UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
ÁREA: DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE PROCESSOS

ÁREA: Engenharia de Processos

Monitoramento de Regimes de Contato Gás-Sólido em Leito de Jorro Cone-Cilíndrico por medidas de Queda de Pressão em Tempo Real

Aluna: Virgínia Aparecida da Silva
Orientadora: Sandra Cristina dos Santos Rocha

Setembro/1998

como parte dos requisitos exigidos
para a obtenção do título de mestre
em Engenharia Química.

Autor: Virgínia Aparecida da Silva
Orientadora: Prof^{a}. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha

Campinas - SP
Setembro/1998-09-09

BIBLIOTECA CENTRAL

UNIDADE BC
N.º CHAMADA:
V. Ex.
TOMBO BC/35743
PROC. 395/98
C D X
PREÇO R$ 11,00
DATA 05/11/98
N.º CPD

CM-00118331-1

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

Si38m

Silva, Virgínia Aparecida da
Monitoramento de regimes de contato gás-sólido em leito de jorro cone-cilíndrico por medidas de queda de pressão em tempo real. / Virgínia Aparecida da Silva.-- Campinas, SP: [s.n.], 1998.

Orientadora: Sandra Cristina dos Santos Rocha
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Processo de leito de jorro. 2. Dinâmica dos fluidos 3. Pressão – Flutuação (Física). 4. Estabilidade. I. Rocha, Sandra Cristina dos Santos. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Esta versão corresponde à redação final da **Tese de Mestrado** defendida pela Engenheira Química **Virgínia Aparecida da Silva** e aprovada pela Comissão Julgadora em 31/08/1998.

Orientadora:

Profª Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 31 de Agosto de 1998 pela banca examinadora constituída pelos professores doutores:

Profª. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha
Orientadora

Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto
Titular

Prof. Dr. José Roberto Dellalibera Finzer
Titular

Que todos os esforços desafiem as impossibilidades.
Lembrai-vos de que as grandes proezas da história
foram conquistas do que parecia impossível.

CHARLIE CHAPLIN

Aos meus pais, com muito carinho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por essa força infinita, que sem ela seria impossível a realização deste trabalho.

Aos meus pais, pelo amor e compreensão, que juntos superamos todas as dificuldades com muita força. Apesar da distância a presença tornou-se constante, mas a saudade... querendo ou não persistiu todo o tempo.

A todos os meus irmãos pela amizade e principalmente ao Virgílio, quantos desabafos, hein?

Ao Juninho por tantos momentos em que me deu o incentivo de persistir no que realmente queria e pela paciência nos momentos mais difíceis.

Enfim, aos amigos que estiveram presentes, querendo e fazendo o possível para participar de todos os momentos.

E me encontro sem palavras para agradecer à Sandra, uma pessoa maravilhosa, que um dia passeando por aqui para visitar a Unicamp a conheci, e nada tirou da minha cabeça que seria com ela que desenvolveria o meu trabalho. E aqui estamos, concluindo um trabalho e muito mais que isso, pois o carinho e admiração se solidificaram. Obrigada por tudo, principalmente pelos muitos momentos de paciência.

À CAPES pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho e aos técnicos que também contribuíram.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama de Geldart ---------- 4

Figura 2.2 – Flutuações de pressão e densidade espectral de potência (Chehbouni et al,1991) ---------- 10

Figura 2.3 – Flutuações de pressão (Bai et al, 1996) ---------- 12

Figura 2.4 – Regimes dinâmicos obtidos em leito de jorro (Mathur e Epstein, 1974) --14

Figura 2.5 – Esquema de um leito de jorro (Mathur e Epstein, 1974) ---------- 15

Figura 2.6 – Curva típica de queda de pressão - velocidade superficial do gás (Mathur e Epstein, 1974) ---------- 17

Figura 2.7 a - Diagramas de fase, trigo, d_p = 3,2 x 6,4 mm, D_c = 15,2 cm, D_i = 1,25 cm (Mathur e Epstein, 1974) ---------- 21

Figura 2.7 b - Diagrama de fase, areia, d_p = 0,42 - 0,83 mm, D_c = 15,2 cm, D_i = 1,25 cm (Mathur e Epstein, 1974) ---------- 22

Figura 2.8 – Queda de pressão versus tempo, leito fixo, milho, D_c = 50 cm, ângulo base 45^0 (Taranto, 1995) ---------- 24

Figura 2.9 – Queda de pressão vs. Tempo, jorro estável - Milho, D_c = 50 cm, ângulo base 45^0 (Taranto, 1995) ---------- 24

Figura 2.10 – Queda de pressão vs. Tempo, "slugging" - Milho, D_c = 50 cm, ângulo base 45^0 (Taranto, 1995) ---------- 25

Figura 2.11 – Espectro de Potência para regime de Jorro Estável - Milho,D_c = 50 cm, ângulo base 45^0 (Taranto, 1995) ---------- 25

Figura 2.12 – Espectro de Potência - Instabilidade no Jorro – Milho, D_c = 50 cm ângulo base 45^0 (Taranto, 1995) ---------- 26

Figura 2.13 – Espectro de Potência - Regime "Slugging" – Milho, D_c = 50 cm , ângulo base 60^0 (Taranto, 1995) ---------- 26

Figura 2.14 – Desenvolvimento Gráfico para a Transformada de Fourier Discreta (Brigham,1988) ---------- 44

Figura 2.15 – Pares da Transformada de Fourier Discreta (Brigham,1988) ---------- 48

Figura 2.16 – FFT de uma Função Periódica: o intervalo de truncamento é múltiplo de um período (Brigham,1988) ---------- 50

Figura 2.17 – FFT de uma Função Periódica: o intervalo de truncamento não é múltiplo de um período (Brigham,1988) ---------- 51

Figura 3.1 – Projeto dos leitos ---------- 55

Figura 3.2 – Montagem Experimental ---------- 56

Figura 3.3 – Sistema experimental em operação, Leito II, ABS, Leito Fixo ---------- 58

Figura 3.4 – Sistema experimental em operação, Leito II, ABS, Leito Jorro Estável -- 58

Figura 3.5 – Sistema experimental em operação, Leito II, Sangel, Leito Jorro Estável --- ---------- 59

Figura 3.6 – Sistema experimental em operação, Leito III, ABS, Regime "Slug" ----- 60

Figura 3.7 – Espectro de potência para o leito vazio ---------- 63

Figura 4.1 – Diagrama de fase, ABS, D_c = 20cm, $\alpha = 60^0$, D_i = 5,0cm ---------- 76

Figura 4.2 – Diagrama de fase, Placebos, d_p = 7,24 mm, D_c = 20cm, α = 60^0, D_i = 5,0cm ---------- 76

Figura 4.3 – Diagrama de fase, acrílico, D_c = 10cm, $\alpha = 45^0$, D_i = 2,5 ---------- 77

Figura 4.4 – Diagrama de fase, sangel,D_c = 10cm, $\alpha = 45^0$, D_i = 2,5cm ---------- 77

Figura 4.5 – Diagrama de fase, Placebos, D_c = 20cm, $\alpha = 45^0$, D_i = 5,0cm ---------- 78

Figura 4.6 – Diagrama de fase, ABS, D_c = 20cm, $\alpha = 45^0$, D_i = 5,0cm ---------- 78

Figura 4.7 – Diagrama de fase, ABS, D_c = 10cm, $\alpha = 60^0$, D_i = 5,0cm ---------- 79

Figura 4.8 – Diagrama de fase, Placebos, D_c = 10cm, $\alpha = 60^0$, D_i = 5,0cm ---------- 79

Figura 4.9 a – Acrílico, D_c = 20 cm e $\alpha = 45^0$, carga = 2100 g - Leito Fixo –Corrida118 ---------- 80

Figura 4.9 b – Acrílico, D_c = 10 cm e $\alpha = 45^0$, carga = 1800 g - Leito Fixo – Corrida 187 ---------- 80

Figura 4.9 c – ABS, D_c = 20 cm e $\alpha = 60^0$, carga = 1800 g - Leito Fixo – Corrida 14 ---------- 81

Figura 4.10 a – Sangel, D_c = 20 cm e $\alpha = 45^0$, carga = 2500 g - Jorro Estável – Corrida 135 ---------- 81

Figura 4.10 b – Acrílico, D_c = 20 cm e $\alpha = 45^0$, carga = 900 g - Jorro Estável – Corrida 113 ---------- 82

Figura 4.10 c – ABS, D_c = 20 cm e $\alpha = 45^0$, carga = 1500 g - Jorro Estável – Corrida 133 ---------- 82

Figura 4.10 d – Acrílico, D_c = 20 cm e α = 45 ^{0}, carga = 1800 g - Jorro Estável – Corrida 117 ---------- 83

Figura 4.10 e – ABS, D_c = 20 cm e α = 60 ^{0}, carga = 1500 g - Jorro Estável – Corrida 7 ---------- 83

Figura 4.10 f – ABS, D_c = 20 cm e α = 60 ^{0}, carga = 1800 g - Jorro Estável – Corrida 15 ---------- 84

Figura 4.10 g – Acrílico, D_c = 20 cm e α = 60 ^{0}, carga = 1800 g - Jorro Estável – Corrida 100 ---------- 84

Figura 4.10 h – Poliestireno, D_c = 20 cm e α = 60 ^{0}, carga = 1800 g - Jorro Estável – Corrida 42 ---------- 85

Figura 4.11 a – Placebos, D_c = 10c m e α = 60 ^{0}, carga = 1500 g - "Slugging" – Corrida 173 ---------- 85

Figura 4.11 b – ABS, D_c = 10 cm e α = 60 ^{0}, carga = 1500 g - "Slugging" – Corrida 210 ---------- 86

Figura 4.11 c - Sangel, D_c = 10 cm e α = 45 ^{0}, carga = 1800 g - "Slugging" – Corrida 249 ---------- 86

Figura 4.11 d – ABS, D_c = 20 cm e α = 60 ^{0}, carga = 2100 g - Instabilidade – Corrida 25 ---------- 87

Figura 4.11 e – ABS, D_c = 20 cm e α = 45 ^{0}, carga = 1500 g - Instabilidade – Corrida 132 ---------- 87

Figura 4.11 f – Poliestireno, D_c = 10 cm e α = 60 ^{0}, carga = 900 g – Caso Atípico – Corrida 164 ---------- 88

Figura 4.11 g – Poliestireno, D_c = 10 cm e α = 45 ^{0}, carga = 600 g – Caso Atípico – Corrida 223 ---------- 88

Figura 4.12 - Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 2 ---------- 92

Figura 4.13 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 7 ---------- 92

Figura 4.14 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 15 ---------- 93

Figura 4.15 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 20 ---------- 93

Figura 4.16 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 45 ---------- 94

Figura 4.17 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 42 ---------- 94

Figura 4.18 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 49 ---------- 95

Figura 4.19 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 81 ---------- 95

Figura 4.20 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 89 ---------- 96

Figura 4.21 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 91 ---------- 96

Figura 4.22 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 100 ---------- 97

Figura 4.23 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 101 ---------- 97

Figura 4.24 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 113 ---------- 98

Figura 4.25 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 117 ---------- 98

Figura 4.26 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 121 ---------- 99

Figura 4.27 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 131 ---------- 99

Figura 4.28 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 133 ---------- 100

Figura 4.29 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 135 ---------- 100

Figura 4.30 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 136 ---------- 101

Figura 4.31 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 137 ---------- 101

Figura 4.32 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 145 ---------- 102

Figura 4.33 – Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 170 ------ 103

Figura 4.34 – Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 173 ----- 104

Figura 4.35 – Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 175 ----- 104

Figura 4.36 – Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 189 ----- 105

Figura 4.37 – Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 198 ----- 105

Figura 4.38 – Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 201 ----- 106

Figura 4.39 – Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 210 ----- 106

Figura 4.40 – Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 216 ----- 107

Figura 4.41 – Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 233 ----- 107

Figura 4.42 - Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 239 ------ 108

Figura 4.43 – Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 240 ----- 108

Figura 4.44 – Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 245 ----- 109

Figura 4.45 – Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 249 ----- 109

Figura 4.46 – Espectro de Potência para "casos atípicos" – Corrida 164 ---------- 110

Figura 4.47 – Espectro de Potência para "casos atípicos" – Corrida 165 ---------- 111

Figura 4.48 – Espectro de Potência para "casos atípicos" – Corrida 223 ---------- 111

Figura 4.49 – Espectro de Potência para "casos atípicos" – Corrida 224 ---------- 112

Figura 4.50 – Espectro de Potência para "casos atípicos" – Corrida 230 ---------- 112

Figura 4.51 – Espectro de Potência para "casos atípicos" – Corrida 74 ---------- 113

Figura 4.52 – Espectro de Potência para "casos atípicos" – Corrida 75 ---------- 114

Figura 4.53 – Queda de Pressão versus Vazão, ABS, leito I, 2100g ---------- 123

Figura 4.54 – Queda de Pressão versus Vazão, Acrílico, leito I, 1500g ---------- 123

Figura 4.55 – Queda de Pressão versus Vazão, Sangel, leito II, 1500g ---------- 124

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resumo Aplicações da FFT ---------- 38

Tabela 3.1 – Características das Partículas ---------- 54

Tabela 3.2 – Características de Algumas Corridas Experimentais ---------- 64

Tabela 4.1 – Valores de Amplitude para ABS, leito I ---------- 116

Tabela 4.2 – Valores de Amplitude para Sangel, leito I ---------- 117

Tabela 4.3 – Valores de Amplitude para ABS, leito II ---------- 118

Tabela 4.4 – Valores de Amplitude para Placebos, leito III ---------- 118

Tabela 4.5 – Valores de Amplitude para Sangel, leito III ---------- 119

Tabela 4.6 – Valores de Amplitude para Poliestireno leito IV ---------- 119

Tabela 4.7 – Valores de Amplitude para ABS, leito IV ---------- 119

Tabela 4.8 – Valores de Amplitude para Sangel, leito IV ---------- 119

Tabela 4.9 – Valores Calculados por Correlações de $\Delta P_{máx}$ ---------- 122

Tabela 4.10 – Valores Calculados por Correlações de ΔP_s ---------- 122

Tabela 4.11 – Valores Calculados por Correlações de u_{ms} ---------- 122

NOMENCLATURA

A = Amplitude (Pa^2/Hz);

A_{cil} = área da seção transversal do cilindro (m^2);

D_c = diâmetro da coluna (m);

D_i = diâmetro do orifício (m);

d_p = diâmetro da partícula (m);

DHleito = queda de pressão média no leito durante 12 segundos (Pa);

D_S = diâmetro do jorro (m);

f = freqüência dominante no espectro (Hz);

f_n = freqüência ponto a ponto (Hz);

f_c = freqüência crítica (Hz);

F_g = freqüência de geração de bolhas (Hz);

F_e = freqüência de erupção de bolhas (Hz);

F_b = freqüência natural do leito fluidizado (Hz);

g = aceleração da gravidade (m/s2);

G = vazão mássica do fluido por unidade de seção transversal da coluna ($kg/s.m^2$);

H = altura do leito (m);

H_c = altura da seção cônica (m);

H_M = altura máxima de jorro (m);

H_o = altura estática do leito (m);

H_{cil} = altura da parte cilíndrica do leito de jorro (m);

H' e h = altura das seções cônicas do leito de jorro (m);

M = massa de sólidos no leito (Kg);

N = número de pontos truncados;

Δ = taxa de amostragem (1/s);

ΔP_M = queda de pressão máxima (Pa);

ΔP_{ms} = queda de pressão no jorro mínimo (Pa);

ΔP_S = queda de pressão no leito de jorro (Pa);

$(\Delta P_S)_{max} = \Delta P_S$ para $H = H_M$;

T = intervalo de amostragem (s);

U_{mb} = velocidade em que inicia a formação de bolhas (m/s);

U_c = velocidade crítica em que as bolhas e "slug" atingem tamanho máximo (m/s);

U_{mf} = velocidade de mínima fluidização (m/s);

U_{ms} = velocidade mínima superficial de jorro (m/s);

U_S = velocidade superficial de jorro (m/s);

U_T = velocidade terminal da partícula (m/s);

Adimensionais:

Re = número de Reynolds = $\dfrac{d_p.U.\rho_f}{\mu}$

Re_i = nº de Reynolds no orifício

Re_{ms} = nº de Reynolds no jorro mínimo

Ar = número de Arquimedes = $\dfrac{g.d_p^3.\rho_f.(\rho_s - \rho_f)}{\mu^2}$

Letras gregas:

ε = porosidade;

ε_s = concentração de sólidos;

ε_{mf} = porosidade na mínima fluidização;

μ = viscosidade do fluido (N.s/m^2);

θ ou α = ângulo da base cônica;

ρ_b = massa específica média dos sólidos (bulk density) – (kg/m^3);

ρ_f = massa específica do fluido (kg/m^3);

ρ_S ou ρ_p = massa específica da partícula(kg/m^3);

ψ ou ϕ = esfericidade

RESUMO

Este trabalho tem como principal objetivo a determinação de um método de identificação de regimes de contato gás-sólido em leito de jorro cone-cilíndrico, a partir da queda de pressão no leito. Foram analisados os leitos fixo, de jorro e "slugging".

Os dados de queda de pressão no leito foram adquiridos em tempo real pelo software "labtech". A taxa de amostragem utilizada foi de 128 Hz em um intervalo de 12 segundos, após a instalação do regime fluidodinâmico desejado no leito. Com os gráficos das flutuações da queda de pressão verificou-se a possibilidade de identificação do regime fluidodinâmico do leito por meio de uma análise comparativa entre os gráficos das flutuações da queda de pressão versus tempo, obtidos para diferentes regimes. A análise individual das medidas de queda de pressão em tempo real não caracteriza o regime de forma objetiva. A diferença entre os gráficos resume-se basicamente no espaçamento entre as oscilações e observou-se uma tendência de diminuição no número de períodos de oscilações para os gráficos de leitos em "slugging" em relação ao jorro estável, e também do jorro estável em relação ao leito fixo.

Com os dados de queda de pressão versus tempo, utilizou-se a transformada de Fourier (FFT) como ferramenta para transformá-los em espectros de potência. Foi possível, então, a identificação dos regimes de leito de jorro, "slugging" e alguns "casos atípicos" observados experimentalmente, a partir da análise dos espectros. Nos espectros observou-se picos dominantes em determinada faixa de freqüência dependendo do regime instalado. Para o leito de jorro estável o pico dominante esteve na faixa de freqüência de 4,5 - 6,9Hz, enquanto para o regime "slugging", este situou-se entre 1,125 - 2,5 Hz. Foram analisados dados de 546 experimentos em leitos de quatro relações dimensionais distintas quais sejam D_c=10 e 20 cm; D_i=2,5 e 5,0 cm;θ = 45 e 60^0 , e utilizadas partículas com $1{,}88 < d_p < 7{,}24$ mm; $1050 < \rho_p < 1281$ kg/m^3; $0{,}58 < \phi < 0{,}87$. A análise do valor da amplitude de queda de pressão no leito mostrou ser dependente do próprio movimento vibratório das partículas.

A partir dos experimentos realizados, em algumas corridas foi possível a obtenção de alguns dados experimentais dos parâmetros de projeto de leito de jorro (ΔP_{max}, ΔP_s e u_{ms}). Os valores obtidos foram comparados com os valores calculados por correlações encontradas na literatura, implementadas em um programa desenvolvido na linguagem Borland Delphi 2.0.

ABSTRACT

The main aim of this work is determining an identification method for gas-solid regimes in cone-cylindrical spouted bed based on frequency analysis of pressure drop fluctuations. The analysis in this work involved: packed bed, steady spouting and slugging bed.

The aquisition of pressure drop fluctuations in real time took place once a specific regime was installed and data colleted by Labtech software. The sampling rate was 128 points per second and the time of sampling was maintained at 12 seconds.

It was verified, by graphics of pressure drop versus time, the possibility of identification of the fluidynamic regimes from a comparative analysis of the graphic obtained for different regimes. The differences among graphics is on the amplitude of fluctuation and also on the period of oscillation for each of the regimes studied, fixed, stable spouting and slugging.

The FFT was used as tool to transform the pressure drop data in spectrum (frequency-amplitude). The graphics on the frequency domain, on the other hand, permitted a more objective recognition of regimes due to the patterns obtained for each regime. This behavior was found to be the same for every spectra representing a steady spout and slugging, and the maximum peak was always in the range of frequency of 4.5 to 6.9Hz and 1.125 to 2.5Hz, respectively. This is a well defined peak of maximum amplitude.

A number of 546 experimental runs were made for 4 different beds: $D_c = 10$ and 20 cm, $D_i = 2.5$ and 5.0 cm, angle = 45 e 60^0 and the experiments were carried out with 5 different particles the in ranges of $1.88 < d_p < 7.24$ mm; $1050 < \rho_p < 1281$ kg/m^3; $0.58 < \phi < 0.87$. The analysis of the bed pressure drop fluctuations amplitude value turned out to be dependent on the particle vibrating movement.

During the acquisition of the experimental data, some project parameters of spouted bed was also obtained, like $\Delta P_{máx}$, ΔP_s and u_{ms}. Collected values were compared with calculated values by correlations found on literature. A software was developed to calculate these parameters ($\Delta P_{máx}$, ΔP_s, u_{ms}) and the language Borland Delphi 2.0 was used.

ÍNDICE

EPÍGRAFE ---------- i
DEDICATÓRIA ---------- ii
AGRADECIMENTOS ---------- iii
LISTA DE FIGURAS ---------- iv
LISTA DE TABELAS ---------- xi
NOMENCLATURA ---------- xii
RESUMO ---------- xiii
ABSTRACT ---------- xiv
1 – INTRODUÇÃO ---------- 1
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ---------- 3
2.1 – Regimes de Contato Gás-Sólido ---------- 3
2.1.1 – Leito Fixo ---------- 3
2.1.2 – Leito Fluidizado ---------- 3
2.1.3 – Leito de jorro ---------- 13
2.1.3.1 – Fluidodinâmica do processo ---------- 15
2.1.3.2 – Estabilidade do jorro ---------- 17
2.1.3.3 - Parâmetros relevantes de projeto de leito de jorro ---------- 27
2.2 – Transformada de Fourier ---------- 36
2.2.1 – Propriedades da Transformada Fourier ---------- 39
2.2.2 – Funções Delta ---------- 40
2.2.3 – Transformada de Fourier Discreta ---------- 42
2.2.3.1 – Desenvolvimento Gráfico ---------- 42
2.2.3.2 – Desenvolvimento Teórico ---------- 45
2.2.4 – "Leakage" e Redução de "Leakage" ---------- 49
2.2.5 – Teorema da Amostragem ---------- 52
3 – Materiais e Métodos Experimentais ---------- 53
3.1 – Materiais ---------- 56
3.2 – Projeto dos Leitos ---------- 54
3.3 – Montagem Experimental ---------- 55
3.4 – Sistema de Aquisição de Dados ---------- 57
3.5 – Procedimento Experimental ---------- 63

4 – Análise de Resultados Obtidos ---------- 74
4.1 – Análise das Flutuações da Queda de Pressão em Tempo Real ---------- 74
4.2 – Análise dos Espectros de Potência ---------- 89
4.2.1 – Espectros de um Leito em Regime de Jorro Estável ---------- 90
4.2.2 – Espetros de um Leito em Regime de "Slugging" ---------- 102
4.2.3 - Espectros para "Casos Atípicos" ---------- 110
4.3 – Análise da Amplitude ---------- 115
4.4 – Comparação dos Resultados Obtidos para Leitos Cônicos Cilíndricos com Resultados Obtidos por Taranto(1996) para Leitos Bidimensionais ---------- 120
4.5 – Determinação dos parâmetros relevantes de projeto leito de jorro ---------- 121
5 – Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos ---------- 125
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ---------- 127

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Em se tratando de regimes de contato gás-sólido, os mais encontrados em processos industriais são o leito fixo, o leito fluidizado e o leito de jorro, para diversas aplicações, como secagem de partículas, recobrimento, granulação, adsorção, etc...

O leito fixo é um dos regimes mais simples na área de meios porosos e um dos mais utilizados na indústria química em várias aplicações.

O leito fluidizado é um modo de contato fluido-sólido que tem sido amplamente utilizado na indústria química, principalmente em operações de secagem e reatores. Possui a vantagem de proporcionar aos materiais altas taxas de transferências de calor e massa e um produto final homogêneo.

O leito de jorro é um modo de contato fluido-sólido indicado para partículas maiores e tem encontrado aplicações principalmente em secagem e recobrimento de partículas. Entretanto, sua aplicação a nível industrial ainda é um pouco restrita. O leito de jorro foi inicialmente desenvolvido como uma solução modificada do leito fluidizado, visando-se o tratamento de partículas maiores, para as quais geralmente não se obtinha um regime de operação adequado num leito fluidizado. A restrição da utilização do leito de jorro para capacidades altas é definida à dificuldade da manutenção de um regime fluidodinâmico estável.

A busca da estabilidade dos regimes em qualquer aplicação e para os três tipos de leitos citados é de suma importância, pois implica numa maior eficiência dos processos.

Atualmente, a definição das faixas de operação em condições estáveis, para os leitos de jorro e fluidizado, é obtida experimentalmente, sendo função da partícula, do fluido, da geometria e das dimensões do leito. Dessa maneira, o mapeamento das regiões de operação com os leitos em regime dinamicamente estável é bastante específico.

A proposta deste trabalho é o monitoramento do regime dinâmico no leito de jorro, envolvendo uma medida física que caracterize por si só a estabilidade do regime, sendo independente da partícula utilizada e das dimensões do leito.

Os objetivos do trabalho, então resumem-se em:

- estabelecer uma metodologia para identificar a estabilidade dos regimes estudados através da medida "on line" de queda de pressão no leito em tempo real, baseada na análise de flutuação de pressão;
- realizar este estudo com o leito de jorro;
- comparar os resultados obtidos para a geometria cone-cilíndrica adquiridos no presente trabalho com os resultados obtidos por Taranto (1996) para geometria bidimensional ;
- comparar os parâmetros de projeto obtidos experimentalmente para regime de jorro estável com algumas correlações encontradas na literatura;
- tentar correlacionar os valores de amplitude de flutuação da queda de pressão com as condições de operação dos leitos, como vazão e carga de partículas.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Regimes de contato Gás-Sólido

2.1.1 – Leito Fixo

O regime de leito fixo descreve a situação em que existe fluxo de gás através do leito mas não existe nenhum movimento de partículas. A carga de partículas, equivalente a uma altura do leito , produz uma pressão estática que não pode ser vencida pela vazão de gás aplicada.

O leito fixo é um dos sistemas de contato gás-sólido de concepção mais simples na área de meios porosos e um dos mais utilizados na indústria química, seja como reator de leito catalítico, como adsorvedor, trocador de calor e secador.

2.1.2 - Leito Fluidizado

A técnica de fluidização teve início comercialmente perto de 1926, na gaseificação do carvão e posteriormente com o FCC - fluid bed catalytic cracker (Geldart, 1986).

O leito fluidizado é formado pela passagem de um fluido, geralmente gás, através de um leito de partículas, que se encontram sobre um distribuidor. Acima da velocidade de mínima fluidização as partículas começam a se movimentar, exceto os sólidos que possuem forças coesivas.

O comportamento das partículas no leito fluidizado depende amplamente da combinação entre o tamanho das partículas e densidades do fluido e do sólido (Geldart (1986)). A Figura 2.1 mostra o conhecido diagrama de fluidização de Geldart comumente aplicado para se verificar o regime de fluidização.

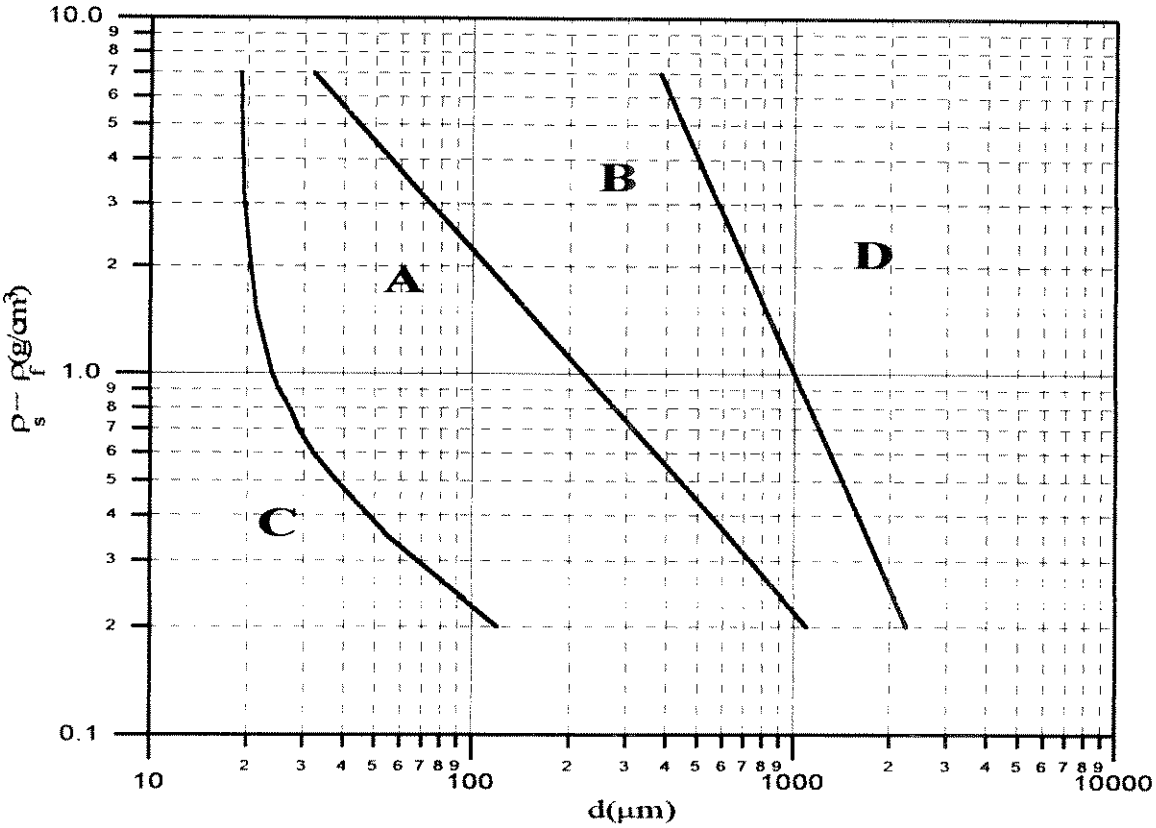


Figura 2.1 - Diagrama de Geldart (Geldart ,1986).

Existem quatro grupos de partículas, como se pode observar na Figura 2.1. No grupo C as forças interpartículas são maiores do que o fluido pode exercer na partícula, tornando a fluidização extremamente difícil. Neste grupo o tamanho das partículas é pequeno ($d_p < 20\mu m$). A transferência de calor entre a superfície das partículas e o leito é bem menor comparando com os grupos A e B.

No grupo A estão as partículas que originam leitos com boa qualidade de fluidização. Para essas partículas existe um considerável número de pesquisas por causa do grande uso em reatores catalíticos utilizando leito fluidizado. O leito de partículas deste grupo expande consideravelmente entre a velocidade de mínima fluidização (U_{mf}) e a velocidade em que inicia a formação de bolhas (U_{mb}) , pois as forças são pouco coesivas .

No grupo B as forças interpartículas são desprezíveis e as bolhas começam a se formar acima da velocidade de mínima fluidização . O tamanho das bolhas aumenta

com a altura do leito e com a velocidade em excesso do gás ($U-U_{mf}$). A fluidização de partículas desse grupo é denominada fluidização borbulhante.

No grupo D encontram-se partículas maiores e/ou densas . O regime de fluxo nesse grupo deve ser turbulento, isto é, $\rho_g U_{mf} d_p / \mu > 1000$. As partículas do grupo D são grosseiras e mais facilmente jorráveis, as forças coesivas interpartículas são menores comparadas com a força de arraste, e para partículas desse grupo, d_p é maior que 1 mm.

Portanto, partículas dos grupos A e B são adequadas à fluidização.

Algumas aplicações da fluidização em processos industriais são (Geldart (1986)):

Químicas:

Reações gás-sólido, como: manufatura de aquilonitrila, polietileno, etc.

Reações gás-sólido em que o sólido é transformado, como: combustão do carvão, gaseificação do carvão, regeneração de catalisador,etc.

Físicas:

Transferência de calor e massa entre gás e partícula, como: secagem de sólidos, absorção de solventes, refrigeração de alimentos, etc.

Transferência de calor e massa partícula-partícula ou partícula-superfície, como: granulação, recobrimento de comprimidos, recobrimento de superfícies plásticas, mistura de sólidos, etc.

Transferência de calor entre leito e superfície, como: tratamento de calor de fibras têxteis, banhos à temperatura constante, etc.

Encontra-se na literatura vários trabalhos envolvendo medidas de pressão em tempo real e flutuação de pressão em leito fluidizado.

Baeyens e Geldart (1974) estudaram o leito fluidizado em regime "slugging" em quatro diâmetros diferentes de 5,08; 7,62; 15,24 e 30,8 cm, utilizando partículas com tamanho médio entre 55 - 3380 μm e densidade de 0,85 - 2,8 g/cm^3. Concluíram que o regime "slugging" é dependente do diâmetro do leito e da diferença da velocidade superficial do gás e da velocidade requerida para fluidizar o leito. Essa diferença é chamada velocidade em excesso do gás: ($U-U_{mf}$). A variação da queda de pressão foi medida com transdutores de pressão. A altura do leito mostrou ser um fator importante na velocidade em excesso requerida para acontecer o "slug".

Atkinson e Clark (1988) analisaram a importância da escolha dos transdutores, com pequeno volume morto, isto é, o volume de tubo que conecta o transdutor ao leito

deve ser pequeno para que não ocorram ruídos. O trabalho explora o diâmetro do tubo do medidor, o comprimento do tubo e o volume morto do transdutor utilizando teoria de controle. Com os resultados experimentais foi visto que os transdutores com alto volume morto podem causar ruídos no sinal de pressão e também grandes fases de atraso entre o evento que ocorre no leito e o tempo de medida.

Fan et al (1991) fizeram um estudo estatístico da flutuação de pressão em leito fluidizado utilizando transdutores de pressão, análise de probabilidade e correlação e análise da transformada de Fourier. As causas observadas das flutuações de pressão foram : efeito da velocidade do gás, altura do leito, tamanho das partículas e o projeto do distribuidor. Esses efeitos foram também relacionados com flutuações de freqüência e amplitude. As flutuações de pressão foram utilizadas para caracterizar a qualidade da fluidização. O leito usado nos experimentos possuía um diâmetro de 0,203 m e altura de 3 m. Foram utilizadas duas placas distribuidoras com 164 furos e com diâmetros dos furos de 0,00158 e 0.00316 m. Dois tipos de arreia foram utilizadas nos experimentos, com diâmetros de 0,000711 e 0,000491 m.

Algumas conclusões importantes do trabalho:

- a amplitude da flutuação de pressão está relacionada com a densidade do leito e com as bolhas, que são as fontes das flutuações de pressão;
- o perfil da densidade de probabilidade do sinal da flutuação de pressão possui diferentes formatos para diferentes pontos no leito;
- as análises de flutuação de pressão determinadas pela função densidade, freqüência e função densidade espectral de potência são úteis para monitorar mudanças nas condições do leito e para diagnosticar anormalidades durante a operação.

Cai et al (1990) conduziram os experimentos em leitos fluidizados convencional, de diâmetro 0,139 m e ,bidimensional, de 0,012 x 0,3 m . Dois tipos de partículas esféricas foram estudadas : sílica gel, grupo A : $d_p = 476\ 10^{-6}$ m, $\rho_p = 834$ Kg/m^3; e sílica gel, grupo B: $d_p = 280\ 10^{-6}$ m, $\rho_p = 706$ Kg/m^3 . Foram instalados dois transdutores de pressão na parede do leito com distância vertical de 0,1 m para se obter as flutuações de pressão para a fase densa. Os resultados foram plotados como magnitude da flutuação de pressão média por velocidade superficial do gás, onde obteve-se a velocidade crítica (U_c), definida como velocidade correspondente ao pico da curva (velocidade de transição da fluidização borbulhante para turbulenta).

Brereton e Grace (1992) interpretaram dados de flutuação de pressão para identificar a transição para fluidização turbulenta. Os experimentos foram feitos com partículas de areia (d_p = 148 μm), à temperatura ambiente em uma coluna de diâmetro de 152 mm. As observações experimentais foram: velocidade superficial do gás de 0,12 m/s caracterizava a transição de borbulhante para "slugging". Na faixa de 0,12< U< 1,0 m/s o regime "slugging" persistia. Acima de 1 m/s o transdutor de pressão registrou pequenas flutuações com altas amplitudes. Para velocidade superficial do gás maior que 4 m/s, resultou em sinais de pequenas amplitudes e altas freqüências. Observaram que a transição para fluidização turbulenta é influenciada pelos seguintes fatores: temperatura , pressão e distribuição do tamanho da partícula.

Os autores Dhodapkar e Klinzing (1993) estudaram a qualidade do regime de fluidização por flutuação de pressão, para partículas do grupo A e B. Os experimentos foram realizados em duas colunas em acrílico para ser possível a visualização: 82,5 e 152,5 mm de diâmetro. Características dos materiais utilizados: esferas de vidro, d_p = 450,110 e 55 10^{-6} m, ρ_p = 2400 Kg/m^3 e alumina, d_p = 400 10^{-6} m e ρ_p = 3200 Kg/m^3.

As seguintes conclusões foram obtidas do trabalho:

- a análise no domínio de freqüência é mais utilizada do que a análise da amplitude, para se estabelecer uma única relação entre estado de fluidização e flutuação de pressão;
- o comportamento da flutuação de pressão em leitos fundos (H/D>5) é significativamente diferente em comparação com leitos rasos, pois ocorre uma variação contínua no estado de fluidização ao longo do leito devido à expansão do gás;
- o regime slug é indesejável por reduzir significativamente o contato gás/sólido e por causar vibração no leito;
- a flutuação de pressão se mostrou uma função complexa do diâmetro do leito, propriedades das partículas, tipo do distribuidor, da localização dos medidores de pressão e da altura estática do leito;
- a medida de flutuação de pressão é um método simples de controle e monitoramento da qualidade da fluidização.

Kage et al (1993) utilizaram análise de flutuação de pressão como método para diagnosticar as condições de fluidização. A função densidade espectral de potência foi obtida por análise de transformada de Fourier (Fast Fourier Transform (FFT)). Foram

detectadas três freqüências principais : geração das bolhas, erupção das bolhas e freqüência natural do leito fluidizado (F_g, F_e e F_b, respectivamente). Foram utilizados dois leitos: um bidimensional de 0,25 x 0,01 m e 0,5 m de altura com partículas de diâmetro de 0,161 mm e outro convencional de diâmetro de 0,146 m com 1 m de altura e partículas de 0,057; 0,161 e 0,456 mm; construídos em resina acrílica para permitir a visualização. A relação entre a freqüência de geração das bolhas e a queda de pressão no distribuidor foi obtida por análise da flutuação de pressão, medida no leito a várias aberturas do distribuidor. O efeito da queda de pressão no leito e da abertura do distribuidor em F_g, F_e e F_b, confirma que a análise da flutuação de pressão por FFT foi útil para detectar a variação no "estado" de fluidização.

O trabalho conclui que a variação do "estado" de fluidização está relacionada com a geometria do distribuidor, por causar diferenças significantes na flutuação de pressão.

Chehbouni et al (1994) realizaram experimentos com areia e FCC com transdutores de pressão diferencial e absoluto mostrando que U_c é a velocidade em que as bolhas e slugs atingem o tamanho máximo. Para velocidade superficial do gás maior que U_c, a quebra das bolhas aumentam enquanto a formação e coalescência dessas diminuem. Foram utilizados dois leitos com diâmetros de 82 e 200 mm. Os experimentos foram conduzidos à temperatura ambiente e pressão atmosférica e com uma altura de leito estático de 450 mm. Quatro transdutores absolutos e um diferencial foram instalados. Utilizando os transdutores absolutos observou-se que para cada tipo de partículas sólidas, a velocidade crítica U_c e o valor do desvio padrão não foram afetados pela posição do medidor de pressão, colocados na fase densa do leito. O transdutor absoluto responde a qualquer flutuação de pressão que ocorre dentro do leito.

A dinâmica do leito fluidizado é caracterizada através do aumento da velocidade superficial do gás, que resulta em um aumento no desvio padrão da flutuação de pressão, devido ao aumento da formação das bolhas e da coalescência delas até U_c. Posteriormente ocorre um decréscimo no desvio padrão, quando as bolhas grandes começam a se quebrar, para velocidade maior que U_c. Para as partículas de FCC o valor de U_c encontrado foi de 0,26 m/s e para areia foi de 0,75 m/s.

Os resultados experimentais obtidos com os transdutores absolutos indica que existe somente uma velocidade de transição antes do início da fluidização circulante.

Utilizando o transdutor diferencial, obteve-se um contraste nas respostas, pois a distância entre os medidores de pressão alterou os valores encontrados de U_c. A flutuação de pressão mostrou-se função da densidade do leito e do tamanho das bolhas. A resposta do transdutor diferencial para a flutuação de pressão local gerada pelas bolhas ou slugs é detectada pela passagem das bolhas pelos dois medidores colocados a uma distância determinada.

Na Figura 2.2 estão as curvas típicas de pressão por tempo que foram obtidas com transdutores diferencias e também as curvas de densidade espectral de potência.

Algumas observações sobre essas curvas (Figura 2.2):

- para U = 0,1 m/s até U_c, a amplitude da flutuação de pressão e o nível de energia da densidade espectral aumentam com a velocidade superficial do gás. As flutuações tornam-se mais regulares, isso traduz-se dentro de uma pequena faixa de freqüência (freqüência dominante). O comportamento é devido à formação e coalescência das bolhas e slugs.
- acima de U_c, no regime turbulento, aumentando a velocidade superficial, a flutuação de pressão torna-se mais irregular, a amplitude e a densidade espectral diminuem. A expansão da densidade espectral sobre alta freqüência, e a freqüência dominante não mais existe. A irregularidade do fluxo vai aumentando, atingindo a velocidade de transporte, onde as flutuações desaparecem.

Portanto, U_k somente é detectada com transdutor diferencial, e é função da distância entre dois medidores e da posição vertical dos medidores com respeito ao leito fluidizado. Para os transdutores absolutos, os valores experimentais de U_c são médios para o leito inteiro. Para o transdutor diferencial U_c é um valor médio para uma fração de leito entre dois medidores.

A velocidade U_k tem sido observada experimentalmente por alguns autores utilizando transdutores diferenciais, mas não tem existência física.

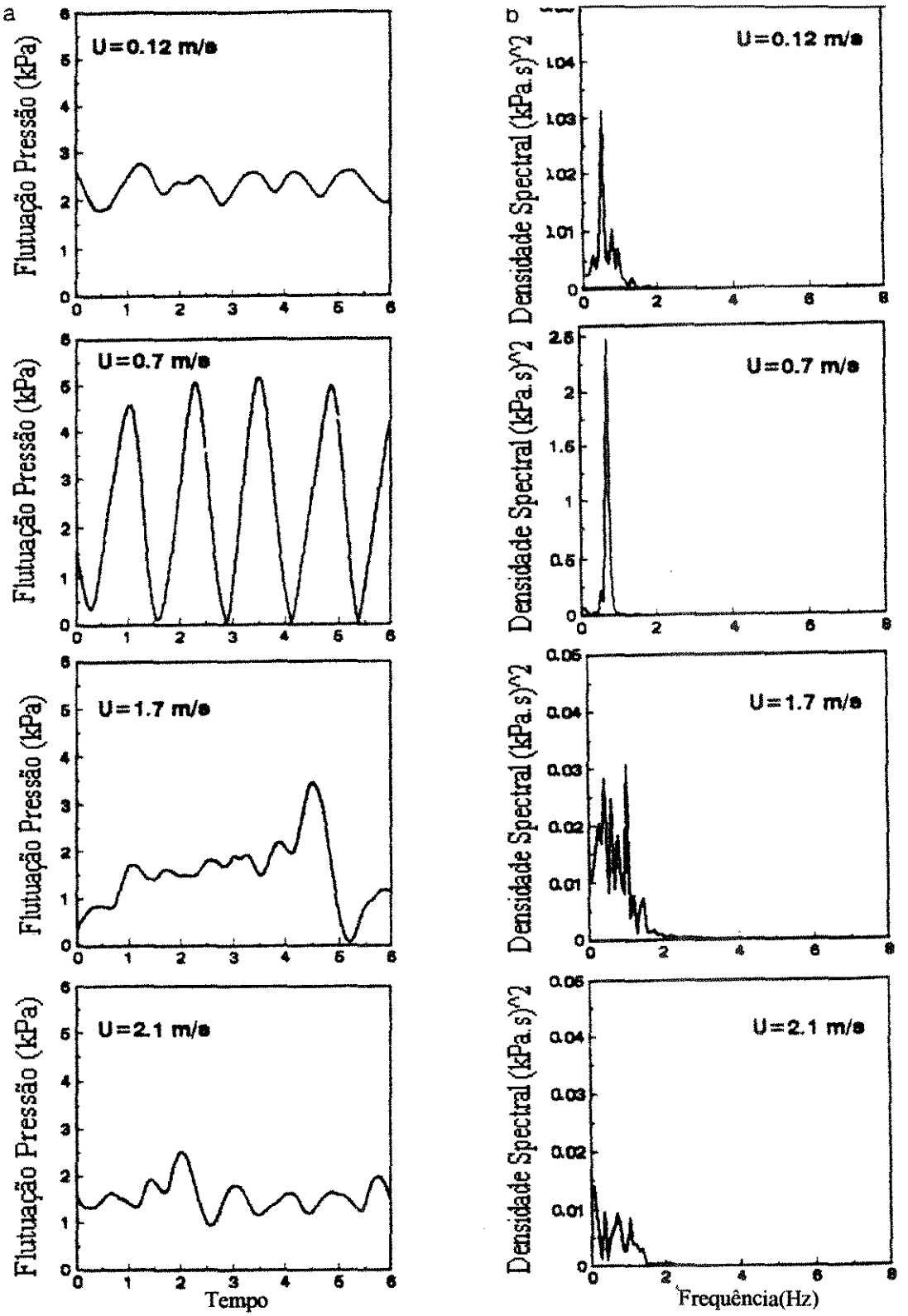


Figura 2.2 - (a) flutuações de pressão para transdutor diferencial, D = 82 mm, partículas - areia, z = 50 -250 mm. (b) densidade espectral de potência relacionada com as flutuações de pressão, D = 82 mm, partículas - areia, z = 50 - 250 mm (Chehbouni et al, 1994).

