, válidas para toda a faixa de tamanho dos leitos de jorro bidimensionais utilizados neste trabalho.

ABSTRACT

The objective of this work is to present a consistent analysis on the fluidodynamics of two-dimensional spouted beds, indicating the mechanisms that govern the spouting. The influence of the main independent variables on the maximum pressure drop and minimum spouting velocity was quantified through an experimental design involving three similar geometrically beds, with columns of 0.15, 0.30 a 0.80 m in width. The experimental data obtained allowed to evaluate the bidimensional geometry with relation to its capacity of scale-up, through the analysis of fluidodynamic similarity.

The methodology used, based on the experimental design and analysis of response surface, optimized the process, indicating maximum and minimum values of maximum pressure drop and minimum spouting velocity for the variation of the independent parameters of spouting. Such independent nondimensional scale parameters were tested and validated by the similarity analysis, with the proposal of equations capable to predict the values of the dependent properties to be followed in the prototype of a real bed.

The choking of spout was the main instability mechanism in the process of obtaining the maximum spoutable bed height of the beds. And through the acquired data of the characteristics curves of the spouted beds it was possible to establish correlations to predict the values of maximum pressure drop and minimum spouting velocity and maximum spoutable bed height, in function of the dimensionless parameters, valid for the wide range of size of the two-dimensional spouted beds used in this work.

NOMENCLATURA

A_{cil}	área da seção transversal do cilindro (m^2)
a_1	área do tubo (cm^2)
a_2	área do orifício (cm^2)
b	pressão barométrica local (mmHg)
D_b	diâmetro da base cônica da coluna do leito (m)
D_c	diâmetro da coluna do leito (m)
D_{CC}	diâmetro do círculo circunscrito (m)
$(D_c)_{eq}$	diâmetro equivalente do leito (m)
D_{CI}	diâmetro do círculo inscrito (m)
D_i	diâmetro do orifício de entrada do leito (m)
d_i	média dos intervalos de abertura das peneiras (mm).
$(D_i)_{eq}$	diâmetro equivalente do orifício de entrada do leito (m)
$(D_{i \max})_{eq}$	diâmetro máximo equivalente do orifício de entrada do leito (m)
D_j	diâmetro do jorro (m)
d_p	diâmetro das partículas (m)
$d_{\bar{p}}$	diâmetro médio das partículas (m)
d_{ps}	diâmetro médio das partículas pela análise granulométrica padrão (m)
E_p	valor médio do tensor tensão efetivo da fase da partícula (Pa)
f	função
g	aceleração da gravidade (m/s^2)
H	altura do leito de partículas (m)
H_0	altura estática do leito (m)
H_c	altura da seção cônica (m)
H_{jm}	altura do leito nas condições de jorro mínimo (m)
$H_{\max}$	altura máxima de jorro estável (m)
h_t	altura do “draft-tube” (m)
L	altura do leito em fluidização (m)
L_1	largura da coluna (m)
L_2	espessura da coluna (m)
L_3	espessura da entrada de ar (m)

L_j	largura do jorro (m)
L_t	distância da entrada até o “draft-tube” (m)
M	massa de sólidos no leito (kg)
P_1	pressão estática na linha de ar (Pa)
Q	vazão mássica (Kg/min)
Q_{jm}	vazão de jorro mínimo (Kg / min)
R^2	coeficiente de correlação (-)
t	temperatura do ar (°C).
U	velocidade do fluido (m / s)
U	velocidade superficial do gás (m / s)
U_{jm}	velocidade de jorro mínimo (m / s)
U_{max}	velocidade superficial correspondente a ΔP_{max} (m / s) (Fig. 2.2)
U_{mf}	velocidade mínima de fluidização (m / s)
v	velocidade da partícula (m / s)
V_T	velocidade terminal da partícula (m / s)
X_i	fração ponderal retida (%)

PARÂMETROS ADIMENSIONAIS

A	parâmetro adimensional definido na Eq. (2.4)
A_{2D}	parâmetro adimensional definido na Eq. (2.6)
A_{modelo}	parâmetro adimensional qualquer para um modelo de leito de jorro
Ar	número de Arquimedes = $\rho_f (\rho_s - \rho_f) g d_p^3 / \mu_f^2$
A_{real}	parâmetro adimensional qualquer para um leito de jorro real
C_D	coeficiente de arraste para uma partícula
C_1 e C_2	parâmetros adimensionais definidos na Eq. (2.2)
C_3 e C_4	parâmetros adimensionais definidos na Eq. (2.29)
D	parâmetro adimensional definido na Eq. (2.29)
$g(\phi)$	= $\phi (5 \phi^3 - 7,57 \phi^2 + 4,09 \phi - 0,516)$
h	= H_{jm} / H_{max}
m	= $\frac{a_2}{a_1}$
n	parâmetro definido na Eq. 2.28

Re_p	número de Reynolds da partícula = $\rho_f d_p U / \mu_f$
Re_{jm}	número de Reynolds no jorro mínimo = $\rho_f d_p \phi U_{mf} / \mu_f$
Re_{mf}	número de Reynolds na mínima fluidização = $\rho_f d_p \phi U_{mf} / \mu_f$
Re^*_{mf}	= Re_{mf} / ϕ
Re_T	número de Reynolds na velocidade terminal das partículas = $\rho_f d_p g(\phi) V_T / \mu_f$
X^*_{2D}	= $1 / (1 - H_{jm} / L_1)$
$X^*_{2DH_{max}}$	= $1 / (H_{max} / L_1 + 1)$
Y^*	= $1 - (\Delta P_{jm} / \Delta P_{mf})$

LETRAS GREGAS

α	coeficiente de descarga = $0,5959 + 0,0312m^{1,05} - 0,184m^4$
β	coeficiente de interação fluido-partícula ($Kg\ m^{-3}\ s^{-1}$)
δ	= $0,3041 + 0,0876m - 0,1166m^2 + 0,4089m^3$
Δh_p	queda de pressão na placa de orifício (cmH_2O).
ΔP_j	queda de pressão de jorro (Pa)
$(-\Delta P_j)_{cilindro}$	queda de pressão de jorro na parte cilíndrica do leito de jorro (Pa)
$(-\Delta P_j)_{cone}$	queda de pressão de jorro na seção cônica (Pa)
ΔP_{jm}	queda de pressão de jorro mínimo (Pa)
ΔP_{max}	queda de pressão máxima (Pa)
$(\Delta P_{max})_{cilindro}$	queda de pressão máxima na parte cilíndrica do leito de jorro (Pa)
$(\Delta P_{max})_{cone}$	queda de pressão máxima na seção cônica (Pa)
ΔP_{mf}	queda de pressão de mínima fluidização (Pa)
ε	fator de compressibilidade = $1 - \beta \frac{\Delta h_p}{P_1}$
ε_0	porosidade do leito (-)
ε_a	porosidade do leito na região anular (-)
ε_j	porosidade do leito na região de jorro (-)
ε_{jm}	porosidade do leito nas condições de jorro mínimo (-)
ε_{mf}	porosidade do leito nas condições de mínima fluidização (-)
θ	ângulo da base dos leitos de jorro bidimensionais ($^\circ$)

θ_c	ângulo de falha de Coulomb ($^{\circ}$)
ϕ	esfericidade da partícula
λ	ângulo definido na Equação (2.28)
μ_f	viscosidade do fluido (Kg / ms)
ρ_b	densidade do leito expandido (Kg / m ³)
ρ_f	densidade do fluido (Kg / m ³)
ρ_p ou ρ_s	densidade da partícula (Kg / m ³)
φ	ângulo de fricção interna da fase partícula ($^{\circ}$)

1. INTRODUÇÃO

Uma das mais promissoras modificações do leito de jorro clássico é o leito de jorro bidimensional em que o problema de ampliação de escala se reduz à simples extensão da espessura do leito, causando um aumento na sua capacidade volumétrica. Um leito de jorro bidimensional consiste basicamente de um vaso retangular de paredes verticais planas com base inclinada e um bocal de entrada no centro, como mostra a Figura 1.1.

Verificações experimentais sobre a fluidodinâmica deste equipamento são realizadas com frequência por muitos pesquisadores, que possibilitam a previsão das variáveis que governam o fenômeno de jorro como a queda de pressão máxima, a vazão de jorro mínimo e altura máxima de jorro estável, mas as condições do processo são sempre específicas para a geometria e as partículas utilizadas. A aplicação dos resultados obtidos em leitos de pequena escala para leitos de escala industrial é tratada com muita dificuldade devido à complexidade dos fenômenos envolvidos.

Uma ferramenta matemática que pode ser usada para atenuar as dificuldades inerentes ao processo de ampliação de escala dos leitos de jorro é a chamada Análise de Similaridade que tem se revelado conveniente em diversas áreas, onde, partindo-se de experimentos em escala de laboratório busca-se reproduzir fenômenos físicos de grande escala. O emprego dessa análise é mais comum em leitos fluidizados, em que os parâmetros adimensionais independentes que descrevem os fenômenos físicos, obtidos por métodos de combinação, são utilizados na ampliação de escala.

O objetivo deste trabalho é estudar a fluidodinâmica do escoamento de partículas em três unidades de leitos de jorro bidimensionais de tamanhos diferentes, com a finalidade de avaliar as condições de ampliação de escala dos mesmos utilizando alguns parâmetros adimensionais obtidos para leitos fluidizados (Glicksman, 1984) que foram adaptados para leitos de jorro (Lim e Grace, 1996). Correlações matemáticas para a queda de pressão máxima, vazão de jorro mínimo e altura máxima de jorro estável serão desenvolvidas de forma que sejam válidas para a ampla faixa de tamanhos dos leitos de jorro bidimensionais.

A revisão bibliográfica sobre leitos de jorro será apresentada no capítulo 2, ressaltando os mecanismos que governam a estabilidade, os tipos existentes e os critérios adequados para a ampliação de escala.

No capítulo 3 será feita uma descrição detalhada do equipamento experimental, bem como das partículas utilizadas e do método adotado para as corridas experimentais.

No capítulo 4 serão obtidos os resultados das variáveis dependentes do processo de jorro. Em seguida será realizado um planejamento experimental para estudar o comportamento dessas variáveis em relação aos parâmetros independentes e também para comparar este comportamento entre os leitos envolvidos no processo. Depois serão analisados os parâmetros de escala importantes para a ampliação de escala e, finalmente, serão desenvolvidas correlações matemáticas para a queda de pressão máxima, vazão de jorro mínimo e altura máxima de jorro estável.

No capítulo 5 serão apresentadas as conclusões do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

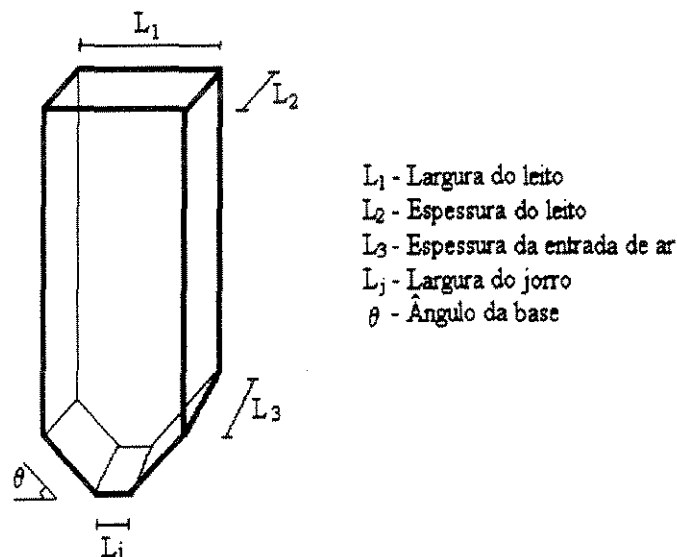


Figura 1.1 - Esquema do Leito de Jorro Bidimensional

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A técnica do leito de jorro foi desenvolvida por Mathur e Gishler em 1955 quando eles tentaram secar trigo em um leito fluidizado. Durante seus experimentos, um novo tipo de regime de fluxo sólido-fluido foi alcançado pela introdução do fluido na parte central do fundo da coluna do leito, ao contrário do que pela distribuição uniforme sobre a área da seção transversal do leito. O leito de jorro foi então desenvolvido, originalmente, como uma solução modificada do leito fluidizado, visando-se o tratamento de partículas de diâmetro médio maior, com os quais, normalmente, não se obtinha operação homogênea num leito fluidizado. Desde então, o leito de jorro tem sido considerado um eficiente sistema de contato para partículas grossas ($d_p > 1\text{mm}$) as quais não podem ser fluidizadas na forma tradicional. O jorro é formado pela penetração de um jato de fluido através de um leito de partículas sólidas. No leito de jorro convencional essas partículas ficam contidas em uma coluna cilíndrica de base cônica, em cuja extremidade inferior fica localizado o orifício de entrada do fluido no leito. Este fluido é geralmente um gás, sendo que na prática utiliza-se com mais frequência o ar.

O início da circulação dos sólidos, que caracteriza o leito de jorro, acontece quando a vazão de ar torna-se alta, o suficiente para arrastar pneumáticamente as partículas para cima do nível do leito. Estas partículas passarão por uma região central de alta porosidade denominada jorro, e ao atingir o ponto em que sua velocidade se iguala a zero, passarão a ter movimento descendente através de uma região de menor porosidade. Essa região localiza-se entre as paredes da coluna e o jorro e denomina-se região anular ou simplesmente ânulo. As partículas podem retornar ao jorro ao longo de toda interface entre o jorro e a região anular, mas a maior parte dos sólidos desloca-se para baixo e só na região da base invertem seu sentido de movimento retornando ao deslocamento ascendente. Estabelece-se então um movimento cíclico e sistemático dos sólidos, tornando um sistema fluidodinâmico único que é mais conveniente do que outras configurações sólido- fluido para muitas aplicações.

No leito de jorro, a mistura local não é tão intensa como em um leito fluidizado, porque a maioria das partículas move-se como um leito empacotado no ânulo e apenas 15% das partículas estão no jorro a cada momento (Thorley et al., 1959). Porém a vantagem distinta que o leito de jorro promove é que a taxa de circulação de sólidos é alta, crescendo com o aumento da vazão (Chatterjee, 1970). Em um jorro cerca de 60 a 70 % do fluido se move

através do ânulo (Thorley et al., 1959) e como o fluido não está na forma de bolhas, o contato entre o fluido e o sólido é melhor. A vazão requerida para atingir o jorro é sempre alta e por isso o tempo de contato é baixo exigindo altas taxas de reciclo. Apesar desta técnica apresentar um fluxo radial restrito de fluido ela possui amplas aplicações como secagem, granulação, mistura de sólidos, resfriamento e recobrimento de partículas.

2.1 ESTABILIDADE DOS LEITOS DE JORRO

A estabilidade dos leitos de jorro é caracterizada pela formação das regiões de jorro, fonte e ânulo. O jorro é uma fase diluída de sólidos ($0,50 < \epsilon_j < 0,80$), onde as partículas são transportadas pneumáticamente pelo jato de fluido no centro do leito. Um baixo tempo de residência e altos coeficientes de transferência de calor e massa fluido-partícula são as principais características dessa região. O Ânulo é a região de fase densa de sólidos ($\epsilon_a = \epsilon_{mf}$) onde partículas e fluido se movem em fluxo contracorrente. A mistura dos sólidos se intensifica na parte mais baixa dessa região por causa do movimento de reentrada na região de jorro. Na região da fonte, as partículas transportadas no jorro mudam seu movimento caindo novamente na região anular. O atrito e a colisão entre as partículas se tornam intensas nessa região conforme o aumento da vazão de gás (Passos et al., 1991).

2.1.1 Leitos de Jorro Convencionais

O leito de jorro convencional é uma coluna cone-cilíndrica como mostrado na Figura 2.1. O ângulo do leito é geralmente ajustado entre 60° a 180° . A principal característica dos leitos de jorro é o movimento contínuo de partículas entre o jorro e a região anular o qual pode ser quantitativamente descrito pela circulação das partículas. A literatura sobre leitos de jorro cone-cilíndrico mostra que esse movimento contínuo de partículas tem um efeito significativo na performance dos leitos de jorro em aplicações como secagem, gaseificação de carvão, granulação, e recobrimento de partículas. Entretanto, este tipo de leito é raramente usado na indústria agrícola por causa dos problemas de ampliação de escala e de operação (Mujumdar e Raghavan, 1984 e Németh et al., 1983).

O diâmetro da coluna (D_c) não pode exceder cerca de um metro sem que haja o desenvolvimento de grandes zonas mortas na região anular. O diâmetro do bocal de entrada (D_i) fica dentro de uma faixa estreita, pois depende do diâmetro da coluna e propriedades das partículas. Algumas limitações na utilização do leito de jorro convencional foram relacionadas por Mujumdar (1982): a perda de carga é elevada antes de se atingir o jorro estável, o fluxo de ar é governado mais pelas necessidades do jorro do que pelas necessidades de transferência de calor e massa, a capacidade é limitada devido aos limites no diâmetro do cilindro e na altura máxima do leito, dificuldades na ampliação de escala (segundo Lim e Grace, 1987, a ordem de magnitude de um jorro é de 3 m de diâmetro da coluna de um leito convencional), e finalmente a grande faixa de tempos de residência das partículas.

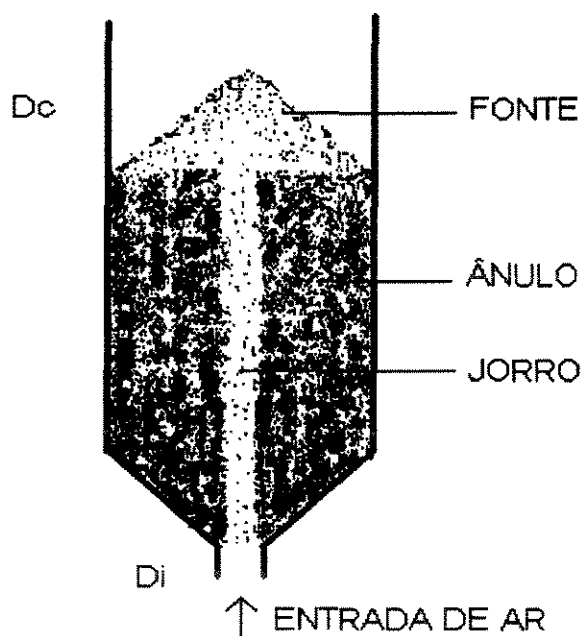


Figura 2.1 - Diagrama Esquemático de um Leito de Jorro Convencional

2.1.2 Fluidodinâmica do Processo:

Antes de ser atingido o movimento cíclico e permanente das partículas algumas etapas ocorrem no leito. Estas etapas podem ser observadas através da curva característica da queda de pressão em função da vazão de ar, indicada na Figura 2.2.

Com baixas vazões, o gás penetra o leito de partículas sem perturbá-las e o sistema comporta-se como um leito fixo (região AB). A uma certa vazão, o jato se torna

suficientemente alto para empurrar as partículas nas proximidades da entrada do gás, causando uma cavidade relativamente vazia, que se forma acima da entrada de ar, formando um arco compacto que oferece grande resistência ao fluxo de gás. Apesar disso a queda de pressão continua crescente. Com mais um pequeno aumento da vazão de gás, a cavidade se alonga para um jorro interno, e o arco compacto continua existindo acima do jorro interno, fazendo com que a queda de pressão no leito aumente até alcançar um valor máximo ($\Delta P_{\max}$) no ponto B, com uma velocidade superficial correspondente ($U_{\max}$).

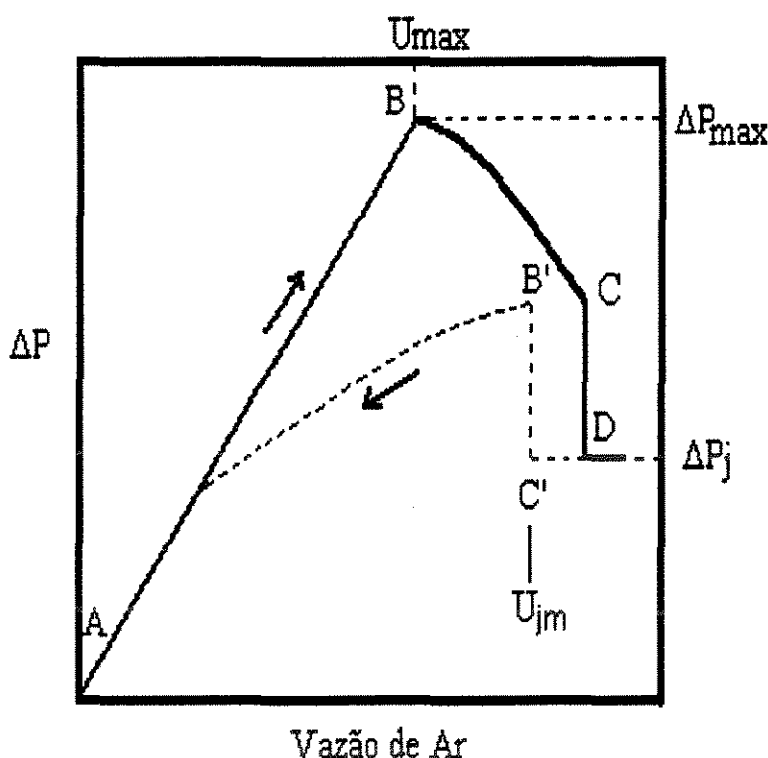


Figura 2.2 - Curva Característica do Leito de Jorro Convencional. Queda de Pressão no Leito vs. vazão de gás.

Com o aumento da vazão além do ponto B, a altura do jorro interno torna-se muito maior em comparação ao leito compactado acima do jorro. A queda de pressão começa a diminuir ao longo de BC. Aumentando-se um pouco mais a vazão até o ponto C, ocorre uma queda brusca da queda de pressão, as partículas são deslocadas do núcleo central causando uma evidente expansão no leito. Neste ponto o leito tende a formar pulsações de jorro interno. Após um ligeiro aumento da vazão, além do ponto C, num ponto denominado jorro incipiente, o jorro interno rompe através da superfície do leito. Quando isso acontece, a concentração de

sólidos na região diretamente acima do jorro interno diminui abruptamente, causando uma redução bem definida da queda de pressão até o ponto D, no qual o leito entra em regime com a estabilidade do jorro. Com aumento ainda maior na vazão, o gás adicional passa através da região do jorro, e a fonte se torna mais alta, oferecendo menos resistência ao fluxo sem nenhum efeito significativo na queda de pressão total, que a partir desse ponto permanece constante.

No processo inverso, diminuindo-se a vazão de gás, o leito permanece no estado de jorro estável até o ponto C', que representa a condição de jorro mínimo e neste ponto obtêm-se a velocidade de jorro mínimo (U_{jm}) que é a menor vazão necessária para se obter o jorro estável. Uma leve redução da velocidade do gás causa o colapso do jorro e a queda de pressão sobe rapidamente para o ponto B' e a partir desse ponto a queda de pressão decresce de acordo com B'-A à medida em que a vazão é reduzida. A curva principal fica agora abaixo da obtida com o aumento da vazão, porque ocorre somente uma interação gás-sólido e não mais a ação de ruptura do jato através do leito.

2.1.3 Equações para Predizer as Propriedades Médias Sólido-Fluido

Velocidade Terminal das Partículas (V_T) (lei de Stokes):

$$Re_T = (4/3 Ar/C_D)^{0,5} g(\phi) \quad (2.1)$$

em que: $Re_T = \rho_f d_p V_T / \mu_f$

$$Ar = \rho_f (\rho_s - \rho_f) g d_p^3 / \mu_f^2 \quad (Ar - \text{número de Arquimedes})$$

C_D é o coeficiente de arraste para uma partícula

$$g(\phi) = \phi (5\phi^3 - 7,57\phi^2 + 4,09\phi - 0,516)$$

ϕ = esfericidade das partículas

Velocidade de Mínima Fluidização (U_{mf}) (equação de Ergun, 1952):

$$Re_{mf} = (C_1^2 + C_2 Ar)^{0,5} - C_1 \quad (2.2)$$

em que: $Re_{mf} = \rho_f d_p \phi U_{mf} / \mu_f$

$$C_1 = 150 (1 - \epsilon_{mf}) / 1,75$$

$$C_2 = 1,75 / (\phi \epsilon_{mf})^3$$

2.1.4 Altura Máxima do Leito

Um dos fatores limitantes da estabilidade de um leito de jorro é a altura ou profundidade do leito. É possível estabelecer um valor máximo para essa altura nas condições de jorro estável sem que ocorra uma fluidização heterogênea, um movimento epistonado ou o estrangulamento do jorro. Esta altura é função da geometria do sistema e das propriedades e dimensões das partículas envolvidas. Quando a altura do leito for igual a altura máxima do leito onde se pode obter o jorro, a velocidade do fluido no topo do leito será igual a velocidade mínima de fluidização (Nagarkatti e Chatterjee, 1974). Passos et al. (1993) observaram que a altura máxima decresce com o aumento do diâmetro das partículas.

Lefroy e Davidson (1969) propuseram uma equação para o cálculo da altura máxima baseada no balanço de força das partículas no leito e supondo que $D_c \gg D_j$, em que D_j é o diâmetro do jorro:

$$H_{\max} = 0,168 d_p^{1/3} D_c^{8/3} D_i^2 \quad (2.3)$$

Littman et al. (1979) desenvolveram uma equação bastante útil para o cálculo da altura máxima em leitos de jorro convencionais de coluna cilíndrica. Esta equação é função apenas das propriedades do sistema (diâmetro da coluna e diâmetro da entrada do leito), e das propriedades fluido-partícula. A equação é válida para predizer a máxima altura em leitos que utilizam partículas grandes e esféricas, onde a fluidização do ânulo limita a penetração do jato do fluido com $A > 0,02$.

$$\frac{H_{\max} D_i}{D_c^2} = 0,218 + \left(\frac{0,005}{A} \right) \quad (2.4)$$

em que:

$$A = Re_{mf}^* Re_T (d_p / D_i) / Ar$$

$$Re_{mf}^* = \rho_f U_{mf} d_p / \mu_f = Re_{mf} / \phi$$

Morgan e Littman (1982), McNab e Bridgwater (1977), Littman e Morgan (1988) e Souza (1993), desenvolveram outras correlações para leitos de jorro convencionais envolvendo o parâmetro adimensional A.

Passos et al. (1993) em seus trabalhos ainda estabeleceram uma correlação para a altura máxima de leitos de jorro bidimensionais, que leva em consideração o parâmetro A_{2D} que identifica os mecanismos de instabilidade do jorro.

$$H_{\max} / L_1 = 0,605 + 6,21 \cdot 10^{-2} / A_{2D} \quad \text{para } A_{2D} \geq 0,044 \quad (2.5)$$

em que: $A_{2D} = Re_{mf}^* Re_T (d_p / L_j) / Ar \quad (2.6)$

$$Re_{mf}^* = Re_{mf} / \phi$$

$$Re_{mf} = \rho_f d_p \phi U_{mf} / \mu_f$$

$$Re_T = \rho_f d_p g(\phi) V_T / \mu_f$$

$$g(\phi) = \phi (5 \phi^3 - 7,57 \phi^2 + 4,09 \phi - 0,516)$$

$$Ar = \rho (\rho_s - \rho_f) g d_p^3 / \mu_f^2$$

2.1.5 Queda de Pressão Máxima e Queda de Pressão de Jorro

Os valores de queda de pressão de interesse prático no projeto e operação de um leito de jorro, são os correspondentes aos pontos B e D na Figura 2.2, que são, respectivamente, a queda de pressão máxima ($\Delta P_{\max}$) e a queda de pressão de jorro estável (ΔP_j), que determinam a potência operacional requerida para o processo.

Uma alta queda de pressão máxima geralmente está associada a uma alta taxa de fluxo de gás e sua ocorrência pode ser atribuída a energia requerida pelo gás para romper o leito compacto e formar um jorro interno na parte inferior do leito. Para que esse jorro interno subsequente se desenvolva para um jorro estável, as condições críticas, tais como tamanho das partículas, diâmetro do orifício de entrada de ar, altura do leito, etc., devem ser satisfeitas.

Malek e Lu (1965) com uma base de dados de vários materiais sólidos em colunas de 10-30 cm de diâmetro, com taxas de altura do leito sobre o diâmetro da coluna maiores que um ($H / D_c > 1$), chegaram à simples relação de que a queda de pressão máxima é aproximadamente igual ao peso do leito por unidade de área seccional. Esta relação,

primeiramente proposta por Becker (1965) e mais tarde por Pallai e Németh (1969) é equivalente à equação:

$$\Delta P_{\max} = H(\rho_s - \rho_f)(1 - \varepsilon_0)g = H\rho_b g \quad (2.7)$$

Gelperin et al. (1960) obtiveram valores experimentais de $\Delta P_{\max}$, os quais em alguns casos foram de duas a três vezes maiores que o peso do leito. Suas correlações empíricas finais foram:

$$\frac{-\Delta P_{\max}}{H\rho_b g} = 1 + 0.062 \left(\frac{D_c}{D_i} \right)^{2.54} \left(\frac{D_c}{D_i} - 1 \right) \left(\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \right)^{-0.18} \quad (2.8)$$

em que θ é o ângulo do cone e D_c o diâmetro da coluna do leito. A faixa de variáveis cobertas foi $\theta = 10^\circ - 60^\circ$ e $H = 10 - 25$ cm, o diâmetro de entrada sendo restringido a 5cm e o material sólido a quartzo fino de 0.16 - 0.28 mm. O termo D_c é relacionado geometricamente às outras dimensões de leitos cônicos pela equação:

$$D_c = D_i + 2H \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.9)$$

Mukhlenov e Gorshtein (1965), que também trabalharam com leitos cônicos, argumentaram que a razão da queda de pressão máxima e a queda de pressão de jorro estável deveria sustentar uma relação com a geometria do sistema e propriedades do gás e sólidos. Iniciando com análises dimensionais, eles chegaram a seguinte correlação empírica de seus dados experimentais:

$$\frac{\Delta P_{\max}}{\Delta P_j} = 1 + 6.65 \left(\frac{H}{D_i} \right)^{1.2} \left(\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \right)^{0.5} (Ar)^{0.2} \quad (2.10)$$

em que ΔP_j é dado pela relação:

$$\frac{-\Delta P_j}{H\rho_b g} = \frac{7.68 \left(\tan \frac{\theta}{2} \right)^{0.2}}{Re^{0.2} \left(\frac{H}{D_i} \right)^{0.33}} \quad (2.11)$$

Ar é o número de Archimedes e depende das propriedades do gás e do sólido. A faixa de tolerância ($\pm 10\%$) dos dados para a Eq (2.10) é a seguinte: $\theta = 12^\circ - 60^\circ$; $D_i = 1.03 - 1.29$ cm; $H = 3 - 15$ cm ; $dp = 0.5 - 2.5$ mm e $\rho_s = 0.98 - 2.36$ mg/m³.

Nicolaev e Golubev (1964) com uma aproximação grosseira, afirmaram que a razão $\Delta P_{\max} / \Delta P_j$ para leitos cônicos fica entre 1.5 e 2.0.

Taranto (1992), utilizou seus dados experimentais para verificar uma correlação na literatura desenvolvida para leitos de jorro convencionais e adaptada para leito de jorro bidimensional. Essa adaptação foi feita em relação aos diâmetros do leito, que foram substituídos pelos diâmetros equivalentes, calculados segundo a definição da Equação 2.12.

$$Deq = 4.R_H \quad (2.12)$$

em que: $R_H = \frac{\text{área do escoamento}}{\text{perímetro molhado}}$

Dessa forma a equação para queda de pressão máxima foi a seguinte:

$$\frac{\Delta P_{\max}}{H_o \rho_b g} = 1 + 6.65 \left(\frac{(D_c)_{eq}}{(D_i)_{eq}} \right)^{2.54} \left(\frac{(D_c)_{eq}}{(D_i)_{eq}} - 1 \right) \left(\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right)^{-0.18} \quad (2.13)$$

A Tabela 2.1 apresenta outras correlações para queda de pressão máxima e queda de pressão de jorro encontradas na literatura para leitos de jorro convencionais em condições específicas das variáveis de operação.

Tabela 2.1 - Correlações para $\Delta P_{\max}$ e ΔP_j em Leitos de Jorro Convencionais

Correlações	Faixa de Variáveis	Ref.
$\Delta p_j = \frac{2}{3} \left(\frac{M}{A_{cil}} \right) g$ (2.14)	$d_p = 4,0 - 6,0 \text{ mm}$ $\theta = 60^\circ$ $\rho_s = 1110 - 1190 \text{ Kg/m}^3$ $\phi = 0,8 - 0,9$	Malek e Lu (1965)
$\Delta P_j = (\rho_s - \rho_f)(1 - \varepsilon_{mf})g(0,75H_{\max})$ (2.15)	Não definida.	Mamuro e Hattori (1969)
$\frac{\Delta P_j}{\Delta P_{\max}} = 0,8 - 0,01 \frac{D_c}{D_i}$ (2.16)	Para vários tamanhos de partículas. $D_c = 15,2 - 61,0 \text{ cm}$	Pallai e Németh (1969)
$\frac{\Delta P_j}{H\rho_b g} = \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{0,14 \frac{(D_c - D_i)}{H}}$ (2.17)	$d_p = 0,92 - 4,95 \text{ mm}$ $D_c = 10,0 - 20,0 \text{ cm}$ $D_i = 0,5 - 3,0 \text{ mm}$ $H = 20,0 - 50,0 \text{ cm}$	Yokogawa e Isaka (1971)
$\Delta P_j = 0,67(1 - \varepsilon_{mf})H\rho_s g$ (2.18)	Mesmas condições da Eq. 2.14	Nascimento et al. (1976)
$\frac{\Delta P_j}{H\rho_b g} = 1,15 \left(\frac{H}{D_c} \right)^{1/2} \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{1/3}$ (2.19)	Mesmas condições da Eq. 2.17	Ogino et al. (1993)
$\Delta P_{\max} = (\Delta P_{\max})_{cone} + (\Delta P_{\max})_{cilindro}$ (2.20)	$d_p = 1,0 - 8,0 \text{ mm}$ $D_c = 15 \text{ cm}$ $D_i = 2,0 - 6,0 \text{ cm}$ $H_c = 1,2 - 16,8 \text{ cm}$ $\theta = 15 - 75^\circ$ $\rho_s = 2420 \text{ Kg/m}^3$	San Jose et al. (1995)
$\left(\frac{\Delta P_{\max}}{\Delta P_j} \right)_{cone} = 1 + 0,116 \left(\frac{H_c}{D_i} \right)^{0,5} \left(\tan \frac{\theta}{2} \right)^{-0,8} Ar^{0,0125}$ (2.21)		
$\left(\frac{\Delta P_{\max}}{\Delta P_j} \right)_{cone} = 1 + 0,35 \left[\frac{(H_0 - H_c)}{D_c} \right]^{0,1} \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{1,1} Ar^{0,1}$ (2.22)		

Correlações	Faixa de Variáveis	Ref.
$-\Delta P_j = (-\Delta P_j)_{\text{cone}} + (-\Delta P_j)_{\text{cilindro}} \quad (2.23)$		
$\left(\frac{-\Delta P_j}{H_c \rho_b g} \right)_{\text{cone}} = 1,20 \left(\tan \frac{\theta}{2} \right)^{-0,11} (Re_i)_{jm}^{-0,06} \left(\frac{H_c}{D_i} \right)^{0,08} \quad (2.24)$	dp = 1,0 - 8,0 mm D _c = 15 cm D _i = 2,0 - 6,0 cm H _c = 1,2 - 16,8 cm θ = 15 - 75° ρ _s = 2420 Kg/m ³ H ₀ < 35 cm φ = 1	San Jose et al. (1995)
$\left(\frac{-\Delta P_j}{(H_0 - H_c) \rho_b g} \right)_{\text{cilindro}} = 0,0385 \left[\frac{(H_0 - H_c)}{D_c} \right]^{0,12}$		
$\left(\frac{D_c}{D_i} \right)^{0,69} (Re_i)_{jm}^{0,31} \quad (2.25)$		
$(Re_i)_{jm} = 0,126 Ar^{0,5} \left(\frac{D_c}{D_i} \right)^{1,68} \left(\tan \frac{\theta}{2} \right)^{-0,57} \quad (2.26)$		

2.1.6 Velocidade de Jorro Mínimo

A velocidade de jorro mínimo é obtida da curva característica dos leitos de jorro pelo decréscimo da vazão de fluido até um ponto em que uma leve diminuição ocasiona o colapso do jorro (Figura 2.2).

O valor da velocidade mínima de jorro estável depende das propriedades sólido-fluido, bem como da geometria do leito. Numa coluna cilíndrica, para um dado material, U_{jm} aumenta com o aumento da altura do leito e com a diminuição do diâmetro do leito. O diâmetro do bocal de entrada tem pouca influência sobre essa velocidade (Mathur e Epstein, 1974).

Dentre várias correlações desenvolvidas para o cálculo da velocidade de jorro mínimo a mais generalizada é a equação de Mathur e Gishler, (1955) que apesar de empírica demonstra ser válida para muitos dados da literatura. Essa equação é a seguinte:

$$U_{jm} = \left(\frac{d_p}{D_c} \right) \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2gH(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.27)$$

Thorley et al. (1959) estabeleceram uma correlação empírica para uma coluna cilíndrica com 2 pés de diâmetro com cerca de 15% de erro. Mathur e Epstein, (1974), organizaram várias equações e discutiram com muitos detalhes a equação de Mathur e Gishler (1955) e a equação de Becker (1961). Posteriormente Grbavić et al., (1976) desenvolveram uma outra correlação para colunas cilíndricas baseada no modelo de Mamuro e Hattori (1968). Littman e Morgan (1983), sugeriram uma correlação geral para U_{jm} em coluna cilíndrica e mostraram que essa velocidade normalizada (U_{jm} / U_{mf}) é função de três parâmetros adimensionais. Esta correlação mostrou um desvio médio de 11,1%.

Fane e Mitchell (1984), propuseram uma correlação dimensional empírica para $D_c > 0,4$ m. Lim e Grace (1987), realizaram um estudo em leitos de coluna cilíndrica com 0,91 m de diâmetro e utilizaram seus resultados para verificar algumas correlações mais usadas para o cálculo da velocidade de jorro mínimo. Passos et al. (1994), em seus trabalhos sobre ampliação de escala em leitos de jorro, citaram mais uma correlação bastante útil desenvolvida por Littman e Morgan (1988).

Passos et al. (1991) e Passos (1991) desenvolveram uma correlação para o cálculo da velocidade de jorro mínimo em leitos de jorro bidimensionais:

$$Re_{jm} = (C_3^2 + C_4(1 - Y^*)Ar)^{0.5} \quad \text{para } A_{2D} \geq 0,014 \quad (2.28)$$

em que:

$$Re_{jm} = \rho_f d_p \phi U_{jm} / \mu_f$$

$$C_3 = 18 (1 - \epsilon_{jm}) / [(X_{2D}^*)^{(n-1)} \cos^2 \lambda]$$

$$C_4 = (\epsilon_{jm} \phi)^3 / [2(X_{2D}^*)^{(n-1)}]$$

$$\lambda = 180^\circ - 2\arctan [D / \tan (45^\circ - \theta_c / 2)]$$

$$D = 2 \left[X_{2DH_{max}}^* / X_{2D}^* \right]^{(n-1)}$$

$$X_{2DH_{max}}^* = 1 / (H_{max} / L_1 + 1)$$

$$X_{2D}^* = 1 / (1 - H_{jm} / L_1)$$

$$Y^* = 1 - (\Delta P_{jm} / \Delta P_{mf})$$

$$n = \tan^2 (45^\circ + \theta_c / 2)$$

Taranto (1992), verificou através de seus dados experimentais, uma correlação desenvolvida para leitos de jorro convencionais e adaptada para leito de jorro bidimensional. Essa adaptação, como na Equação 2.13, também foi feita em relação aos diâmetros do leito, que foram substituídos pelos diâmetros equivalentes, calculados segundo a definição da Equação 2.12. A equação para a velocidade de jorro mínimo adaptada para a geometria bidimensional foi a seguinte:

$$U_{jm} = \left(\frac{d_p}{(D_c)_{eq}} \right) \left(\frac{(D_i)_{eq}}{(D_c)_{eq}} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{2gH_0(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.29)$$

A Tabela 2.2 apresenta outras correlações para velocidade de jorro mínimo encontradas na literatura dos leitos de jorro convencionais em condições específicas das variáveis de operação.

Tabela 2.2 - Correlações para U_{jm} em Leitos de Jorro Convencionais

Correlações	Faixa de Variáveis	Ref.
$U_{jm} = \frac{1}{1,74} \left\{ \left(\frac{d_p}{D_c} \right) \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{\frac{1}{3}} \left[\frac{2gH(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{\frac{1}{2}} - 0,25 \right\} \quad (2.30)$	$d_p = 0,5 - 0,8 \text{ mm}$ $D_c = 5,0 - 10,0 \text{ cm}$ $D_c / D_i = 12,0$ $H_c = 1,2 - 16,8 \text{ cm}$ $H / D_c = 1,0 - 3,0$ $\rho_s = 2420 - 7070 \text{ Kg/m}^3$ $\phi = 1$ e $\theta = 60^\circ$	Abdelrazek (1961)
$U_{jm} = U_{mf} \left(\frac{H/H_{max}}{1,5} + 1 \right) \quad (2.31)$	$d_p = 1,6 - 2,5 \text{ mm}$ $D_c = 6,0 \text{ cm}$ $D_i = 0,6 - 1,0 \text{ cm}$ $\theta = 60^\circ$ $\phi = 1$	Pallai e Németh (1969)
$U_{jm} = 0,663 d_p^{0,741} H^{0,592} \left[\frac{2gH(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{0,5} \quad (2.32)$	$d_p = 3,61 - 6,27 \text{ mm}$ $D_c = 30,5 \text{ cm}$ $D_i = 5,08 \text{ cm}$ $H = 50 - 70 \text{ cm}$ $\theta = 35^\circ$ $\rho_s = 1190 - 1310 \text{ Kg/m}^3$	Brunello et al. (1974)

Correlações	Faixa de Variáveis	Ref.
$U_{jm} = 0,977 \left(\frac{d_p}{D_c} \right)^{0,615} \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{0,274} \left[\frac{2gH(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{0,324} \quad (2.33)$	$d_p = 0,655 - 2,23 \text{ mm}$ $D_c = 20,0 \text{ cm}$ $D_i = 2,2 - 3,0 \text{ cm}$ $H_c = 1,2 - 16,8 \text{ cm}$ $\theta = 60^\circ$ $\rho_s = 2650 \text{ Kg/m}^3$ $H = 25 - 50 \text{ cm}$	Uemaki et al (1983)
$U_{jm} = 10,6(2gH)^{0,5} \left(\frac{d_p}{D_c} \right)^{1,05} \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{0,266} \left(\frac{H}{D_c} \right)^{-0,095} \left[\frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{0,256} \quad (2.34)$	$d_p = 2,1 - 2,8 \text{ cm}$ $D_c = 24 - 45 \text{ cm}$ $D_i = 2,1 - 3,5 \text{ cm}$ $\theta = 60^\circ$ $H = 24 - 40 \text{ cm}$	Choi e Meisen (1992)
$U_{jm} = 0,0151 \left[\frac{\epsilon_0^4}{2(1 - \epsilon_0)} \right]^{\frac{1}{2}} \left[(1 - \epsilon_0) \frac{\rho_f(\rho_s - \rho_f)gD_c^3}{\mu^2} \right]^{\frac{1}{4}} \left(\frac{d_p}{D_c} \right) \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{\frac{1}{3}} \left[\frac{2gH(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.35)$	$d_p = 1,0 - 8,0 \text{ cm}$ $D_c = 10,0 - 20,0 \text{ cm}$ $D_i = 0,5 - 3,0 \text{ cm}$ $H = 20 - 50 \text{ cm}$	Ogino et al (1993)
$U_{jm} = \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^2 \left(\frac{\mu_f}{\rho d_p} \right) (Re_i)_{jm} + \left(\frac{d_p}{D_c} \right) \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{0,1} \left[\frac{2gH(H_D - H_c)(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.36)$	$d_p = 1,0 - 8,0 \text{ cm}$ $D_c = 15 \text{ cm}$ $D_i = 2,0 - 6,0 \text{ cm}$ $H_c = 1,2 - 18,6 \text{ cm}$ $\theta = 15 - 75^\circ$ $\rho_s = 2420 \text{ Kg/m}^3$ $H_0 < 35 \text{ cm}$ $\phi = 1$	San Jose et al (1995)

2.2 MODIFICAÇÕES DOS LEITOS DE JORRO CONVENCIONAIS

As modificações do leito de jorro convencional foram propostas para melhorar a sua operacionalidade e trazer melhor ajuste entre as características do leito e a necessidade do processo. Passos et al. (1987) classificaram essas modificações da seguinte forma:

- (a) - Mudanças na geometria do leito:
 - a.1 - Leitos de jorro bidimensionais, esquematizado na Tabela 2.3, ou
 - a.2 - Leitos de jorro cônicos, esquematizado na Tabela 2.3.

(b) - Modificações da operação de jorro pela:

b.1 - Introdução de “ draft-tube “ ou “ draft-plates “ no leito de partículas (Grbaviic et al., 1992), ver Tabela 2.4.

b.2 - Introdução de fluido adicional na região anular do leito de jorro (leitos de jorro fluidizados) (Chatterjee, 1970), mostrado na Tabela 2.4.

b.3 - Introdução de qualquer dispositivo mecânico para melhorar ou produzir circulação de sólidos (leito de jorro de transporte mecânico, leito de jorro vibracional).

Uma classificação mais geral para essas modificações pode ser encontrada nos trabalhos de Mathur e Epstein (1974), Mujumdar (1984), e Passos et al. (1987).

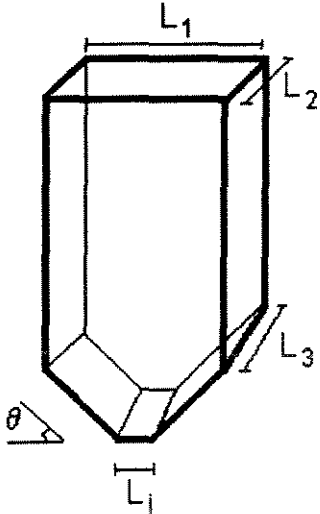
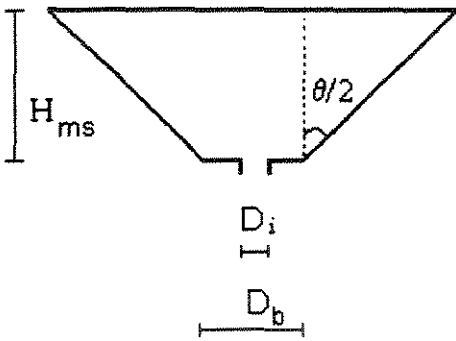
Embora, ambos, leitos de jorro bidimensionais e leitos de jorro cônicos requererem uma baixa operação na queda de pressão, altas vazões de fluido são necessárias para manter a estabilidade do jorro em leitos de jorro bidimensionais (Passos et al., 1991). A introdução de “draft-tube” ou “draft-plates” podem reduzir a queda de pressão de jorro mínimo (ΔP_{jm}) e melhorar a capacidade volumétrica do leito. Entretanto a quantidade de fluido que vai para a região anular diminui significativamente (Claflin & Fane, 1984). A taxa de fluxo de fluido na região anular é grande em leitos de jorro fluidizados. A flexibilidade de operação também é melhorada por causa da diferença de regimes de fluxos obtidos pela variação do fluxo de fluido na região anular (Vukovic et al., 1984; Chatterjee et al., 1983; Passos et al., 1989).

Essas modificações parecem muito atrativas para resolver alguns dos problemas de operação nos leitos de jorro convencionais, entretanto precauções devem ser tomadas na escolha do projeto apropriado para um dado processo.

Mujumdar (1984), sugeriu o uso da geometria bidimensional para melhorar a capacidade volumétrica pela simples extensão da largura do leito, minimizando o problema de ampliação de escala. Um leito de jorro bidimensional consiste basicamente de um leito retangular de paredes verticais planas e uma base angular, que permite uma boa recirculação das partículas para dentro do jorro, evitando a formação de zonas mortas, e com entrada de ar no centro do leito. As características de vazão de fluido em leitos de jorro bi-dimensionais de

partículas grossas, dependem das interações parede-partícula, bem como das propriedades fluido-partícula.

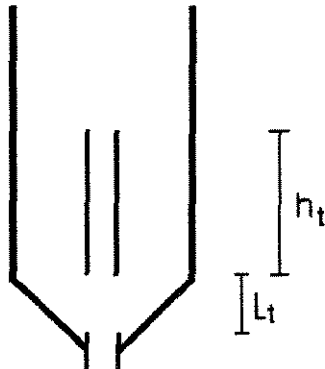
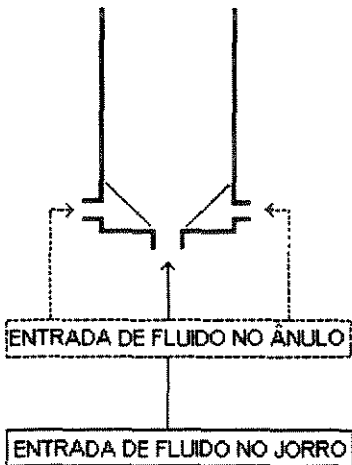
Tabela 2.3 - Leitos de Jorro não Convencionais: Mudanças na Geometria do Leito
(Passos et al., 1994).

DESENHO ESQUEMÁTICO	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS
(a) LEITOS DE JORRO BIDIMENSIONAIS	
	- a melhora na capacidade volumétrica se dá pela simples extensão de L_2 (Mujumdar, 1984); - uma alta taxa de fluido e uma baixa queda de pressão no jorro mínimo (passos et al., 1991).
(b) LEITO DE JORRO CÔNICO	
	- não há limitações para a altura do leito; - baixa queda de pressão de jorro mínimo e altas taxas de fluido na região anular (Povrenoic et al., 1987).

Para resolver o problema de ampliação de escala e capacidade de secagem dos leitos de jorro convencionais, Kalwar et al. (1988) sugeriram que os leitos de jorro bi-dimensionais fossem dimensionalizados da seguinte forma: a espessura da entrada de ar (L_3) deve ser

sempre igual à espessura do leito (L_2), e a largura da entrada de ar, ou largura do jorro (L_j) deve ser mantida na faixa de 1/6 a 1/20 da largura do leito (L_1).

Tabela 2.4 - Leitos de Jorro não Convencionais: Mudanças na Operação de Jorro
(Passos et al., 1994).

DESENHO ESQUEMÁTICO	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS
(a) LEITOS DE JORRO COM "DRAFT TUBE"	
	- não há limitações para a altura do leito; - grande controle da taxa de circulação de sólidos; - a queda de pressão e a taxa de fluxo de fluido nas condições de jorro mínimo são baixas; - a taxa de fluxo de fluido na região anular é baixa (Clafin e Fane, 1984).
(b) LEITO DE JORRO FLUIDIZADO	
	- maior flexibilidade na operação; - altas taxas de fluxo na região anular; - a condição mínima de jorro é uma função da entrada de jato de fluido na região anular (Vukovic et al., 1984 e Passos, 1991).

2.3 CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE EM LEITOS DE JORRO CONVENCIONAIS

De acordo com Mathur e Epstein (1974), existem três mecanismos diferentes os quais podem causar a terminação do jorro para alturas do leito maiores do que $H_{\max}$. Estes mecanismos são a fluidização na região anular, o estrangulamento do jorro e o crescimento da instabilidade.

2.3.1 Fluidização na Região Anular

Esse mecanismo ocorre em leitos de jorro convencionais de partículas grossas ($d_p > 1\text{mm}$) jorrados por fluxo de ar à temperatura ambiente e é caracterizado por um decréscimo de $H_{\max}$ com o aumento de d_p .

Littman e Morgan (1988), analisaram os principais parâmetros adimensionais para descrever esse mecanismo. Esses parâmetros e suas correlações estão resumidos na Tabela 2.5. Esses autores usaram as seguintes condições limites para desenvolver suas correlações:

- (i) a velocidade do fluido no topo do ânulo é igual a velocidade de mínima fluidização (U_{mf}) em $h = 1$ ($h = H_{jm} / H_{\max}$);
- (ii) a velocidade de entrada do fluido é, pelo menos, igual a velocidade terminal das partículas (V_t) em $h = 1$;
- (iii) a taxa entre a queda de pressão de jorro mínimo e a queda de pressão de mínima fluidização é constante para um dado sistema.

A Equação 2.37 estabelece um valor máximo de D_i acima do qual um jorro estável termina em um dado leito de jorro convencional.

A Equação 2.38 mostra os parâmetros básicos necessários para predizer $H_{\max}$ em leitos de jorro convencionais de partículas grossas. O parâmetro A representa a entrada de energia mínima requerida para sustentar o jorro relativo à perda de energia friccional mínima através do jorro em $h = 1$. Uma vez que A diminui com o decréscimo de d_p , deve haver um valor de A no qual esse mecanismo muda para um que envolva o estrangulamento do jorro. Morgan e

Littman (1982) registraram tais transições em $A = 0,02$ para partículas esféricas e em $A = 0,014$ para partículas não esféricas.

Tabela 2.5 - Mecanismo de Terminação do Jorro: Fluidização no Topo do Ânulo ⁽¹⁾
(Passos et al., 1994).

CORRELAÇÕES	REFERÊNCIA
$D_c / D_i \geq (V_T / U_{mf})^{1/2}$ $h \leq 1$ (2.37)	Littman e Morgan (1988)
$H_{max} D_i / D_c^2 = K A$ (2.38)	Morgan e Littman (1982)
$K = 0.218 / A + 5 \times 10^{-3} / A^2$ e $A \geq 0.002$	Partículas Esféricas
$K = 0.218 / A + 5.13 \times 10^{-3} / A^2 +$ $2.54 \times 10^{-5} / A^3$ e $A \geq 0.014$	Partículas não esféricas
em que:	
$A = Re_{mf}^* Re_T (d_p / D_i) / Ar$	Re_{mf} - Predito pela Eq. (2.2)
$Re_{mf}^* = \rho_f U_{mf} d_p / \mu_f = Re_{mf} / \phi$	Ar - definido na Eq. (2.1)
$H_{max} / D_c = (D_c / d_p) (D_c / D_i) (1700 / Ar) \times$ $\times [(1 + 35.9 \times 10^{-6} Ar)^{0.5} - 1]^2$ (2.39) para $A \leq 0,02$	McNab e Bridgwater (Epstein e Grace, 1984) Souza (1993)

(1) - Mecanismo característico de leitos de jorro convencionais de partículas grossas, em que $A \geq 0,014$.