Wilkinson (1995) utilizou desvio padrão da flutuação de pressão para determinar a velocidade de mínima fluidização (U_{mf}) através da metodologia proposta por Puncochar et al (1985). Os experimentos foram realizados em dois leitos: 0,038 e 0,120 m de diâmetro. As flutuações de pressão foram medidas com transdutores diferenciais. Os resultados para U_{mf} foram obtidos para partículas do grupo B,onde o início da fluidização é coincidente com o início do regime borbulhante e para partículas do grupo A para as quais as velocidades de U_{mf} e U_{mb} são distintas.

Shibuya et al (1996) pesquisaram a transição entre os regimes de fluidização (particulada, borbulhante, turbulenta e rápida), monitorando a flutuação de pressão diferencial e calculando o desvio padrão da flutuação de pressão e a concentração de sólidos (ε_s). O leito foi construído em acrílico com diâmetro de 97 mm e altura de 3 m. Medidores de pressão foram instalados verticalmente na parede do leito e ligados a um computador via um A/D para proceder a aquisição de dados em tempo real. Os experimentos foram conduzidos a três diferentes alturas de leito estático: 0,4; 0,7 e 1,5 m acima da placa distribuidora. O desvio padrão da flutuação de pressão diferencial mostrou-se principalmente relacionado com a concentração de sólidos em regime de leito fluidizado.

Os resultados experimentais indicaram concentrações de sólidos distintas para os diferentes regimes:

- para fluidização bubbling, ε_{sb} (particulada) $> \varepsilon_s > 0,35$;
- para fluidização turbulenta, $0,15 < \varepsilon_s < 0,35$;
- para fluidização rápida, $0,05 < \varepsilon_s < 0,15$; e
- para transporte pneumático: $\varepsilon_s < 0,05$.

Os resultados foram confirmados com dados encontrados na literatura.

Bai et al (1996) estudaram a velocidade de transição da fluidização borbulhante para turbulenta com a mistura das partículas SS - sílica sand e FCC. A mistura binária constitui-se de FCC como partículas finas e SS partículas grosseiras. A fração de partículas grosseiras variou de 0 a 100%. O princípio da fluidização turbulenta, U_c, foi determinado pela medida de flutuação de pressão em função da fração de partículas grosseiras/pesadas. A velocidade de transição é influenciada pelos seguintes fatores: tamanho e densidade das partículas, geometria do leito, temperatura e pressão de operação.

Os resultados obtidos foram a variação do desvio padrão da flutuação de pressão (σ) em função da velocidade superficial do gás (U). Para cada fração de partículas grosseiras, a transição da fluidização borbulhante para turbulenta é caracterizada pela variação de σ com U. Observou-se um aumento de σ com o aumento da velocidade do gás para $U < U_c$, devido ao aumento da formação de bolhas e da coalescência; e um decréscimo de σ quando as bolhas grandes começam a quebrar, para velocidades maiores que Uc. Geralmente o desvio padrão da flutuação de pressão aumenta com o aumento da fração de partículas grosseiras, a uma dada velocidade do gás. A adição de partículas grosseiras resultou num aumento na heterogeneidade do leito devido principalmente à formação de bolhas grandes e à coalescência dessas.

Na Figura 2.3 observa-se as flutuações de pressão por tempo antes e depois da velocidade de transição.

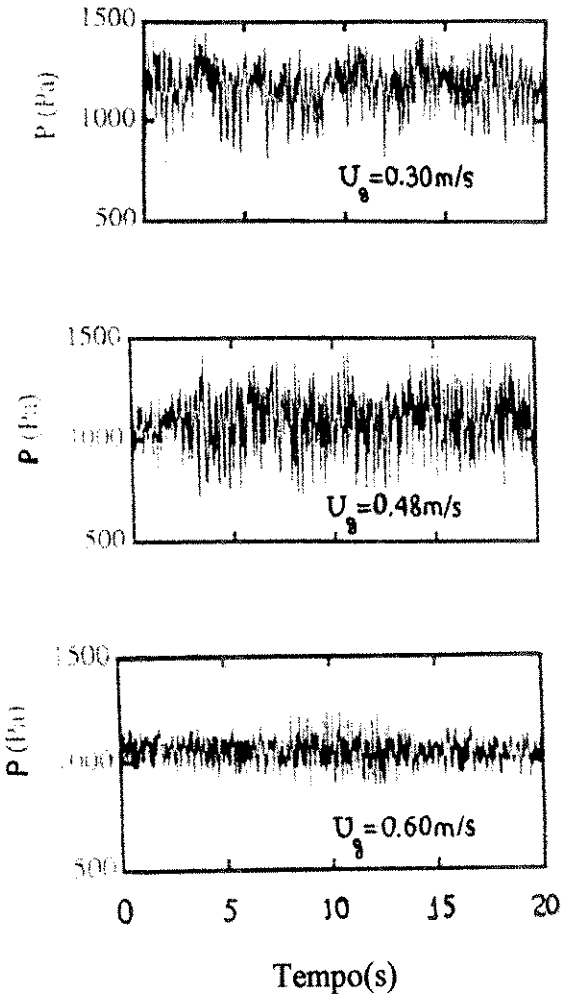


Figura 2.3-Flutuações de P (X_c= 0,U_c= 0,38m/s), onde a velocidade do gás (U_g) varia de bubbling (0,3 m/s) para turbulenta (0,6 m/s), Bai et al, 1996.

2.1.3 - LEITO DE JORRO

O leito de jorro teve sua origem como uma solução modificada do leito fluidizado, visando-se o tratamento de partículas maiores, para as quais não se obtinha um regime de operação adequado num leito fluidizado. É um regime que se caracteriza pelo intenso contato entre as partículas e o gás.

Consiste de um recipiente geralmente de geometria cone-cilíndrica contendo partículas de um tamanho considerável $d_p > 1$ mm. O fluido entra verticalmente por uma entrada centralizada na base. Se a vazão de fluido for alta o suficiente, o resultado será um fluxo de partículas subindo rapidamente pelo centro do leito, que depois de atingirem uma determinada altura, caem de volta à região anular, descendo junto à parede do recipiente, onde caem lentamente até reencontrarem o fluxo central e recomeçarem o trajeto, num movimento cíclico.

A altura do leito tem um papel de importância relevante para a estabilidade do regime de jorro (Mathur e Epstein, 1974). A Figura 2.4 ilustra a transição de um leito fixo para um leito de jorro, depois para um leito borbulhante e para o regime "slugging", apresentando os regimes mais comumente encontrados nos processos envolvendo leito de jorro. Para uma mesma configuração de leito e partículas, os regimes apresentados na Figura 2.4 poderiam representar a transição de um leito fixo a um em regime de "slugging" em relação ao aumento da vazão de gás que entra no leito. Basicamente , o regime em leito de jorro depende diretamente da vazão do gás, do tamanho, forma e massa específica das partículas e da altura do leito. É possível estabelecer um valor máximo para essa altura, que é função dos parâmetros geométricos do leito, de modo a garantir jorro estável.

O leito de jorro pode ser encontrado em três configurações diferentes:

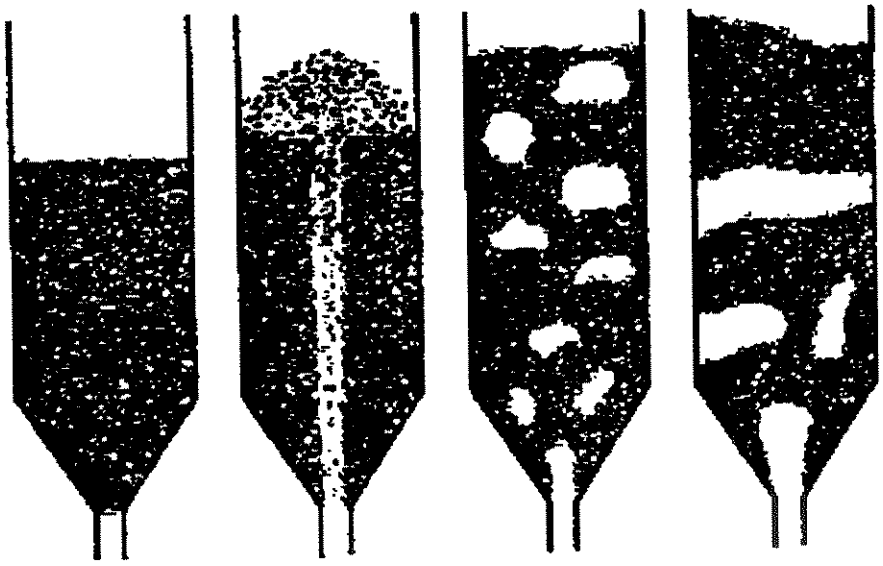
- Cônico
- Cone-Cilíndrico
- Bidimensional

O mecanismo fluidodinâmico se divide em duas fases:

- Fase Central - Região de Jorro: que é diluída e ascendente e dinamicamente similar ao transporte pneumático;
- Fase Anular - Região densa com movimento descendente de sólido onde o fluido escoa em contra-corrente com as partículas.

Dentre as aplicações do leito de jorro temos:

- Secagem - onde na região de jorro ocorrem as transferências de calor e massa convectivas e na anular as difusivas,
- Misturadores - o movimento cíclico promove uniformidade das partículas,
- Resfriamento/Aquecimento,
- Granulação de pastas e soluções ,
- Recobrimento de partículas - comprimidos, sementes, fertilizantes.



Leito Fixo | **Leito de Jorro** | **Leito Borbulhante** | **Regime "Slugging"**

Figura-2.4: Regimes Dinâmicos obtidos em leito de jorro (Mathur e Epstein, 1974)

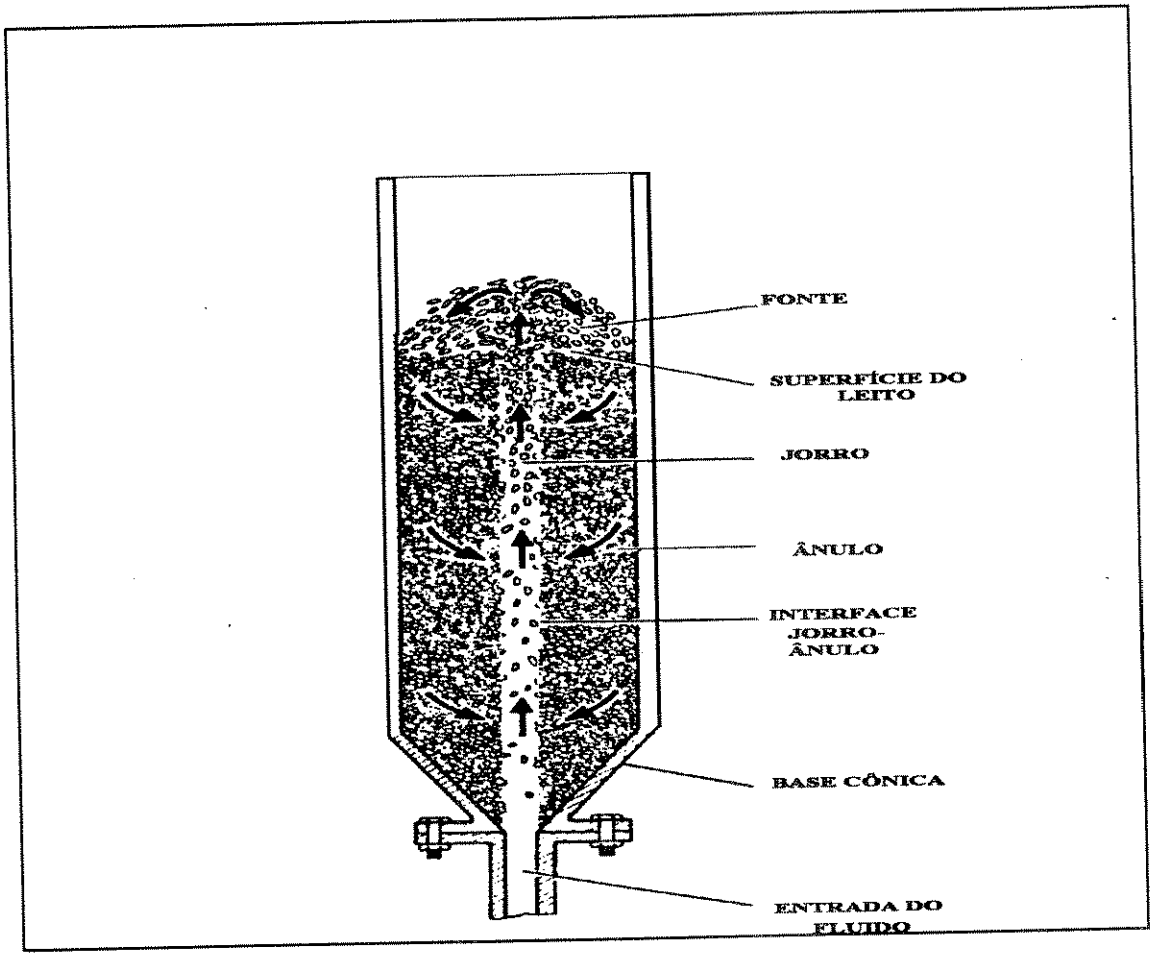


Figura-2.5: Esquema de um leito de jorro

(Mathur e Epstein, 1974)

2.1.3.1 - Fluidodinâmica do Processo

O mecanismo de transição de um leito fixo para um leito de jorro é melhor descrito com referência ao gráfico de queda de pressão-velocidade superficial do gás de entrada. As etapas observadas na Figura 2.6 são:

- a baixas vazões , o gás passa simplesmente sem perturbar as partículas, a queda de pressão aumenta com o aumento do fluxo de gás (região A-B);
- para um dado valor de vazão, o fluxo de gás se torna suficientemente alto para empurrar as partículas na vizinhança da entrada de ar, causando a formação de uma

cavidade imediatamente acima da entrada de ar, e de um arco compacto que oferece grande resistência ao fluxo de gás. A queda de pressão ainda continua a aumentar;

- com um acréscimo na vazão de gás, a cavidade se alonga para um jorro interno, de forma que a queda de pressão no leito aumente até o seu valor máximo, no ponto B. A velocidade superficial correspondente à esse ponto é u_m;
- quando a vazão é aumentada além do ponto B, a altura da cavidade interna se torna grande em comparação ao leito fixo acima dela. A queda de pressão então cai seguindo a linha B-C;
- quando o ponto C é atingido, uma quantidade de partículas já foram tiradas da região central e ocorre uma expansão no leito;
- com um pequeno aumento da vazão além do ponto C, que é chamado de jorro incipiente, o jorro interno rompe a superfície do leito. Quando isso ocorre, a concentração de sólidos na região diretamente acima do jorro interno diminui abruptamente, causando uma diminuição da queda de pressão ao ponto D, onde o leito torna-se móvel e o jorro estável se instala;
- aumentando-se ainda mais a vazão, o gás adicional simplesmente passa pela região de jorro, tornando a fonte mais alta sem qualquer efeito significativo na queda de pressão total. Portanto, a queda de pressão além desse ponto se mantém constante.

Os valores da velocidade de jorro incipiente (C) e do início do jorro (D) não são exatamente reprodutíveis. Uma velocidade mais facilmente reprodutível é a velocidade de jorro mínimo que é obtida diminuindo-se a velocidade do gás lentamente. O leito se mantém em jorro até o ponto C', que representa a condição de jorro mínimo. Uma pequena redução da velocidade do gás causa o colapso do jorro e a queda de pressão muda para B'. Diminuindo-se mais ainda a vazão, a queda de pressão cai de acordo com B'- A. Contudo, a curva principal agora fica abaixo da obtida com o aumento da vazão, visto que a energia requerida pelo gás para penetrar nos sólidos não é mais consumida durante o colapso do jorro.

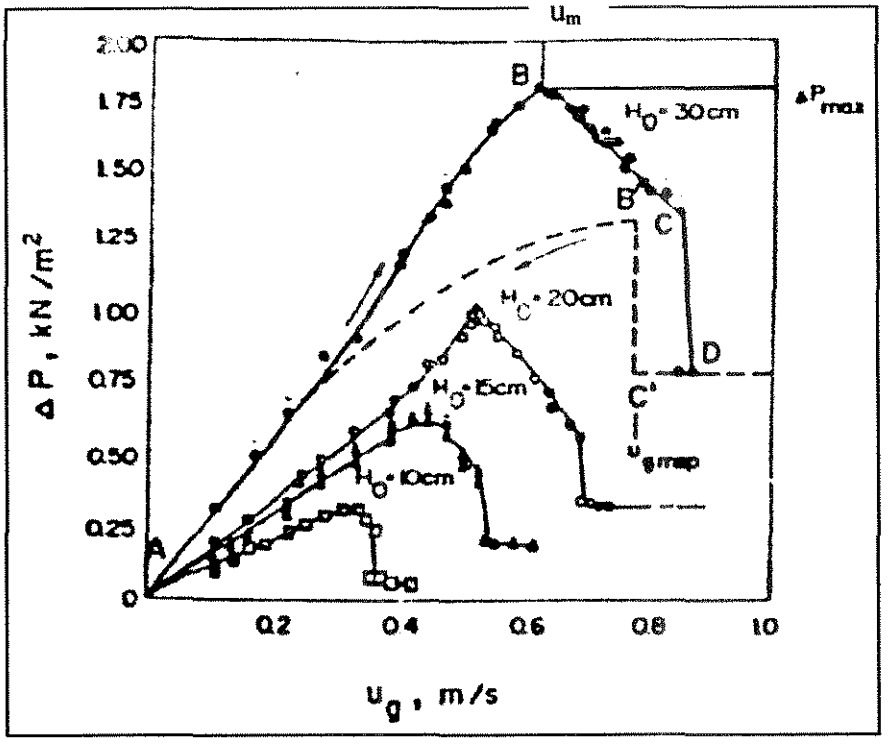


Figura 2.6 - Curva típica de queda de pressão-velocidade superficial do gás (Mathur e Epstein, 1974).

O pico da queda de pressão, que ocorre na curva de queda de pressão versus vazão de gás, pode ser atribuído à energia requerida pelo gás para romper o leito fixo e formar um jorro interno na parte inferior do leito. Se esse jorro interno vai se desenvolver para um leito de jorro estável ou não, dependerá de condições serem satisfeitas, tal como o tamanho das partículas, o diâmetro do orifício de entrada de ar, altura do leito, etc.

2.1.3.2 - Estabilidade do Jorro

A estabilidade do jorro é definida por alguns fatores, tais como:

- Geometria do Leito
- Propriedades dos Sólidos
- Fluxo de Gás

O projeto do leito é uma etapa primordial nos trabalhos a serem desenvolvidos, e uma das variáveis importantes é a altura máxima de jorro estável, pois a partir desta

temos uma idéia de qual altura de leito deve ser usada. Existem várias correlações para esse parâmetro presente na literatura.

Becker (1961) sugere, a partir de experimentos para vários materiais e leitos, um valor crítico para a razão diâmetro do orifício e diâmetro da coluna de $D_i / D_c = 0{,}35$. Da mesma forma Nemeth e Pallai (1970) propõe um valor de $D_i / D_c = 0{,}30$ e sugerem um valor para D_c/d_p entre 40 e 50.

A altura máxima do jorro estável depende do tamanho, forma e densidade das partículas e das dimensões do leito. É possível estabelecer um valor máximo para essa altura, que é função dos parâmetros geométricos do leito, de modo a garantir jorro estável.

Mathur e Epstein (1974):

O valor de H_M diminui com o aumento do diâmetro de orifício de entrada de ar, até um valor limite, quando o jorro perde a estabilidade.

$$H_M = 0{,}168 . \frac{d_p^{1/3} . D_c^{8/3}}{D_i^2} \tag{2.1}$$

As condições para a correlação de Mathur e Epstein para o cálculo da altura máxima de jorro estável foram as seguintes:

- $D_c = 10{,}2 - 22{,}9$ cm
- $d_p = 1 - 3{,}7$ mm
- $\theta = 60^0$
- $\rho_s = 923 - 2667$ Kg/m^3
- $\varepsilon = 0{,}358 - 0{,}5$

Malek e Lu (1965) propuseram a seguinte correlação para cálculo da altura máxima de jorro estável:

$$\frac{H_M}{D_c} = 336 . \left(\frac{D_c}{d_p}\right)^{0,75} . \left(\frac{D_c}{D_i}\right)^{0,4} . \left(\frac{\rho_f}{\rho_S}\right)^{1,2} . \left(\frac{1}{\psi}\right)^2 \tag{2.2}$$

Com algumas restrições:

- $D_c = 10{,}2 - 22{,}9$ cm
- $d_p = 1 - 3{,}7$ mm
- $\theta = 60^0$
- $\rho_s = 923 - 2667$ Kg/m^3
- $\varepsilon = 0{,}358 - 0{,}5$

O trabalho dos autores Morris et al (1982) envolveu o desenvolvimento de uma Equação para a predição da altura máxima de jorro estável, levando em conta o efeito da esfericidade, visto que este fator é de extrema importância para estabilidade do regime de jorro. Chegaram às seguintes conclusões: a Equação considera o efeito do fator de forma da partícula, H_M pode aumentar significativamente com a não esfericidade das partículas e o efeito da esfericidade em H_M diminui quando o tamanho da partícula é reduzido; o diâmetro do orifício de entrada do leito deve ser maior para partículas não esféricas do que para esféricas.

Outras correlações para o cálculo de H_M são colocadas a seguir:

Lefroy e Davidson (1969):

$$H_M = 0{,}192.\frac{d_p.D_c^4}{D_i^2.D_s^2} \tag{2.3}$$

Para : $D_c = 10{,}2 - 22{,}9$ cm e $d_p = 1 - 3{,}7$ mm

- $\theta = 60^0$
- $\rho_s = 923 - 2667$ Kg/m^3
- $\varepsilon = 0{,}358 - 0{,}5$

Littman et al (1979):

$$H_M = 0{,}345.\left(\frac{D_S}{D_c}\right)^{-0{,}384}.\left(\frac{D_c^2 - D_S^2}{D_S}\right) \tag{2.4}$$

A correlação foi desenvolvida para as seguintes condições:

- $D_c = 7{,}6 - 30{,}5$ cm
- $d_p = 7{,}6 - 9{,}0$ mm

Çeçen et al (1994):

$$\frac{H_M}{D_c} = 0{,}99 \cdot \left[\frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \cdot \frac{U_{mf} \cdot u_T}{g \cdot D_c} \right]^{-0{,}144} \tag{2.5}$$

Com as seguintes limitações:

- $D_c = 8{,}0 - 15{,}2$ cm
- $d_p = 1 - 3{,}7$ mm
- $Di / d_p < 20$

Morgan e Littman (1982):

$$\frac{H_M \cdot D_i}{D_c^2} = 0{,}218 + \frac{0{,}00380}{\varepsilon_{mf}^{1,5} \cdot g(\psi)} \cdot \frac{D_i}{d_p} \tag{2.6}$$

onde:

$$g(\psi) = \left(\frac{U_{mf}(\psi < 1)}{U_{mf}(\psi = 1)} \right) \cdot \left(\frac{u_T(\psi < 1)}{u_T(\psi = 1)} \right)$$

- $D_c = 10{,}0 - 22{,}9$ cm e $D_i = 1{,}0 - 5{,}1$ cm
- $d_p = 1{,}48 - 8{,}86$ mm e $\rho_s = 633 - 2339$ Kg/m^3

As transições entre regimes ou condições que propiciam a instalação de um regime podem ser apresentados através de diagramas de fase, que levam em consideração as características do leito, das partículas e da vazão do gás (Mathur e Epstein, 1974). O diagrama de fase então interpreta uma dada combinação de leito e partículas como se pode observar na Figura 2.7.

O ângulo da seção cônica no leito facilita o fluxo de sólidos para a região anular. Com a base reta ao invés de cônica uma zona de sólidos estagnado pode ser formada na base. O limite desse ângulo depende do atrito interno das partículas, e para maioria das partículas o ângulo fica entre 40^0 e 60^0.

Existe uma faixa de valores para a velocidade do gás que proporciona o jorro estável, e depende da geometria do leito, tamanho e forma das partículas. Velocidades abaixo da faixa não conseguem romper o jorro e acima podem acarretar regimes instáveis como "slugging".

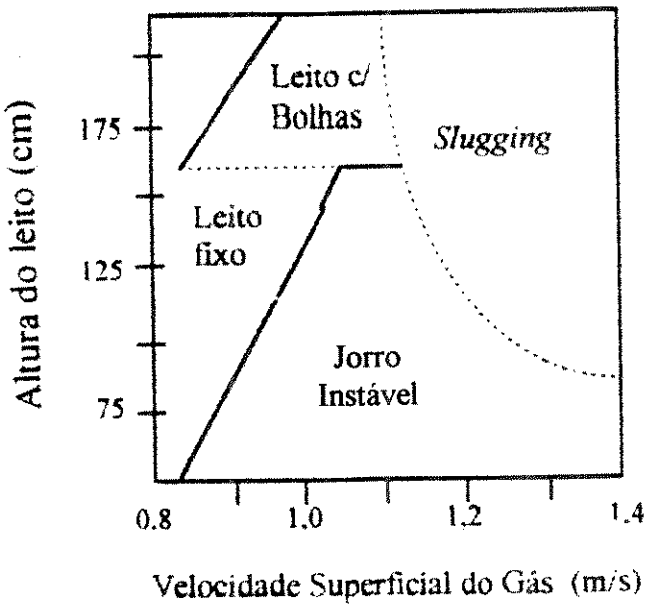


Figura 2.7 a - Diagramas de fase, trigo, d_p = 3,2 x 6,4 mm,D_c = 15,2 cm, D_i = 1,25 cm (Mathur e Epstein, 1974).

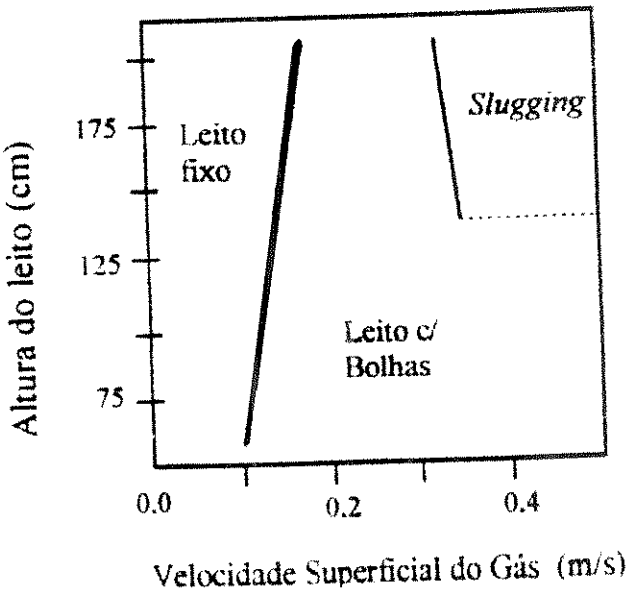


Figura 2.7 b - Diagrama de fase, areia, d_p = 0,42 - 0,83 mm, D_c = 15,2 cm, D_i = 1,25 cm (Mathur e Epstein, 1974).

Grace et al (1987) obtiveram estabilidade do jorro para diversos diâmetros de orifício e de partícula trabalhando com um leito de D_c = 0,91 m , D_i = 76,2; 92,1; 101,6 e 114,2 mm, d_p = 3,45; 4,7 e 6,7 mm. Para um valor de D_i/d_p maior que 30, foi verificado que não se atinge jorro estável. Este valor limite é considerado importante no scale up do leito de jorro. Como os experimentos foram conduzidos num leito grande (0,91 m), observou-se um aumento de zonas mortas e um aumento relativo na queda de pressão no orifício de entrada.

O único trabalho encontrado na literatura sobre medidas das flutuações da queda de pressão em tempo real para leito de jorro foi o de Taranto (1996), que realizou estudos sobre monitoramento de regimes em leito de jorro bidimensional através da análise dos espectros de potência obtidos por medidas da queda de pressão em tempo real. O estudo mostrou a viabilidade de se utilizar medidas de flutuação da queda de pressão para obtenção de um método de identificação dos padrões de regimes.

Foram utilizadas partículas de soja e milho, com diâmetros de 0,0065 e 0,0076 m, e com esfericidades de 0,98 e 0,75. Leitos com largura de 90 e 50 cm foram utilizados.

Os dados de queda de pressão em tempo real foram coletados com uma taxa de amostragem de 100 Hz e com um tempo de aquisição de dados de 11 s para cada corrida. Os gráficos de queda de pressão por tempo foram construídos e observou-se que a diferença entre eles reside principalmente no espaçamento entre as oscilações e uma tendência de um menor número de períodos de oscilação para o regime de slugging em relação ao jorro estável, e também do jorro estável em relação ao leito fixo (Figuras 2.8, 2.9, 2.10).

Foi obtido um espectro unimodal, para queda de pressão no leito, com pico entre 4 e 5 Hz, indicando jorro estável para tamanhos e geometrias de leitos distintos e partículas de diferentes formas e diâmetros (Figura 2.11). A presença de dois picos no espectro representa um estado onde o jorro começa a apresentar sinais de instabilidade e o regime "slugging" está na iminência de se instalar (Figura 2.12). Para leitos em regimes "slugging", situação em que não existe um fluxo definido pelo centro do leito, os espectros apresentaram somente um pico na região de 1 e 2 Hz (Figura 2.13).

O procedimento apresentado, além de proporcionar o monitoramento do processo também pode ser usado como parte de um controlador.

Uma das grandes vantagens desse procedimento, é o de não necessitar das variáveis do processo, como tamanho, forma das partículas, carga, vazão do gás, etc..., utilizando somente a variável de estado, a queda de pressão, para identificar o regime de jorro estável.

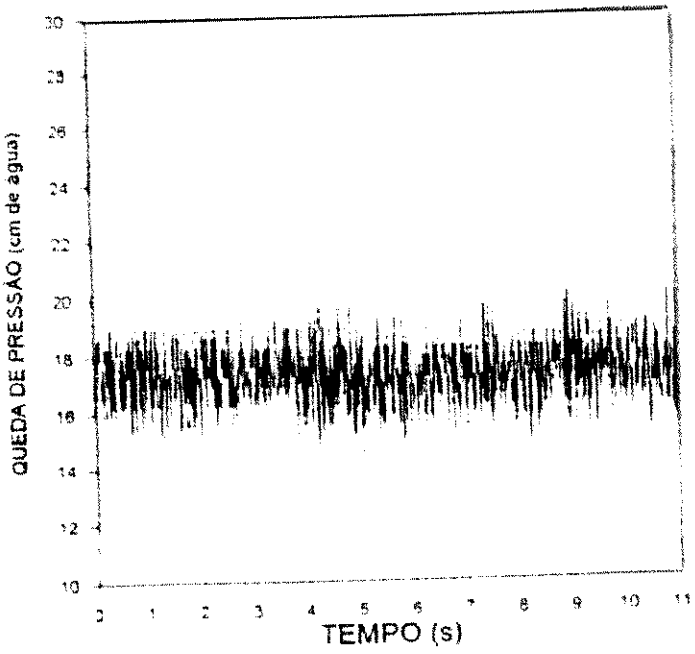


Figura 2.8 – Queda de pressão vs. Tempo, leito fixo - Milho, D_c = 50 cm, ângulo base 45^0 (Taranto, 1995).

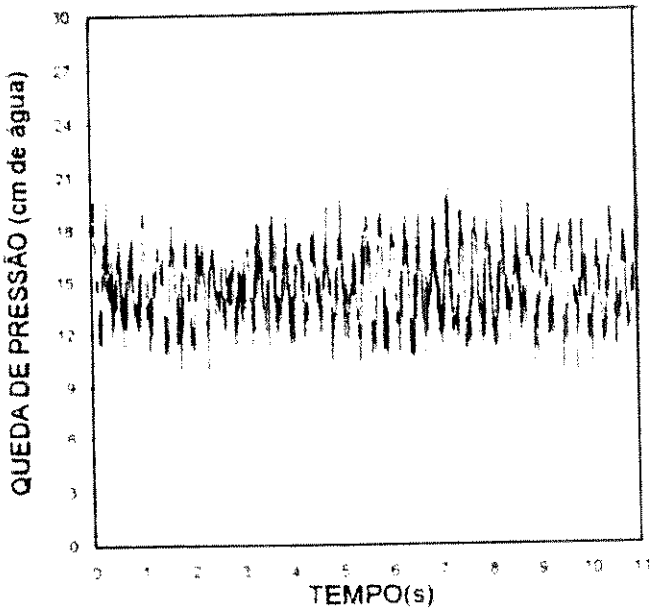


Figura 2.9 – Queda de pressão vs. Tempo, jorro estável- Milho,D_c = 50 cm, ângulo base 45^0 (Taranto, 1995).

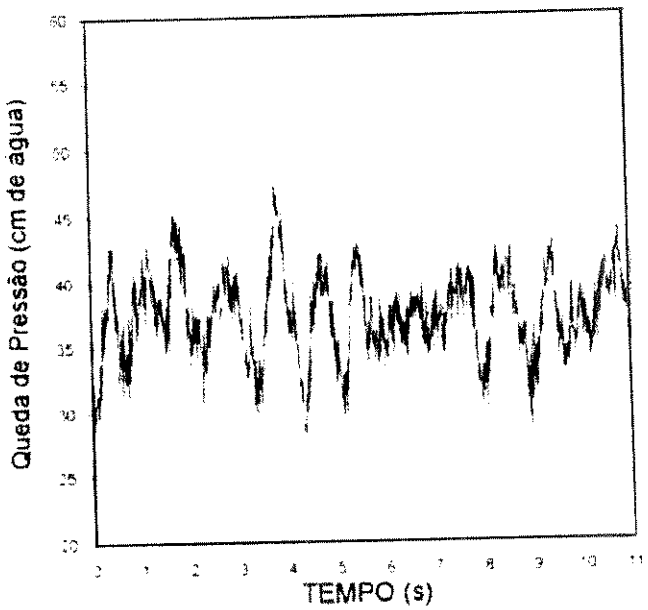


Figura 2.10 - Queda de pressão vs. Tempo, jorro estável- Milho, D_c = 50 cm, ângulo base 45^0 (Taranto, 19960).

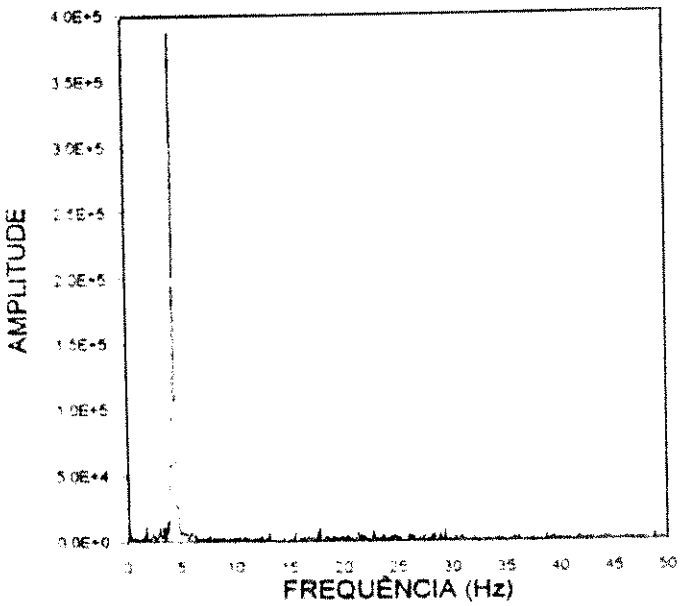


Figura 2.11 - Espectro de Potência para regime de Jorro Estável - Milho, Dc=50cm, 45° (Taranto,1996)

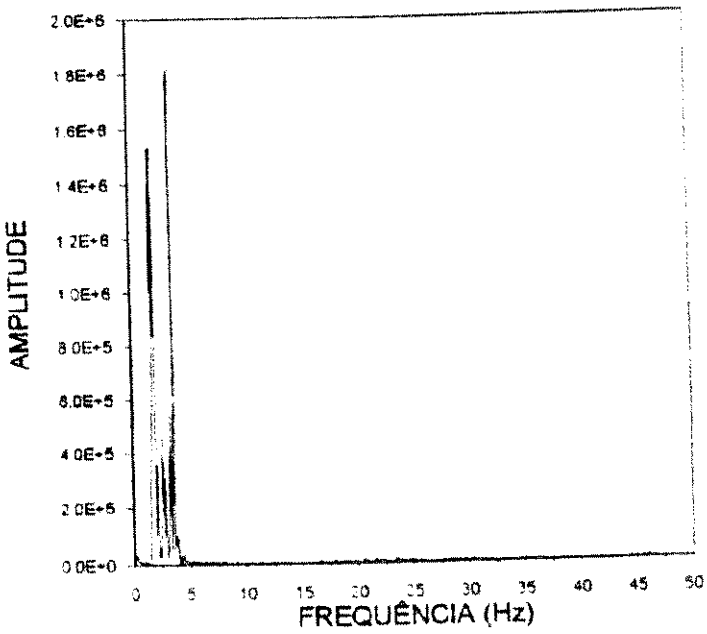


Figura 2.12 - Espectro de Potência - Instabilidade no Jorro - Milho D_c = 50 cm ângulo base 45^0 (Taranto, 1996).

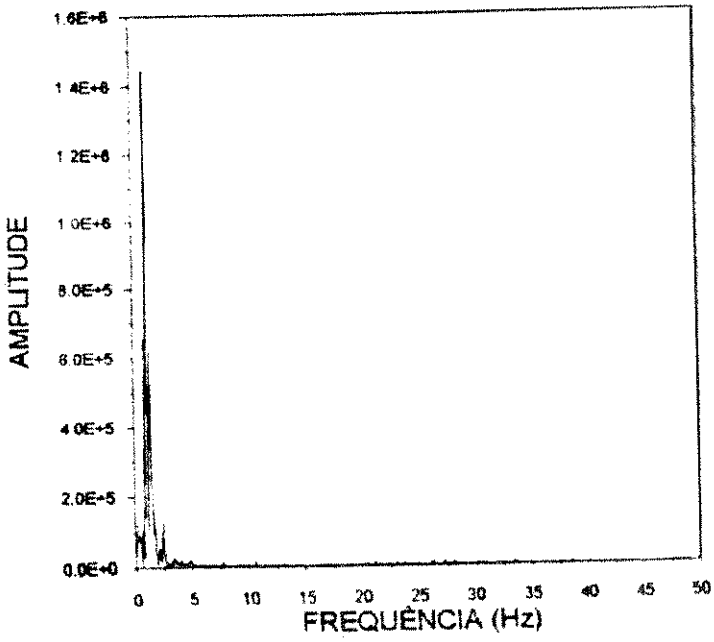


Figura 2.13 - Espectro de Potência - Regime "Slugging" - Milho D_c = 50 cm ,ângulo base 60^0 (Taranto, 1996).

2.1.3.3 – Parâmetros Relevantes de Projeto de Leito de Jorro

Na literatura são encontradas várias correlações para cálculo dos parâmetros de projeto de leitos de jorro, como: altura máxima de jorro estável, queda de pressão máxima, de jorro estável e de jorro mínimo e velocidade de jorro mínimo.

A importância da determinação desses parâmetros de projeto é a seguinte:

- através da queda de pressão máxima podemos calcular a potência do soprador necessária para atingir o jorro;
- a queda de pressão de jorro estável, juntamente com a velocidade de jorro mínimo determinam a potência de operação do leito;
- a altura máxima de jorro estável limita a carga de sólidos a ser utilizada no leito.

Abaixo são mostradas algumas correlações encontradas na literatura abrangendo a queda de pressão máxima, de jorro estável, de jorro mínimo e velocidade de mínimo jorro. As equações para altura máxima de jorro estável já foram escrita no item 2.1.3.2.

Pallai e Nemeth (1969):

$$-\Delta P_M = H.(\rho_s - \rho_f).(1-\varepsilon).g = H.\rho_b.g \tag{2.7}$$

- Para $D_c = 10{,}0 - 30{,}0$ cm e $H / D_c < 20$

Yokogawa e Isaka (1971):

$$-\frac{\Delta P_M}{H.\rho_b.g} = \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{0{,}14.\frac{(D_c - D_i)}{H}} \tag{2.8}$$

Com as seguintes limitações:

- $D_c = 10{,}0 - 20{,}0$ cm
- $D_i = 0{,}5 - 3{,}0$ cm
- $d_p = 0{,}92 - 4{,}95$ mm
- $H = 20{,}0 - 50{,}0$ cm

Ogino et al (1993):

$$-\frac{\Delta P_M}{H.\rho_b.g} = 1{,}15.\left(\frac{H}{D_c}\right)^{1/2}.\left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{1/3} \tag{2.9}$$

Em que a geometria do leito se restringiu na faixa de: D_c = 10,0 – 20,0 cm e D_i = 0,5 – 3,0 cm;

Partículas com: d_p = 0,92 – 4,95 mm e altura da carga estática entre 20,0 – 50,0 cm

San Jose et al (1995):

$$\Delta P_M = (\Delta P_M)_{cone} + (\Delta P_M)_{cilindro} \tag{2.10}$$

Na qual:

$$\left(\frac{\Delta P_M}{\Delta P_S}\right)_{cone} = 1 + 0{,}116.\left(\frac{H_c}{D_i}\right)^{0,5}.(\tan\theta/2)^{-0,80}.Ar^{0,0125} \tag{2.11}$$

e

$$\left(\frac{\Delta P_M}{\Delta P_S}\right)_{cilindro} = 1 + 0{,}35.\left[\frac{(H_o - H_c)}{D_c}\right]^{0,1}.\left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{1,1}.Ar^{0,1} \tag{2.12}$$

As correlações foram desenvolvidas nas seguintes condições:

- D_c = 15,0 cm
- D_i = 2,0 – 6,0 cm
- d_p = 1,0 – 8,0 mm
- H_c = 1,2 – 16,8 cm
- θ = 15 - 75^0
- ρ_s = 2420 kg/m^3

- $H_0 < 35$ cm
- $\phi = 1$

$(\Delta P_S)_{cone}$ e $(\Delta P_S)_{cilindro}$ são calculados através da correlação (2.15)

Mamuro e Hattori (1969):

$$-\Delta P_S = (\rho_S - \rho_f).(1 - \varepsilon_{mf}).g.(0{,}75.H_M) \tag{2.13}$$

Para essa correlação as condições não foram definidas.

Pallai e Nemeth (1969):

$$\frac{(\Delta P_S)_{MAX}}{\Delta P_M} = 0{,}8 - 0{,}01.\frac{D_c}{D_i} \tag{2.14}$$

Foi desenvolvida com diversos grãos e Dc = 15,2 – 61,0 cm

San Jose et al (1995):

$$-\Delta P_S = (-\Delta P_S)_{cone} + (-\Delta P_S)_{cilindro} \tag{2.15}$$

$$\left(\frac{-\Delta P_S}{H_c.\rho_b.g}\right)_{cone} = 1{,}20.(\tan\theta/2)^{-0{,}11}.(Re_i)_{ms}^{-0{,}06}.\left(\frac{H_c}{D_i}\right)^{0{,}08},$$

$$\left(\frac{-\Delta P_S}{(H_o - H_c).\rho_b.g}\right)_{cilindro} = 3{,}85x10^{-2}.\left[\frac{(H_o - H_c)}{D_i}\right]^{0{,}12}.\left(\frac{D_c}{D_i}\right)^{0{,}69}.(Re_i)_{ms}^{0{,}31}$$

e

$$(Re_i)_{ms} = 0{,}126.Ar^{0,5}.\left(\frac{D_c}{D_i}\right)^{1,68}.(\tan\theta/2)^{-0,57}$$

Com validade para as seguintes condições:

- $D_c = 15{,}0$ cm
- $D_i = 2{,}0 - 6{,}0$ cm
- $d_p = 1{,}0 - 8{,}0$ mm
- $H_c = 1{,}2 - 16{,}8$ cm
- $\theta = 15 - 75^0$
- $\rho_s = 2420$ kg/m^3
- $H_0 < 35$ cm
- $\phi = 1$

Mukhlenov e Gorshtein (1965)

$$\frac{-\Delta P_{ms}}{H.\rho_b.g} = \frac{7{,}68.(\tan\theta/2)^{0,2}}{(Re_i)_{ms}^{0,2}.\left(\frac{H}{D_i}\right)^{0,33}} \qquad (2.16)$$

Para:

- $D_i = 2{,}0 - 6{,}0$ cm
- $d_p = 1{,}0 - 2{,}3$ mm
- $H = 3{,}0 - 15{,}0$ cm
- $\theta = 12 - 60^0$ e $\rho_s = 980 - 2380$ kg/m^3

Malek e Lu (1965):

$$\Delta P_{ms} = \frac{2}{3}.\frac{M.g}{A_{cil}} \qquad (2.17)$$

Onde as limitações são descritas abaixo:

- $d_p = 4{,}0 - 6{,}0$ mm
- $\theta = 60^0$
- $\rho_s = 1110 - 1190$ kg/m^3
- $\phi = 0{,}8 - 0{,}9$

Nascimento et al (1976)

$$\Delta P_{ms} = 0{,}67.(1 - \varepsilon_{mf}).H.\rho_s.g \tag{2.18}$$

Mesmas condições da Equação 2.17.

Sampaio (1978):

$$\frac{\Delta P_{ms}}{\rho_b.g.H} = \frac{2}{3} \tag{2.19}$$

Mesmas condições da Equação 2.17.

Brunello et al (1974):

$$U_{ms} = 0{,}663.d_p^{0,741}.H^{0,592}.\left[\frac{2.g.(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}\right]^{0,5} \tag{2.20}$$

A correlação foi desenvolvida nas seguintes condições:

- $D_c = 30{,}5$ cm
- $D_i = 5{,}08$ cm

- d_p = 3,61 – 6,27 mm
- H = 50 - 70 cm
- $\theta = 35^0$
- ρ_s = 1190 - 1310 kg/m^3

San Jose et al (1995):

$$U_{ms} = \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^2 \cdot \left(\frac{\mu}{\rho . d_p}\right) . (Re_i)_{ms} + \left(\frac{d_p}{D_c}\right) . \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{0,1} \cdot \left[\frac{2.g.(H_o - H_c).(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}\right]^{1/2}$$

(2.21)

Para:

- D_c = 15,0 cm
- D_i = 2,0 – 6,0 cm
- d_p = 1,0 – 8,0 mm
- H_c = 1,2 – 16,8 cm
- $\theta = 15 - 75^0$
- ρ_s = 2420 kg/m^3
- $H_0 < 35$ cm
- $\phi = 1$

onde: $(Re_i)_{ms}$ é equivalente ao da correlação (2.15).

Mathur e Gishler (1955):

$$U_{ms} = \left(\frac{d_p}{D_c}\right) . \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{2.g.H.(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}\right)^{1/2} \qquad (2.22)$$

Foi desenvolvida para várias partículas e:

- D_c / D_i = 3,3 - 24
- H / D_c = 1,3 – 6,7 e ρ_s = 1050 - 3950 kg/m^3

Uemaki et al (1983):

$$U_{ms} = 0{,}977.\left(\frac{d_p}{D_c}\right)^{0{,}615}.\left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{0{,}274}.\left[\frac{2.g.H.(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}\right]^{0{,}324} \qquad (2.23)$$

Com as seguintes condições:

- $D_c = 20{,}0$ cm e $D_i = 2{,}2 - 3{,}0$ cm
- $d_p = 0{,}655 - 2{,}23$ mm
- $H_c = 1{,}2 - 16{,}8$ cm
- $\theta = 60^0$
- $\rho_s = 2650$ kg/m^3
- $H = 25$ - 50cm

Choi e Meisen (1992):

$$U_{ms} = 10{,}6.(2.g.H)^{0{,}5}.\left(\frac{d_p}{D_c}\right)^{1{,}05}.\left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{0{,}266}.\left(\frac{H}{D_c}\right)^{-0{,}095}.\left[\frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}\right]^{0{,}256} \qquad (2.24)$$

Para:

- $D_c = 24{,}0 - 45{,}0$ cm
- $D_i = 2{,}1 - 3{,}5$ cm
- $d_p = 2{,}1 - 2{,}8$ mm
- $H = 24$ - 40 cm
- $\theta = 60^0$

Ogino et al (1993):

$$U_{ms} = 0{,}0151.\left[\frac{\varepsilon^4}{2.(1-\varepsilon)}\right]^{1/2}.\left[(1-\varepsilon).\frac{\rho_f.(\rho_s-\rho_f).g.D_c^3}{\mu^2}\right]^{1/4}.\left(\frac{d_p}{D_c}\right).\left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{1/3}.$$

$$.\left[\frac{2.g.H.(\rho_s-\rho_f)}{\rho_f}\right]^{1/2} \quad (2.25)$$

A validade da correlação para cálculo da velocidade de mínimo jorro se encontra nas seguintes faixas:

- D_c = 10,0 – 20,0 cm
- D_i = 0,5 – 3,0 cm
- d_p = 1,0 – 8,0 mm
- H = 20 - 50 cm

Abdelrazek (1969):

$$U_{ms} = \frac{1}{1{,}74}.\left\{\left(\frac{d_p}{D_c}\right).\left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{1/3}.\left[\frac{2.g.H.(\rho_s-\rho_f)}{\rho_f}\right]^{1/2} - 0{,}25\right\} \quad (2.26)$$

Para:

- D_c = 5,0 – 10,0 cm
- D_c / D_i = 12,0
- d_p = 0,5 – 0,8 mm
- H_c = 1,2 – 16,8 cm
- $\theta = 60^0$
- H / D_c = 1,0 – 3,0
- ρ_s = 2420 - 7070 kg/m^3 e ϕ = 1

Pallai e Nemeth (1969):

$$U_{ms} = U_{mf} \cdot \left[\frac{H/H_M}{1,5} + 1 \right] \tag{2.27}$$

Com as seguintes condições experimentais:

- $D_c = 6,0$ cm
- $D_i = 0,6 - 1,0$ cm
- $d_p = 1,6 - 2,5$ mm
- $\theta = 60^0$
- $\phi = 1$

Os dados utilizados nas correlações acima devem estar no SI, exceto a correlação (2.26), que utiliza unidades inglesas (ft/lb/sec).

As correlações propostas para o cálculo dos parâmetros de projeto de leito de jorro foram determinadas para condições especificas, por isso existe a limitação para cada Equação acima citada.

2.2 - TRANSFORMADA DE FOURIER

Métodos objetivos para identificação de regimes de escoamento em fluxos gás-sólido e gás-líquido têm sido bastante estudados, pela sua importância nos diversos processos. Os regimes são classificados utilizando-se técnicas de Fourier, de acordo com as respostas das funções densidade espectral de potência (DEP) e função densidade de probabilidade (FDP).

Os autores Hubbard et al (1966) utilizaram espectro de flutuação de pressão junto à parede do tubo, para diferenciar entre vários tipos de regimes em fluxos horizontais.

França (1991) utilizou a função densidade espectral de potência, que permitiu distinguir, ainda que restritamente, padrões de escoamento onda, *plug*, pistonado e anular em escoamentos gás-líquido. Observou que o espectro de frequência de escoamento intermitente, *plug* e pistonado apresentam frequência dominante, enquanto que os escoamentos em onda e anular apresentam uma onda de frequências dominantes, de mesma ordem de magnitude.

A transformada de Fourier vem se destacando em utilização devido às inúmeras aplicações encontradas em diversas áreas.

A forma integral da transformada de Fourier é definida pela expressão:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)\ e^{-j2\pi ft}\, dt \qquad (2.28)$$

Se a integral existe para todo valor do parâmetro f, então a equação acima que define H (f), é a transformada de Fourier de h (t). Denominaremos h (t) uma função da variável tempo e H (f), de freqüência.

Em geral a transformada de Fourier é um número complexo:

$H(f) = R(f) + jI(f) = |H(f)|\, e^{j\theta(f)}$

Na qual:

R(f) é a parte real da transformada de Fourier;

I(f) é a parte imaginária;

|H(f)| é a amplitude ou espectro de h(t)

$|H(f)| = \sqrt{R^2(f) + I^2(f)}$

θ(f) é o ângulo de fase da transformada e é dado por:

$\theta(f) = \tan^{-1}[I(f) / R(f)]$

A inversa da transformada de Fourier é dada por:

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(f)\, e^{-j2\pi ft}\, df \qquad (2.29)$$

As funções h(t) e H(f) são denominadas o par da transformada de Fourier e são denotadas por:

$$h(t) \Leftrightarrow H(f)$$

A seguir é apresentado um resumo de algumas aplicações da FFT ("Fast Fourier Transform"), que é utilizada para o cálculo de transformadas de Fourier, de funções discretamente amostradas, e são facilmente executadas a partir de rotinas especiais. A FFT tem sido amplamente utilizada como uma ferramenta de extrema importância em diversas áreas. A interpretação é feita com respeito ao tempo (t) e freqüência (f).

Tabela 2.1- Resumo das Aplicações da FFT

• Aplicações Mecânicas
Dinâmica Estrutural
Modelagem da Planta de Energia Nuclear
Análise de Vibração
• Métodos Numéricos
Problemas de valor de fronteira
Integração Numérica
Interpolação alta velocidade
Equação da Difusão
Equação Diferencial Elíptica
• Processamento de Sinal
Análise espectral tempo real
Estimação da função coerencia
• Instrumentação
Cromatografia
Microscopia
Difração Raio X
• Comunicação
Análise de Sistema
Detecção de Sinais
• Diversos
Metalurgia
Sistema de energia Elétrica
Restituição de Imagens
Análise de Sistema Não Linear

A evolução tecnológica do computador contribuiu bastante para o desenvolvimento da FFT. Certamente, a FFT tem se tornado um dos maiores destaques na tecnologia de sinal digital. Como mostrado na Tabela 2.1 a aplicação da FFT é diversificada.

A análise da função pode ser feita nos domínios do tempo e freqüência, sendo essa uma propriedade chave da transformada de Fourier.

2.2.1 - Propriedades da Transformada de Fourier Contínua

Citaremos em seguida algumas propriedades importantes. As provas para essas propriedades são diretas e podem ser retiradas da literatura (Brigham, 1988).

•Linearidade: Se x (t) e y (t) tem FT X (f) e Y (f), respectivamente então a função x (t) + y (t) tem transformadas X (f) + Y (f);

•Simetria: Se a FT de h (t) é H (f) , então

$$H(t) \Leftrightarrow h(-f)$$

•Escala do tempo: Se a FT de h(t) é H(f), então para todo número real $k > 0$,

$$h(kt) \Leftrightarrow 1/kH(f/k)$$

A escala do tempo mostra que uma expansão no domínio do tempo leva a uma contração no domínio de freqüência.

•Escala de freqüência: Se a função inversa da transformada de Fourier de H (f) é h (t), então a inversa da transformada de H (kf) para todo real k é (1 / | k |) h (t / k). Analogamente à escala de tempo, a expansão da escala de freqüência resulta numa contração no domínio do tempo.

•Deslocamento temporal: Se h (t) é deslocado por uma constante t_0, então a sua transformada se torna:

$$H(f)e^{-j2\pi f t_0}$$

e o par da transformada fica:

$$h(t-t_0) \Leftrightarrow H(f)\, e^{-j2\pi f t_0}$$

•Deslocamento de Freqüência: Se H (f) é deslocada de f_o, ficando, então, H (f-f_o), a transformada inversa muda para:

$$h(t)\, e^{-j2\pi f t_o}$$

A equação (2.28) mostra claramente que a transformada de Fourier é uma operação linear. No domínio do tempo,a função h (t) pode ter uma ou mais simetrias especiais. Ela pode ser puramente real ou imaginária, ou ela poderia ser par, h(t) = h(-t), ou impar, h(t) = -h(-t). No domínio da freqüência, essas simetrias levam a relações entre H(f) e H(-f). A Tabela 2.2 mostra as correspondências entre as simetrias nos dois domínios.

Tabela 2.2 - Correspondências entre os domínios do tempo e freqüência:

Se	Então
h(t) for real	H(-f) = [H(f)]*
h(t) for imaginária	H(-f) = -[H(f)]*
h(t) for par	H(-f) = H(f)⇒H(f) é par
h(t) for impar	H(-f)=-H(f)⇒H(f) é impar
h(t) for real e par	H(f) é real e par
h(t) for real e ímpar	H(f) é imaginária e ímpar
h(t)for imaginária e par	H(f) é imaginária e par
h(t) for imaginária e ímpar	H(f) é real e ímpar

onde [H (f)]* é o complexo conjugado de H (f).

2.2.2 - Funções Delta

Se h (t) é uma função periódica e/ou discreta, então a transformada de Fourier pode convenientemente ser definida introduzindo-se funções delta. É através de funções delta que os conceitos de funções de amostragem e transformadas de Fourier discretas serão definidas.

A função delta ou impulso $\delta(t)$ é uma ferramenta matemática importante na análise de transformadas de Fourier contínuas e discretas. O seu uso simplifica muitas derivações que, de outro modo, poderiam requerer argumentos complicados. A seguinte discussão foi baseada em Brigham (1988).

A função impulso é definida como:

$$\delta(t-t_o) = 0 \qquad \text{para } t \neq t_o$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-t_o)dt = 1 \tag{2.30}$$

A função impulso pode ser usada como um artificio matemático para peneirar o valor de um sinal ou função num dado instante de tempo, como mostra o resultado abaixo:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-t_o)\, h(t)\, dt = h\,(t_o) \tag{2.31}$$

Uma outra propriedade da função impulso é que a transformada de Fourier de uma seqüência de funções impulso eqüidistantes,

$$h(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \partial(t - nT) \tag{2.32}$$

é

$$H(f) = 1/T \sum_{n=-\infty}^{\infty} \partial(f - n / T) \tag{2.33}$$

2.2.3 - Transformada de Fourier Discreta

Consideremos por exemplo uma função h(t) e sua transformada H(f), como ilustrado na Figura 2.14 - a. É desejado modificar o par da transformada de Fourier de maneira que o par seja acessível à computação digital. O par modificado é denominado transformada de fourier discreta.

Para determinar a transformada de Fourier de h (t) pela técnica de análise digital é necessário amostrar h (t). A amostragem é feita multiplicando h (t) por uma função de amostragem $\Delta_o(t)$, como mostra Figura 2.14 - b, onde o intervalo de amostragem é T.

Quando feita a modificação da função, e esta diferir do par original somente pelo efeito de "aliasing"(quando T é aumentado o espaçamento no domínio da frequencia diminui ocorrendo então uma sobreposição de forma de ondas), temos somente um recurso para reduzir esse erro, que é dispor de uma taxa de amostragem maior, isto é, escolher um T menor.

Na segunda modificação é necessário fazer o truncamento da função a um número finito de pontos N, que será sempre múltiplo de um período de 2^{γ}, eliminando os possíveis problemas de "leakage".

Será feita a seguir uma abordagem gráfica.

2.2.3.1 -Desenvolvimento Gráfico

Na Figura 2.14 - a , o par da transformada deve ser modificado de tal maneira que o par se torne apropriado à computação digital. Esse par modificado, denominado transformada de Fourier discreta, deve se aproximar tanto quanto possível da transformada de Fourier contínua.

A Figura 2.14 - c mostra a primeira modificação do par original, mas ainda não é adequado para computação digital uma vez que um número infinito de pontos de amostragem de h (t) é considerado. Observa-se que o par modificado difere do original somente pelo efeito do "aliasing", resultado da amostragem. Então devemos reduzir o T, aumentando a taxa de amostragem.

Agora será feito o truncamento da função de amostragem h (t) a fim de que somente um número finito de pontos permaneça. Para o truncamento utilizaremos a função retangular x (t), como mostra a Figura 2.14 - d.

A Figura 2.14 - e ilustra o produto h (t).Δ_o(t).x(t), que leva a uma função de comprimento finito. Mas a função de freqüência tem, agora, uma ondulação que é causada pelo "leakage". Portanto é necessário escolher o comprimento da função truncada .

O truncamento resulta numa segunda modificação no par original da FT, que agora leva à convolução de H(f).Δ_o(f) com X(f), produzindo alterações na transformada original.

Para a função de freqüência discreta é necessária a multiplicação pela função de amostragem de freqüência , Δ_1 (f), a um intervalo de amostragem $1/T_o$.

O par da transformada discreta da Figura 2.14 - g, é adequado para análise computacional, uma vez que a função de tempo e freqüência originais são aproximadas por N pontos de amostragem. Note que a amostragem no domínio do tempo resulta numa função periódica de freqüência e que a amostragem no domínio de freqüência resulta numa função periódica no tempo. Consequentemente, a transformada de Fourier discreta requer que as funções originais , para o tempo e freqüência sejam modificadas para funções periódicas , onde N pontos amostrados no domínio do tempo representam um período das funções nos domínios de tempo e freqüência, respectivamente. É por causa dos N valores de tempo e freqüência estarem relacionados por uma transformada de Fourier contínua que uma relação pode ser derivada.

Se for admitido que N pontos de amostragem da função h(t) original formam um período de uma forma de onda periódica, a transformada de Fourier discreta de h(t) é dada pelos N pontos computados de:

$$H(n/NT) = T\sum_{k=0}^{N-1} h(kT)e^{-j2\Pi kn/N} \qquad (2.34)$$

A escala do tempo e freqüência da transformada de Fourier são relacionados da seguinte maneira: os dados adquiridos são no tempo, feitos num intervalo de amostragem T e truncados a N ($N = 2^{\gamma}$), onde n é o número do ponto. Obtem-se a resposta no domínio de freqüência, que é dada pela equação:

$$\begin{aligned} f_n &= n/NT \\ n &= 1,2,\ldots,N-1 \end{aligned} \qquad (2.35)$$

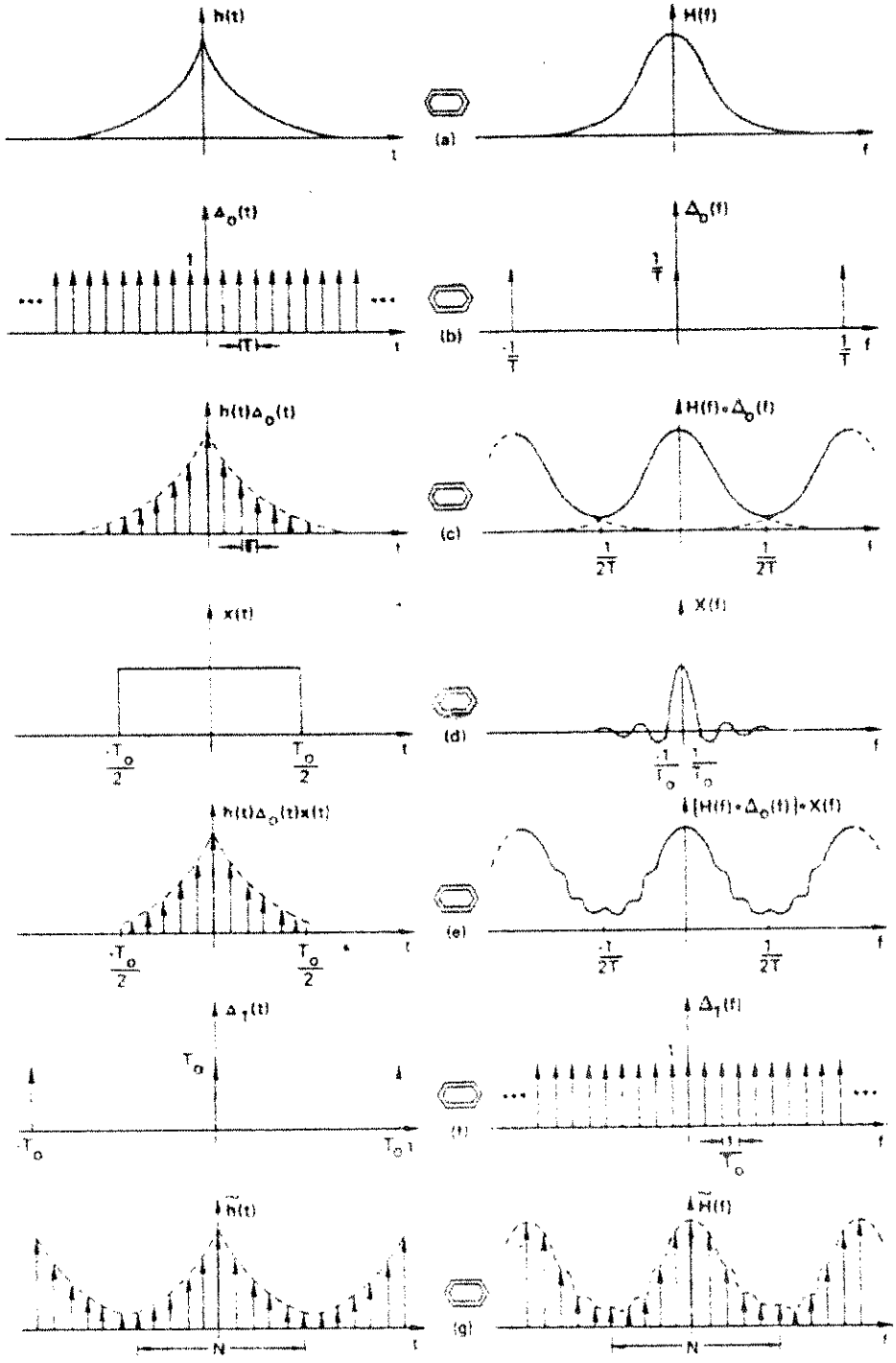


Figura 2.14 - Desenvolvimento Gráfico para a Transformada de Fourier Discreta (Brigham,1988).

2.2.3.2 - Desenvolvimento Teórico

A função de amostragem pode ser escrita como:

$$h(t)\,\Delta_o(t) = h(t)\sum_{k=-\infty}^{\infty}\delta(t-kT) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(kT)\delta(t-kT) \qquad (2.36)$$

O resultado dessa multiplicação é ilustrado na Figura 2.15-c. Note que o efeito de "aliasing" é devido à escolha de T. O próximo passo é fazer o truncamento com uma função retangular x(t),como na Figura 2.15-d.

$$x(t) = 1 \qquad -T/2 < t < T_o - T/2$$

$$x(t) = 0 \qquad \text{caso contrário}$$

onde T_o é a duração da função truncada.

O truncamento resulta:

$$h(t)\,\Delta_o(t)x(t) = \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} h(kT)\delta(t-kT)\right]x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} h(kT)\delta(t-kT) \qquad (2.37)$$

A função $\Delta_1(t)$ é dada por:

$$\Delta_1(t) = T_o \sum_{r=-\infty}^{\infty}\delta(t-rTo) \qquad (2.38)$$

A relação desejada é $[h(t)\,\Delta_o(t)x(t)]\,\Delta_1(t)$, portanto:

$$[h(t)\,\Delta_o(t)x(t)]\,\Delta_1(t) = \left[\sum_{k=0}^{N-1} h(kT)\delta(t-kT)\right]\left[\sum_{r=-\infty}^{\infty}\delta(t-rTo)\right] \qquad (2.39)$$

$$= \ldots + T_o \sum_{k=0}^{N-1} h(kT)\delta(t + To - kT) + T_o \sum_{k=0}^{N-1} h(kT)\delta(t - kT) +$$

$$+ T_o \sum_{k=0}^{N-1} h(kT)\delta(t - To - kT) + \ldots \qquad (2.40)$$

Note que a equação (2.40) é periódica com período T_o , a qual na forma compacta pode ser rescrita como:

$$\tilde{h}(t) = T_o \left[\sum_{k=0}^{N-1} h(kT)\delta(t - kT - rTo) \right] \qquad (2.41)$$

Escolhemos a função $\tilde{h}(t)$ para implicar numa aproximação da função h(t).

A transformada de Fourier de uma função periódica é uma seqüência de impulsos eqüidistantes:

$$\tilde{H}(n / To) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \alpha n \delta(f - nfo) \qquad (2.42)$$

onde:

$$\alpha n = 1 / T_o \int_{-T/2}^{To-T/2} \tilde{h}(t)\, e^{-j2\pi nt/To}\, dt \qquad (2.43)$$

Substituindo a equação (2.41) em (2.43):

$$\alpha n = 1 / To \int_{-T/2}^{To-T/2} To \sum_{r=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} h(kT)\delta(t - kT - rTo)\; e^{-j2\pi nt/To}\, dt \qquad (2.44)$$

Simplificando obtem-se:

$$\alpha n = \sum_{k=0}^{N-1} h(kT)\, e^{-j2\pi knT/To} \qquad (2.45)$$

Se for admitido que N pontos de amostragem da função h(t) original formam um período de uma forma de onda periódica, a transformada de Fourier discreta de h(t) é dada pelos N pontos computados de

$$H(n/NT) = T \sum_{k=0}^{N-1} h(kT)\, e^{-j2\pi nk/N} \qquad (2.46)$$

Onde T é o intervalo de amostragem de tempo e n = 0,1,2,....,N-1.

A transformada discreta inversa é dada por:

$$h(kT) = 1/N \sum_{n=0}^{N-1} H(n/NT)\, e^{j2\pi nk/N} \qquad (2.47)$$

para k = 0,1,2,...,N-1.

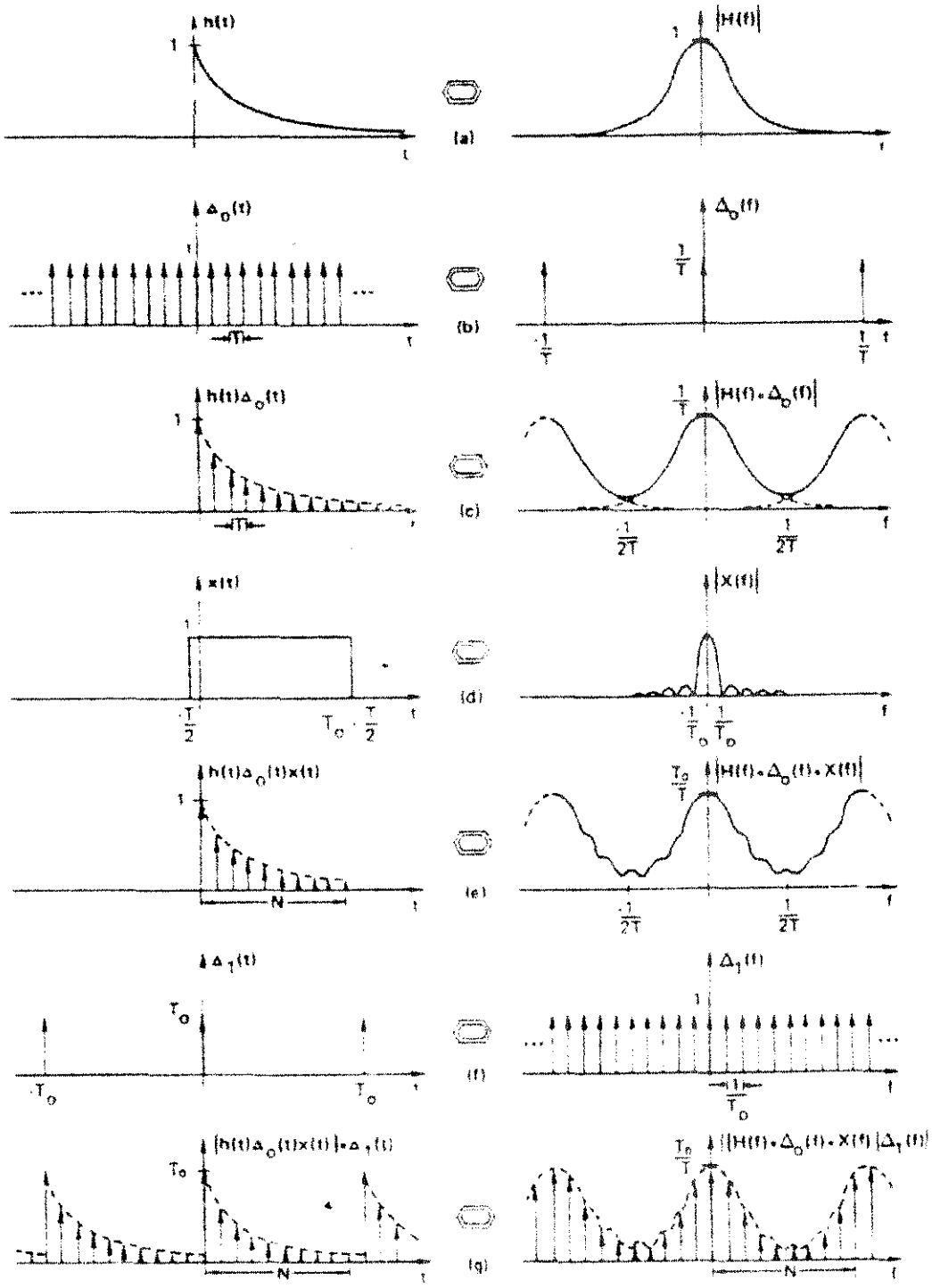


Figura 2.15 - Pares da Transformada de Fourier Discreta

(Brigham,1988)

2.2.4 - "Leakage" e Redução de "Leakage"

O truncamento, no domínio do tempo, da função de amostragem h (t), produz uma convolução com a função X (f) - equação (2.47) - no domínio da freqüência. Essa convolução introduz componentes adicionais no domínio da freqüência por causa das características de X (f). Esse fenômeno denomina-se "leakage".

Se uma função periódica é amostrada e truncada de maneira a consistir um múltiplo inteiro de um período, a transformada de Fourier discreta será igual à transformada contínua de Fourier. Isso acontece devido ao fato da função amostragem no domínio da freqüência (Figura 2.15-c) ser coincidente com os zeros de X (f).

Considerando a Figura 2.16, nota-se que 32 pontos definem exatamente quatro períodos da função e os valores computados da transformada de Fourier discreta desses pontos de amostragem são iguais a zero, exceto na freqüência desejada de 1/8.

Se o intervalo de truncamento não for escolhido igual a um múltiplo de um período, as oscilações laterais de X (f) criam uma considerável diferença entre a transformada de Fourier discreta e a transformada de Fourier continua. Por exemplo, considere a função cossenoide da Figura 2.17. Nota-se que os 32 pontos de amostragem não definem um múltiplo de um período. Por causa do "leakage", existem agora componentes de freqüência em todos os pontos discretos de freqüência.

Para funções tais como h (t) da Figura 2.14-a, que não é nem periódica, nem limitada, o truncamento no domínio do tempo introduz "leakage" que produz ondulação na transformada de Fourier discreta (Figura 2.14-e). O "leakage" , portanto, pode ser significativamente reduzido ampliando-se o truncamento de funções no domínio do tempo.

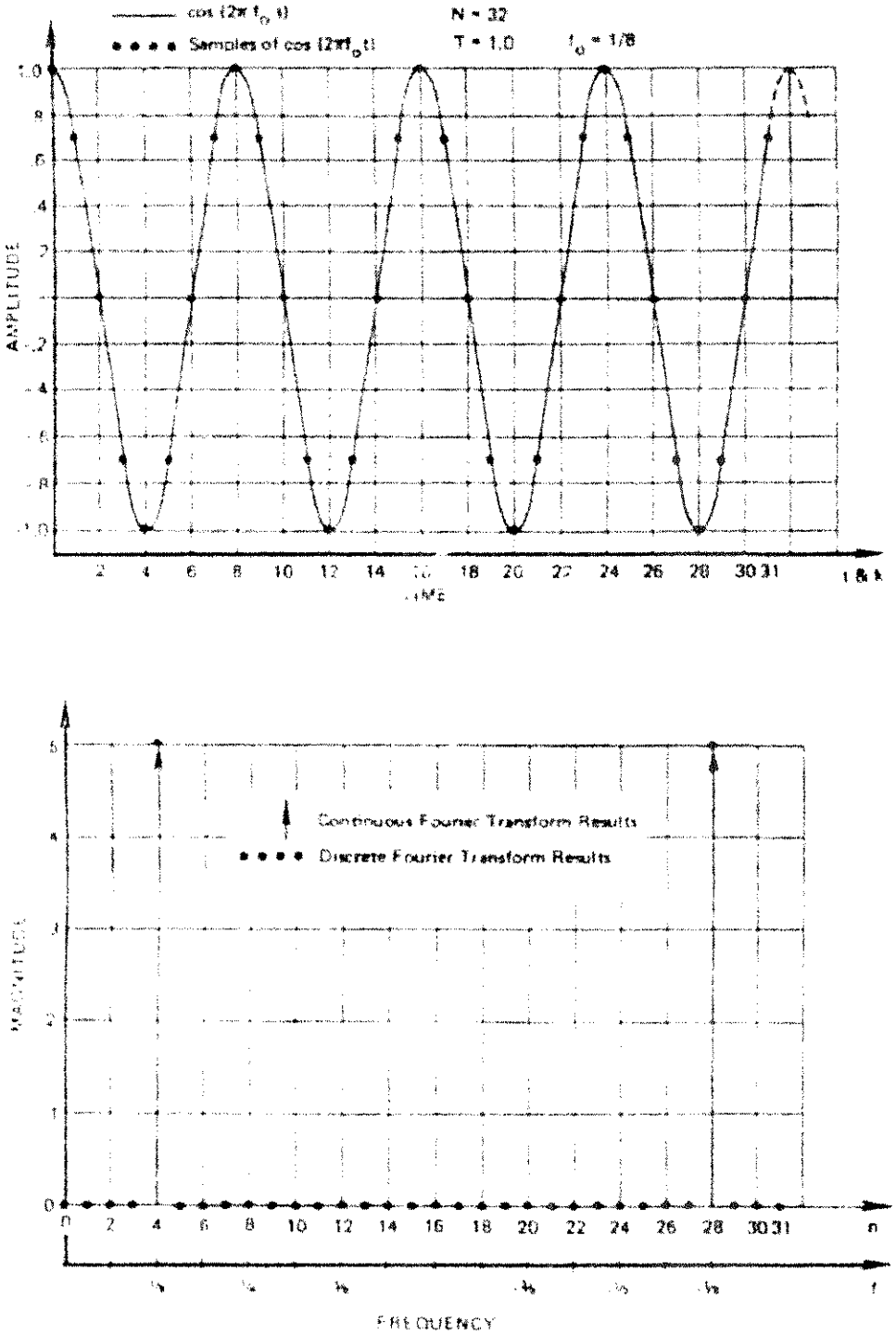


Figura 2.16 - FFT de uma Função Periódica: o intervalo de truncamento é múltiplo de um período (Brigham,1988).

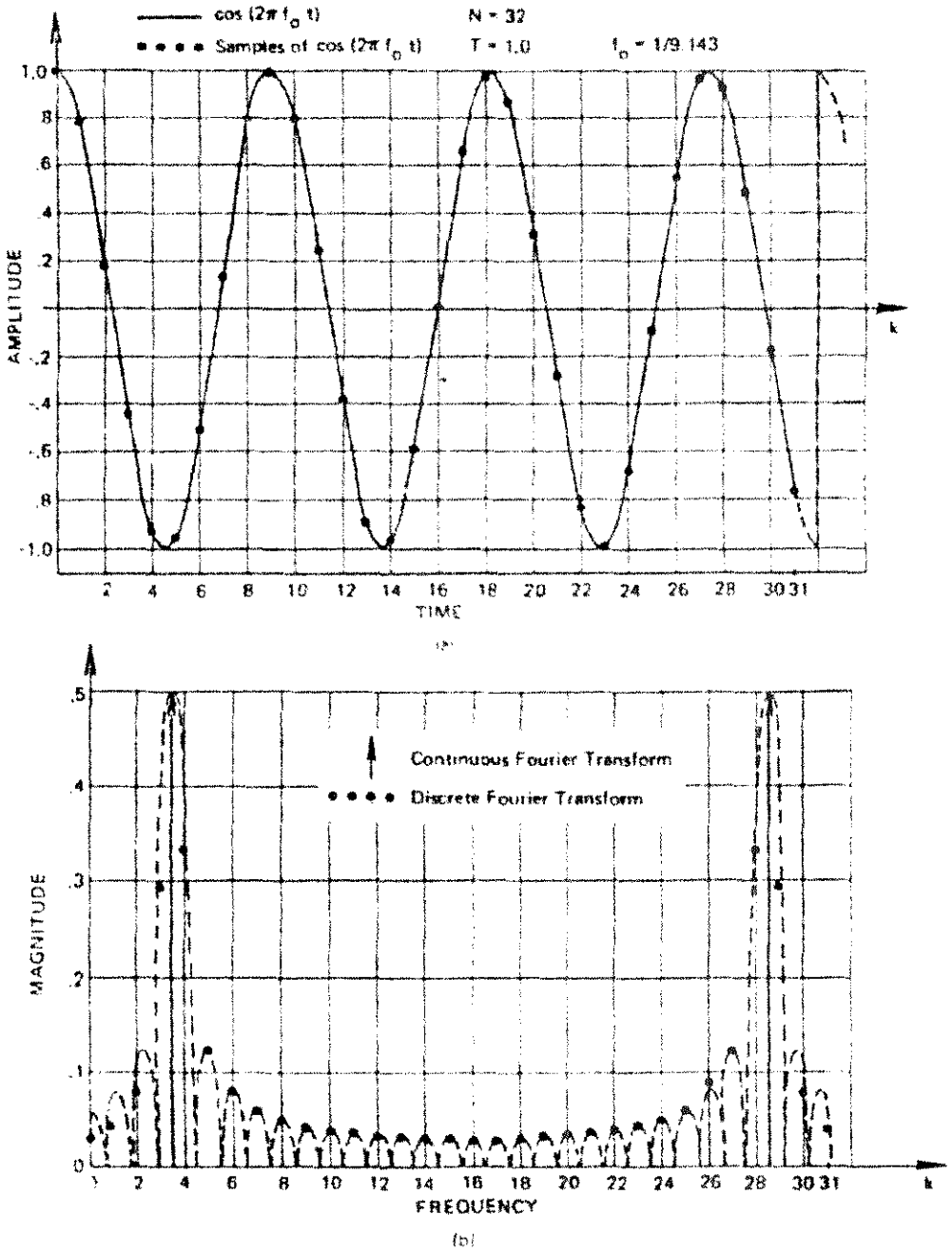


Figura 2.17 - FFT de uma Função Periódica: o intervalo de truncamento não é múltiplo de um período (Brigham,1988).

2.2.5 - Teorema da Amostragem

O tamanho do intervalo de amostragem, T, é um fator de grande importância na amostragem de valores de uma função contínua h (t). Se T for aumentado, o espaçamento no domínio da freqüência diminui, e por causa disso, uma sobreposição de forma de onda ocorre. Essa distorção da transformada de Fourier é conhecida como "aliasing", que ocorre porque a função não foi amostrada numa taxa suficientemente alta, isto é, o intervalo de amostragem foi muito grande. A sobreposição vai ocorrer até que a separação dos impulsos de freqüência sejam aumentados até $1/T=2f_c$, onde f_c é o maior componente de freqüência da transformada de Fourier da função contínua h(t).

O teorema da amostragem estabelece que se a transformada de Fourier h(t) é zero para todas as freqüências maiores que uma dada freqüência f_c, então a função contínua h (t) pode ser determinada unicamente a partir dos conhecimento dos seus valores amostrados

$$\hat{h}(t) = h(nT) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \partial(t - nT) \qquad (2.48)$$

O teorema impõe duas condições:

1) é necessário que a transformada de Fourier seja zero para freqüências maiores que f_c, isto é, a transformada de Fourier deve ser zero para $|f| > f_c$;

2) que o espaçamento entre as amostras deve ser $T = 1 / 2f_c$. Esse espaçamento assegura que não ocorra o "aliasing".

A freqüência $1 / T = 2f_c$ é conhecida como taxa de amostragem de Nyquist. Essa freqüência ainda tem uma outra grande característica, que é a simetria do espectro de freqüência em relação ao ponto zero de freqüência. Dessa forma, o espectro de freqüência, para uma amostragem feita com espaçamento de intervalo de $1 / T = 2f_c$, geralmente é apresentado somente entre zero e f_c.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

3.1 – Materiais

Os experimentos foram realizados utilizando-se partículas de polímeros, como o sangel, cycogel, acrigel e poliestireno. As características comerciais dos polimeros utilizados são: alta rigidez, resistência química, proporcionam brilho nobre ao produto acabado, atóxicos, fácil processabilidade, bom acabamento superficial, etc.Utilizou-se também placebos para a realização dos experimentos.

Para a caracterização física das partículas foram determinados o diâmetro médio, a massa especifica e a esfericidade, que são apresentados na Tabela 3.1.

A massa específica foi determinada por picnometria. A Equação utilizada para o cálculo foi:

$$\rho_s = \frac{P_s \cdot \rho_{H2O}}{(P_a + P_s) - (P_t)} \qquad (3.1)$$

onde:

ρ_s = massa específica dos sólidos;

ρ_{H2O} = massa específica da água;

P_s = peso dos sólidos;

P_a = peso do picnômetro com água;

P_t = peso do picnômetro com os sólidos e água.

O diâmetro foi obtido por análise em conjunto de peneiras padronizadas Tyler – diâmetro médio de Sauter:

$$d_p = \frac{1}{\sum x_i / d_i - d_{i-1}} \qquad (3.2)$$

na qual:

d_p = diâmetro médio de Sauter;

x_i = fração mássica retida na peneira i;

d_i = diâmetro de abertura da peneira i.

d_{i-1} = diâmetro de abertura da peneira i-1.

A Equação utilizada para obtenção da esfericidade foi a seguinte (Peçanha, 1986):

$$\phi = {d_{CI}}/{d_{CC}} \qquad (3.3)$$

na qual:

d_{CI} e d_{CC} correspondem, respectivamente, aos diâmetros dos círculos inscrito e circunscrito ao contorno da projeção da partícula sobre um plano de repouso estável.

Tabela 3.1 - Características das partículas:

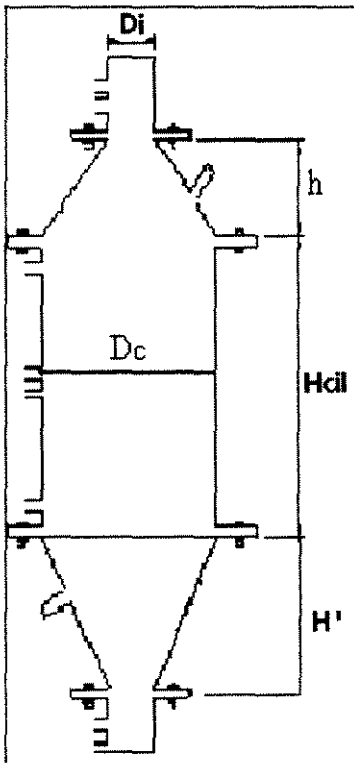
Material	**d_p (mm)**	**ρ (Kg/m^3)**	**Ø**
Poliestireno	4,58	1050	0,87
ABS	2,88	1040	0,79
Sangel	2,87	1080	0,68
Acrílico	1,88	1180	0,58
Placebos	7,24	1281	0,87

3.2 – Projeto dos leitos utilizados

Os leitos, cujas dimensões são mostradas na Figura 3.1, foram construídos em acrílico para possibilitar a observação visual do regime de operação desejado. É possível operar com dois diferentes ângulos de base cônica para cada leito: 45° e 60°. A relação do diâmetro de orifício da entrada do ar e o diâmetro da coluna cilíndrica adotada nos projetos foi de 0,25, baseando-se na relação crítica encontrada na literatura (Becker, 1961) de 0,35, para obtenção de jorro estável. De acordo com os projetos realizados, tem-se a versatilidade de se trabalhar com quatro geometrias de leitos, variando as dimensões e os ângulos da base cônica, que influencia fortemente a

taxa de circulação de sólidos. Com o objetivo de se obter as medidas de pressão e temperatura nos leitos, foram previstas várias tomadas. Um ponto na entrada e outro na saída do leito, conectados por tubos de borracha de silicone ao transdutor diferencial, e este ligado ao sistema de aquisição de dados e uma tomada antes do distribuidor foi colocado um termopar que permite acompanhar a temperatura do ar na entrada do leito.