McNab e Bridgwater (1984), desenvolveram uma equação semi-empírica para H_{max} em leitos de jorro convencionais. Essa equação prediz razoavelmente bem os valores de H_{max} na faixa de A próximo a 0,014 (Souza, 1992). A correlação de McNab e Bridgwater pode ser escrita como uma função de A , (D_i / d_p) e (D_c / D_i) como mostra a Equação 2.39. Da Tabela 2.5, pode-se ver que a principal diferença entre a Equação 2.39 e a Equação 2.38 é o efeito de D_c sobre H_{max} .

2.3.2 Estrangulamento do Jorro

O estrangulamento do jorro tem sido estudado em leitos de jorro convencionais de partículas finas ($d_p < 1$) jorradas por fluxo de ar ou água à temperatura ambiente. A cavidade do jorro interno degenera dentro de bolhas (ou slugs) na região inferior do leito em $h = 1$. A altura máxima de leito de jorro estável aumenta conforme d_p aumenta.

Epstein e Chandnani (1987), estudaram as características de jorro de gás para partículas finas em leitos de jorro convencionais. Seus resultados mostram um regime de jorro progressivamente incoerente no jorro mínimo. Suas características são uma distorção na fonte, movimento de ondas ao longo da interface jorro-ânulo e uma grande zona estagnada na zona periférica inferior externa do ânulo.

Com o aumento da taxa de fluxo de gás, o volume da zona estagnada diminui junto com um significativo aumento da queda de pressão de jorro. Os critérios para o jorro baseados no mecanismo de estrangulamento do jorro em leitos de jorro convencionais são mostrados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Mecanismo de Terminação do Jorro: Estrangulamento do Jorro ⁽²⁾ (Passos et al., 1994).

CORRELAÇÕES	REFERÊNCIA
$D_i / d_p \leq 25$ (2.40) $d_{ps} \cong 1.15 \phi d_p$	Epstein e Chandnani (1987)
$0,55 \leq U_{jm} / U_{mf} \leq 0,70$ (2.41) em $h = 1$	
$0,003 \leq A < 0,014$ (2.42)	Passos (1991)
$H_{max} D_i / D_c^2 = f(A, D_i / D_c)$ (2.43) $= (0,655 / A D_i / D_c)^{0,857}$	Littman e Morgan (1988)

(2) - Mecanismo característico de leitos de jorro convencionais de partículas finas, em que $A < 0,014$

Grace e Lim (1987), sugeriram que a Equação 2.40 pode prever bem as transições de regimes na região de entrada de um leito fluidizado. Essa observação mostra que esse mecanismo está envolvido com as características do jorro acima do bocal de entrada ao invés da fluidização no topo da região anular.

A velocidade de jorro mínimo (U_{jm}) é mais baixa do que a velocidade de mínima fluidização (U_{mf}) em $h = 1$, como pode ser visto na Equação 2.41 (Tabela 2.6). Isto indica que os regimes borbulhante ou de “slugging” iniciam na região central inferior do leito antes que o topo do ânulo seja fluidizado.

O mecanismo de estrangulamento do jorro também pode ocorrer em leitos de jorro convencionais de partículas grossas para valores de A mais baixos que 0.014. Tais valores são obtidos pelo aumento de D_i e/ou variação das propriedades dos fluidos. Wu et al. (1987), mostraram que leitos de jorro convencionais de partículas grossas ($d_p \approx 1.6$ mm) mudam suas características de jorro conforme a temperatura do leito é aumentada até 420 °C. Passos (1991), demonstraram que o parâmetro A prediz bem essa mudança do mecanismo de terminação do jorro observada por Wu et al.

A correlação para H_{max} proposta por Littman e Morgan (1988) sugere que D_c é o parâmetro geométrico mais importante para prever H_{max} em leitos de jorro convencionais de partículas finas (ver Eq.2.43 na Tabela 2.6).

2.3.3 Crescimento da Instabilidade

O mecanismo de crescimento da instabilidade aparece na literatura como uma característica de leitos de geometria bidimensional, mas não é bem definido como um mecanismo de terminação de jorro.

Volpicelli et al. (1967) descreveu dois tipos de instabilidade em leitos de jorro bidimensionais de partículas finas e grossas. O primeiro é relacionado ao desenvolvimento de ondas na região inferior do jorro. Essas ondas se movem para cima ao longo da interface jorro-ânulo como pulsações. O segundo tipo de instabilidade é correlacionado com oscilações do jorro em torno de seu eixo.

A primeira instabilidade descrita por Volpicelli et al. (1967) foi identificada por Epstein e Chandnani (1987) como o regime de jorro progressivamente incoerente. Esse regime ocorre em leitos de jorro convencionais quando o estrangulamento do jorro é o mecanismo responsável pela terminação do jorro.

Estudos de leitos de jorro bidimensionais de partículas grossas (Anderson et al., 1984 e Ojalvo, 1989) mostram que pequenas mudanças em L_j levam a diferentes regimes de jorro com características variando da fluidização do ânulo ao estrangulamento do jorro. Nem os critérios de estabilidade, nem os mecanismos de terminação do jorro haviam sido estudados anteriormente na literatura de leitos de jorro bidimensionais.

2.4 CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE EM LEITOS DE JORRO BIDIMENSIONAIS

Passos et al., (1993) desenvolveram um importante trabalho sobre a estabilidade de leitos de jorro bidimensionais. Foram relacionados os parâmetros adimensionais de relevância para a terminação do jorro e correlações importantes utilizando-se partículas pequenas e grandes. O parâmetro adimensional A_{2D} , definido pelos autores, pode ser usado para identificar os mecanismos terminais do jorro. Para $A_{2D} < 0,044$ o estrangulamento do jorro é o principal mecanismo. Para $A_{2D} > 0,094$, a fluidização do ânulo é o mecanismo que governa a estabilidade do jorro. Para $0,044 < A_{2D} < 0,094$, ocorre a transição entre os dois mecanismos, que se caracteriza por uma oscilação no regime com uma movimentação periódica de jorro, em torno do eixo central do leito.

Passos et al., (1993) sugerem ainda que existe uma analogia entre o jorro cônico e o jorro bidimensional e ela pode ser expressa na forma de um diâmetro da entrada do jorro máximo equivalente:

$$\pi (D_{i \max})_{eq}^2 / 4 = (L_2 \cdot L_j)_{max} \quad (2.44)$$

L_2 = Espessura da coluna bidimensional (m)

L_j = Largura do jorro

$(D_{i \max})_{eq}$ = Diâmetro máximo equivalente do orifício de entrada do leito (m)

Os critérios de estabilidade e as equações fluidodinâmicas para leitos de jorro bidimensionais são relacionados na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Critérios de Estabilidade - Equações Fluidodinâmicas para Leitos de Jorro Bidimensionais (Passos et al., 1994).

CORRELAÇÕES	REFERÊNCIA
$L_1 / L_j \geq V_T / U_{mf} \quad (2.45)$ em que: U_{mf} - predita por Passos (1991) V_T - predita pela eq. (2.1)	Passos et al., (1993) Passos (1991)
$H_{max} / L_1 = 0,605 + 6,21 \times 10^{-2} / A_{2D}$ $- 2,9 \times 10^{-3} / A_{2D} \quad (2.46)$ para $A_{2D} \geq 0,044$ em que: A_{2D} - definido na eq. (2.6)	Passos et al. (1993)
$L_2 / L_j \leq 650 (d_p \phi / L_j)^2 \quad (2.47)$	Passos et al. (1993)

A Equação 2.45 é similar à Equação 2.37 e prediz o valor mínimo de (L_1 / L_j) acima do qual o jorro termina para alturas de leitos maiores do que H_{max} devido à fluidização no topo da região anular.

A Equação 2.46 foi desenvolvida com base nos balanços de energia e momento. Essa equação corresponde às Equações 2.38 e 2.39 da Tabela 2.5. Os parâmetros A_{2D} e A são análogos em definição.

2.5 AMPLIAÇÃO DE ESCALA

A principal informação requerida para o cálculo e projeto de leitos de jorro é o tamanho do leito em que o jorro possa ocorrer e a potência do soprador para um processo específico. O procedimento de cálculo irá depender do tipo de processo no qual o sistema é projetado. Mathur e Epstein (1974), citaram as principais considerações para o projeto com

relação aos vários tipos de processos para o qual um leito de jorro pode ser usado. Por mais simples que seja o tipo de processo o procedimento geral para o projeto de um leito de jorro torna-se basicamente o mesmo dos leitos fluidizados. A diferença dos cálculos para o projeto e ampliação de escala dos dois sistemas é a taxa de fluxo requerida. A velocidade de jorro mínimo, ao contrário da velocidade de mínima fluidização, é dependente do tamanho e geometria do leito. Em contraste, a taxa de fluxo correspondente na fluidização é independente da altura do leito e é diretamente proporcional a área da seção transversal da coluna.

Embora muitas equações baseadas em leitos de pequena escala ($D_c < 0,3 \text{ m}$) estão disponíveis para predizer as propriedades hidrodinâmicas de leitos de jorro, há ainda consideráveis incertezas em relação aos critérios adequados de ampliação de escala. A maioria das equações existentes não trabalham bem para grandes colunas. Recentemente, alguns dados experimentais foram obtidos em colunas consideravelmente grandes de até 1,1 m de diâmetro (Fane e Mitchell, 1984; Green e Bridgwater, 1983; Lim e Grace, 1987; He et al., 1992). Entretanto, modelos não totalmente disponíveis ou equações para grandes colunas não foram desenvolvidas devido à falta de dados suficientes. Estudos de ampliação de escala em leitos de jorro são entretanto de grande importância. Lim e Grace (1996) examinaram se as relações de escala propostas por Glicksman (1984) para ampliação de escala de leitos fluidizados poderiam ser adaptadas para ampliação de escala de leitos de jorro. Um resumo de suas análises e de seus resultados será apresentado nos tópicos a seguir.

2.5.1 Princípio da Similaridade

O princípio da similaridade é freqüentemente usado na obtenção de dados experimentais para representar o complexo fenômeno de fluxo em grande escala, isto é, para calcular cargas de vento em construções e para projetar cascos de navios. O conceito básico é que se dois campos são geometricamente similares e são operados com valores idênticos de todos os importantes parâmetros adimensionais independentes, então as variáveis adimensionais dependentes também devem ser idênticas nos locais correspondentes (Bisio e Kabel, 1985).

Esse simples princípio hidrodinâmico se aplica também a leitos fluidizados. Prescrições de grupos adimensionais para caracterizar a dinâmica de leitos fluidizados podem ser traçadas

de acordo com Romero e Johanson (1962). Muitos grupos de pesquisadores também verificaram experimentalmente as relações de escala propostas por Glicksman (Newby e Keairns, 1986; Zhang e Yang, 1987; Roy e Davidson, 1988; Glicksman et al., 1991).

Uma regra simplificada de similaridade foi desenvolvida por Horio et al. (1986) baseada em equações de bolha governantes e dinâmica de gás intersticial desenvolvida por Horio et al. (1983). Essa regra de similaridade requer menos condições de controle do que a de Glicksman (1984). Entretanto a regra de similaridade de Horio et al. é válida somente para leitos fluidizados borbulhantes. Para leitos turbulentos, leitos rápidos e leitos de jorro, diferentes regras são requeridas. Horio et al. (1989) desenvolveram outra lei de escala para leitos fluidizados circulantes. Ao mesmo tempo, Glicksman(1988) mostrou que seus parâmetros originais se reduzem para os de Horio et al. (1986a) quando o número de Reynolds da partícula, $Re_p = \rho_f U d_p / \mu_f$, é pequeno (< 4), uma condição a qual se aplica diferentemente em leitos de jorro.

2.5.1.1 Considerações Sobre Leitos de Jorro

Embora existam muitas características comuns entre leitos fluidizados e leitos de jorro, existem também diferenças significantes entre os mesmos. A mais notável, a região anular de um leito de jorro constitui um movimento do leito compacto com fluxo intersticial de fluido em contracorrente, enquanto que os sólidos em leitos fluidizados têm movimento mais aleatório inteiramente sustentado pelo gás. Existe uma substancial constante partícula-partícula na região anular dos leitos de jorro, de modo que as características reológicas dessa fase densa possam ter um papel mais importante do que em leitos fluidizados, onde a reologia da fase densa é comumente ignorada. Entretanto, antes dos grupos adimensionais propostos por Glicksman (1984) poderem ser usados para ampliação de escala em leitos de jorro, o fenômeno detalhado de todas as partes de um leito de jorro deve ser examinado.

Derivando os grupos adimensionais, Glicksman (1984) adotou equações do movimento para fluido e partícula em leitos fluidizados de partículas esféricas (Jackson, 1971) da seguinte maneira:

$$\rho_f \varepsilon_0 \left[\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \text{grad} \mathbf{U} \right] + i \rho_f g \varepsilon_0 + \text{grad} p + \beta (\mathbf{U} - \mathbf{v}) = 0 \quad (\text{movimento do fluido}) \quad (2.48)$$

$$\rho_s (1 - \varepsilon_0) \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \text{grad} \mathbf{v} \right] + i \rho_s g (1 - \varepsilon_0) - \beta (\mathbf{U} - \mathbf{v}) = 0 \quad \text{movimento das partículas} \quad (2.49)$$

Nessas equações, as forças interparticulares, colisões partícula-partícula bem como as forças eletrostáticas foram negligenciadas. Adimensionalizando as Equações 2.48 e 2.49 resulta nos seguintes parâmetros de escala:

$$\frac{\beta d_p}{\rho_s U}, \frac{g d_p}{U^2}, \frac{\rho_f}{\rho_s}, \frac{H}{d_p}, \frac{D_c}{d_p}, \text{ adimensionais de distribuição do tamanho das partículas, e} \\ \text{adimensionais da geometria do leito.} \quad (2.50)$$

O coeficiente β do primeiro grupo pode ser relacionado às forças viscosas e inerciais do fluido através da equação de Ergun (1952) ou através de outras equações por arraste sobre conjuntos de esferas, levando para um grupo explícito de parâmetros de escala:

$$\frac{g d_p}{U^2}, \frac{\rho_s d_p U}{\mu}, \frac{\rho_f}{\rho_s}, \frac{H}{d_p}, \frac{D_c}{d_p}, \phi_s, \text{ adimensionais de distribuição do tamanho das partículas, e} \\ \text{adimensionais da geometria do leito.} \quad (2.51)$$

Em número de Reynolds baixo ou alto, os parâmetros da Equação 2.51 podem ser um pouco reduzidos. Para $Re \leq 4$, a densidade do gás não é importante de modo que ρ_f / ρ_s pode ser ignorado. Em números de Reynolds altos ($Re > 1000$), as forças de arraste e viscosas são negligenciados comparados com as forças inerciais. A viscosidade do fluido nesse caso não é importante e o segundo grupo da Equação 2.51 pode ser omitido. Na região intermediária ($4 < Re < 1000$), ambas forças viscosas e inerciais são importantes e nenhum grupo pode ser eliminado.

Lim e Grace (1996) afirmaram que a Equação 2.48 pode ser aplicada para leitos de jorro como uma primeira aproximação para partículas esféricas lisas, mas uma maior atenção deveria ser enfocada sobre as tensões interparticulares na região anular onde as partículas estão

em contato entre si. Dessa forma a equação que governa o movimento das partículas (Eq. 2.49) foi escrita como:

$$\rho_s(1 - \varepsilon_0) \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \text{grad} \mathbf{v} \right] + i \rho_s g (1 - \varepsilon_0) - \beta (\mathbf{U} - \mathbf{v}) - \text{div} \mathbf{E}_p = 0 \quad (2.52)$$

em que $\mathbf{E}_p$ é o tensor tensão efetivo para a fase partícula. Lim e Grace (1996) definiram as quantidades adimensionais como em Glicksman (1984) e introduziram um tensor de solitação efetivo adimensional, isto é,

$$\mathbf{U}' = \frac{\mathbf{U}}{U}, \quad \mathbf{v}' = \frac{\mathbf{v}}{U}, \quad \nabla' = d_p \nabla, \quad t' = \frac{U}{d_p} t, \quad \mathbf{E}'_p = \frac{\mathbf{E}_p}{g \rho_s d_p}. \quad (2.53)$$

a Equação 2.52 foi então adimensionalizada como:

$$(1 - \varepsilon_0) \left[\frac{\partial \mathbf{v}'}{\partial t'} + (\mathbf{v}' \cdot \nabla') \mathbf{v}' \right] + i \frac{g d_p}{U^2} (1 - \varepsilon_0) - \frac{\beta d_p}{\rho_s U} (\mathbf{U}' - \mathbf{v}') - \frac{g d_p}{U^2} (\nabla' \cdot \mathbf{E}'_p) = 0 \quad (2.54)$$

Felizmente, o coeficiente adimensional, $g d_p / U^2$, relacionado à tensão, é simplesmente o número de Froude, o qual já foi incluído nas relações de escala de Glicksman (1984). Muitos autores, anteriormente (McNab e Bridgwater, 1979; Benkrid e Caram, 1989; Krzywanski et al., 1979), tentaram aplicar os princípios da mecânica dos sólidos para derivar as relações de tensão efetiva para leitos de jorro. Eles assumiram que as partículas sólidas na região anular podem ser representadas como um plástico rígido em uma condição crítica quase estática. A lei da similaridade mecânica (Sokolovskii, 1965) afirma que em regiões geometricamente similares, com os valores do ângulo de fricção interna (φ), coeficiente adimensional de coesão, e a porosidade do leito idênticos, as equivalentes tensões nos pontos correspondentes são similares se os mesmos são similares nos limites. As partículas em leitos de jorro são sempre maiores do que 1mm de diâmetro, significando que as forças coesivas podem ser negligenciadas, levando-se em consideração que materiais granulares são usualmente considerados coesivos somente quando as partículas sólidas são menores do que cerca de 100 μm de diâmetro. Entretanto, existem somente dois parâmetros adimensionais adicionais, φ e ε_0 , os quais precisam ser considerados por similaridade mecânica na região anular dos leitos de

jorro. O controle dos parâmetros adimensionais para leitos de jorro podem entretanto ser identificados como:

$$\frac{gd_p}{U^2}, \frac{\rho_s d_p U}{\mu}, \frac{\rho_f}{\rho_s}, \frac{H}{d_p}, \frac{D_c}{d_p}, \phi_s, \phi, \epsilon_o, \text{ adimensionais de distribuição do tamanho das partículas,}$$

e adimensionais da geometria do leito. (2.55)

Em leitos de jorro outros fatores precisam ser considerados. Glicksman (1984), foi justificado em assumir a incompressibilidade dos gases porque a velocidade do fluido em leitos fluidizados é pequena comparada com a velocidade sônica, para que a pressão absoluta não mude o suficiente para influenciar apreciavelmente as propriedades termodinâmicas do fluido. Entretanto, a velocidade do gás de entrada pode ser alta em até 80 m s^{-1} para grandes leitos de jorro, cerca de 20% da velocidade sônica, o que significa que a compressibilidade do gás pode ser significativa. Entretanto, se as relações de escala que assumem a incompressibilidade são aplicadas para leitos de jorro, erros significantes podem ocorrer nas proximidades da entrada.

Em leitos de jorro, o movimento ascendente das partículas no jorro colidem com a interface entre o jorro e o ânulo e com as próprias partículas no jorro (Lefroy e Davidson, 1969) e na região da fonte , bem como no topo da superfície da região anular. Para fontes bem desenvolvidas, as partículas também colidem com a parede da coluna. As forças eletrostáticas são também ignoradas e podem ser importantes somente em alguns sistemas, embora possam ser reduzidas na prática pelo uso de agentes anti-estáticos. Negligenciando esses fatores surgirão alguns desvios, mas o fato de tenderem a ser apreciáveis em regiões limitadas sugere-se que os grupos adimensionais adotados possam ser suficientes para uma primeira aproximação.

O número de Reynolds ($Re = \rho_f d_p U / \mu$) em leitos de jorro é usualmente da ordem de 100 (Epstein e Levine, 1978). Para grandes colunas, o número de Reynolds (baseado no diâmetro das partículas e velocidade relativa) pode chegar a 3000 no jorro. Na região anular a velocidade do gás aumenta com o aumento da distância vertical da entrada, e o fluxo pode mudar de viscoso para inercial. Para uma dada faixa de Re , não é imediatamente possível eliminar os termos pela suposição de Re alto ou baixo.

Por este motivo Lim e Grace, (1997) usaram o grupo completo dos parâmetros governantes dados na Equação 2.55. Eles estudaram a validade dessas relações de escala, examinaram a influência de cada grupo adimensional sobre a similaridade combinando, propositadamente de forma inadequada alguns grupos, testaram também o erro na tentativa de se ampliar a escala de leitos de jorro pela variação somente dos dimensionais, isto é, atingindo somente a similaridade geométrica usando-se o mesmo gás na mesma temperatura e pressão; e finalmente examinaram a influência da esfericidade das partículas e o ângulo de fricção interna (ϕ). Eles utilizaram um leito convencional frio (temperatura e pressão ambientes) de 0,152 m de diâmetro e uma coluna de grande escala de 0,914 m de diâmetro operando à elevada temperatura e pressão com variações no tamanho das partículas de vidro, aço granulado, areia e poliestireno, tanto nas corridas à frio quanto à quente.

Seus resultados indicaram que todos os grupos das relações de escala na Equação 2.55 são válidos para leitos de jorro de pequena escala. Os grupos adimensionais foram verificados individualmente e com exceção de ρ_s / ρ_f , nenhum outro grupo pôde ser omitido do grupo total dos parâmetros de escala. O ângulo de fricção interna dos sólidos particulados e a esfericidade tiveram efeito sobre altura máxima de jorro estável, altura da fonte e queda de pressão longitudinal. As forças de interação partícula-partícula não puderam ser ignoradas para o estudo de ampliação de escala de leitos de jorro.

Verificações dos parâmetros de escala da Equação 2.55 também foram conduzidas em leito de grande escala à alta temperatura. A coincidência dos resultados à quente e frio sugeriram que os parâmetros de escala são suficientes para a similaridade hidrodinâmica. Mais uma vez os resultados indicaram que os parâmetros modificados são válidos para ampliação de escala de leitos de jorro.

Essas constatações podem ser de grande importância para considerar o comportamento de leitos de jorro de grande escala operando à temperatura ambiente, já que a maioria das aplicações comerciais de leitos de jorro envolve grandes colunas operando à elevadas temperaturas, sendo que a investigação experimental de tais leitos é complicada e de alto custo. Por outro lado, a maioria das investigações experimentais são executadas em leitos pequenos com ar à temperatura ambiente.

3. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

3.1 MATERIAIS

Depois de vários testes preliminares para decidir quais partículas deveriam ser utilizadas, optamos por dois tipos que obtiveram regimes de jorro mais estáveis. Essas partículas são esferas de vidro e ABS. Suas características físicas, como massa específica, diâmetro médio e esfericidade foram determinadas e estão apresentadas na Tabela 3.1

Tabela 3.1 - Características das Partículas

Partícula	ρ_s (Kg/m ³)	d_p (mm)	ϕ
Esferas de Vidro	2600	3,00	1,00
ABS	1040	2,88	0,79

Para a determinação do tamanho das partículas, os diâmetros médios foram calculados com base nas análises granulométricas, realizadas em um peneirador vibratório com peneiras grampeadas. A equação de distribuição utilizada foi a seguinte:

$$d_p = \frac{1}{\sum (X_i / d_i)} \quad (3.1)$$

em que: d_p é o diâmetro médio das partículas;

X_i é a fração ponderal retida (%);

d_i é a média dos intervalos de abertura das peneiras (mm).

A massa específica das partículas foi determinada por picnometria e quanto a esfericidade, utilizou-se a relação entre os diâmetros dos círculos inscrito e circunscrito ao contorno da projeção da partícula sobre um plano de repouso estável, como mostra a Equação 3.2. (Peçanha e Massarani, 1986).

$$\phi = \left(\frac{D_{CI}}{D_{CC}} \right) \quad (3.2)$$

3.2 EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL

3.2.1 Leitos de Jorro Utilizados

O sistema experimental utilizado neste trabalho foi projetado e montado no Laboratório de Fluidodinâmica do Departamento de Termofluidodinâmica da Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP. Os leitos de jorro utilizados nos experimentos são do tipo bidimensional, sendo construídos em acrílico para facilitar a visualização das partículas e montados de forma a permitir a variação de suas dimensões. A parte inclinada dos leitos é encaixada à parte retangular com ângulos de base de 60° e 45° . A Figura 3.1 mostra as dimensões dos três leitos utilizados no estudo de ampliação de escala dos mesmos. Os valores dessas dimensões estão de acordo com as relações propostas por Kalwar et al. (1989), elucidadas no capítulo anterior (tópico 2.2).

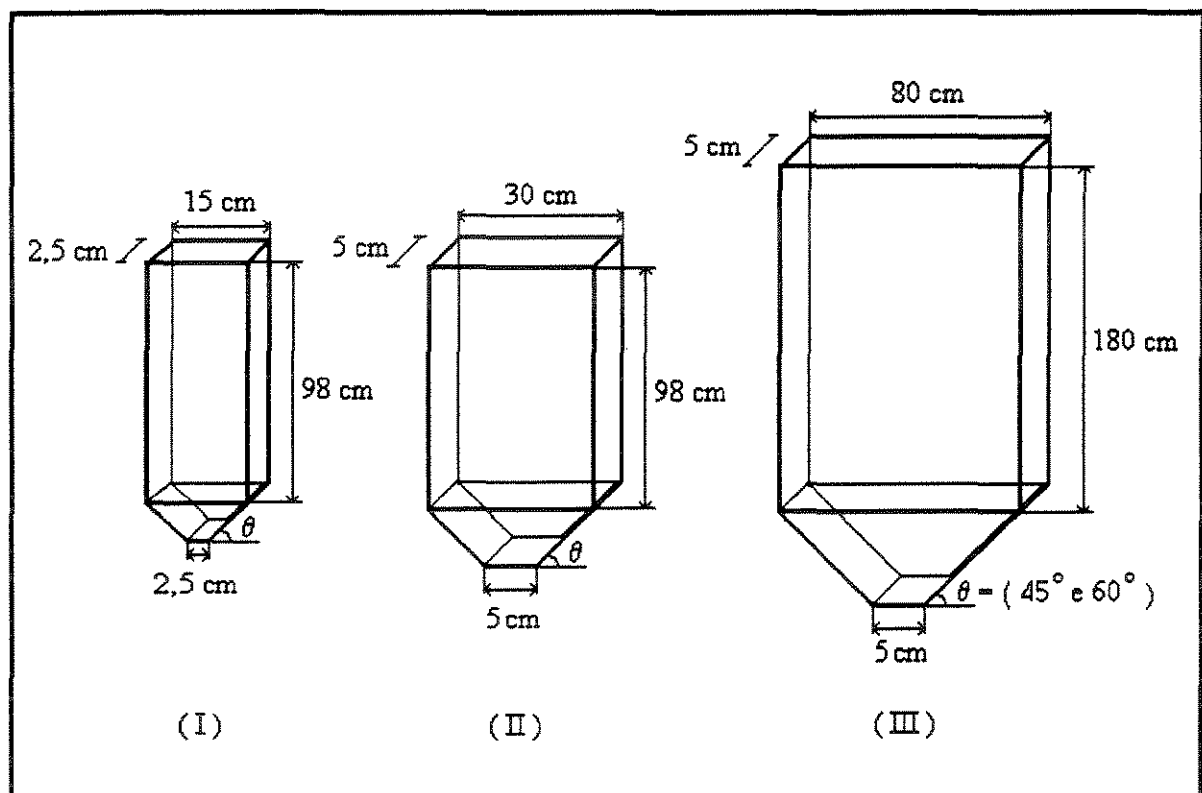


Figura 3.1 - Esquema dos Leitos de Jorro Bidimensionais

A partir deste capítulo, os leitos utilizados serão denominados pequeno, médio e grande, com numeração (I), (II) e (III), respectivamente. A diferença do tamanho dos leitos e as seis configurações resultantes das combinações entre ângulo e leito podem ainda ser observadas na Figura 3.1. Devido a falta de espaço físico, só foi possível a montagem de um leito por vez. Quando um leito era montado com um certo ângulo de base, todas as corridas possíveis eram feitas para permitir a desmontagem e troca do ângulo e assim sucessivamente com todas as configurações.

3.2.2 Sistema de Alimentação - Controle e Medição da Vazão de Ar

O fluxo de ar utilizado na montagem experimental é fornecido por um soprador de 7,5 c.v., com deslocamento de 8 m³/min e pressão máxima de 3700 mmca. A linha de transporte de ar é uma tubulação de aço galvanizado de duas polegadas de diâmetro interno, contendo um sistema de arrefecimento para manter o ar à temperatura ambiente. O controle da vazão de ar é realizado por uma válvula globo de duas polegadas de diâmetro.

As medidas de vazão são obtidas através de um medidor de placa de orifício. As tomadas de pressão diferencial foram instaladas nos cantos da placa, ou seja, uma a jusante e outra a montante da placa, sendo que a leitura foi feita por um manômetro de tubo em U. A calibração da placa de orifício permitiu a obtenção da vazão do ar em função da queda de pressão na placa. O procedimento para a calibração (Ower e Pankhurst, 1977) resulta na seguinte equação geral para a placa de orifício:

$$Q = k \epsilon \alpha_2 \sqrt{\frac{1}{1 - m^2} \left(\Delta h_p \right) \frac{b}{k_1 + t}} \quad (3.3)$$

em que: Q = vazão mássica (Kg/min).

$$\epsilon = 1 - \delta \frac{\Delta h_p}{P_1} \quad (\text{fator de compressibilidade}).$$

$$\beta = 0,3041 + 0,0876m - 0,1166m^2 + 0,4089m^3$$

P_1 = pressão estática na linha de ar.

$$\alpha = 0,5959 + 0,0312m^{1,05} - 0,184m^4 \quad (\text{coeficiente de descarga}).$$

$$m = \frac{a_2}{a_1}$$

a_1 = área do tubo (cm^2).

a_2 = área do orifício (cm^2).

Δh_p = queda de pressão na placa (cmH_2O).

b = pressão barométrica local (mmHg).

t = temperatura do ar ($^\circ\text{C}$).

Quando a temperatura e a altura barométrica são dados em graus centígrados e em milímetros de mercúrio respectivamente, $k = 0,0573$ e $k_1 = 273$.

De acordo com este procedimento, as equações resultantes que fornecem a vazão de ar na tubulação, com a utilização de uma placa de 25mm de diâmetro interno, e outra de 30mm de diâmetro interno são respectivamente as seguintes:

$$Q = 4,8136 \frac{(\Delta h_p)^{1/2}}{(273 + t)^{1/2}} - 1,5060 \left(\frac{(\Delta h_p)^{3/2}}{(P_1 + 1000)(273 + t)^{1/2}} \right) \quad (3.4)$$

$$Q = 7,1902 \frac{(\Delta h_p)^{1/2}}{(273 + t)^{1/2}} - 2,4432 \left(\frac{(\Delta h_p)^{3/2}}{(P_1 + 1000)(273 + t)^{1/2}} \right) \quad (3.5)$$

A Equação 3.4 foi utilizada para fornecer as vazões dos leitos pequenos, enquanto que a Equação 3.5 fornecia as vazões dos leitos médios e grandes.

3.2.3 Descrição do Sistema Experimental

O esquema da montagem experimental é mostrado na Figura 3.2. O processo se inicia com o ar ambiente sendo insuflado por um soprador (1), para em seguida passar por um resfriador de ar (3) e pela placa de orifício (5) que está acoplada a um manômetro tipo U (6). Uma válvula globo (2) permite a regulação do fluxo de ar. A tubulação possui ainda um ponto de tomada de pressão estática (4) também acoplado a um manômetro tipo U (6).

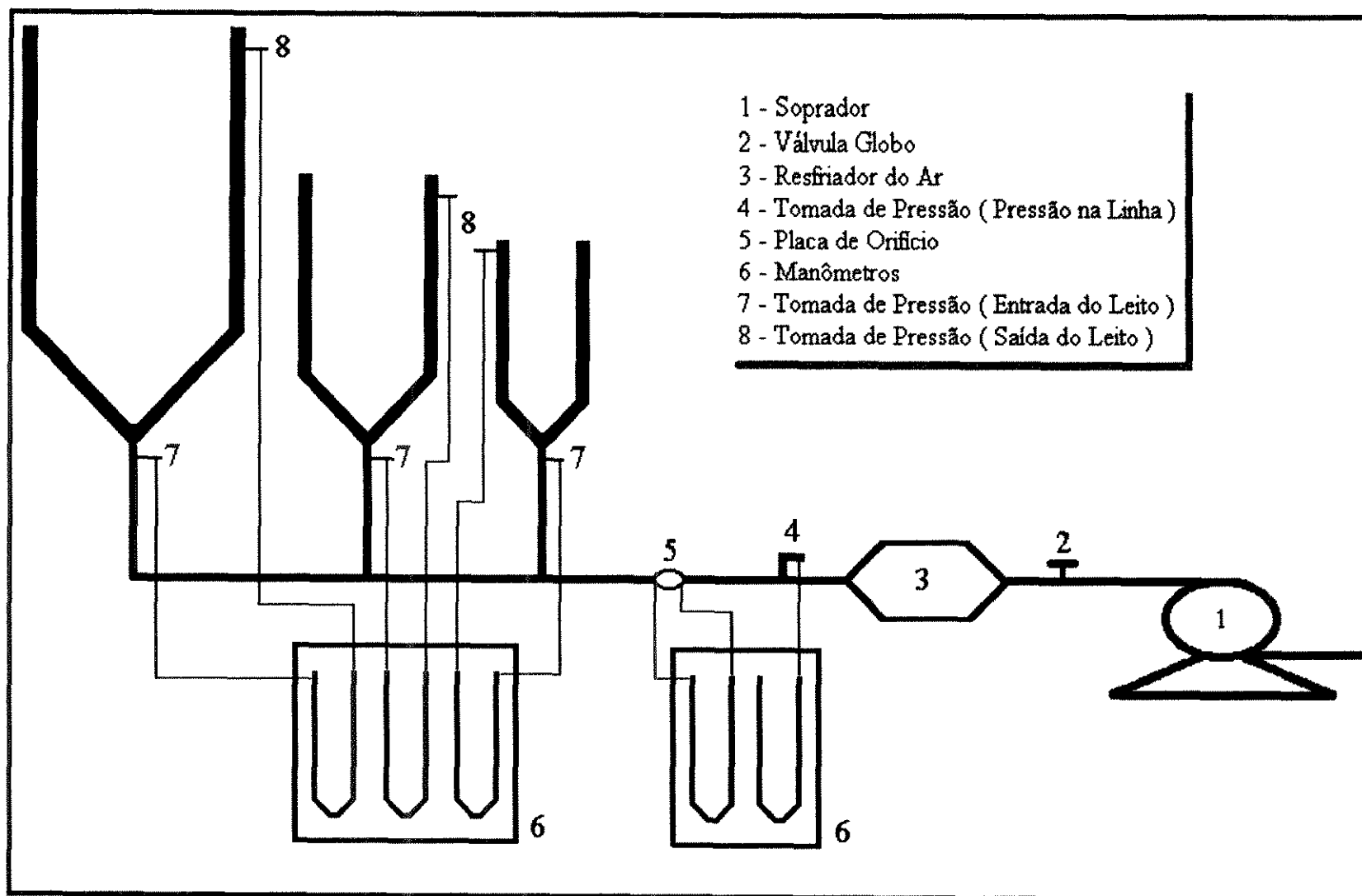


Figura 3.2 - Diagrama Esquemático da Montagem Exerimental

Para as medidas de queda de pressão no leito, dois pontos de tomada de pressão foram instalados, um logo abaixo do bocal de entrada (7) e outro na saída dos leitos (8), acoplados ao manômetro tipo U (6). O ar que chega aos leitos é dissipado ao ar ambiente no topo dos leitos.

3.3 PLANEJAMENTO FATORIAL

Um planejamento fatorial foi elaborado para avaliar a influência dos parâmetros de escala na queda de pressão máxima, velocidade de jorro mínimo. A fim de quantificar a influência das variáveis no processo, a técnica do planejamento fatorial foi utilizada de acordo com Barros Neto, Scarmínio e Bruns, 1995. Para este tratamento estatístico, as variáveis que influenciam no processo são denominados de fatores e a quantificação da influência de um fator é denominada de efeito. Para executar o planejamento fatorial, definem-se os níveis em que cada fator será estudado, ou seja, um nível mínimo ou inferior e um nível máximo ou superior para cada fator.

Tabela 3.2 - Valores dos Fatores Utilizados no Planejamento Fatorial e seus Níveis

Superior e Inferior.

Fatores	<u>Níveis</u>	
	Superior (+)	Inferior (-)
Largura do Leito, L_1 (cm)	30	15
	80	15
	80	30
Ângulo, θ ($^{\circ}$)	60°	45°
Partícula, ρ_P (Kg/m^3)	2600	1040
$H/H_{\max}$ (-)	0,95	0,55

Nos planejamentos de dois níveis costuma-se identificar os níveis superior e inferior com os sinais (+) e (-), respectivamente. Usando essa notação os níveis superior e inferior

adotados para os fatores L_1 , Ângulo, ρ_P e $H/H_{\max}$ estão na Tabela 3.3, onde são mostrados os valores dos fatores e o seu nível correspondente.

Segundo a descrição encontrada em Box, Hunter e Hunter (1978), a essência do planejamento fatorial consiste em se projetar um experimento que seja capaz de fornecer informações sobre a influência dos fatores sobre as respostas de interesse, sem ter uma preocupação muito rigorosa sobre a descrição dessa influência.

Depois de especificar os níveis em que cada fator será estudado, isto é, os valores dos fatores, os experimentos devem ser executados com todas as combinações possíveis. Se há N_1 níveis para a primeira variável, N_2 para a segunda e N_k para a variável de ordem k , então o planejamento requer no mínimo $N_1 \times N_2 \times \dots \times N_k$ experimentos. Os ensaios podem ainda ser repetidos para se obter uma estimativa do erro experimental.

Para estudar o efeito de qualquer fator sobre a resposta é preciso fazê-lo variar e observar o resultado dessa variação . Isto obviamente implica na realização de ensaios em pelo menos dois níveis desse fator. Um planejamento fatorial em que todas as variáveis são estudadas em apenas dois níveis é, portanto, o mais simples de todos eles. Havendo k fatores, isto é, k variáveis controladas pelo pesquisador, o planejamento de dois níveis irá requerer a realização de $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ensaios diferentes, sendo chamado por isto de planejamento fatorial 2^k .

Quando os ensaios são feitos em duplicata, a estimativa do erro experimental é associada à determinação de uma resposta individual. A extensão desse erro será importante para decidir se existem ou não efeitos estatisticamente significativos dos fatores sobre a resposta. No caso em que os ensaios não são realizados em duplicata, a estimativa do erro experimental é encontrada considerando que a importância de uma interação decresça com o número de fatores envolvidos na sua definição. Um planejamento fatorial 2^4 , por exemplo, contém quatro efeitos principais, seis interações de dois fatores, quatro interações de três fatores e uma interação de quatro fatores, podendo considerar-se que as interações de três ou mais fatores como flutuações aleatórias, ou seja, ruído embutido nos valores das respostas. Porém este procedimento exige muita cautela e senso crítico por parte do pesquisador.

A influência dos quatro fatores da Tabela 3.2 sobre as respostas, ou seja, sobre $\Delta P_{\max}$, Q_{jm} , foi quantificada em planejamentos fatoriais 2^4 utilizando-se experimentos realizados nos três leitos de jorro bidimensionais já mencionados neste capítulo. Também foram realizados planejamentos fatoriais 2^3 , nos quais somente os fatores ângulo, ρ_p e $H/H_{\max}$ foram estudados. O fator L_1 neste caso não foi estudado por apresentar um único nível, o que significa que para esse tipo de planejamento todas as corridas utilizadas foram realizadas em um único leito. A escolha de três fatores em dois níveis diferentes para cada, implicando num planejamento fatorial 2^3 , requer oito experimentos, e a escolha de quatro fatores, o planejamento 2^4 requer dezesseis experimentos

3.4 MÉTODO EXPERIMENTAL

3.4.1 Obtenção dos Dados de Queda de Pressão e Vazão de Ar

3.4.1.1 Condições do Processo

Os experimentos foram realizados com repetições, sendo necessárias quarenta e oito corridas das setenta realizadas para elaborar planejamentos fatoriais. No estudo da ampliação de escala dos leitos foram utilizadas também, quarenta e oito corridas. As alturas dos leitos de partículas foram pré-fixadas, uma na parte inclinada e outra na parte retangular dos leitos, sendo que a primeira deveria ser a menor possível onde o jorro pudesse ser estabelecido e a outra deveria ficar próxima a altura máxima de jorro estável para que fosse possível analisar o comportamento mínimo e máximo do jorro. Ainda sobre os planejamentos fatoriais, as corridas deveriam apresentar a razão $H/H_{\max} = 0,55$ para as alturas da parte inclinada e $H/H_{\max} = 0,95$ para as alturas da parte retangular dos leitos para que esse parâmetro adimensional fosse incluído como mais um fator de influência na queda de pressão máxima, vazão de jorro mínimo e altura máxima de jorro estável.

3.4.1.2 Obtenção dos Dados Experimentais

Esta etapa do procedimento experimental objetivou o estudo da fluidodinâmica dos leitos de jorro bidimensionais. A rotina experimental aplicada foi a seguinte: depois de montados, os leitos eram carregados com uma determinada carga de partículas, onde a altura

ficava compreendida ou na parte inclinada ou na parte retangular dos leitos. Partindo-se da vazão nula iniciava-se a movimentação do ar aumentando-se gradativamente a vazão. Em vários pontos eram anotados os valores de queda de pressão no leito, queda de pressão na placa e pressão na linha, até que o jorro fosse estabelecido com alturas da fonte bem desenvolvidas. Em seguida decrescia-se a vazão obtendo-se os dados de queda de pressão até que a vazão outra vez fosse nula.

Em todos os casos, a fluidodinâmica do processo foi exatamente a mesma como Mathur e Epstein explicaram em seus trabalhos (ver Capítulo 2 - Tópico 2.1.2). Mas em alguns casos o jorro interno não se formou durante a operação, ocorrendo apenas uma grande e abrupta expansão do leito, seguida de grandes pulsações que impossibilitavam a leitura nos manômetros até que o jorro era estabelecido ou, no caso da vazão decrescente , até o colapso do jorro.

A Tabela 3.3 apresenta as características das corridas experimentais.

Tabela 3.3 - Características das Corridas Experimentais

Corrida	Leito	Ângulo	Partícula	Carga (g)	H ₀ (cm)
1	I	45°	ABS	72,40	5,0
2	I	45°	ABS	193,90	9,0
3	I	45°	ABS	399,60	15,0
4	I	60°	ABS	125,90	8,5
5	I	60°	ABS	143,70	9,5
6	I	60°	ABS	316,90	14,5
7	I	45°	ABS	72,40	5,0
8	I	45°	ABS	193,90	9,0
9	I	45°	ABS	399,60	15,0
10	I	60°	ABS	125,90	8,5

Corrida	Leito	Ângulo	Partícula	Carga (g)	H ₀ (cm)
11	I	60°	ABS	143,70	9,5
12	I	60°	ABS	316,90	14,5
13	II	45°	ABS	546,80	10,0
14	II	45°	ABS	671,20	11,5
15	II	45°	ABS	1580,30	19,5
16	II	60°	ABS	693,90	14,0
17	II	60°	ABS	875,20	16,0
18	II	60°	ABS	1723,30	24,0
19	II	45°	ABS	546,80	9,5
20	II	45°	ABS	671,20	11,5
21	II	45°	ABS	1580,30	19,5
22	II	60°	ABS	693,90	14,0
23	II	60°	ABS	875,20	16,0
24	II	60°	ABS	1723,30	24,0
25	III	45°	ABS	3436,30	28,5
26	III	45°	ABS	8684,85	46,0
27	III	45°	ABS	9056,90	48,0
28	III	60°	ABS	3811,14	38,5
29	III	60°	ABS	10646,59	66,0
30	III	45°	ABS	3436,30	28,5
31	III	45°	ABS	8684,85	46,0
32	III	45°	ABS	9056,90	48,0
33	III	60°	ABS	3811,14	38,5
34	III	60°	ABS	10646,59	66,0

Corrida	Leito	Ângulo	Partícula	Carga (g)	H ₀ (cm)
35	I	45°	VIDRO	189,50	5,0
36	I	45°	VIDRO	511,3	9,5
37	I	45°	VIDRO	1031,80	16,5
38	I	60°	VIDRO	280,20	8,0
39	I	60°	VIDRO	313,10	8,5
40	I	60°	VIDRO	728,90	14,0
41	I	45°	VIDRO	189,50	5,0
42	I	45°	0,0026	511,30	9,5
43	I	45°	VIDRO	1031,80	16,5
44	I	60°	VIDRO	280,20	8,0
45	I	60°	VIDRO	313,10	8,5
46	I	60°	VIDRO	728,90	14,0
47	II	45°	VIDRO	1307,30	10,0
48	II	45°	VIDRO	1833,50	12,0
49	II	45°	VIDRO	4281,50	21,0
50	II	60°	VIDRO	2048,40	16,0
51	II	60°	VIDRO	2264,40	17,0
52	II	60°	VIDRO	5165,30	28,5
53	II	60°	VIDRO	5395,60	29,5
54	II	45°	VIDRO	1307,30	10,0
55	II	45°	VIDRO	1833,50	12,0
56	II	45°	VIDRO	4281,50	21,0
57	II	60°	VIDRO	2048,40	16,0
58	II	60°	VIDRO	2264,40	17,0

Corrida	Leito	Ângulo	Partícula	Carga (g)	H ₀ (cm)
59	II	60°	VIDRO	5165,30	28,5
60	II	60°	VIDRO	5395,60	29,5
61	III	45°	VIDRO	5735,00	22,5
62	III	45°	VIDRO	8990,07	29,0
63	III	45°	VIDRO	15191,60	39,0
64	III	60°	VIDRO	4797,97	26,0
65	III	60°	VIDRO	12119,10	45,0
66	III	45°	VIDRO	5735,00	22,5
67	III	45°	VIDRO	8990,07	29,0
68	III	45°	VIDRO	15191,60	39,0
69	III	60°	VIDRO	4797,97	26,0
70	III	60°	VIDRO	12119,10	45,0

I - Leito menor ($L_1 = 15$ cm), II - Leito médio ($L_1 = 30$ cm), III - Leito maior ($L_1 = 80$ cm)

Para cada corrida experimental foi construído um gráfico de queda de pressão versus vazão de ar para a obtenção dos valores de queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo. Estes gráficos serão apresentados e analisados no próximo capítulo, bem como as análises dos planejamentos fatoriais.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 OBTENÇÃO DA ALTURA MÁXIMA DE JORRO ESTÁVEL

A primeira etapa dos experimentos foi determinar a altura máxima de jorro estável. As partículas eram carregadas nos leitos para que fossem jorradas com vazões de ar que permitissem um jorro bem definido e fontes bem desenvolvidas. Em seguida os níveis de altura das partículas no leito eram aumentados até que o jorro apresentasse instabilidade crescente ou pelo surgimento de grandes zonas mortas nas regiões anulares para qualquer vazão de ar aplicada. A maior altura de leito de partículas que não apresentasse uma dessas condições era considerada a altura máxima de jorro estável. A Tabela 4.1 mostra os valores das alturas máximas dos leitos.

Tabela 4.1 - Altura Máxima dos Leitos de Jorro Bidimensionais.

Leito	Ângulo	Partícula	Carga (g)	H _{max} (cm)
I	45 ^o	ABS	403,80	16,0
I	60 ^o	ABS	336,60	15,5
II	45 ^o	ABS	1637,40	20,5
II	60 ^o	ABS	1664,80	25,0
III	45 ^o	ABS	9728,52	50,5
III	60 ^o	ABS	11227,90	69,0
I	45 ^o	VIDRO	1105,80	17,5
I	60 ^o	VIDRO	793,90	14,5
II	45 ^o	VIDRO	4394,70	22,0
II	60 ^o	VIDRO	5585,40	31,0
III	45 ^o	VIDRO	16287,70	41,0
III	60 ^o	VIDRO	13555,40	47,5

Os leitos maiores (leitos de numeração III), e principalmente os de 60^o, apresentaram grandes zonas estagnadas de partículas ainda na parte inclinada e isso resultou em alturas máximas proporcionalmente menores. O aumento da taxa de fluxo de ar aumentava significativamente a queda de pressão no jorro, mas não alterava o volume de zona estagnada que se formava nos leitos. As fontes eram distorcidas ou desapareciam momentaneamente com a instabilidade do jorro, causando uma irregular circulação das partículas. Alguns leitos

apresentaram formação de ondas ascendentes ou pulsações que também caracterizavam a instabilidade e a terminação do jorro.

4.2 OBTENÇÃO DOS VALORES DE $\Delta P_{\max}$ E Q_{jm} .

Os valores de queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo foram obtidos experimentalmente e foram a partir dos gráficos dos dados de queda de pressão e vazão de ar. A Tabela 4.1 apresenta esses valores para todas as corridas experimentais.

Tabela 4.2 - Valores de Queda de Pressão Máxima e Vazão de Jorro Mínimo Extraídos das Corridas Experimentais.

Corrida	Leito	Ângulo	Partícula	Carga (g)	H ₀ (cm)	$\Delta P_{\max}$ (cmH ₂ O)	Q _{jm} (Kg/min)
1	I	45°	ABS	72,40	5,0	4,5	0,15
2	I	45°	ABS	193,90	9,0	9,7	0,21
3	I	45°	ABS	399,60	15,0	28,5	0,29
4	I	60°	ABS	125,90	8,5	7,0	0,18
5	I	60°	ABS	143,70	9,5	10,8	0,20
6	I	60°	ABS	316,90	14,5	36,4	0,37
7	I	45°	ABS	72,40	5,0	4,0	0,16
8	I	45°	ABS	193,90	9,0	9,7	0,22
9	I	45°	ABS	399,60	15,0	29,7	0,30
10	I	60°	ABS	125,90	8,5	6,7	0,20
11	I	60°	ABS	143,70	9,5	10,8	0,20
12	I	60°	ABS	316,90	14,5	31,0	0,35
13	II	45°	ABS	546,80	10,0	13,5	0,51
14	II	45°	ABS	671,20	11,5	14,7	0,50
15	II	45°	ABS	1580,30	19,5	29,4	0,75
16	II	60°	ABS	693,90	14,0	21,1	0,50
17	II	60°	ABS	875,20	16,0	26,0	0,60
18	II	60°	ABS	1723,30	24,0	39,0	0,80
19	II	45°	ABS	546,80	9,5	13,3	0,52
20	II	45°	ABS	671,20	11,5	15,1	0,51
21	II	45°	ABS	1580,30	19,5	28,7	0,80

Corrida	Leito	Ângulo	Partícula	Carga (g)	H ₀ (cm)	$\Delta P_{\max}$ (cmH ₂ O)	Q _{lm} (Kg/min)
22	II	60°	ABS	693,90	14,0	19,5	0,50
23	II	60°	ABS	875,20	16,0	25,9	0,60
24	II	60°	ABS	1723,30	24,0	41,3	0,90
25	III	45°	ABS	3436,30	28,5	34,1	1,00
26	III	45°	ABS	8684,85	46,0	87,7	1,25
27	III	45°	ABS	9056,90	48,0	89,9	1,50
28	III	60°	ABS	3811,14	38,5	55,7	1,20
29	III	60°	ABS	10646,59	66,0	102,1	1,75
30	III	45°	ABS	3436,30	28,5	34,3	1,10
31	III	45°	ABS	8684,85	46,0	76,0	1,30
32	III	45°	ABS	9056,90	48,0	91,7	1,50
33	III	60°	ABS	3811,14	38,5	48,9	1,20
34	III	60°	ABS	10646,59	66,0	105,2	1,80
35	I	45°	VIDRO	189,50	5,0	11,5	0,23
36	I	45°	VIDRO	511,3	9,5	20,1	0,34
37	I	45°	VIDRO	1031,80	16,5	51,3	0,43
38	I	60°	VIDRO	280,20	8,0	13,3	0,27
39	I	60°	VIDRO	313,10	8,5	14,7	0,29
40	I	60°	VIDRO	728,90	14,0	35,1	0,42
41	I	45°	VIDRO	189,50	5,0	11,2	0,22
42	I	45°	VIDRO	511,30	9,5	20,7	0,35
43	I	45°	VIDRO	1031,80	16,5	49,7	0,44
44	I	60°	VIDRO	280,20	8,0	13,1	0,26
45	I	60°	VIDRO	313,10	8,5	15,4	0,30
46	I	60°	VIDRO	728,90	14,0	37,1	0,44
47	II	45°	VIDRO	1307,30	10,0	22,5	0,75
48	II	45°	VIDRO	1833,50	12,0	24,9	0,80
49	II	45°	VIDRO	4281,50	21,0	48,1	1,30
50	II	60°	VIDRO	2048,40	16,0	32,7	1,00
51	II	60°	VIDRO	2264,40	17,0	33,3	1,00
52	II	60°	VIDRO	5165,30	28,5	67,7	1,30
53	II	60°	VIDRO	5395,60	29,5	68,1	1,50
54	II	45°	VIDRO	1307,30	10,0	22,5	0,80
55	II	45°	VIDRO	1833,50	12,0	22,5	0,90
56	II	45°	VIDRO	4281,50	21,0	47,2	1,30

Corrida	Leito	Ângulo	Partícula	Carga (g)	H ₀ (cm)	$\Delta P_{\max}$ (cmH ₂ O)	Q _{jm} (Kg/min)
57	II	60°	VIDRO	2048,40	16,0	34,1	0,90
58	II	60°	VIDRO	2264,40	17,0	33,9	1,00
59	II	60°	VIDRO	5165,30	28,5	69,3	1,40
60	II	60°	VIDRO	5395,60	29,5	68,3	1,50
61	III	45°	VIDRO	5735,00	22,5	58,2	1,40
62	III	45°	VIDRO	8990,07	29,0	79,3	1,50
63	III	45°	VIDRO	15191,60	39,0	113,5	2,00
64	III	60°	VIDRO	4797,97	26,0	58,2	1,40
65	III	60°	VIDRO	12119,10	45,0	119,2	2,30
66	III	45°	VIDRO	5735,00	22,5	57,0	1,30
67	III	45°	VIDRO	8990,07	29,0	74,4	1,70
68	III	45°	VIDRO	15191,60	39,0	105,3	2,10
69	III	60°	VIDRO	4797,97	26,0	57,1	1,40
70	III	60°	VIDRO	12119,10	45,0	118,7	2,20

I - Leito menor ($L_1 = 15$ cm), II - Leito médio ($L_1 = 30$ cm), III - Leito maior ($L_1 = 80$ cm)

A queda de pressão máxima e a vazão de jorro mínimo são as variáveis dependentes necessárias para realizar o estudo de ampliação de escala dos leitos de jorro bidimensionais. Essas variáveis são dependentes das propriedades sólido-fluido e dos parâmetros geométricos do leito. A análise da fluidodinâmica apenas pela observação visual do movimento das partículas indicou que a circulação de sólidos diminuiu proporcionalmente à medida que se aumentavam as dimensões dos leitos. Da mesma forma, para alturas proporcionais de leito de partículas, os leitos maiores ($L_1 = 80$ cm) apresentaram estrangulamentos do jorro mais cedo do que o esperado, além da formação de grandes zonas estagnadas. Mas mesmo assim o comportamento das curvas características do jorro foi semelhante em todas as corridas experimentais. As Figuras 4.1 a 4.3 são exemplos de curvas características obtidas nos experimentos.