Os leitos foram projetados de forma que pudessem ser utilizados como leito fixo, leito de jorro e leito fluidizado, sendo que neste trabalho os dois primeiros tipos foram utilizados.



	Di (cm)	Dc (cm)	H' (cm)	h (cm)	Hcil (cm)	θ (°)
Leito I	5.0	20.0	13.0	7.5	30.0	60
Leito II	5,0	20,0	13.0	7.5	30.0	45
Leito III	2.5	10.0	7.0	3.8	50.0	60
Leito IV	2.5	10.0	7.0	3.8	50.0	45

Figura 3.1 – Projeto dos leitos

3.3- Montagem experimental

O sistema experimental utilizado neste trabalho foi construído com o objetivo de se obter medidas da queda de pressão em tempo real e encontra-se no Laboratório de Fluidodinâmica e Secagem do Departamento de Termofluidodinâmica da Faculdade de Engenharia Química - Unicamp. A Figura 3.2 mostra uma visão global da montagem utilizada.

Um compressor do tipo ibram® ,de 7,5cv (1) fornece ar para o sistema, o qual é aquecido por um conjunto de três resistências (2); em (3) a temperatura do ar é controlada via um controlador relê liga-desliga. O resfriador (4) é utilizado quando se deseja trabalhar com temperatura próximas à ambiente. O resfriador utilizado é da marca Refrio®, feito com aletas de alumínio e tubos de cobre e utilizando como fluido refrigerante água. A vazão do ar é controlada pela válvula (5) e medida pela queda de pressão na placa de orifício (6) – ligada ao transdutor diferencial(7), e pela pressão estática na linha (8) – ligada ao transdutor absoluto (9). Ambos os transdutores são acoplados ao sistema de aquisição de dados(12). O ar então chega à entrada do leito (10). A placa distribuidora (11) é utilizada para proporcionar uma distribuição uniforme do ar, apenas no caso de se trabalhar com leito fluidizado. Os dados de queda de pressão em tempo real foram obtidos pelos transdutores diferencial (7) e absoluto (9) , acoplados ao sistema de aquisição de dados (12). A tubulação utilizada é de duas polegadas nominal, de ferro galvanizado.

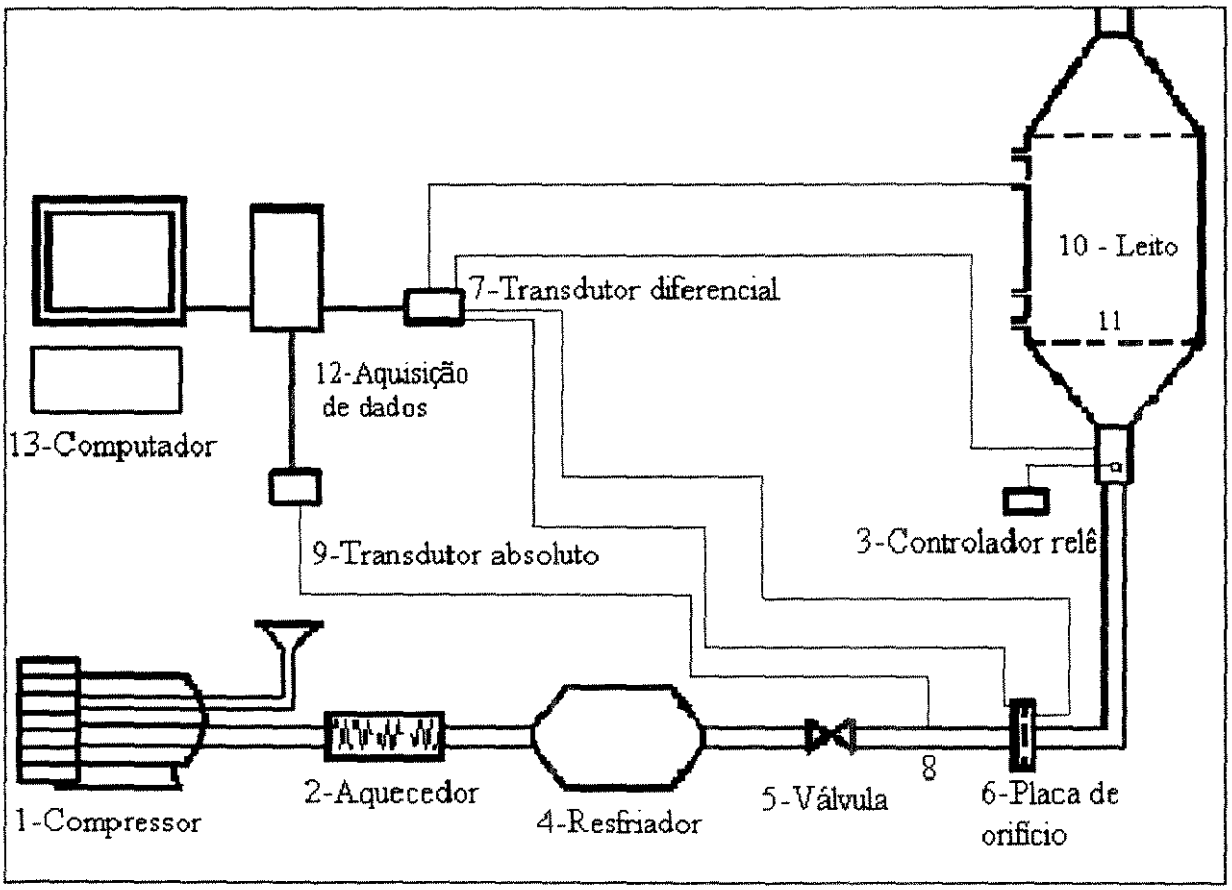


Figura 3.2 – Montagem Experimental

Com as partículas já caracterizadas e o sistema experimental construído, trabalhou-se com os seguintes regimes de contato gás-sólido:

- leito fixo;
- leito de jorro estável;
- regime "slugging".
- dentre outros

No decorrer dos experimentos surgiram alguns regimes fluidodinâmicos que foram denominados "casos atípicos" e que serão discutidos posteriormente.

As Figuras 3.3 a 3.6 mostram o sistema experimental em operação.

3.4 – Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados utiliza o software "labtech", o qual permite adquirir medidas de pressão através de transdutores absoluto e diferencial em tempo real. O software permite a leitura e interpretação de todos os sinais enviados à placa (PCL-711S) e também realizar operações matemáticas em linha durante a aquisição dos dados, além do gerenciamento de arquivos de dados para cada canal ou um dado agrupamento deles. Cinco canais foram ligados dos transdutores ao computador, transformando os sinais analógicos em sinais digitais. Uma interface gráfica permite que o usuário trabalhe com os dados adquiridos de diversas formas, através da inserção de diferentes ícones nesta interface e relacionando-os entre si. Estes ícones representam diversas funções, como transformação de dados, cálculos matemáticos, gravação em arquivo ou visualização gráfica da aquisição em tempo real.

Após a instalação do software de aquisição de dados, foi instalado um filtro RC (resistor - capacitor) na saída do sinal de cada transdutor que apresentou ruído, que foram causados pela fonte de alimentação. Foi necessário, então, assegurar que os transdutores de pressão não produzissem ruídos, mascarando os espectros de freqüência, levando a uma interpretação errônea, onde os picos de freqüência que apareceriam devido aos ruídos dos transdutores se misturariam com os picos dados pela flutuação da queda de pressão no leito. Concluída esta etapa, foi feita a calibração dos transdutores. Para cada canal, foram realizadas medidas com aplicação de uma pressão já conhecida. Medindo-se a voltagem média respectiva a cada valor da queda de pressão, foi feita a regressão linear, obtendo-se então a Equação de uma reta

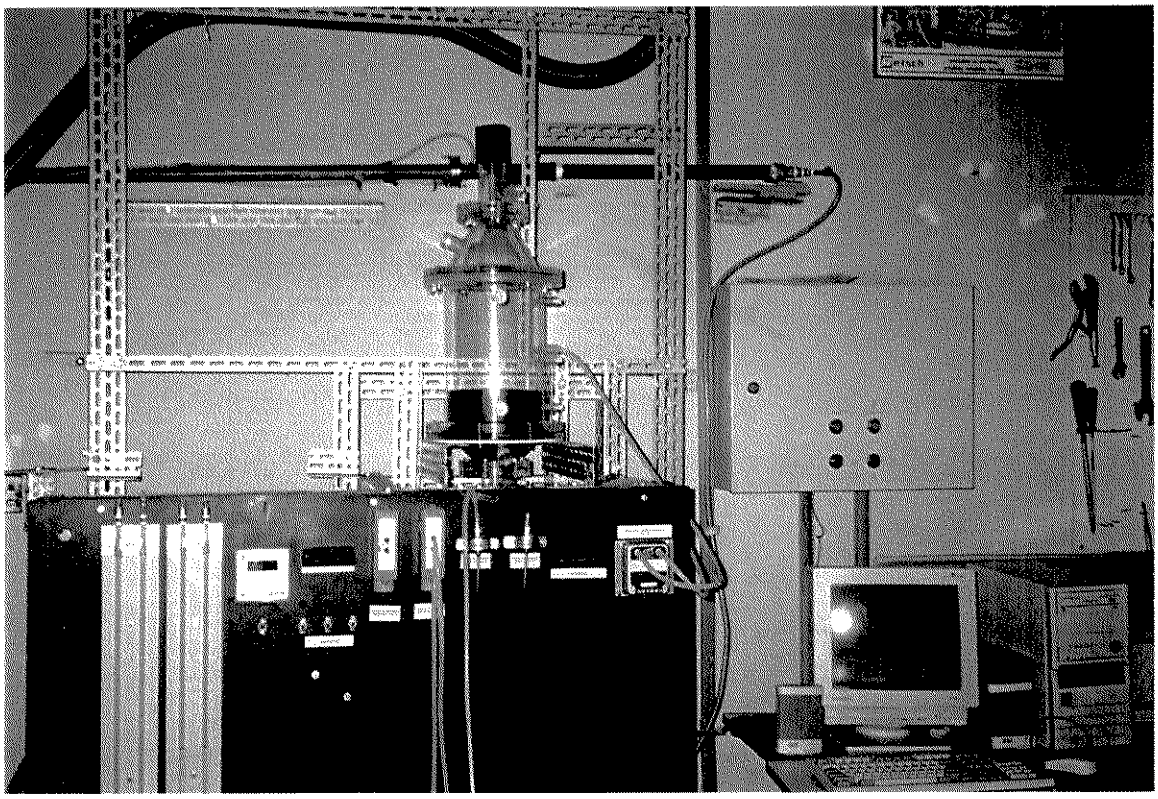


Figura 3.3 – Leito II, ABS, Leito Fixo

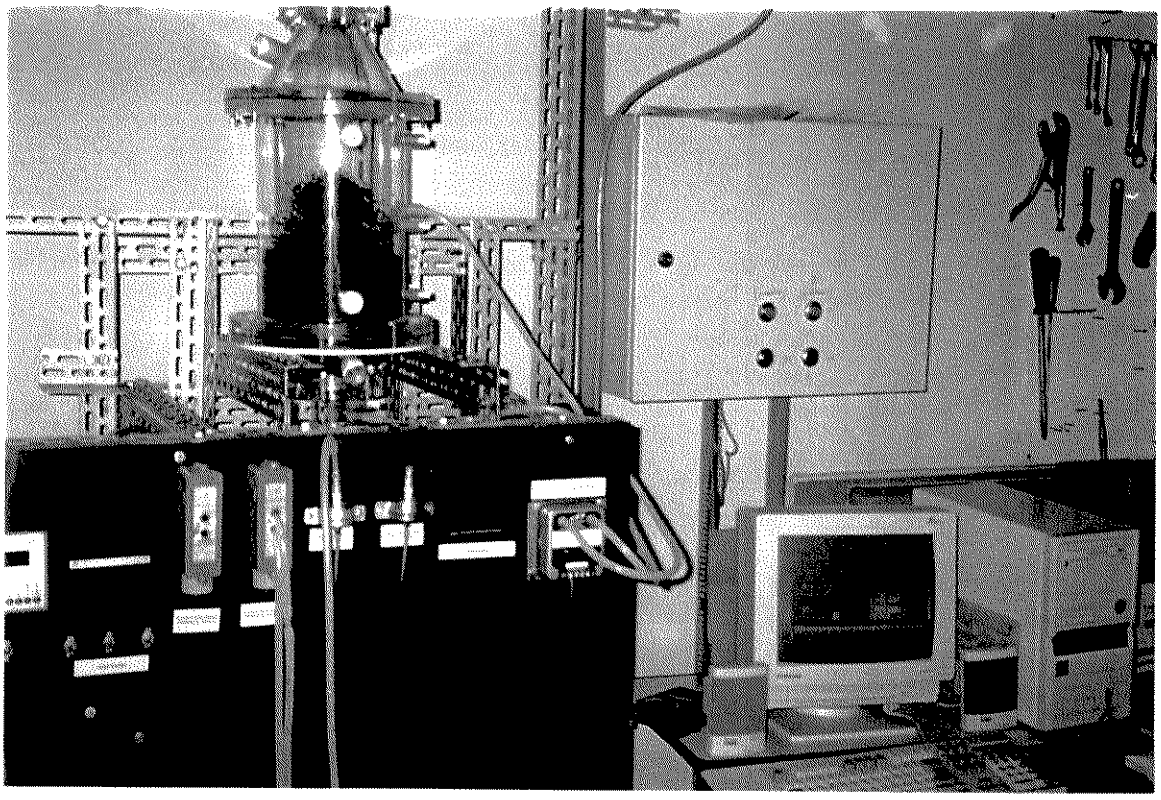


Figura 3.4 – Leito II, ABS, Leito Jorro Estável

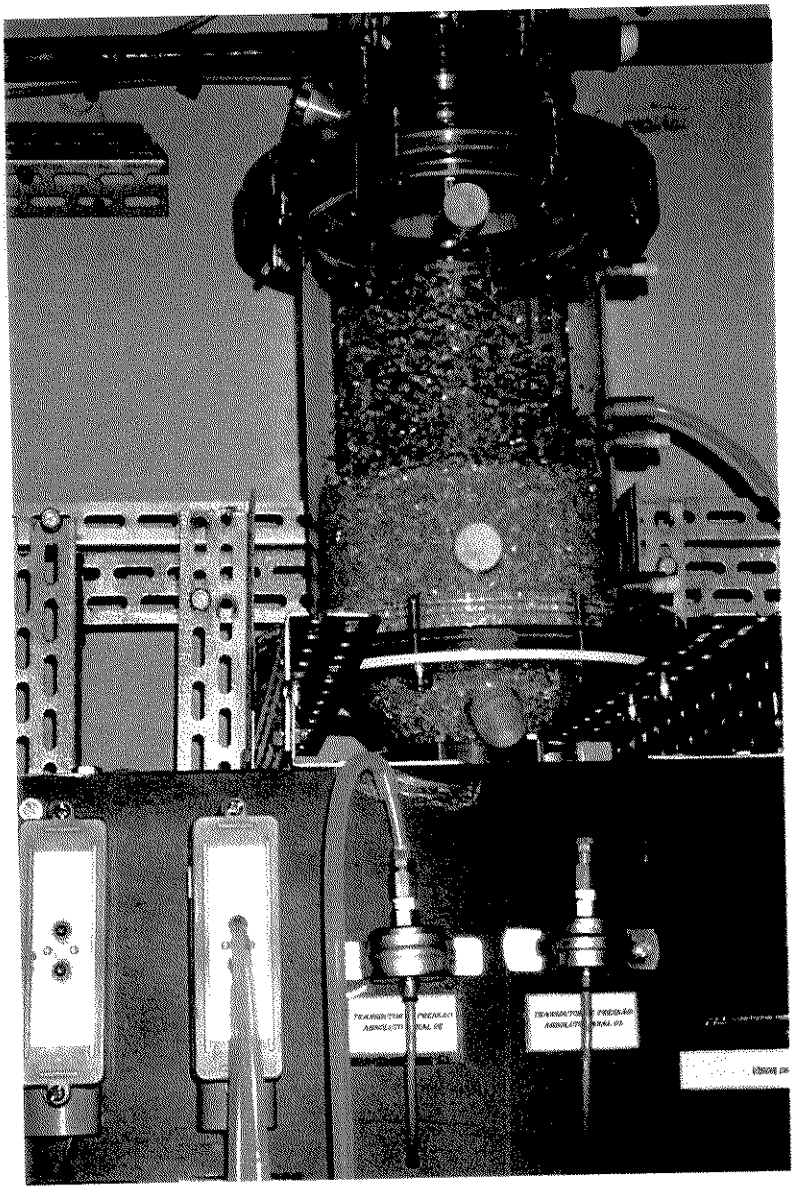


Figura 3.5 – Leito II, Sangel, Leito Jorro Estável

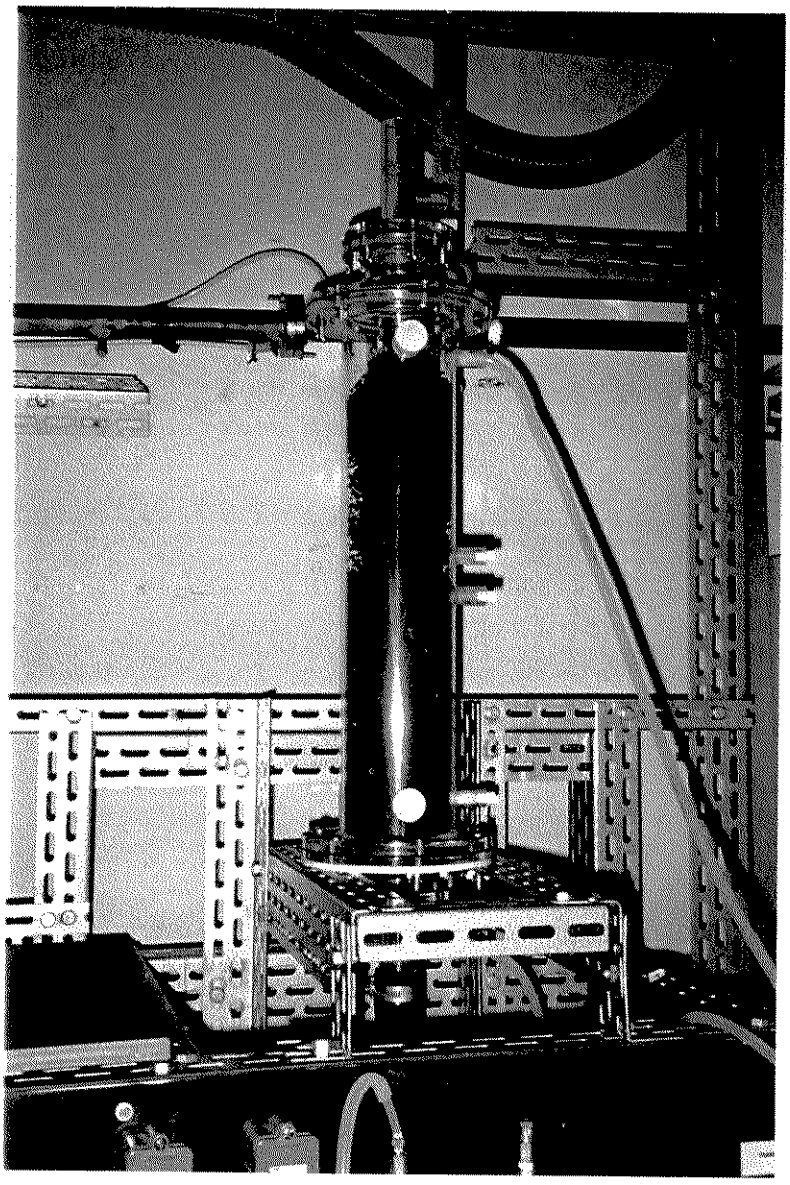


Figura 3.6 – Leito III, ABS, Regime "Slug"

Embora sejam utilizados apenas três canais – um para medida da queda de pressão no leito; outro para medida da queda de pressão na placa de orifício e para medida da pressão estática na linha - todos os cinco canais dos sistema de aquisição foram calibrados:

Canal00: Y = 164,8.X – 157,8 (3.4)

Canal01: Y = 3567,3.X – 13218,3 (3.5)

Canal02: Y = 1778,2.X – 6415,8 (3.6)

Canal03 : Y = 151,0.X – 157,2 (3.7)

Canal04 : Y = 130,0.X – 133,7 (3.8)

Nessas equações X representa a média das flutuações em volts (V) adquirida pela placa, e Y a queda de pressão em milímetros de água (mm H_20). Os canais 00, 03 e 04 estão ligados aos transdutores de pressão diferenciais e os canais 01 e 02, aos transdutores de pressão absolutos. Através de medidas de pressão estática na linha e de queda de pressão na placa de orifício, tomadas pelos transdutores absoluto e diferencial, respectivamente, e da temperatura do ar na entrada do leito, é possível então calcular a vazão do ar pela Equação de calibração da vazão de ar (Queriroz Filho, V.A, 1997):

$$Q = 13{,}4255 \cdot \sqrt{\frac{\Delta h}{T + 273{,}15}} - \frac{5{,}1781}{P + 1018{,}57} \cdot \frac{\sqrt[3]{\Delta h}}{\sqrt{T + 273{,}15}} \qquad (3.9)$$

onde:

Δh = queda de pressão na placa de orifício;

P = pressão estática na linha;

T = temperatura do ar entrada leito;

Q = vazão do ar .

Para se trabalhar com a transformada de Fourier como ferramenta de identificação de regimes através da análise das flutuações da queda de pressão no leito, é necessário que a aquisição de dados seja feita a uma determinada taxa e tempo de amostragem. Iniciou-se os testes preliminares, levando-se em conta o efeito de "aliasing", sendo necessário definir uma taxa de amostragem , no domínio do tempo,

que corresponda a um espaçamento, no domínio de frequência, como discutido no Capítulo 2. O software adquire os dados da queda de pressão no leito em tempo real (função h(t)) e calcula "on line" a transformada de Fourier por FFT. Foram criados três diferentes arquivos de saída de dados: 1) queda de pressão no leito e tempo; 2) queda de pressão na placa de orifício e pressão estática na linha (para cálculo da vazão) e 3) amplitude calculada por FFT. Inicialmente foram testadas várias taxas de amostragem: 30, 50, 70, 100 e 128Hz. Decidiu-se trabalhar com uma taxa de 128Hz. A taxa de amostragem igual a 70Hz se mostrou suficiente para o cálculo da transformada de Fourier satisfatoriamente. Entretanto, os espectros obtidos com uma taxa de 128Hz apresentaram picos mais definidos.

Definida a taxa de amostragem, pelos testes preliminares, de 128 pontos por segundo e um tempo de 12 segundos, adequado para aquisição dos dados experimentais, chegou-se a um número de pontos igual a 1536 por experimento.

O número de pontos, N, deverá ser sempre múltiplo de um período de 2^n, evitando-se assim, os possíveis problemas de "leakage", conforme já visto no Capítulo 2. Como esse número deve ser truncado em 2^n, tomou-se $n = 10$, truncando o número de pontos em 1024.

Foram realizados experimentos coletando-se dados da queda de pressão com o leito vazio, e a transformada de Fourier foi então computada com diferentes valores de taxa de amostragem. Como foi fixada uma taxa de 128Hz para esse trabalho, a Figura 3.7 mostra o experimento com o leito vazio com uma taxa de 128Hz e 12 segundos, truncando com 1024 pontos. Como pode ser observado na Figura abaixo, as flutuações para o leito vazio existem, mas apresentam amplitudes tão pequenas que não exercerão influências nos espectros de potência dos leitos com partículas. Se os valores se mostrassem significantivos, a diferença seria computada à transformada de Fourier.

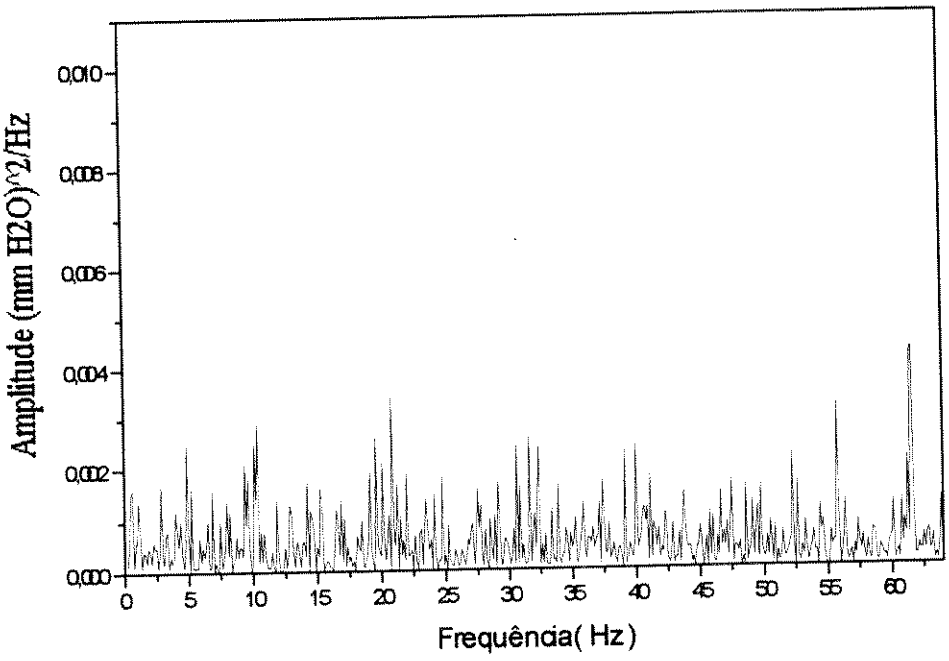


Figura 3.7 – Espectro de potência para o leito vazio

3.5 - Procedimento Experimental

A carga de leito estático e uma determinada vazão para obtenção do regime desejado foram fixadas para cada experimento que foi realizado, com uma taxa de amostragem de 128Hz e um tempo de 12 segundos. Variou-se a carga de partículas de 600g até 4000g e a vazão de ar de 0,08 até 2,4 Kg/min, sendo que a variação de carga ficou entre 600g a 1800g para o leito menor e 600g a 4000g para o leito maior. Valores da queda de pressão no leito versus tempo foram adquiridos em um arquivo e um outro arquivo foi criado com as respostas transformadas por FFT. Esse procedimento foi realizado para os vários regimes de contato fluido-sólido: leitos fixo, jorro e "slugging", dentre outros observados experimentalmente. As medidas da queda de pressão na placa de orifício foram obtidas com transdutor diferencial e a pressão estática na linha com transdutor absoluto, adquiridos em tempo real pelo software de gerenciamento dos dados e pelo termopar instalado à entrada do leito, acompanhamos a temperatura do ar. Esse valor de temperatura foi usado para cálculo da vazão de ar na linha. A sequência experimental seguida foi a seguinte:

- carrega-se o leito com uma determinada carga de partículas;
- inicialmente o fluxo de ar passa pelo leito sem que haja movimento das partículas, estabelecendo o regime de leito fixo;
- faz-se a aquisição dos dados de queda de pressão em tempo real num intervalo de 12 segundos;
- aumenta-se a vazão de ar até que se atinja outro regime: jorro estável, instável, "slug", e faz-se novamente a aquisição dos dados e as observações visuais dos regimes;
- novamente procede-se à aquisição dos dados para uma nova carga.

Foram construídos todos os gráficos das flutuações da queda de pressão versus tempo das corridas realizadas e foi visto que era possível realizar uma análise comparativa entre os regimes observados. Os gráficos foram então convertidos por FFT em gráficos de freqüência por amplitude (espectro de potência). Esses gráficos serão apresentados e analisados em Capítulos posteriores juntos com as flutuações da queda de pressão no leito e os diagramas de fase.

A Tabela 3.2 mostra valores de carga e vazão para um conjunto de experimentos realizados, bem como a definição do regime de contato gás-sólido por observação visual.

Tabela 3.2 – Características de Algumas Corridas Experimentais

Corrida	**Leito**	**Partícula**	**Carga (g)**	**Vazão de ar (Kg/min)**	**Regime Fluidodinâmico**
1	I	ABS	1200	0,37	Leito Fixo
2	I	ABS	1200	1,15	Jorro Estável
3	I	ABS	1200	1,20	Jorro Estável
4	I	ABS	1200	1,26	Jorro Estável
5	I	ABS	1200	1,17	Jorro Estável
6	I	ABS	1500	0,46	Leito Fixo
7	I	ABS	1500	1,31	Jorro Estável
8	I	ABS	1500	1,35	Jorro Estável
9	I	ABS	1500	1,47	Jorro Estável
10	I	ABS	1500	1,55	Jorro Estável
11	I	ABS	1500	1,58	Jorro Estável

Tabela3.2 - Continuação

12	I	ABS	1500	1,36	Jorro Estável
13	I	ABS	1500	1,30	Jorro Estável
14	I	ABS	1800	0,61	Leito Fixo
15	I	ABS	1800	1,39	Jorro Estável
16	I	ABS	1800	1,45	Jorro Estável
17	I	ABS	1800	1,5	Jorro Estável
18	I	ABS	1800	1,64	Instabilidade
19	I	ABS	1800	1,74	Instabilidade
20	I	ABS	1800	1,52	Jorro Estável
21	I	ABS	1800	1,42	Jorro Estável
22	I	ABS	2100	0,68	Leito Fixo
23	I	ABS	2100	1,48	Jorro Estável
24	I	ABS	2100	1,59	Instabilidade
25	I	ABS	2100	1,69	Instabilidade
26	I	ABS	2100	1,83	Instabilidade
27	I	ABS	2100	1,98	Instabilidade
28	I	ABS	2100	1,72	Instabilidade
29	I	ABS	2500	0,69	Leito Fixo
30	I	ABS	2500	1,6	Instabilidade
31	I	ABS	2500	1,68	Instabilidade
32	I	ABS	2500	1,84	Instabilidade
33	I	ABS	2500	1,92	Instabilidade
34	I	ABS	2500	1,79	Instabilidade
35	I	ABS	3000	0,98	Leito Fixo
36	I	ABS	3000	1,67	Instabilidade
37	I	ABS	3000	1,75	Instabilidade
38	I	ABS	3000	1,8	Instabilidade
39	I	ABS	3000	1,9	Instabilidade
40	I	Poliestireno	1200	1,1	Caso atípico
41	I	Poliestireno	1200	1,41	Caso atípico
42	I	Poliestireno	1200	0,83	Jorro Estável

Tabela3.2 - Continuação

43	I	Poliestireno	1200	0,81	Jorro Estável
44	I	Poliestireno	1800	0,33	Leito Fixo
45	I	Poliestireno	1800	0,96	Jorro Estável
46	I	Poliestireno	1800	1,14	Jorro Estável
47	I	Poliestireno	1800	1,24	Caso atípico
48	I	Poliestireno	1800	1,4	Caso atípico
49	I	Poliestireno	1800	0,95	Jorro Estável
50	I	Poliestireno	2500	0,47	Leito Fixo
51	I	Poliestireno	2500	1,15	Caso atípico
52	I	Poliestireno	2500	1,21	Caso atípico
53	I	Poliestireno	2500	1,45	Caso atípico
54	I	Poliestireno	2500	1,66	Caso atípico
55	I	Poliestireno	2500	1,93	Caso atípico
56	I	Poliestireno	2500	1,10	Jorro Estável
57	I	Poliestireno	2500	1,06	Jorro Estável
58	I	Poliestireno	3000	0,49	Leito Fixo
59	I	Poliestireno	3000	1,1	Jorro Estável
60	I	Poliestireno	3000	1,46	Jorro Estável
61	I	Poliestireno	3000	1,64	Caso atípico
62	I	Poliestireno	3000	1,42	Jorro Estável
63	I	Poliestireno	3000	1,2	Jorro Estável
64	I	Poliestireno	3500	0,51	Leito Fixo
65	I	Poliestireno	3500	1,21	Jorro Estável
66	I	Poliestireno	3500	1,3	Jorro Estável
67	I	Poliestireno	3500	1,6	Jorro Estável
68	I	Poliestireno	3500	1,4	Jorro Estável
69	I	Poliestireno	3500	1,68	Caso atípico
70	I	Poliestireno	3500	1,23	Jorro Estável
71	I	Poliestireno	3500	1,16	Jorro Estável
72	I	Poliestireno	4000	0,52	Leito Fixo
73	I	Poliestireno	4000	1,18	Jorro Estável

Tabela3.2 - Continuação

74	I	Poliestireno	4000	1,54	Caso atípico
75	I	Poliestireno	4000	1,66	Caso atípico
76	I	Poliestireno	4000	1,22	Caso atípico
77	I	Poliestireno	4000	1,16	Jorro Estável
78	I	Sangel	1200	0,30	Leito Fixo
79	I	Sangel	1200	0,72	Jorro Estável
80	I	Sangel	1200	1,05	Leito Fixo
81	I	Sangel	1200	0,77	Jorro Estável
82	I	Sangel	1800	0,32	Leito Fixo
83	I	Sangel	1800	1,01	Jorro Estável
84	I	Sangel	1800	1,2	Jorro Estável
85	I	Sangel	1800	1,32	Jorro Estável
86	I	Sangel	1800	0,92	Jorro Estável
87	I	Sangel	2500	0,35	Leito Fixo
88	I	Sangel	2500	1,05	Jorro Estável
89	I	Sangel	2500	1,16	Jorro Estável
90	I	Sangel	2500	1,35	Jorro Estável
91	I	Sangel	2500	1,06	Jorro Estável
92	I	Sangel	3500	0,47	Leito Fixo
93	I	Sangel	3500	1,29	Jorro Estável
94	I	Sangel	3500	1,18	Jorro Estável
95	I	Sangel	4000	1,04	Jorro Estável
96	I	Sangel	4000	0,61	Leito Fixo
97	I	Sangel	4000	1,17	Jorro Estável
98	I	Sangel	4000	1,23	Jorro Estável
99	I	Acrílico	1200	0,29	Leito Fixo
100	I	Acrílico	1200	0,98	Jorro Estável
101	I	Acrílico	1200	1,13	Jorro Estável
102	I	Acrílico	1200	0,92	Jorro Estável
103	I	Acrílico	1800	0,51	Leito Fixo
104	I	Acrílico	1800	0,98	Jorro Estável

Tabela3.2 - Continuação

105	I	Acrílico	1800	1,15	Jorro Estável
106	I	Acrílico	1800	1,04	Jorro Estável
107	I	Acrílico	3000	0,61	Leito Fixo
108	I	Acrílico	3000	1,31	Jorro Estável
109	I	Acrílico	3000	1,35	Jorro Estável
110	I	Acrílico	3000	1,22	Jorro Estável
111	II	Acrílico	900	0,31	Leito Fixo
112	II	Acrílico	900	0,79	Jorro Estável
113	II	Acrílico	900	0,72	Jorro Estável
114	II	Acrílico	1800	0,34	Leito Fixo
115	II	Acrílico	1800	1,05	Jorro Estável
116	II	Acrílico	1800	1,03	Jorro Estável
117	II	Acrílico	1800	0,97	Jorro Estável
118	II	Acrílico	2100	0,52	Leito Fixo
119	II	Acrílico	2100	1,27	Jorro Estável
120	II	Acrílico	2100	1,18	Jorro Estável
121	II	Acrílico	2100	1,04	Jorro Estável
122	II	ABS	600	0,28	Leito Fixo
123	II	ABS	600	0,81	Jorro Estável
124	II	ABS	600	0,85	Jorro Estável
125	II	ABS	600	1,04	Instabilidade
126	II	ABS	600	1,21	Instabilidade
127	II	ABS	600	0,75	Jorro Estável
128	II	ABS	1500	0,32	Leito Fixo
129	II	ABS	1500	1,22	Jorro Estável
130	II	ABS	1500	1,31	Jorro Estável
131	II	ABS	1500	1,43	Jorro Estável
132	II	ABS	1500	1,57	Instabilidade
133	II	ABS	1500	1,37	Jorro Estável
134	II	Sangel	2100	0,43	Leito Fixo
135	II	Sangel	2100	1,19	Jorro Estável

Tabela3.2 - Continuação

136	II	Sangel	2100	1,23	Jorro Estável
137	II	Sangel	2100	1,08	Jorro Estável
138	II	Sangel	2500	0,5	Leito Fixo
139	II	Sangel	2500	1,16	Jorro Estável
140	II	Sangel	2500	1,22	Jorro Estável
141	II	Sangel	2500	1,26	Jorro Estável
142	II	Sangel	2500	1,16	Jorro Estável
143	II	Poliestireno	900	0,42	Leito Fixo
144	II	Poliestireno	900	0,71	Jorro Estável
145	II	Poliestireno	900	0,76	Jorro Estável
146	II	Poliestireno	900	0,93	Jorro Estável
147	II	Poliestireno	1500	0,47	Leito Fixo
148	II	Poliestireno	1500	0,92	Jorro Estável
149	II	Poliestireno	1500	1,01	Jorro Estável
150	II	Poliestireno	1500	1,07	Jorro Estável
151	II	Poliestireno	1800	0,5	Leito Fixo
152	II	Poliestireno	1800	1,1	Jorro Estável
153	II	Poliestireno	1800	1,14	Jorro Estável
154	II	Poliestireno	1800	1,08	Jorro Estável
155	III	Poliestireno	600	0,08	Leito Fixo
156	III	Poliestireno	600	0,47	Instabilidade
157	III	Poliestireno	600	0,59	Instabilidade
158	III	Poliestireno	600	1,39	Instabilidade
159	III	Poliestireno	600	0,53	Instabilidade
160	III	Poliestireno	900	0,11	Leito Fixo
161	III	Poliestireno	900	0,44	Instabilidade
162	III	Poliestireno	900	0,48	Instabilidade
163	III	Poliestireno	900	0,6	Slug
164	III	Poliestireno	900	1,1	Caso atípico
165	III	Poliestireno	900	1,18	Caso atípico
166	III	Poliestireno	900	0,51	Instabilidade

Tabela3.2 - Continuação

167	III	Poliestireno	1500	0,23	Leito Fixo
168	III	Poliestireno	1500	0,43	Slug
169	III	Poliestireno	1500	0,58	Slug
170	III	Poliestireno	1500	0,6	Slug
171	III	Placebos	1500	0,29	Leito Fixo
172	III	Placebos	1500	1,48	Slug
173	III	Placebos	1500	1,53	Slug
174	III	Placebos	1800	0,8	Leito Fixo
175	III	Placebos	1800	1,52	Slug
176	III	Placebos	1800	1,54	Slug
177	III	Acrílico	600	0,22	Leito Fixo
178	III	Acrílico	600	0,45	Instabilidade
179	III	Acrílico	600	0,57	Instabilidade
180	III	Acrílico	600	0,77	Instabilidade
181	III	Acrílico	600	0,49	Instabilidade
182	III	Acrílico	600	0,43	Instabilidade
183	III	Acrílico	1200	0,24	Leito Fixo
184	III	Acrílico	1200	0,58	Instabilidade
185	III	Acrílico	1200	0,77	Instabilidade
186	III	Acrílico	1200	0,62	Instabilidade
187	III	Acrílico	1800	0,28	Leito Fixo
188	III	Acrílico	1800	0,47	Slug
189	III	Acrílico	1800	0,49	Slug
190	III	Acrílico	1800	0,51	Slug
191	III	Sangel	600	0,39	Leito Fixo
192	III	Sangel	600	0,62	Instabilidade
193	III	Sangel	600	0,99	Instabilidade
194	III	Sangel	600	1,22	Instabilidade
195	III	Sangel	600	0,72	Instabilidade
196	III	Sangel	1200	0,4	Leito Fixo
197	III	Sangel	1200	0,6	Slug

Tabela3.2 - Continuação

198	III	Sangel	1200	0,68	Slug
199	III	Sangel	1200	0,77	Slug
200	III	Sangel	1800	0,38	Leito Fixo
201	III	Sangel	1800	0,64	Slug
202	III	Sangel	1800	0,67	Slug
203	III	ABS	600	0,11	Leito Fixo
204	III	ABS	600	0,69	Instabilidade
205	III	ABS	600	1,17	Instabilidade
206	III	ABS	600	1,37	Instabilidade
207	III	ABS	600	0,74	Instabilidade
208	III	ABS	1200	0,26	Leito Fixo
209	III	ABS	1200	0,47	Slug
210	III	ABS	1200	0,56	Slug
211	III	ABS	1200	0,59	Slug
212	III	ABS	1200	0,64	Slug
213	III	ABS	1200	0,51	Slug
214	III	ABS	1800	0,27	Leito Fixo
215	III	ABS	1800	0,49	Slug
216	III	ABS	1800	0,51	Slug
217	III	ABS	1800	0,65	Slug
218	IV	Poliestireno	600	0,08	Leito Fixo
219	IV	Poliestireno	600	0,56	Instabilidade
220	IV	Poliestireno	600	1,12	Instabilidade
221	IV	Poliestireno	600	0,52	Instabilidade
222	IV	Poliestireno	900	0,09	Leito Fixo
223	IV	Poliestireno	900	0,69	Caso atípico
224	IV	Poliestireno	900	0,92	Caso atípico
225	IV	Poliestireno	900	0,53	Instabilidade
226	IV	Poliestireno	1500	0,18	Leito Fixo
227	IV	Poliestireno	1500	0,54	Instabilidade
228	IV	Poliestireno	1500	0,93	Instabilidade

Tabela3.2 - Continuação

229	IV	Poliestireno	1500	0,98	Caso atípico
230	IV	Poliestireno	1500	0,95	Caso atípico
231	IV	Poliestireno	1800	0,21	Leito Fixo
232	IV	Poliestireno	1800	0,43	Slug
233	IV	Poliestireno	1800	0,47	Slug
234	IV	ABS	600	0,19	Leito Fixo
235	IV	ABS	600	0,67	Instabilidade
236	IV	ABS	600	0,82	Instabilidade
237	IV	ABS	600	0,7	Instabilidade
238	IV	ABS	1200	0,11	Leito Fixo
239	IV	ABS	1200	0,57	Slug
240	IV	ABS	1200	0,66	Slug
241	IV	ABS	1200	0,8	Slug
242	IV	ABS	1200	0,85	Slug
243	IV	ABS	1200	0,72	Slug
244	IV	ABS	1800	0,14	Leito Fixo
245	IV	ABS	1800	0,57	Slug
246	IV	ABS	1800	0,6	Slug
247	IV	Sangel	1800	0,21	Leito Fixo
248	IV	Sangel	1800	0,47	Slug
249	IV	Sangel	1800	0,51	Slug
250	IV	Acrílico	1800	0,22	Leito Fixo
251	IV	Acrílico	1800	0,48	Slug
252	IV	Acrílico	1800	0,53	Slug

O número total de corridas realizadas foi de 546 e escolheu-se 252 para constar na tabela acima. Essas corridas foram escolhidas aleatoriamente para se ter uma noção dos regimes que foram observados experimentalmente.

Os regimes de leito fixo, jorro estável e "slug" são bem definidos por Mathur e Epstein (1974), conforme apresentado no Capítulo 2. Considerou-se instabilidade de regime toda situação em que ocorreram pulsos, rotação na

região de jorro e da fonte, ou seja, qualquer regime fluidodinamicamente ativo que não se caracterizou como um dos regimes citados acima. Decidiu-se ainda denominar de "caso atípico" aos regimes obtidos em alguns experimentos onde as partículas se agrupavam junto à parede, na região anular, aumentando o diâmetro da região de jorro e formando um arco num movimento bem definido e cíclico; onde ocorreu um espaço considerável no fundo do leito e acima prevaleceu o jorro estável. Entretanto, esses regimes citados acima não se enquadraram dentro dos regimes instáveis, pois o movimento era sempre definido e cíclico.

Durante a realização dos experimentos de aquisição de queda de pressão por tempo, também foi possível adquirir alguns dados de projeto de leito de jorro como: queda de pressão máxima, de jorro estável e velocidade de jorro mínimo. Tendo em mãos esses dados experimentais, foi então feito um estudo comparativo entre os valores obtidos experimentalmente com os valores calculados por correlações existentes na literatura, citadas no Capítulo 2, as quais as faixas de condições experimentais se encontraram dentro da faixa estudada. Foi desenvolvido um aplicativo, cuja linguagem utilizada foi Borland Delphi 2.0, que permite os cálculos dos parâmetros de projeto de leitos de jorro, queda de pressão máxima, queda de pressão de jorro, vazão de jorro mínimo e altura máxima de jorro estável através de correlações mostradas no Capítulo 2. O procedimento para obtenção dos valores experimentais desses parâmetros foi a construção da curva de queda de pressão em função da vazão ar para os experimentos onde verificou-se o jorro estável, para vazões crescentes e decrescentes, de acordo com o procedimento já bem definido na literatura (Mathur e Epstein, 1974). O valor da queda de pressão considerado para cada vazão foi a média dos valores adquiridos no intervalo de 12 segundos.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

4.1 – Análise das flutuações da queda de pressão em tempo real

De acordo com o procedimento descrito no Capítulo anterior, os dados de queda de pressão versus tempo foram adquiridos e foram observados os regimes de leito fixo, jorro estável, instável e "slugging", variando-se a configuração do leito, as partículas, a carga de sólidos e a vazão do ar. Dentre os regimes instáveis se encontram os leitos pulsantes, os leitos com as partículas em desordem (sem movimento definido), e também observou-se alguns "casos atípicos" que serão discutidos mais adiante.

Foi verificado, como especificado na literatura, que o regime de jorro estável é restrito para uma faixa de vazão de gás, dada a partícula e a geometria do leito. As transições entre regimes ou condições que propiciam a instalação de um regime podem ser apresentados em diagramas, que levam em consideração as características do leito, das partículas e da vazão do gás e que são denominados diagramas de fase (Mathur e Epstein, 1974). O diagrama de fase, então, interpreta uma dada combinação de leito e partículas, mostrando a especificidade dos regimes para cada tipo de leito e partículas. Com os dados adquiridos neste trabalho, pudemos obter diagramas de fase (Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4). Podemos observar pela Figura 4.1 que para uma dada partícula e geometria do leito, existe uma altura máxima de jorro estável, acima da qual o regime estável já não é mais observado. Para uma faixa restrita de vazões de gás e cargas, o jorro estável prevalece com boa taxa de circulação e regiões definidas (central, fonte, anular). Comparando as Figuras 4.1 e 4.2 observa-se uma região de jorro mais restrita e uma altura máxima de jorro estável menor para as condições dadas em 4.2. Nas Figuras 4.3 e 4.4 não foi observado o regime de jorro estável devido à geometria do leito e partículas analisadas. Para uma determinada carga e faixa de vazões, a transição se deu de leito fixo para um regime com uma fonte pobre em partículas, taxa de circulação ruim ou desordem, não se enquadrando nas características do regime de jorro estável (nos diagramas caracterizamos esse regime como instável). O regime de slug ficou bem definido para uma determinada carga e faixa de vazão e em seguida o movimento desordenado de partículas se instalou. A vazão foi aumentada até o limite de escape das partículas do leito.

As Figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 mostram outros diagramas de fase obtidos experimentalmente neste trabalho, demonstrando a especificidade de regimes para cada leito e partícula. A Figura 4.5 mostra o comportamento dos placebos no leito II, onde não obteve-se regime de jorro estável, foi observado somente o regime de leito fixo e instabilidade.

Nos leitos de geometrias III e IV foram observados "casos atípicos", onde as partículas se deslocavam para a parede do leito formando um arco num movimento bem definido e cíclico

Para todas as experiências realizadas foram construídos os gráficos de queda de pressão no leito em função do tempo, como os exemplificados nas Figuras 4.9 , 4.10 e 4.11. As Figuras 4.9-a, 4.9-b e 4.9-c mostram o resultado típico obtido para o regime de leito fixo. Para todos os experimentos de leito fixo, o resultado obtido foi semelhante, independentemente da partícula e da geometria do leito. As oscilações apresentam amplitude bastante pequena e uma freqüência muito elevada. O comportamento obtido para o regime de jorro estável também manteve um padrão bem determinado em relação às flutuações de pressão, que pode ser observado nas Figuras 4.10-a, 4.10-b, 4.10-c, 4.10-d, 4.10-e, 4.10-f, 4.10-g e 4.10-h. Para o leito em movimento de jorro estável, as flutuações apresentam amplitude maior e mais espaçadas em relação ao tempo, comparadas ao leito fixo. As Figuras 4.11-a, 4.11-b, 4.11-c mostram o comportamento da queda de pressão versus tempo para o leito apresentando "slugs" e as Figuras 4.11-d e 4.11-e caracterizam um leito de jorro já apresentando instabilidade. Também observamos um padrão no comportamento das flutuações para regime de slugs, obtido em todos os experimentos em que o regime se instalou, independente de geometria de leito e partículas. As flutuações apresentaram amplitudes ainda maiores que as do jorro estável e uma freqüência menor. Os leitos instáveis apresentaram amplitude altas e uma freqüência das oscilações maiores que para leito de jorro estável e slug. As Figuras 4.11-f e 4.11-g caracterizam as flutuações para os "casos atípicos" observados.

As flutuações de pressão em torno do valor médio apresentaram aproximadamente 1,4% de amplitude para leito fixo, 13,4% para leito de jorro e 34,4% para "slug".

O que se pode verificar desses resultados é que existe a possibilidade de identificação do regime fluidodinâmico do leito através de uma análise comparativa entre os gráficos das flutuações da queda de pressão versus tempo. A análise individual

das medidas de queda de pressão em tempo real não caracteriza o regime de forma objetiva. A diferença entre os gráficos se resume basicamente no espaçamento entre as oscilações e observa-se uma tendência de um menor número de períodos de oscilações para os gráficos de leitos em slugging em relação ao jorro estável, e também do jorro estável em relação ao leito fixo.

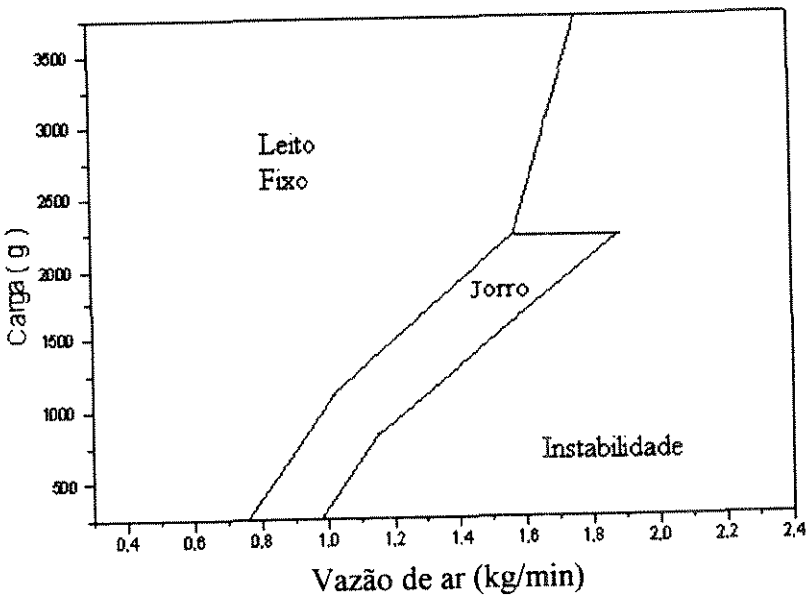


Figura 4.1 - Diagrama de fase, ABS,
$D_c = 20cm$, $\theta = 60^0$, $D_i = 5,0cm$

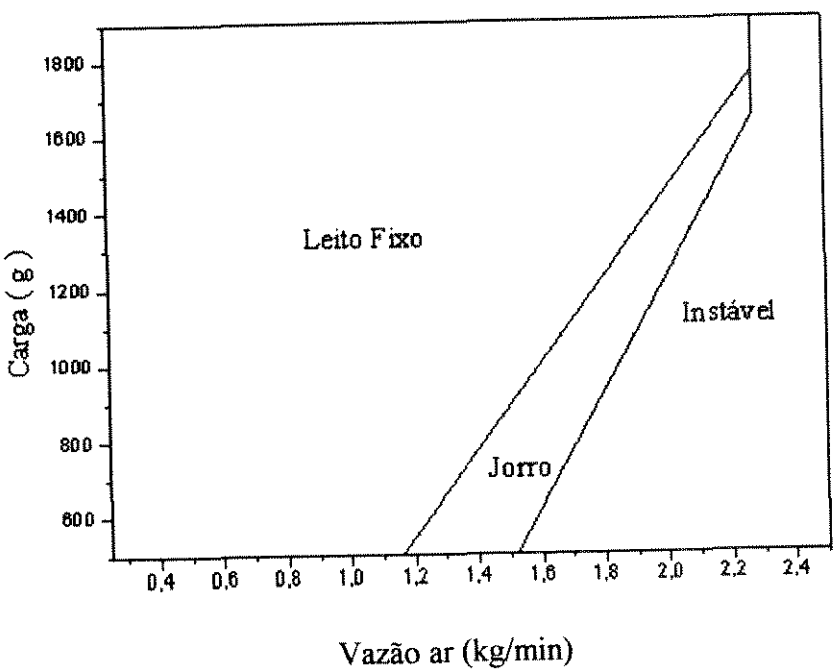


Figura 4.2 - Diagrama de fase, Placebos, $d_p = 7,24$ mm
$D_c = 20cm$, $\theta = 60^0$, $D_i = 5,0cm$

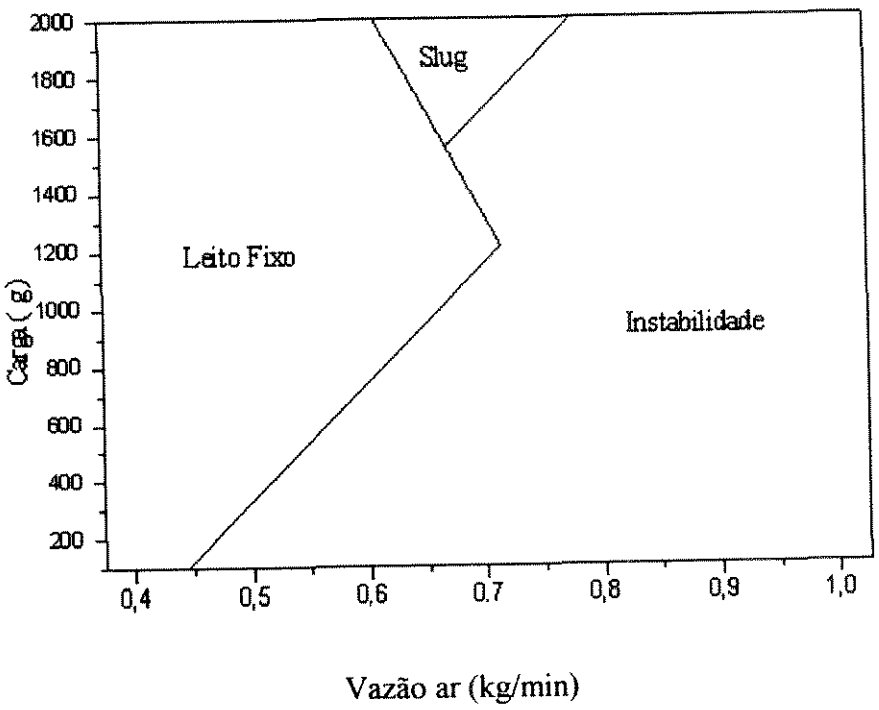


Figura 4.3 – Diagrama de fase, acrílico

D_c = 10cm, $\theta = 45^0$, D_i = 2,5cm

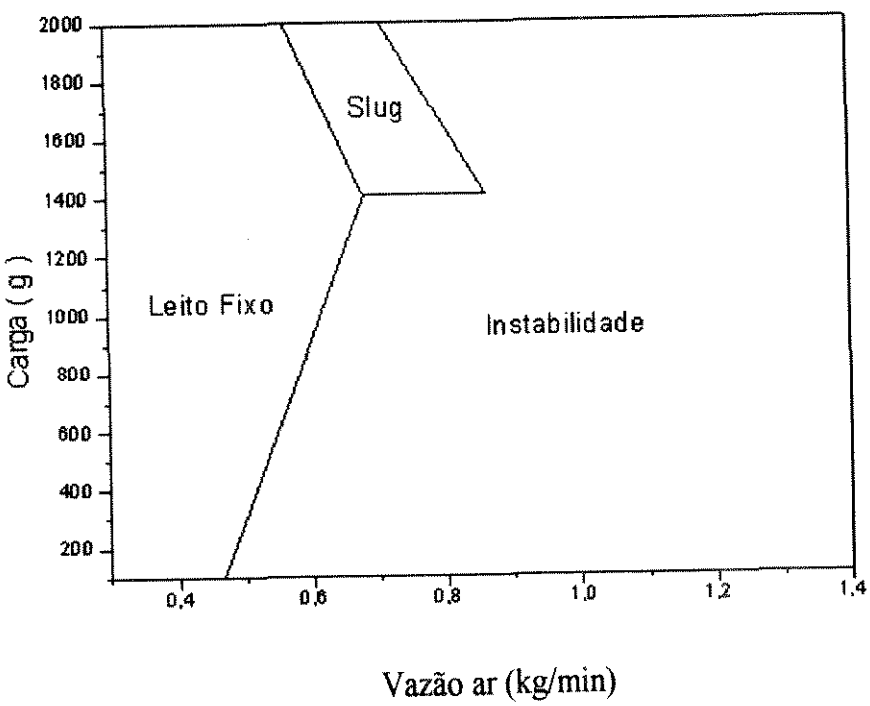


Figura 4.4 – Diagrama de fase, sangel

D_c = 10cm, $\theta = 45^0$, D_i = 2,5cm

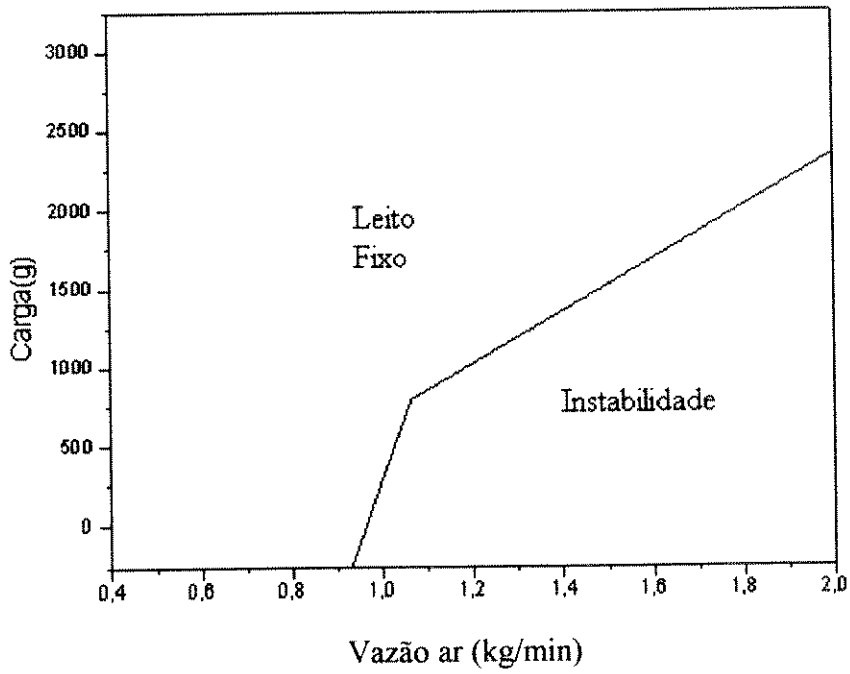


Figura 4.5 – Diagrama de fase, Placebos

$D_c = 20cm$, $\theta = 45^0$, $D_i = 5,0cm$

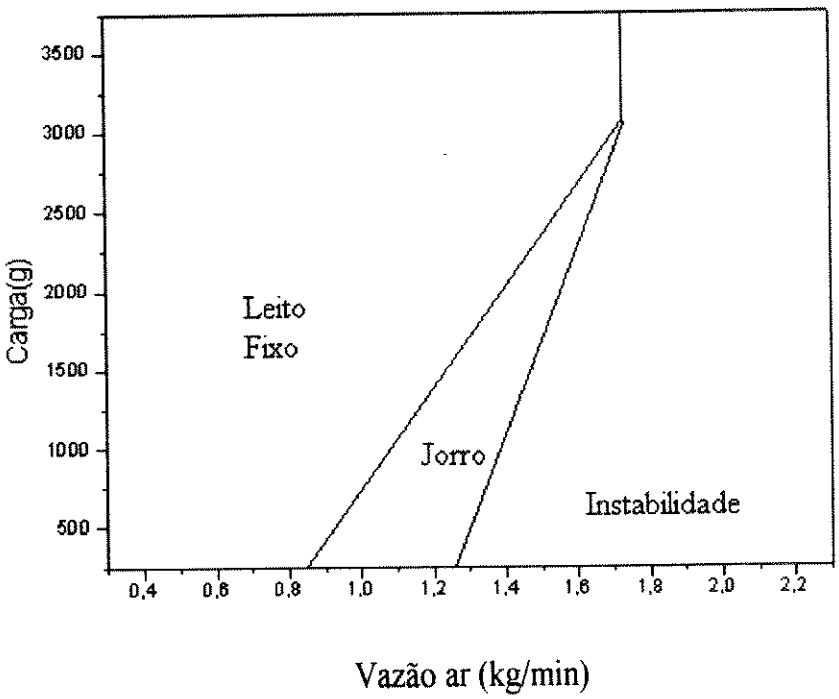


Figura 4.6 – Diagrama de fase, ABS

$D_c = 20cm$, $\theta = 45^0$, $D_i = 5,0cm$

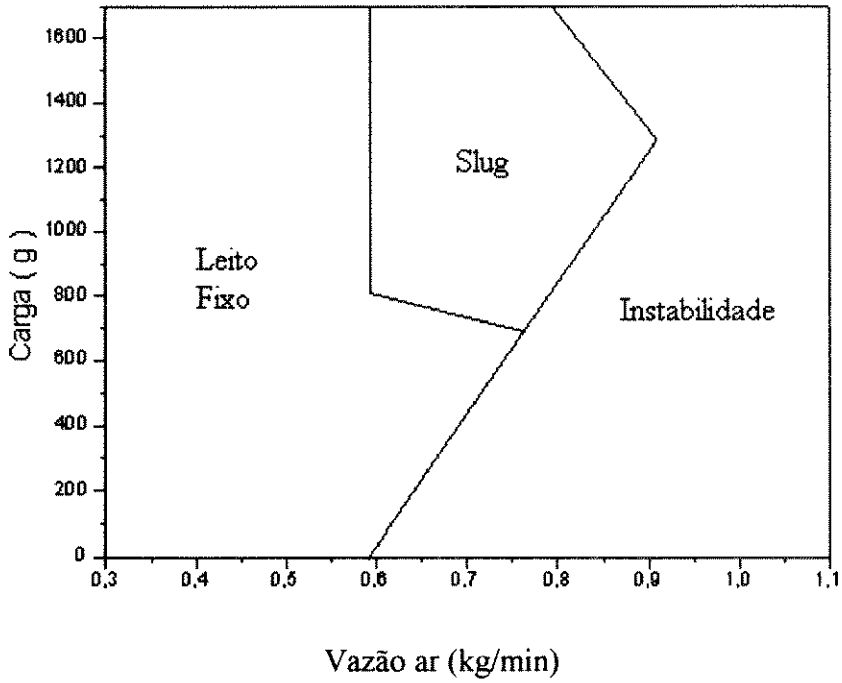


Figura 4.7 – Diagrama de fase, ABS

D_c = 10cm, $\theta = 60^0$, D_i = 5,0cm

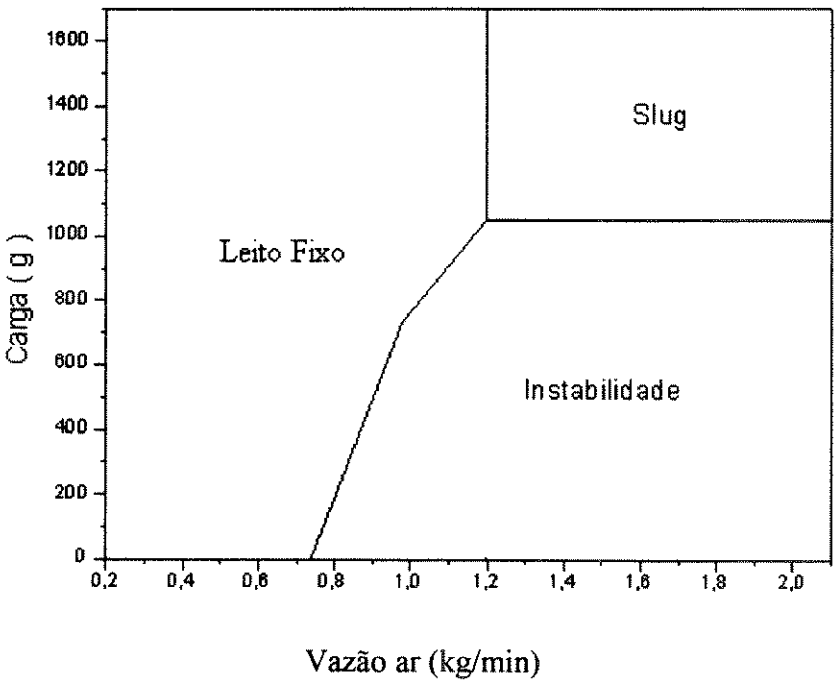


Figura 4.8 – Diagrama de fase, Placebos

D_c = 10cm, $\theta = 60^0$, D_i = 5,0cm

Cabe salientar que para todos os experimentos realizados o comportamento foi mantido, como nos exemplos das Figuras 4.9, 4.10 e 4.11

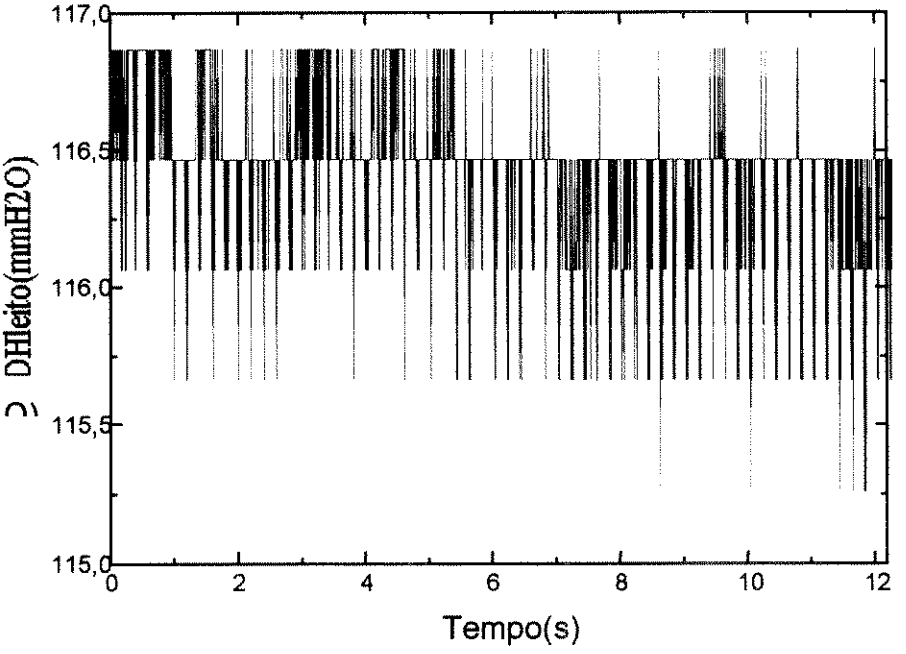


Figura 4.9-a - Acrílico, D_c = 20cm e

$\theta = 45^0$, carga = 2100g - Leito Fixo – Corrida118

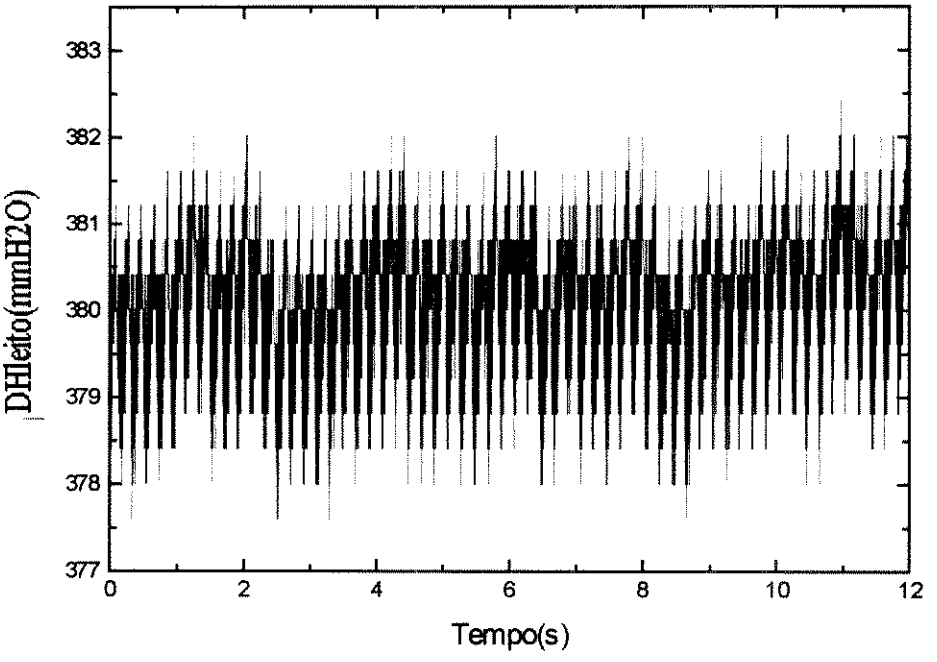


Figura 4.9-b - Acrílico, D_c = 10cm e

$\theta = 45^0$, carga = 1800g - Leito Fixo – Corrida 187

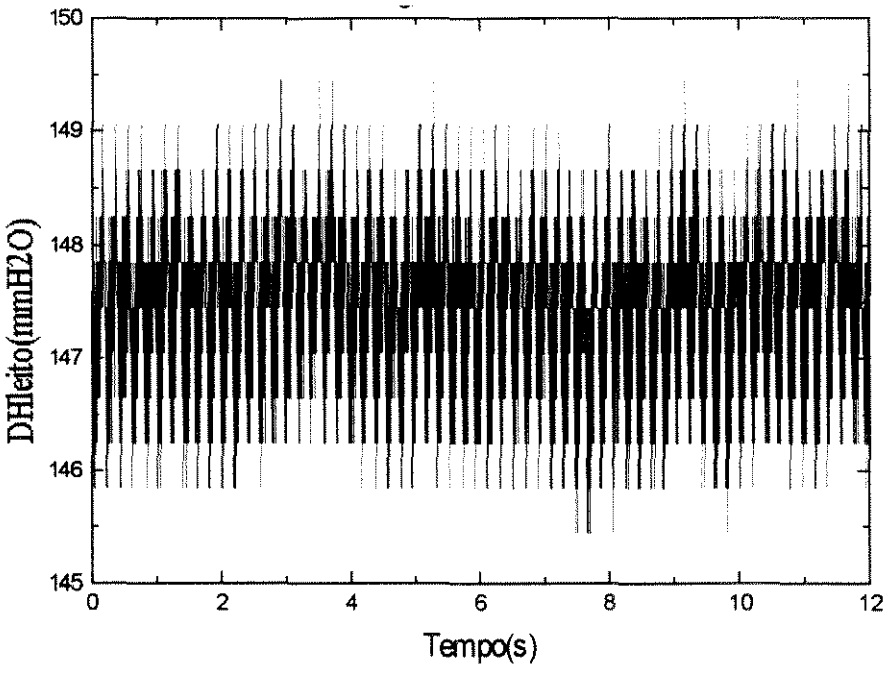


Figura 4.9-c - ABS, D_c = 20cm e
$\theta = 60^0$, carga = 1800g - Leito Fixo – Corrida 14

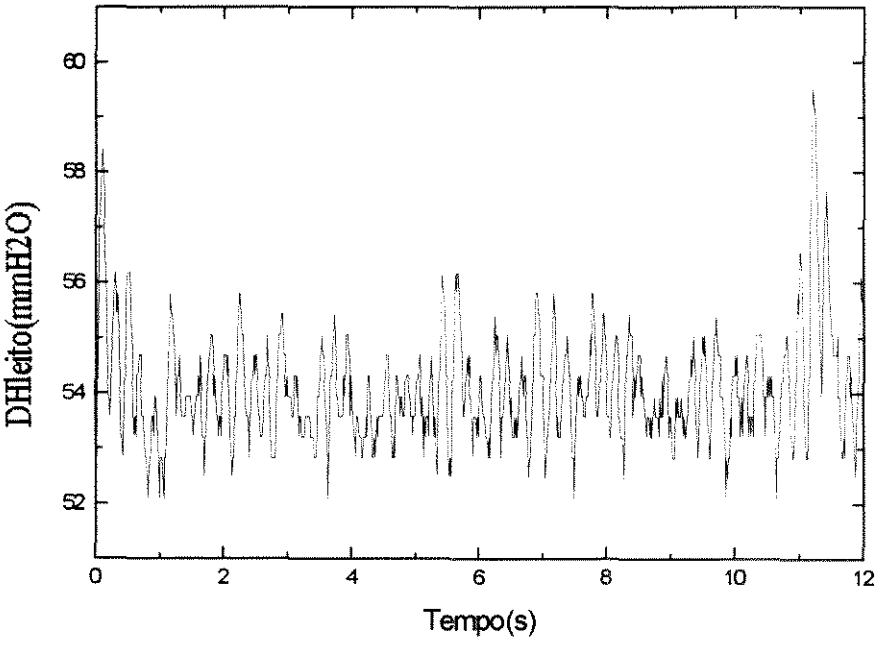


Figura 4.10-a - Sangel, D_c = 20cm e $\theta = 45^0$,
carga = 2500g - Jorro Estável – Corrida 135

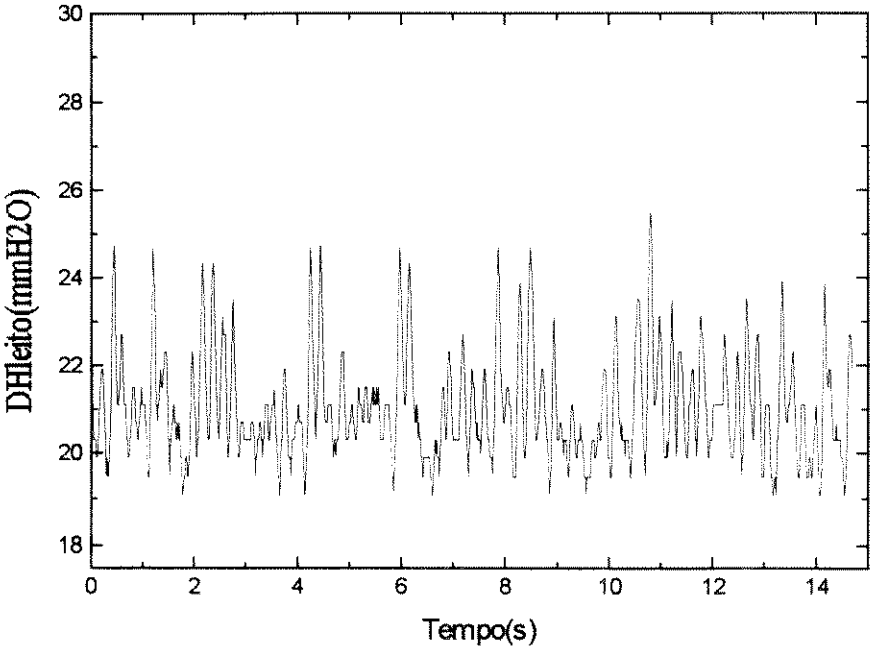


Figura 4.10-b - Acrílico, D_c = 20cm e

$\theta = 45^0$, carga = 900g - Jorro Estável – Corrida 113

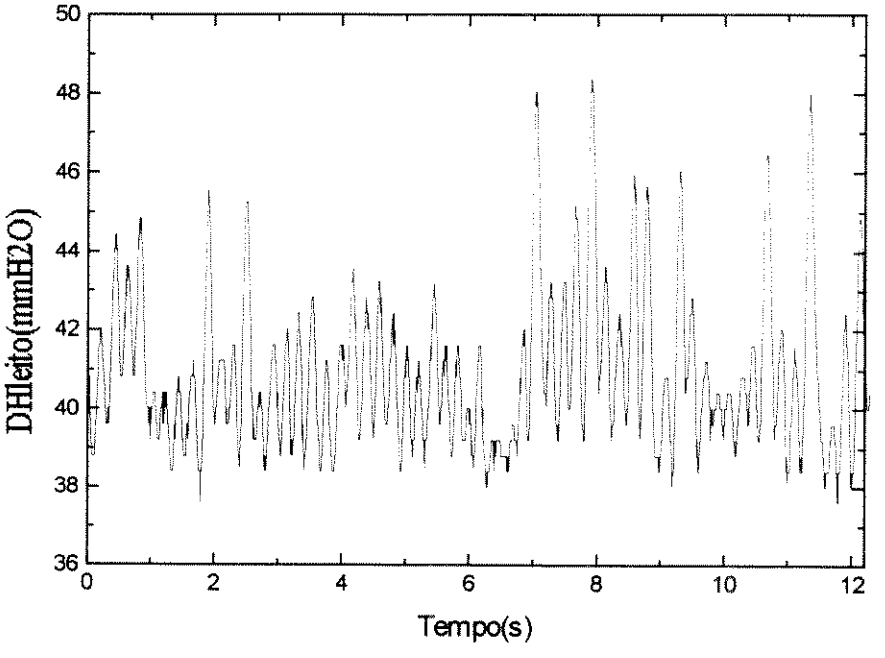


Figura 4.10-c - ABS, D_c = 20cm e

$\theta = 45^0$, carga = 1500g - Jorro Estável – Corrida 133

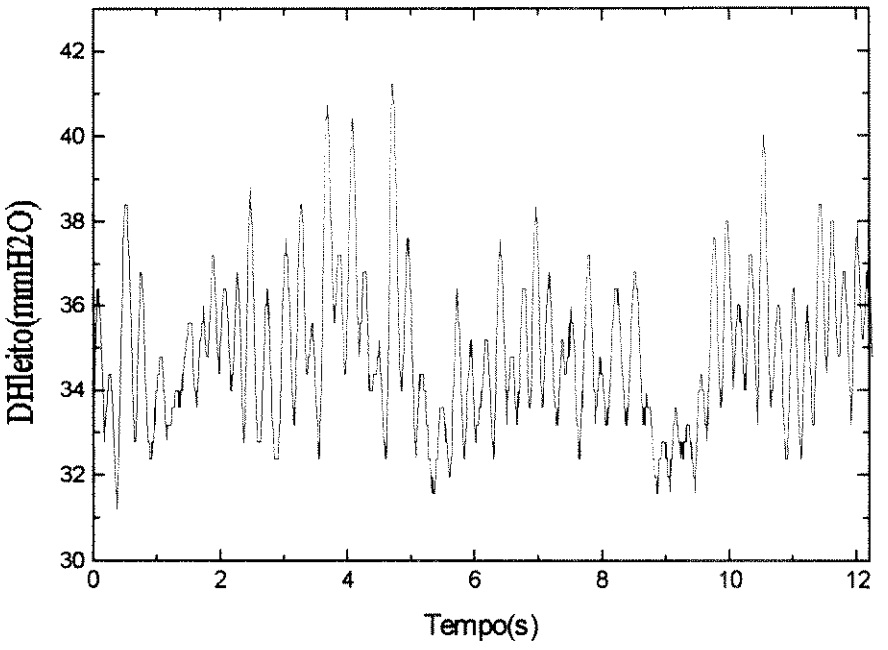


Figura 4.10-d – Acrílico, D_c = 20cm e

$\theta = 45^0$, carga = 1800g - Jorro Estável – Corrida 117

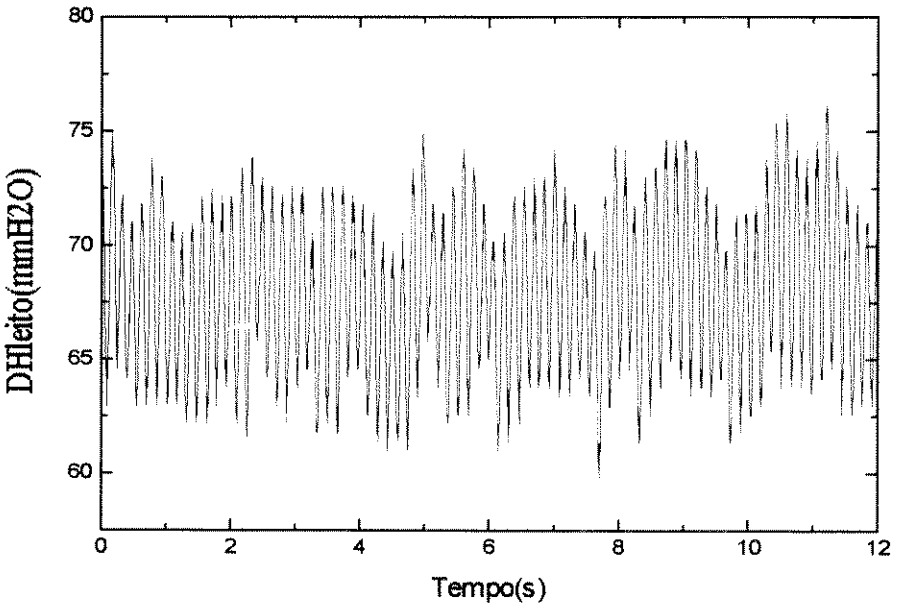


Figura 4.10-e – ABS, , D_c = 20cm e

$\theta = 60^0$, carga = 1500g - Jorro Estável – Corrida 7

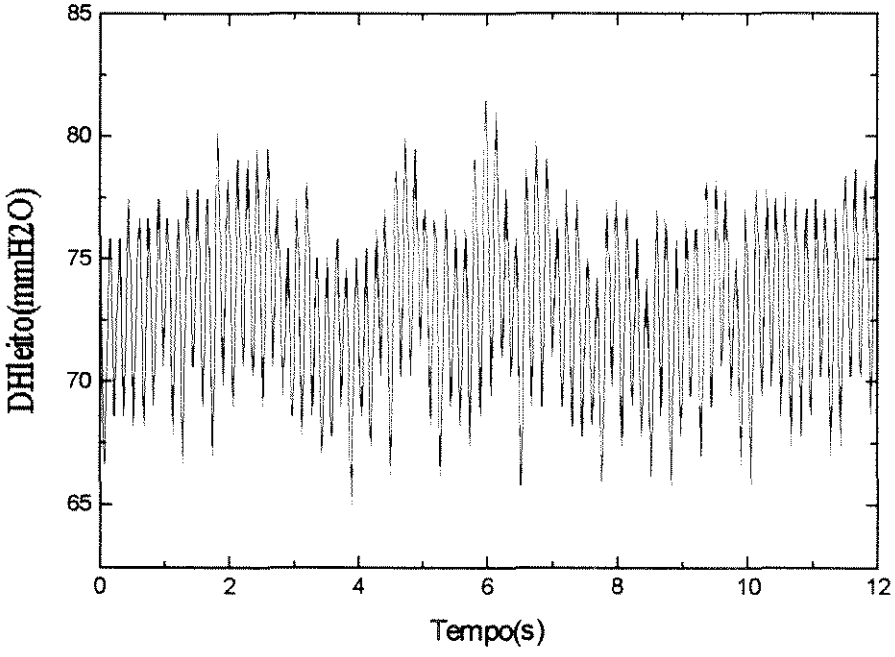


Figura 4.10-f - ABS, D_c = 20cm e

$\theta = 60^0$, carga = 1800g - Jorro Estável – Corrida 15

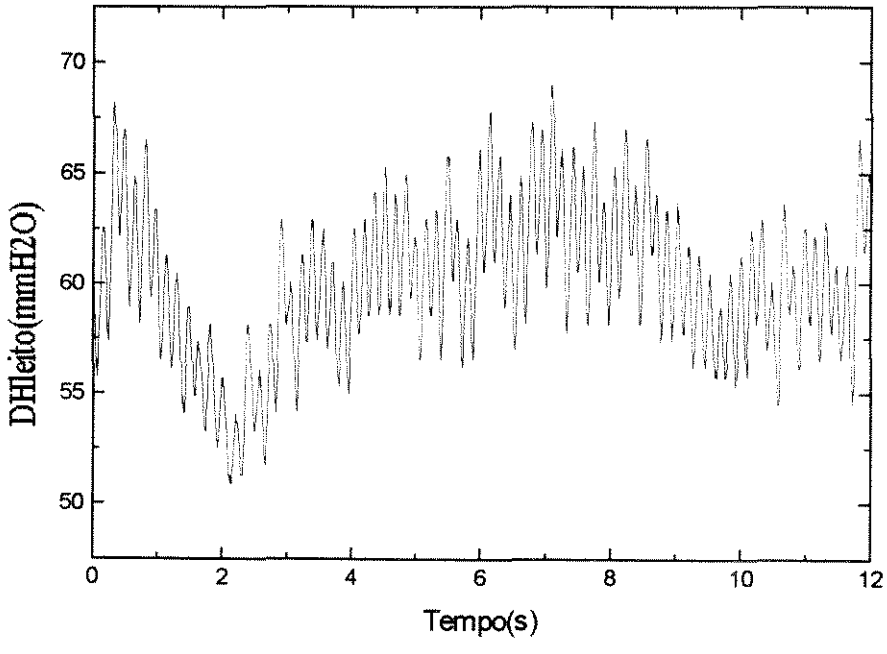


Figura 4.10-g - Acrílico, D_c = 20cm e

$\theta = 60^0$, carga = 1800g - Jorro Estável – Corrida 100

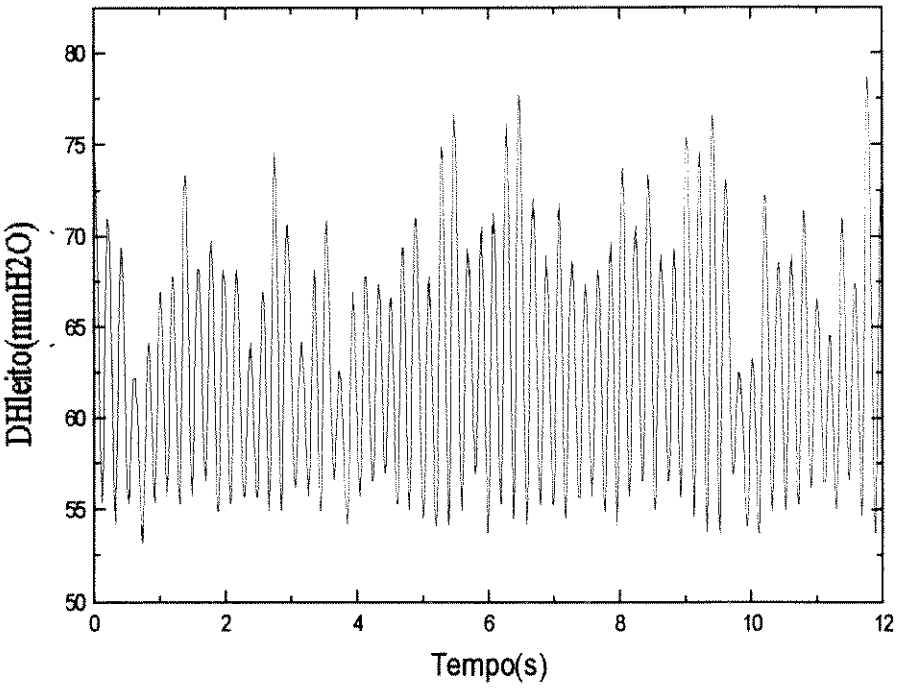


Figura 4.10-h – Poliestireno, D_c = 20cm e

$\theta = 60^0$, carga = 1800g - Jorro Estável – Corrida 42

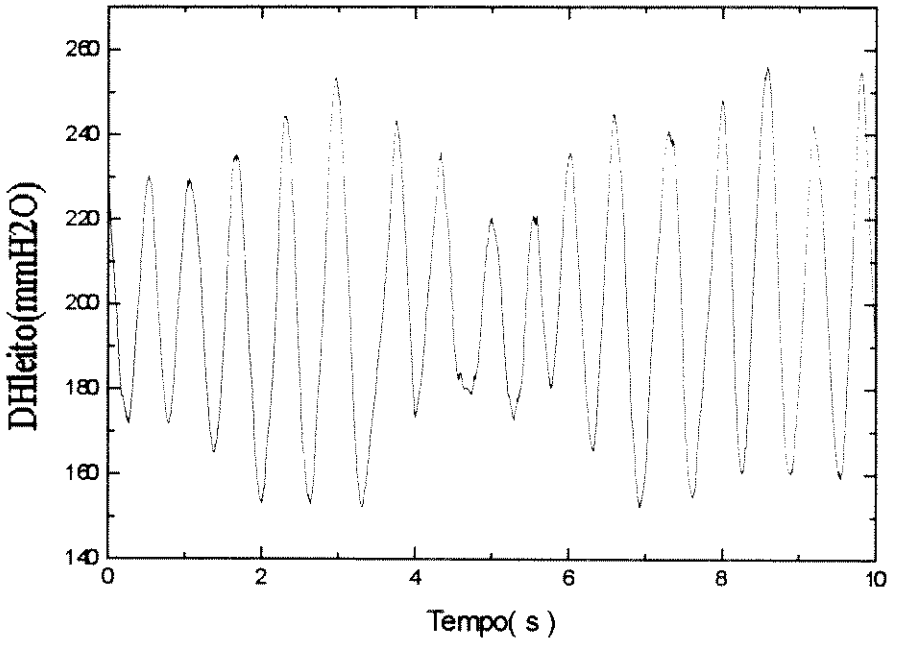


Figura 4.11-a - Placebos, D_c = 10cm e

$\theta = 60^0$, carga = 1500g - "Slugging" – Corrida 173

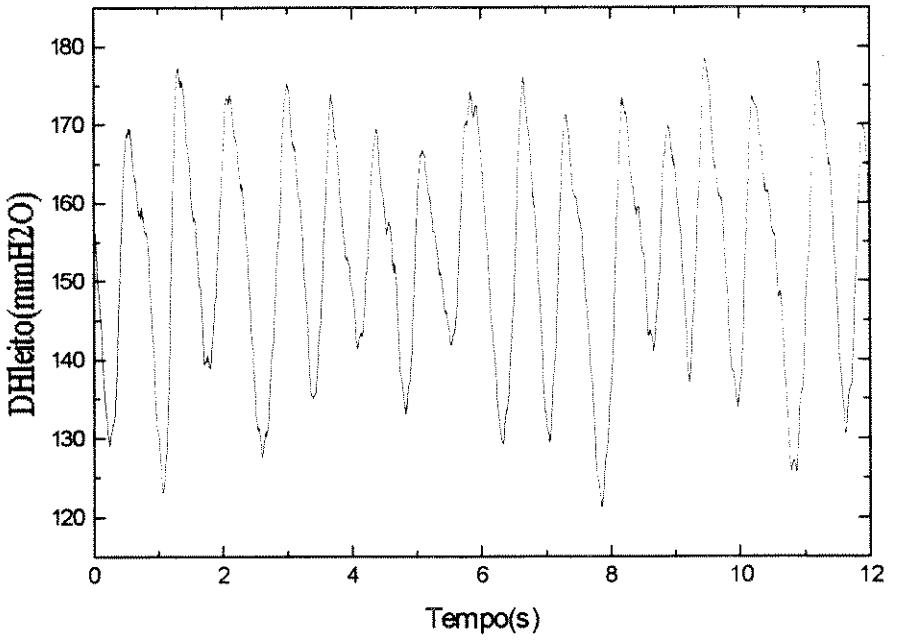


Figura 4.11-b -ABS, D_c = 10cm e $\theta = 60^0$,
carga = 1500g - "Slugging" – Corrida 210