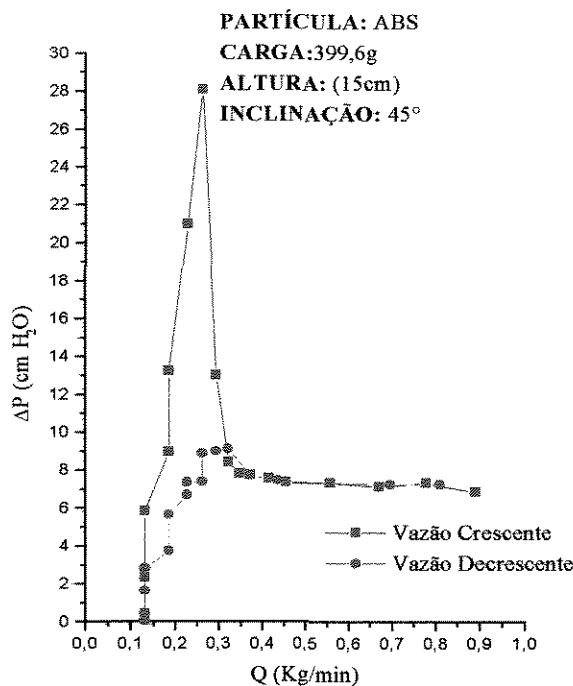


Fig. 4.1a

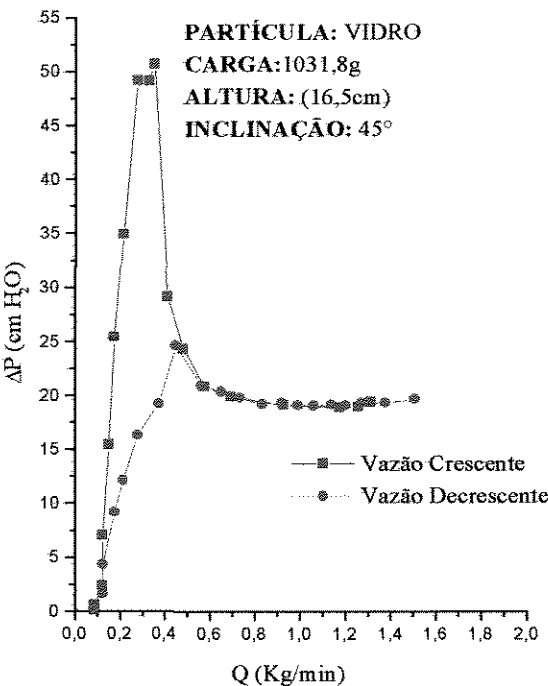


Fig. 4.1b

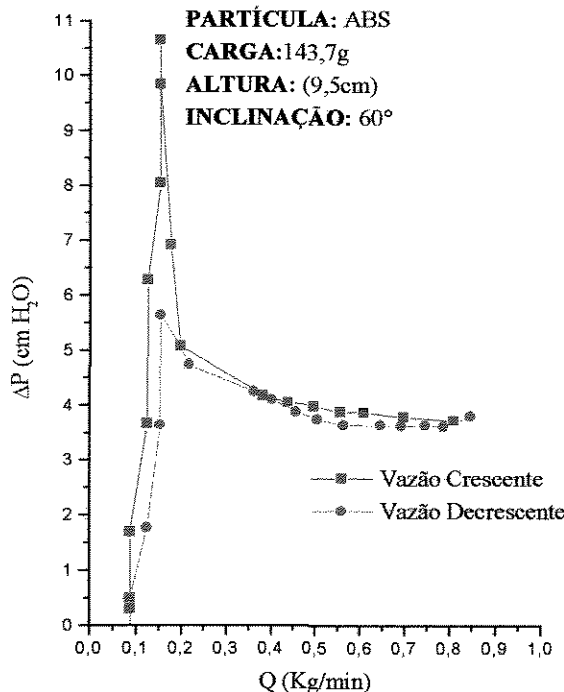


Fig. 4.1c

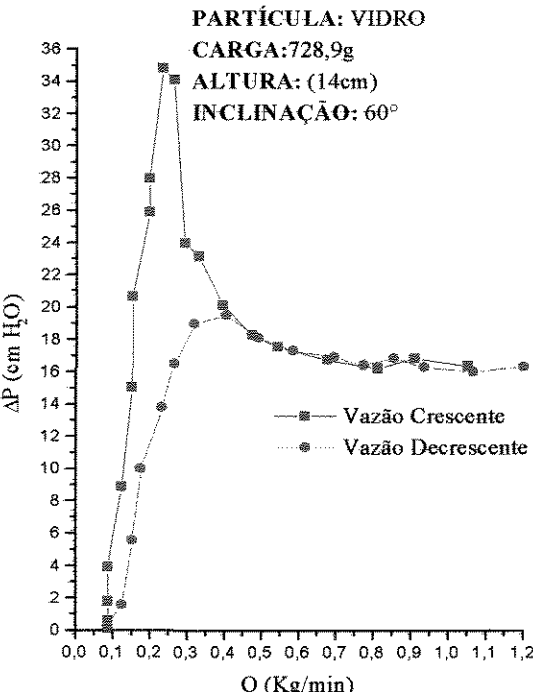


Fig. 4.1d

Figura 4.1 - Curvas Características do Leito Pequeno ($L_1 = 15 \text{ cm}$).

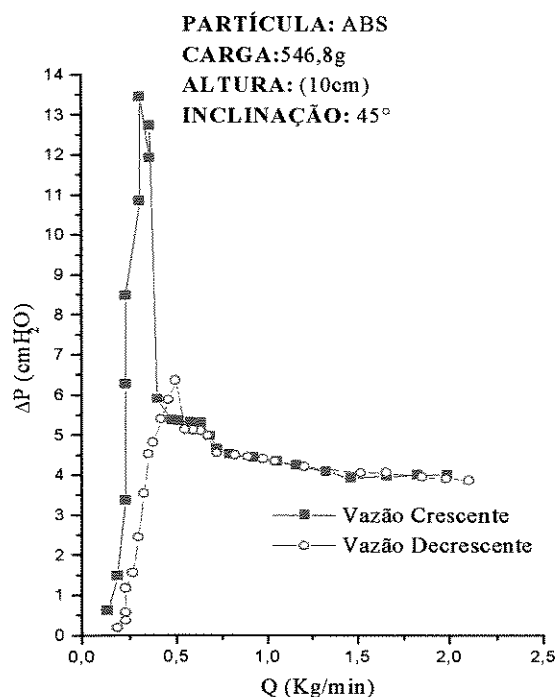


Fig. 4.2a

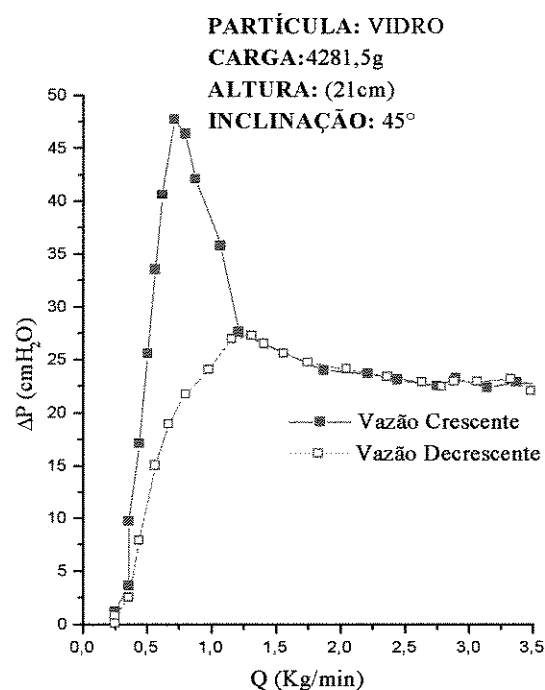


Fig. 4.2b

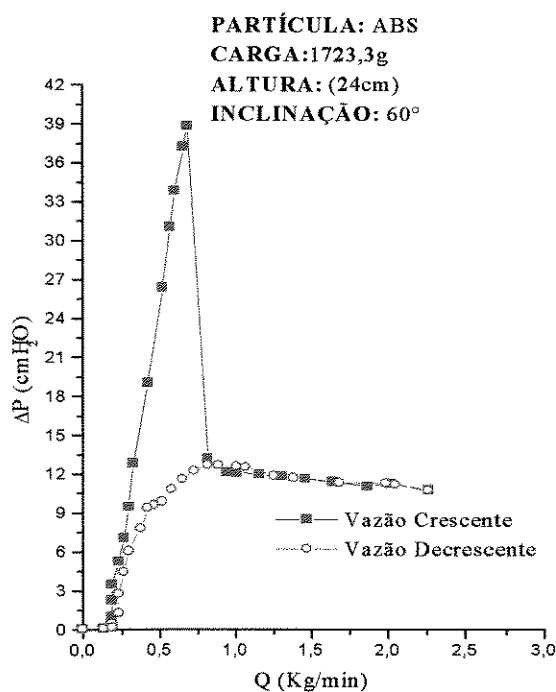


Fig. 4.2c

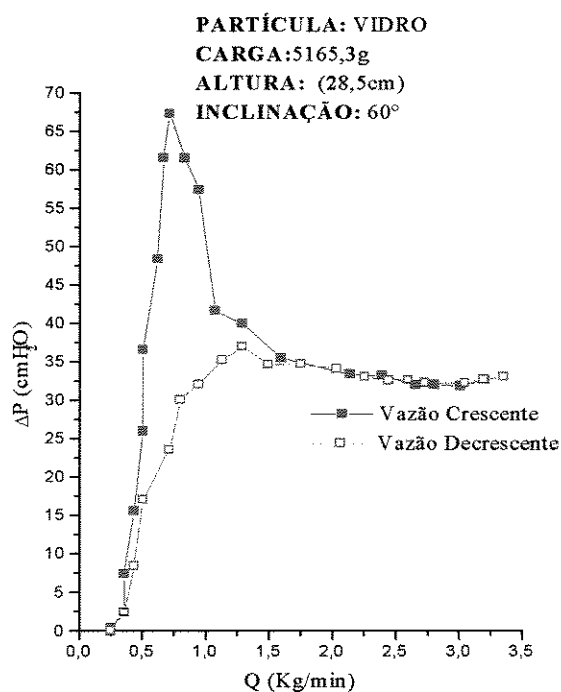


Fig. 4.2d

Figura 4.2 - Curvas Características do Leito Médio ($L_1 = 30$ cm).

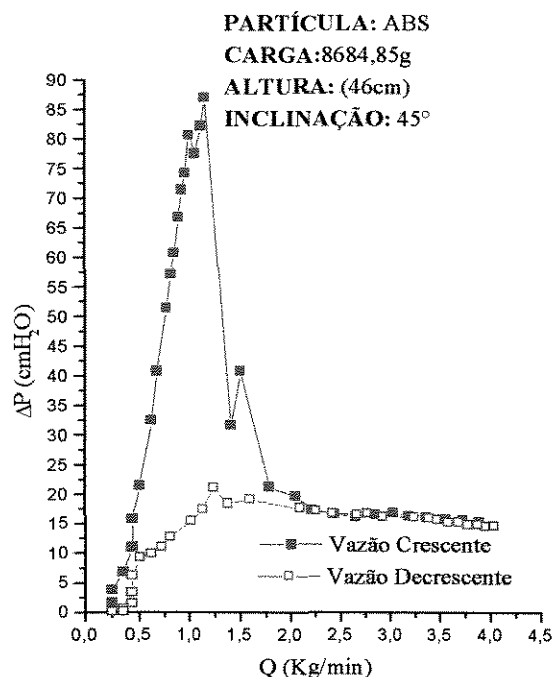


Fig. 4.3a

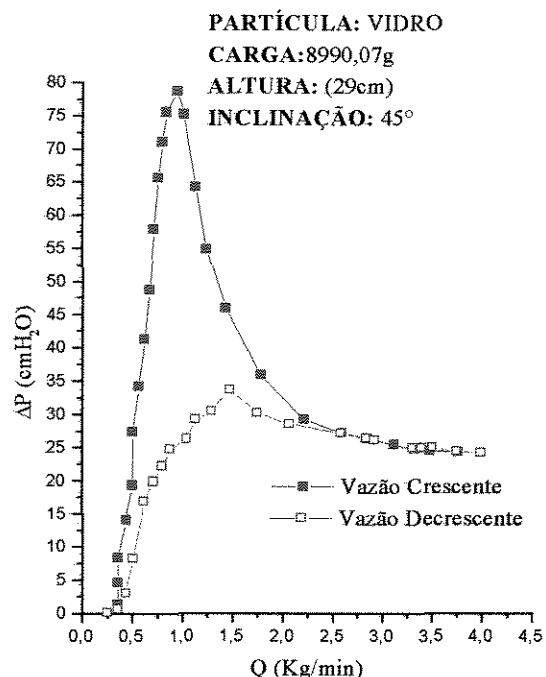


Fig. 4.3b

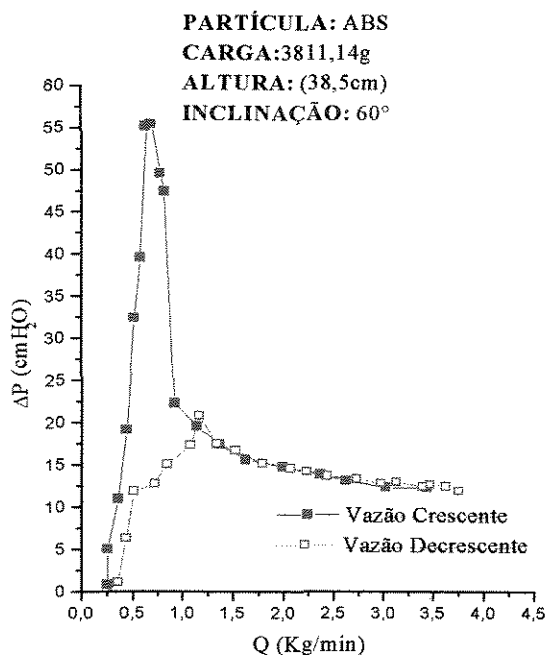


Fig. 4.3c

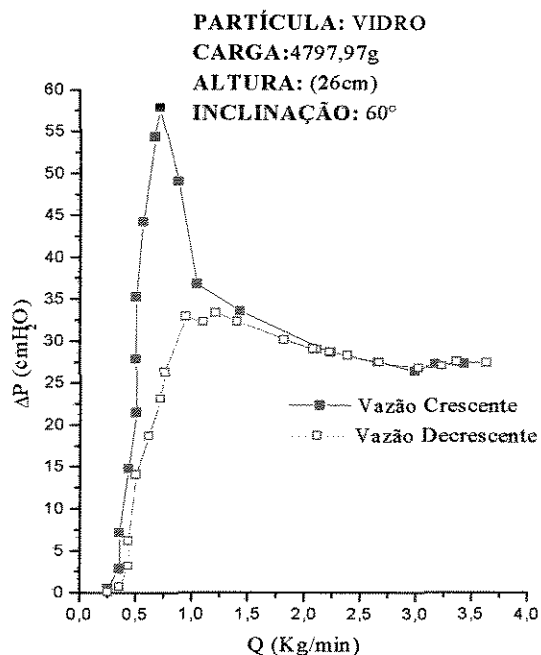


Fig. 4.3d

Figura 4.3 - Curvas Características do Leito Grande ($L_1 = 80$ cm).

O restante dos gráficos de queda de pressão versus vazão de ar das corridas, incluindo as duplicatas, estão apresentados no Anexo A.

A proporcionalidade existente entre os valores de queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo nos leitos de geometria semelhante pode ser estudada através das análises de similaridade fluidodinâmica dos parâmetros de escala que influenciam esses fenômenos. Mas para entendermos melhor a influência desses parâmetros nas variáveis dependentes, realizamos um planejamento experimental envolvendo todos os leitos e os principais parâmetros de operação que serão apresentados no próximo tópico.

4.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O método do planejamento fatorial de experimentos foi utilizado para estimar os efeitos dos parâmetros de escala na queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo. A estimativa desses efeitos foi realizada através do software “STATISTICA for Windows” fabricado pela StatSoft, Inc. (Tulsa, EUA, 1984 - 1995). O programa utiliza o algoritmo de Yates para estimar os efeitos (Yates, F., 1937).

Os efeitos classificados como principais indicam a importância da variável na resposta a ser analisada e quando o efeito de uma variável depende do nível de outra, interagindo entre si, o efeito é secundário. Podem existir efeitos de terceira e quarta ordem que em alguns casos são desprezados. A existência de interações torna incorreta a análise isolada do efeito de um único fator. Os efeitos dos fatores devem ser interpretados conjuntamente para que a interação entre eles fique claramente evidenciada. Quanto maior o valor de um efeito, maior sua importância. Valores positivos indicam efeitos sinérgicos e valores negativos indicam efeitos antagônicos.

As Tabelas 4.3 a 4.8 mostram os valores já codificados das variáveis independentes do processo de jorro e os valores das respostas para cada planejamento fatorial realizado. Em seguida serão apresentados os resultados dos planejamentos. Além da estimativa dos efeitos, as superfícies de resposta da queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo em função das variáveis independentes foram avaliadas e serão mostradas ainda neste capítulo.

Tabela 4.3 - Planejamento Fatorial 2^3 - Leito Pequeno ($L_1 = 15$ cm)

Corrida	H/H _{MAX}	ρ_s (Kg/m ³)	Ângulo (°)	ΔP_{max} (cm H ₂ O)	Q _{jm} (Kg/min)
1	+	+	+	35,1	0,42
2	+	+	-	51,3	0,43
3	+	-	+	36,4	0,37
4	+	-	-	28,5	0,29
5	-	+	+	13,3	0,27
6	-	+	-	20,1	0,34
7	-	-	+	7,0	0,18
8	-	-	-	9,7	0,21
9	+	+	+	37,1	0,44
10	+	+	-	49,7	0,44
11	+	-	+	31,0	0,35
12	+	-	-	29,7	0,30
13	-	+	+	13,1	0,26
14	-	+	-	20,2	0,35
15	-	-	+	7,0	0,18
16	-	-	-	9,7	0,22

Tabela 4.4 - Planejamento Fatorial 2^3 - Leito Médio ($L_1 = 30$ cm)

Corrida	H/H _{MAX}	ρ_s (Kg/m ³)	Ângulo (°)	ΔP_{max} (cm H ₂ O)	Q _{jm} (Kg/min)
1	+	+	+	68,1	1,50
2	+	+	-	48,1	1,30
3	+	-	+	39,0	0,80
4	+	-	-	29,4	0,75
5	-	+	+	33,3	1,00
6	-	+	-	24,9	0,80
7	-	-	+	21,1	0,50
8	-	-	-	14,7	0,50
9	+	+	+	68,3	1,50
10	+	+	-	47,2	1,30
11	+	-	+	41,3	0,90
12	+	-	-	28,7	0,80
13	-	+	+	33,9	1,00
14	-	+	-	25,5	0,90
15	-	-	+	19,5	0,50
16	-	-	-	15,1	0,51

Tabela 4.5 - Planejamento Fatorial 2^3 - Leito Grande ($L_1 = 80$ cm)

Corrida	H/H _{MAX}	ρ_s (Kg/m ³)	Ângulo (°)	$\Delta P_{\max}$ (cm H ₂ O)	Q _{jm} (Kg/min)
1	+	+	+	119,2	2,30
2	+	+	-	113,5	2,00
3	+	-	+	105,2	1,80
4	+	-	-	89,9	1,50
5	-	+	+	58,2	1,25
6	-	+	-	58,2	1,40
7	-	-	+	55,7	1,20
8	-	-	-	34,1	1,00
9	+	+	+	118,7	2,20
10	+	+	-	105,3	2,10
11	+	-	+	105,2	1,80
12	+	-	-	91,7	1,50
13	-	+	+	57,1	1,40
14	-	+	-	57,0	1,30
15	-	-	+	48,9	1,20
16	-	-	-	34,3	1,10

Tabela 4.6 - Planejamento Fatorial 2^4 - Leito Pequeno e Leito Médio.

Corrida	L_1	H/H_{MAX}	ρ_s (Kg/m ³)	Ângulo (°)	ΔP_{max} (cm H ₂ O)	Q_{jm} (Kg/min)
1	+	+	+	+	68,1	1,50
2	+	+	+	-	48,1	1,30
3	+	+	-	+	39,0	0,80
4	+	+	-	-	29,4	0,75
5	+	-	+	+	33,3	1,00
6	+	-	+	-	24,9	0,80
7	+	-	-	+	21,1	0,50
8	+	-	-	-	14,7	0,50
9	-	+	+	+	35,1	0,42
10	-	+	+	-	51,3	0,43
11	-	+	-	+	36,4	0,37
12	-	+	-	-	28,5	0,29
13	-	-	+	+	13,3	0,27
14	-	-	+	-	11,5	0,23
15	-	-	-	+	7,0	0,18
16	-	-	-	-	9,7	0,21
17	+	+	+	+	68,3	1,50
18	+	+	+	-	47,2	1,30
19	+	+	-	+	41,3	0,90
20	+	+	-	-	28,7	0,80
21	+	-	+	+	33,9	1,00
22	+	-	+	-	25,5	0,90
23	+	-	-	+	19,5	0,50
24	+	-	-	-	15,1	0,51
25	-	+	+	+	37,1	0,44
26	-	+	+	-	49,7	0,44
27	-	+	-	+	31,0	0,35
28	-	+	-	-	29,7	0,30
29	-	-	+	+	13,1	0,26
30	-	-	+	-	11,2	0,22
31	-	-	-	+	7,0	0,18
32	-	-	-	-	9,7	0,22

Tabela 4.7 - Planejamento Fatorial 2^4 - Leito Pequeno e Leito Grande.

Corrida	L_1	H/H_{MAX}	ρ_s (Kg/m ³)	Ângulo (°)	ΔP_{max} (cm H ₂ O)	Q_{jm} (Kg/min)
1	+	+	+	+	119,2	2,30
2	+	+	+	-	113,5	2,00
3	+	+	-	+	105,2	1,80
4	+	+	-	-	89,9	1,50
5	+	-	+	+	58,2	1,25
6	+	-	+	-	58,2	1,40
7	+	-	-	+	55,7	1,20
8	+	-	-	-	34,1	1,00
9	-	+	+	+	35,1	0,42
10	-	+	+	-	51,3	0,43
11	-	+	-	+	36,4	0,37
12	-	+	-	-	28,5	0,29
13	-	-	+	+	13,3	0,27
14	-	-	+	-	11,5	0,23
15	-	-	-	+	7,0	0,18
16	-	-	-	-	9,7	0,21
17	+	+	+	+	118,7	2,20
18	+	+	+	-	105,3	2,10
19	+	+	-	+	105,2	1,80
20	+	+	-	-	91,7	1,50
21	+	-	+	+	57,1	1,40
22	+	-	+	-	57,0	1,30
23	+	-	-	+	48,9	1,20
24	+	-	-	-	34,3	1,10
25	-	+	+	+	37,1	0,44
26	-	+	+	-	49,7	0,44
27	-	+	-	+	31,0	0,35
28	-	+	-	-	29,7	0,30
29	-	-	+	+	13,1	0,26
30	-	-	+	-	11,2	0,22
31	-	-	-	+	7,0	0,18
32	-	-	-	-	9,7	0,22

Tabela 4.8 - Planejamento Fatorial 2^4 - Leito Médio e Leito Grande.

Corrida	L_1	H/H_{MAX}	ρ_s (Kg/m ³)	Ângulo (°)	ΔP_{max} (cm H ₂ O)	Q_{jm} (Kg/min)
1	+	+	+	+	119,2	2,30
2	+	+	+	-	113,5	2,00
3	+	+	-	+	105,2	1,80
4	+	+	-	-	89,9	1,50
5	+	-	+	+	58,2	1,25
6	+	-	+	-	58,2	1,40
7	+	-	-	+	55,7	1,20
8	+	-	-	-	34,1	1,00
9	-	+	+	+	68,1	1,50
10	-	+	+	-	48,1	1,30
11	-	+	-	+	39,0	0,80
12	-	+	-	-	29,4	0,75
13	-	-	+	+	33,3	1,00
14	-	-	+	-	24,9	0,80
15	-	-	-	+	21,1	0,50
16	-	-	-	-	14,7	0,50
17	+	+	+	+	118,7	2,20
18	+	+	+	-	105,3	2,10
19	+	+	-	+	105,2	1,80
20	+	+	-	-	91,7	1,50
21	+	-	+	+	57,1	1,40
22	+	-	+	-	57,0	1,30
23	+	-	-	+	48,9	1,20
24	+	-	-	-	34,3	1,10
25	-	+	+	+	68,3	1,50
26	-	+	+	-	47,2	1,30
27	-	+	-	+	41,3	0,90
28	-	+	-	-	28,7	0,80
29	-	-	+	+	33,9	1,00
30	-	-	+	-	25,5	0,90
31	-	-	-	+	19,5	0,50
32	-	-	-	-	15,1	0,51

4.3.1 Análise dos Efeitos do Planejamento Fatorial 2^3 para o Leito Pequeno.

As Tabelas 4.9 e 4.10 apresentam os resultados da análise dos dados da Tabela 4.3.

Tabela 4.9 - Estimativa dos Efeitos sobre $\Delta P_{\max}$ (Leito Pequeno).

Variável: $\Delta P_{\max}$	Estimativa dos Efeitos $R^2 = 0,99417$			
Fator	Efeito	Erro Padrão	-95% Limite de Confiança	+95% Limite de Confiança
Média Global	24,93125*	0,381250*	24,05209*	25,81041*
(1) $H/H_{\max}$	24,83750*	0,762500*	23,07917*	26,59583*
(2) ρ_p	10,11250*	0,762500*	8,35417*	11,87083*
(3) Ângulo	-4,86250*	0,762500*	-6,62083*	-3,10417*
(12)	1,78750*	0,762500*	0,02917*	3,54583*
(13)	-0,03750	0,762500	-1,79583	1,72083
(23)	-5,81250*	0,762500*	-7,57083*	-4,05417*
(123)	-3,6875*	0,762500*	-5,44583*	-1,92917*

(*) - Efeitos estatisticamente significativos

Tabela 4.10 - Estimativa dos Efeitos sobre Q_{jm} (Leito Pequeno).

Variável: Q_{jm}	Estimativa dos Efeitos $R^2 = 0,99476$			
Fator	Efeito	Erro Padrão	-95% Limite de Confiança	+95% Limite de Confiança
Média Global	0,315625*	0,002253*	0,310428*	0,320822*
(1) $H/H_{\max}$	0,128750*	0,004507*	0,118357*	0,139143*
(2) ρ_p	0,106250*	0,004507*	0,095857*	0,116643*
(3) Ângulo	-0,013750*	0,004507*	-0,024143*	-0,003357*
(12)	-0,001250	0,004507	-0,011643	0,009143
(13)	0,043750*	0,004507*	0,033357*	0,054143*
(23)	-0,028750*	0,004507*	-0,039143*	-0,018357*
(123)	-0,00625	0,004507	-0,016643	0,004143

(*) - Efeitos estatisticamente significativos

Nos planejamentos fatoriais 2^3 , cada efeito é uma combinação linear dos resultados de oito corridas experimentais, com os coeficientes $\pm 1/4$ (Barros Neto, Scarminio e Bruns, 1995). Cada um dos oito valores de combinação é uma média de dois outros, já que os experimentos foram feitos em duplicata. A média global das variáveis dependentes é calculada, pois também é uma combinação linear das corridas, mas com coeficientes iguais a $1/8$.

Os fatores 1 ($H / H_{\max}$), 2 (partícula) e 3 (ângulo) são os efeitos principais e os efeitos de interação de dois fatores são identificados nas tabelas 4.9 e 4.10 pelos números combinados dos efeitos principais 12, 13, 23 e 123. O erro padrão dos efeitos é a raiz quadrada da variância de cada efeito e vale o dobro do erro padrão das variáveis dependentes, pois os coeficientes de combinação linear neste caso são todos iguais a $1/8$ ao invés de $\pm 1/4$.

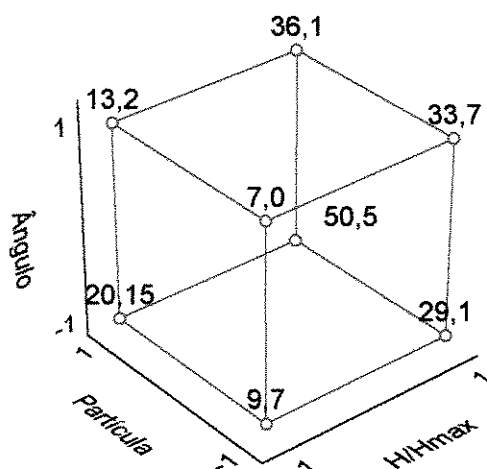
Através do teste do limite de confiança, só serão significativos os efeitos que estiverem dentro de um intervalo em que não exista a possibilidade de ser zero. Com 95% de confiança, os valores em asterisco indicam que o efeito é significativo, portanto pode-se verificar a existência de dois efeitos significativos da interação de dois fatores e um de três na Tabela 4.9 e, na Tabela 4.10, apenas dois efeitos de interação de dois fatores são significativos.

Com relação à queda de pressão máxima, nenhum efeito principal pode ser interpretado isoladamente. Apesar de $H/H_{\max}$ não interagir diretamente com o ângulo, seu efeito com a partícula depende do nível do ângulo, dessa forma o efeito de interação dos três fatores é significativo. Com relação à vazão de jorro mínimo, pode-se dizer que $H/H_{\max}$ só não interage com a partícula. O outro efeito de interação, partícula e ângulo, não depende dos níveis de $H/H_{\max}$, o que justifica a inexistência de interação de três fatores.

A melhor forma de interpretar conjuntamente os efeitos é traçando um diagrama contendo as respostas médias em todas as combinações de níveis das variáveis. Os efeitos calculados podem ser interpretados como contrastes geométricos de um cubo como mostrado na Figura 4.4. Os valores médios das variáveis dependentes obtidos das corridas correspondem aos vértices do cubo. Os efeitos principais são contrastes entre faces opostas e as interações de dois fatores são contrastes entre planos diagonais. Examinando os diagramas para queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo da Figura 4.4 pode-se concluir que:

Planejamento Fatorial 2^3 - Leito Pequeno

Valores Médios da Queda de Pressão Máxima



Valores Máximos da Vazão de Jorro Mínimo

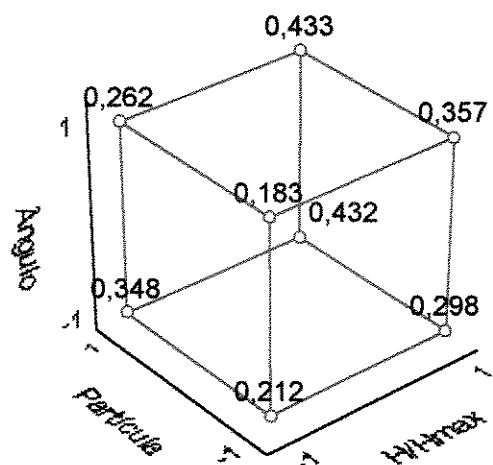


Figura 4.4 - Interpretação Geométrica dos Efeitos (Leito Pequeno).

1. Quando $H/H_{\max}$ aumenta de 0,55 para 0,95, o valor de $\Delta P_{\max}$ aumenta em todos os níveis das outras variáveis. O maior aumento foi de 30,35 cmH₂O utilizando o leito com ângulo de 45° e partículas de vidro contra 26,7 cmH₂O com ângulo de 60° e partículas de ABS, 22,9 cmH₂O com ângulo de 60° e partículas de vidro e 19,4 cmH₂O com ângulo de 45° e partículas de ABS.

2. A troca das partículas de ABS por esferas de vidro causa um aumento na queda de pressão máxima também em todos os níveis das outras variáveis. Os maiores aumentos ocorreram quando se utilizou o ângulo de base de 45° (21,4 cmH₂O com $H/H_{\max} = 0,95$ contra 10,45 cmH₂O com $H/H_{\max} = 0,55$). Os menores aumentos ocorreram com ângulo de base de 60° (2,4 cmH₂O com $H/H_{\max} = 0,95$ contra 6,2 cmH₂O com $H/H_{\max} = 0,55$).

3. Quando o ângulo de base de 45° foi trocado pelo de 60°, a queda de pressão máxima aumentou somente quando $H/H_{\max} = 0,95$ foi utilizado com partículas de ABS. Este aumento foi de 4,6 cmH₂O. Nos outros níveis das variáveis, a queda de pressão máxima diminuiu. A maior queda foi de 14,4 cmH₂O quando utilizou-se partículas de vidro e $H/H_{\max} = 0,95$ contra 6,95 cmH₂O com partículas de vidro e $H/H_{\max} = 0,55$ e 2,7 cmH₂O com partículas de ABS e $H/H_{\max} = 0,55$.

4. O maior aumento na queda de pressão máxima ocorreu quando $H/H_{\max}$ aumentou de 0,55 para 0,95 e foi de 30,35 cmH₂O utilizando o leito com ângulo de 45° e partículas de vidro e a maior queda ocorreu pela troca do ângulo de 45° pelo de 60° com partículas de vidro e $H/H_{\max} = 0,95$.

5. A vazão de jorro mínimo aumentou quando $H/H_{\max}$ mudou de 0,55 para 0,95 em todos os níveis dos outros fatores. Os maiores aumentos ocorreram quando o ângulo de base de 60° foi utilizado com partículas de ABS e vidro (0,174 Kg/min e 0,171 Kg/min, respectivamente). Os menores aumentos ocorreram quando o ângulo de 45° foi utilizado com as partículas de ABS e vidro (0,086 Kg/min e 0,084 Kg/min, respectivamente). Esses resultados mostram que o fator $H/H_{\max}$ não interage com as partículas, pois as respostas são praticamente as mesmas quando se utiliza apenas um nível do ângulo de base.

6. A troca das partículas de ABS por esferas de vidro causa aumentos maiores na vazão de jorro mínimo quando utilizamos o ângulo de base de 45° com $H/H_{\max} = 0,55$ e 0,95

(0,136 e 0,134 Kg/min, respectivamente). Os aumentos menores ocorreram quando utilizamos o ângulo de base de 60^0 com $H/H_{\max} = 0,55$ e 0,95 (0,079 e 0,076 Kg/min, respectivamente). Da mesma forma como no caso anterior, estes resultados confirmam a inexistência de interação entre $H/H_{\max}$ e as partículas.

7. Quando trocamos o ângulo de base de 45^0 por 60^0 a vazão de jorro mínimo apresenta pequenos aumentos quando utilizamos $H/H_{\max} = 0,95$ com partículas de ABS e de vidro (0,059 e 0,01 Kg/min, respectivamente). E quando utilizamos $H/H_{\max} = 0,55$, a vazão de jorro mínimo diminui com partículas de ABS e de vidro (0,029 e 0,086 cmH₂O, respectivamente).

8. O maior aumento da vazão de jorro mínimo ocorreu quando $H/H_{\max}$ aumentou de 0,55 para 0,95 e foi de 0,174 Kg/min utilizando o leito com ângulo de 60^0 e partículas de ABS. A maior queda da vazão de jorro mínimo ocorreu quando trocamos o ângulo de base de 45^0 por 60^0 utilizando $H/H_{\max} = 0,55$ e partículas de vidro (0,086 cmH₂O).

Para mostrar mais claramente quais variáveis, ou quais interações têm maior influência no processo, apresentamos na Figura 4.5 o diagrama Pareto de efeitos (Plackett, R. L., e Burman, J. P., 1946). Esse diagrama mostra a estimativa dos efeitos distribuídos de acordo com seu tamanho absoluto, calculados através do teste “t” de Student (1908). A linha vertical que corta os efeitos padronizados indica a magnitude mínima dos efeitos estatisticamente significantes. Os valores à direita dessa linha são significativos e os da esquerda não apresentam qualquer influência sobre as variáveis dependentes.

Verifica-se pela Figura 4.5 que o fator $H/H_{\max}$ é o que mais influencia na queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo, o que pode ser percebido pelas interpretações do gráfico anterior. Em segundo vem a partícula, ou a densidade das partículas. É importante observar que o efeito do ângulo é bem pequeno e antagônico nos dois casos, mas seu efeito, em alguns casos, é maior quando interage com outra variável, como acontece no caso da interação 23 (partícula-ângulo), influenciando significativamente nos resultados de queda de pressão máxima e também no caso em que as interações 13 e 23 ($H/H_{\max}$ -ângulo e partícula-ângulo) causam efeitos maiores na vazão de jorro mínimo do que o efeito isolado do ângulo. As interações $H/H_{\max}$ -partícula e $H/H_{\max}$ -ângulo ocorrem, mas não têm nenhum efeito

significativo nos resultados de queda de pressão máxima. O mesmo acontece com a interação $H/H_{\max}$ -partícula para as vazões de jorro mínimo.

Agora que conhecemos os principais efeitos sobre nossas variáveis de interesse, apresentaremos os gráficos de superfície de resposta com o objetivo de conhecermos também uma região ótima (máxima ou mínima) da queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo. Esses gráficos encontram-se nas Figuras 4.6 e 4.7.

A metodologia de superfícies de resposta (ou RSM, de *Response Surface Methodology*) é uma técnica de otimização baseada no emprego de planejamentos fatoriais, introduzida por G. E. P. Box na década de 1950, e que desde então tem sido usada com grande sucesso na modelagem de diversos processos industriais. Essa metodologia é constituída de duas etapas distintas: modelagem e deslocamento. Essas etapas são repetidas tantas vezes quantas forem necessárias, com o objetivo de atingir uma região ótima (máxima ou mínima) da superfície investigada. A modelagem normalmente é feita ajustando-se modelos lineares ou quadráticos a resultados experimentais obtidos a partir de planejamentos fatoriais. O deslocamento se dá sempre ao longo do caminho de máxima inclinação de um determinado modelo, que é a trajetória na qual a resposta varia de forma mais pronunciada.

As superfícies de resposta das Figuras 4.6 e 4.7 são relações funcionais entre os valores verdadeiros das respostas e dos fatores. Os círculos azuis são os pontos experimentais das corridas. As superfícies contêm regiões de máximo e mínimo para $\Delta P_{\max}$ e Q_{jm} , respectivamente, que são funções lineares das variáveis codificadas. Para codificar dois valores de um efeito em -1 e +1 e utilizá-los nos modelos lineares apresentados nas figuras, basta subtrair de cada um deles o valor médio e dividir o resultado pela metade da diferença entre o valor superior e o valor inferior. Como exemplo, a codificação dos valores do ângulo de base (fator 3) de 45^0 e 60^0 é a seguinte:

$$(45^0 - 52,5^0) / [(60^0 - 45^0) / 2] = -7,5 / 7,5 = -1$$

$$(60^0 - 52,5^0) / [(60^0 - 45^0) / 2] = 7,5 / 7,5 = 1$$

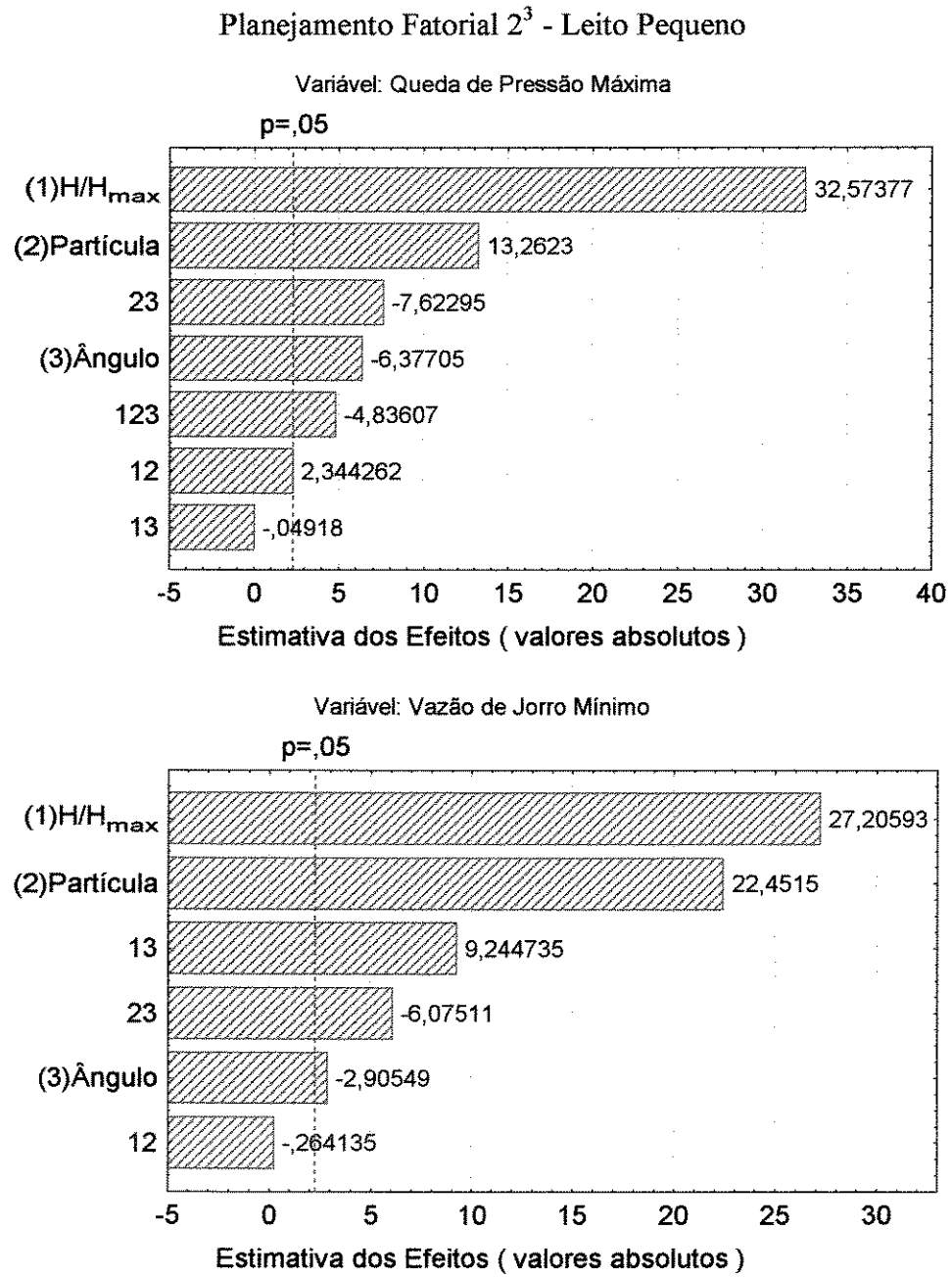


Figura 4.5 - Diagramas de Pareto dos Efeitos Padronizados (Leito Pequeno).

Através das superfícies de resposta podemos obter valores de queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo para valores diferentes das variáveis de controle estudadas. Se desejarmos obter maiores valores para a queda de pressão máxima, devemos deslocar a região experimental para maiores valores de $H/H_{\max}$, e maiores valores de ρ_p , mas valores menores do ângulo de base causam pequenos aumentos em $\Delta P_{\max}$. Esse procedimento é observado pelo deslocamento ao longo da trajetória perpendicular às curvas de nível, ou seja, seguindo o caminho de máxima inclinação da superfície ajustada. Os maiores valores para a vazão de jorro mínimo, seguindo o caminho de máxima inclinação da superfície, deslocam-se para maiores valores de $H/H_{\max}$ e maiores valores de ρ_p , mas no caso do ângulo, a região em que a vazão de jorro mínimo apresenta valores mais altos, as duas superfícies de resposta são aproximadamente paralelas, indicando a pequena influência desse fator.

As análises feitas até agora envolveram apenas as corridas realizadas no menor leito de jorro bidimensional. Espera-se que o comportamento das variáveis dependentes nos leitos maiores sejam semelhantes, ou que pelo menos tenham a mesma tendência, uma vez que os leitos apresentam mesma geometria apenas ampliada.

Planejamento Fatorial 2^3 - Modelo Linear:

$$24,93+12,42*(1)+5,06*(2)-2,43*(3)+0,89*(1)*(2)-0,02*(1)*(3)-2,91*(2)*(3)-1,84*(1)*(2)*(3)$$

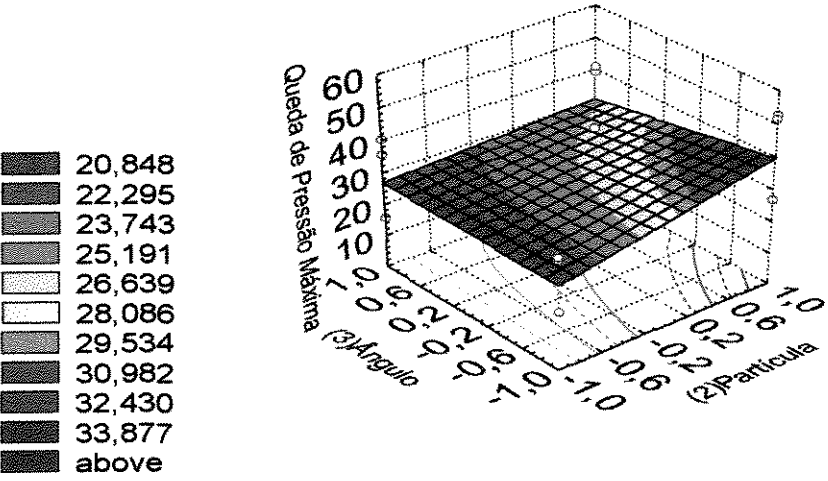
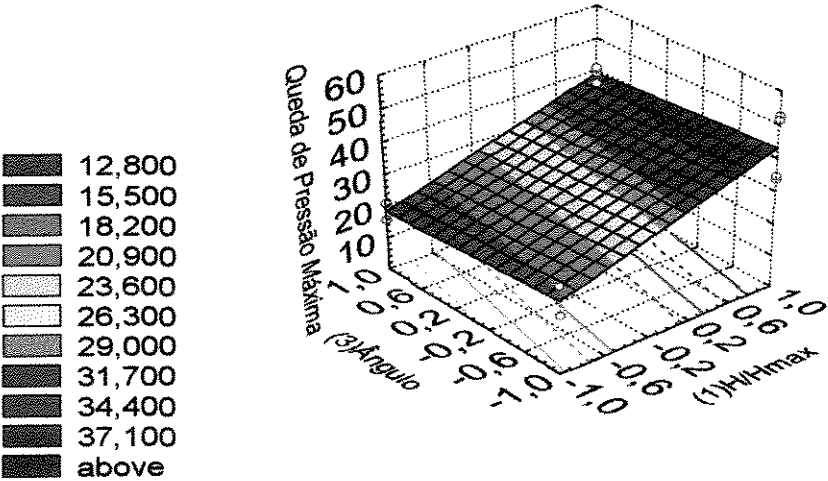
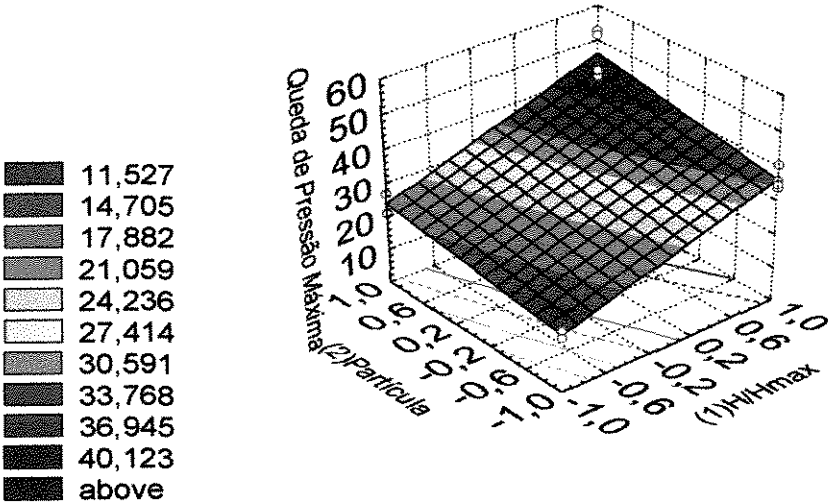


Figura 4.6 - Superfícies de Resposta para ΔP_{max} (Leito Pequeno).

Planejamento Fatorial 2^3 - Modelo Linear:

$$0,32+0,06*(1)+0,05*(2)-6,9*10^{-3}*(3)+6,3*10^{-4}*(1)*(2)+0,02*(1)*(3)-0,01*(2)*(3)-3,1*10^{-3}*(1)*(2)*(3)$$

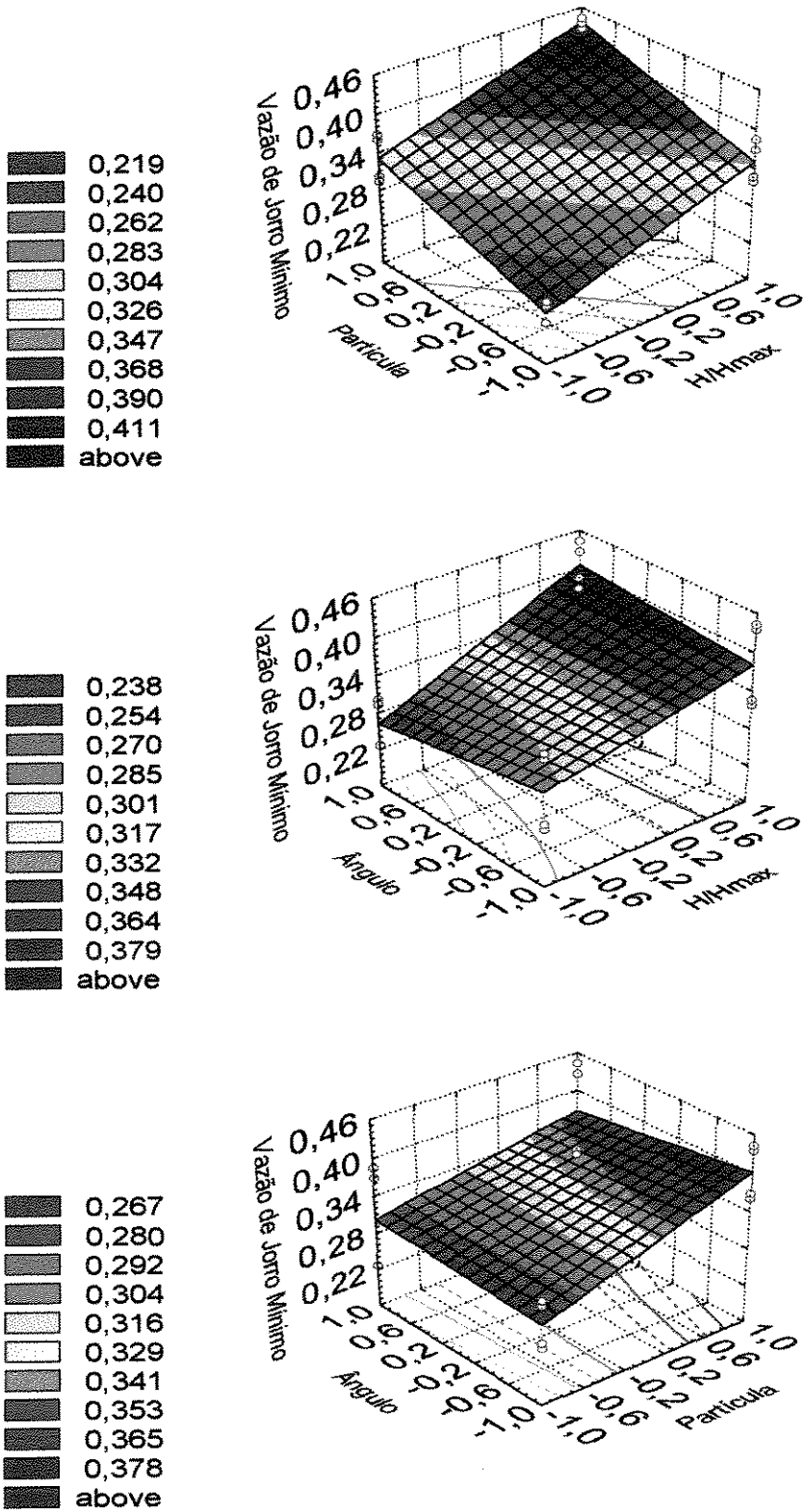


Figura 4.7 - Superfícies de Resposta para Q_{jm} (Leito Pequeno).

4.3.2 Análise dos Efeitos do Planejamento Fatorial 2^3 para o Leito Médio.

Os resultados da análise do planejamento fatorial 2^3 para o leito médio (Tabela 4.4) são mostrados nas Tabelas 4.11 e 4.12.

Tabela 4.11 - Estimativa dos Efeitos sobre $\Delta P_{\max}$ (Leito Médio).

Variável: $\Delta P_{\max}$	Estimativa dos Efeitos $R^2 = 0,99877$			
Fator	Efeito	Erro Padrão	-95% Limite de Confiança	+95% Limite de Confiança
Média Global	34,88125*	0,198333*	34,42389*	35,33861*
(1) $H/H_{\max}$	22,76250*	0,396666*	21,84779*	23,67721*
(2) ρ_p	17,56250*	0,396666*	16,64779*	18,47721*
(3) Ângulo	11,36250*	0,396666*	10,44779*	12,27721*
(12)	5,76250*	0,396666*	4,84779*	6,67721*
(13)	4,46250*	0,396666*	3,54779*	5,37721*
(23)	3,11250*	0,396666*	2,19779*	4,02721*
(123)	1,6125*	0,396666*	0,69779*	2,52721*

(*) - Efeitos estatisticamente significativos

Tabela 4.12 - Estimativa dos Efeitos sobre Q_{jm} (Leito Médio).

Variável: Q_{jm}	Estimativa dos Efeitos $R^2 = 0,99352$			
Fator	Efeito	Erro Padrão	-95% Limite de Confiança	+95% Limite de Confiança
Média Global	0,9100*	0,009396*	0,888333*	0,931667*
(1) $H/H_{\max}$	0,3925*	0,018792*	0,349166*	0,435834*
(2) ρ_p	0,5050*	0,018792*	0,461666*	0,548334*
(3) Ângulo	0,1050*	0,018792*	0,061666*	0,148334*
(12)	0,0825*	0,018792*	0,039166*	0,125834*
(13)	0,0325	0,018792	-0,010834	0,075834
(23)	0,0700*	0,018792*	0,026666*	0,113334*
(123)	-0,0075	0,018792	-0,050834	0,035834

(*) - Efeitos estatisticamente significativos

Os efeitos principais, de interação de dois e de três fatores são significativos sobre a queda de pressão máxima, portanto devem ser analisados conjuntamente. Sobre a vazão de jorro mínimo, apenas os efeitos 13 ($H/H_{\max}$ -ângulo) e 123 ($H/H_{\max}$ -partícula-ângulo) não são significativos e indicam que $H/H_{\max}$ não interage com o ângulo de base dos leitos.

A interpretação geométrica dos efeitos da Figura 4.8 nos mostra que:

1. Quando $H/H_{\max}$ aumenta de 0,55 para 0,95, o valor de $\Delta P_{\max}$ aumenta em todos os níveis das outras variáveis. Os maiores aumentos ocorreram quando as partículas de vidro foram utilizadas com ângulos de base de 60° e de 45° (34,6 cmH₂O e 22,45 cmH₂O, respectivamente). Os menores aumentos ocorreram quando as partículas de ABS foram utilizadas com ângulos de base de 60° e de 45° (19,85 cmH₂O e 14,15 cmH₂O, respectivamente).
2. A troca das partículas de ABS por esferas de vidro causa um aumento na queda de pressão máxima também em todos os níveis das outras variáveis. Os maiores aumentos ocorreram quando $H/H_{\max} = 0,95$ utilizando ângulos de base de 60° e de 45° (28,05 cmH₂O e 18,6 cmH₂O, respectivamente). Os menores aumentos ocorreram quando $H/H_{\max} = 0,55$ utilizando ângulos de base de 60° e de 45° (13,3 cmH₂O e 10,3 cmH₂O, respectivamente).
3. Quando trocamos o ângulo de base de 45° por 60° , a queda de pressão máxima também é aumentada em todos os níveis dos outros fatores. Os maiores aumentos ocorreram quando $H/H_{\max} = 0,95$ utilizando partículas de vidro e ABS (20,55 cmH₂O e 11,1 cmH₂O, respectivamente). Os menores aumentos ocorreram quando $H/H_{\max} = 0,55$ utilizando partículas de vidro e ABS (8,4 cmH₂O e 5,4 cmH₂O, respectivamente).
4. O maior aumento da queda de pressão máxima ocorreu quando $H/H_{\max}$ aumentou de 0,55 para 0,95 e foi de 34,6 cmH₂O utilizando o leito com ângulo de 60° e partículas de vidro. O menor aumento ocorreu quando trocamos o ângulo de base de 45° por 60° e foi 5,4 cmH₂O com $H/H_{\max} = 0,55$ e partículas de ABS.
5. A vazão de jorro mínimo aumentou quando $H/H_{\max}$ aumentou de 0,55 para 0,95 em todos os níveis dos outros fatores. Os maiores aumentos ocorreram quando as partículas de vidro foram utilizadas com ângulos de base de 60° e de 45° (0,5 Kg/min e 0,45

Kg/min, respectivamente). Os menores aumentos ocorreram quando as partículas de ABS foram utilizadas com ângulos de 60° e 45° (0,35 Kg/min e 0,27 Kg/min, respectivamente).

6. A vazão de jorro mínimo também aumentou quando trocamos as partículas de ABS por esferas de vidro em todos os níveis dos outros fatores. Os maiores aumentos ocorreram quando $H/H_{\max} = 0,95$ utilizando ângulos de base de 60° e de 45° (0,65 Kg/min e 0,525 Kg/min, respectivamente). Os menores aumentos ocorreram quando $H/H_{\max} = 0,55$ utilizando ângulos de base de 60° e de 45° (0,5 Kg/min e 0,45 Kg/min, respectivamente).

7. A troca do ângulo de base de 45° para 60° causou uma pequena queda na vazão de jorro mínimo quando as partículas de ABS foram utilizadas com $H/H_{\max} = 0,55$ (0,005 Kg/min) e um pequeno aumento com as mesmas partículas, mas com $H/H_{\max} = 0,95$ (0,075 Kg/min). A utilização de partículas de vidro causaram aumentos um pouco maiores em Q_{jm} para $H/H_{\max} = 0,95$ e $0,55$ (0,2 Kg/min e 0,15 Kg/min, respectivamente). Esses resultados mostram que não há interação entre $H/H_{\max}$ e o ângulo de base pela insignificância das respostas quando os níveis desses fatores são trocados.

8. O maior aumento de Q_{jm} ocorreu quando as partículas de ABS foram trocadas pelas esferas de vidro (0,65 Kg/min) utilizando-se $H/H_{\max} = 0,95$ e ângulo de 60° . A única queda na vazão de jorro mínimo ocorreu pela troca do ângulo de 45° para 60° com $H/H_{\max} = 0,55$ e partículas de ABS.

A Figura 4.9 apresenta os diagramas de Pareto dos efeitos sobre $\Delta P_{\max}$ e Q_{jm} para as configurações do leito médio. O fator que mais influenciou a queda de pressão máxima foi $H/H_{\max}$ e em segundo lugar as partículas. No caso da vazão de jorro mínimo a maior influência foi causada pelas partículas e depois por $H/H_{\max}$.

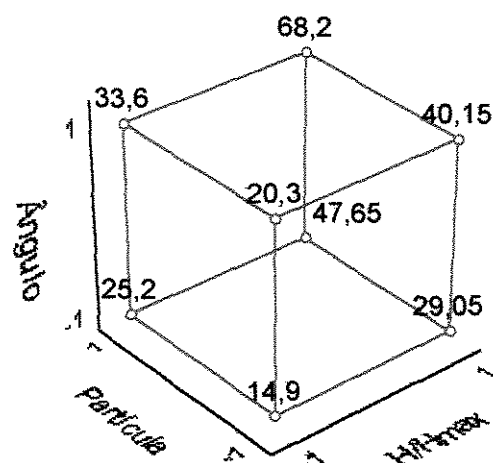
O terceiro fator de maior influência para as duas variáveis dependentes foi o ângulo de base dos leitos. Os efeitos deste fator nas configurações do leito médio foram sinérgicos e bem maiores que os efeitos nas configurações do leito pequeno. Esta constatação se deve ao fato de que, ao contrário do leito médio e do leito grande, as alturas máximas de jorro estável ($H_{\max}$) do leito pequeno com o ângulo de 60° foram um pouco menores do que com o ângulo de 45° .

Dessa forma e uma vez que os valores do fator $H/H_{\max}$ foram estipulados em 0,95 e 0,55, os valores de $\Delta P_{\max}$ e Q_{jm} obtidos foram, na maioria das vezes, maiores no leito pequeno com ângulo de 45° do que com ângulo de 60° , enquanto que nos outros leitos os valores obtidos foram maiores com ângulo de 60° do que com ângulo de 45° . Isto explica o efeito contrário do ângulo, mas a diferença desse efeito quanto ao seu tamanho absoluto poderá ser melhor observada nos planejamentos fatoriais 2^4 , onde o fator L_1 (largura do leito) é incluído no cálculo dos efeitos.

Através das superfícies de resposta para o leito médio, apresentadas nas Figuras 4.10 e 4.11, observamos que o comportamento das variáveis independentes é praticamente o mesmo do comportamento no leito pequeno. Podemos obter maiores valores para a queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo deslocando as regiões experimentais para maiores valores de $H/H_{\max}$, maiores valores de ρ_p e maiores valores do ângulo de base dos leitos.

Planejamento Fatorial 2^3 - Leito Médio

Valores Médios da Queda de Pressão Máxima



Valores Médios da Vazão de Jorro Mínimo

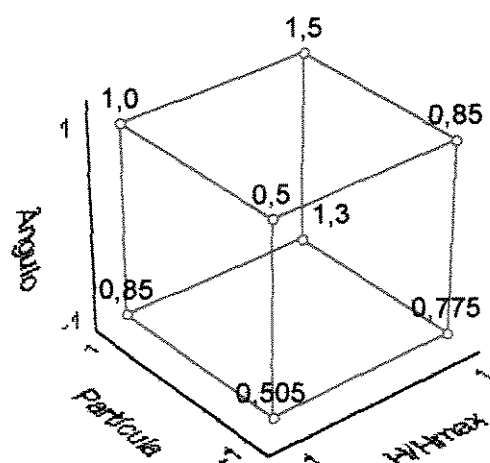


Figura 4.8 - Interpretação Geométrica dos Efeitos (Leito Médio).

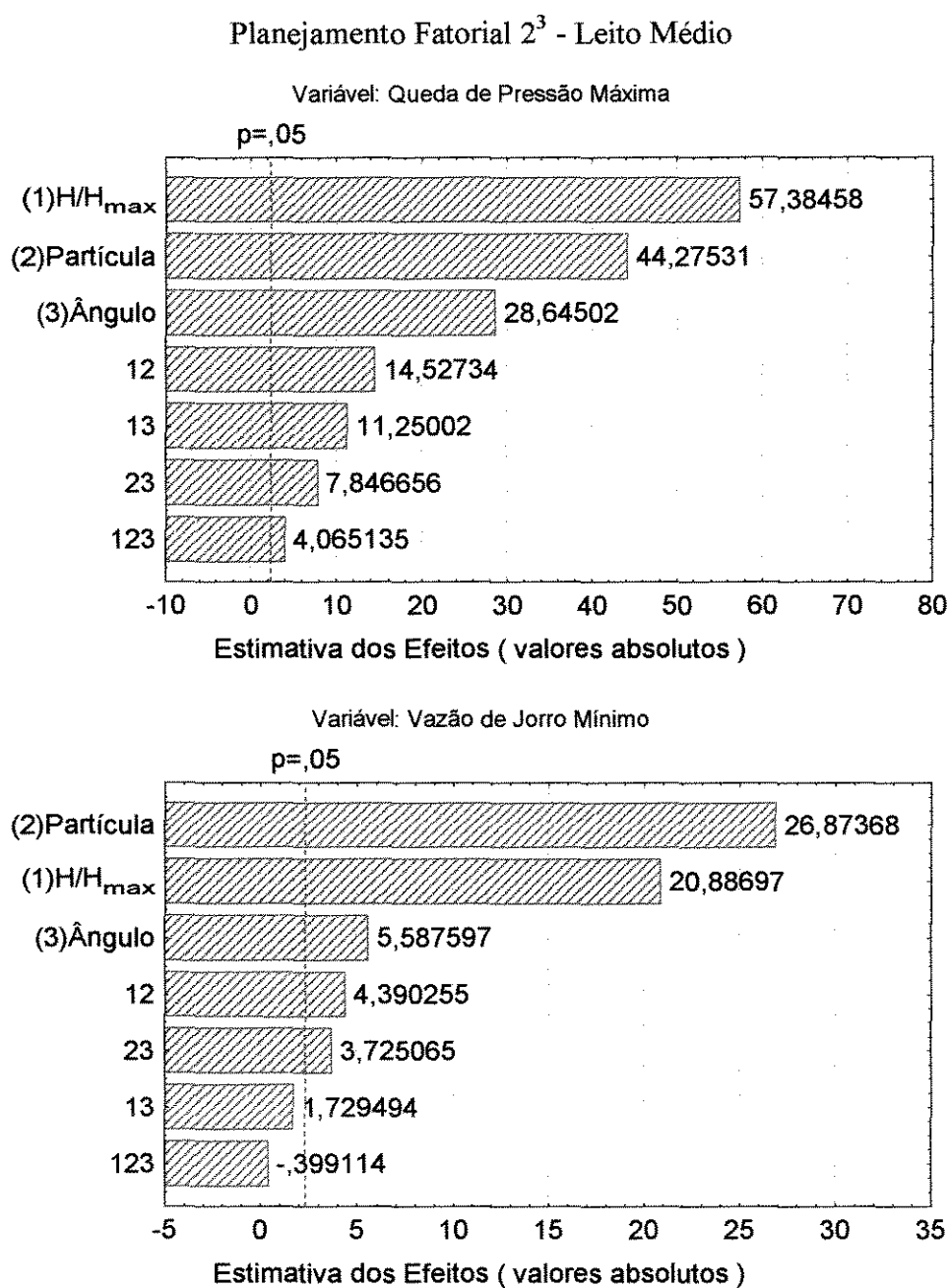


Figura 4.9 - Diagramas de Pareto dos Efeitos Padronizados (Leito Médio).

Planejamento Fatorial 2^3 - Modelo Linear:

$$34,88 + 11,38 \cdot (1) + 8,78 \cdot (2) + 5,68 \cdot (3) + 2,88 \cdot (1) \cdot (2) + 2,23 \cdot (1) \cdot (3) + 1,56 \cdot (2) \cdot (3) + 0,81 \cdot (1) \cdot (2) \cdot (3)$$

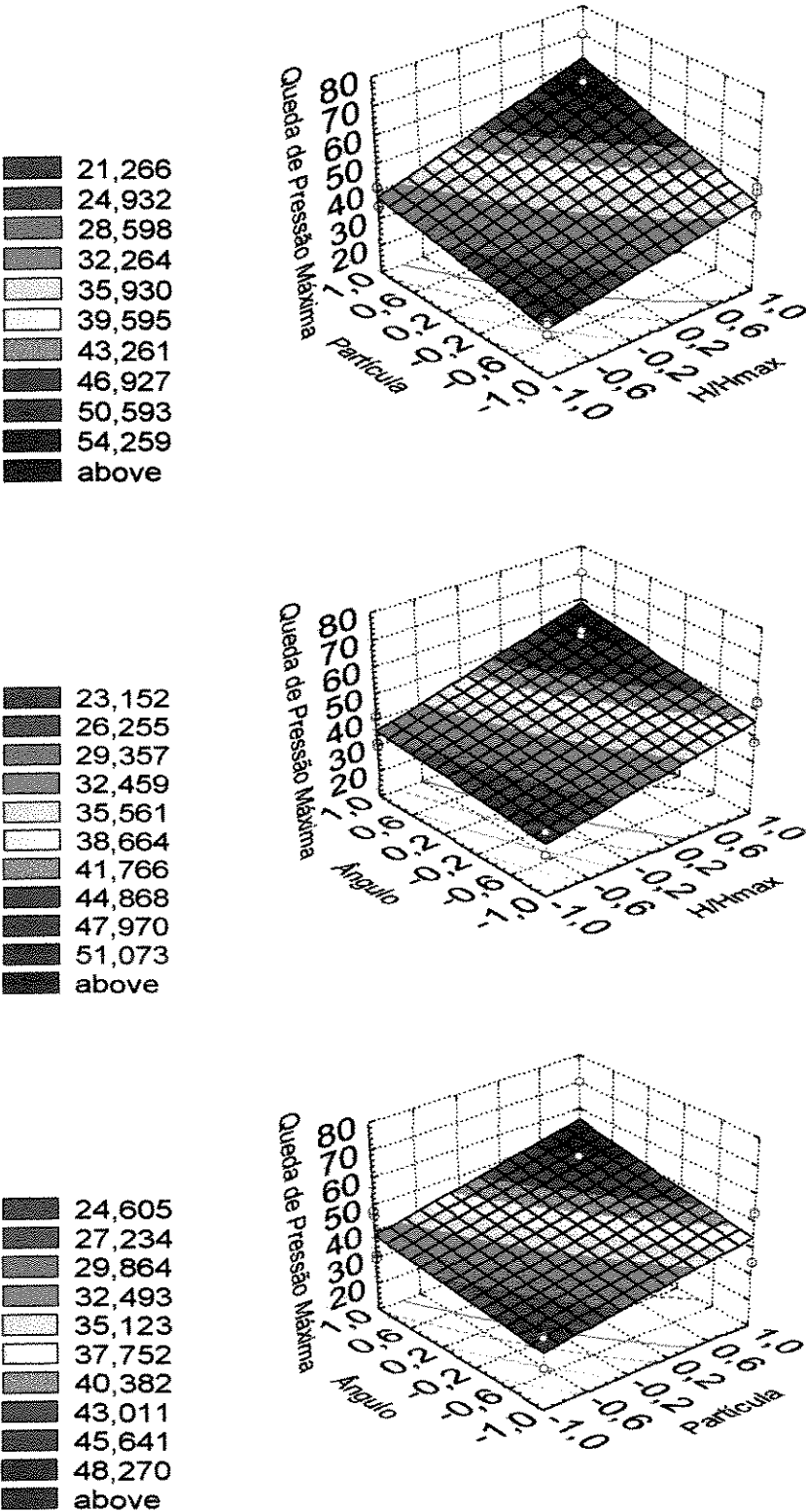


Figura 4.10 - Superfícies de Resposta para $\Delta P_{\max}$ (Leito Médio).

Planejamento Fatorial 2^3 - Modelo Linear:

$$0,91+0,20*(1)+0,25*(2)+0,05*(3)+0,04*(1)*(2)+0,02*(1)*(3)+0,04*(2)*(3)-0,004*(1)*(2)*(3)$$

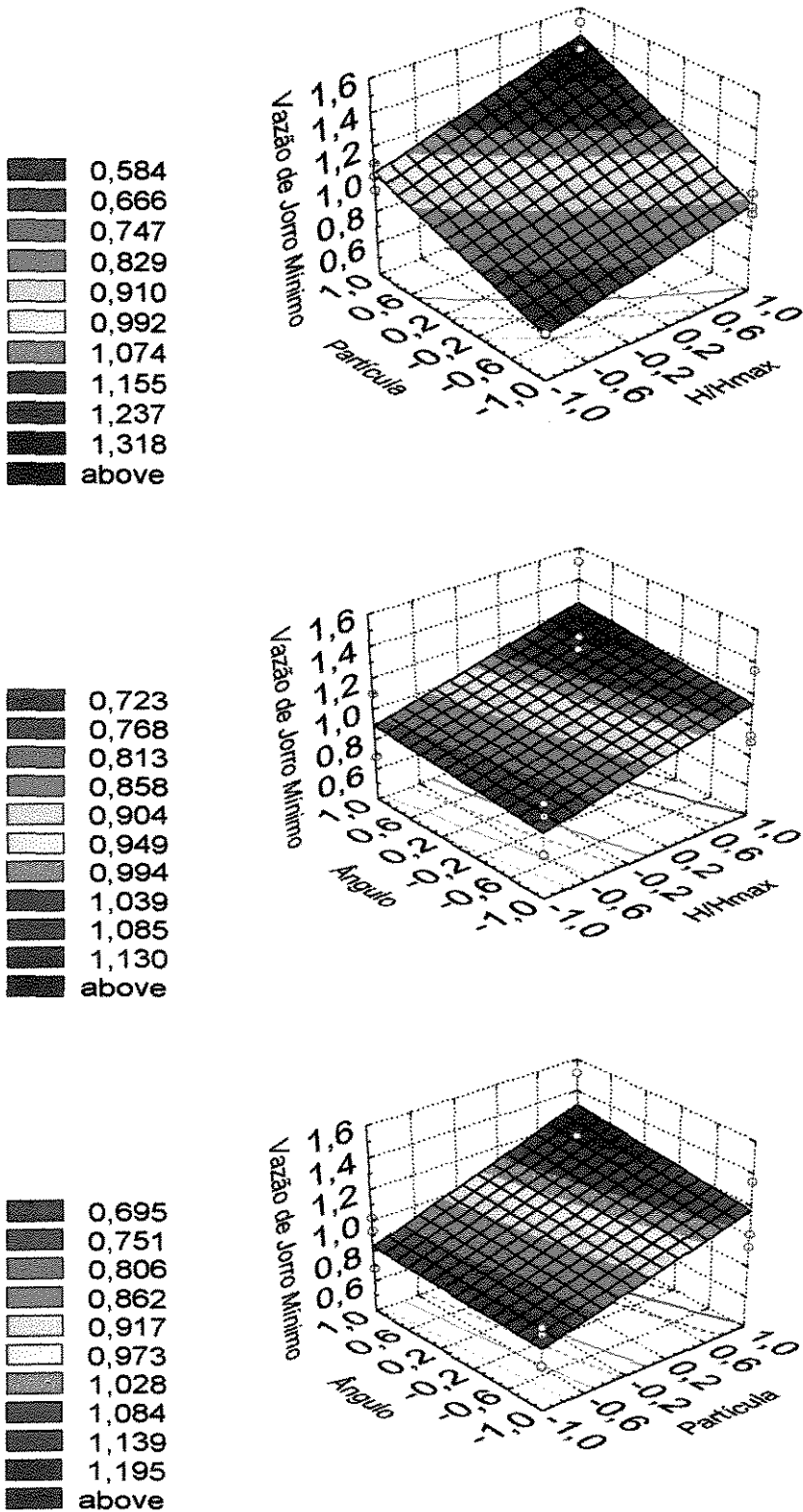


Figura 4.11 - Superfícies de Resposta para Q_{jm} (Leito Médio).

4.3.3 Análise dos Efeitos do Planejamento Fatorial 2^3 para o Leito Grande.

As Tabelas 4.13 e 4.14 apresentam os resultados do planejamento fatorial 2^3 da Tabela 4.5 para o leito grande.

Tabela 4.13 - Estimativa dos Efeitos sobre $\Delta P_{\max}$ (Leito Grande).

Variável: $\Delta P_{\max}$	Estimativa dos Efeitos $R^2 = 0,99573$			
Fator	Efeito	Erro Padrão	-95% Limite de Confiança	+95% Limite de Confiança
Média Global	78,2625*	0,683683*	76,68593*	79,83907*
(1) $H/H_{\max}$	55,650*	1,367365*	52,49685*	58,80315*
(2) ρ_p	15,275*	1,367365*	12,12185*	18,42815*
(3) Ângulo	10,525*	1,367365*	7,37185*	13,67815*
(12)	0,900	1,367365	-2,25315	4,05315
(13)	1,450	1,367365	-1,70315	4,60315
(23)	-5,725*	1,367365*	-8,87815*	-2,57185*
(123)	3,300*	1,367365*	0,14685*	6,45315*

(*) - Efeitos estatisticamente significativos

Tabela 4.14 - Estimativa dos Efeitos sobre Q_{jm} (Leito Grande).

Variável: Q_{jm}	Estimativa dos Efeitos $R^2 = 0,98781$			
Fator	Efeito	Erro Padrão	-95% Limite de Confiança	+95% Limite de Confiança
Média Global	1,565625*	0,015625*	1,529594*	1,601656*
(1) $H/H_{\max}$	0,66875*	0,031250*	0,596687*	0,740813*
(2) ρ_p	0,35625*	0,031250*	0,284187*	0,428313*
(3) Ângulo	0,15625*	0,031250*	0,084187*	0,228313*
(12)	0,14375*	0,031250*	0,071687*	0,215813*
(13)	0,09375*	0,031250*	0,021687*	0,165813*
(23)	-0,06875	0,031250	-0,140813	0,003313
(123)	0,01875	0,031250	-0,053313	0,090813

(*) - Efeitos estatisticamente significativos

Para a queda de pressão, somente os fatores 12 e 13 não são significativos. Isto indica que $H/H_{\max}$ só depende da interação entre partícula e ângulo. Para a vazão de jorro mínimo, somente os fatores 23 e 123 não são significativos, o que significa que as partículas não dependem dos níveis do ângulo de base.

A análise dos efeitos pela interpretação geométrica das variáveis do leito grande são apresentados na Figura 4.12 e mostram que:

1. Quando $H/H_{\max}$ aumenta de 0,55 para 0,95, o valor de $\Delta P_{\max}$ aumenta em todos os níveis das outras variáveis. O maior aumento foi de 61,3 cmH₂O e ocorreu quando as partículas de vidro foram utilizadas com ângulos de base de 60° contra 56,6 cmH₂O para partículas de ABS e ângulo de 45°, 52,9 cmH₂O para partículas de ABS e ângulo de 60° e 51,8 cmH₂O para partículas de vidro e ângulo de 45°.

2. A troca das partículas de ABS por esferas de vidro causa um aumento na queda de pressão máxima também em todos os níveis das outras variáveis. Os maiores aumentos ocorreram quando o ângulo de base de 45° foi utilizado com $H/H_{\max} = 0,55$ e 0,95 (23,4 cmH₂O e 18,6 cmH₂O, respectivamente). Os menores aumentos ocorreram quando o ângulo de base de 60° foi utilizado com $H/H_{\max} = 0,55$ e 0,95 (5,35 cmH₂O e 13,75 cmH₂O, respectivamente).

3. Quando trocamos o ângulo de base de 45° por 60°, a queda de pressão máxima também é aumentada em todos os níveis dos outros fatores. Os maiores aumentos ocorreram quando as partículas de ABS foram utilizadas com $H/H_{\max} = 0,55$ e 0,95 (18,1 cmH₂O e 14,4 cmH₂O, respectivamente). Os menores aumentos ocorreram quando as partículas de vidro foram utilizadas com $H/H_{\max} = 0,95$ e 0,55 (9,55 cmH₂O e 0,05 cmH₂O, respectivamente).

4. O maior aumento foi de 61,3 cmH₂O e ocorreu quando $H/H_{\max}$ aumentou de 0,55 para 0,95 com partículas de vidro sendo utilizadas com ângulo de base de 60°. O menor aumento ocorreu quando trocamos o ângulo de base de 45° por 60° e foi 0,05 cmH₂O com $H/H_{\max} = 0,55$ e partículas de vidro.

5. A vazão de jorro mínimo aumentou quando $H/H_{\max}$ aumentou de 0,55 para 0,95 em todos os níveis dos outros fatores. Os maiores aumentos ocorreram quando as

partículas de vidro foram utilizadas com ângulos de base de 60° e de 45° (0,925 Kg/min e 0,7 Kg/min, respectivamente). Os menores aumentos ocorreram quando as partículas de ABS foram utilizadas com ângulos de 60° e 45° (0,6 Kg/min e 0,45 Kg/min, respectivamente).

6. A vazão de jorro mínimo também aumentou quando trocamos as partículas de ABS por esferas de vidro em todos os níveis dos outros fatores. Os maiores aumentos ocorreram quando $H/H_{\max} = 0,95$ utilizando ângulos de base de 45° e de 60° (0,55 Kg/min e 0,45 Kg/min, respectivamente). Os menores aumentos ocorreram quando $H/H_{\max} = 0,55$ utilizando ângulos de base de 45° e de 60° (0,3 Kg/min e 0,125 Kg/min, respectivamente).

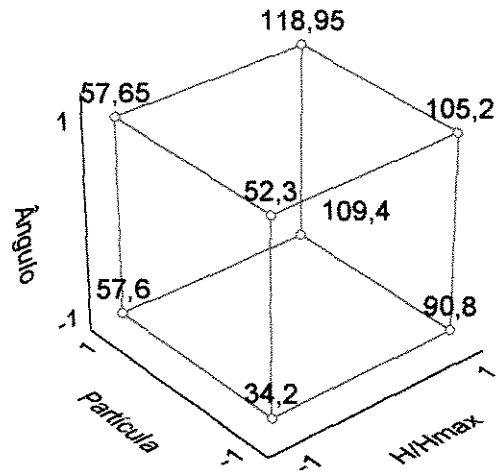
7. A troca do ângulo de base de 45° para 60° causou uma pequena queda na vazão de jorro mínimo quando as partículas de vidro foram utilizadas com $H/H_{\max} = 0,55$ (0,025 Kg/min). Nos níveis das demais variáveis a vazão de jorro mínimo aumentou, sendo que os maiores valores ocorreram quando $H/H_{\max} = 0,95$ para as partículas de ABS e de vidro (0,3 Kg/min e 0,2 Kg/min, respectivamente). O menor aumento foi de 0,15 Kg/min e ocorreu em $H/H_{\max} = 0,55$ com partículas de ABS.

8. O maior aumento na vazão de jorro mínimo ocorreu quando $H/H_{\max}$ aumentou de 0,55 para 0,95 com as partículas de vidro sendo utilizadas com ângulos de base de (0,925 Kg/min). A única queda na vazão de jorro mínimo ocorreu pela troca do ângulo de 45° para 60° com $H/H_{\max} = 0,55$ e partículas de vidro.

A Figura 4.13 apresenta os diagramas de Pareto dos efeitos sobre $\Delta P_{\max}$ e Q_{jm} para as configurações do leito Grande. O fator que mais influenciou a queda de pressão máxima foi $H/H_{\max}$, bem mais que o segundo lugar das partículas. No caso da vazão de jorro mínimo a maior influência também foi causada por $H/H_{\max}$ e depois pelas partículas. O terceiro fator de maior influência para as duas variáveis dependentes foi o ângulo de base dos leitos. Somente o efeito de interação dos fatores 23 (partícula e ângulo) foram significativos para a queda de pressão máxima e em relação a vazão de jorro mínimo, os efeitos significativos foram 12 ($H/H_{\max}$ e partículas) e 13 ($H/H_{\max}$ e ângulo).

Planejamento Fatorial 2^3 - Leito Grande

Valores Médios da Queda de Pressão Máxima



Valores Médios da Vazão de Jorro Mínimo

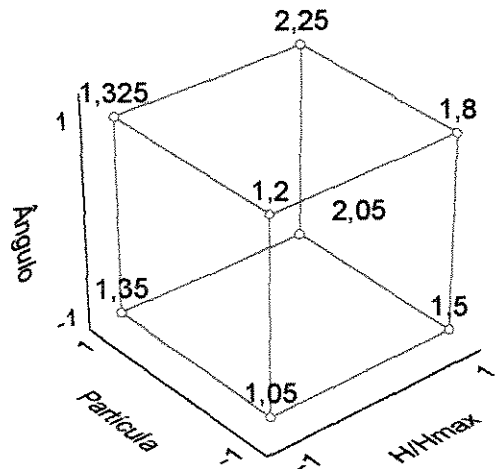


Figura 4.12 - Interpretação Geométrica dos Efeitos (Leito Grande)

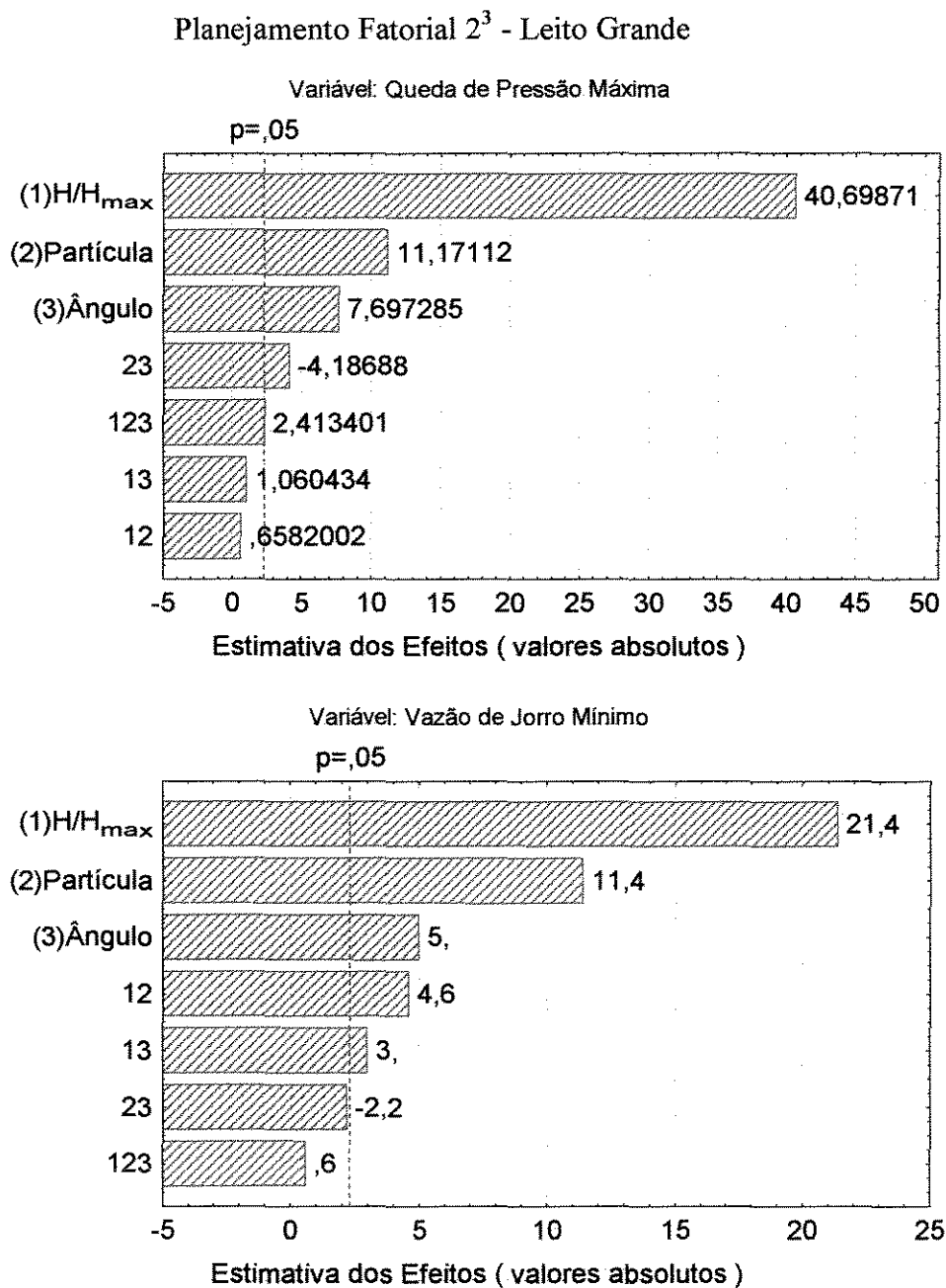


Figura 4.13 - Diagramas de Pareto dos Efeitos Padronizados (Leito Grande).

Através das superfícies de resposta para o leito grande, apresentadas nas Figuras 4.14 e 4.15, podemos obter maiores valores para a queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo deslocando as regiões experimentais para maiores valores de $H/H_{\max}$, maiores valores de ρ_p e maiores valores do ângulo de base dos leitos.

A utilização dos planejamentos fatoriais 2^3 determinou o comportamento da queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo quando mudamos o ângulo de base, a altura do leito de partícula em relação a altura máxima e o tipo de partícula nos leitos de jorro bidimensionais. Esse comportamento foi exatamente o mesmo nas configurações do leito médio e grande. Os leitos pequenos só não apresentaram tal comportamento devido ao efeito antagônico do ângulo de base.

O fato de termos escolhido o parâmetro $H/H_{\max}$ como uma alternativa para estudarmos a influência da altura do leito de partículas sobre as variáveis dependentes do processo justifica o comportamento desigual ocorrido nos leitos pequenos. Seria impossível manter uma mesma altura de leitos de partículas nos três leitos, pois os tamanhos e as inclinações diferentes não permitem cargas iguais para um mesmo valor de H . A utilização da relação $H/H_{\max}$ resolve este problema, mas a análise da influência da altura do leito de partículas se torna dependente da altura máxima de jorro estável que, por sua vez depende dos parâmetros geométricos dos leitos e das propriedades sólido-fluido. E como já foi dito no capítulo anterior, as configurações dos leitos maiores apresentaram zonas estagnadas nas regiões anulares que prejudicaram o processo natural de obtenção de $H_{\max}$, portanto as corridas realizadas com valores iguais de $H/H_{\max}$ não indicam equivalência entre os leitos de mesma partícula. Em suma, a análise da influência de H é mais complexa devido aos problemas ocorridos durante a obtenção dos valores de $H_{\max}$ que, conseqüentemente resultaram em proporções desiguais entre os leitos.

Nos planejamentos fatoriais 2^4 que apresentaremos nos próximos tópicos, uma nova variável será incluída. Desta vez o comportamento das variáveis dependentes será avaliado quando se troca um leito por outro, ou seja, quando a variável L_1 (largura do leito) é trocada.

Planejamento Fatorial 2^3 - Modelo Linear:

$$78,26 + 27,83*(1) + 7,64*(2) + 5,26*(3) + 0,45*(1)*(2) + 0,73*(1)*(3) - 2,86*(2)*(3) + 1,65*(1)*(2)*(3)$$

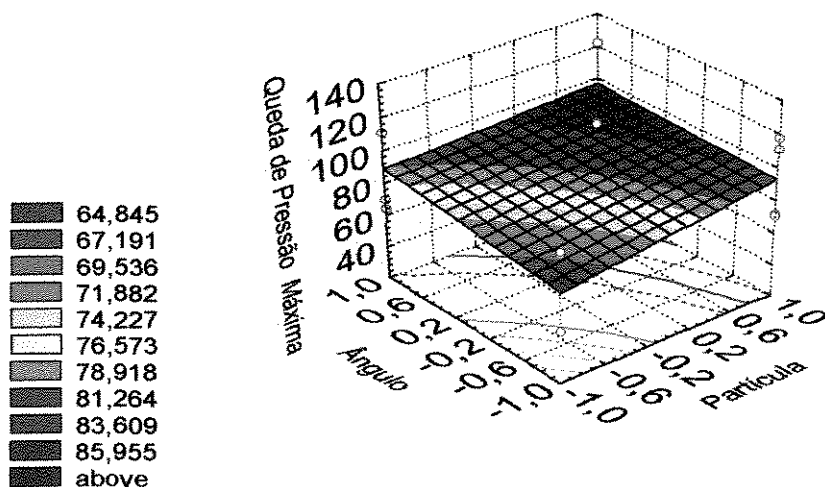
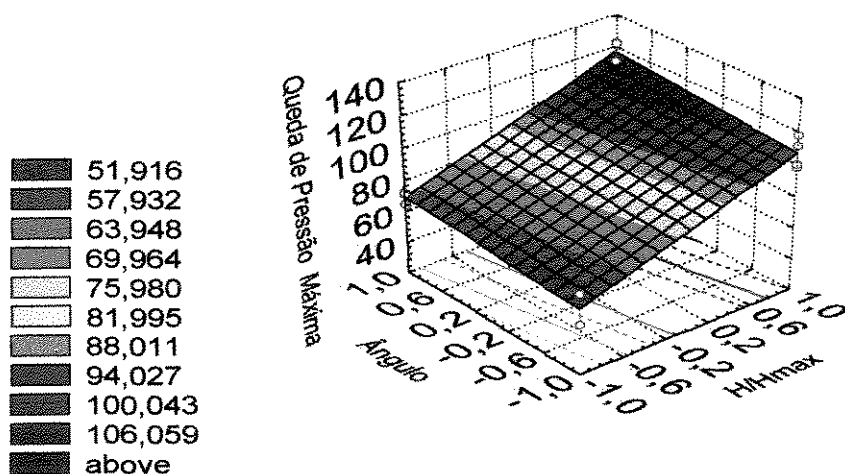
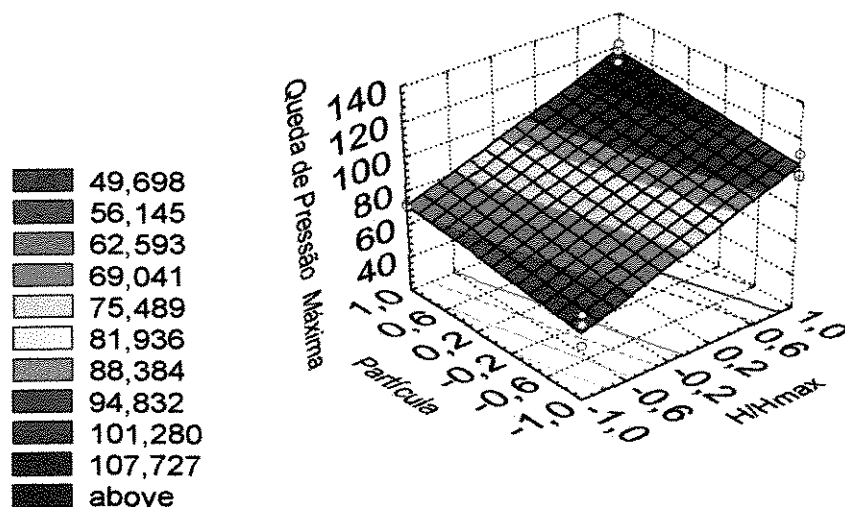


Figura 4.14 - Superfícies de Resposta para $\Delta P_{\max}$ (Leito Grande).

Planejamento Fatorial 2^3 - Modelo Linear:

$$1,57+0,33*(1)+0,18*(2)+0,08*(3)+0,07*(1)*(2)+0,05*(1)*(3)-0,03*(2)*(3)+9,4*10^{-3}*(1)*(2)*(3)$$

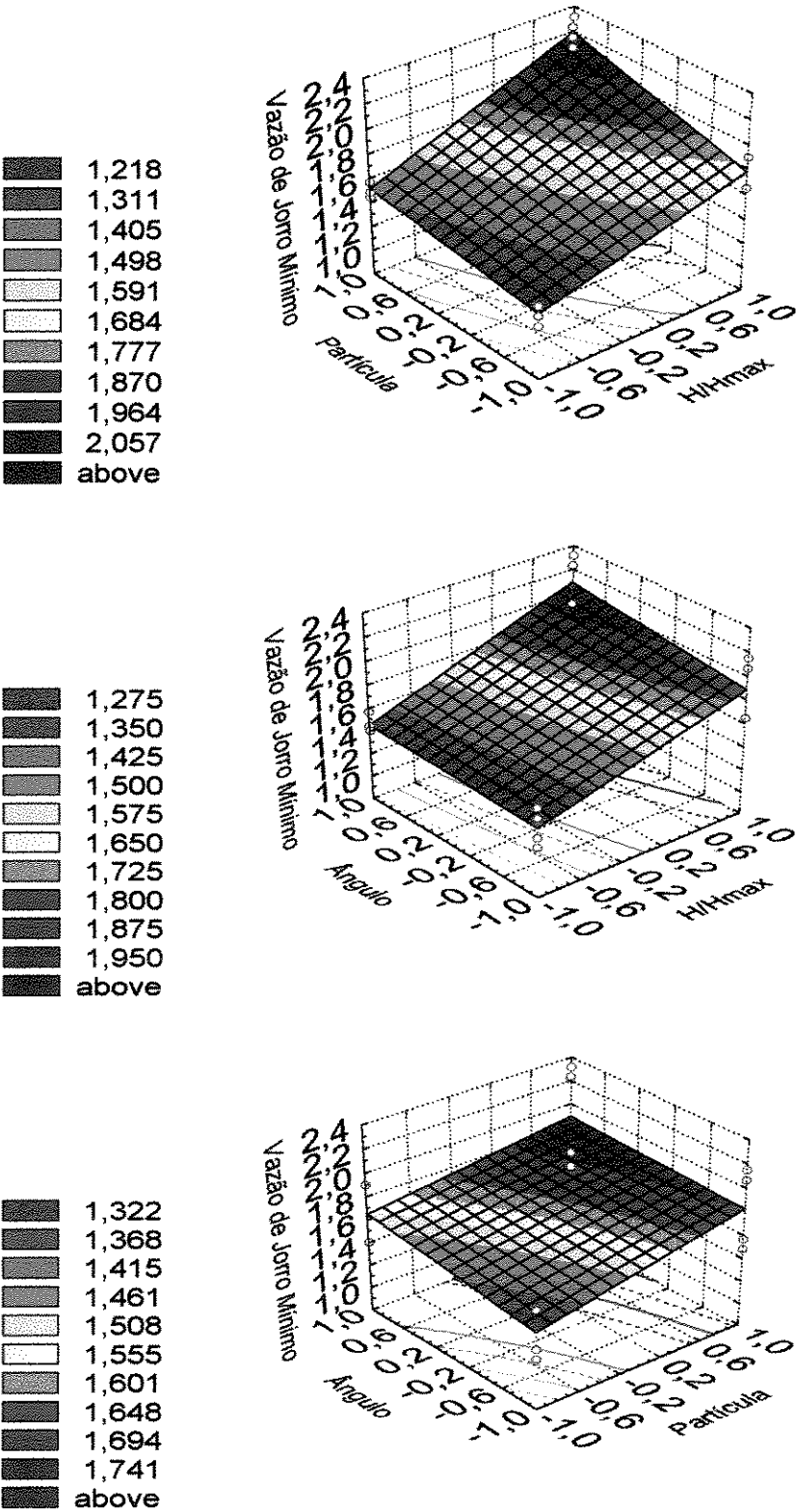


Figura 4.15 - Superfícies de Resposta para Q_{jm} (Leito Grande).

4.3.4 Planejamento Fatorial 2^4 entre os Leitos Pequeno e Médio.

Os planejamentos fatoriais 2^3 nos permitiram estudar a fluidodinâmica dos leitos de jorro bidimensionais pela previsão de $\Delta P_{\max}$ e Q_{jm} quando os principais parâmetros independentes do processo são variados. A quarta variável a ser acrescentada nos planejamentos que faremos a seguir é a largura da coluna bidimensional, ou largura do leito (L_1). A importância dessa nova variável nos planejamentos será vital para uma comparação entre leitos, estabelecendo dados fundamentais para a ampliação de escala.

Como são três os leitos utilizados neste trabalho e conseqüentemente três níveis de L_1 , os planejamentos serão feitos com dois leitos de cada vez para que dois níveis desse fator seja estudado.

No cálculo dos efeitos, além da média global, quinze podem ser quantificados: quatro efeitos principais, seis interações de dois fatores, quatro interações de três fatores e uma interação de quatro fatores. Os efeitos de quarta ordem serão desprezados, pois os demais efeitos são suficientes para descrever adequadamente o comportamento das respostas. Nesse caso as interações desprezadas serão usadas para a estimativa do erro experimental.

Para que as análises dos efeitos não se tornem enfadonhas e repetitivas, apresentaremos somente os resultados relativos à largura do leito, uma vez que já conhecemos o comportamento de $\Delta P_{\max}$ e Q_{jm} em relação ao ângulo, às partículas e às alturas das partículas nos leitos.

As Tabelas 4.15 e 4.16 apresentam os resultados do planejamento fatorial 2^4 da Tabela 4.6 para os leitos pequeno e médio.

A análise pela interpretação geométrica dos efeitos (Figura 4.16 e 4.17) é um pouco diferente nos planejamentos fatoriais 2^4 . As médias das respostas de cada vértice são calculadas pelas médias das variáveis dependentes nos seus níveis superior ou inferior, mas a média do quarto fator não incluído em cada cubo é calculada nos seus dois níveis. Portanto ao analisarmos os efeitos, o quarto fator ficará subentendido como a média dos seus níveis e não de um único nível.

Tabela 4.15 - Estimativa dos Efeitos sobre $\Delta P_{\max}$ (Leitos Pequeno e Médio).

Variável: $\Delta P_{\max}$	Estimativa dos Efeitos $R^2 = 0,9841$			
Fator	Efeito	Erro Padrão	-95% Limite de Confiança	+95% Limite de Confiança
Média Global	29,35625*	0,500331*	28,30064*	30,41186*
(1) L_1	11,05000*	1,000662*	8,93879*	13,16121*
(2) $H/H_{\max}$	24,90000*	1,000662*	22,78879*	27,01121*
(3) ρ_p	12,73750*	1,000662*	10,62629*	14,84871*
(4) Ângulo	4,35000*	1,000662*	2,23879*	6,46121*
(12)	-2,13750*	1,000662*	-4,24871*	-0,02629*
(13)	4,82500*	1,000662*	2,71379*	6,93621*
(14)	7,01250*	1,000662*	4,90129*	9,12371*
(23)	4,87500*	1,000662*	2,76379*	6,98621*
(24)	1,11250	1,000662	-0,99871	3,22371
(34)	-0,25000	1,000662	-2,36121	1,86121
(123)	0,88750	1,000662	-1,22371	2,99871
(124)	3,35000*	1,000662*	1,23879*	5,46121*
(134)	3,36250*	1,000662*	1,25129*	5,47371*
(234)	-2,13750*	1,000662*	-4,24871*	-0,02629*

(*) - Efeitos estatisticamente significativos

Para a queda de pressão os maiores aumentos ocorreram quando $H/H_{\max}$ aumentou de 0,55 para 0,95. Para o leito pequeno com partículas de vidro o aumento foi de 31,025 cmH₂O, contra 29,275 cmH₂O para o leito pequeno com ângulo de 45°, 28,525 cmH₂O para leito médio com partículas de vidro e 27,225 cmH₂O para o leito médio com ângulo de 60°.

Pode parecer estranho que os maiores aumentos não ocorreram quando o leito foi trocado, mas é necessário lembrar que não foi apenas a largura do leito a ser aumentada. A largura do jorro (L_j) que era de 2,5 cm no leito pequeno aumentou para 5 cm no leito médio, portanto se fizemos uma analogia com o parâmetro adimensional D_o/D_i dos leitos de jorro convencionais e L_1/L_j para leitos de jorro bidimensionais, veremos que nos leitos pequenos esse parâmetro possui o mesmo valor que no leito médio, ou seja, $\left(\frac{L_1}{L_j}\right)_P = \left(\frac{L}{L_j}\right)_M = 6$.

A grosso modo, isto quer dizer que a queda de pressão máxima aumentou praticamente nas mesmas proporções nos leitos pequeno e médio. A queda de pressão máxima é função das dimensões do leito, mas é muito mais dependente da altura do leito de partículas. Para leitos bem largos e rasos, a queda de pressão máxima é baixa e, como a ampliação de escala não foi muito grande (leito pequeno - leito médio), esse comportamento parece bem razoável.

Tabela 4.16 - Estimativa dos Efeitos sobre Q_{jm} (Leitos Pequeno e Médio).

Variável: Q_{jm}	Estimativa dos Efeitos $R^2 = 0,99488$			
Fator	Efeito	Erro Padrão	-95% Limite de Confiança	+95% Limite de Confiança
Média Global	0,605312*	0,005001*	0,594762*	0,615863*
(1) L_1	0,609375*	0,010001*	0,588274*	0,630476*
(2) H/H_{max}	0,275625*	0,010001*	0,254524*	0,296726*
(3) ρ_p	0,290625*	0,010001*	0,269524*	0,311726*
(4) Ângulo	0,060625*	0,010001*	0,039524*	0,081726*
(12)	0,116875*	0,010001*	0,095774*	0,137976*
(13)	0,214375*	0,010001*	0,193274*	0,235476*
(14)	0,044375*	0,010001*	0,023274*	0,065476*
(23)	0,055625*	0,010001*	0,034524*	0,076726*
(24)	0,023125*	0,010001*	0,002024*	0,044226*
(34)	0,035625*	0,010001*	0,014524*	0,056726*
(123)	0,026875*	0,010001*	0,005774*	0,047976*
(124)	0,009375	0,010001	-0,011726	0,030476
(134)	0,034375*	0,010001*	0,013274*	0,055476*
(234)	-0,021875*	0,010001*	-0,042976*	-0,000774*

(*) - Efeitos estatisticamente significativos

Pode-se dizer que o leito pequeno se comportou de maneira equivalente ao leito médio. Isto pode ser notado pela diferença insignificante entre os aumentos de ΔP_{max} com a troca de H/H_{max} nos níveis das outras variáveis. Neste caso H/H_{max} não interage com L_1 e com o ângulo de base dos leitos, indicando que ΔP_{max} depende basicamente da altura e das partículas utilizadas.

Os aumentos na queda de pressão máxima quando trocamos o leito pequeno pelo leito grande foram as seguintes: 19,275 cmH₂O para $H/H_{\max} = 0,95$ e ângulo de 60°, 17,125 cmH₂O para $H/H_{\max} = 0,55$ e partículas de vidro, 16,85 cmH₂O para $H/H_{\max} = 0,55$ e ângulo de 60°, 14,625 cmH₂O para $H/H_{\max} = 0,95$ e partículas de vidro, 9,525 cmH₂O para $H/H_{\max} = 0,55$ e ângulo de 45°, 9,25 cmH₂O para $H/H_{\max} = 0,55$ e partículas de ABS, 3,2 cmH₂O para $H/H_{\max} = 0,95$ e partículas de ABS e a única queda foi de 1,45 cmH₂O para $H/H_{\max} = 0,95$ e ângulo de 45°.

Em relação à vazão de jorro mínimo, a largura do leito é o fator de maior influência, mas totalmente dependente dos níveis das outras variáveis. Os maiores aumentos ocorreram pela troca do leito pequeno com o leito médio. O maior foi de 0,967 Kg/min com $H/H_{\max} = 0,95$ e partículas de vidro contra 0,78 Kg/min com $H/H_{\max} = 0,95$ e ângulo de 60°, 0,68 Kg/min com $H/H_{\max} = 0,55$ e partículas de vidro, 0,673 Kg/min com $H/H_{\max} = 0,95$ e ângulo de 45°, 0,529 Kg/min com $H/H_{\max} = 0,55$ e ângulo de 60°, 0,485 Kg/min com $H/H_{\max} = 0,95$ e partículas de ABS, 0,458 Kg/min com $H/H_{\max} = 0,55$ e ângulo de 45° e 0,306 Kg/min com $H/H_{\max} = 0,55$ e partículas de ABS.