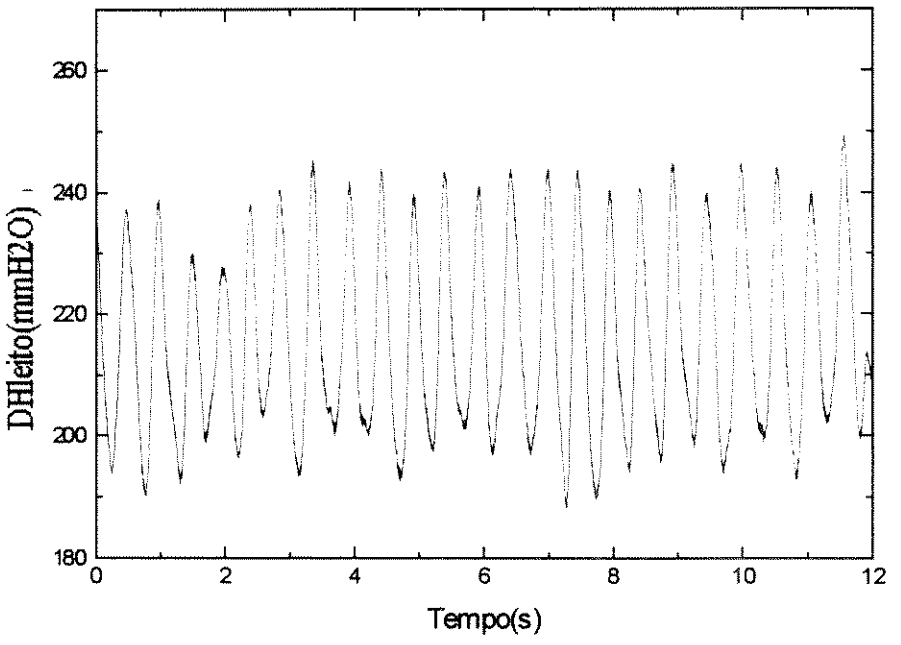


Figura 4.11-c - Sangel, D_c = 10cm e $\theta = 45^0$,
carga = 1800g - "Slugging" – Corrida 249

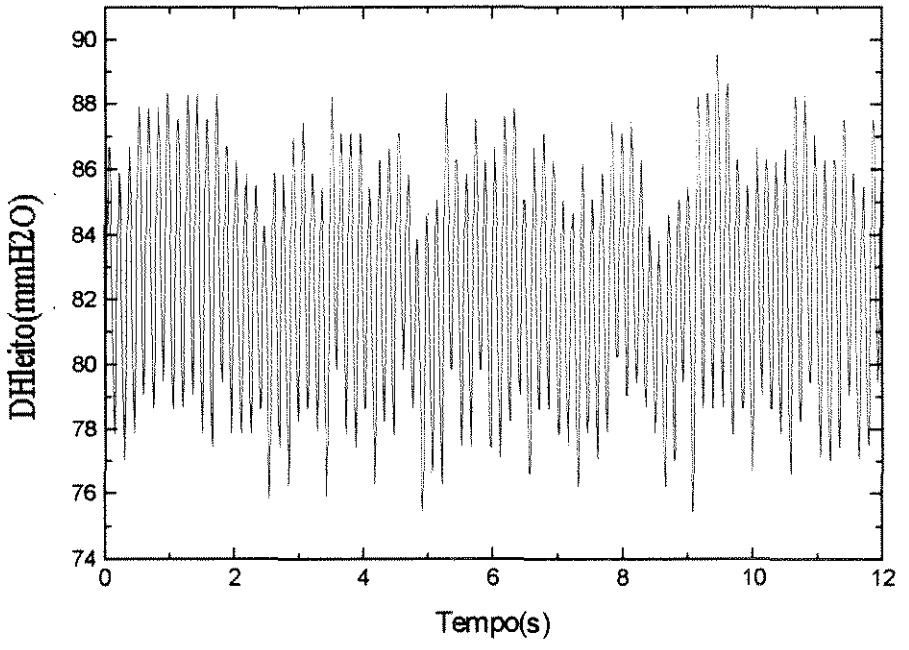


Figura 4.11-d - ABS, D_c = 20cm e

$\theta = 60^0$, carga = 2100g - Instabilidade – Corrida 25

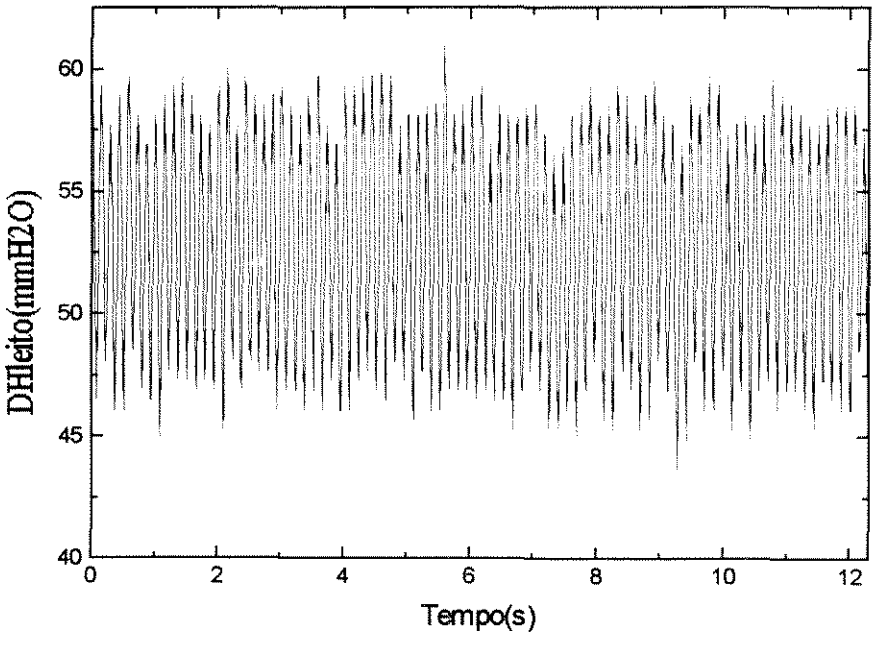


Figura 4.11-e – ABS, D_c = 20cm e

$\theta = 45^0$, carga = 1500g - Instabilidade – Corrida 132

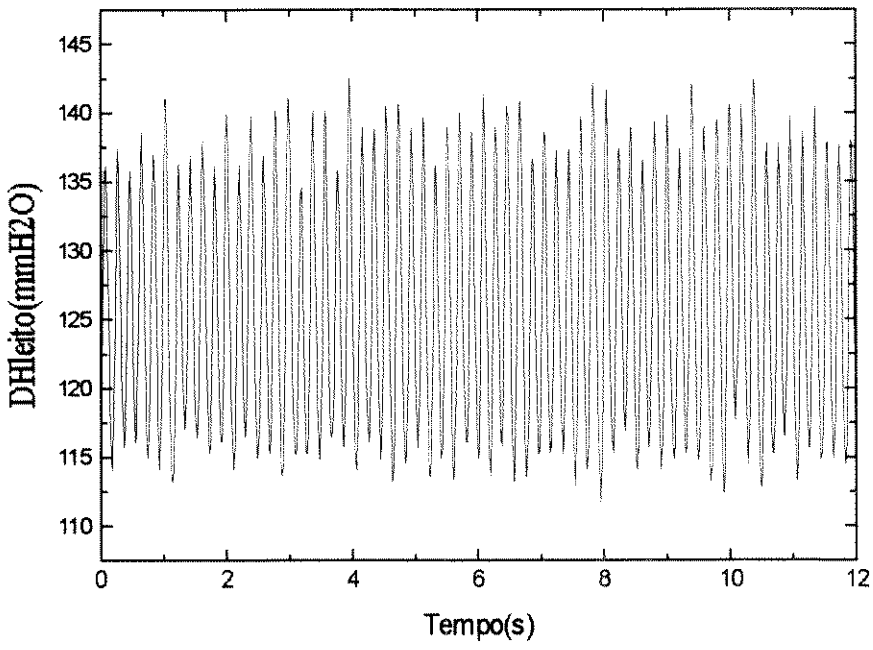


Figura 4.11-f - Poliestireno, D_c = 10cm e

$\theta = 60^0$, carga = 900g – Caso Atípico – Corrida 164

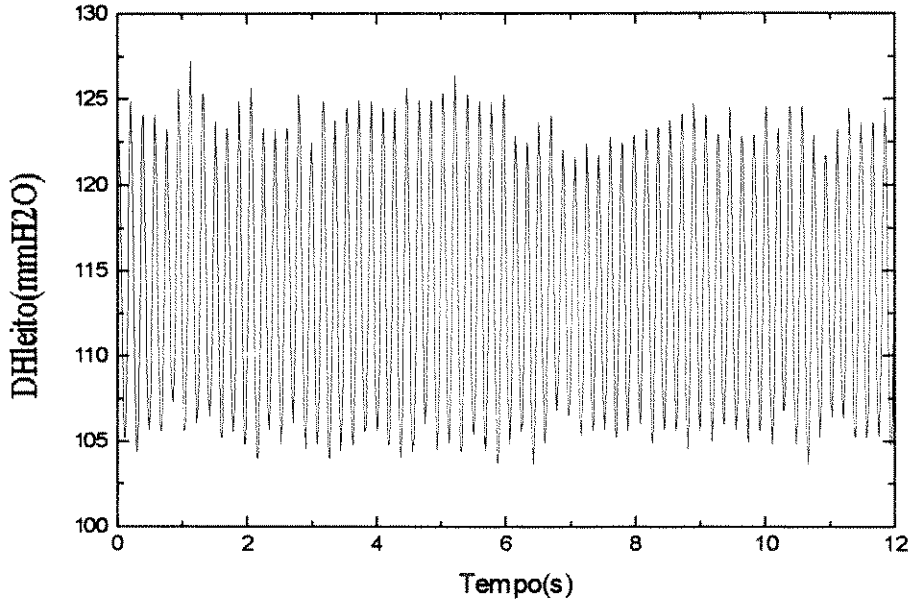


Figura 4.11-g - Poliestireno, D_c = 10cm e

$\theta = 45^0$, carga = 600g – Caso Atípico – Corrida 223

Os gráficos obtidos mostraram padrões de comportamento característicos para cada regime observado, entretanto, a identificação do regime só é possível por análise comparativa. Pela obtenção de padrões próprios para cada regime pode-se concluir que as flutuações dependem do próprio movimento vibratório do leito, sendo independente da geometria e das partículas utilizadas. Ou seja, os resultados obtidos nesta etapa do trabalho mostraram que existe potencial para o desenvolvimento de uma metodologia objetiva de identificação e monitoramento de regimes utilizando as flutuações da queda de pressão.

4.2 – Análise dos espectros de potência

Com o objetivo de definir uma metodologia objetiva para a identificação e monitoração dos regimes fluidodinâmicos de contato gás-sólido obtidos nos experimentos, recorremos à técnica de transformação dos gráficos obtidos, de queda de pressão por tempo, em gráficos no domínio de freqüência, através da transformada de Fourier. Os gráficos obtidos por FFT são denominados espectros de potência.

Os espectros de potência foram construídos numa taxa de amostragem de 128Hz e intervalo de tempo de 12 segundos, conforme já discutido anteriormente. A freqüência ponto a ponto foi calculada da seguinte forma:

$$f_n = n\frac{1}{1024}\cdot 128 \Rightarrow f_n = \frac{n}{8} \tag{4.1}$$

De acordo com o teorema da Amostragem, define-se uma freqüência crítica de Nyquist como:

$$\frac{1}{\Delta} = 2\cdot f_c \Rightarrow \frac{1}{0{,}0078125} = 2\cdot f_c \Rightarrow f_c = 64Hz \tag{4.2}$$

Dessa forma, os espectros apresentarão valores no campo de – 64Hz < f < 64Hz.

Para os leitos I e II foram observados os seguintes regimes: jorro estável – apresentando boa taxa de circulação das partículas e regiões definidas (central, fonte e anular) , os espectros desses experimentos são mostrados nas Figuras 4.12 a 4.32. Para os leitos menores, III e IV, o regime de jorro estável não foi observado, devido à

geometria do leito e partículas utilizadas. Nesses leitos observou-se o regime de slug bem definido, apresentado nas Figuras 4.33 a 4.45. Os "casos atípicos" são mostrados nas Figuras 4.53 a 4.61 e foram obtidos nos leitos I , III e IV. . O regime instável, onde as partículas se encontravam em desordem e o leito pulsante ou taxa de circulação muito lenta, os espectros para esses experimentos apresentaram picos amontoados no inicio ou picos com freqüência dominante fora da faixa que foi observada para jorro estável e "slug".

4.2.1 – Espectros de um leito em regime de jorro estável

As Figuras 4.12 a 4.32 apresentam os espectros de potência para leitos em regime de jorro estável para combinações de leito e partículas. Como pode ser observado, todos os espectros para esse tipo de regime apresentaram um pico dominante para uma determinada freqüência na região de 4,5 a 6,9 Hz. Nota-se uma tendência de amplitudes iguais a zero quando o espectro se aproxima da freqüência crítica de Nyquist, fc = 64 Hz, obedecendo ao teorema da amostragem.

As Figuras 4.12 a 4.15 representam os espectros de potência para ABS no leito I. Pode-se notar que os espectros apresentaram um único pico dominante. Foi observado experimentalmente para essa partícula e geometria de leito, um regime de jorro estável bem definido, até atingir a altura máxima de jorro estável. Para cargas maiores que 2100g não se observou jorro e sim um regime em pulsos com fonte aberta.

Para o poliestireno no leito I, obteve-se as Figuras 4.16 a 4.18. Nota-se que o regime de jorro estável apresentou um único pico dominante numa freqüência bem definida. O comportamento da partícula em regime de jorro estável se enquadrou bem dentro das características do regime de jorro estável encontrado na literatura. Foram observados também regimes alternados de jorro estável e pulsos ("composto"), com boa taxa de circulação, que serão mostrados como "casos atípicos" nas Figuras 4.51 e 4.52.

O sangel se comportou em regime de jorro estável até o limite de carga suportada pelo leito (4000g) para a geometria do leito I. Não foi observado regime instável para essa partícula e geometria devido à restrição na altura do leito construído. O regime de jorro estável foi atingido, abrangendo todas as características que propiciam a definição de estabilidade para o regime. A freqüência de todos os espectros

construídos se encontraram na faixa do regime de jorro estável, alguns exemplos se encontram nas Figuras 4.19 a 4.21.

A partícula que apresentou dificuldades para atingir jorro estável com essa geometria (leito I) foi o acrílico. Nesses experimentos a altura da fonte não se manteve constante, a fonte girava jogando as partículas para a parede do leito, mas apresentou uma taxa de circulação de partículas boa; os espectros para essas observações experimentais estão nas Figuras 4.22 e 4.23 . Já com o ângulo da base de 45^0 (leito II) a fonte apresentou giros durante a corrida, implicando em uma taxa de circulação de partículas alta, mas não uniforme, o que se refletiu nos picos menores observados nos espectros de potência nas Figura 4.24 a 4.26.

O ABS apresentou para o leito II, o mesmo comportamento observado experimentalmente com a geometria do leito I, apresentando regiões de jorro muito bem definidas (central, fonte e anular) e uma taxa de circulação de partículas rápida e uniforme. Os espectros para essas observações se encontram nas Figuras 4.27 e 4.28. Com uma determinada vazão conseguimos sair do regime de jorro estável e observar uma fonte aberta com leito pulsante, já apresentando instabilidade.

O sangel apresentou para a geometria do leito II, as características de jorro estável, onde a freqüência do pico dominante está na faixa já obtida para esse regime, como pode ser observado nas Figuras 4.29 a 4.31.

No leito II o poliestireno teve um comportamento de maior estabilidade, comparado com o leito I, pois não houve alterações de regime estável com fonte abrindo e leito pulsante. Mesmo assim, foram obtidos picos menores, além do dominante, que são provavelmente devidos à taxa de circulação de partículas lenta; o espectro para esse comportamento se encontra na Figura 4.32.

Pelas observações experimentais das corridas realizadas que apresentaram regime de jorro estável, podemos concluir que esse comportamento se refletiu nos espectros, pois para o regime de jorro estável a freqüência se encontrou sempre na faixa de 4,5 a 6,9Hz, em todas as corridas realizadas.

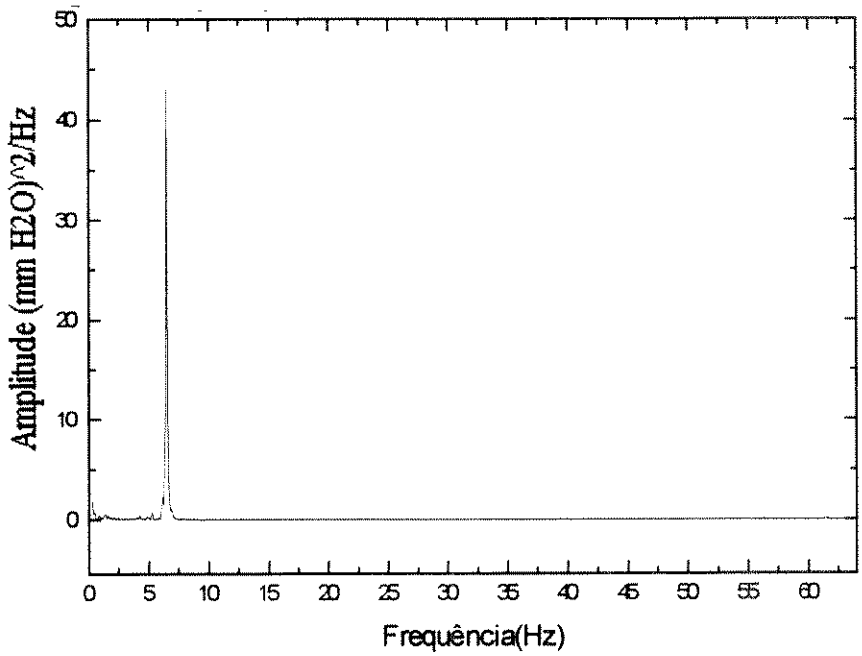


Figura 4.12 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 2

Leito I, 1200g, ABS, Dhleito=61mmH_2O, f=6,5Hz, A=43,1(mmH_2O)^2/Hz

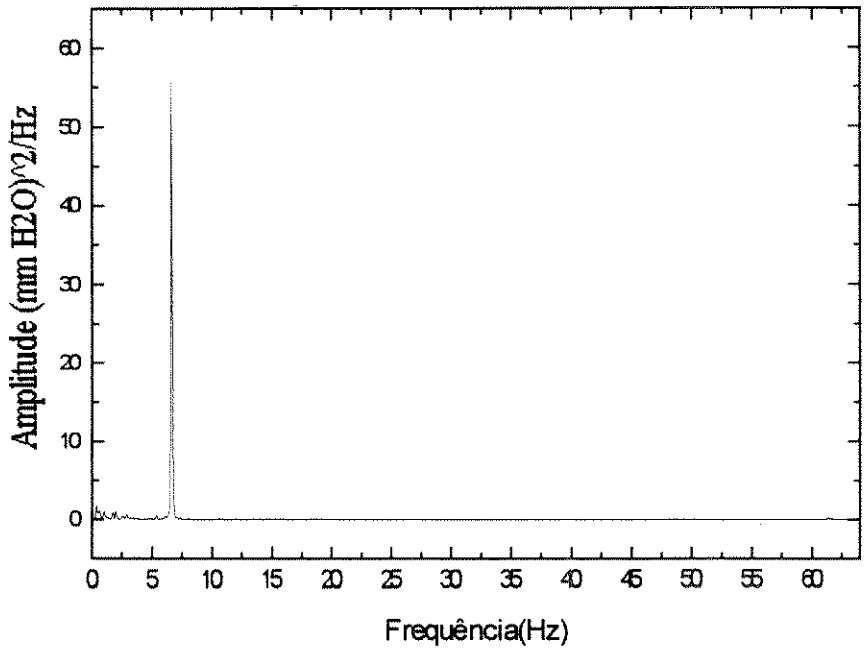


Figura 4.13 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 7

Leito I, 1500g, ABS, Dhleito=66,8mmH_2O, f=6,625Hz, A=96,8(mmH_2O)^2/Hz

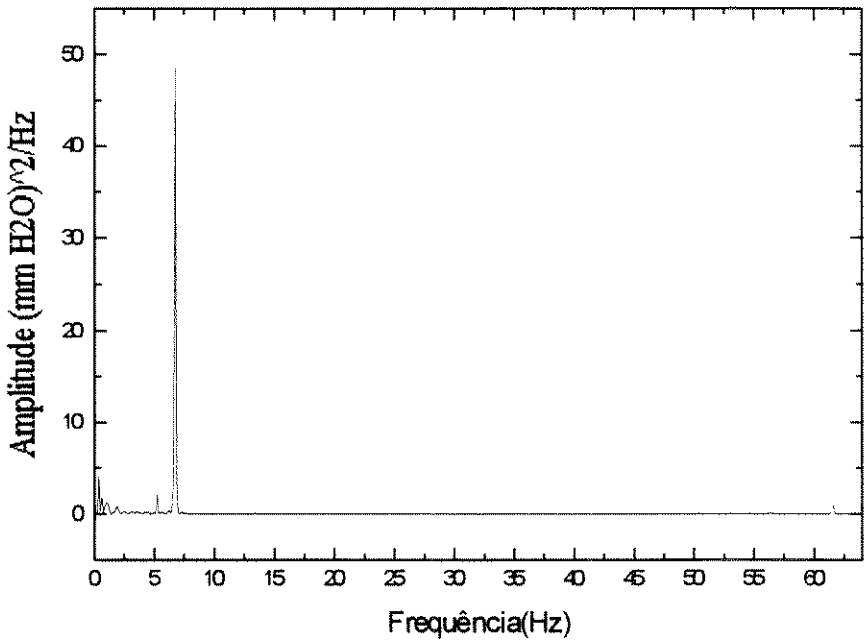


Figura 4.14 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 15

Leito I, 1800g, ABS, Dhleito=73,1mmH_2O, f=6,875Hz, A=48,6(mmH_2O)^2/Hz

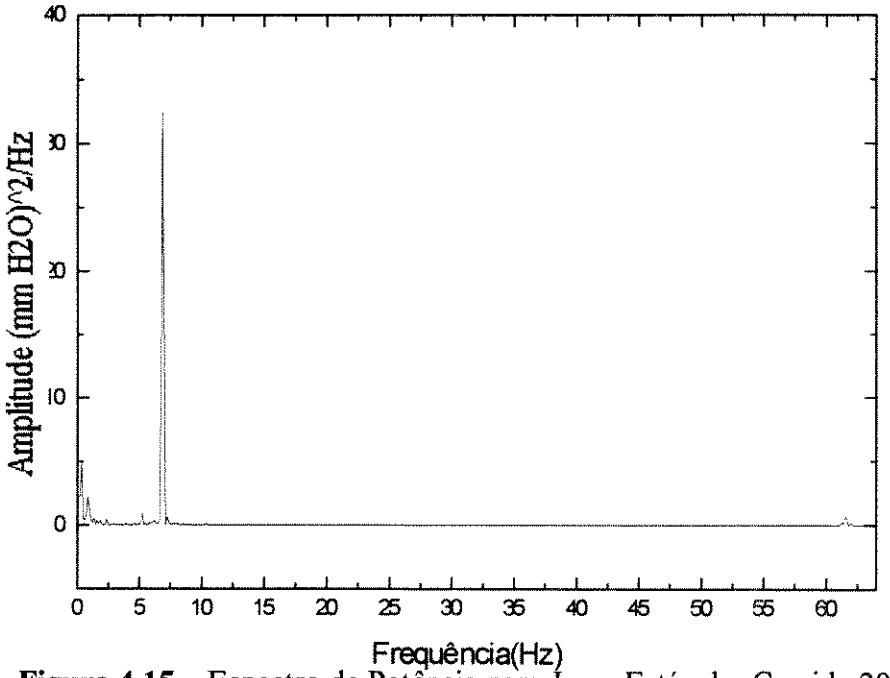


Figura 4.15 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 20

Leito I, 1800g, ABS, Dhleito=75,6mmH_2O, f=6,875Hz, A=32,4(mmH_2O)^2/Hz

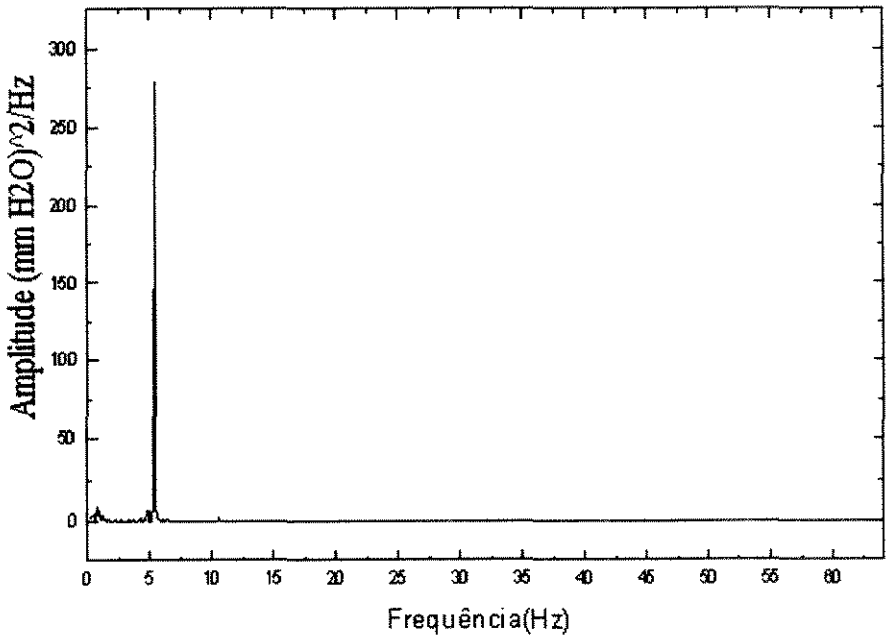


Figura 4.16 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 45

Leito I, 1800g, Poliestireno, Dhleito=79,4mmH_2O, f=5,375Hz, A=279(mmH_2O)^2/Hz

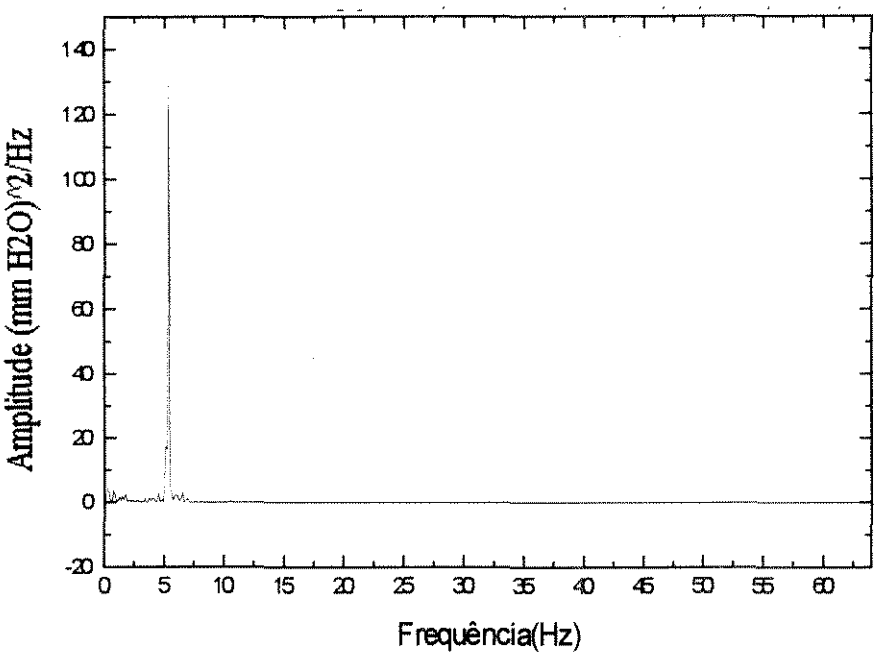


Figura 4.17 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 42

Leito I, 1200g, Poliestireno, Dhleito=62,8mmH_2O, f=5,375Hz, A=138,1(mmH_2O)^2/Hz

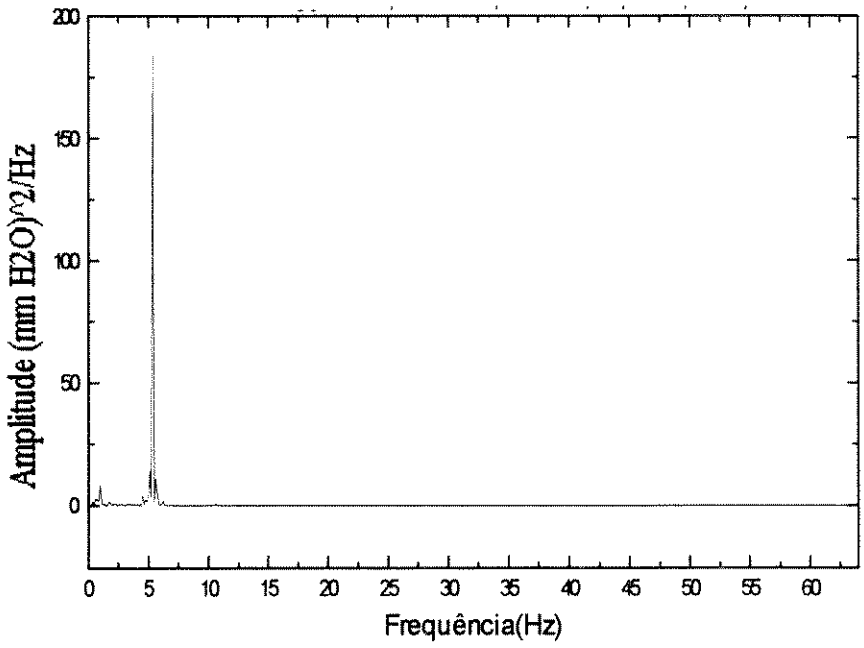


Figura 4.18 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 49

Leito I, 1800g, Poliestireno, Dhleito=77,9mmH_2O, f=5,375Hz, A=184,2(mmH_2O)^2/Hz