Os diagramas de Pareto dos efeitos sobre $\Delta P_{\max}$ e Q_{jm} (Figura 4.18) mostram que a maior influência sobre a queda de pressão máxima foi de $H/H_{\max}$. O efeito de interação entre esse fator e L_1 (12) não foi significativo. Quanto à vazão de jorro mínimo, a largura do leito foi o fator de maior influência. O maior efeito de interação entre esse fator e os demais foi com as partículas (13), seguido por $H/H_{\max}$ (12) e depois pelo ângulo de base dos leitos (14).

As superfícies de respostas para a queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo dos leitos pequeno e médio estão nas Figuras 4.19 e 4.20. Vale lembrar que através destes gráficos poderemos conciliar o máximo ou mínimo valor de $\Delta P_{\max}$ e Q_{jm} com o máximo ou mínimo valor da largura do leito, altura do leito de partículas, densidade das partículas e ângulo de base dos leitos.

Podemos obter maiores valores para a queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo deslocando as regiões experimentais para maiores valores de $H/H_{\max}$, maiores valores de ρ_p e maiores valores do ângulo de base dos leitos.

Planejamento Fatorial 2^4 - Leitos Pequeno e Médio
Valores Médios da Queda de Pressão Máxima

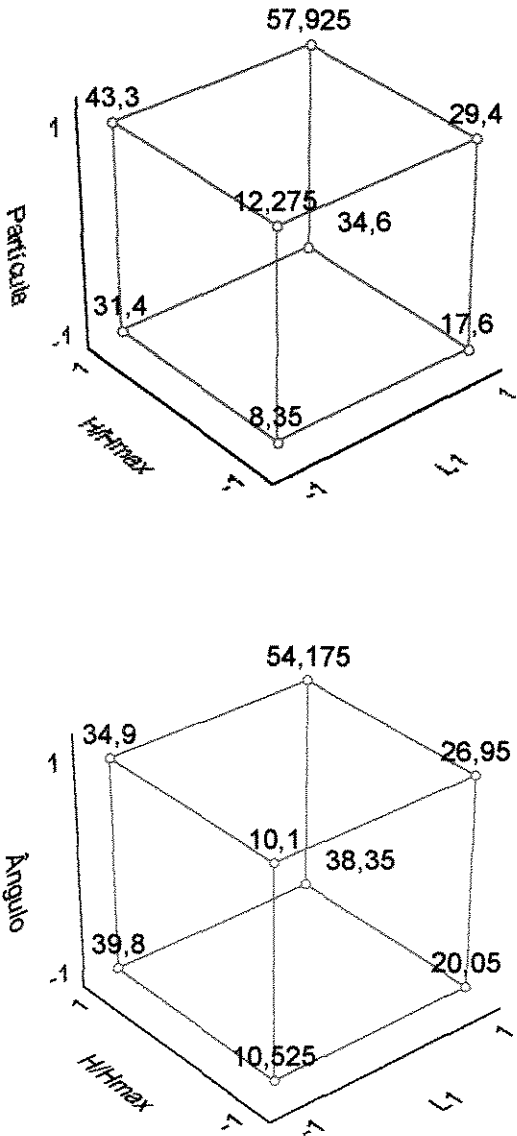


Figura 4.16 - Interpretação Geométrica dos Efeitos em ΔP_{max} (Leitos Pequeno e Médio).

Planejamento Fatorial 2^4 - Leitos Pequeno e Médio
Valores Médios da Vazão de Jorro Mínimo

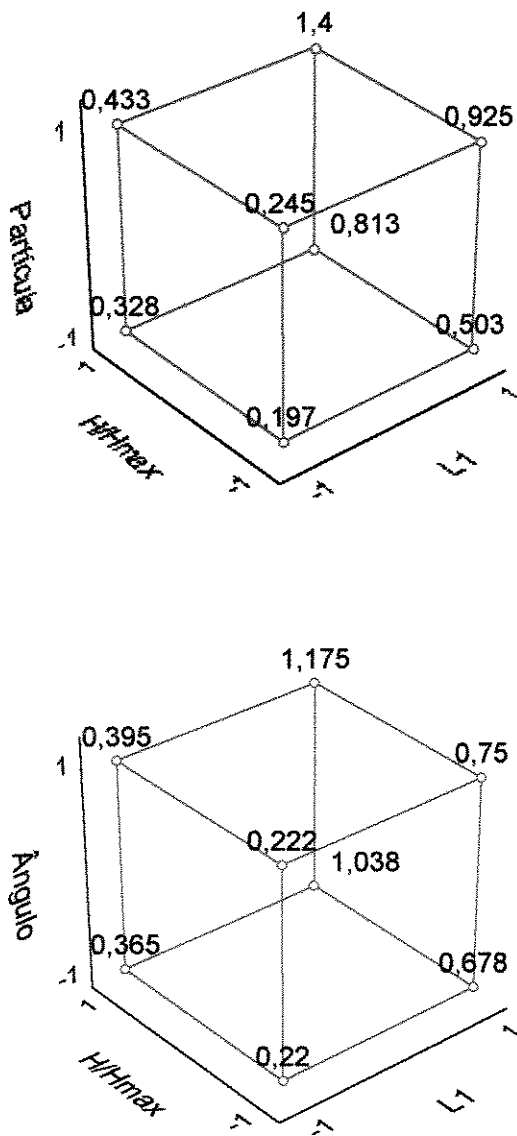


Figura 4.17 - Interpretação Geométrica dos Efeitos em Q_{jm} (Leitos Pequeno e Médio).

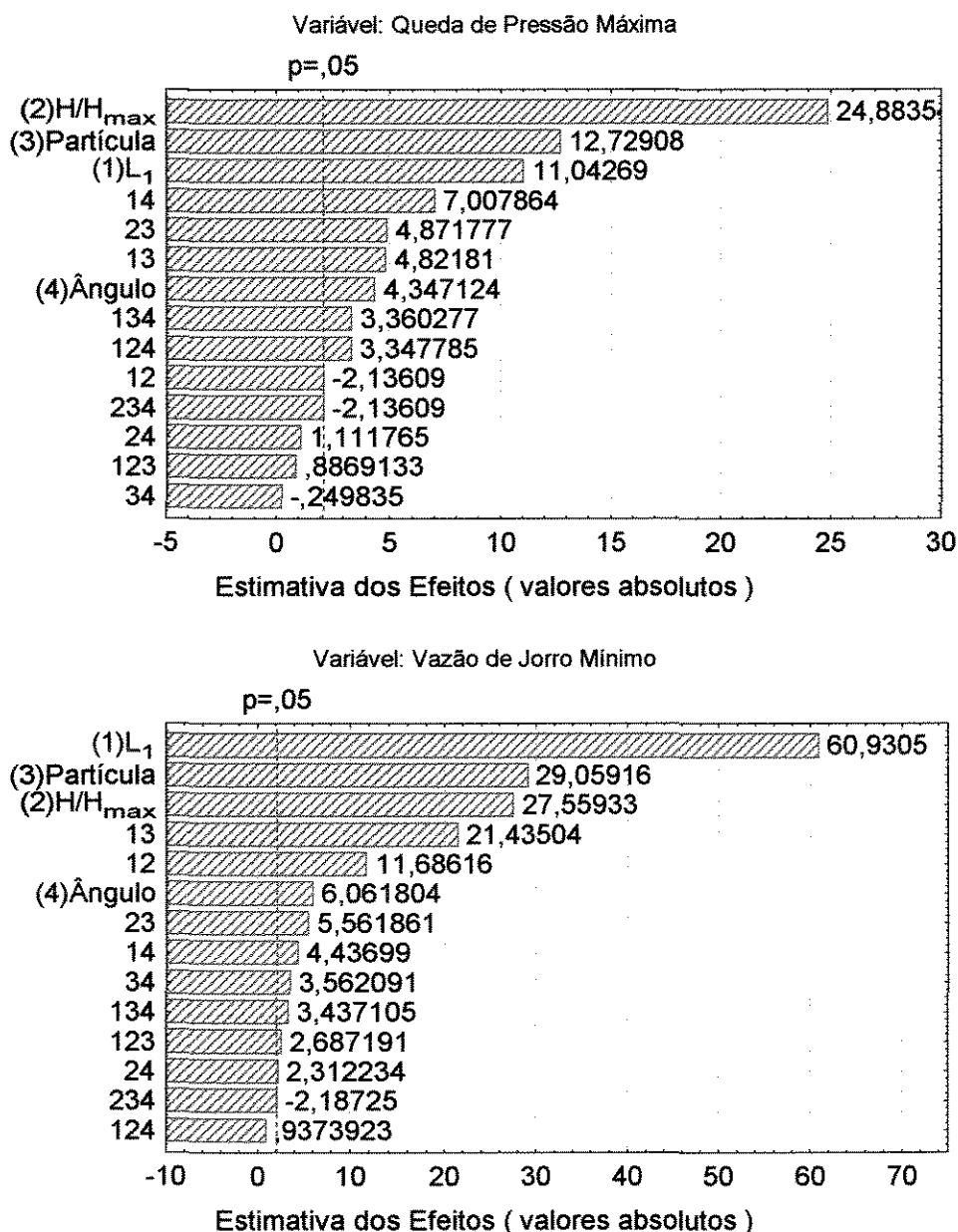
Planejamento Fatorial 2^4 - Leitos Pequeno e Médio

Figura 4.18 - Diagramas de Pareto dos Efeitos Padronizados (Leitos Pequeno e Médio).

Planejamento Fatorial 2⁴ - Modelo linear:

$$29,36 + 5,53 \cdot (1) + 12,45 \cdot (2) + 6,37 \cdot (3) + 2,18 \cdot (4) + 1,07 \cdot (1) \cdot (2) + 2,41 \cdot (1) \cdot (3) + 3,51 \cdot (1) \cdot (4) + 2,44 \cdot (2) \cdot (3) + 1,68 \cdot (1) \cdot (2) \cdot (3) + 1,68 \cdot (1) \cdot (3) \cdot (4) - 1,07 \cdot (2) \cdot (3) \cdot (4)$$

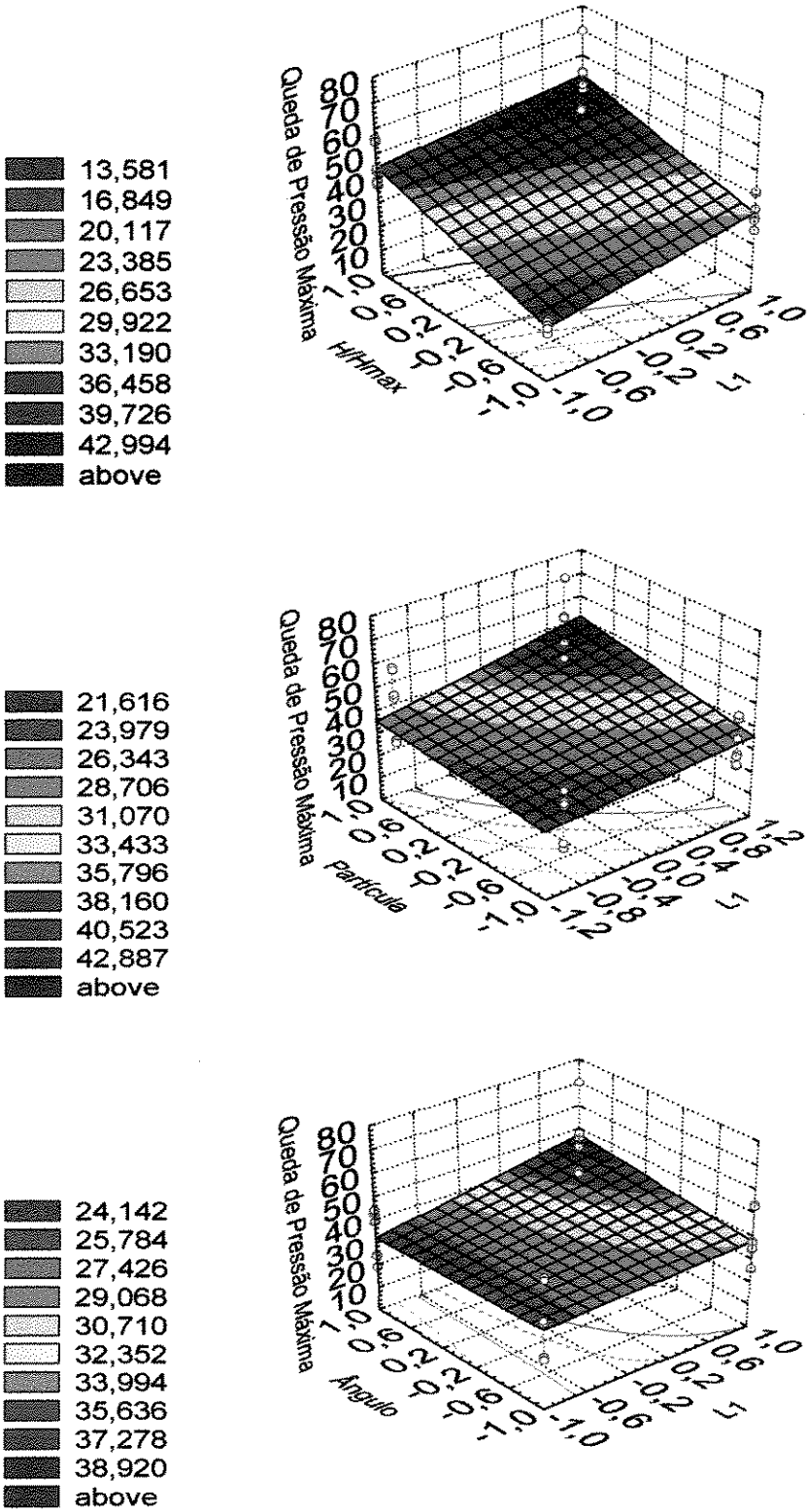


Figura 4.19 - Superfícies de Resposta para ΔP_{max} (Leitos Pequeno e Médio).

Planejamento Fatorial 2^4 - Modelo linear:

$$0,61+0,30*(1)+0,14*(2)+0,15*(3)+0,03*(4)+0,06*(1)*(2)+0,11*(1)*(3)+0,02*(1)*(4)+0,03*(2)*(3)+0,01*(2)*(4)+0,02*(3)*(4)+0,01*(1)*(2)*(3)+0,02*(1)*(3)*(4)-0,01*(2)*(3)*(4)$$

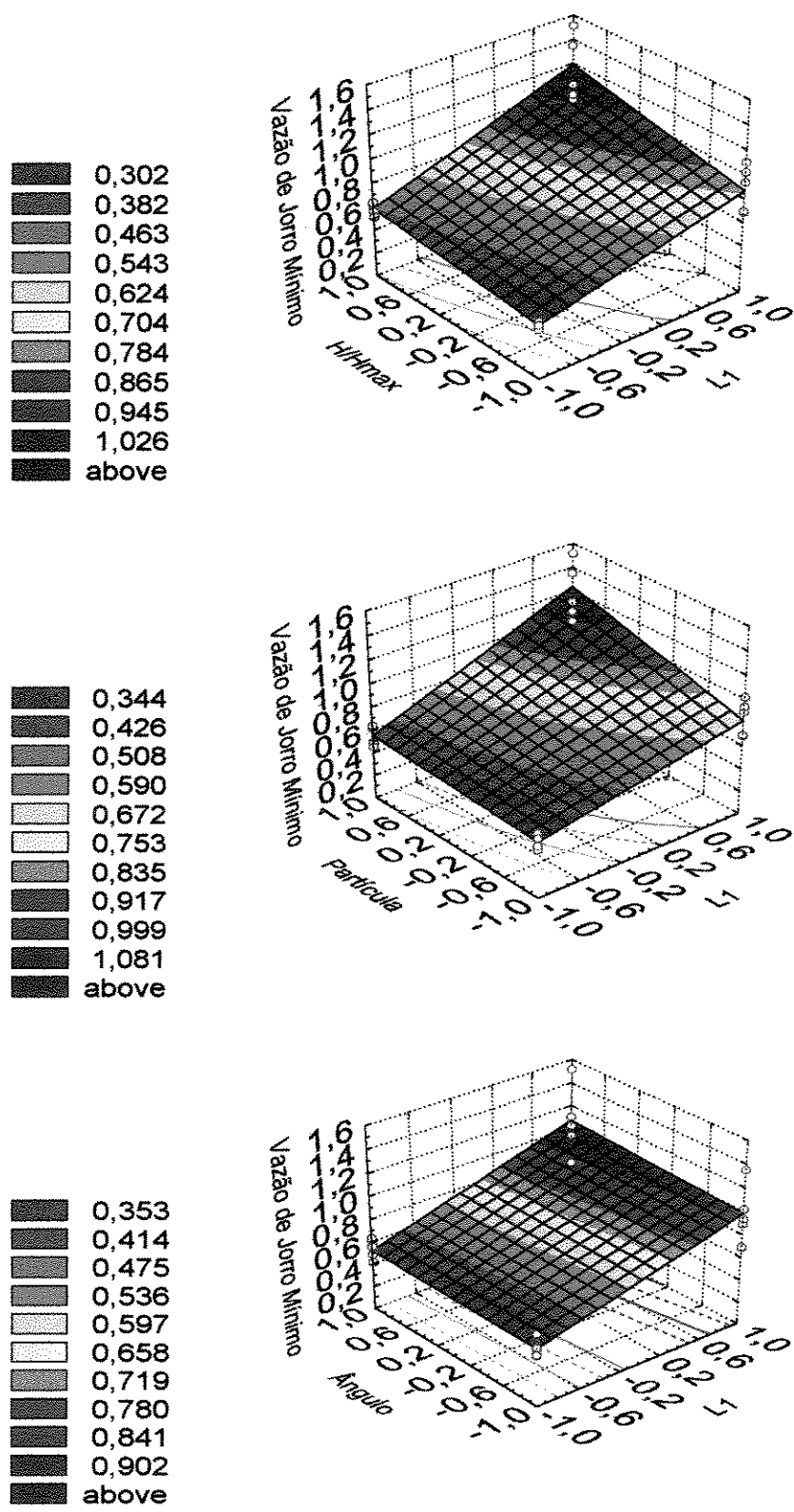


Figura 4.20 - Superfícies de Resposta para Q_{jm} (Leitos Pequeno e Médio).

4.3.5 Planejamento Fatorial 2^4 entre os Leitos Pequeno e Grande.

As Tabelas 4.17 e 4.18 apresentam os resultados do planejamento fatorial 2^4 da Tabela 4.7 para os leitos pequeno e grande.

Tabela 4.17 - Estimativa dos Efeitos sobre $\Delta P_{\max}$ (Leitos Pequeno e Grande).

Variável: $\Delta P_{\max}$	Estimativa dos Efeitos $R^2 = 0,994$			
Fator	Efeito	Erro Padrão	-95% Limite de Confiança	+95% Limite de Confiança
Média Global	51,04688*	0,674231*	49,62437*	52,46938*
(1) L_1	54,43125*	1,348461*	51,58625*	57,27625*
(2) $H/H_{\max}$	41,34375*	1,348461*	38,49875*	44,18875*
(3) ρ_p	11,59375*	1,348461*	8,74875*	14,43875*
(4) Ângulo	3,93125*	1,348461*	1,08625*	6,77625*
(12)	14,30625*	1,348461*	11,46125*	17,15125*
(13)	3,68125*	1,348461*	0,83625*	6,52625*
(14)	6,59375*	1,348461*	3,74875*	9,43875*
(23)	2,44375	1,348461	-0,40125	5,28875
(24)	-0,39375	1,348461	-3,23875	2,45125
(34)	-4,66875*	1,348461*	-7,51375*	-1,82375*
(123)	-1,54375	1,348461	-4,38875	1,30125
(124)	1,84375	1,348461	-1,00125	4,68875
(134)	-1,05625	1,348461	-3,90125	1,78875
(234)	-1,29375	1,348461	-4,13875	1,55125

(*) - Efeitos estatisticamente significativos

O parâmetro adimensional L_1/L_j para o leito pequeno, como já vimos, é igual a 6 e para leito grande $L_1/L_j = 16$, e essa grande diferença é a causa da maior influência de L_1 sobre a queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo. Os efeitos de interação desse fator com as outras variáveis foram todos importantes, indicando mais uma vez que L_1 não pode ser analisado individualmente.

Tabela 4.18 - Estimativa dos Efeitos sobre Q_{jm} (Leitos Pequeno e Grande).

Variável: Q_{jm}	Estimativa dos Efeitos $R^2 = 0,99755$			
Fator	Efeito	Erro Padrão	-95% Limite de Confiança	+95% Limite de Confiança
Média Global	0,933125*	0,008352*	0,915503*	0,950747*
(1) L_1	1,265000*	0,016705*	1,229756*	1,300244*
(2) H/H_{max}	0,413750*	0,016705*	0,378506*	0,448994*
(3) ρ_p	0,216250*	0,016705*	0,181006*	0,251494*
(4) Ângulo	0,086250*	0,016705*	0,051006*	0,121494*
(12)	0,255000*	0,016705*	0,219756*	0,290244*
(13)	0,140000*	0,016705*	0,104756*	0,175244*
(14)	0,070000*	0,016705*	0,034756*	0,105244*
(23)	0,086250*	0,016705*	0,051006*	0,121494*
(24)	0,053750*	0,016705*	0,018506*	0,088994*
(34)	-0,033750	0,016705	-0,068994	0,001494
(123)	0,057500*	0,016705*	0,022256*	0,092744*
(124)	0,040000*	0,016705*	0,004756*	0,075244*
(134)	-0,035000	0,016705	-0,070244	0,000244
(234)	-0,008750	0,016705	-0,043994	0,026494

(*) - Efeitos estatisticamente significativos

A interpretação geométrica dos efeitos para a queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo nos leitos pequeno e médio (Figuras 4.21 e 4.22) indica que os maiores aumentos de ΔP_{max} ocorreram quando o leito pequeno foi trocado pelo leito grande. O maior foi de 77,175 cmH₂O para $H/H_{max} = 0,95$ e ângulo de 60°, 70,875 cmH₂O para $H/H_{max} = 0,95$ e partículas de vidro, 66,6 cmH₂O para $H/H_{max} = 0,95$ e partículas de ABS, 60,3 cmH₂O para $H/H_{max} = 0,95$ e ângulo de 45°, 45,35 cmH₂O para $H/H_{max} = 0,55$ e partículas de vidro, 44,875 cmH₂O para $H/H_{max} = 0,55$ e ângulo de 60°, 35,375 cmH₂O para $H/H_{max} = 0,55$ e ângulo de 45° e a 34,9 cmH₂O para $H/H_{max} = 0,55$ e partículas de ABS.

Em relação à vazão de jorro mínimo, a largura do leito também é o fator de maior influência e interage com todas as outras variáveis. Os maiores aumentos ocorreram pela troca do leito pequeno com o leito médio. O maior foi de 1,717 Kg/min com $H/H_{max} = 0,95$ e

partículas de vidro contra 1,63 Kg/min com $H/H_{\max} = 0,95$ e ângulo de 60° , 1,41 Kg/min com $H/H_{\max} = 0,95$ ângulo de 45° , 1,322 Kg/min com $H/H_{\max} = 0,95$ e partículas de ABS, 1,093 Kg/min com $H/H_{\max} = 0,55$ e partículas de vidro, 1,04 Kg/min com $H/H_{\max} = 0,55$ e ângulo de 60° , 0,98 Kg/min com $H/H_{\max} = 0,55$ e ângulo de 45° e 0,927 Kg/min com $H/H_{\max} = 0,55$ e partículas de ABS.

Os diagramas de Pareto dos efeitos sobre $\Delta P_{\max}$ e Q_{jm} (Figura 4.23) mostram que a maior influência sobre a queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo foi da largura do leito. Todos os efeitos de interação desse fator com os demais foram importantes, sendo que a influência da interação (12) foi maior até que a influência das partículas.

As superfícies de respostas para a queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo dos leitos pequeno e grande estão nas Figuras 4.24 e 4.25 e confirmam as tendências da queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo em se obter maiores valores pelo deslocamento das regiões experimentais para maiores valores de $H/H_{\max}$, maiores valores de ρ_p e maiores valores do ângulo de base dos leitos.

Planejamento Fatorial 2^4 - Leitos Pequeno e Grande

Valores Médios da Queda de Pressão Máxima

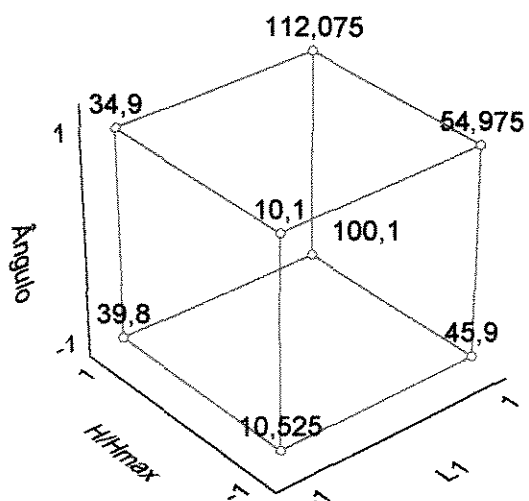
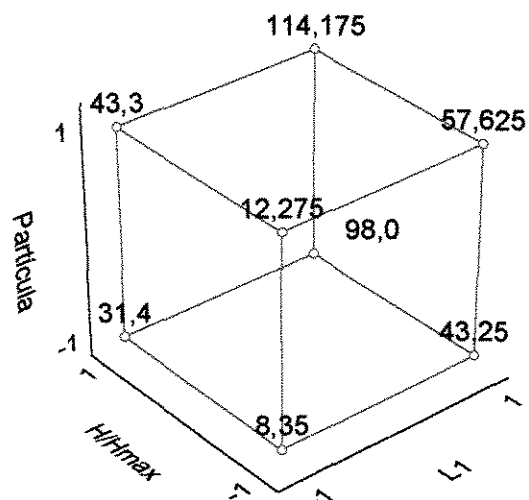


Figura 4.21 - Interpretação Geométrica dos Efeitos em $\Delta P_{\max}$ (Leitos Pequeno e Grande)

Planejamento Fatorial 2^4 - Leitos Pequeno e Grande
Valores Médios da Vazão de Jorro Mínimo

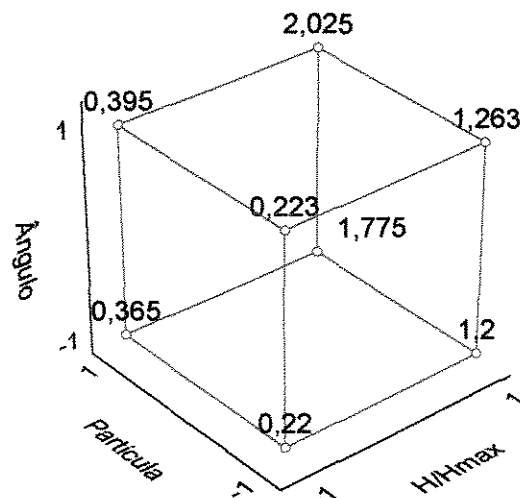
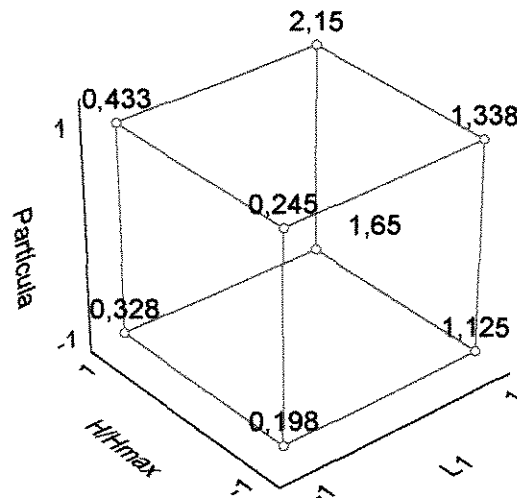


Figura 4.22 - Interpretação Geométrica dos Efeitos em Q_{jm} (Leitos Pequeno e Grande)

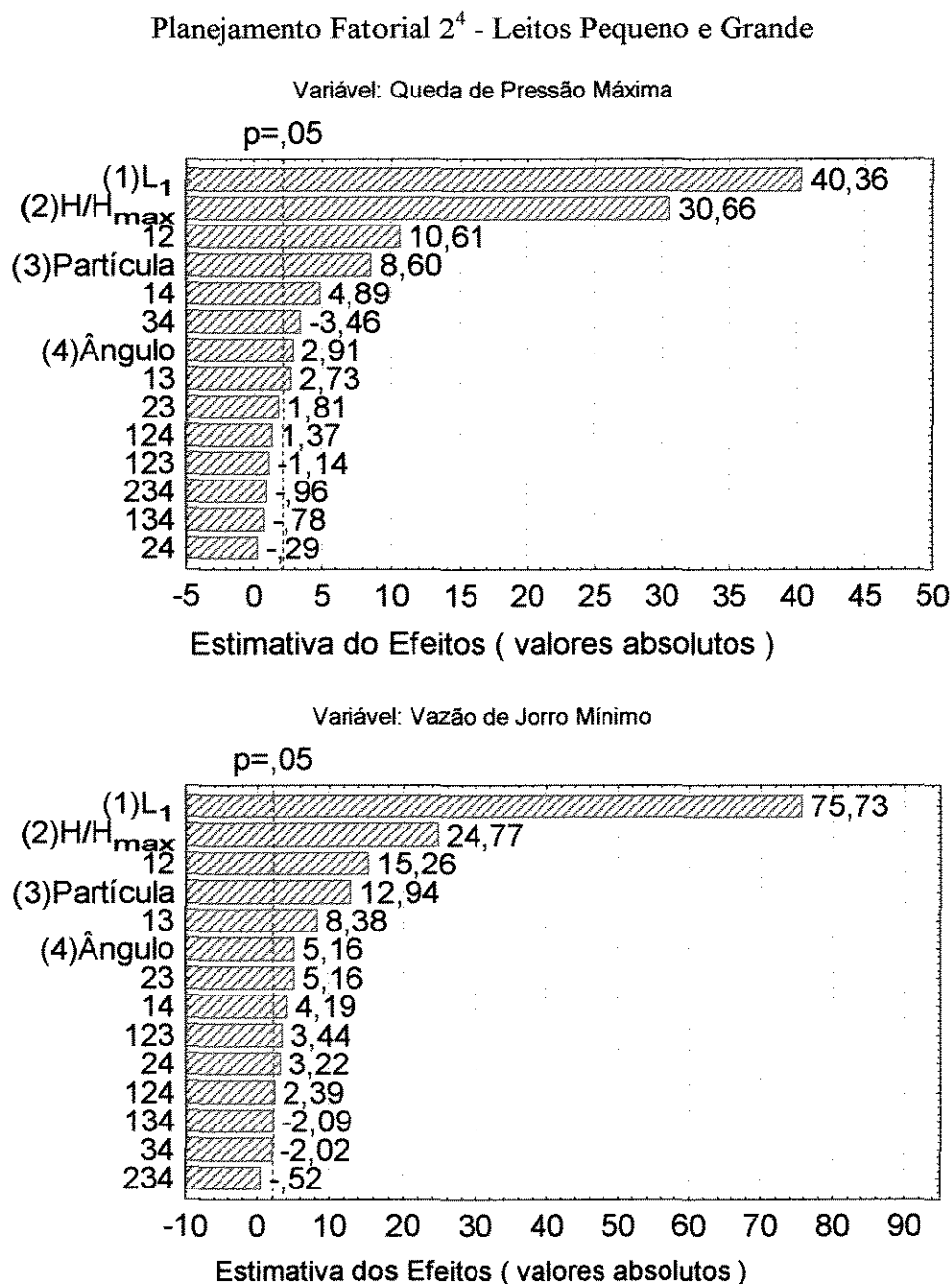


Figura 4.23 - Diagramas de Pareto dos Efeitos Padronizados (Leitos Pequeno e Grande).

Planejamento Fatorial 2⁴ - Modelo linear:

$$51,05+2722*(1)+20,67*(2)+5,80*(3)+1,97*(4)+7,15*(1)*(2)+1,84*(1)*(3)+3,30*(1)*(4)-2,33*(2)*(3)$$

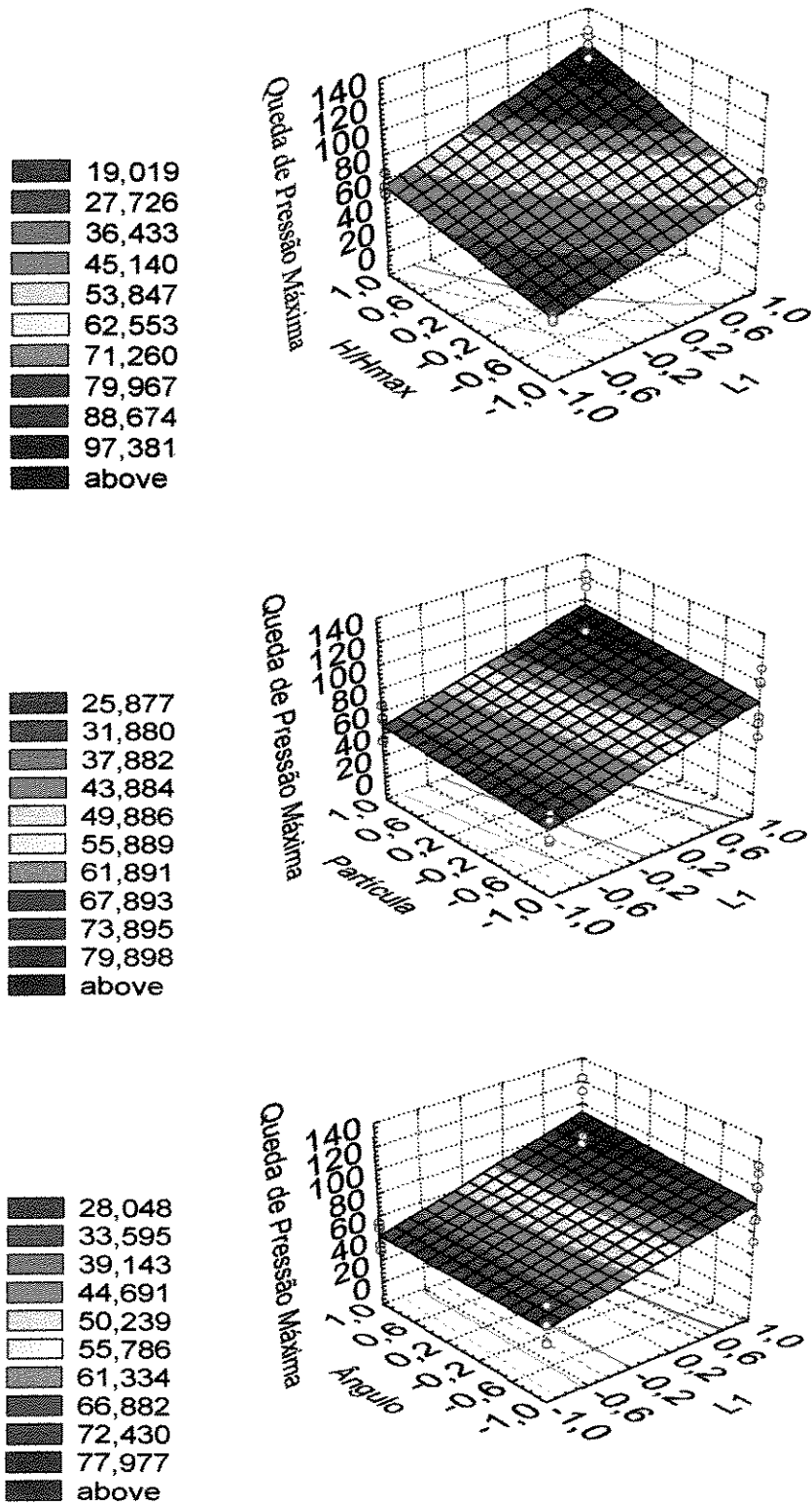


Figura 4.24 - Superfícies de Resposta para ΔP_{max} (Leitos Pequeno e Grande).

Planejamento Fatorial 2⁴ - Modelo linear:

$$0,93+0,63*(1)+0,21*(2)+0,11*(3)+0,04*(4)+0,13*(1)*(2)+0,07*(1)*(3)+0,04*(1)*(4)+0,04*(2)*(3)+0,03*(2)*(4)+0,03*(1)*(2)*(3)+0,02*(1)*(2)*(4)$$

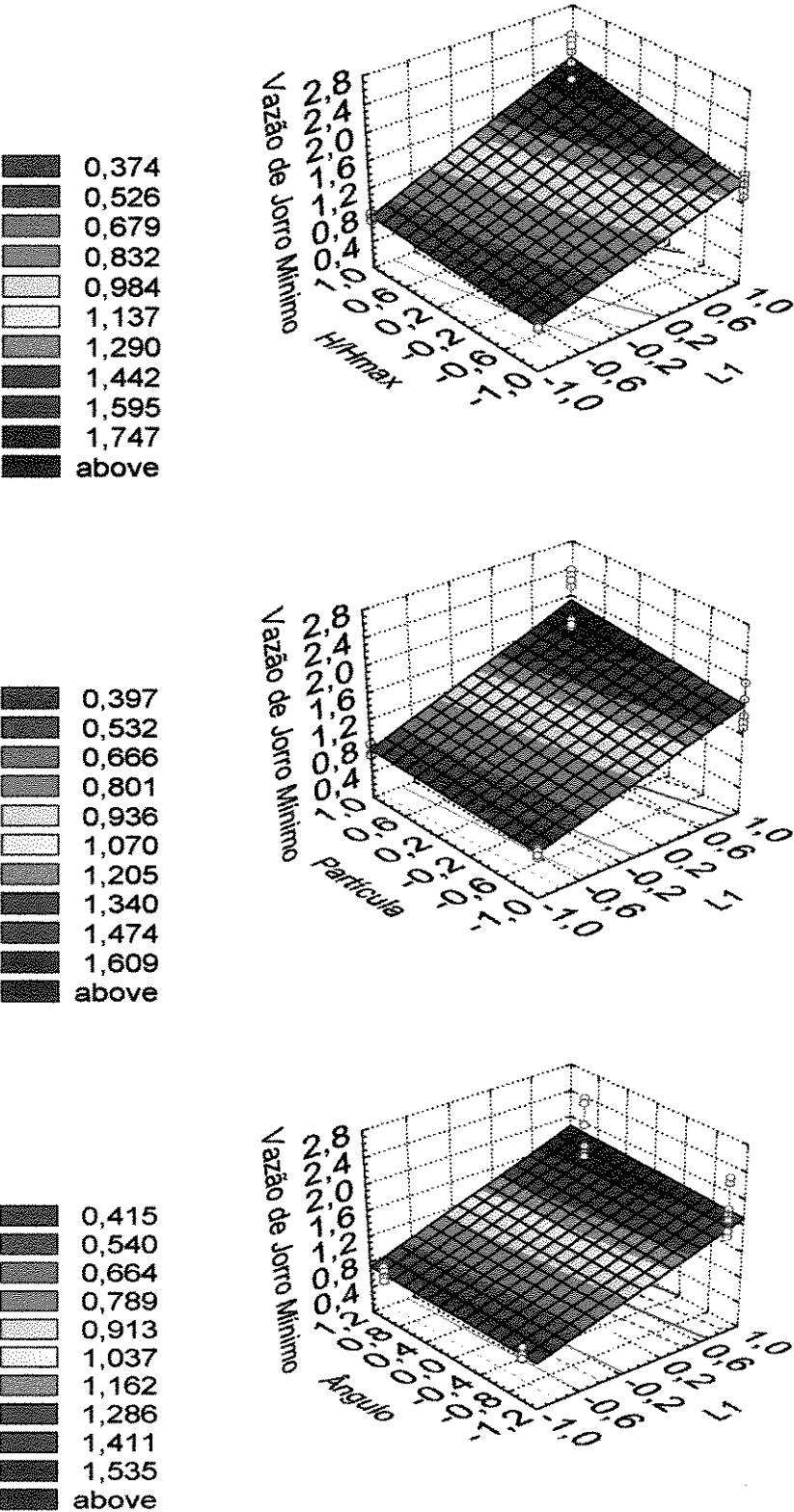


Figura 4.25 - Superfícies de Resposta para Q_{jm} (Leitos Pequeno e Grande).

4.3.6 Planejamento Fatorial 2^4 entre os Leitos Médio e Grande.

As Tabelas 4.19 e 4.20 apresentam os resultados do planejamento fatorial 2^4 da Tabela 4.7 para os leitos médio e grande.

Tabela 4.19 - Estimativa dos Efeitos sobre $\Delta P_{\max}$ (Leitos Médio e Grande).

Variável: $\Delta P_{\max}$	Estimativa dos Efeitos $R^2 = 0,99787$			
Fator	Efeito	Erro Padrão	-95% Limite de Confiança	+95% Limite de Confiança
Média Global	56,57188*	0,360148*	55,81203*	57,33172*
(1) L_1	43,38125*	0,720296*	41,86156*	44,90094*
(2) $H/H_{\max}$	39,20625*	0,720296*	37,68656*	40,72594*
(3) ρ_p	16,41875*	0,720296*	14,89906*	17,93844*
(4) Ângulo	10,94375*	0,720296*	9,42406*	12,46344*
(12)	16,44375*	0,720296*	14,92406*	17,96344*
(13)	-1,14375	0,720296	-2,66344	0,37594
(14)	-0,41875	0,720296	-1,93844	1,10094
(23)	3,33125*	0,720296*	1,81156*	4,85094*
(24)	2,95625*	0,720296*	1,43656*	4,47594*
(34)	-1,30625	0,720296	-2,82594	0,21344
(123)	-2,43125*	0,720296*	-3,95094*	-0,91156*
(124)	-1,50625	0,720296	-3,02594	0,01344
(134)	-4,41875*	0,720296*	-5,93844*	-2,89906*
(234)	2,45625*	0,720296*	0,93656*	3,97594*

(*) - Efeitos estatisticamente significativos

Os parâmetros adimensionais neste caso são os mesmos do planejamento anterior, ou seja, $(L_1/L_j)_M = 6$ e $(L_1/L_j)_G = 16$, portanto é de se esperar que o comportamento das variáveis dependentes também seja o mesmo. Mais uma vez L_1 foi o fator de maior influência sobre a queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo, e mais uma vez os efeitos de interação desse fator com as outras variáveis foram importantes.

Tabela 4.20 - Estimativa dos Efeitos sobre Q_{jm} (Leitos Médio e Grande).

Variável: Q_{jm}	Estimativa dos Efeitos $R^2 = 0,99433$			
Fator	Efeito	Erro Padrão	-95% Limite de Confiança	+95% Limite de Confiança
Média Global	1,237813	0,008986*	1,218853*	1,256772*
(1) L_1	0,655625*	0,017972*	0,617707*	0,693543*
(2) H/H_{max}	0,530625*	0,017972*	0,492707*	0,568543*
(3) ρ_p	0,430625*	0,017972*	0,392707*	0,468543*
(4) Ângulo	0,130625*	0,017972*	0,092707*	0,168543*
(12)	0,138125*	0,017972*	0,100207*	0,176043*
(13)	-0,074375*	0,017972*	-0,112293*	-0,036457*
(14)	0,025625	0,017972	-0,012293	0,063543
(23)	0,113125*	0,017972*	0,075207*	0,151043*
(24)	0,063125*	0,017972*	0,025207*	0,101043*
(34)	0,000625	0,017972	-0,037293	0,038543
(123)	0,030625	0,017972	-0,007293	0,068543
(124)	0,030625	0,017972	-0,007293	0,068543
(134)	-0,069375*	0,017972*	-0,107293*	-0,031457*
(234)	0,005625	0,017972	-0,032293	0,043543

(*) - Efeitos estatisticamente significativos

A interpretação geométrica dos efeitos para a queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo nos leitos médio e grande (Figuras 4.26 e 4.27) indica que os maiores aumentos de ΔP_{max} ocorreram quando o leito pequeno foi trocado pelo leito grande. O maior foi de 57,9 cmH₂O para $H/H_{max} = 0,95$ e ângulo de 60°, 56,25 cmH₂O para $H/H_{max} = 0,95$ e partículas de vidro, 63,4 cmH₂O para $H/H_{max} = 0,95$ e partículas de ABS, 61,75 cmH₂O para $H/H_{max} = 0,95$ e ângulo de 45°, 28,225 cmH₂O para $H/H_{max} = 0,55$ e partículas de vidro, 28,025 cmH₂O para $H/H_{max} = 0,55$ e ângulo de 60°, 25,85 cmH₂O para $H/H_{max} = 0,55$ e ângulo de 45° e a 25,65 cmH₂O para $H/H_{max} = 0,55$ e partículas de ABS.

Em relação à vazão de jorro mínimo, a largura do leito também é o fator de maior influência e interage com todas as outras variáveis. Os maiores aumentos ocorreram pela troca do leito pequeno com o leito médio. O maior foi de 0,85 Kg/min com $H/H_{max} = 0,95$ e ângulo

de 60° contra 0,838 Kg/min com $H/H_{\max} = 0,95$ e partículas de ABS, 0,75 Kg/min com $H/H_{\max} = 0,95$ e partículas de vidro, 0,737 Kg/min com $H/H_{\max} = 0,95$ e ângulo de 45° , 0,623 Kg/min com $H/H_{\max} = 0,55$ e partículas de ABS, 0,523 Kg/min com $H/H_{\max} = 0,55$ e ângulo de 45° , 0,512 Kg/min com $H/H_{\max} = 0,55$ e ângulo de 60° e 0,412 Kg/min com $H/H_{\max} = 0,55$ e partículas de vidro.

Esses aumentos, obviamente ocorreram em proporções menores do que os aumentos entre o leito pequeno e grande, mas apresentaram o mesmo comportamento. Os diagramas de Pareto dos efeitos sobre $\Delta P_{\max}$ e Q_{jm} (Figura 4.28) mostram que a maior influência sobre a queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo foi da largura do leito. A influência da interação (12) mais uma vez foi muito significativa, indicando a grande dependência das respostas na largura do leito e nas alturas de leito de partículas.

As superfícies de respostas para a queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo dos leitos médio e grande estão nas Figuras 4.29 e 4.30 e outra vez confirmam as tendências da queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo em se obter maiores valores pelo deslocamento das regiões experimentais para maiores valores de $H/H_{\max}$, maiores valores de ρ_p e maiores valores do ângulo de base dos leitos.

Planejamento Fatorial 2^4 - Leitos Médio e Grande
Valores Médios da Queda de Pressão Máxima

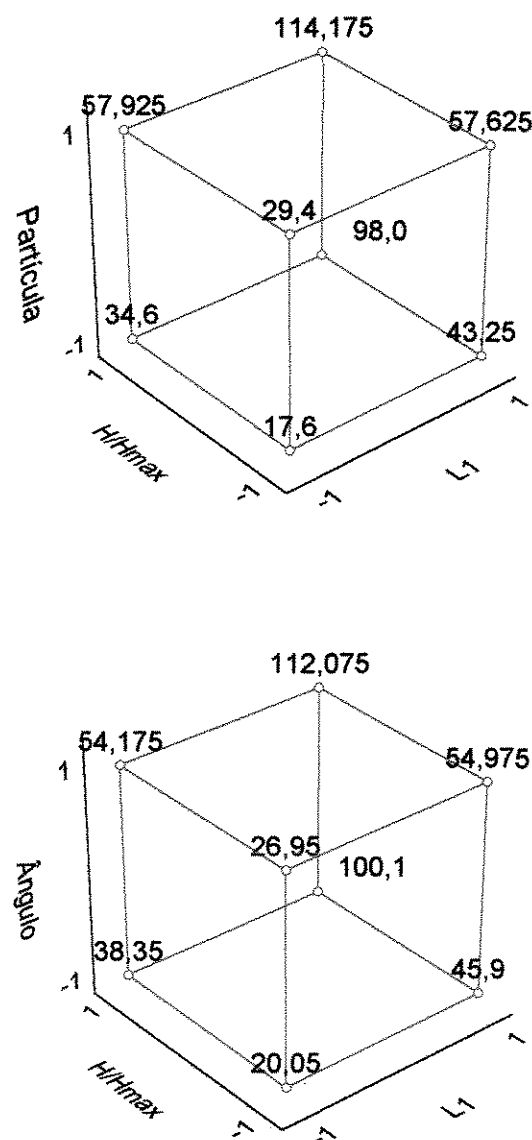


Figura 4.26 - Interpretação Geométrica dos Efeitos em ΔP_{max} (Leitos Médio e Grande)

Planejamento Fatorial 2^4 - Leitos Médio e Grande

Valores Médios da Vazão de Jorro Mínimo

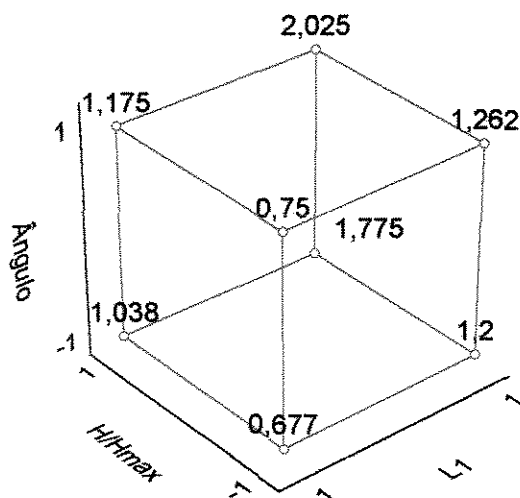
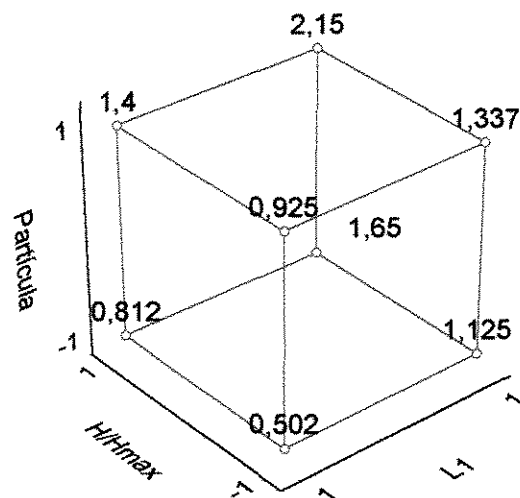


Figura 4.27 - Interpretação Geométrica dos Efeitos em Q_{jm} (Leitos Médio e Grande)

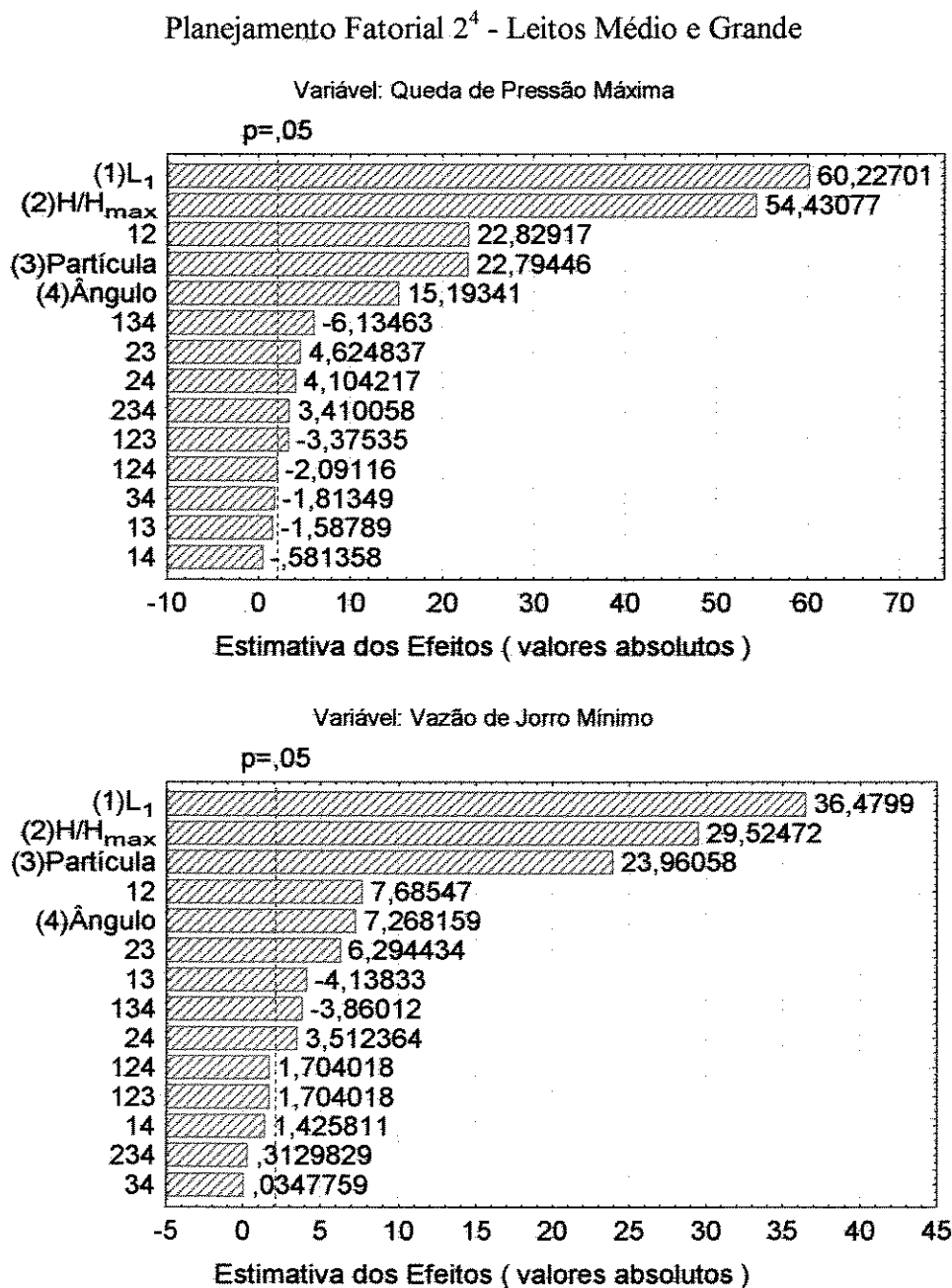


Figura 4.28 - Diagramas de Pareto dos Efeitos Padronizados (Leitos Médio e Grande).

Planejamento Fatorial 2^4 - Modelo linear:

$$56,57 + 21,69*(1) + 19,6*(2) + 8,21*(3) + 5,47*(4) + 8,22*(1)*(2) + 1,66*(2)*(3) + 1,48*(2)*(4) - 1,21*(1)*(2)*(3) - 2,21*(1)*(3)*(4) + 1,22*(2)*(3)*(4)$$

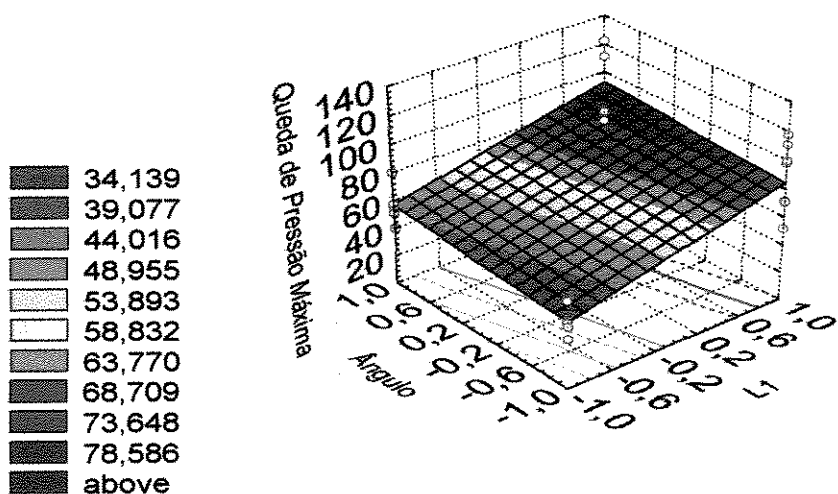
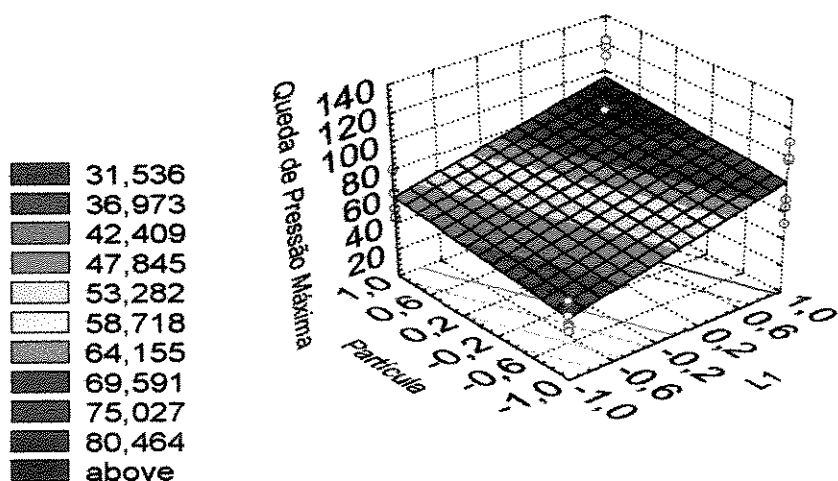
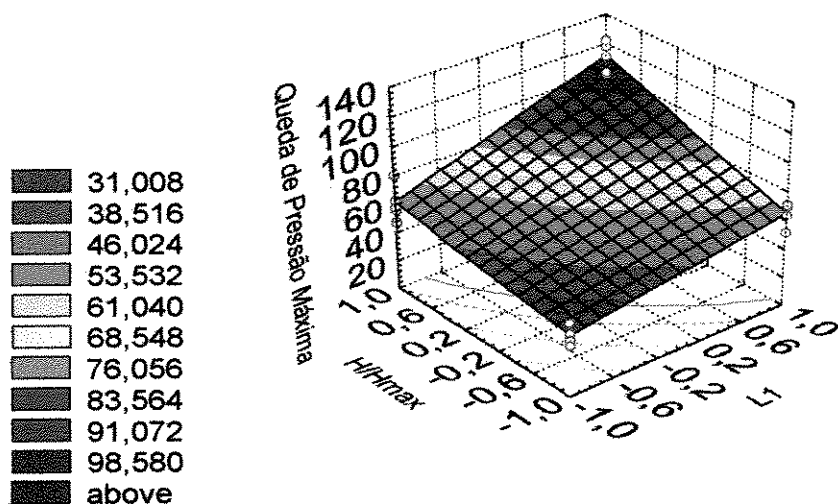


Figura 4.29 - Superfícies de Resposta para $\Delta P_{\max}$ (Leitos Médio e Grande).

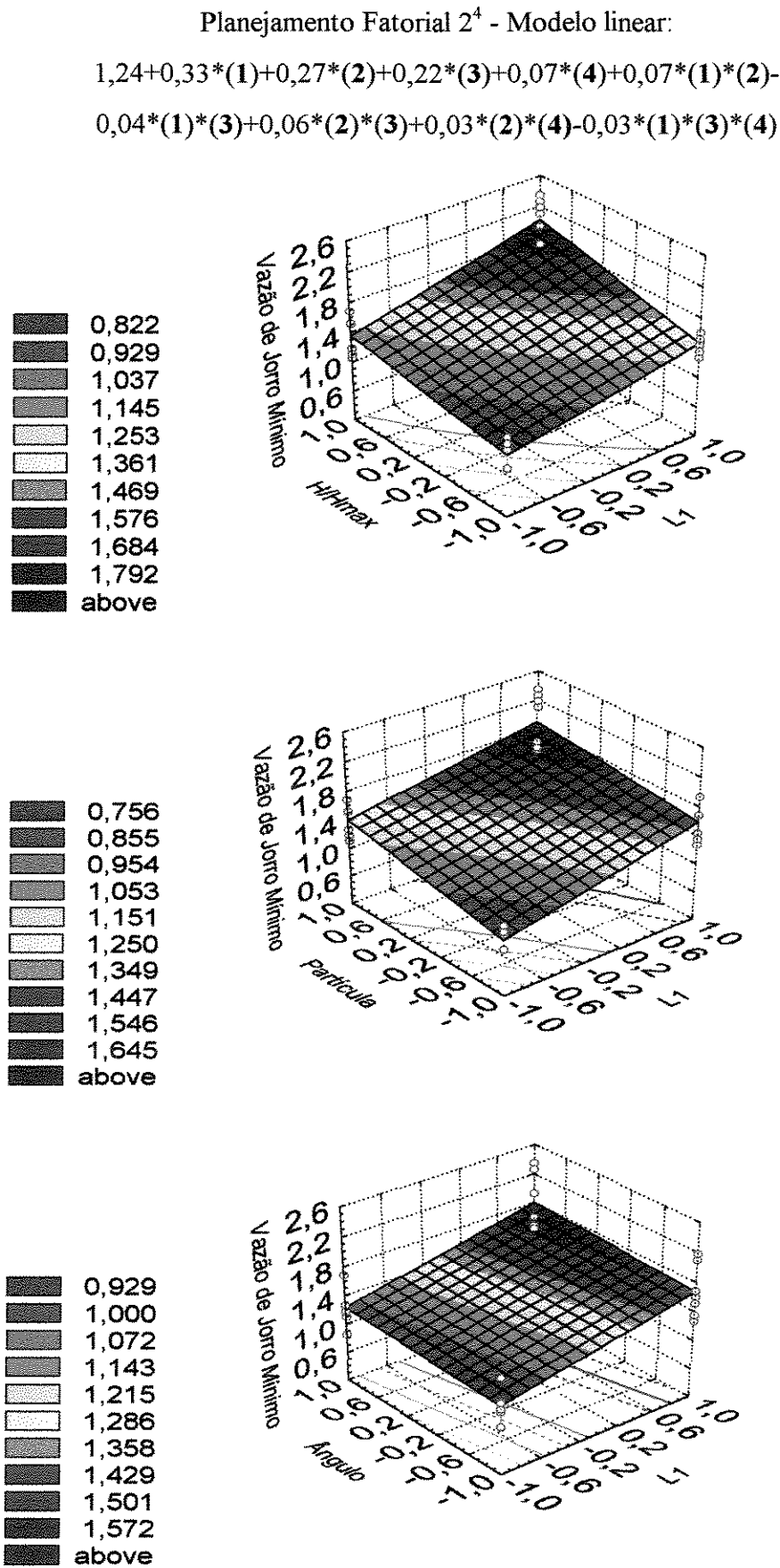


Figura 4.30 - Superfícies de Resposta para Q_{jm} (Leitos Médio e Grande).

4.3.7 Resumo dos Principais Resultados do Planejamento Experimental.

A metodologia do planejamento experimental mostrou-se adequada para explicar como e quais variáveis independentes estão relacionadas com a queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo.

A relação entre os aumentos de queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo com a troca dos parâmetros de escala independentes é o fator determinante para o cálculo dos efeitos. A Tabela 4.21 apresenta o resumo dos aumentos para todos os planejamentos fatoriais 2^3 e a Tabela 4.22 para os aumentos relativos à troca da largura dos leitos de jorro, obtidos dos planejamentos fatoriais 2^4 .

Para analisarmos as Tabelas 4.21 e 4.22, precisamos, em primeiro lugar, lembrar que o fenômeno de jorro se comporta de maneira específica para um dado conjunto de propriedades sólido-fluido e geometria dos leitos. Portanto, para explicar a causa de algumas disparidades entre os aumentos das variáveis dependentes, principalmente provocados pela troca do ângulo de base nos níveis dos outros fatores, devemos levar em consideração alguns fatores como o surgimento de zonas mortas, a má formação do jorro, a dificuldade em se obter a altura correta do leito de partículas no ponto exato de máxima estabilidade, os problemas inerentes ao tipo de partícula utilizada, e, entre outras, as dificuldades naturais devido a geometria dos leitos bidimensionais.

Através dos planejamentos fatoriais não é possível fundamentar argumentos de causa das disparidades, mas a grande vantagem está na identificação dos efeitos que cada parâmetro envolvido exerce sobre as variáveis dependentes. Os aumentos causados pela troca do parâmetro $H/H_{\max}$ são em sua maioria, superiores aos aumentos causados pela troca dos outros parâmetros, e isto é suficiente para indicar a importância de $H/H_{\max}$ como o fator que mais influencia no processo. Os aumentos causados pela troca das partículas classificam-nas como a segunda variável de maior importância. Tais partículas apresentaram praticamente os mesmos diâmetros, mas as densidades diferentes foram os subsídios necessários para validar seus efeitos. A troca do ângulo de base causou diminuições nas variáveis dependentes em alguns casos e aumentou em outros. Esta constatação pode ser observada pelos valores negativos apresentados na Tabela 4.21.

Tabela 4.21 - Resumo dos Principais Efeitos dos Planejamentos Fatoriais 2³

Troca dos Parâmetros	Configuração	Variações das Variáveis Dependentes					
		$\Delta P_{\max}$ (CmH ₂ O) Leito (I)	$\Delta P_{\max}$ (CmH ₂ O) Leito (II)	$\Delta P_{\max}$ (CmH ₂ O) Leito (III)	Q_{jm} (Kg/min) Leito (I)	Q_{jm} (Kg/min) Leito (II)	Q_{jm} (Kg/min) Leito (III)
H/H _{max}	Partículas de Vidro e ângulo de 60°	22,9	34,60	61,30	0,17	0,50	0,93
	Partículas de Vidro e ângulo de 45°	30,35	22,45	51,80	0,08	0,45	0,70
	Partículas de ABS e ângulo de 60°	26,70	19,85	52,90	0,17	0,35	0,60
	Partículas de ABS e ângulo de 45°	19,40	14,15	56,60	0,09	0,27	0,45
Partícula	H/H _{max} = 0,95 e ângulo de 60°	2,40	28,05	13,75	0,08	0,65	0,45
	H/H _{max} = 0,95 e ângulo de 45°	21,40	18,60	18,60	0,13	0,53	0,55
	H/H _{max} = 0,55 e ângulo de 60°	6,20	13,30	5,35	0,08	0,50	0,13
	H/H _{max} = 0,55 e ângulo de 45°	10,45	10,30	23,40	0,14	0,45	0,30
Ângulo	Partículas de Vidro e H/H _{max} = 0,95	-14,40	20,55	9,55	0,01	0,20	0,20
	Partículas de Vidro e H/H _{max} = 0,55	-6,95	8,40	0,05	-0,09	0,15	-0,03
	Partículas de ABS e H/H _{max} = 0,95	4,60	11,10	14,40	0,06	0,08	0,30
	Partículas de ABS e H/H _{max} = 0,55	-2,70	5,40	18,10	-0,03	-0,01	0,15

Tabela 4.22 - Resumo dos Principais Efeitos dos Planejamento Fatoriais 2⁴

Troca do Parâmetro	Configuração	Variações das Variáveis Dependentes					
		$\Delta P_{\max}$ (CmH ₂ O) Leitos (I e II)	$\Delta P_{\max}$ (CmH ₂ O) Leitos (I e III)	$\Delta P_{\max}$ (CmH ₂ O) Leitos (II e III)	Q_{jm} (Kg/min) Leitos (I e II)	Q_{jm} (Kg/min) Leitos (I e III)	Q_{jm} (Kg/min) Leitos (II e III)
L ₁	Partículas de Vidro e ângulo de 60°	26,25	63,65	37,40	0,90	1,44	0,54
	Partículas de Vidro e ângulo de 45°	5,5	52,58	47,08	0,75	1,37	0,63
	Partículas de ABS e ângulo de 60°	9,88	58,40	48,53	0,41	1,23	0,83
	Partículas de ABS e ângulo de 45°	2,58	43,10	40,53	0,39	1,02	0,64
	H/H _{max} = 0,95 e ângulo de 60°	19,28	77,18	57,90	0,78	1,63	0,85
	H/H _{max} = 0,95 e ângulo de 45°	-1,45	60,3	61,75	0,67	1,41	0,74
	H/H _{max} = 0,55 e ângulo de 60°	16,85	44,88	28,03	0,53	1,04	0,51
	H/H _{max} = 0,55 e ângulo de 45°	9,53	35,38	25,85	0,46	0,98	0,52
	Partículas de Vidro e H/H _{max} = 0,95	14,63	70,88	56,25	0,97	1,72	0,75
	Partículas de Vidro e H/H _{max} = 0,55	17,13	45,35	28,23	0,68	1,09	0,41
	Partículas de ABS e H/H _{max} = 0,95	3,20	66,60	63,40	0,49	1,32	0,84
	Partículas de ABS e H/H _{max} = 0,55	9,25	34,90	25,65	0,31	0,93	0,62

A interpretação dos efeitos do ângulo de base indica uma tendência: à medida em que o tamanho dos leitos aumenta o efeito se torna maior e mais sinérgico. Nas configurações em que o ângulo de 60° foi utilizado, os valores das variáveis dependentes foram, em sua maioria, superiores aos produzidos nas configurações com o ângulo de 45° , utilizando valores proporcionais da altura do leito de partículas.

A Tabela 2.21 indica ainda que os maiores aumentos ocorreram no leito grande, seguido pelo médio e pequeno. A influência global de L_1 sobre a queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo é maior que a influência de todos os outros parâmetros analisados no planejamento 2^3 . A Tabela 2.22 apresenta os aumentos provocados pela troca dos leitos, indicando valores sinérgicos em praticamente todos os níveis das outras variáveis.

Os resultados de queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo foram ainda fortemente influenciados pelos parâmetros de escala adimensionais. O mais notável, o parâmetro L_1 / L_j , foi o principal causador dos pequenos aumentos produzidos com a troca do leito pequeno (I) pelo leito médio (II). Esse comportamento adverso ocorreu somente em relação à queda de pressão máxima, supostamente causado pela equivalência dos parâmetros adimensionais.

O comportamento fluidodinâmico dos leitos de jorro bidimensionais está associado às tendências apresentadas no planejamento experimental, mais especificamente pela análise de superfície de resposta, em que os maiores valores das variáveis dependentes do processo são obtidos em leitos com maiores larguras da coluna, com ângulos de base mais inclinados, com alturas de partículas o mais próximo possível da altura máxima, e para partículas mais densas e mais esféricas.

4.4 AMPLIAÇÃO DE ESCALA ATRAVÉS DA ANÁLISE DE SIMILARIDADE

Para que um leito de jorro seja convenientemente projetado é necessário que sua fluidodinâmica seja bem compreendida e de uma maneira geral, as análises do planejamento experimental tornaram isto possível.

O estudo através da análise de similaridade é conveniente para uma generalização de resultados experimentais e pode auxiliar nas correlações matemáticas para as variáveis dependentes do jorro. Através da análise de similaridade o número de parâmetros independentes da qual o fenômeno físico depende é reduzido. Tal redução é efetuada através da obtenção de novos parâmetros independentes os quais são combinações dos parâmetros independentes originais. Para que dois leitos de tamanhos diferentes se comportem de maneira equivalente, é necessário que tais parâmetros independentes possuam os mesmos valores para ambos.

Neste trabalho utilizaremos alguns parâmetros adimensionais (Equação 2.55) para testá-los em relação aos resultados de queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo. A análise de similaridade requer que a similaridade geométrica seja atendida, ou seja, os leitos devem possuir a mesma forma e os ângulos devem ser preservados. Segundo Glicksman, L.R. (1984), os parâmetros adimensionais que devem ser equivalentes para se ter similaridade geométrica em fluidização são os termos $\frac{D_c}{L}$ e $\frac{D_c}{d_p}$ em que D_c é o diâmetro da coluna do leito, L é a altura do leito e d_p é o diâmetro das partículas. No caso dos leitos de jorro bidimensionais consideraremos os termos $\frac{H}{L_1}$ e $\frac{L_1}{L_j}$ como os parâmetros que devem ser equivalentes para satisfazer a similaridade geométrica, sendo que o último, diferentemente em fluidização, relaciona a largura do leito com a largura do jorro, ao invés do diâmetro das partículas, devido à facilidade de ampliação de escala oferecida pela geometria bidimensional.

Nas Tabelas 4.21 a 4.23 apresentamos os resultados experimentais da ampliação de escala entre os leitos de jorro bidimensionais. As corridas utilizadas encontram-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.23 - Teste experimental das variáveis Adimensionais (leitos pequeno e médio).

Casos	Corridas	Partíc.	$\left(\frac{H}{L_1}\right)_{II}$ $\left(\frac{H}{L_1}\right)_I$	$\left(\frac{L_1}{L_j}\right)_{II}$ $\left(\frac{L_1}{L_j}\right)_I$	$\left(\frac{L_1}{d_p}\right)_{II}$ $\left(\frac{L_1}{d_p}\right)_I$	$\left(\frac{\rho_f}{\rho_s}\right)_{II}$ $\left(\frac{\rho_f}{\rho_s}\right)_I$	$\frac{(\Delta P_{max})_{II}}{(\Delta P_{max})_I}$	$\frac{(Q_{jm})_{II}}{(Q_{jm})_I}$
1	1 e 13	ABS	1,000	1	2	1	3,0	3,4
2	2 e 15	ABS	1,083	1	2	1	3,03	3,57
3	4 e 17	ABS	0,930	1	2	1	3,71	3,33
4	7 e 14	ABS	1,152	1	2	1	3,68	3,13
5	8 e 21	ABS	1,083	1	2	1	2,99	3,64
6	10 e 23	ABS	0,930	1	2	1	3,87	3,00
7	35 e 47	Vidro	1,000	1	2	1	1,96	3,26
8	38 e 50	Vidro	1,000	1	2	1	2,46	3,70
9	40 e 52	Vidro	1,022	1	2	1	1,93	3,10
10	41 e 54	Vidro	1,000	1	2	1	2,00	3,64
11	44 e 57	Vidro	1,000	1	2	1	2,60	3,46
12	46 e 53	Vidro	1,054	1	2	1	1,84	3,41

Tabela 4.24 - Teste experimental das variáveis Adimensionais (leitos pequeno e grande).

Casos	Corridas	Partíc.	$\left(\frac{H}{L_1}\right)_{III}$ $\left(\frac{H}{L_1}\right)_I$	$\left(\frac{L_1}{L_j}\right)_{III}$ $\left(\frac{L_1}{L_j}\right)_I$	$\left(\frac{L_1}{d_p}\right)_{III}$ $\left(\frac{L_1}{d_p}\right)_I$	$\left(\frac{\rho_f}{\rho_s}\right)_{III}$ $\left(\frac{\rho_f}{\rho_s}\right)_I$	$\frac{(\Delta P_{max})_{III}}{(\Delta P_{max})_I}$	$\frac{(Q_{jm})_{III}}{(Q_{jm})_I}$
13	1 e 25	ABS	1,07	2,67	5,33	1	7,58	6,67
14	2 e 26	ABS	0,96	2,67	5,33	1	9,04	5,95
15	4 e 28	ABS	0,85	2,67	5,33	1	7,95	6,67
16	7 e 30	ABS	1,07	2,67	5,33	1	8,57	6,87
17	8 e 31	ABS	0,96	2,67	5,33	1	7,84	5,91
18	10 e 33	ABS	0,85	2,67	5,33	1	7,30	6,00
19	35 e 61	Vidro	0,84	2,67	5,33	1	5,06	6,09
20	39 e 65	Vidro	0,99	2,67	5,33	1	8,1	7,93
21	41 e 66	Vidro	0,84	2,67	5,33	1	5,09	5,91
22	45 e 70	Vidro	0,99	2,67	5,33	1	7,7	7,33

Tabela 4.25 - Teste experimental das variáveis Adimensionais (leitos médio e grande).

Casos	Corridas	Partic.	$\frac{\left(\frac{H}{L_1}\right)_{III}}{\left(\frac{H}{L_1}\right)_{II}}$	$\frac{\left(\frac{L_1}{L_j}\right)_{III}}{\left(\frac{L_1}{L_j}\right)_{II}}$	$\frac{\left(\frac{L_1}{d_p}\right)_{III}}{\left(\frac{L_1}{d_p}\right)_{II}}$	$\frac{\left(\frac{\rho_f}{\rho_s}\right)_{III}}{\left(\frac{\rho_f}{\rho_s}\right)_{II}}$	$\frac{(\Delta P_{max})_{III}}{(\Delta P_{max})_{II}}$	$\frac{(Q_{jm})_{III}}{(Q_{jm})_{II}}$
23	13 e 25	ABS	1,07	2,67	2,67	1	2,53	1,96
24	15 e 27	ABS	0,96	2,67	2,67	1	3,06	2,00
25	16 e 28	ABS	0,85	2,67	2,67	1	2,64	2,40
26	18 e 29	ABS	1,07	2,67	2,67	1	2,62	2,19
27	19 e 30	ABS	0,96	2,67	2,67	1	2,58	2,12
28	21 e 32	ABS	0,85	2,67	2,67	1	3,19	1,88
29	22 e 33	ABS	0,84	2,67	2,67	1	2,51	2,40
30	24 e 34	ABS	0,99	2,67	2,67	1	2,55	2,00
31	47 e 61	Vidro	0,84	2,67	2,67	1	2,59	1,87
32	50 e 65	Vidro	1,05	2,67	2,67	1	3,65	2,30
33	55 e 67	Vidro	0,91	2,67	2,67	1	3,31	1,89
34	51 e 70	Vidro	0,99	2,67	2,67	1	3,56	2,20

A comparação entre os valores de queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo dos leitos bidimensionais apresentou excelente concordância nos resultados das corridas especificadas nas tabelas anteriores. O comportamento semelhante das variáveis dependentes é justificado pela equivalência dos parâmetros de escala adimensionais.

Nem todos os parâmetros apresentaram equivalência, mas foram proporcionais em todos os casos. A aplicação da ampliação de escala será realizada pela combinação do conjunto de parâmetros adimensionais, baseada no seguinte princípio: Seja um parâmetro “A” do conjunto de parâmetros adimensionais governantes de um fenômeno físico qualquer. Para que a similaridade seja atendida, necessita-se que:

$$A_{\text{modelo}} = A_{\text{real}} \quad (4.1)$$

Multiplicando-se a equação anterior por outro parâmetro adimensional “B”, também pertencente ao conjunto, têm-se:

$$B_{\text{modelo}} A_{\text{modelo}} = B_{\text{real}} A_{\text{real}} \quad (4.2)$$

A Equação (4.1) é utilizada para se obter similaridade em relação ao parâmetro “A” e a Equação (4.2) para a similaridade entre os parâmetros “A” e “B”.

Este princípio foi empregado na combinação dos parâmetros adimensionais apresentados na Tabela 4.26:

Tabela 4.26 - Conjunto simplificado dos Parâmetros Adimensionais.

Número:	1	2	3	4	5	6
Parâmetro:	$\frac{Q_{jm}}{(gH)^{0,5}}$	$\frac{\Delta P_{max}}{\rho_b g H}$	$\frac{H}{L_j}$	$\frac{L_1}{L_j}$	$\frac{L_1}{d_p}$	$\frac{\rho_f}{\rho_s}$

Os parâmetros (1) e (2) foram incluídos para que os adimensionais de queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo (razão entre os resultados de dois leitos) sejam calculados. Na Tabela 4.27 são apresentadas as combinações feitas entre os parâmetros da Tabela 4.26 e as equivalências resultantes a serem satisfeitas entre dois leitos de tamanhos diferentes.

Tabela 4.27 - Combinação dos Parâmetros Adimensionais e Equivalências a serem satisfeitas.

Número	Combinação	Equivalência
(I)	$\frac{(1) \times (4)}{(5)^{1,228}}$	$\left[\frac{\frac{Q_{jm}}{(H)^{0,5}} \left(\frac{L_1}{L_j} \right)}{\left(\frac{L_1}{d_p} \right)^{1,228}} \right]_{\text{mod elo}} = \left[\frac{\frac{Q_{jm}}{(H)^{0,5}} \left(\frac{L_1}{L_j} \right)}{\left(\frac{L_1}{d_p} \right)^{1,228}} \right]_{\text{real}}$
(II)	$\frac{(2) \times (4)^{1,14}}{(5)^{0,86}}$	$\left[\frac{\left(\frac{\Delta P_{max}}{\rho_b H} \right) \left(\frac{L_1}{L_j} \right)^{1,14}}{\left(\frac{L_1}{d_p} \right)^{0,86}} \right]_{\text{mod elo}} = \left[\frac{\left(\frac{\Delta P_{max}}{\rho_b H} \right) \left(\frac{L_1}{L_j} \right)^{1,14}}{\left(\frac{L_1}{d_p} \right)^{0,86}} \right]_{\text{real}}$

A utilização das equivalências obtidas na Tabela 4.27 e das propriedades independentes do processo resulta nas seguintes equações para obtenção das propriedades dependentes a serem seguidas na ampliação de escala:

$$\frac{Q_{jm}(\text{maior})}{Q_{jm}(\text{menor})} = \frac{\left[H^{0,5} \left(\frac{L_1}{d_p} \right)^{1,228} \right]_{\text{maior}} \left(\frac{L_1}{L_j} \right)_{\text{menor}}}{\left[H^{0,5} \left(\frac{L_1}{d_p} \right)^{1,228} \right]_{\text{menor}} \left(\frac{L_1}{L_j} \right)_{\text{maior}}} \quad (4.3)$$

$$\frac{\Delta P_{\max}(\text{maior})}{\Delta P_{\max}(\text{menor})} = \frac{\left[(H\rho_b) \left(\frac{L_1}{d_p} \right)^{0,86} \right]_{\text{maior}} \left(\frac{L_1}{L_j} \right)_{\text{menor}}^{1,14}}{\left[(H\rho_b) \left(\frac{L_1}{d_p} \right)^{0,86} \right]_{\text{menor}} \left(\frac{L_1}{L_j} \right)_{\text{maior}}^{1,14}} \quad (4.4)$$

Deve-se observar que o arranjo dos dados experimentais não permitiu que todos os parâmetros adimensionais apresentassem os mesmos valores em cada leito, entretanto o sucesso da ampliação de escala pode ser atribuído a um ajuste de dados feito para se obter os expoentes dos parâmetros (4) e (5). Tal ajuste foi feito pelo método Quasi-Newton através do programa “STATISTICA for Windows”.

Na prática, nem sempre é possível obter semelhança entre todos os parâmetros adimensionais de um protótipo e de seu respectivo leito real. A utilização dos conjuntos simplificados das relações de escala pode amenizar este problema nas situações em que sejam aplicáveis.

O uso de leitos em escala de laboratório devidamente modelados facilita o projeto dos leitos comerciais e permite um melhor conhecimento de fenômenos referentes a dinâmica das partículas e do gás utilizados. Dessa forma, mudanças de projeto podem ser rapidamente testadas para resolver anomalias de funcionamento nos leitos comerciais existentes.

As Figuras 4.31 e 4.32 apresentam as comparações entre os leitos pequeno e médio para a queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo.

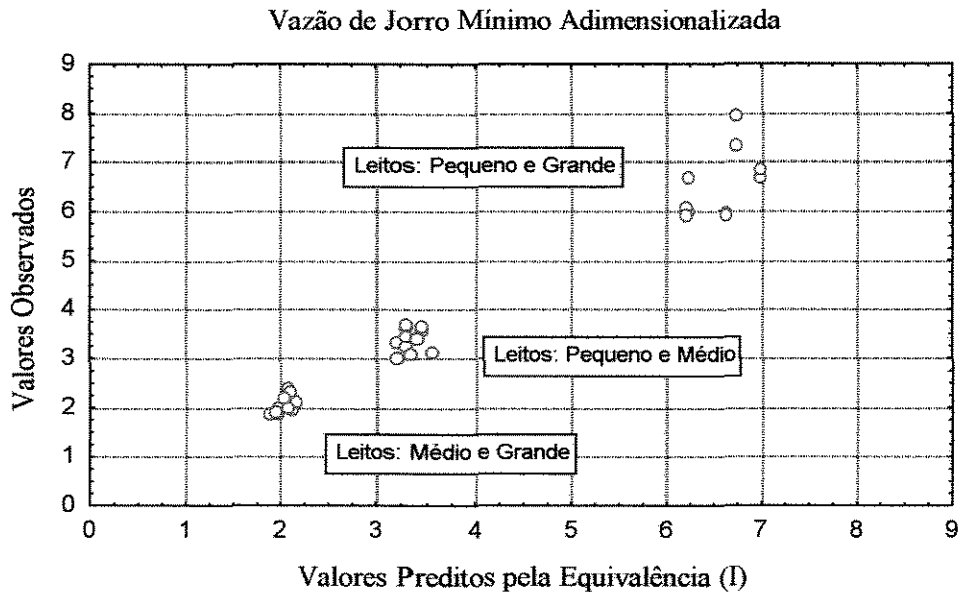


Figura 4.31 - Comparação dos Resultados de Q_{jm} Adimensionalizado.

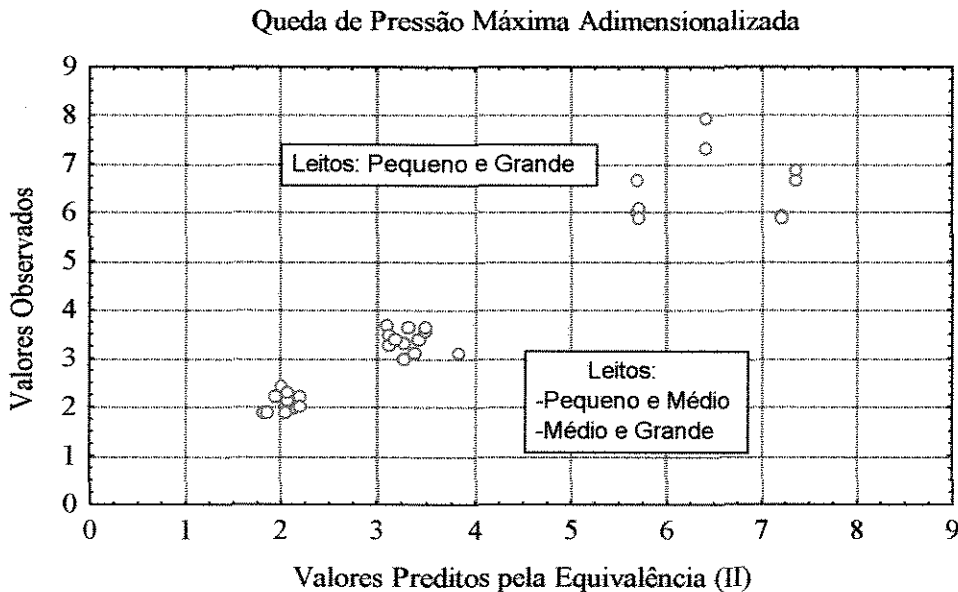


Figura 4.32 - Comparação dos Resultados de ΔP_{max} Adimensionalizado.

Os aumentos da vazão de jorro mínimo e queda de pressão máxima foram praticamente os mesmos na comparação entre dois leitos, e estão indicados pelos grupos isolados de pontos experimentais em azul nas Figuras 4.31 e 4.32. A coincidência dos resultados indica que os parâmetros de escala são válidos para os leitos de jorro bidimensionais. As Equações 4.3 e 4.4 predizem bem o comportamento das variáveis dependentes dos leitos bidimensionais, dinamicamente similares. O leito grande, por exemplo, apresentou valores de $\Delta P_{\max}$ e Q_{jm} de seis a oito vezes maiores que os valores no leito pequeno. Somente os aumentos de queda de pressão máxima entre os leitos pequeno-médio e médio-grande apresentaram valores comuns nos grupos de corridas indicados na Figura 4.32.

As Equações 4.3 e 4.4 podem ser úteis para prever o comportamento de protótipos de leitos com grandes colunas, apresentando equivalência, ou valores proporcionais entre os parâmetros de escala adimensionais.

A Tabela 4.28 apresenta os valores calculados pelas equivalências (I) e (II) para a vazão de jorro mínimo e queda de pressão máxima, bem como os desvios relativos aos dados experimentais. A tabela também fornece o desvio médio absoluto, o desvio padrão e os coeficientes de correlação. Os valores de Q_{jm} e $\Delta P_{\max}$, indicados como números adimensionais dos experimentos, são os resultados experimentais de todos os casos das Tabelas 4.23 a 4.25 e os adimensionais calculados, são os preditos pelas Equações 4.3 e 4.4.

Tabela 4.28 - Comparação das Variáveis Dependentes Adimensionais Experimentais com as Calculadas nas Equações 4.3 e 4.4.

Casos	Q_{jm} (adimens.) Exp.	Q_{jm} (adimens.) Calc.	Desvio (%)	$\Delta P_{\max}$ (adimens.) Exp.	$\Delta P_{\max}$ (adimens.) Calc.	Desvio (%)
1	3,40	3,314	-2,54	3,40	3,429	0,85
2	3,57	3,449	-3,39	3,57	3,490	-2,23
3	3,33	3,215	-3,46	3,33	3,284	-1,38
4	3,13	3,554	13,53	3,13	3,826	22,25
5	3,64	3,449	-5,25	3,64	3,490	-4,11
6	3,00	3,215	7,16	3,00	3,284	9,47

Casos	Q _{jm} (adimens.) Exp.	Q _{jm} (adimens.) Calc.	Desvio (%)	ΔP _{max} (adimens.) Exp.	ΔP _{max} (adimens.) Calc.	Desvio (%)
7	3,26	3,314	1,65	3,26	3,132	-3,93
8	3,64	3,314	-8,96	3,64	3,319	-8,82
9	3,70	3,314	-10,44	3,70	3,109	-15,98
10	3,46	3,314	-4,23	3,46	3,132	-9,48
11	3,10	3,343	7,85	3,10	3,378	8,98
12	3,41	3,401	-0,25	3,41	3,205	-6,01
13	6,67	6,990	4,80	6,67	7,361	10,36
14	5,95	6,619	11,25	5,950	7,222	21,38
15	6,67	6,231	-6,58	6,670	5,705	-14,47
16	6,87	6,990	1,75	6,870	7,361	7,14
17	5,91	6,619	12,00	5,910	7,222	22,20
18	6,00	6,231	3,85	6,000	5,705	-4,92
19	6,09	6,211	1,99	6,090	5,717	-6,12
20	7,93	6,737	-15,05	7,930	6,411	-19,16
21	5,91	6,211	5,09	5,910	5,717	-3,26
22	7,33	6,737	-8,09	7,330	6,411	-12,54
23	1,96	2,113	7,80	1,960	2,149	9,65
24	2,00	1,964	-1,82	2,000	2,062	3,12
25	2,40	2,075	-13,52	2,400	2,015	-16,02
26	2,19	2,075	-5,23	2,19	2,203	0,59
27	2,12	2,168	2,25	2,12	2,077	-2,00
28	1,88	1,964	4,45	1,88	2,062	9,70
29	2,40	2,075	-13,52	2,40	2,015	-16,02
30	2,00	2,075	3,77	2,00	2,203	10,15
31	1,87	1,877	0,39	1,87	1,827	-2,27
32	2,30	2,099	-8,74	2,30	2,077	-9,71
33	1,89	1,946	2,94	1,89	1,872	-0,93
34	2,20	2,036	-7,44	2,20	1,955	-11,15
Desvio Médio Absoluto (%)			6,2	9,0		
Desvio Padrão (%)			4,145	6,42		
Coeficiente de Correlação			0,982	0,955		

4.5 CORRELAÇÃO PARA VELOCIDADE DE JORRO MÍNIMO.

Uma correlação geral para a velocidade de jorro mínimo foi desenvolvida com base nos mesmos princípios fluidodinâmicos dos leitos de jorro convencionais, em que o diâmetro da coluna (D_c) e o diâmetro da entrada de ar (D_i) são substituídos pela largura do leito (L_1) e Largura do jorro (L_j), respectivamente.

Os planejamentos experimentais nos mostraram que Q_{jm} está diretamente associada às variáveis primitivas do sistema (propriedades fluido-partícula, altura do leito, largura da coluna e largura do jorro), tanto pelas contribuições individuais quanto pelas interações entre as mesmas. A aplicação da ampliação de escala indica a grande importância dos parâmetros adimensionais dessas variáveis para se obter um comportamento homogêneo entre leitos de geometria bidimensional.

Através dessas observações chegamos a uma correlação que prediz bem os valores de Q_{jm} . Todas as corridas foram utilizadas, portanto a correlação é válida para uma grande faixa de valores das propriedades geométricas dos leitos de jorro bidimensionais. A correlação é a seguinte:

$$U_{jm} = 3,0(2gH)^{0,5} \left(\frac{L_1}{L_j} \right) \left(\frac{L_1}{d_p \phi} \right)^{-0,75} \left(\frac{H}{L_1} \right)^{0,16} \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right)^{0,23} \quad (4.5)$$

A equação acima foi desenvolvida para se obter valores da vazão de jorro mínimo em m/s, utilizando-se a seguinte faixa de variáveis: d_p (2,88 a 3 cm); ρ_s (1040 a 2600 Kg/m³); ϕ (0,79 a 1); L_1 (15 a 80 cm); L_j (2,5 a 5 cm) e H_0 (0,05 a 0,66 m).

Uma equação semelhante foi desenvolvida por Choi e Meisen, 1992 (Equação 2.35) para leitos de jorro convencionais, mas seus dados foram obtidos em colunas com diâmetros inferiores a 0,5 m. Segundo Lim e Grace (1987), a maioria das correlações para velocidade de jorro mínimo desenvolvidas em leitos de colunas pequenas, prediz pobremente os resultados de experimentos realizados em grandes colunas e também não prediz a dependência de Q_{jm} sobre a altura estática do leito de partículas.

A comparação entre os valores preditos pela Equação 4.5 e os observados encontra-se na Figura 4.33. O ajuste dos dados dessa correlação foi obtido pelo método Quasi-Newton. A coincidência dos resultados indica um bom ajuste dos dados.

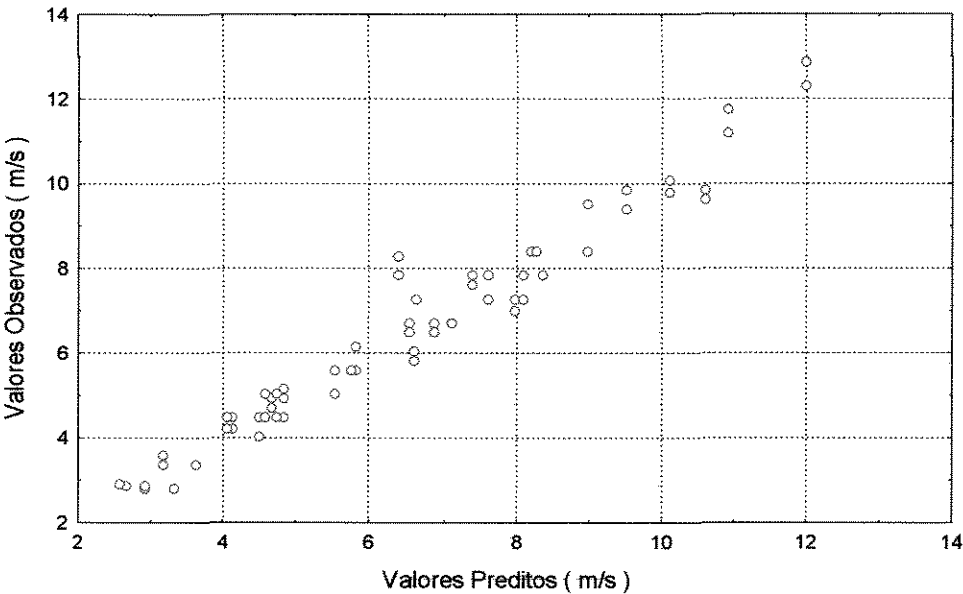


Figura 4.33 - Valores Preditos versus Valores Observados para U_{jm} .

A Tabela 4.29 apresenta os valores calculados pela Equação 4.5 para a velocidade de jorro mínimo

Tabela 4.29 - Comparação dos Dados Experimentais com os Calculados na Equação 4.5.

Corrida	Leito	Ângulo	Partíc.	Carga (g)	U_{jm} (Exp.) (m/s)	U_{jm} (Calc) (m/s)	Desvio (%)
1	I	45°	ABS	72,40	3,36	3,17	-5,72
2	I	45°	ABS	193,90	4,71	4,67	-0,86
3	I	45°	ABS	399,60	6,50	6,53	0,47
4	I	60°	ABS	125,90	4,03	4,49	11,39
5	I	60°	ABS	143,70	4,48	4,83	7,86
6	I	60°	ABS	316,90	8,29	6,38	-22,99
7	I	45°	ABS	72,40	3,59	3,17	-11,61
8	I	45°	ABS	193,90	4,93	4,67	-5,37
9	I	45°	ABS	399,60	6,72	6,53	-2,88

Corrida	Leito	Ângulo	Partíc.	Carga (g)	U_{jm} (Exp.) (m/s)	U_{jm} (Calc) (m/s)	Desvio (%)
10	I	60°	ABS	125,90	4,48	4,49	0,25
11	I	60°	ABS	143,70	4,48	4,83	7,86
12	I	60°	ABS	316,90	7,84	6,38	-18,59
13	II	45°	ABS	546,80	2,86	2,66	-6,84
14	II	45°	ABS	671,20	2,80	2,92	4,17
15	II	45°	ABS	1580,3	4,20	4,13	-1,70
16	II	60°	ABS	693,90	2,80	3,32	18,56
17	II	60°	ABS	875,20	3,36	3,63	7,87
18	II	60°	ABS	1723,3	4,48	4,73	5,64
19	II	45°	ABS	546,80	2,91	2,57	-11,67
20	II	45°	ABS	671,20	2,86	2,92	2,13
21	II	45°	ABS	1580,3	4,48	4,13	-7,85
22	II	60°	ABS	693,90	2,80	3,32	18,56
23	II	60°	ABS	875,20	3,36	3,63	7,87
24	II	60°	ABS	1723,3	5,04	4,73	-6,10
25	III	45°	ABS	3436,3	5,60	5,82	3,89
26	III	45°	ABS	8684,8	7,00	7,97	13,88
27	III	45°	ABS	9056,9	8,40	8,20	-2,41
28	III	60°	ABS	3811,1	6,72	7,09	5,52
29	III	60°	ABS	10646,59	9,80	10,1	3,15
30	III	45°	ABS	3436,30	6,16	5,82	-5,56
31	III	45°	ABS	8684,85	7,28	7,97	9,50
32	III	45°	ABS	9056,90	8,40	8,20	-2,41
33	III	60°	ABS	3811,14	6,72	7,09	5,52
34	III	60°	ABS	10646,59	10,1	10,1	0,28
35	I	45°	VIDRO	189,50	5,15	4,83	-6,22
36	I	45°	VIDRO	511,3	7,62	7,37	-3,23
37	I	45°	VIDRO	1031,80	9,64	10,6	10,03
38	I	60°	VIDRO	280,20	6,05	6,59	8,84
39	I	60°	VIDRO	313,10	6,50	6,85	5,45
40	I	60°	VIDRO	728,90	9,41	9,52	1,11
41	I	45°	VIDRO	189,50	4,93	4,83	-1,96
42	I	45°	VIDRO	511,30	7,84	7,37	-5,99
43	I	45°	VIDRO	1031,80	9,86	10,6	7,53

[illegible]

Os dados experimentais de Taranto (1992) foram utilizados para calcular a vazão de jorro mínimo através da Equação 4.5. A Figura 4.34 apresenta a comparação entre os valores preditos pela Equação 4.5 e os valores experimentais de Taranto. O desvio médio foi de 11,46% e o desvio padrão 7,266%. Isto indica que a correlação ajusta razoavelmente bem os resultados, visto que as partículas utilizadas por Taranto têm forma bem mais irregular (comprimidos) que as utilizadas neste trabalho, e além disso os resultados também foram aceitáveis com o uso do ângulo de base de 30^0 , não utilizado neste trabalho.

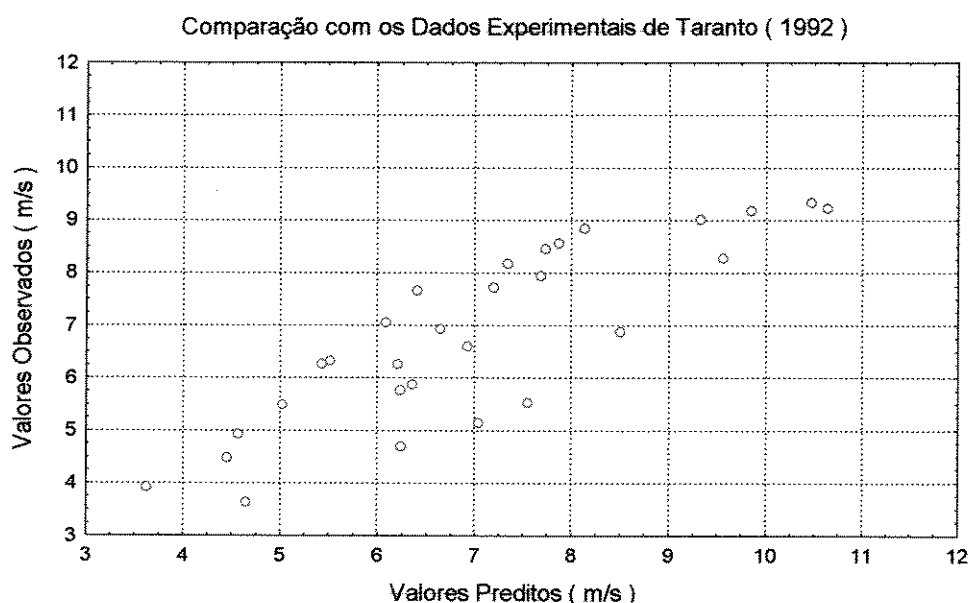


Figura 4.34 - Comparação entre Valores Experimentais de Taranto (1992) e os Valores Preditos pela Equação 4.5.

4.6 CORRELAÇÃO PARA QUEDA DE PRESSÃO MÁXIMA.

Os resultados experimentais de queda de pressão máxima foram utilizados para o desenvolvimento de uma correlação que leva em consideração as propriedades das partículas e do gás, bem como dos parâmetros geométricos do sistema. Assim como na correlação para a vazão de jorro mínimo, o parâmetro adimensional H/L_1 é incluído por se tratar de uma relação importante na ampliação de escala dos leitos de jorro bidimensionais. A equação foi desenvolvida utilizando-se a seguinte faixa de variáveis: d_p (2,88 a 3 cm); ρ_s (1040 a 2600 Kg/m^3); ϕ (0,79 a 1); L_1 (15 a 80 cm); L_j (2,5 a 5 cm); H_0 (0,05 a 0,66 m) e θ (45° a 60°). A correlação obtida foi a seguinte:

$$\frac{\Delta P_{\max}}{H\rho_b g} = 1 + 32,6 \left(\frac{L_1}{L_j} \right)^{0,05} \left(\frac{L_1}{\phi d_p} \right)^{0,18} \left(\frac{H}{L_1} \right)^{1,15} [Ar(\phi)]^{-0,41} \left(\text{tg} \frac{\theta}{2} \right)^{-2} \quad (4.6)$$

O método utilizado para o ajuste dos dados dessa correlação foi também o de Quasi-Newton. Os valores preditos pela Equação 4.6 apresentam uma boa concordância com os valores observados. A comparação entre esses valores encontra-se na Figura 4.35.

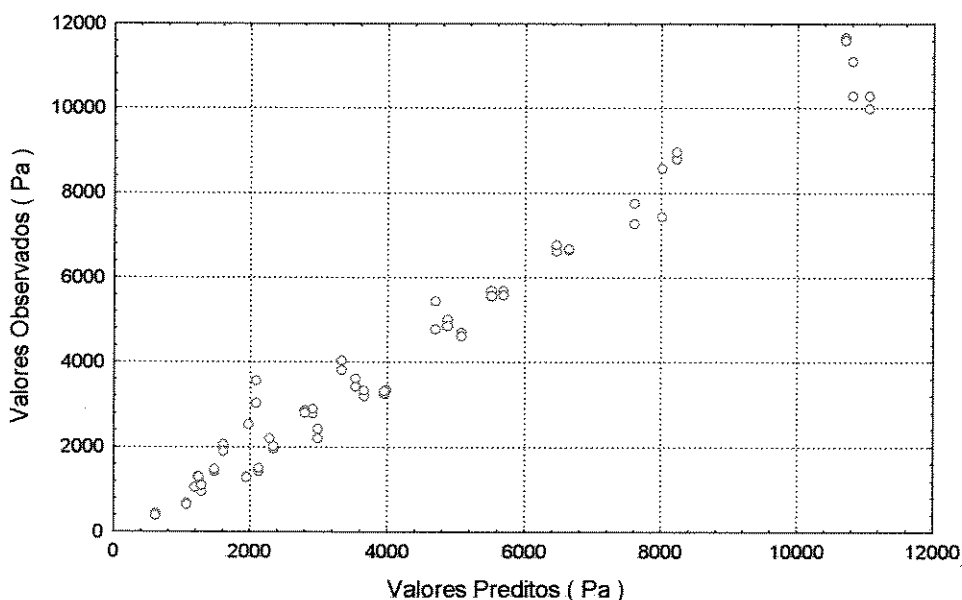


Figura 4.35 - Valores Preditos versus Valores Observados para $\Delta P_{\max}$.

A Tabela 4.26 apresenta os valores experimentais e os calculados pela Equação 4.6 para a queda de pressão máxima.

Tabela 4.30 - Comparação dos Dados Experimentais com os Calculados na Equação 4.6.

Corrida	Leito	Ângulo	Partíc.	Carga (g)	$\Delta P_{\max}$ (Exp.) (Pa)	$\Delta P_{\max}$ (Calc.) (Pa)	Desvio (%)
1	I	45°	ABS	72,40	440,86	619,13	40,44
2	I	45°	ABS	193,90	950,29	1283,78	35,09
3	I	45°	ABS	399,60	2792,1	2913,24	4,34
4	I	60°	ABS	125,90	685,78	1066,99	55,59
5	I	60°	ABS	143,70	1058,06	1187,79	12,26
6	I	60°	ABS	316,90	3566,05	2091,05	-41,36
7	I	45°	ABS	72,40	391,87	619,13	57,99
8	I	45°	ABS	193,90	950,29	1283,78	35,09
9	I	45°	ABS	399,60	2909,66	2913,24	0,12
10	I	60°	ABS	125,90	656,39	1066,99	62,55
11	I	60°	ABS	143,70	1058,06	1187,79	12,26
12	I	60°	ABS	316,90	3037,02	2091,05	-31,15
13	II	45°	ABS	546,80	1322,57	1229,27	-7,05
14	II	45°	ABS	671,20	1440,14	1472,1	2,22
15	II	45°	ABS	1580,3	2880,27	2799,29	-2,81
16	II	60°	ABS	693,90	2067,14	1605,79	-22,32
17	II	60°	ABS	875,20	2547,18	1970,22	-22,65
18	II	60°	ABS	1723,3	3820,77	3327,8	-12,90
19	II	45°	ABS	546,80	1302,98	1241,11	-4,75
20	II	45°	ABS	671,20	1479,32	1472,1	-0,49
21	II	45°	ABS	1580,3	2811,7	2799,29	-0,44
22	II	60°	ABS	693,90	1910,39	1605,79	-15,94
23	II	60°	ABS	875,20	2537,38	1970,22	-22,35
24	II	60°	ABS	1723,3	4046,1	3327,8	-17,75
25	III	45°	ABS	3436,3	3340,73	3974,77	18,98
26	III	45°	ABS	8684,8	8591,84	8010,65	-6,76
27	III	45°	ABS	9056,9	8807,37	8227,48	-6,58
28	III	60°	ABS	3811,1	5456,85	4688,15	-14,09

Corrida	Leito	Ângulo	Partic.	Carga (g)	$\Delta P_{\max}$ (Exp.) (Pa)	$\Delta P_{\max}$ (Calc.) (Pa)	Desvio (%)
29	III	60°	ABS	10646,59	10002,58	11054,83	10,52
30	III	45°	ABS	3436,30	3360,32	3974,77	18,29
31	III	45°	ABS	8684,85	7445,61	8010,65	7,59
32	III	45°	ABS	9056,90	8983,71	8227,48	-8,42
33	III	60°	ABS	3811,14	4790,66	4688,15	-2,14
34	III	60°	ABS	10646,59	10306,29	11054,83	7,26
35	I	45°	VIDRO	189,50	1126,64	1284,81	14,04
36	I	45°	VIDRO	511,3	1969,17	2341,92	18,93
37	I	45°	VIDRO	1031,80	5025,78	4867,06	-3,16
38	I	60°	VIDRO	280,20	1302,98	1947,31	49,45
39	I	60°	VIDRO	313,10	1440,14	2122,53	47,38
40	I	60°	VIDRO	728,90	3438,69	3524,65	2,50
41	I	45°	VIDRO	189,50	1097,25	1284,81	17,09
42	I	45°	VIDRO	511,30	2027,95	2341,92	15,48
43	I	45°	VIDRO	1031,80	4869,03	4867,06	-0,04
44	I	60°	VIDRO	280,20	1283,39	1947,31	51,73
45	I	60°	VIDRO	313,10	1508,71	2122,53	40,69
46	I	60°	VIDRO	728,90	3634,63	3524,65	-3,03
47	II	45°	VIDRO	1307,30	2204,29	2283,08	3,57
48	II	45°	VIDRO	1833,50	2439,42	2991,39	22,63
49	II	45°	VIDRO	4281,50	4712,29	5068,47	7,56
50	II	60°	VIDRO	2048,40	3203,57	3656,79	14,15
51	II	60°	VIDRO	2264,40	3262,35	3949,1	21,05
52	II	60°	VIDRO	5165,30	6632,47	6459,97	-2,60
53	II	60°	VIDRO	5395,60	6671,66	6640,29	-0,47
54	II	45°	VIDRO	1307,30	2204,29	2283,08	3,57
55	II	45°	VIDRO	1833,50	2204,29	2991,39	35,71
56	II	45°	VIDRO	4281,50	4624,11	5068,47	9,61
57	II	60°	VIDRO	2048,40	3340,73	3656,79	9,46
58	II	60°	VIDRO	2264,40	3321,13	3949,1	18,91
59	II	60°	VIDRO	5165,30	6789,22	6459,97	-4,85
60	II	60°	VIDRO	5395,60	6691,25	6640,29	-0,76
61	III	45°	VIDRO	5735,00	5701,77	5508,15	-3,40
62	III	45°	VIDRO	8990,07	7768,9	7594,58	-2,24

Corrida	Leito	Ângulo	Partíc.	Carga (g)	$\Delta P_{\max}$ (Exp.) (Pa)	$\Delta P_{\max}$ (Calc.) (Pa)	Desvio (%)
63	III	45°	VIDRO	15191,60	11119,42	10808,99	-2,79
64	III	60°	VIDRO	4797,97	5701,77	5690,02	-0,21
65	III	60°	VIDRO	12119,10	11677,85	10704,97	-8,33
66	III	45°	VIDRO	5735,00	5584,2	5508,15	-1,36
67	III	45°	VIDRO	8990,07	7288,86	7594,58	4,19
68	III	45°	VIDRO	15191,60	10316,08	10808,99	4,78
69	III	60°	VIDRO	4797,97	5594	5690,02	1,72
70	III	60°	VIDRO	12119,10	11628,86	10704,97	-7,94
Desvio Médio Absoluto (%)							15,37
Desvio Padrão (%)							16,13
Coeficiente de Correlação							0,986

Os dados experimentais de Taranto (1992) também foram testados pela Equação 4.2. A Figura 4.36 apresenta os valores preditos versus valores observados. O desvio médio foi de 27,123 % e o desvio padrão 23,679%, indicando resultados satisfatórios, considerando a complexidade do fenômeno de jorro.