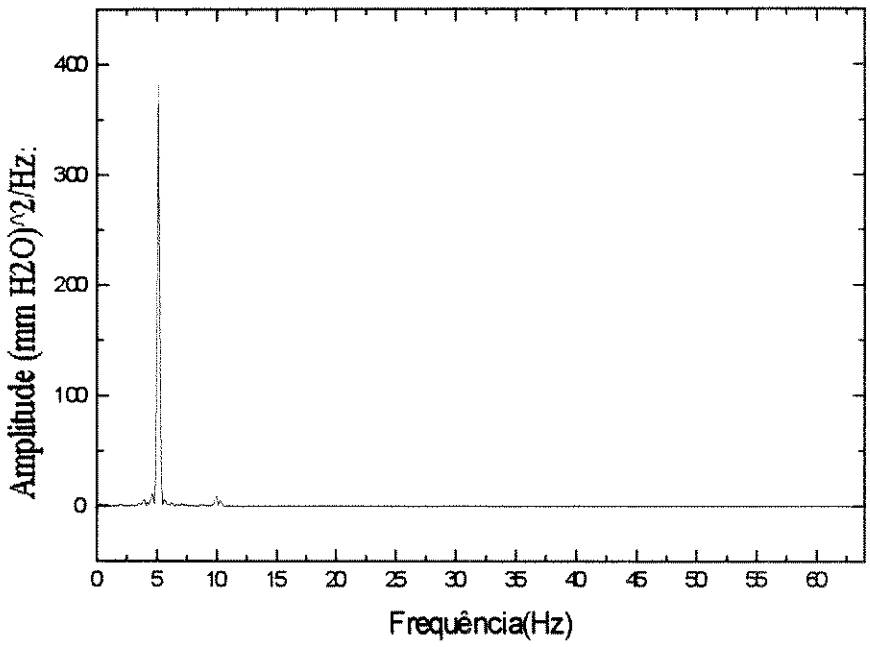


Figura 4.19 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 81

Leito I, 1200g, Sangel, Dhleito=73,7mmH_2O, f=5,125Hz, A=386,2(mmH_2O)^2/Hz

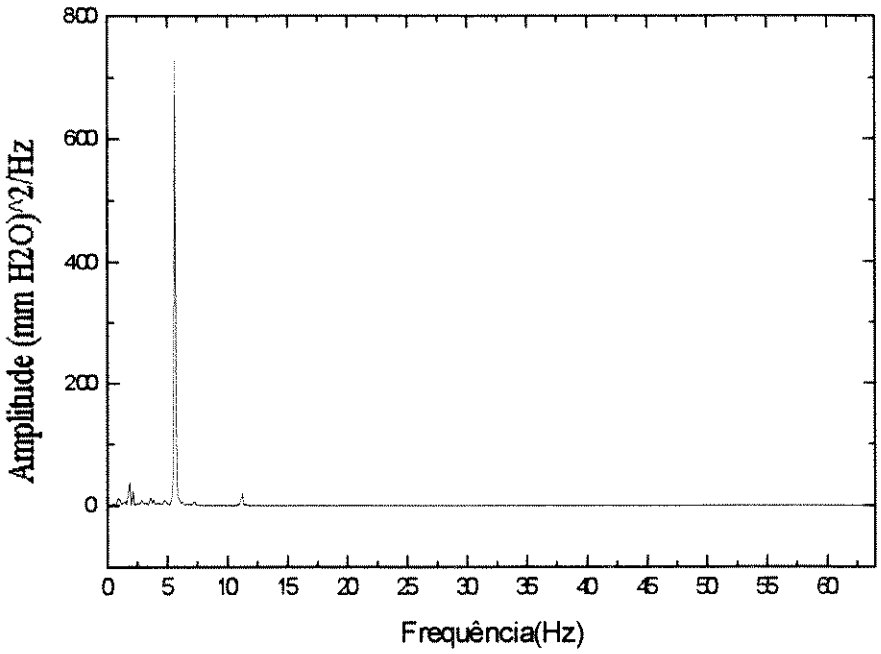


Figura 4.20 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 89

Leito I, 2500g, Sangel, Dhleito=112,8mmH_2O, f=5,625Hz, A=726,8(mmH_2O)^2/Hz

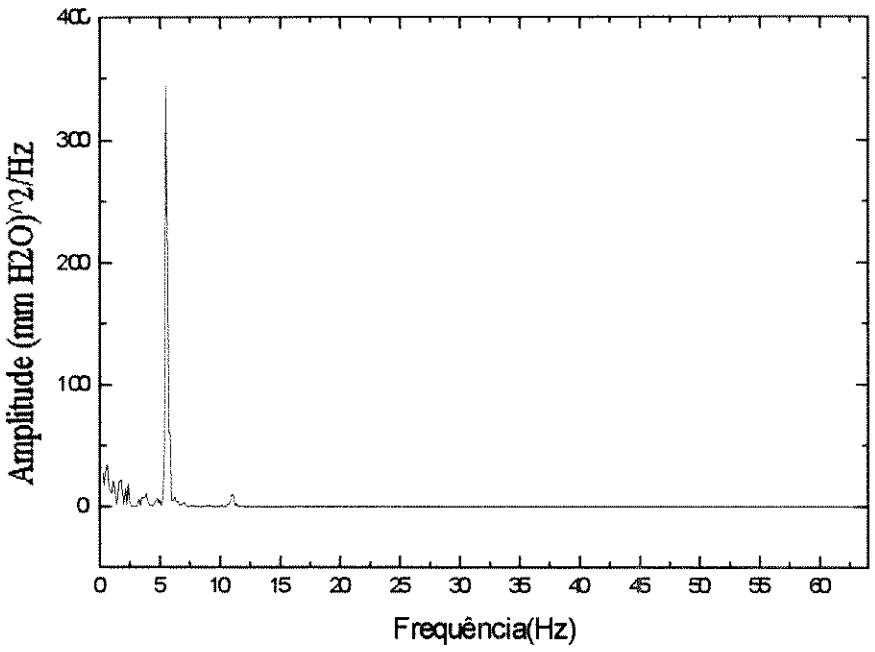


Figura 4.21 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 91

Leito I, 2500g, Sangel, Dhleito=110,9mmH_2O, f=5,5Hz, A=344,8(mmH_2O)^2/Hz

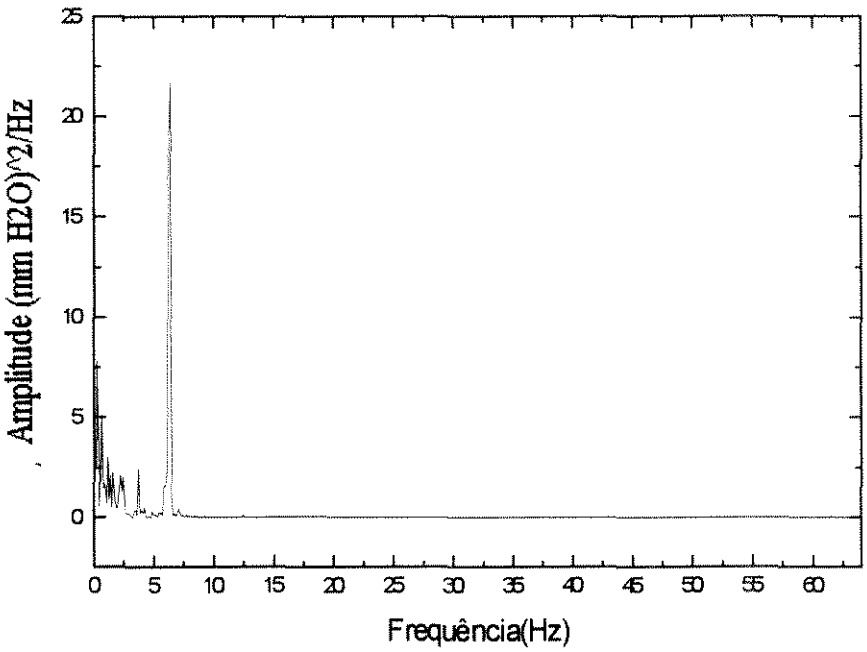


Figura 4.22 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 100

LeitoI, 1200g, Acrílico

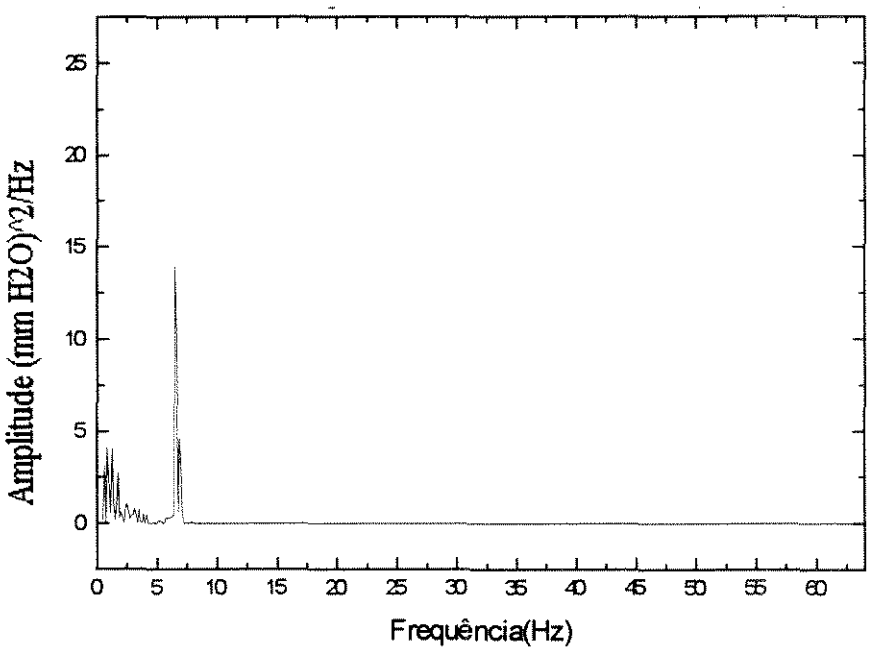


Figura 4.23 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 101

Leito I, 1800g, Acrílico, Dhleito=62,4mmH_2O, f=6,5Hz, A=14(mmH_2O)^2/Hz

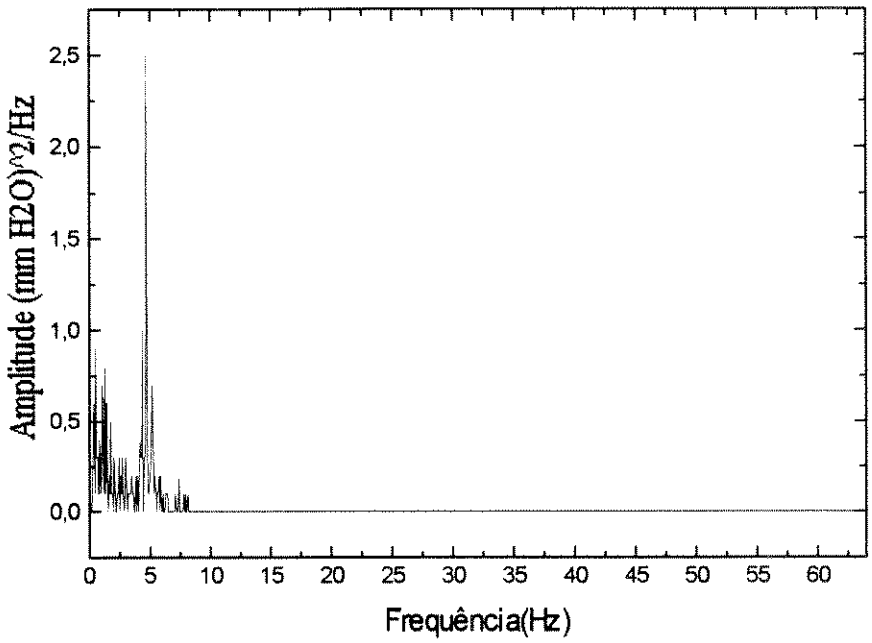


Figura 4.24 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 113

Leito II, 900g, Acrílico, Dhleito=21,4mmH_2O, f=4,72Hz, A=2,5(mmH_2O)^2/Hz

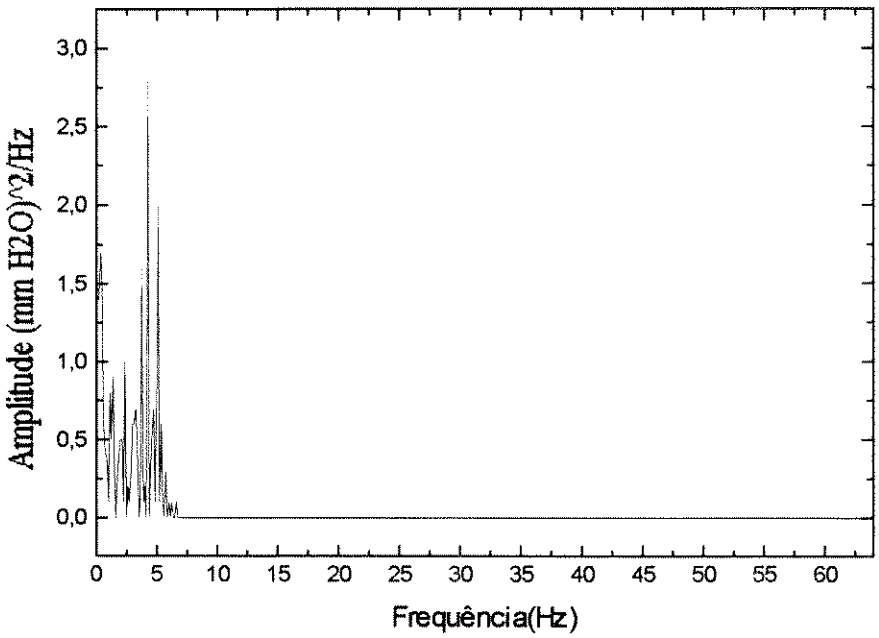


Figura 4.25 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 117

Leito II, 1800g, Acrílico, Dhleito=34,2mmH_2O, f=4,75Hz, A=2,8(mmH_2O)^2/Hz

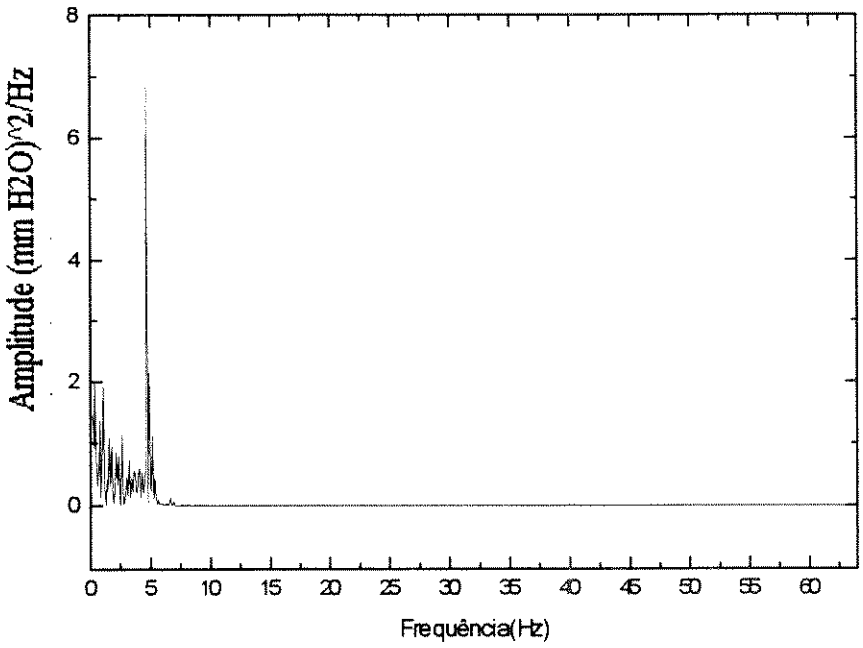


Figura 4.26 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 121

Leito II, 2100g, Acrílico, Dhleito=42,2mmH_2O, f=4,7Hz, A=6,86(mmH_2O)^2/Hz

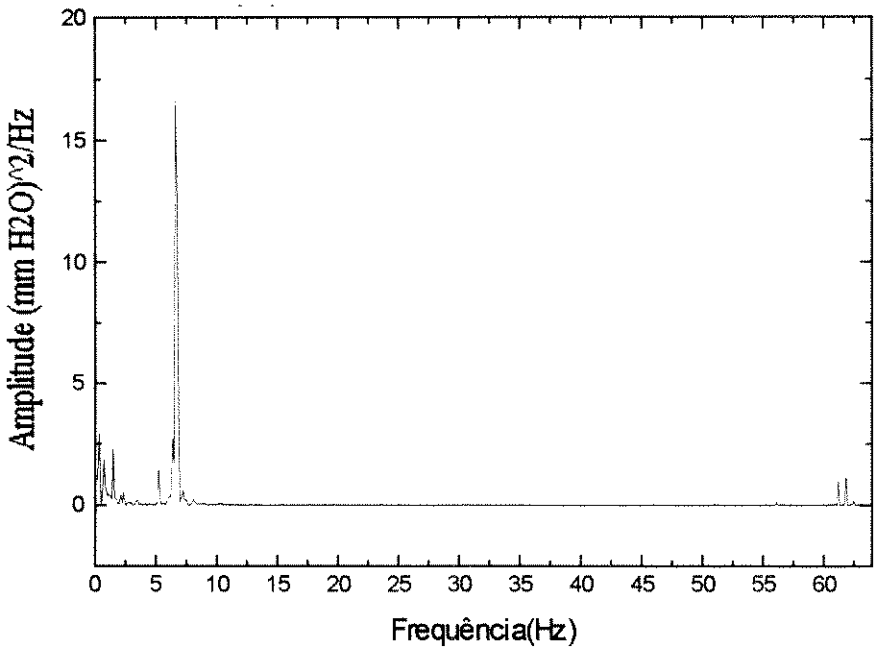


Figura 4.27 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 131

Leito II, 1500g, ABS, Dhleito=42mmH_2O, f=6,625Hz, A=16,75(mmH_2O)^2/Hz

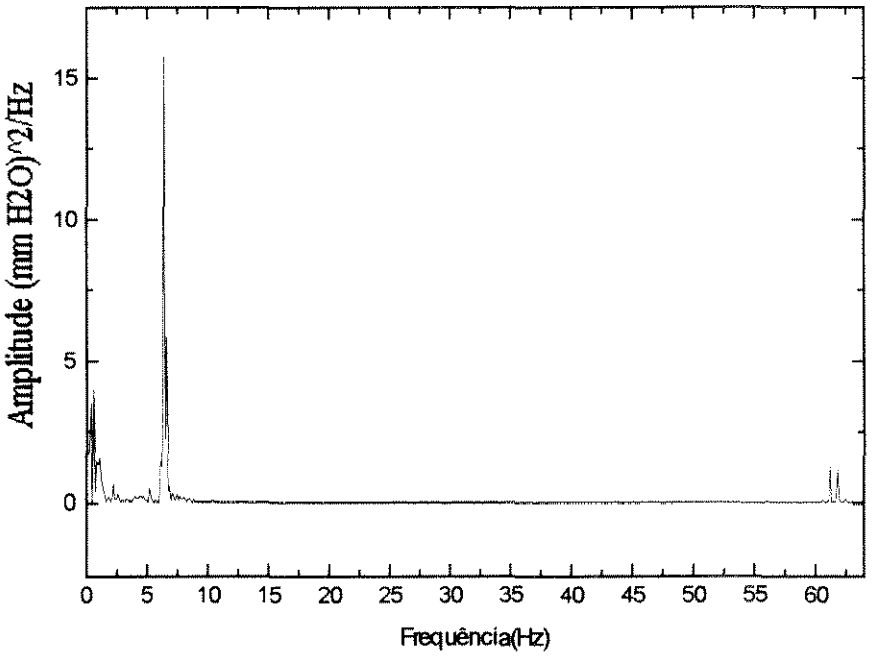


Figura 4.28 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 133
Leito II, 1500g, ABS, Dhleito=43mmH_2O, f=6,375Hz, A=15,807(mmH_2O)^2/Hz

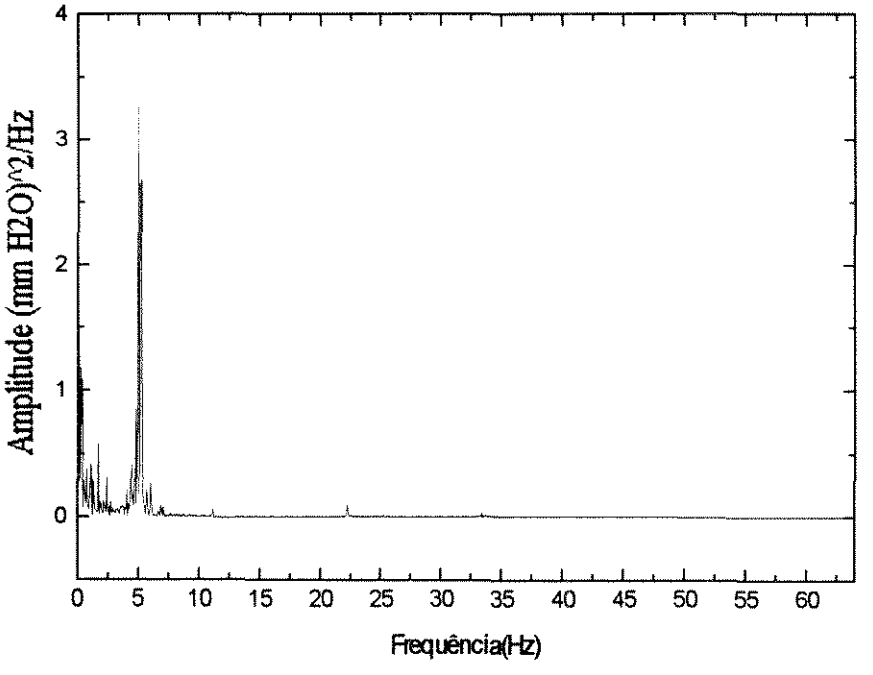


Figura 4.29 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 135
Leito II, 1500g, Sangel, Dhleito=55,2mmH_2O, f=4,99Hz, A=3,26(mmH_2O)^2/Hz

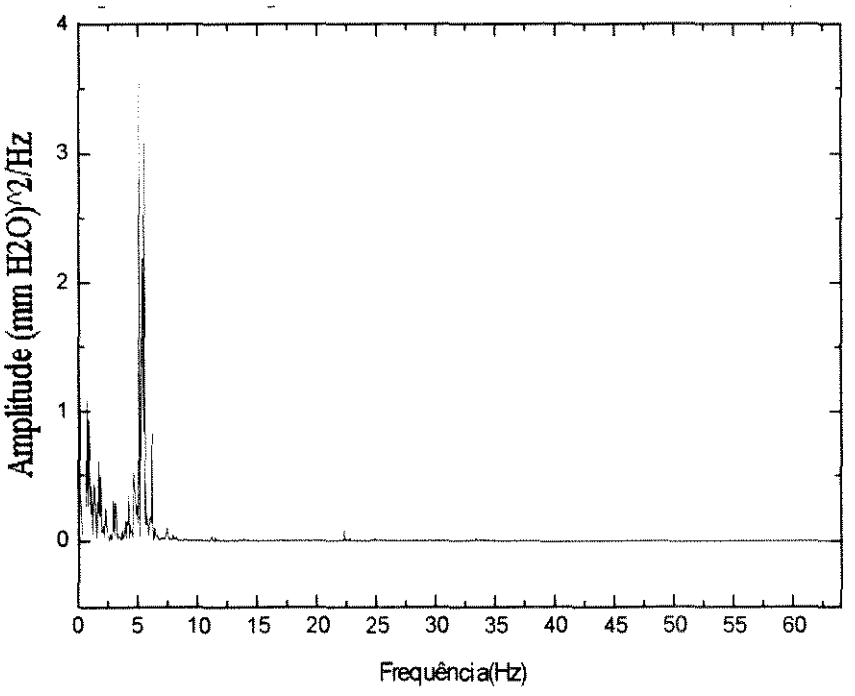


Figura 4.30 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 136

Leito II, 2100g, Sangel, Dhleito=66,8mmH_2O, f=5,13Hz, A=3,56(mmH_2O)^2/Hz

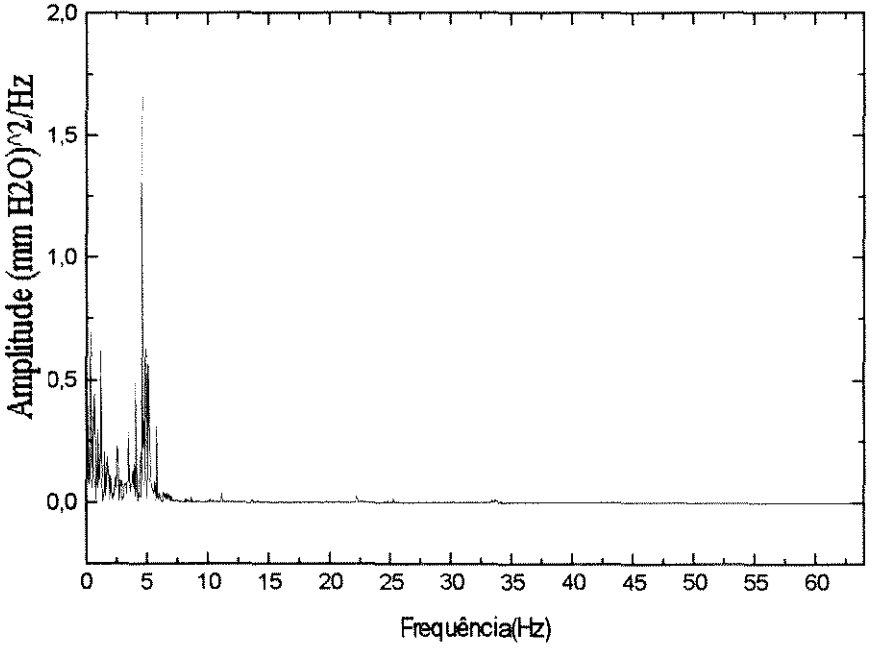


Figura 4.31 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 137

Leito II, 1500g, Sangel, Dhleito=64,8mmH_2O, f=4,65Hz, A=1,66(mmH_2O)^2/Hz

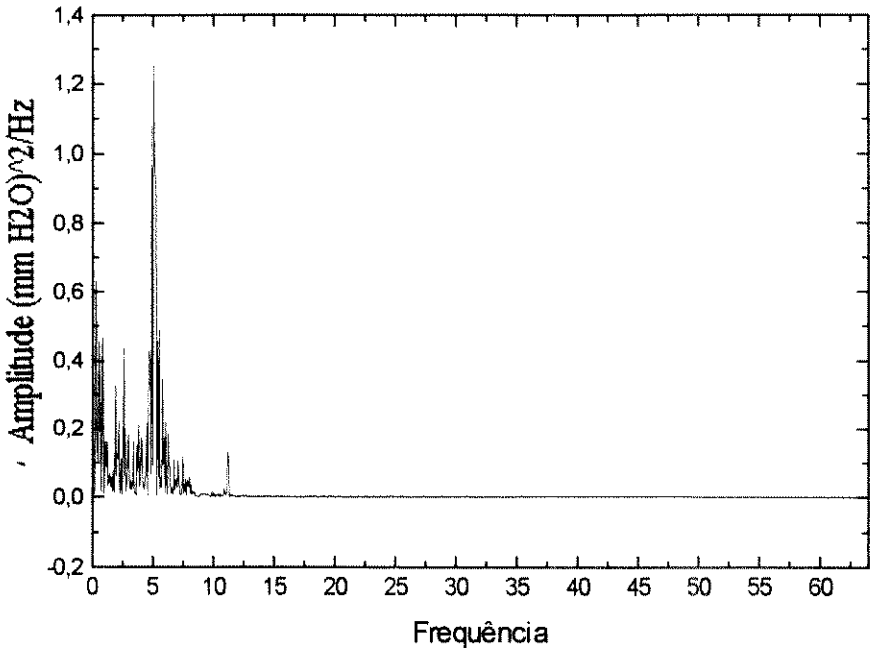


Figura 4.32 – Espectro de Potência para Jorro Estável – Corrida 145
Leito II, 900g, Poliestireno, Dhleito=36,8mmH_2O, f=6,1Hz, A=1,22(mmH_2O)^2/Hz

4.2.2 – Espectros para leito em regime de "Slugging"

O regime de "slug" foi observado quando o ar apresentou dificuldades de formar o canal para atravessar completamente a carga de partículas. Para os leitos em regime de "slug", onde não existe fluxo de ar definido pelo centro do leito, os espectros apresentaram picos de frequencia na faixa de 1,125 a 2,5Hz, como mostram as Figuras 4.33 a 4.45. Neste caso, coexistem, como observado experimentalmente duas fases: sólida e gás, em movimento vertical em direção ao topo do leito. O limite da vazão foi até a elutriação de partículas do leito. O "slug" é um regime indesejado por reduzir significativamente as transferencias de calor e massa.

Para os leitos III e IV não foi observado o regime de jorro estável, devido à geometria dos leitos e partículas analisadas. Os espectros não apresentaram pico de frequencia dominante e sim vários picos amontoados no início do espectro. Observou-se experimentalmente uma taxa de circulação de partículas praticamente nula, uma fonte pobre em partículas, não apresentando um regime estável.

Para o ABS o regime de "slug" foi observado para uma carga maior que 1200g e para uma carga menor os picos se amontoaram no início do espectro. O mesmo

comportamento foi obtido nos leitos III e IV para o sangel. O acrílico apresentou picos na faixa do regime de "slug" para uma carga maior que 1800g. O poliestireno se enquadrou dentro dos "casos atípicos" por ter formado um movimento de arco definido e cíclico, com os espectros apresentados nas Figuras 4.46 a 4.50 e para uma carga maior que 1800g foi obtido o regime de "slug" definido, cujo espectro é mostrado na Figura 4.33 .

Observou-se experimentalmente que a carga de partículas e o diâmetro do leito são fatores importantes para instalar o regime de "slug".

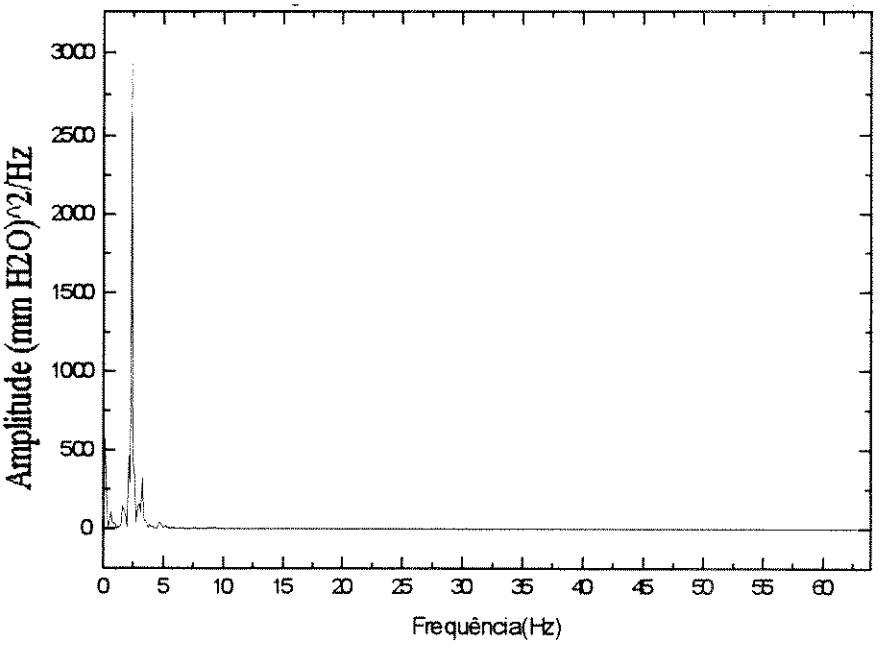


Figura 4.33 – Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 170 Leito III, 1500g, Poliestireno, Dhleito=184,8mmH_2O, f=2,375Hz, A=2932,5(mmH_2O)^2/Hz

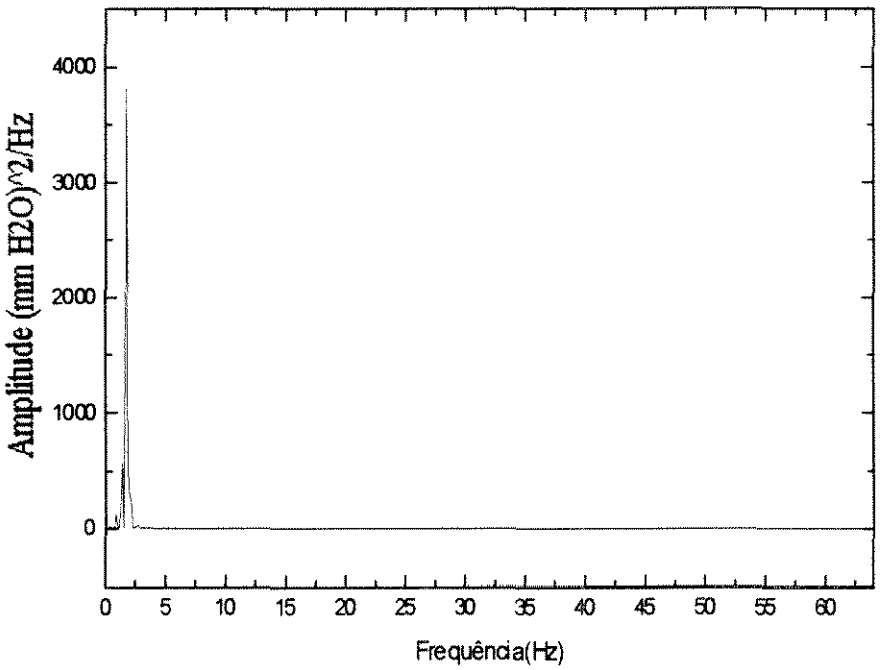


Figura 4.34 – Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 173 Leito III, 1500g, Placebos, Dhleito=201,8mmH_2O, f=1,8Hz, A=3811,5(mmH_2O)^2/Hz

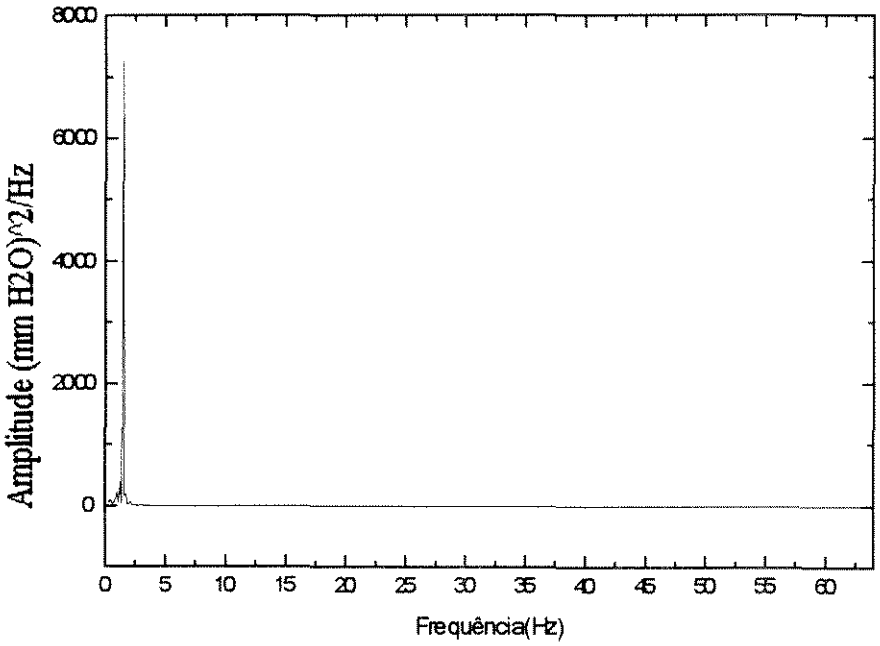


Figura 4.35 – Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 175 Leito III, 1800g, Placebos, Dhleito=209,6mmH_2O, f=1,5Hz, A=7245,1(mmH_2O)^2/Hz

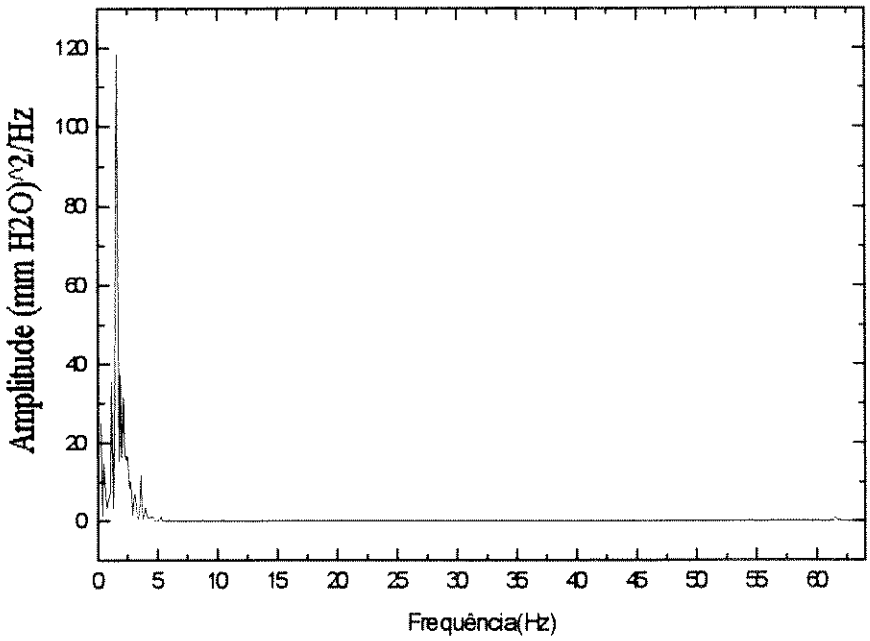


Figura 4.36 – Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 189 Leito III, 1800g, Acrílico, Dhleito=205,4mmH_2O, f=1,625Hz, A=118,5(mmH_2O)^2/Hz

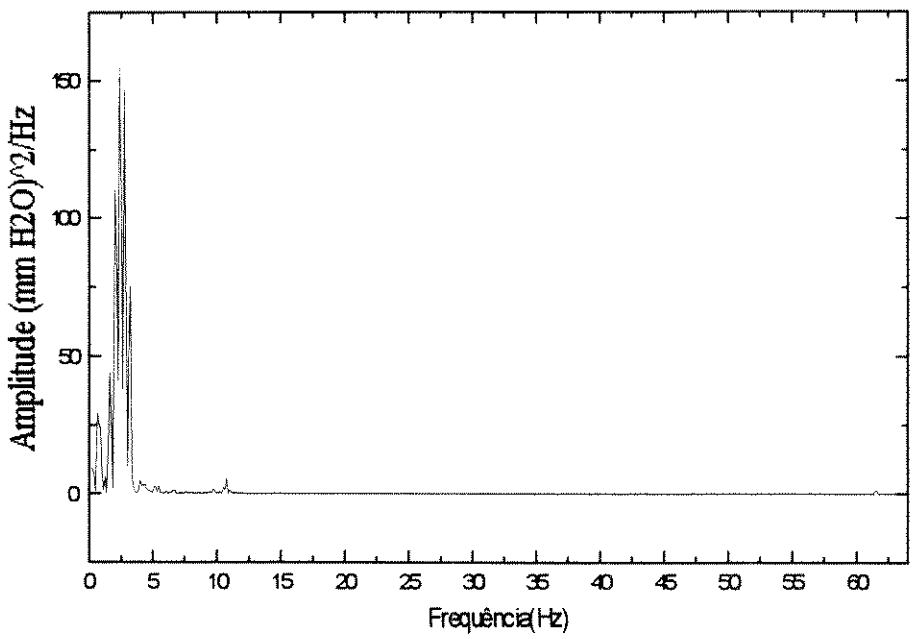


Figura 4.37 – Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 198 Leito III, 1200g, Sangel, Dhleito=42,3mmH_2O, f=2,375Hz, A=154,8(mmH_2O)^2/Hz

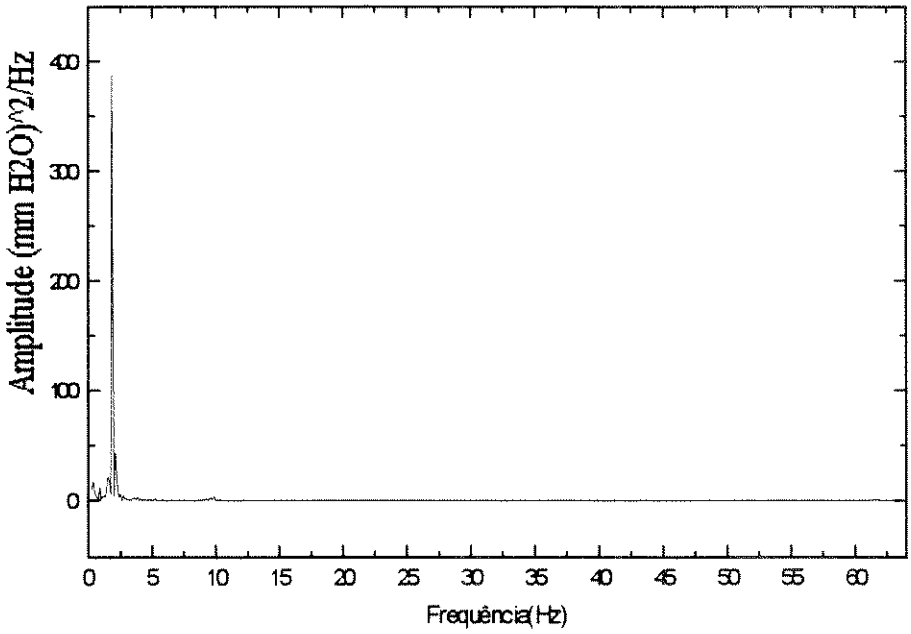


Figura 4.38 – Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 201 Leito III, 1800g, Sangel, Dhleito=225,3 mmH_2O, f=1,875Hz, A=387$(mmH_2O)^2$/Hz

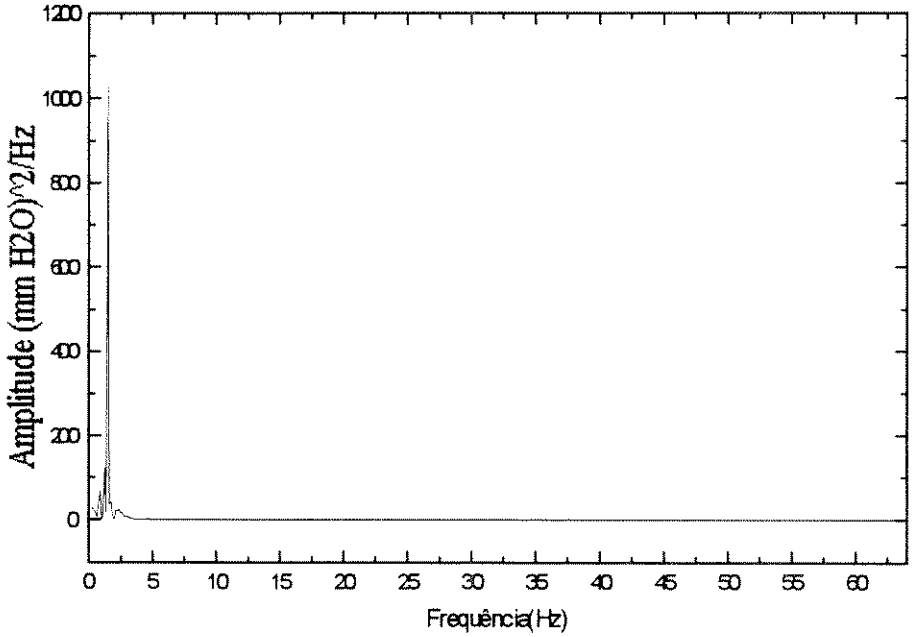


Figura 4.39 – Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 210 Leito III, 1200g, ABS, Dhleito=93 mmH_2O, f=1,5Hz, A=1026$(mmH_2O)^2$/Hz

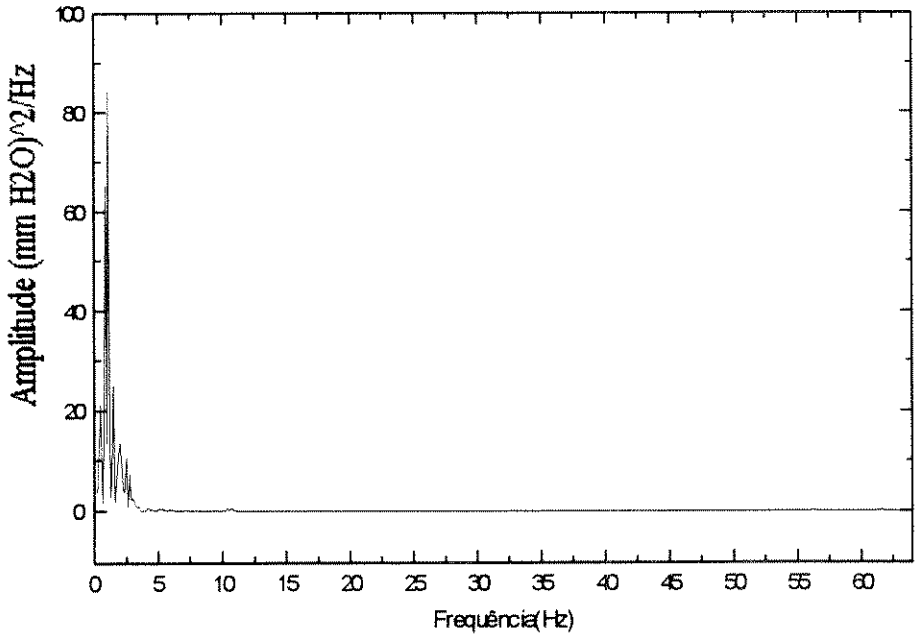


Figura 4.40 – Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 216 Leito III, 1800g, ABS, Dhleito=239,5 mmH_2O, f=1,25Hz, A=84,2$(mmH_2O)^2$/Hz

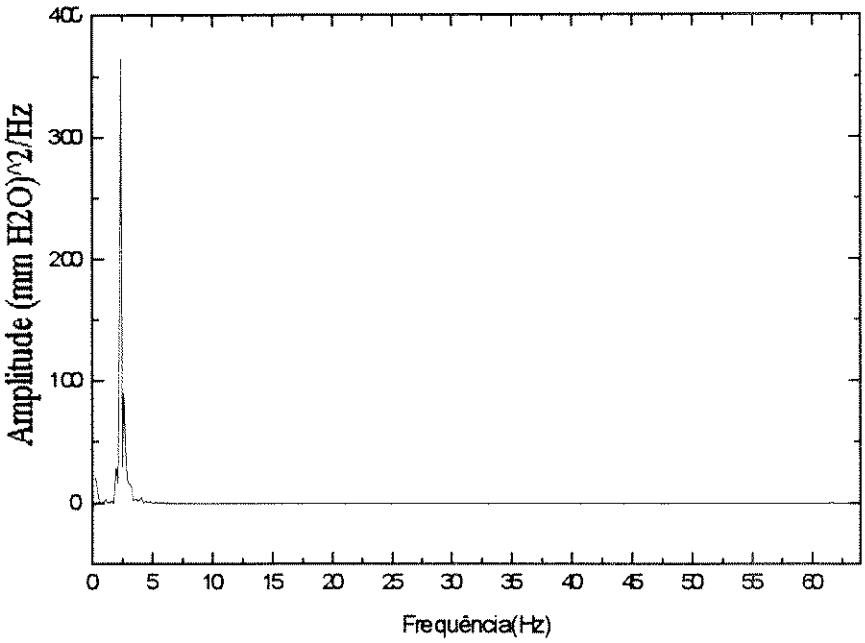


Figura 4.41 – Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 233 Leito III, 1200g, Poliestireno, Dhleito=163,3 mmH_2O, f=2,375Hz,A=364,4$(mmH_2O)^2$/Hz

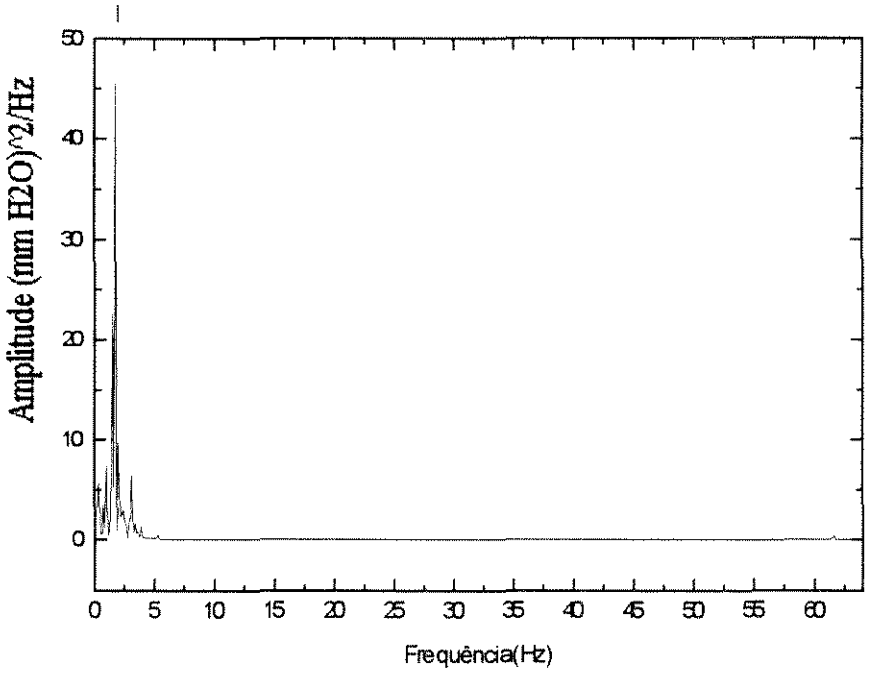


Figura 4.42 – Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 239 Leito IV, 1200g, ABS, Dhleito=134,1 mmH_2O, f=1,75Hz, A=46,6$(mmH_2O)^2$/Hz

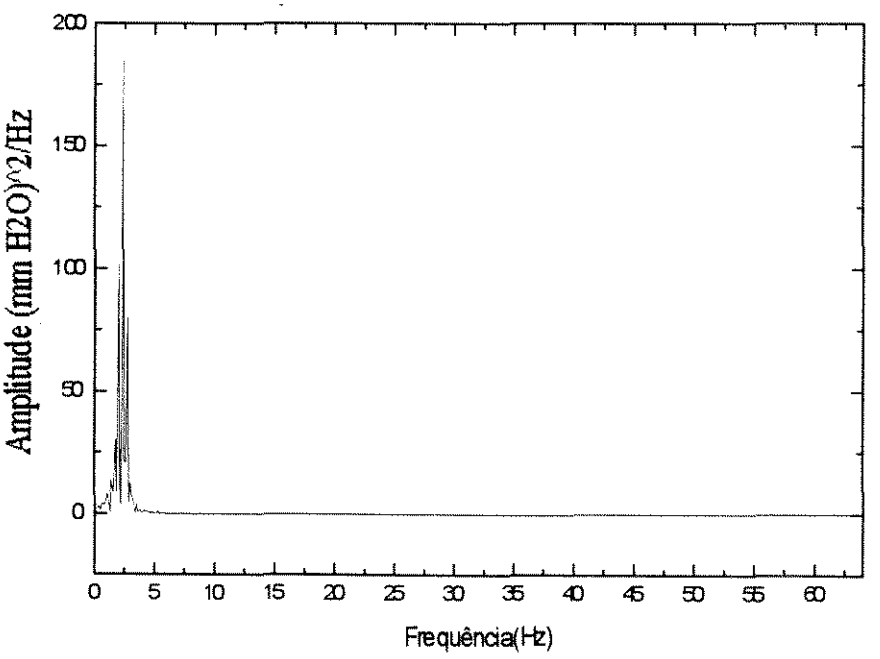


Figura 4.43 – Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 240 Leito IV, 1200g, ABS, Dhleito=130,6 mmH_2O, f=2,375Hz, A=184,8$(mmH_2O)^2$/Hz

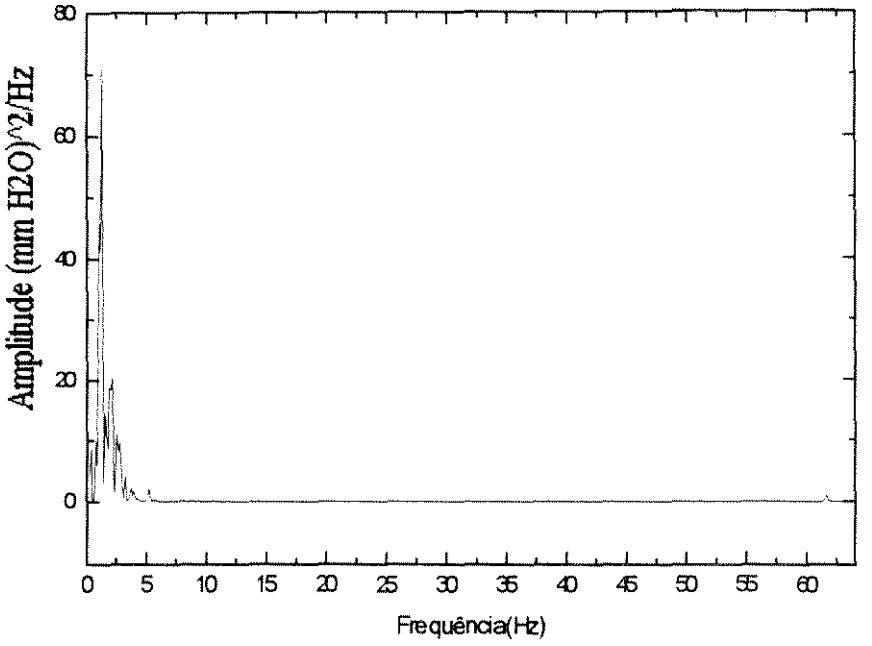


Figura 4.44 – Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 245 Leito IV, 1800g, ABS, Dhleito=212,8 mmH_2O, f=1,25Hz, A=71$(mmH_2O)^2$/Hz

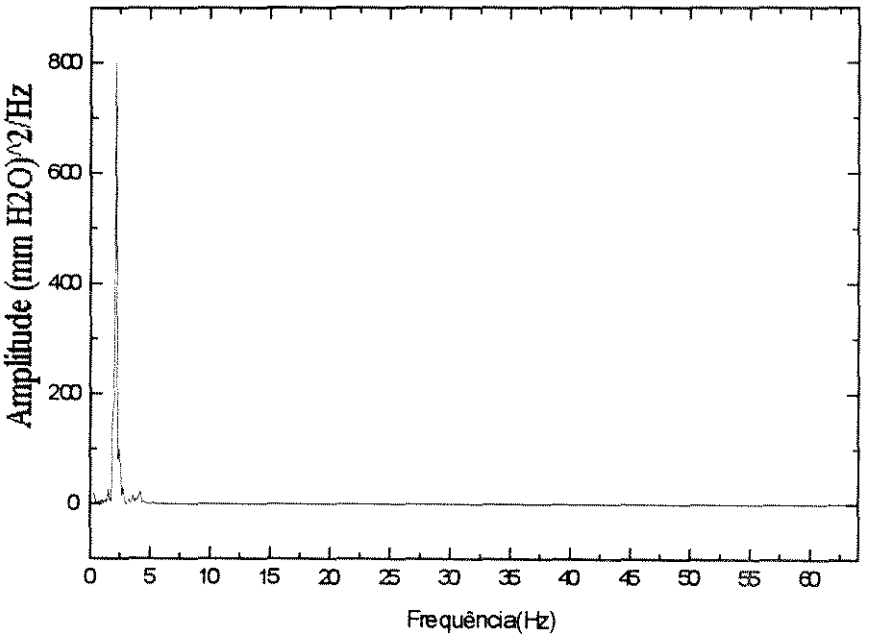


Figura 4.45 – Espectro de Potência para Regime de "Slugging" – Corrida 249 Leito IV, 1800g, Sangel, Dhleito=216,2 mmH_2O, f=2,125Hz, A=800,2$(mmH_2O)^2$/Hz

4.2.3 – Espectros para "casos atípicos"

Nos leito menores, III e IV, observou-se a formação de um arco de partículas num movimento definido e cíclico para os experimentos com poliestireno. Os gráficos dos espectros mostram que a freqüência do pico dominante fica na faixa de regime de jorro estável, Figuras 4.46 a 4.50. Consideramos que o espectro apresentou-se como o jorro estável pela taxa de circulação e movimento cíclico observados nesses experimentos. Ou seja, em se tratando de flutuações, o comportamento é o mesmo que para jorro estável.

Os "casos atípicos" foram observados somente para o poliestireno com os leitos de geometria: I, III e IV. O arco formado com as geometrias dos leitos III e IV se enquadrou em um regime definido e cíclico, com uma ótima taxa de circulação de partículas implicando em um resultado da faixa de freqüência semelhante à que foi observada para o regime de jorro estável.