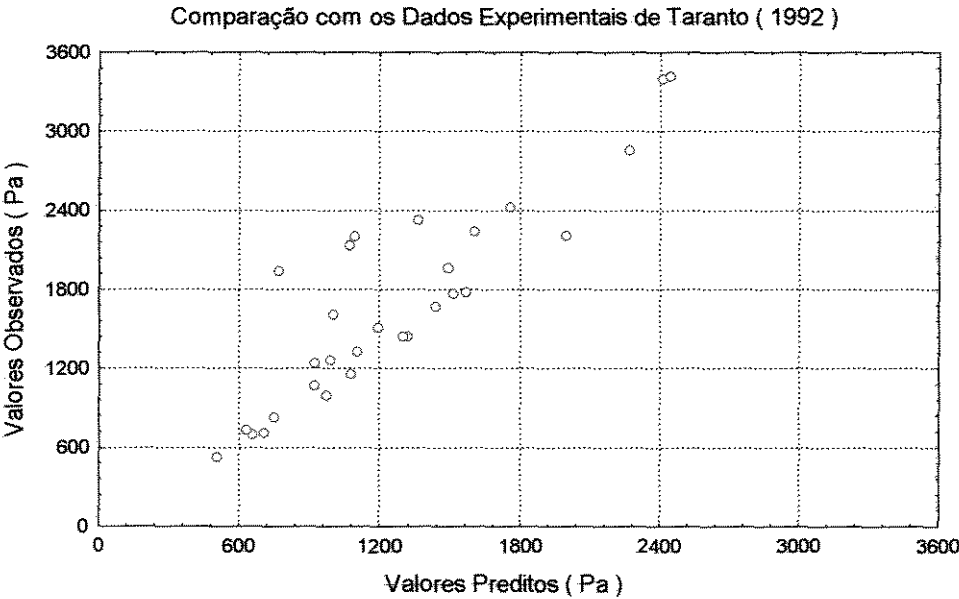


Figura 4.36 - Comparação entre Valores Experimentais de Taranto (1992) e os Valores Preditos pela Equação 4.6.

4.7 CORRELAÇÃO PARA ALTURA MÁXIMA DE JORRO ESTÁVEL.

Uma simples análise da Tabela 4.1 indica que o aumento da largura do leito causa grandes aumentos na altura máxima de jorro estável. O mesmo não se pode dizer pela troca das partículas de ABS por partículas de vidro, pois nos leitos grandes $H_{\max}$ diminuiu consideravelmente. Esse efeito antagônico ocorreu também com a troca do ângulo de base de 45° para 60° quando o leito pequeno foi utilizado, mas pouco significativo. Na realidade, o aumento do ângulo tende a aumentar a altura máxima de jorro estável e isto pode ser constatado quando trocamos o ângulo nos leitos médio e grande.

Tendo como base estas observações, concluímos que a altura máxima de jorro estável, assim como a queda de pressão máxima e a vazão de jorro mínimo, também está associada às variáveis primitivas do sistema pela forte influência da largura do leito, do ângulo de base e das propriedades fluido-partícula. A natureza desses efeitos pode estar mal definida em nossas observações por causa do surgimento de zonas estagnadas nas regiões anulares. A correlação que propusemos envolve todos os parâmetros geométricos do leito e as propriedades do gás e das partículas, mas não inclui nenhum fator que amenize tal problema. Assim mesmo a correlação prediz bem os resultados de $H_{\max}$ e pode ser utilizada para a grande faixa de tamanho de leitos de jorro bidimensionais utilizada neste trabalho. A correlação é a seguinte:

$$\frac{H_{\max}}{L_1} = 39,47 \left(\frac{L_1}{L_j} \right)^{0,075} \left(\frac{L_1}{\phi d_p} \right)^{-0,317} [Ar(\phi)]^{-0,145} \left(\tan \frac{\theta}{2} \right)^{0,69} \quad (4.7)$$

Mais uma vez o ajuste dos dados foi feito pelo método de Quasi-Newton. A equação foi desenvolvida utilizando-se a seguinte faixa de variáveis: d_p (2,88 a 3 cm); ρ_s (1040 a 2600 Kg/m³); ϕ (0,79 a 1); L_1 (15 a 80 cm); L_j (2,5 a 5 cm); e θ (45° a 60°).

A comparação entre os valores preditos e os valores observados encontra-se na Figura 4.37. A boa concordância entre os valores observados e os preditos indica que os dados foram bem ajustados. A Tabela 4.27 apresenta os valores calculados pela Equação 4.7 com um desvio médio de 12,74% e um desvio padrão de 7,99% em relação aos valores experimentais.

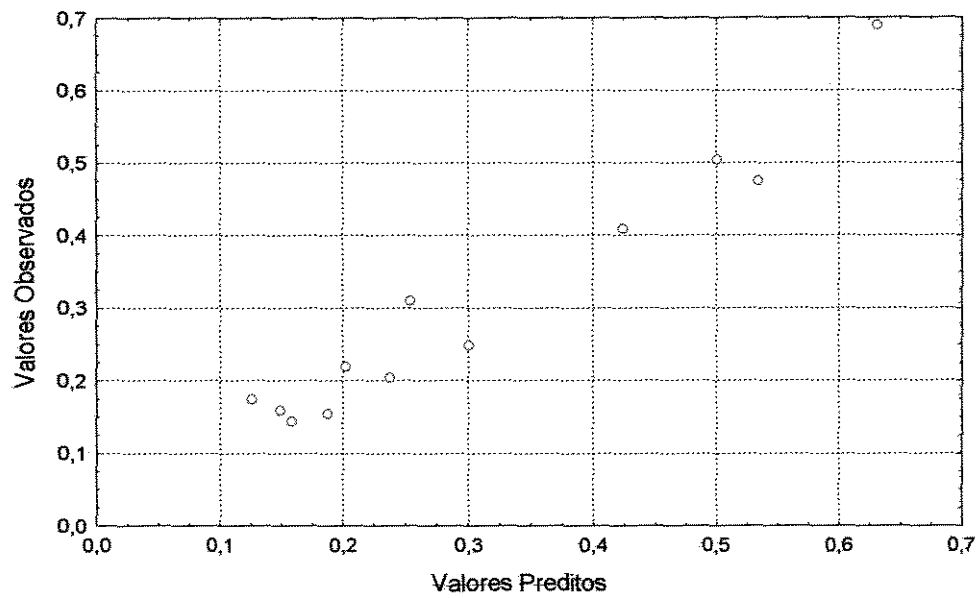


Figura 4.37 - Comparação entre Valores Experimentais e os Valores Preditos de H_{max} .

Tabela 4.31 - Comparação dos Dados Experimentais com os Calculados na Equação 4.7.

Leito	Ângulo	Partícula	Carga (g)	H_{max} (Exp.) (cm)	H_{max} (Calc.) (cm)	Desvio (%)
I	45°	ABS	403,80	16,0	14,8	-7,37
I	60°	ABS	336,60	15,5	18,7	20,43
II	45°	ABS	1637,40	20,5	23,8	16,09
II	60°	ABS	1664,80	25,0	29,9	19,91
III	45°	ABS	9728,52	50,5	50,1	-0,82
III	60°	ABS	11227,90	69,0	63,1	-8,57
I	45°	VIDRO	1105,80	17,5	12,5	-28,32
I	60°	VIDRO	793,90	14,5	15,8	8,97
II	45°	VIDRO	4394,70	22,0	20,1	-8,43
II	60°	VIDRO	5585,40	31,0	25,4	-18,15
III	45°	VIDRO	16287,70	41,0	42,4	3,41
III	60°	VIDRO	13555,40	47,5	53,4	12,43

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÕES

O metodologia do planejamento experimental apresentou-se como uma ferramenta muito útil para determinar o comportamento das variáveis independentes sobre a queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo, evitando análises excessivas, complicadas, e apresentando informações generalizadas sobre a influência dos parâmetros independentes no processo, dentre as quais podemos citar:

1. Indiscutivelmente a variável de maior importância sobre o fenômeno de jorro é a largura do leito. Isto significa dizer que o aumento de L_1 foi a causa dos maiores aumentos sobre $\Delta P_{\max}$ e Q_{jm} .

2. A altura do leito de partículas exerce grande influência sobre a queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo, apresentando-se como a segunda variável de maior importância. Quanto mais próxima da altura máxima de jorro estável, maior será o valor de $\Delta P_{\max}$ e Q_{jm} , utilizando-se o mesmo tipo de partícula e leitos de mesmo tamanho e com mesmo ângulo de base.

3. O terceiro parâmetro de maior importância foi a densidade das partículas. Quanto maior o valor de ρ_s , maior será o valor da queda de pressão máxima e da vazão de jorro mínimo.

4. O ângulo de base torna-se a terceira variável de maior importância à medida em que o tamanho do leito é aumentado. Da mesma forma, o efeito do ângulo passa a ser sinérgico com o aumento do tamanho do leito. Genericamente, quanto mais inclinado for o ângulo de base do leito maior será o valor da queda de pressão máxima e da vazão de jorro mínimo.

5. A influência das interações entre as variáveis independentes do jorro foi bastante expressiva, sendo, em alguns casos, maior que a influência direta de algumas variáveis principais. Dentre as que mais se destacaram podemos citar a interação entre a largura do leito e altura do leito de partículas, e também as interações entre o ângulo de base e

as demais variáveis por apresentarem maiores influências do que a influência individual das partículas e do ângulo de base.

6. A análise de superfície de resposta fortaleceu o estudo, chegando-se a faixas ótimas de operação e contribuindo para futuros projetos e controle do processo de leitos de jorro bidimensionais. Pôde-se verificar que os maiores valores das variáveis dependentes do processo são obtidos em leitos com maiores larguras da coluna, com ângulos de base mais inclinados, com alturas de partículas o mais próximo possível da altura máxima, e para partículas mais densas.

Corroborando com Lim e Grace (1996), o grupo de parâmetros adimensionais, desenvolvido por Glicksman (1984) para leitos fluidizados, adaptados para leitos de jorro convencionais e, neste trabalho, readaptados para leitos de jorro bidimensionais são válidos para a ampliação de escala através da análise de similaridade fluidodinâmica.

As equivalências resultantes das combinações dos parâmetros adimensionais poderão ser úteis para predizer o comportamento de protótipos de leitos de jorro bidimensionais com grandes colunas, apresentando valores iguais ou proporcionais entre os parâmetros de escala adimensionais.

As correlações propostas neste trabalho para a queda de pressão máxima, vazão de jorro mínimo e altura máxima de jorro estável foram totalmente embasadas no comportamento experimental das variáveis independentes e nas análises dos parâmetros de escala adimensionais. Estas correlações predizem bem os valores experimentais e são válidas para a seguinte faixa de variáveis: d_p (2,88 a 3 cm); ρ_s (1040 a 2600 Kg/m³); ϕ (0,79 a 1); L_1 (15 a 80 cm); L_j (2,5 a 5 cm); H_0 (5 a 66 cm) e θ (45° a 60°).

Finalizando, é necessário ressaltar que nem todos os parâmetros de escala adimensionais foram testados na ampliação de escala dos leitos e que a causa e a consequência do surgimento de zonas mortas nas regiões anulares dos leitos foram negligenciadas no desenvolvimento das correlações de queda de pressão máxima, vazão de jorro mínimo e altura máxima de jorro estável.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se:

1. Estender o estudo da fluidodinâmica dos leitos de jorro bidimensionais combinando as variáveis de escala adimensionais e variando-se outros parâmetros independentes, tais como o diâmetro e esfericidade das partículas.
2. Estudar a influência das variáveis independentes sobre a altura máxima de jorro estável identificando os problemas inerentes ao tipo de mecanismo de terminação do jorro.
3. Obter os parâmetros adimensionais independentes próprios para leitos de jorro bidimensionais através da análise de similaridade.
4. Aplicar a ampliação de escala em leitos bidimensionais utilizando-se a maior faixa de valores possíveis dos parâmetros adimensionais para diferentes temperaturas de ar ou de outros fluidos.
5. E por último, utilizar as novas correlações para verificar valores experimentais com as propriedades de leito, partículas e fluido diferentes das utilizadas no presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDELRAZEK, I. D. *An analysis of thermo-chemical deposition in spouted beds*. Ph. D. thesis, Univ. of Tennessee, Knoxville, 1969.
- ANDERSON, K., RAGHAVAN, G. S. V e MUNJUMDAR, A. S. *Characteristics of asymmetric two-dimensional slot spouted beds for grains*. *Drying '84*, A. S. Mujumdar, Ed., Hemisphere Publishing Corporation, New York. 205-209 (1984).
- BARROS NETO, B., SCARMÍNIO, I. S. e BRUNS, R. E. *Otimização e planejamento de experimentos - uma introdução à quimiometria*. Campinas, Ed. Unicamp, 1995. 299p.
- BECKER, H. A. *An investigation of laws governing the spouting of coarse particles*. *Chem. Eng. Sci.* **13**, 245 (1961).
- BENKRID, A. e CARAM, H. S. *Solid flow in the annular region of a spouted bed*. *A.I.Ch. J.* **35**, 1328-1336 (1989).
- BISIO, A. e KABEL, R. *Scaleup of chemical processes*. McGraw-Hill, New York, (1985)
- BOX, G. E P. *The exploration and exploitation of response surfaces: some considerations and examples*. *Biometrics* **10**, 16-60 (1954).
- BOX, G. E. P., HUNTER, W. G. e HUNTER, J. S. *Statistics for experimenters*. New York, John Wiley, 1978. 653 p.
- BRUNELLO, G., NINA, G. D., NUNES, F. C. S. e NASCIMENTO., C. A. O. *Minimum air requirement for spouting mixed particles*. *Can. J. Chem. Eng.* **52**, 170-173 (1974).
- CHATTERJEE, A. *Effect of particle diameter and apparent particle density on internal solid circulation rate in air-spouted beds*. *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Develop* **9**, 531 (1970).
- CHATTERJEE, A., ADUSUMILLI, R. S. S. e DESHMUKH., A. V. *Wall to bed heat transfer characteristics of spout-fluid beds*. *Can. J. Chem. Eng.* **61**, 390-397 (1983).
- CHOI, M. e MEISEN, A. *Hydrodynamics of shallow, conical spouted beds*. *Can. J. Chem. Eng.* **70**, n.5, 916-924 (1992).
- CLAFLIN, J. K. e FANE, A. G. *Gas distribution and heat transfer in a draft-tube spouted bed*. *AIChE, Symposium Series*, 241, **80**, 17-23 (1984).
- EPSTEIN, N. e CHANDNANI, P. P. *Gas spouting characteristics of fine particles*. *Chem. Eng. Science* **42**, 2977-2981 (1987).
- EPSTEIN, N. e GRACE, J. R. *Spouting of particulate solids*. *Handbook of Powder Science and Technology*, M. E. Fayed e L. Otten, Eds., Van Nostrand Reinhold Co., New York, Ny. 507-536 (1984).

- EPSTEIN, N. e LEVINE, S. *Non-Darcy flow and pressure distribution in a spouted bed*. Fluidization, eds J. F. Davidson and D. L. Keairns, p. 98-103. Cambridge University Press, U.K. (1978).
- ERGUN, S. *Fluid flow through packed columns*. Chem. Eng. Prog. 48-49 (1952).
- FANE, A. G. e MITCHELL, R. A. *Minimum spouting velocity of scaled-up beds*. Can. J. Chem. Eng. **62**, 437-439 (1984).
- FLEMING, R. J. *The spoutability of particulate solids in air*. M.A.Sc. thesis, Univ. of Toronto, Canada, 1966.
- GELPERIN, N. I., AINSHTEIN, V. G., GELPERIN, E. N., e L'VOVA, S. D. *Hydrodynamics properties of fluidized granular materials in conical and conical-cilindrical sets*. Khim. Tekhnol. Top. Masel 5, **8**, 51(1960).
- GLICKSMAN, L. R. *Scaling relationships for fluidized beds*. Chem. Eng. Sci. **39**, 1363-1369 (1984).
- GLICKSMAN, L. R. *Scaling relationship for fluidized beds*. Chem. Eng. Sci. **43**, 1419-1421 (1988).
- GLICKSMAN, L. R., Westphalen, D., Brereton, C. e Grace, J. R. *Verification of the scaling laws for circulating fluidized beds*. Proceedings of the 11th International Conference on Fluidized Bed Combustion, ed. E. J. Anthony, 4-26-1 a 4-26-11. Montreal (1991).
- GRBAVCIC, Z. B., VUKOVIC, D. V., ZDANSKI, F. K. e LITTMAN, H. *Fluid flow pattern, minimum spouting velocity and pressure drop in spouted beds*. Can. J. Chem. Eng. **54**, 33-42 (1976).
- GRBAVCIC et al. *Fluid flow pattern an solids circulation rate in a liquid phase spout-fluid bed with draft tube*. Can. J. Chem. Eng. **70**, 895-904 (1992).
- GREEN, M. C. e BRIDGWATER, J. *An experimental study of spouting in large sector beds*. Can. J. Chem. Eng. **61**, 281-288 (1983).
- HE, Y.-L., LIM, C. J. e GRACE, J. R. *Spouted bed and spout fluid bed behaviour in a column of diameter 0.91 m*. Can. J. Chem. Eng. **70**, 848-857 (1992).
- HORIO, M., LIU, J. e MUCHI, I. *Direct simulation for predicting bubble distribution and particle circulation pattern in large-scale beds*. Kagaku Kogaku Ronbunshu **9**, 176-185 (1983).
- HORIO, M., NONAKA, A., SAWA, Y e MUCHI, I. *A new similarity rule for fluidized bed scale-up*. A.I.Ch.E. J. **32**, 1466-1482 (1986a).

- HORIO, M., TAKADA, M., ISHIDA, M. e TANAKA, N. *The similarity rule of fluidization and its application to solid mixing and circulation control*. Fluidization V, eds L. Ostergaard e A. Sorensen, 151-158. Engineering Foundation, New York (1986b).
- HORIO, M., ISHII, H., KOBUKAI, Y. e YAMANISHI, N. *A scaling law for circulating fluidized beds*. J. Chem. Eng. Japan **22**, 587-592 (1989).
- JACKSON, R. *Fluid mechanical theory*. Fluidization, eds J. F. Davidson e D. Harrison, Chap. 3. Academic Press, London (1971).
- KALWAR, M. I., RAGHAVAN, G. S. V., MUJUMDAR, A. S. e FANOUS, M. A. *Aerodynamics of grains in a large scale two-dimensional spouted bed with draft plates*. Drying '89", Hemisphere Publishing Corporation, New York, 433-439 (1989).
- KRZYWANSKI, R. S., EPSTEIN, N. e BOWEN, B. D. *Spout diameter variation in two-dimensional and cylindrical spouted beds: a theoretical model and its verification*. Chem. Eng. Sci. **44**, 1617-1626 (1989).
- LEFROY, G.A. e DAVIDSON, J.F. *The mechanics of spouted beds*, Trans. Instn. Chem. Eng. **47**, T120-T128 (1969).
- LIM, C. J. e GRACE, J. R. *Spouted bed hydrodynamics in a 0.91 m diameter vessel*. Can. J. Chem. Eng. **65**, 366-372 (1987).
- LIM, C. J. e GRACE, J. R. *Scale-up studies of spouted beds*. Chem. Eng. Sci. **52**, n.2, 329-339 (1997).
- LITTMAN, H., MORGAN, M. H., VUKOVIC, D. V., ZDANSCI, F. K. e GRBAVCIC, Z. B. *Prediction of the maximum spoutable height and the average spout to inlet tube diameter ratio in spouted beds of spherical particles*. Can. J. Chem. Eng., Ottawa, **57**, 684-687 (1979).
- LITTMAN, H. e MORGAN, M. H. *A general correlation for the minimum spouting velocity*. Can. J. Chem. Eng., Ottawa, **61**, 269-273 (1983).
- LITTMAN, H. e MORGAN, M. H. *The measurement, prediction and correlation of the minimum spouting velocity, pressure drop, maximum spoutable bed height and spout diameter in spouted beds of coarse particles*. Doraiswamy, L. K. e Mujumdar, A. S., Amsterdam: Elsevier, 287-315 s.n.t. (1988).
- MALEK, M. A., e LU, B. C, Y. *Pressure drop and spoutable bed height in spouted beds*. Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop. **4**, 123 (1965).
- MAMURO, T. e HATTORI, H. *Flow pattern of fluid in spouted beds*. J. Chem. Eng. Japan **1**, 1-5 (1968).

- MATHUR, K. B. e EPSTEIN, N. *Spouted Beds*. Academic press, New York, (1974).
- MATHUR, K. B. e GISHLER, P. E. *A study of the application of the spouted bed technique to wheat drying*. J. Appl. Chem. **5**, 624 (1955).
- MCNAB, G. S. e BRIDGWATER. J. *The application of soil mechanics to spouted bed design*. Can. J. Chem. Eng. **52**, 161-169 (1974).
- MCNAB, G. S. e BRIDGWATER. J. In: Particle Technology Nuremberg Conference. Nuremberg: 1977. Preprints II, p. 62.
- MCNAB, G. S. e BRIDGWATER. *A theory for effective solid stresses in the annulus of a spouted bed*. Can. J. Chem. Eng. **57**, 271-279 (1979)
- MORGAN, M. H e LITTMAN, H. *Predicting the maximum spoutable height in spouted beds of irregularly shaped particles*. Ind. Eng. Chem. Fund., **21**, 23-26 (1982).
- MUJUMDAR, A. S. *Spouted bed technology - A brief review*. Anais do X Encontro sobre Escoamento de Meios Porosos, São Carlos: 1982, v.2.
- MUJUMDAR, A. S. *Advances in drying*. Drying '84", 1984, New York: Hemisphere, McGraw Hill v. 4. p. 151.
- MUJUMDAR, A. S. e RAGHAVAN, G. S. V. Drying '84", Hemisphere, New York, 1984, p. 1-10.
- MUKHLENOV, I. P. e GORSHTAIN, A. E. *Investigation of a spouting bed*. Khim. Prom. (Moscow) **41**, 443 (1965).
- NAGARKATTI, A. e CHATTERJEE, A. *Pressure and flow characteristics of a gas phase spout-fluid bed and the minimum spout-fluid condition*. Can. J. Chem. Eng., Ottawa, **52**, 185-195 (1974).
- NASCIMENTO et al., 1976, citado em "Secagem de Produtos Agrícolas" de Giulio Massarani, **2**, p. 56 (1987).
- NÉMETH, J., PALLAI, E. e ARADI, E. Can. J. Chem. Eng. **61**, 419 (1983).
- NEWBY, R. A. e KEAIRNS, D. L. *Testing of the scaling relationship for fluid-bed dynamics*. In Fluidization V, eds L. Ostergaard e A. Sorensen, p.31-38. Engineering Foundation, New York (1986).
- NICOLAEV, A. M. e GOLUBEV, L. G. *Basic hydrodynamic characteristics of the spouting bed*. Izv. Vysh. Ucheb. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. **7**, 855 (1964).
- OGINO F., ZHANG, L. e MAHASHI, Y., *Minimum rate of spouting and peak pressure-drop in a spouted bed*. Inter. Chem. Eng. Of Japan, **33** (2), 265-272 (1993).
- OJALVO, J. R. O. Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, Tese de Mestrado, 1989.

- OWER, E. e PANKHURST, R. C. *The Measurement of air flow*. 5th Edition, Pergamon Press, 1977 p. 148-183.
- PALLAI, I., AND NÉMETH, J. *Analysis of flow forms in a spouted bed apparatus by the so-called phase diagram*. Int. Congr. Chem. Eng. (CHISA), 3rd, Prague, September 1969, Paper No. C2.4. Czechoslovak Society for Industrial Chemistry.
- PASSOS, M. L. *Flow characteristics of two-dimensional spouted and spout-fluidized beds of particles*. Ph. D. Thesis, McGill University, Montreal, PQ (1991).
- PASSOS, M. L., MUJUMDAR, A. S., MASSARANI, G. *Scale-up of spouted beds dryers: criteria and aplicaitons*. Drying '94" 12, n. 1-2, p.351-391. (1994).
- PASSOS, M. L., MUJUMDAR, A. S e RAGHAVAN, V. S. G. *Prediction of the maximum spoutable bed height in two dimensional spouted bed*. Powder Technology, 74, 97-105 (1993).
- PASSOS, M. L., MUJUMDAR, A. S e RAGHAVAN, V. S. G. *Desingn parameters for a two-dimensional spouted bed*. Paper presented in Third International Symposium on Spouted Beds, Vancouver, BC, (1991).
- PASSOS, M. L., MUJUMDAR, A. S e RAGHAVAN, V. S. G. *Aerodynamics in a two-dimensional spout-fluidized bed*. Proceedings of XVII Meeting of Fluid Flow through Porous Media, São Carlos, SP, 1, 295-306 (1989).
- PASSOS, M. L., MUJUMDAR, A. S e RAGHAVAN, V. S. G. *Spouted beds for drying: Principles and design considerations*. In " Advances in Drying", A. S. Mujumdar, Ed., Hemisphere Publishing Corp., New York, NY, 4, 359-398 (1987).
- PEÇANHA, P., R. e MASSARANI, G. *Dimensão característica e forma de parículas*. Anais do XIV Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, p. 302-312 (1986).
- PLACKETT, R. L. e BURMAN, J. P. *The desigh of optimum multifactorial experiments*. Biometrika 33, 305-325, 328-332 (1946).
- POVRENOVIC, D. S., HADZISMAJLOVIC, Z. B., GRBAVCIC, V., VUKOVIC e LITTMAN, H. *Minimum fluid flowrate, pressure drop and stability of a conicla spouted bed*. Proceeding of 9th Int. Cong. Of Chem. Eng. (CHISA'87), E9.27 (1987).
- ROMERO, J. B. e JOHANSON, L. N. *Factors affecting fluidized bed quality*. Chem. Eng. Prog. Symp. Ser. 58, (38), 28-37 (1962).
- ROY, R. e DAVIDSON, J. F. *Similarity between gas-fluidized beds at elevated temperature and pressure*. In Fluidization VI, eds J. R. Grace, L. W., Shemilt e Bergougnou, M. A. Engineering Foundation, New York, 293-300 (1988).

- SAN JOSE, M. J., OLAZAR, M., AGUADO, R. e BILBAO, J. *Influence of the conical section geometry on the hydrodynamics of shallow spouted beds*. Chem. Eng. J., **62**, (2), 113-120 (1995).
- SOKOLOVSKII, V. V. *Statics of granular media*. Pergamon Press, Oxford (1965).
- SOUZA, C. C., *Computer program for optimization of spouted bed grain dryers*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (1993).
- STUDENT. *The probable error of a mean*. Biometrika, **6**, 1-25 (1908).
- TARANTO, O. P. *Estudo experimental da dinâmica em um leito de jorro bidimensional: aplicação em recobrimento de comprimidos*. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas (1992).
- THORLEY, B., SAUNBY, J. B., MATHUR, K. B., e OSBERG, G. L. *An analysis of air and solid flow in a spouted wheat bed*, Can. J. Chem. Eng. 37-184 (1959).
- UEMAKI O., YAMADA R. e KUGO, M. *Particle segregation in a spouted bed of binary mixtures*. Can. J. Chem. Eng. **61**, 303-307 (1983).
- VOLPICELLI, G., RASO, G., e MASSIMILIA, L. *Gas and solid flow in bidimensional spouted beds*. Proc. Eindhoven Fluidizn. Symp., Netherlands Univ. Press, Amsterdam, p.123 (1967).
- VUKOVIC, D. V., HADZISMAJLOVIC, D. E., GARIC, Z. B. e LITTMAN. *Flow regimes for spout-fluid beds*. Can. J. Chem. Eng. **62**, 825-829 (1984).
- ZHANG, M. C. e YANG, R. Y. K. *On the scaling laws for bubbling gas-fluidized bed dynamics*. Powder Technol. **51**, 159-165 (1987).
- WU, W. M., LIM, C. J. e EPSTEIN, N. *Hidrodinamics of spouted beds at elevated temperatures*. Chem. Eng. Commun. **62**, 251 (1987).
- YATES, F. *The Design and Analysis of Factorial Experiments*. Imperial Bureau of Soil Science, Technical Communication n.35, Harpenden. (1937).
- YOKOGAWA, A. e ISAKA, M., Hitachi Zosen Giho, **32**, (1), 47 (1971).

ANEXO A

CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS LEITOS DE JORRO BIDIMENSIONAIS

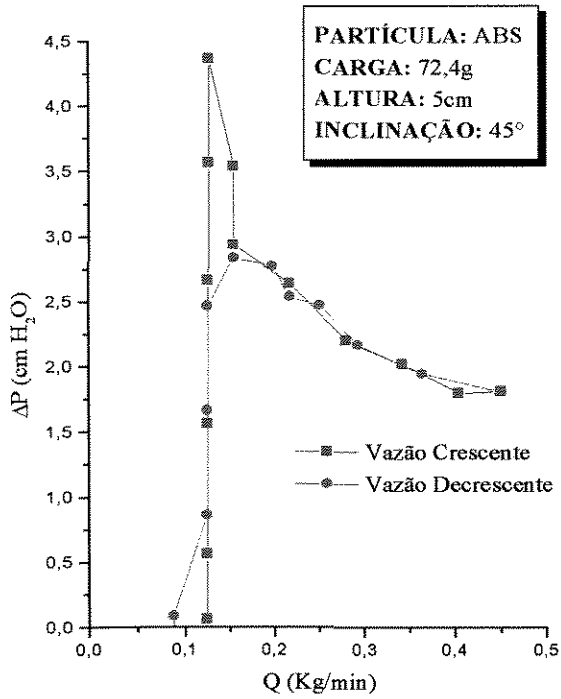


Fig. A.1a - Primeiro Grupo de Corridas

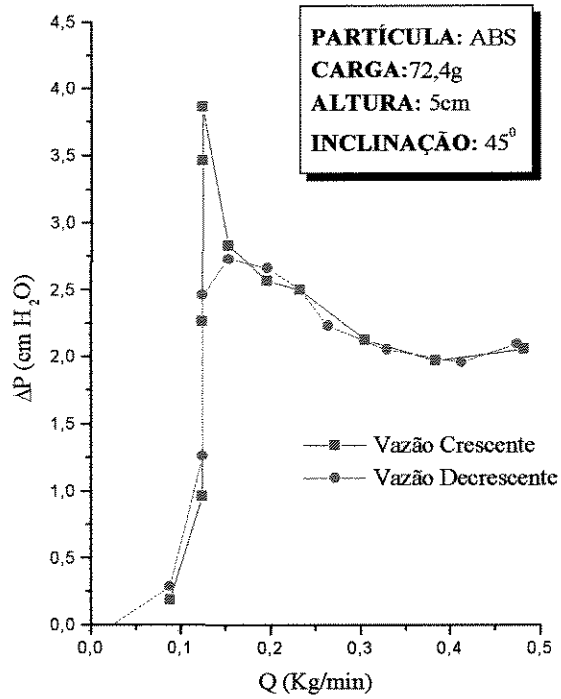


Fig. A.1b - Segundo Grupo de Corridas

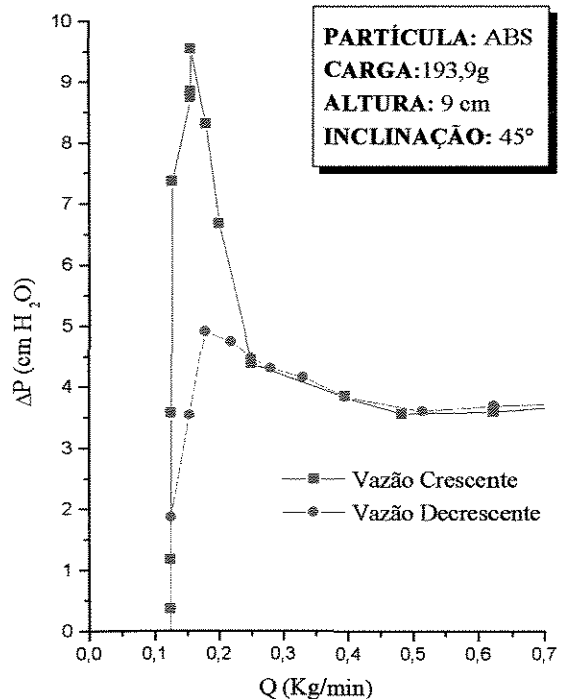


Fig. A.1c - Primeiro Grupo de Corridas

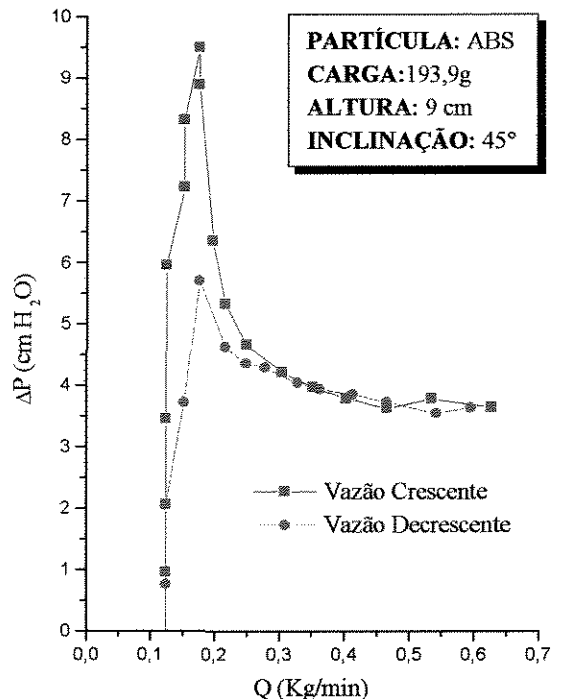


Fig. A.1d - Segundo Grupo de Corridas

Figura A.1 - Curvas Características dos Leitos Pequenos ($L_1 = 0,15$ m)

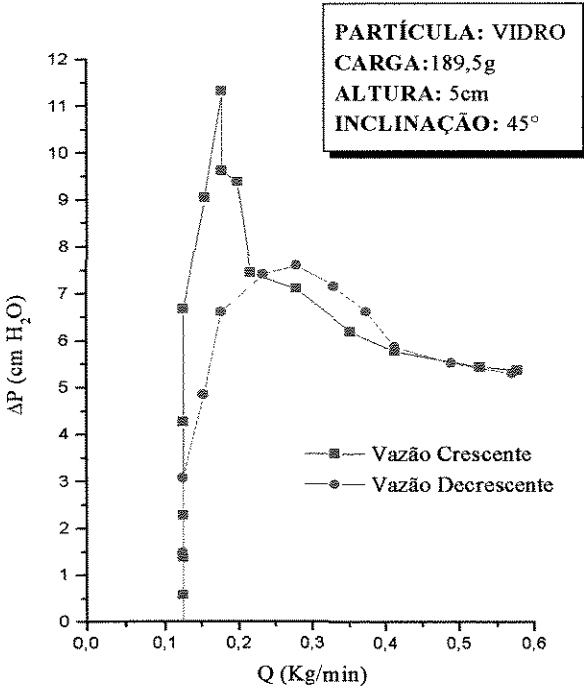


Fig. A.1e - Primeiro Grupo de Corridas

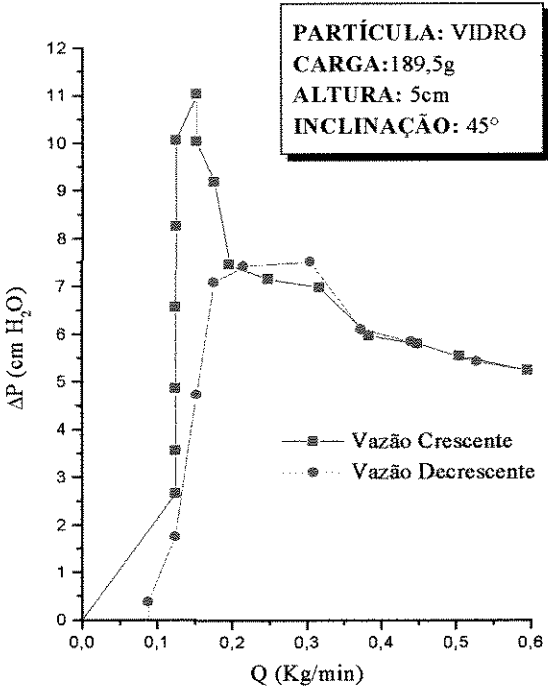


Fig. A.1f - Segundo Grupo de Corridas

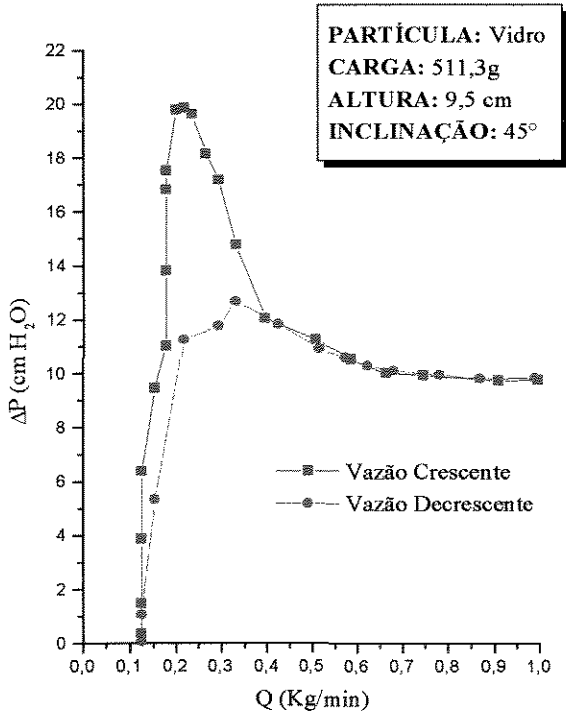


Fig. A.1g - Primeiro Grupo de Corridas

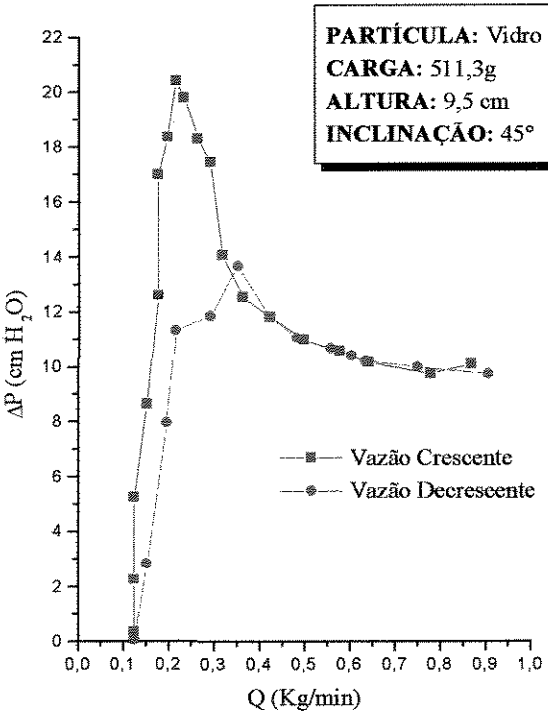


Fig. A.1h - Segundo Grupo de Corridas

Figura A.1 - Curvas Características dos Leitos Pequenos ($L_1 = 0,15$ m) (Continuação)

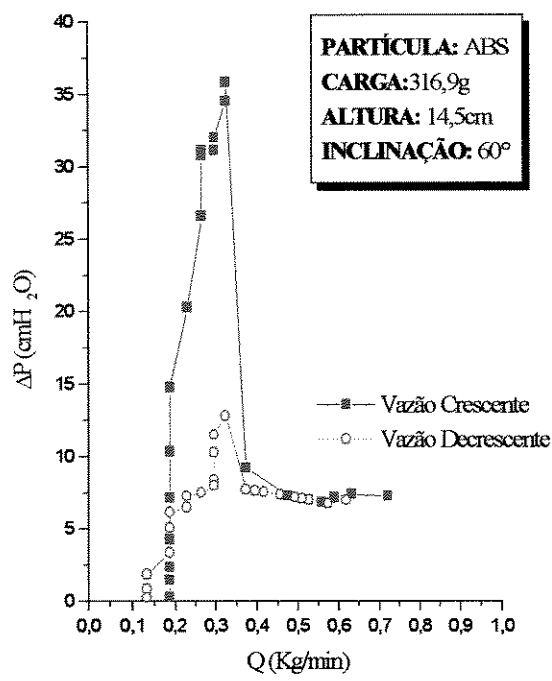


Fig. A.1i - Primeiro Grupo de Corridas

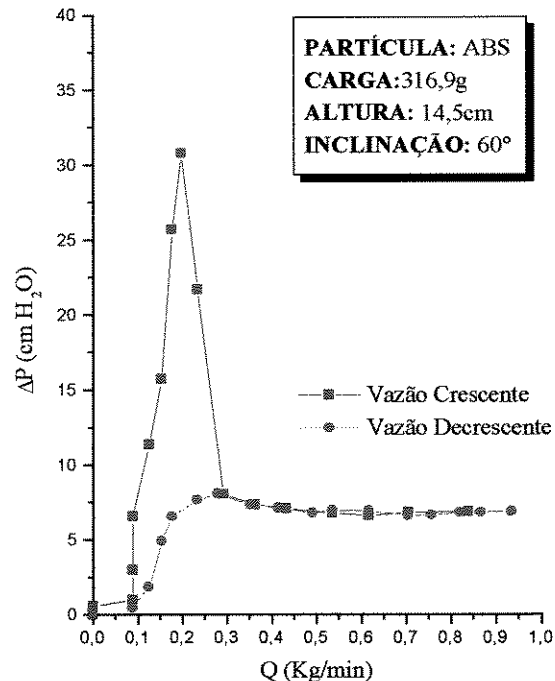


Fig. A.1j - Segundo Grupo de Corridas

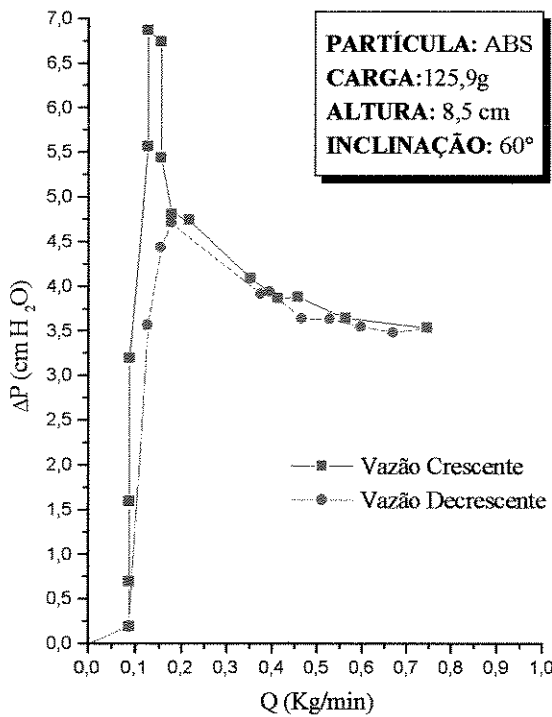


Fig. A.1k - Primeiro Grupo de Corridas

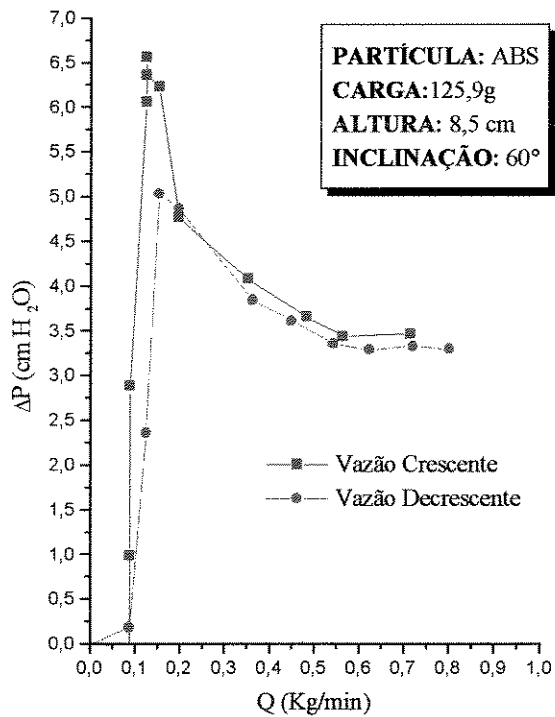


Fig. A.1l - Segundo Grupo de Corridas

Figura A.1 - Curvas Características dos Leitos Pequenos ($L_1 = 0,15$ m) (Continuação)

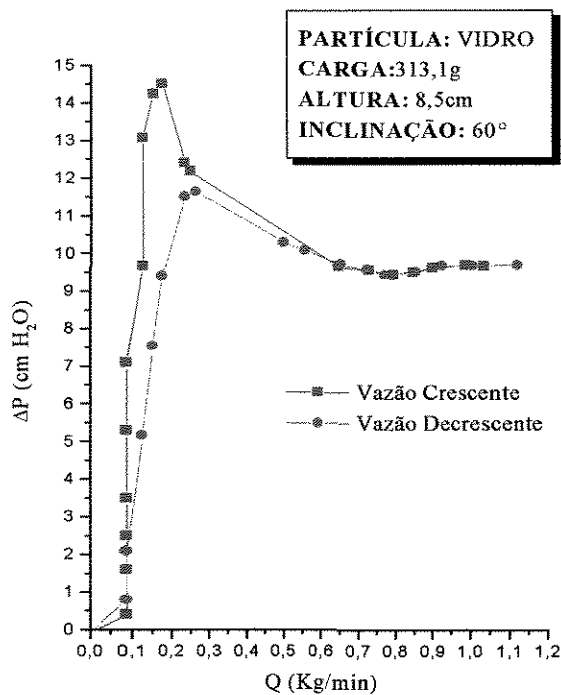


Fig. A.1m - Primeiro Grupo de Corridas

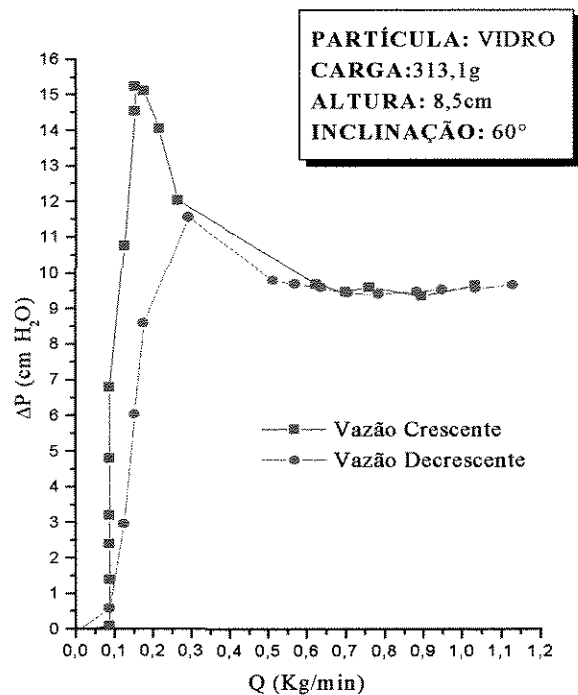


Fig. A.1n - Segundo Grupo de Corridas

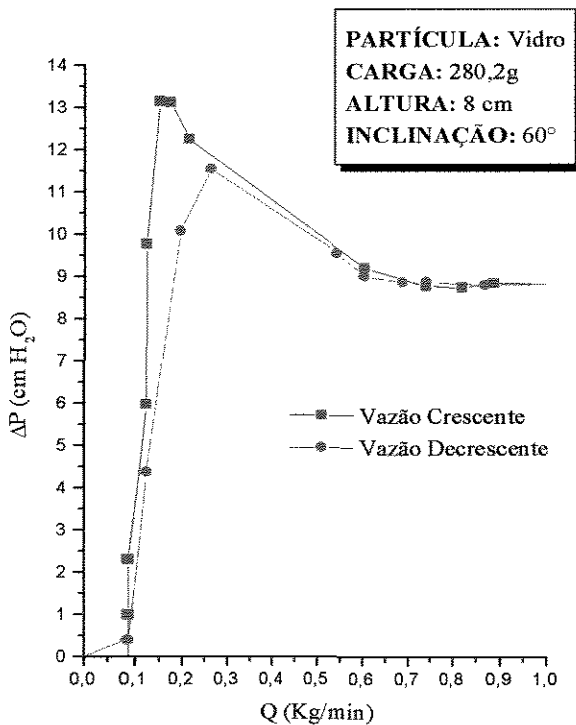


Fig. A.1o - Primeiro Grupo de Corridas

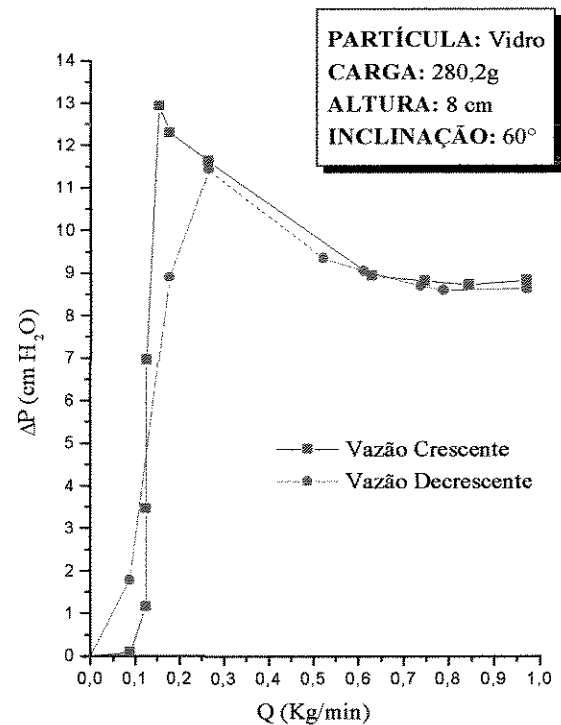


Fig. A.1p - Segundo Grupo de Corridas

Figura A.1 - Curvas Características dos Leitos Pequenos ($L_1 = 0,15$ m) (Continuação)

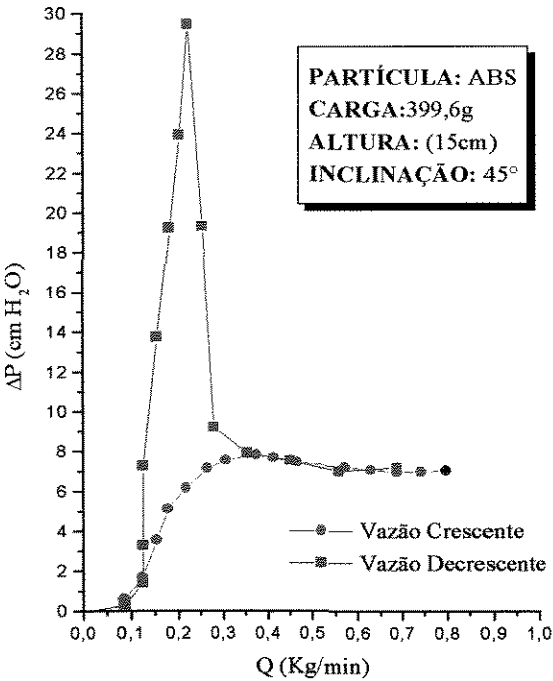


Fig. A.1q - Segundo Grupo de Corridas

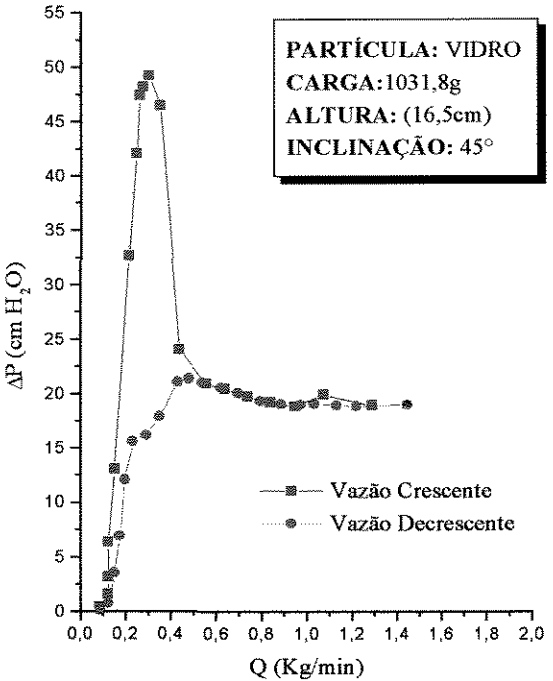


Fig. A.1r - Segundo Grupo de Corridas

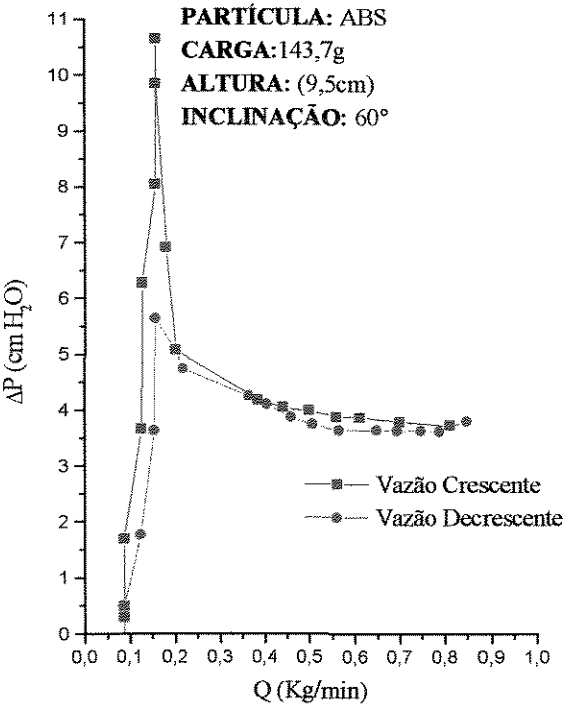


Fig. A.1s - Segundo Grupo de Corridas

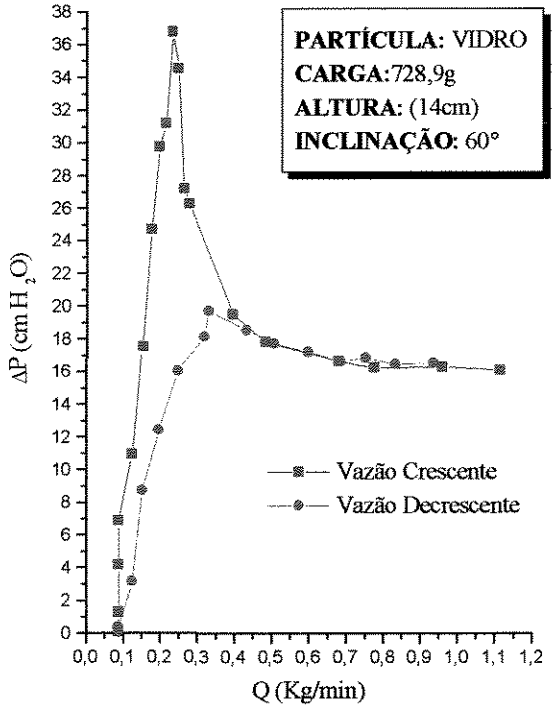


Fig. A.1t - Segundo Grupo de Corridas

Figura A.1 - Curvas Características dos Leitos Pequenos ($L_1 = 0,15 \text{ m}$) (Continuação)

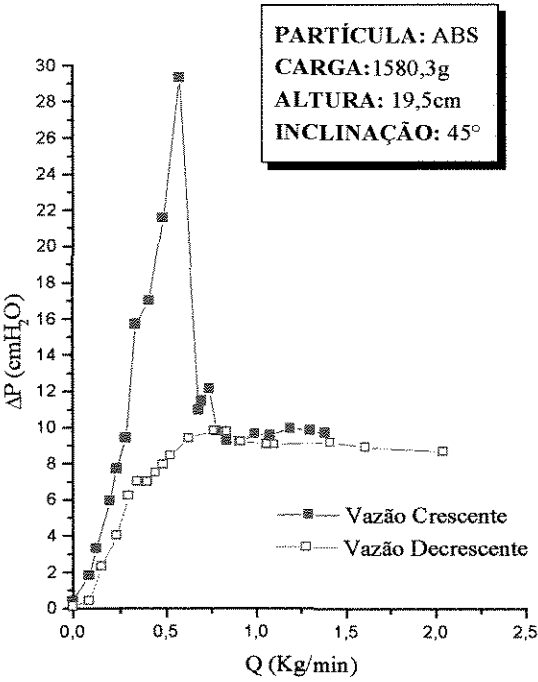


Fig. A.2a - Primeiro Grupo de Corridas

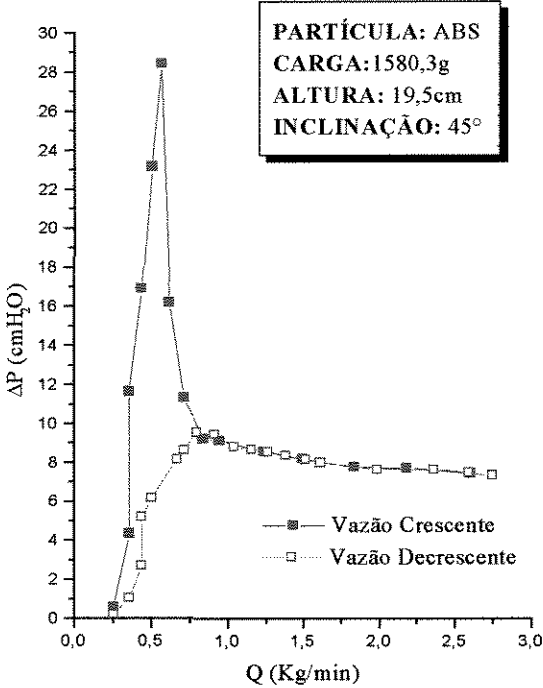


Fig. A.2b - Segundo Grupo de Corridas

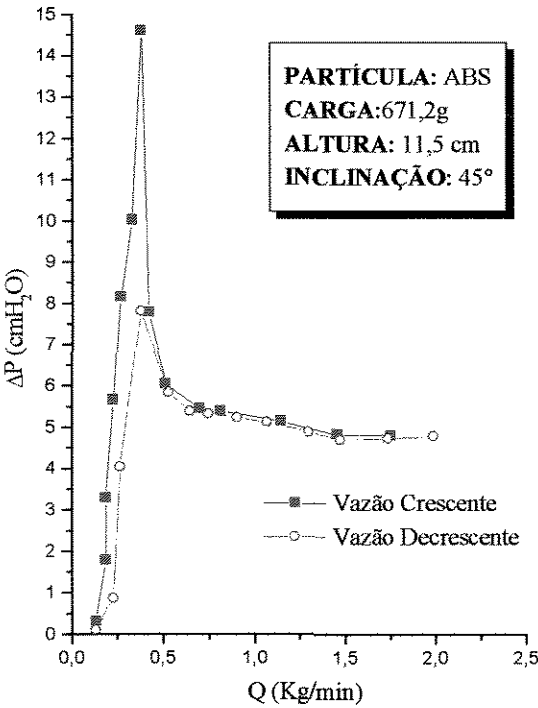


Fig. A.2c - Primeiro Grupo de Corridas

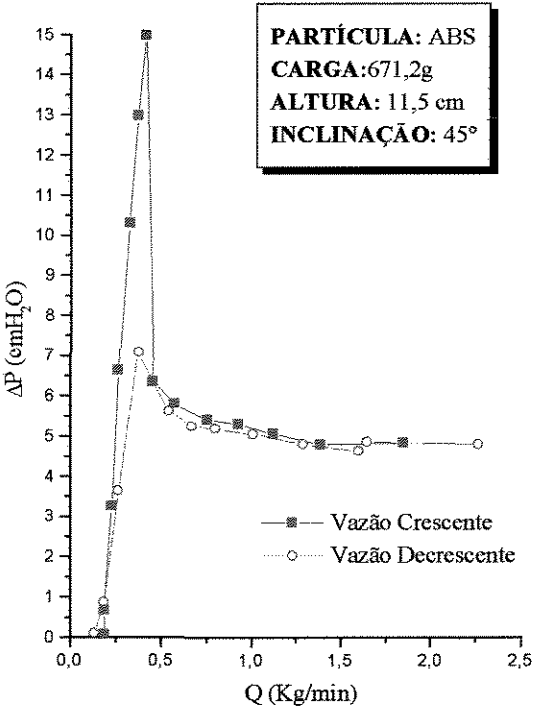


Fig. A.2d - Segundo Grupo de Corridas

Figura A.2 - Curvas Características dos Leitos Médios ($L_1 = 0,30$ m)

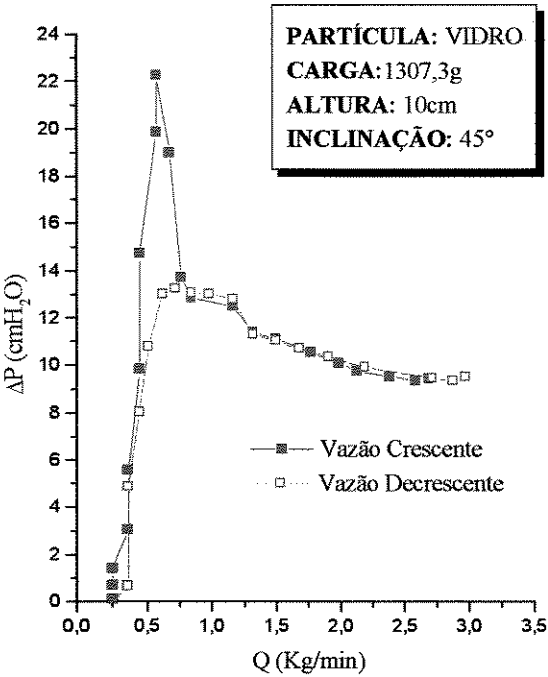


Fig. A.2e - Primeiro Grupo de Corridas

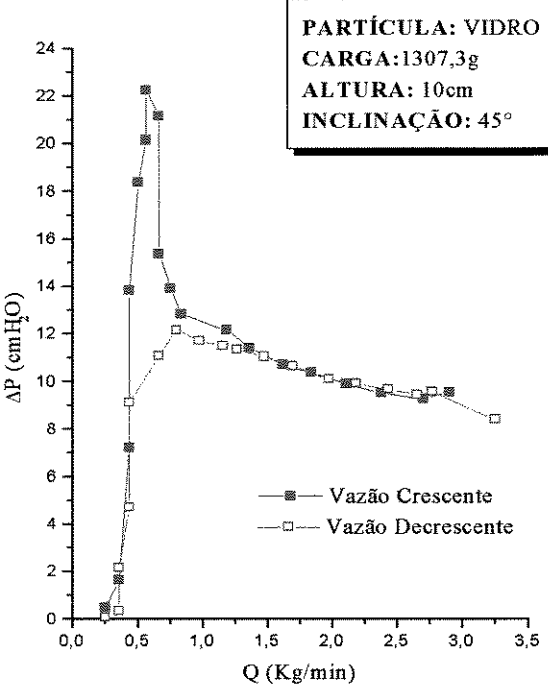


Fig. A.2f - Segundo Grupo de Corridas

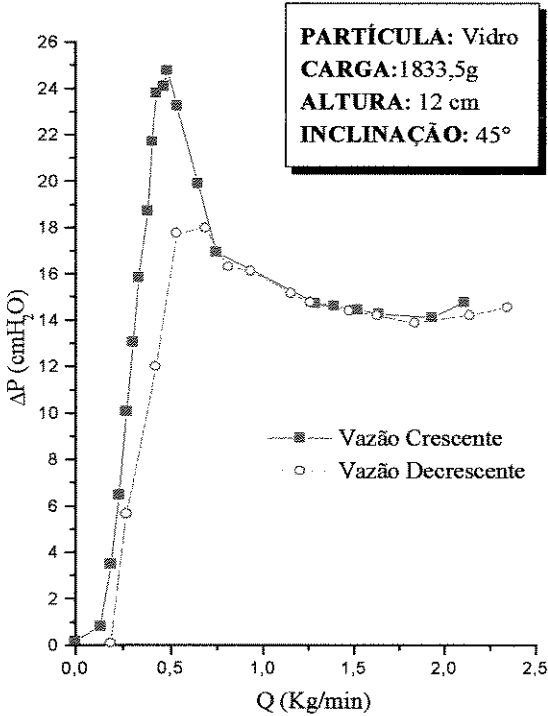


Fig. A.2g - Primeiro Grupo de Corridas

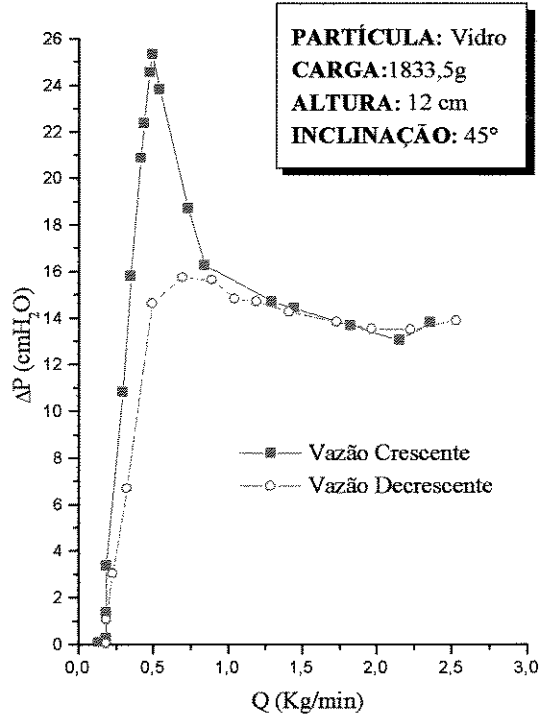


Fig. A.2h - Segundo Grupo de Corridas

Figura A.2 - Curvas Características dos Leitos Médios ($L_1 = 0,30$ m) (Continuação)

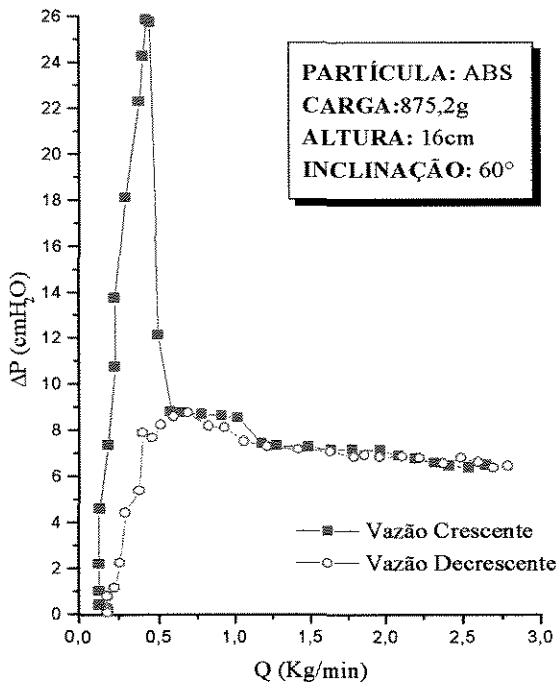


Fig. A.2i - Primeiro Grupo de Corridas

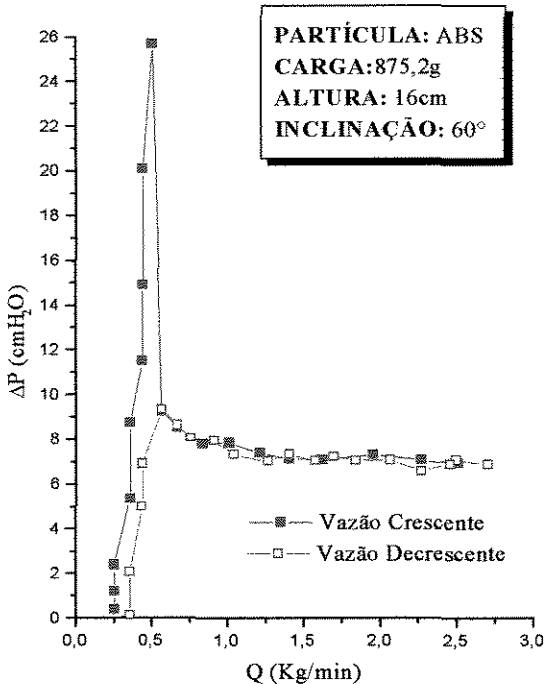


Fig. A.2j - Segundo Grupo de Corridas

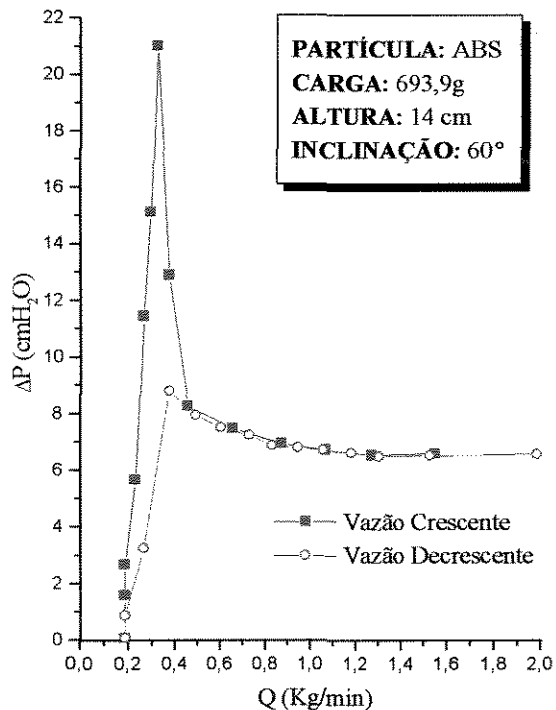


Fig. A.2k - Primeiro Grupo de Corridas

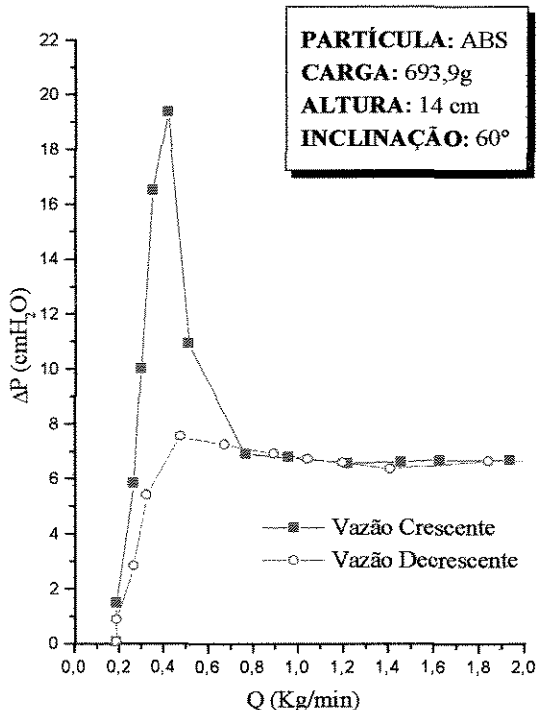


Fig. A.2l - Segundo Grupo de Corridas

Figura A.2 - Curvas Características dos Leitos Médios ($L_1 = 0,30\text{ m}$) (Continuação)

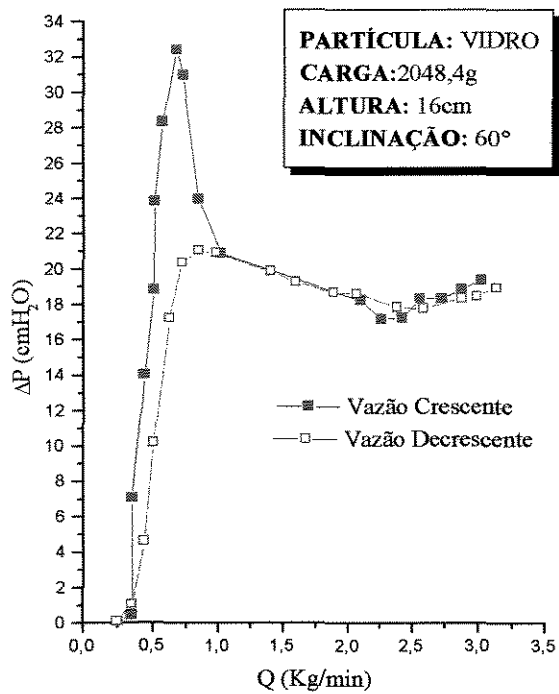


Fig. A.2m - Primeiro Grupo de Corridas

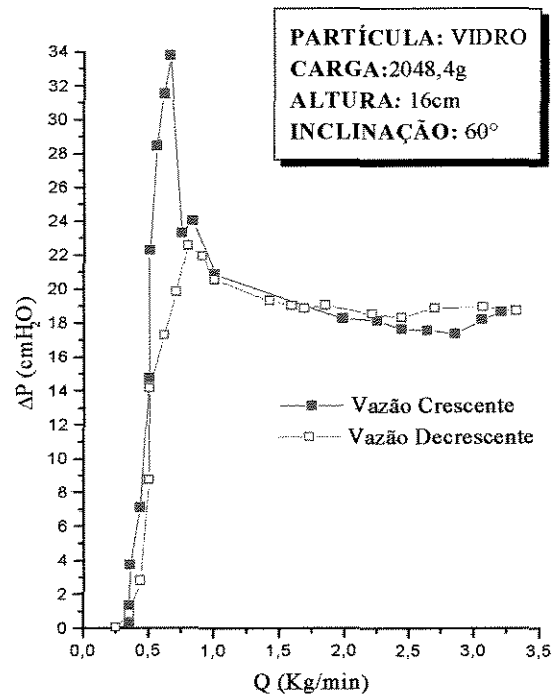


Fig. A.2n - Segundo Grupo de Corridas

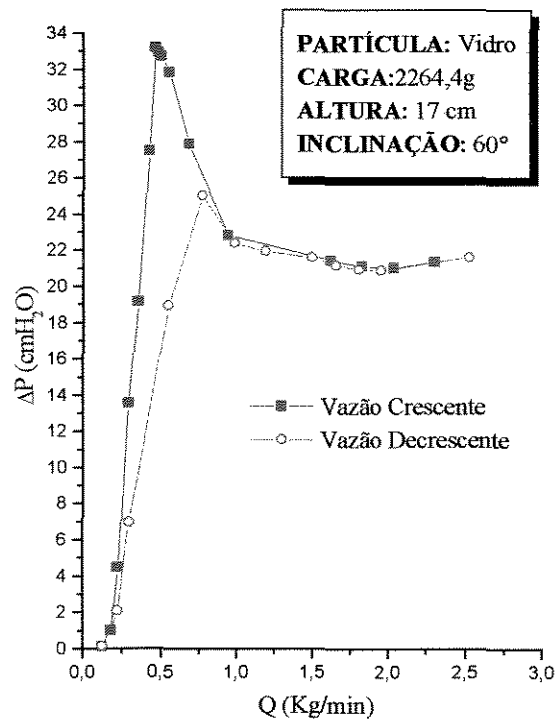


Fig. A.2o - Primeiro Grupo de Corridas

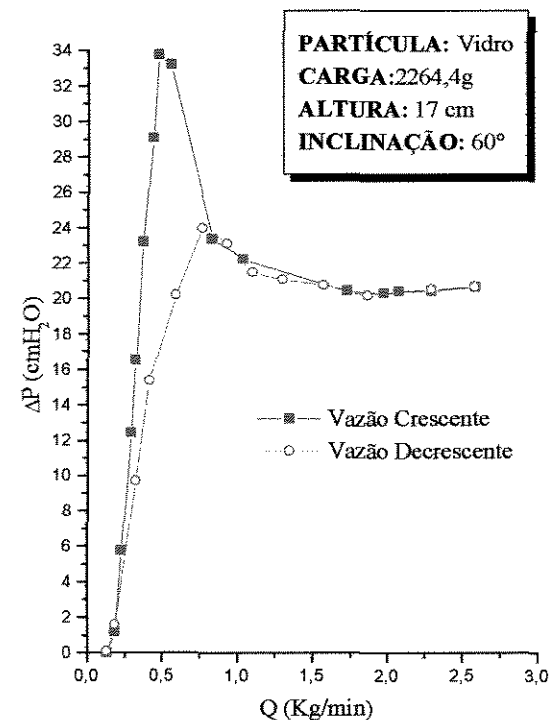


Fig. A.2p - Segundo Grupo de Corridas

Figura A.2 - Curvas Características dos Leitos Médios ($L_4 = 0,30\text{ m}$) (Continuação)

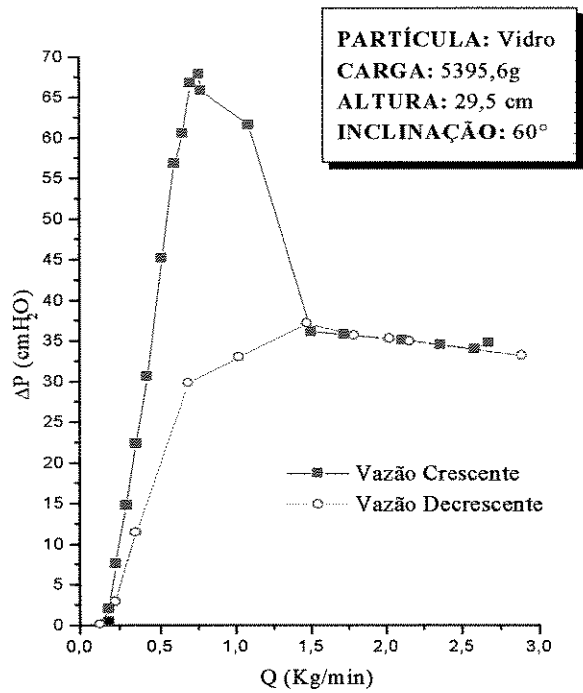


Fig. A.2q - Primeiro Grupo de Corridas

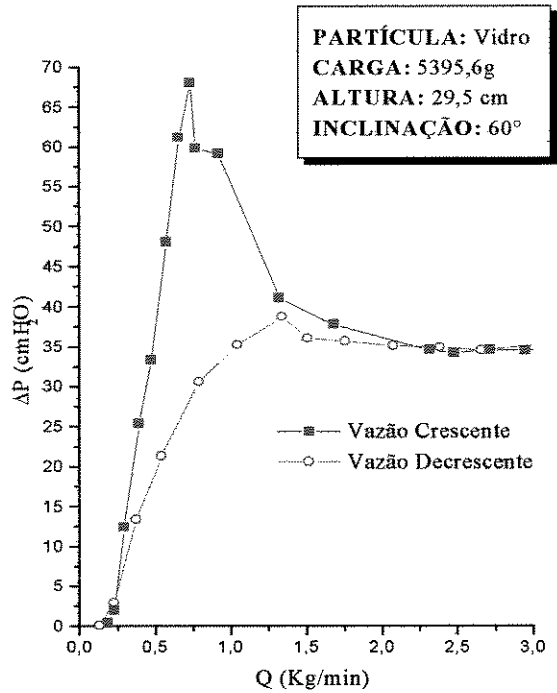


Fig. A.2r - Segundo Grupo de Corridas

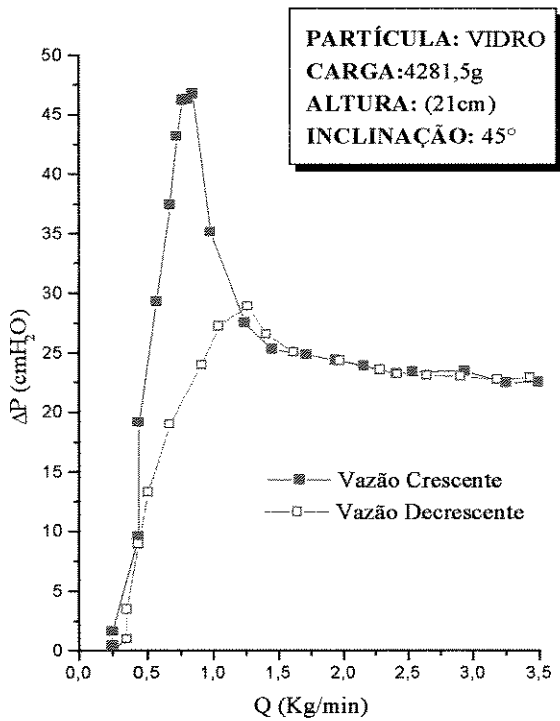


Fig. A.2s - Segundo Grupo de Corridas

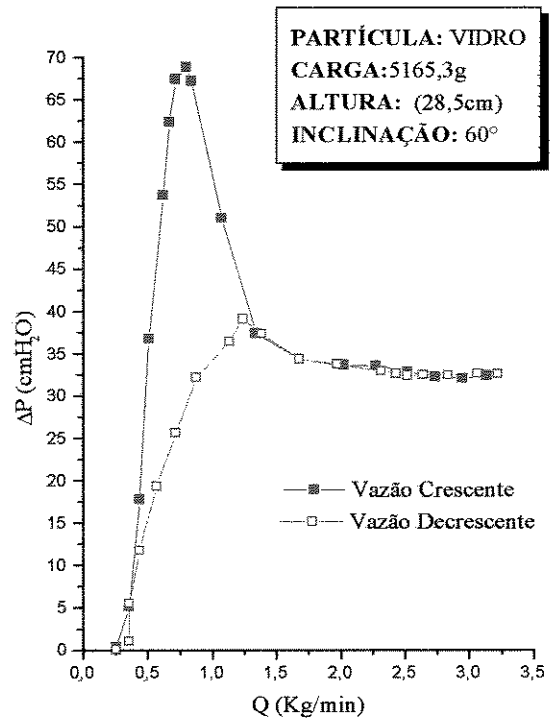


Fig. A.2t - Segundo Grupo de Corridas

Figura A.2 - Curvas Características dos Leitos Médios ($L_1 = 0,30\text{ m}$) (Continuação)

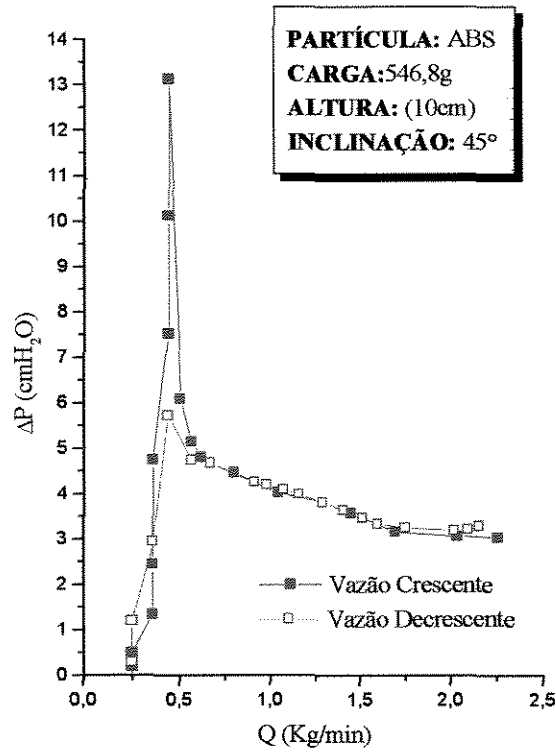


Fig. A.2u - Segundo Grupo de Corridas

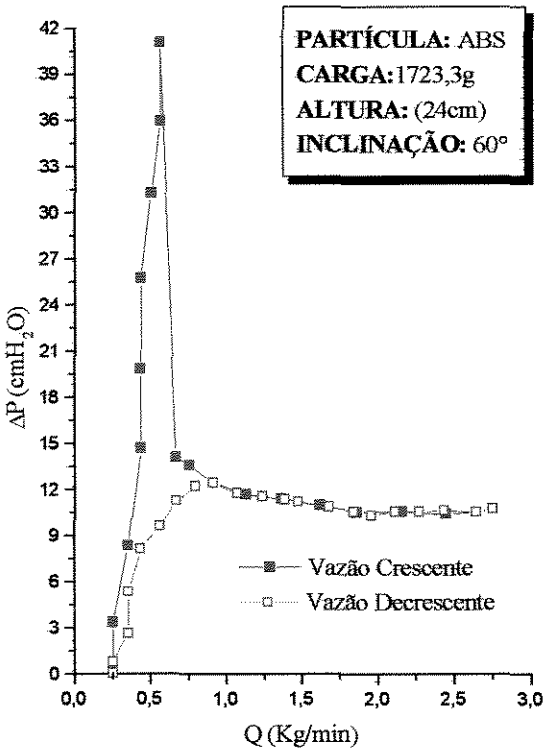


Fig. A.2v - Segundo Grupo de Corridas

Figura A.2 - Curvas Características dos Leitos Médios ($L_1 = 0,30$ m) (Continuação).

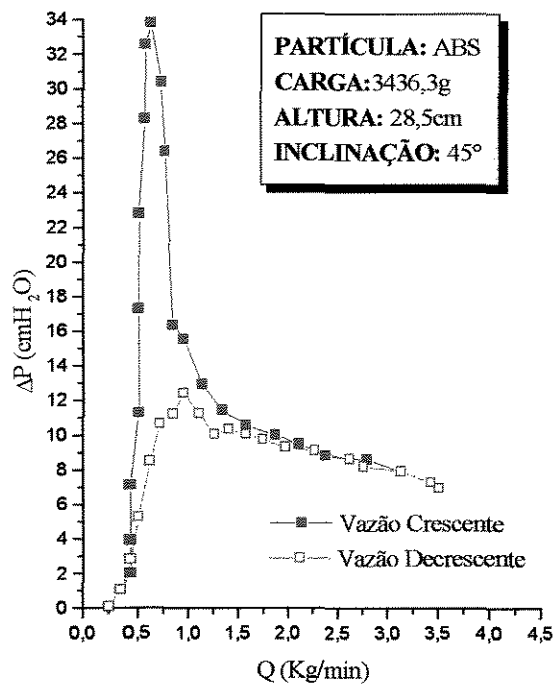


Fig. A.3a - Primeiro Grupo de Corridas

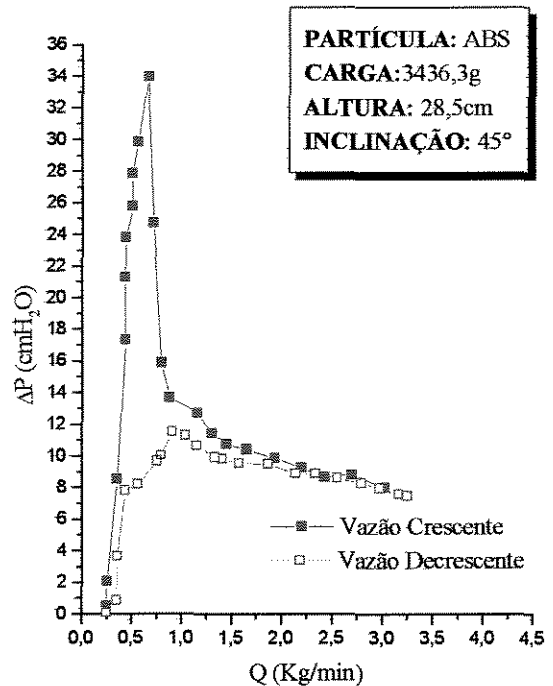


Fig. A.3b - Segundo Grupo de Corridas

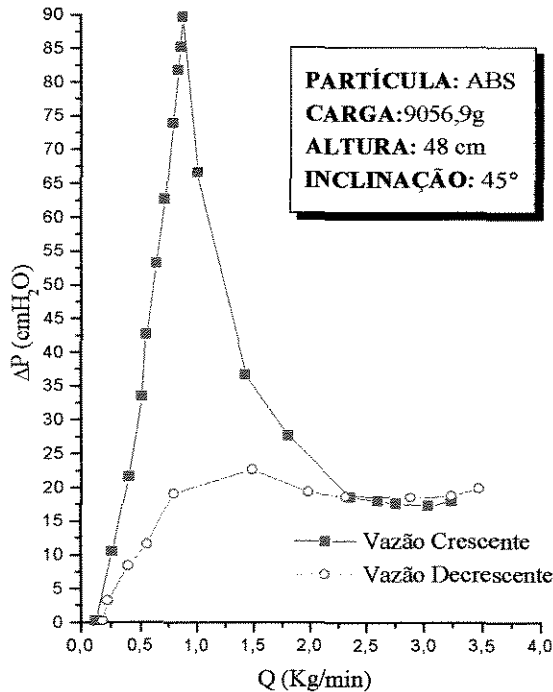


Fig. A.3c - Primeiro Grupo de Corridas

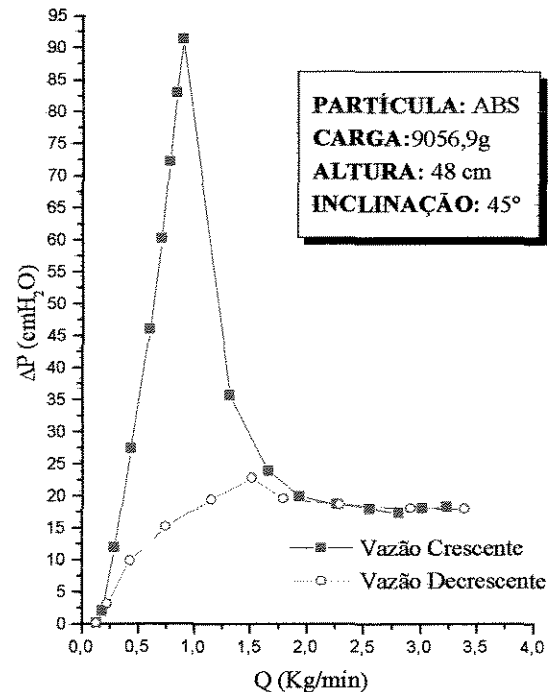


Fig. A.3d - Segundo Grupo de Corridas

Figura A.3 - Curvas Características dos Leitos Grandes ($L_1 = 0,80 \text{ m}$)

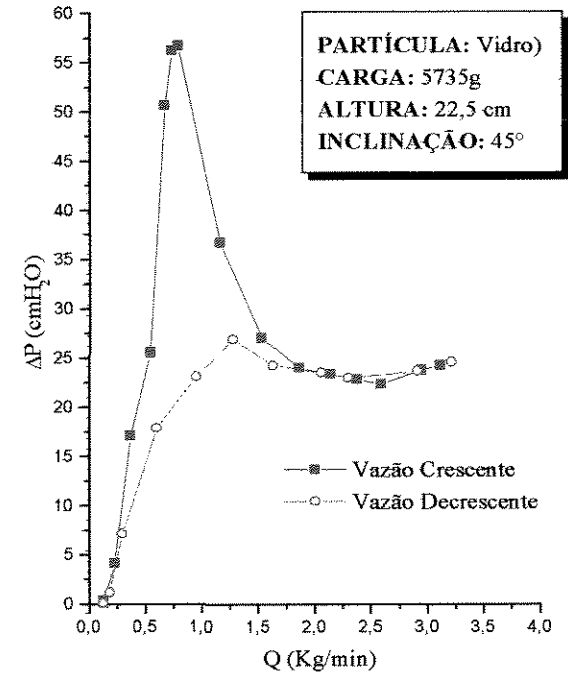
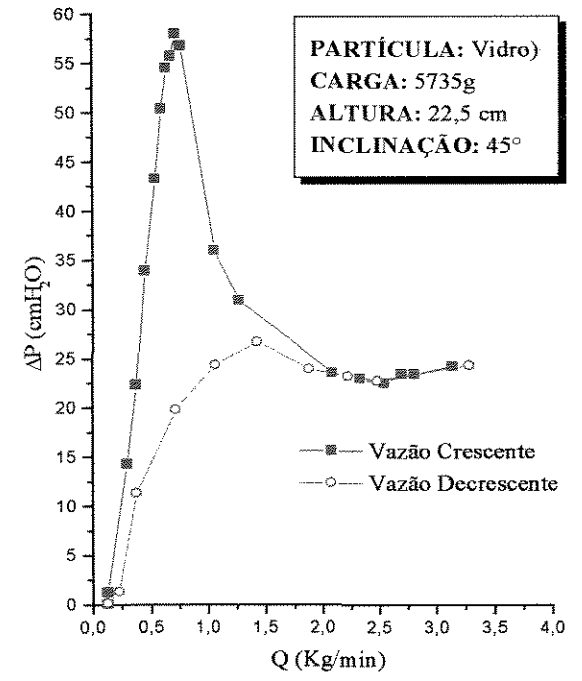
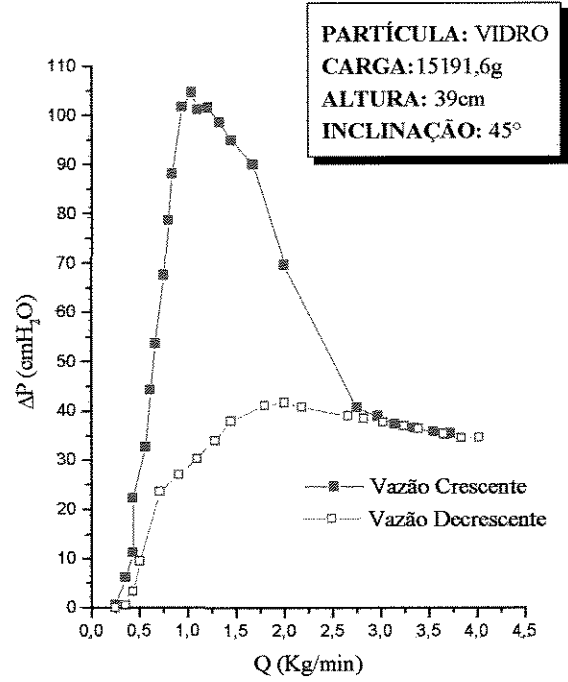
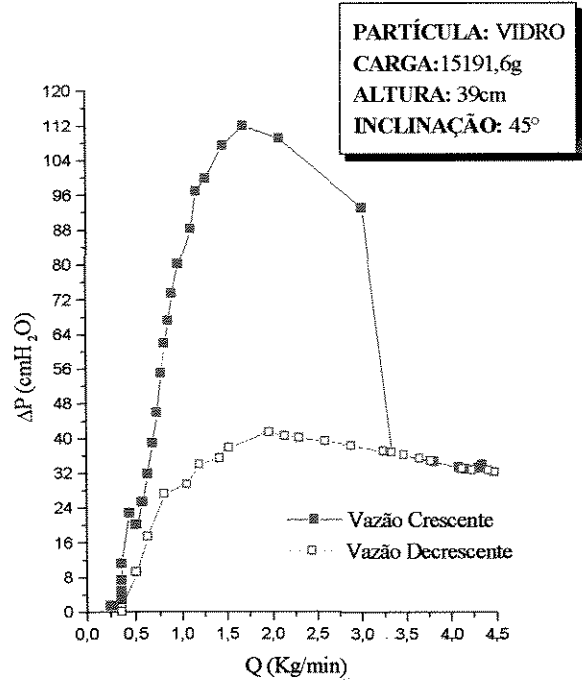


Figura A.3 - Curvas Características dos Leitos Grandes ($L_4 = 0,80\text{ m}$) (Continuação)

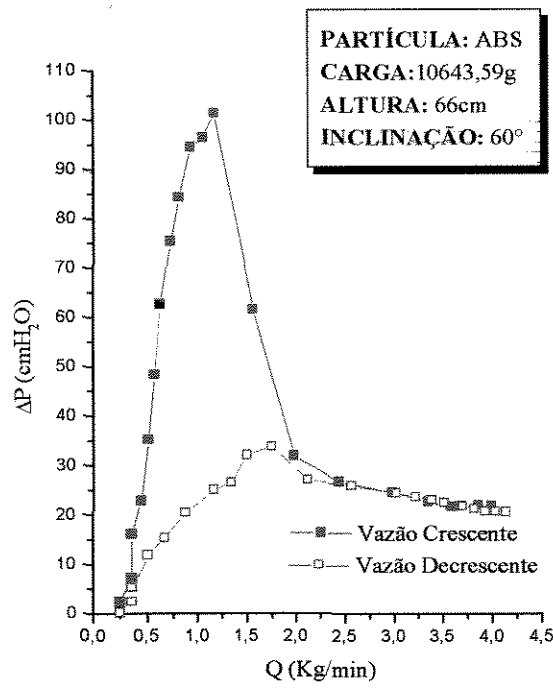


Fig. A.3i - Primeiro Grupo de Corridas

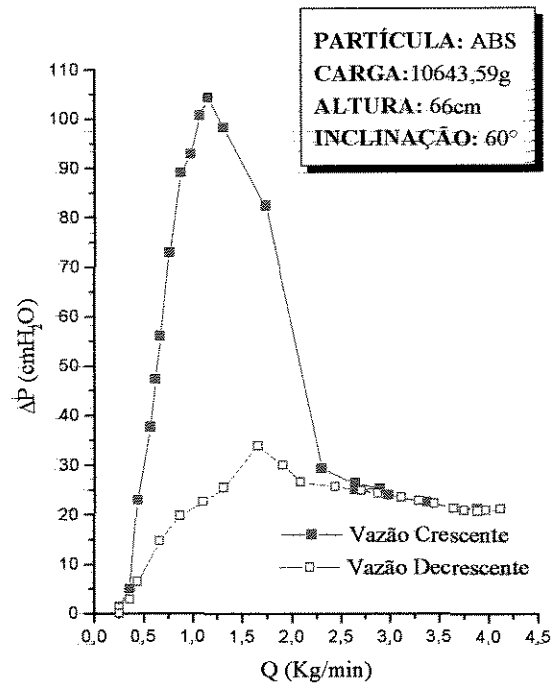


Fig. A.3j - Segundo Grupo de Corridas

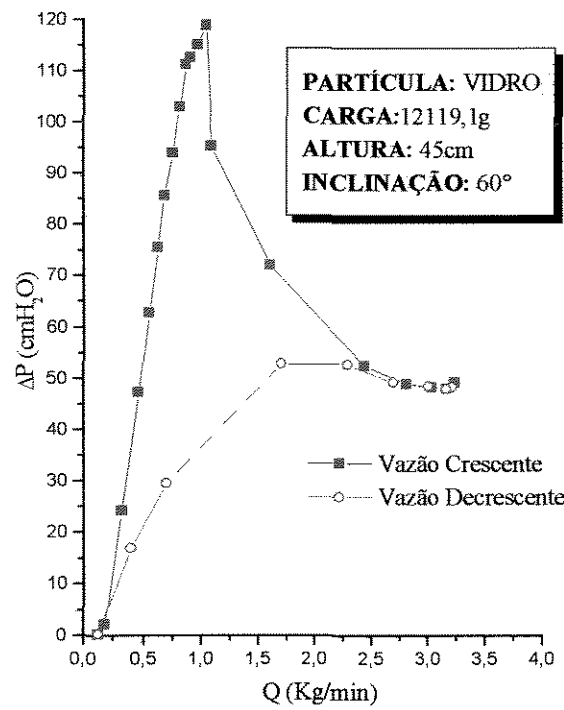


Fig. A.3k - Primeiro Grupo de Corridas

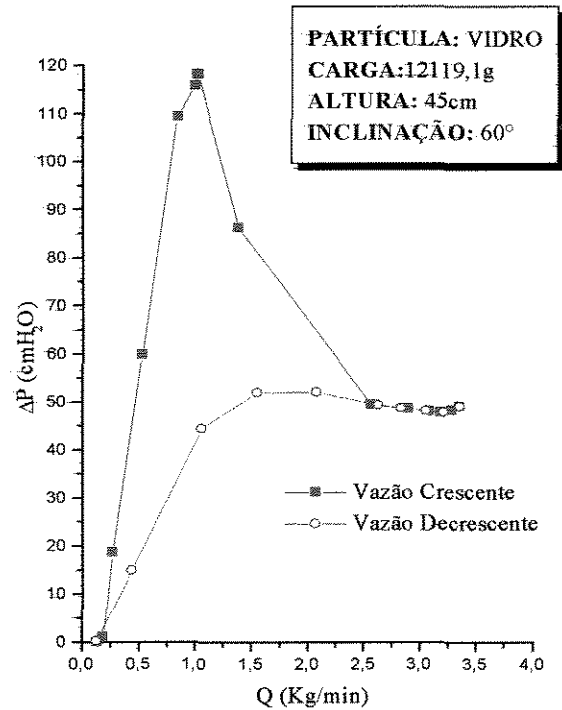


Fig. A.3l - Segundo Grupo de Corridas

Figura A.3 - Curvas Características dos Leitos Grandes ($L_1 = 0,80 \text{ m}$) (Continuação)

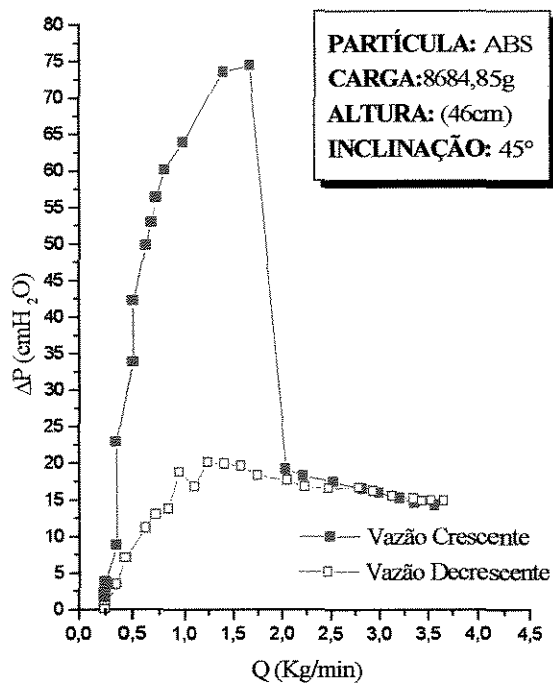


Fig. A.3m - Segundo Grupo de Corridas

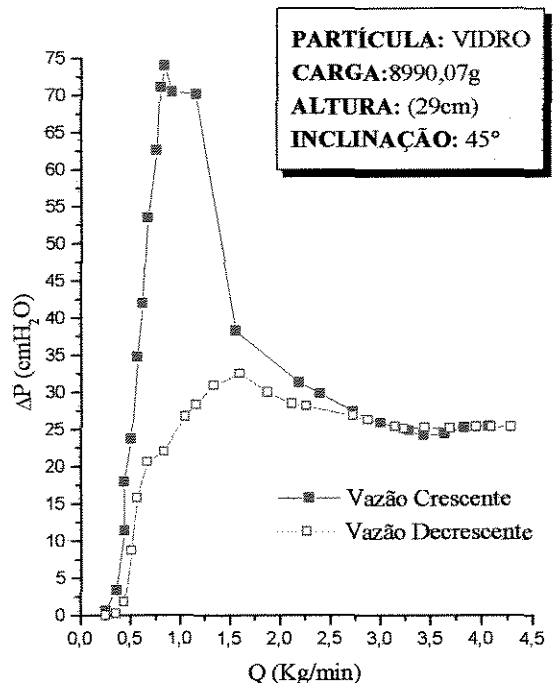


Fig. A.3n - Segundo Grupo de Corridas

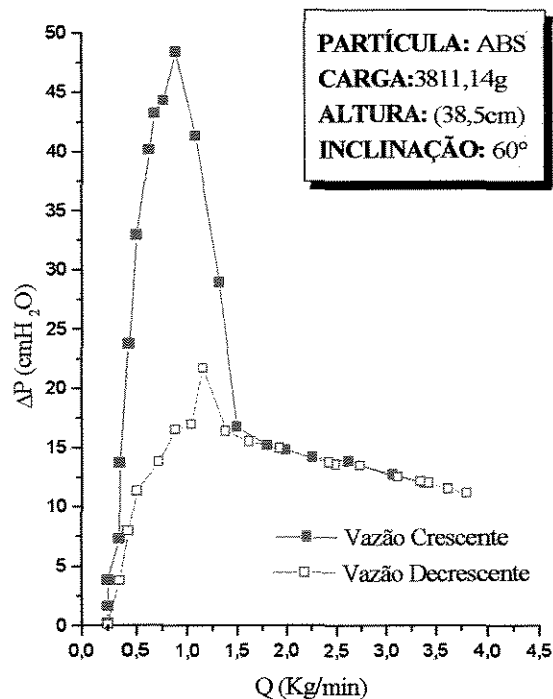


Fig. A.3o - Segundo Grupo de Corridas

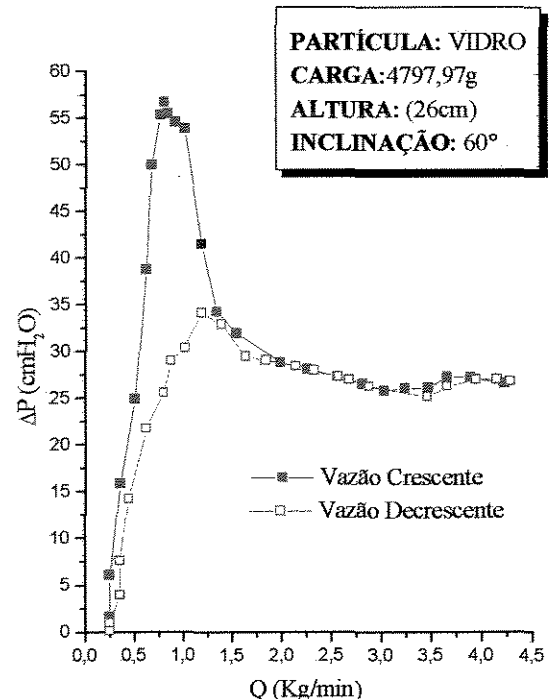


Fig. A.3p - Segundo Grupo de Corridas

Figura A.3 - Curvas Características dos Leitos Grandes ($L_1 = 0,80\text{ m}$) (Continuação)