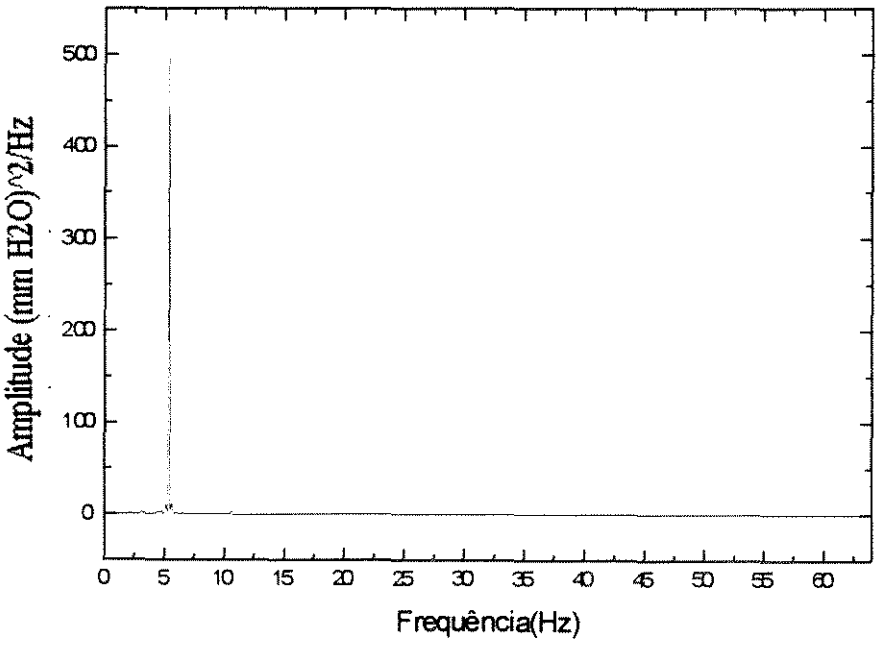


Figura 4.46 – Espectro de Potência para "casos atípicos" – Corrida 164
Leito III, 900g, Poliestireno, Dhleito=125,7 mmH_2O, f=5,375Hz,
A=496,6(mmH_2O)^2/Hz

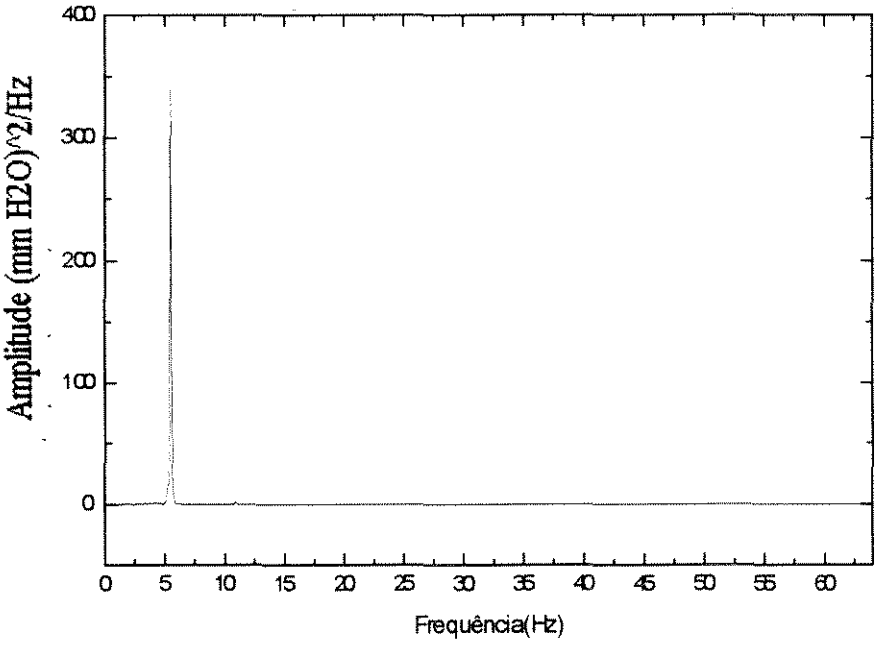


Figura 4.47 – Espectro de Potência para "casos atípicos" – Corrida 165

Leito III, 900g, Poliestireno, Dhleito=128,7 mmH_2O, f=5,5Hz, A=332,9$(mmH_2O)^2$/Hz

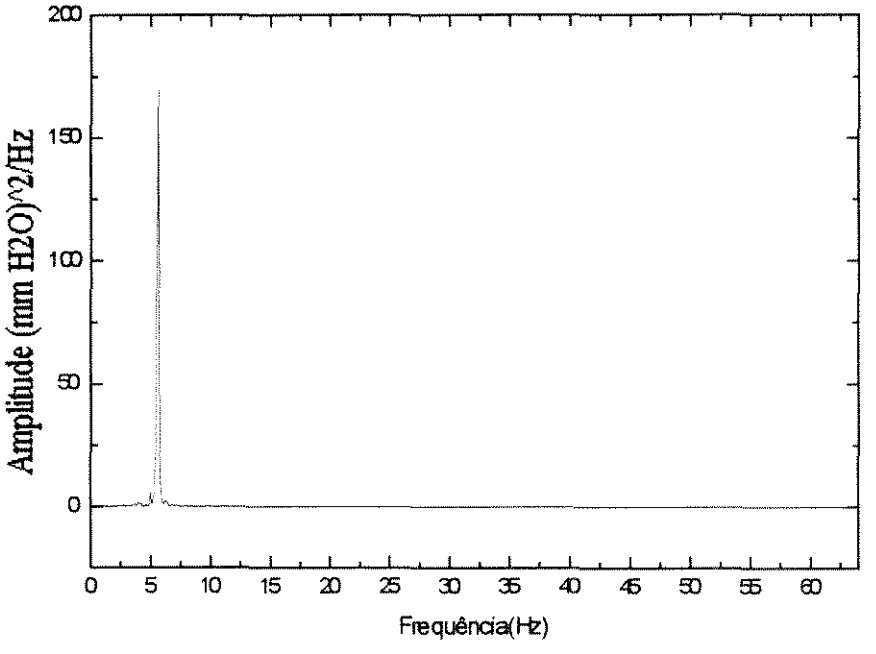


Figura 4.48 – Espectro de Potência para "casos atípicos" – Corrida 223

Leito IV, 900g, Poliestireno, Dhleito=105,9 mmH_2O, f=5,625Hz,

A=160,8$(mmH_2O)^2$/Hz

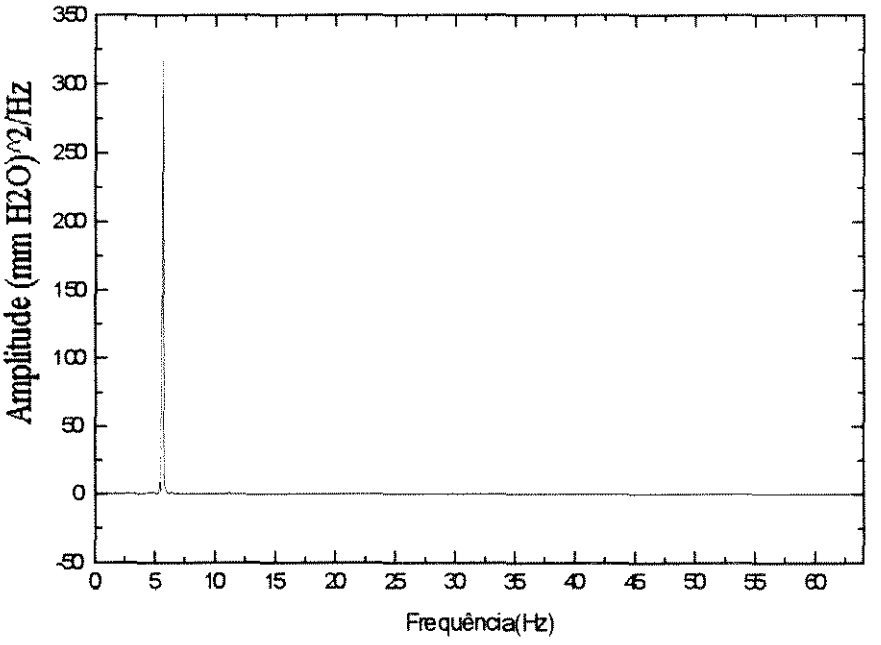


Figura 4.49 – Espectro de Potência para "casos atípicos" – Corrida 224

Leito IV, 900g, Poliestireno, Dhleito=114 mmH_2O, f=5,625Hz, A=312,8$(mmH_2O)^2$/Hz

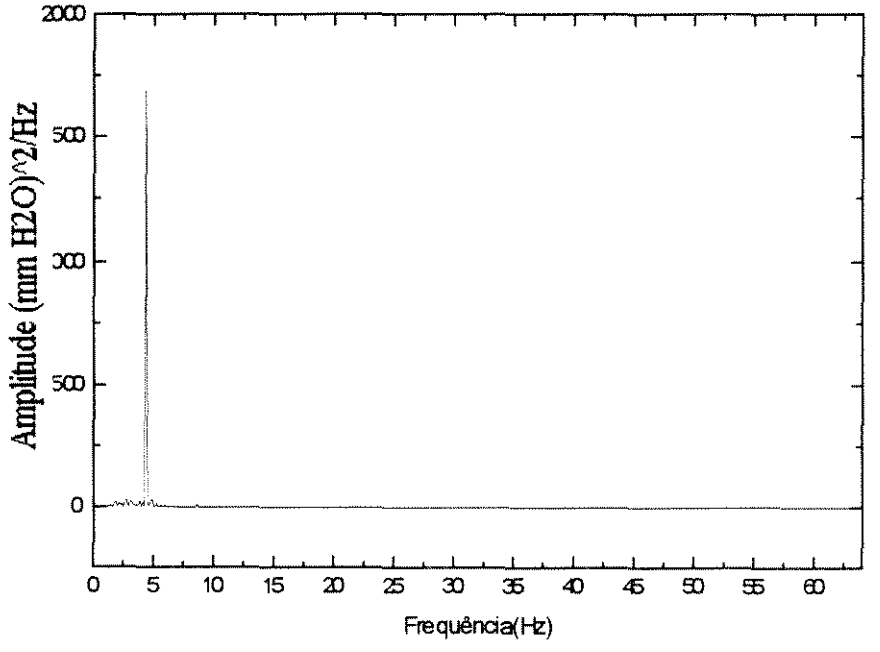


Figura 4.50 – Espectro de Potência para "casos atípicos" – Corrida 230

Leito IV, 1500g, Poliestireno, Dhleito=168 mmH_2O, f=4,375Hz,

A=1686,8$(mmH_2O)^2$/Hz

Para o poliestireno no leito I, observou-se um regime que iremos denominar "composto" para uma carga de 4000g, que foi a máxima carga suportada pelo leito. Em duas corridas experimentais nessas condições observou-se um espaço considerado no fundo do leito, totalmente ocupado pela fase gasosa, como ocorre no regime de "slug" e, logo acima dessa região, prevaleceu o jorro estável. Assim, apareceu um "slug" e acima um movimento de jorro estável. Os espectros correspondentes a esses experimentos são mostrados nas Figuras 4.51 e 4.52. É muito interessante notar que aparece o pico dominante na mesma faixa de freqüência obtidas para os outros experimentos para jorro estável e também aparece um outro pico, menor, na faixa de freqüência já observada para os leitos em regime de "Slugging". Esses resultados demonstram que o espectro de potência realmente caracteriza o regime de contato entre as fases que ocorre no leito; a leitura correta dos gráficos permite a identificação do regime fluidodinâmico.

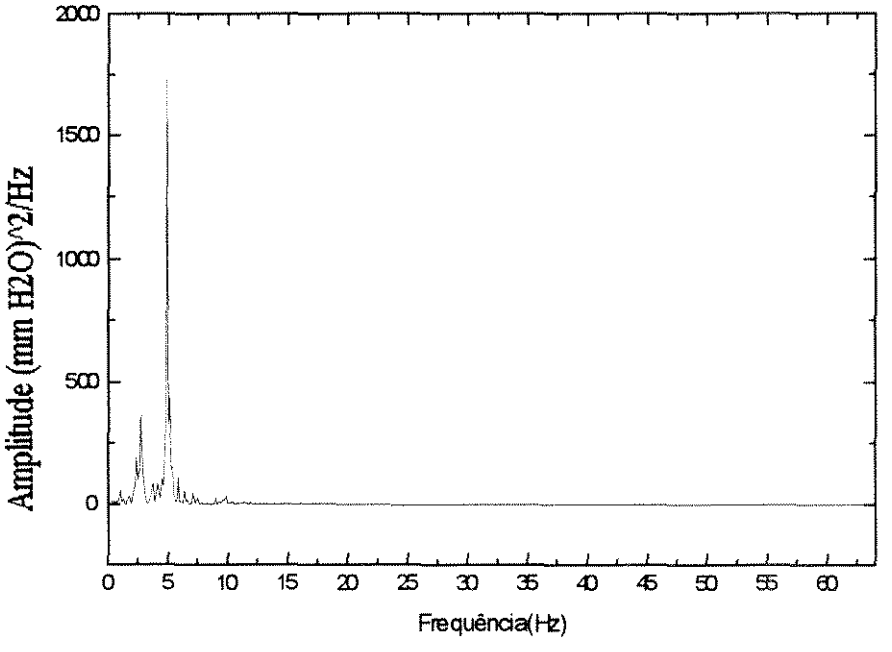


Figura 4.51 – Espectro de Potência para "casos atípicos" – Corrida 74
Leito I, 4000g, Poliestireno, Dhleito=169,5 mmH_2O, f=4,875 e 2,5Hz, A=1748,8 e 381,3 $(mmH_2O)^2/Hz$

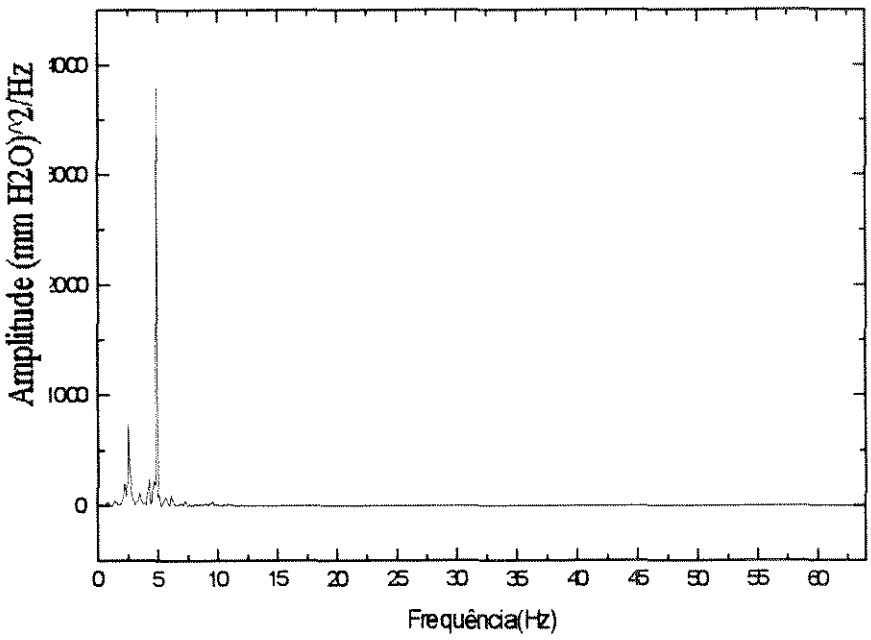


Figura 4.52 – Espectro de Potência para "casos atípicos" – Corrida 75 Leito I, 4000g, Poliestireno, Dhleito=172,3 mmH_2O, f=6,75 e 2,5Hz, A=3813,8 e 738,2 $(mmH_2O)^2/Hz$

4.2.4 – Comentários finais

Os regimes instáveis observados foram aqueles que apresentaram: fonte aberta – pulsante, desordem de partículas no leito tendendo à elutriação; regimes que apresentaram fonte mas uma taxa de circulação de partículas quase nula. Enfim, a instabilidade foi observada para os regimes que não se enquadraram nos regimes conhecidos, como, leito fixo, leito de jorro estável e "Slugging". Verificou-se que as faixas da freqüência dominante para esses regimes observados estão fora das faixas definidas para os regimes de jorro estável e "slug".

Esses resultados demonstram que o espectro de potência realmente caracteriza o regime de contato entre as fases que ocorre no leito; a leitura correta dos gráficos do espectro de potência obtidos permite a identificação do regime fluidodinâmico.

De acordo com os espectros de potência obtidos no trabalho, a respeito da freqüência dominante podemos definir uma faixa de freqüência para cada regime observado:

- Leito de Jorro Estável e "casos atípicos": 4,5< f < 6,9 Hz;
- "Slugging": 1,125 < f < 2,5 Hz;
- Instabilidade: Múltiplos picos, ou pico dominante fora das faixas definidas acima.

4.3 – Análise da Amplitude

Uma das propostas deste trabalho é a análise da amplitude das flutuações da queda de pressão no leito com as condições de operação dos leitos, como carga, características das partículas e, possivelmente, geometria do leito. No decorrer dos experimentos e dos resultados obtidos foi observado que a amplitude se relacionou com o próprio movimento vibratório das partículas no leito, ou seja, para o leito fixo, os valores de amplitude observados foram muito inferiores aos de leito de jorro, que por sua vez, foram menores que os de amplitude de flutuações para regime "slug".

O valor de amplitude característico, que foi tomado para a análise dos dados foi o correspondente ao pico dominante, já trabalhando com FFT.

No leito I observou-se o regime de jorro estável para várias cargas e partículas, e a variação nos valores de amplitude foi verificado devido ao movimento definido de jorro e às vibrações que surgiram no fundo do leito (telinha que suporta as partículas). Aumentando a intensidade das vibrações, a freqüência se manteve na faixa de jorro estável devido à definição do regime com boa taxa de circulação de partículas, mas o valor da amplitude aumentou juntamente com a intensidade das vibrações.

Pela Tabela 4.1 podemos observar que aumentando a vazão, prevalecendo o regime de jorro estável, obteve-se um aumento no valor da amplitude, devido à intensidade da vibração das partículas no fundo do leito que surgiram para essa geometria. Para uma carga de 3000g não foi observado jorro estável e o valor da amplitude diminuiu devido ao aumento significativo da taxa de circulação de partículas, pois a instabilidade se deu com a fonte abrindo intensamente tornando a taxa de circulação de partículas muito rápida com o aumento da vazão, ou seja, para vazões

acima de 1,75 Kg/min foi obtido praticamente o leito de jorro rápido ou "jet spouted bed".

Tabela 4.1 – Valores de amplitude para o ABS, leito I

Carga(g)	Vazão (Kg/min)	Queda de pressão média no leito (mm H2O)	Amplitude (mmH2O)^2/Hz	Regime
1200	1,15	61	43,1	Jorro Estável
1200	1,20	67	216	Jorro Estável
1200	1,26	68,2	294,5	Jorro Estável
1500	1,31	66,8	55,8	Jorro Estável
1500	1,35	68	32,2	Jorro Estável
1500	1,47	75,2	167,8	Jorro Estável
3000	1,67	105,1	89,7	Regime Instável
3000	1,75	105,5	79,9	Regime Instável
3000	1,8	104,8	36,1	Regime Instável
3000	1,9	103,6	21,1	Regime Instável

De acordo com a Tabela 4.2, observa-se comportamento similar ao observado para o ABS. O jorro foi atingido até uma vazão limite, de escape de partículas do leito, prevalecendo o regime de jorro estável. Observou-se experimentalmente um aumento considerável na intensidade das vibrações no fundo do leito refletindo no aumento do valor da amplitude, mas que não afetou o regime que se instalou de jorro estável durante a corrida. Dessa forma, a freqüência para a qual a amplitude é máxima se manteve na faixa observada para jorro estável e o valor alto obtido para essa amplitude indica uma situação de aumento na vibração no fundo do leito. Assim, a análise conjunta frequencia -amplitude mostra com fidelidade o comportamento do regime fluidodinâmico do leito.

Tabela 4.2 – Valores de amplitude para o Sangel, leito I:

Carga(g)	Vazão (Kg/min)	Queda de pressão média no leito (mm H2O)	Amplitude (mmH2O)^2/Hz	Regime
2500	1,05	107,5	109,2	Jorro Estável
2500	1,16	112,8	726,6	Jorro Estável
2500	1,35	117	1563,5	Jorro Estável
2500	1,03	110,9	344,8	Jorro Estável

A Tabela 4.3 mostra os valores de amplitude para os experimentos realizados no leito II. Cabe salientar que para essa geometria, as partículas não apresentaram vibrações no fundo do leito (telinha), apresentando um regime de jorro estável sem vibrações no fundo que refletiram em valores de amplitude mais baixos. Com a carga de 600g observou-se o regime instável, acarretando em um aumento considerável do valor da amplitude, comparado com o valor para jorro estável. A carga de 1500g também apresentou a transição dos regimes. Passando a vazão de 1,22 para 1,31 com a carga de 1500g notou-se uma melhora significativa na taxa de circulação das partículas diminuindo o valor da amplitude, com a vazão de 1,43 o valor da amplitude fica maior até atingir um regime instável (desordem) implicando num acréscimo no valor da amplitude. Nesse caso, a fonte começa a abrir aumentando o movimento vibratório do leito que se torna rápido. Fazendo a volta (vazão decrescente) atinge-se o regime de jorro estável e o valor da amplitude volta a diminuir.

Tabela 4.3 – Valores de amplitude para o ABS, leito II

Carga(g)	Vazão (Kg/min)	Queda de pressão média no leito (mm H2O)	Amplitude (mmH2O)^2/Hz	Regime
600	0,81	26,0	7,34	Jorro Estável
600	1,04	35,0	198,3	Regime Instável
600	0,95	33,0	62,5	Regime Instável
600	0,75	25,0	6,9	Jorro Estável
1500	1,22	41,0	16,3	Jorro Estável
1500	1,31	42,0	8,6	Jorro Estável
1500	1,43	45,0	16,8	Jorro Estável
1500	1,57	53,0	97	Regime Instável
1500	1,37	43,0	15,8	Jorro Estável

Para os leitos III e IV o único regime observado experimentalmente e que é definido na literatura foi o "slug"; fora esse regime, os demais se enquadraram em " casos atípicos" ou apresentaram instabilidade.

Nas Tabelas 4.4 a 4.8, podemos acompanhar o valor da amplitude para o regime de "slug". Observa-se que o valor da amplitude aumenta com o aumento da vazão, devido à queda brusca das partículas no leito, aumentando bem o movimento vibratório do leito. A vibração se mostrou mais intensa para os placebos que são mais pesados apresentando um valor de amplitude maior comparado com as outras partículas.

Tabela 4.4 – Valores de amplitude para o Placebos, leito III

Carga(g)	Vazão (Kg/min)	Queda de pressão média no leito (mm H2O)	Amplitude (mmH2O)^2/Hz	Regime
1500	1,48	199,2	2210,1	Slug
1500	1,53	205,8	3811,7	Slug

Tabela 4.5 – Valores de amplitude para o Sangel, leito III

Carga(g)	Vazão (Kg/min)	Queda de pressão média no leito (mm H2O)	Amplitude (mmH2O)^2/Hz	Regime
1800	0,64	225,8	387,2	Slug
1800	0,67	228,9	533,3	Slug

Tabela 4.6 – Valores de amplitude para o Poliestireno, leito IV

Carga(g)	Vazão (Kg/min)	Queda de pressão média no leito (mm H2O)	Amplitude (mmH2O)^2/Hz	Regime
1800	0,43	163,3	101,7	Slug
1800	0,46	170,9	364,4	Slug

Tabela 4.7 – Valores de amplitude para o ABS, leito IV

Carga(g)	Vazão (Kg/min)	Queda de pressão média no leito (mm H2O)	Amplitude (mmH2O)^2/Hz	Regime
1200	0,57	130,6	45,6	Slug
1200	0,66	131,4	184,6	Slug
1200	0,80	134,1	190,8	Slug

Tabela 4.8 – Valores de amplitude para o Sangel, leito III

Carga(g)	Vazão (Kg/min)	Queda de pressão média no leito (mm H2O)	Amplitude (mmH2O)^2/Hz	Regime
1800	0,47	211,4	206,1	Slug
1800	0,51	216	800,2	Slug

A análise do valor de amplitude para todos os experimentos realizados seguem o mesmo comportamento discutido acima.

Pode-se observar então, que o valor da amplitude das flutuações da queda de pressão no leito mostrou ser dependente do próprio movimento vibratório das partículas.

4.4 – Comparação dos Resultados Obtidos para Leitos Cone-Cilíndricos com os de Taranto (1996) para Leitos Bidimensionais.

Comparando-se os resultados obtidos neste trabalho com os de Taranto (1996), podemos observar que as flutuações da queda de pressão em tempo real foram semelhantes, para leito fixo, leito de jorro e "slug",como exemplificado nas Figuras 2.8 a 2.10 e 4.9 a 4.11. Os resultados obtidos nos dois trabalhos mostraram a possibilidade de identificação do regime fluidodinâmico do leito através de uma análise comparativa entre os gráficos das flutuações da queda de pressão versus tempo. A análise individual das medidas de queda de pressão em tempo real não caracterizou o regime de forma objetiva. A diferença entre os gráficos dos diferentes regimes, para cada trabalho, se resume basicamente no espaçamento entre as oscilações e observa-se uma tendência de um menor número de períodos de oscilações para os gráficos de leitos em "slugging" em relação ao jorro estável, e também do jorro estável em relação ao leito fixo. Para todos os experimentos de leito fixo, o resultado obtido foi semelhante, independentemente da partícula e da geometria do leito. As oscilações apresentaram amplitude bastante pequena e uma freqüência muito elevada. O comportamento obtido para o regime de jorro estável também manteve um padrão bem determinado em relação às flutuações de pressão. Para o leito em movimento de jorro estável, as flutuações apresentaram amplitude maior e mais espaçadas em relação ao tempo, comparadas ao leito fixo. Também observou-se um padrão no comportamento das flutuações para regime de "slugs", obtido em todos os experimentos em que o regime se instalou, independente de geometria de leito e partículas. As flutuações apresentaram amplitudes ainda maiores que as do jorro estável e uma freqüência menor. Os leitos instáveis apresentaram amplitudes altas e uma freqüência das oscilações maior que para leito de jorro estável e "slug".

Em relação aos espectros de potência, no trabalho de Taranto (1996), obteve-se espectros com picos de freqüência dominante bem definido, sendo que em nenhum espectro observou-se a presença de picos menores. A faixa de freqüência para leito de

jorro encontrada foi de 4 – 5 Hz e para "slug" na faixa de 1 – 2 Hz, conforme as figuras 2.10 a 2.13, mostrando uma faixa mais restrita comparada com as faixas obtidas neste trabalho, em geometria cone-cilíndrica. O comportamento das partículas no leito bidimensional se mostrou mais controlado, devido às restrições das paredes. No leito cone-cilíndrico as partículas não encontram tanta restrição ou "barreira" física, tornando o movimento tridimensional menos controlado. Apesar da geometria do leito bidimensional ser diferente da estudada no presente trabalho, podemos considerá-lo como uma fatia da geometria cone-cilíndrica. Dessa maneira os resultados encontrados se mostraram próximos, como era esperado, e a faixa de freqüência encontrada neste trabalho para regime de jorro estável foi de 4,5 a 6,9Hz e para "slug" de 1,125 a 2,5 Hz, um pouco ampliada em relação ao leito bidimensional.

Assim, a análise dos espectros de potência mostrou a viabilidade de se utilizar medidas de flutuações de queda de pressão como um método objetivo de identificação dos padrões de escoamento de leitos de partículas tanto para geometria cone-cilíndrica como para a bidimensional.

4.5 – Determinação dos parâmetros relevantes de projeto: queda de pressão máxima, jorro estável e velocidade de jorro mínimo.

Com os dados das flutuações da queda de pressão por tempo, obteve-se também em algumas corridas parâmetros importantes para o projeto de leito de jorro, tais como queda de pressão máxima, de jorro estável e velocidade de jorro mínimo. Para obtenção dos valores experimentais desses parâmetros construiu-se a curva de queda de pressão por vazão para alguns experimentos onde verificou-se o jorro estável, para vazões crescentes e decrescentes, de acordo com o procedimento já definido na literatura (Mathur e Epstein, 1974). Alguns exemplos desses gráficos se encontram nas Figuras 4.53 a 4.55.

Foi então feito um estudo comparativo entre os valores obtidos experimentalmente com os valores calculados por correlações existentes na literatura, citadas no Capítulo 2. Foi desenvolvido um programa em linguagem Borland Delphi 2.0, para ambiente Windows, que permitiu os cálculos dos parâmetros de projeto do leito de jorro pelas correlações da literatura, visto cada uma ser muito específica e restrita.

Nas Tabelas 4.9 a 4.11 podemos observar a comparação entre os valores calculados pelas correlações e os experimentais pelo erro médio relativo. As condições experimentais em que o trabalho foi desenvolvido não permitiu a comparação com todas as correlações encontradas na literatura. Encontrou-se um erro relativo considerável quando a faixa das restrições, para as quais foram desenvolvidas as correlações, foram extrapoladas. Apenas as correlações constantes nas tabelas 4.9 a 4.11 foram desenvolvidas para as faixas de condições experimentais deste trabalho.

Tabela 4.9 – Valores calculados de ΔP_{max}

Correlação	**Erro Relativo (%)**	**Nº corridas**
Pallai e Nemeth Eq. 2.7	20.7	16

Tabela 4.10 – Valores calculados por correlações de ΔP_s

Correlação	**Erro Relativo (%)**	**Nº corridas**
Mamuro e Hattori Eq.2.13	22,4	14

Tabela 4.11 – Valores calculados de U_{ms}

Correlação	**Erro Relativo(%)**	**Nº corridas**
Mathur e Gishler Eq.2.22	25,3	11

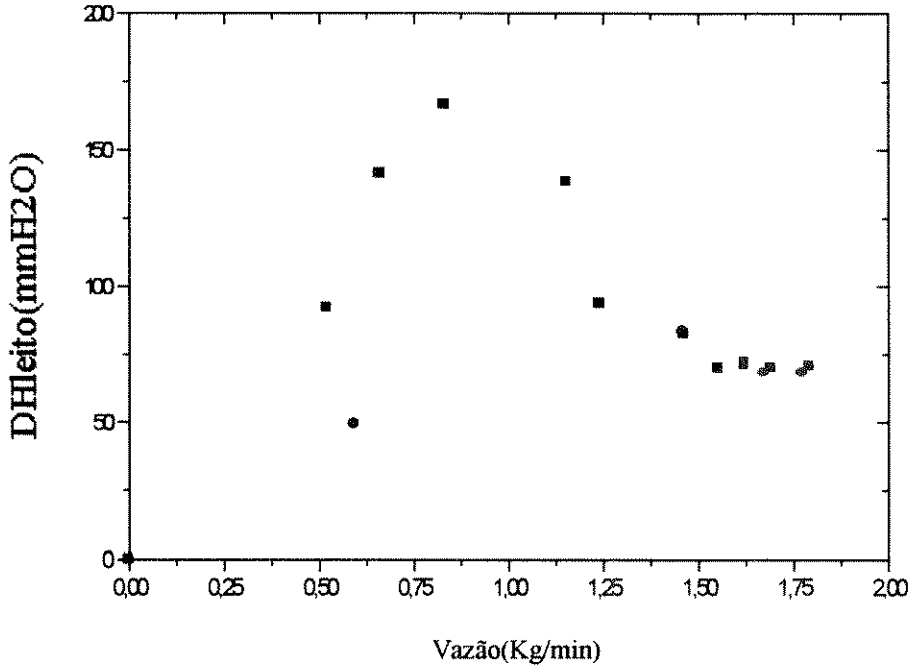


Figura 4.53 – Queda de pressão no leito versus vazão, ABS, leito I, 2100g

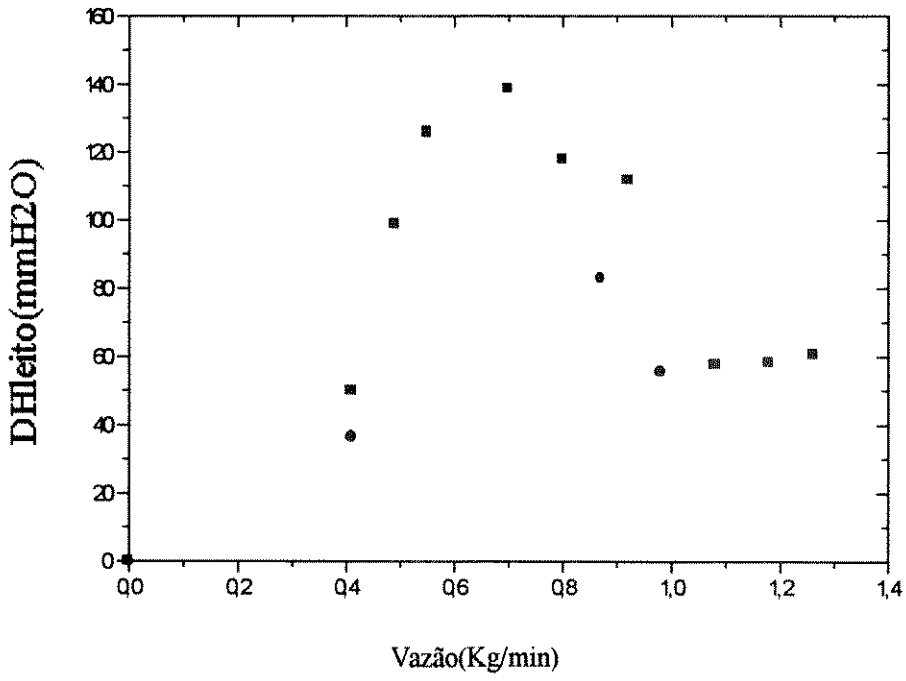


Figura 4.54 – Queda de pressão no leito versus vazão, Acrílico, leito I,1500g

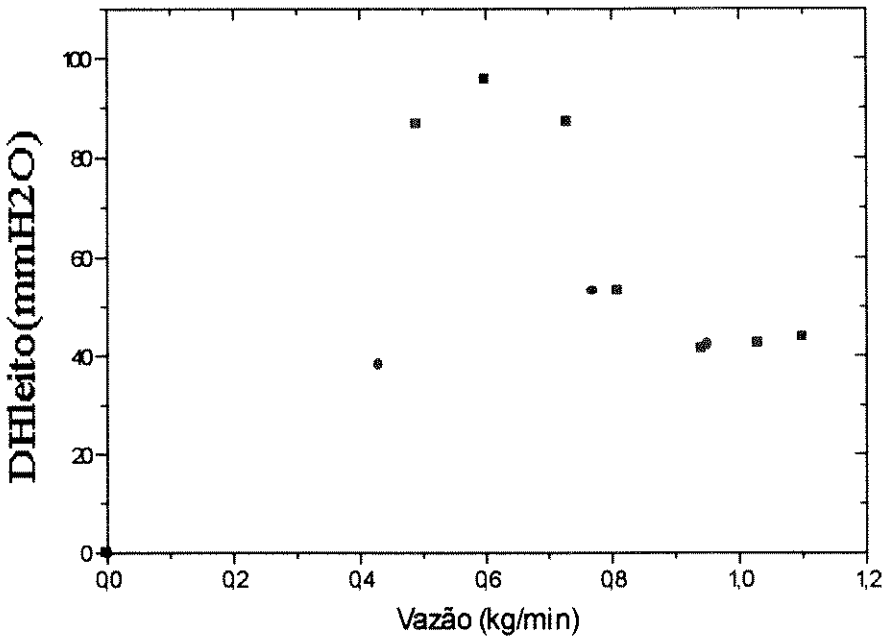


Figura 4.55 – Queda de pressão no leito versus vazão, Sangel, leito II, 1500g

O comportamento fluidodinâmico obtido para as corridas onde se observou regime de jorro estável foi semelhante ao mostrado pelas Figuras 4.53 a 4.55.

Foram apenas três correlações utilizadas para cálculo do erro percentual que se encontrou dentro da faixa das condições experimentais. Obteve-se valores de erro médio relativo baixo quando a faixa de trabalho estava dentro das condições para as quais as correlações foram propostas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 – Conclusões

O trabalho foi desenvolvido com partículas de polímeros utilizados comercialmente e placebos nas seguintes condições: $1{,}88 < d_p < 7{,}24$ mm; $1\,050 < \rho_p < 1281$ kg/m^3; $0{,}58 < \phi < 0{,}87$; e geometria do leito com $D_c = 10$ e 20 cm; $D_i = 2{,}5$ e 5,0 cm; $\theta = 45$ e 60^0. A partir de dados obtidos em 546 experimentos, o principal objetivo do trabalho foi atingido, obtendo-se um método de identificação de regimes de contato gás-sólido em leito de jorro cone-cilíndrico a partir da transformada de Fourier dos dados de queda de pressão no leito em função do tempo. O pico da freqüência dominante mostrou-se bem definido nos regimes de jorro estável e "slugging". De acordo com os espectros de potência obtidos no trabalho, a respeito da freqüência dominante, pudemos definir uma faixa de freqüência para cada regime observado experimentalmente:

- Leito de Jorro Estável e "casos atípicos": $4{,}5 < f < 6{,}9$ Hz;
- "Slugging": $1{,}125 < f < 2{,}5$ Hz;
- Instabilidade: múltiplos picos, ou pico dominante fora das faixas definidas acima.

O espectro de potência ,então, realmente caracteriza o regime de contato entre as fases que ocorre no leito; a leitura correta dos gráficos do espectro de potência obtidos permite a identificação do regime fluidodinâmico estabelecido.

Foi realizada a comparação com o trabalho de Taranto (1996), onde a faixa de freqüência para leito de jorro encontrada foi de 4 – 5 Hz e para "slug" na faixa de 1 – 2 Hz para leitos bidimensionais. Os resultados encontrados deste trabalho se mostraram próximos.

Com os dados das flutuações de queda de pressão, verificou-se ainda a possibilidade de identificação do regime fluidodinâmico do leito através de uma análise comparativa entre os gráficos das flutuações da queda de pressão versus tempo. A análise individual das flutuações de queda de pressão em tempo real não caracteriza o regime de forma objetiva. A diferença entre os gráficos resumiu-se basicamente no espaçamento entre as oscilações, com uma tendência de um menor número de períodos de oscilações

para os gráficos de leitos em "slugging" em relação ao jorro estável, e também do jorro estável em relação ao leito fixo.

Nos diagramas de fase verificou-se especificidade para cada partícula e geometria estudada, sendo o mapeamento das regiões de operação com os leito dinamicamente estável bastante especifico.

Foi desenvolvido um programa em linguagem para a estimativa dos valores dos parâmetros de projeto de leito de jorro, possibilitando uma análise comparativa de correlações empíricas da literatura. Obteve-se valores de erro médio relativo baixo quando a faixa de trabalho estava dentro das condições para as quais as correlações foram propostas.

5.2 – Sugestões para trabalhos futuros

- Obter uma metodologia para identificar as transições do regime de fluidização – borbulhante, turbulenta e rápida – através da medida "on line" de queda de pressão no leito em tempo real, baseada na análise realizada no presente trabalho;
- Estender o estudo para escalas maiores, visando confirmação dos resultados;
- Utilizar a metodologia proposta para identificação dos regimes fluidodinâmicos para desenvolver um sistema de controle, o qual poderá atuar sobre variáveis do processo, como a vazão, para garantir a operação em regime de jorro estável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELRAZEK, I. D. An analysis of thermo-chemical deposition in spouted beds *Tese de doutorado; Univ. of Tennessee; Knoxville (1969).*

ATKINSON, C. M. e CLARK, N. N. Amplitude Reduction and Phase Lag in Fluidized Bed Pressure Measurements. *Chemical Engineering Science,* V.43, p. 1547-1557 (1988).

BAEYENS, J. e GELDART, D. An Investigation in to Slugging Fluidized Bed. *Chemical Engineering Science.* V.29, p. 255-265 (1974).

BAI, D.; MASUDA, Y.; NAKAGAWA, N.; KATO, K. Hydrodynamic Behavior of a Binary Solids Fluidized Bed. *Journal of Chemical Engineering of Japan,* V.29, p. 211-216 (1996).

BECKER, H. A. An Investitigation of Laws Governing the Spouting of Coarse Particles. *Chem. Eng. Science.* V.13, p. 245-262 (1961).

BRERETON, C. M. H. GRACE, J. R. The Transition to Turbulent Fluidization. *Trans. I. Chem. Eng.,* V.70, p. 246-251 (1992).

BRIGHAM, E. O. *The Fast Fourier Transform and its Applications.* Prentice- Hall, Inc. (1988).

BRUNELLO, G.; NINA, G. D.; NUNES, F. C. S. e NASCIMENTO, C. A. O. Minimum air requirements for spouting mixed particles. *Can. J. Chem. Eng.,*V. 52, p. 170 -173 (1974).

CAI, P.; JIN, Y.; WANG, Z. W. Mechanism of Flow Regime Transition from Bubbling to Turbulent Fluidization. *AIChE Journal.* Vol.36, p. 955-956 (1990).

ÇEÇEN, A. The maximum spouted bed heights of fine particles spouted with air. *Can. J. Chem. Eng.*, V. 72 (5), p. 792 (1994).

CHEHBOUNI, A.; CHAOUKI, J.; GUY, C.; KLVANA, D. Characterization of the Flow transition between Bubbling and Turbulent Fluidization. *Ind. Eng. Chem. Res.*, V.33, p. 1889-1896 (1994).

DHODAPKAR, S. V.; KLINZING, G.E. Pressure Fluctuation Analysis for Fluidized Bed. *AIChE Symposium Series*, N.296, p. 170-183 (1993).

FAN, L. T.; HO, T. C.; HIRAOKA, S. Pressure Fluctuations in a Fluidized Bed. *AIChE Journal*, V.27, p. 388-396 (1981).

FRANÇA, F.A. Análise de Sinais de pressão e Queda de Pressão como indicadores de Regimes em Fluxo Bifásico Horizontal. *Revista Brassileira de Ciências Mecânicas*, V.13, n.2, p. 137-149 (1991).

GELDART, D. *Gas Fluidization Technology*. Ed. Geldart, D., John Willey and Sons (1986).

GRACE, J. R e LIM, C. J. Spouted Bed Hydrodynamics in a 0.91 m Diameter Vessel. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, V.65, p. 366-372 (1987).

HUBBARD, N.G.; DUKLER, A. E. The Caracterization of Flow Regimes for horizontal two – phase Flow: I. Statistical Analysis of Wall Pressure Fluctuations, *In: HEAT TRANSFER AND FLUID MECHANICS INSTITUTE*, Stanford. Proceedings. Stanford University Press (1966).

KAGE, H.; IWASAKI, N.; MATSUNO, Y. Frequency Analysis of Pressure Fluctuation in Plenum as a Diagnostic Method for Fluidized Beds. *AIChE Symposium Series*, N.296, p. 184-190 (1993).

LEFROY, G. A. e DAVIDSON, I. F.; The mechanics of spouted beds; *Trans. Inst Chem. Eng.*, V. 47, T120 (1969).

LITTMAN, M., MORGAN III, M. H., VUKOVIC, D. V., ZDANSKI, F. K. e GRBAVCIC', Z. B. Prediction of the maximum spoutable height and and the average spout to inlet tube diameter ratio in spouted beds of spherical particles. *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 57, p. 684-697 (1979).

MALEK, M.A. E LU, B.C.Y. Pressure Drop and Spoutable Bed Height in Spouted beds. *I&EC Process Design and Development*, Vol.4, p. 123-128 (1965).

MATHUR, K. B. e GISHLER, P. E.; A technique for contacting gases with coarse solid particles. *AIChE.*, V. 1, p. 157 (1955).

MATHUR, K.B. E EPSTEIN, N. *Spouted Bed.* Academic Press, Inc., 304 p., (1974).

MORGAN, M.H.. E LITTMAN, H. Predicting the Maximum Spoutable Height in Spouted Beds of Irregulerly Shaped Particles. *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, V.21, p. 23-26 (1982).

MORIS, H. M. e LITTMAN, M. Prediction of the maximum spoutable height in spouted Beds of Irregularly Shaped Particle. *Ind . Eng. Chem. Fundam.*, V.21, p. 23-26(1982).

MUKHLENOV, I. P. e GORSHTEIN, A. E. Investigation of a spouting bed. *Khim. Prom., Moscow*, V. 41, p. 443 (1965).

NASCIMENTO et al (1976), citado em *"Secagem de Produtos Agrícolas" de Giulio Massarani*, V. 2 , p. 56 (1987).

OGINO, F.; ZHANG, L. e MAEHASHI, Y. Minimum rate of spouting and peak pressure-drop in a spouted bed. *Inter. Chem. Eng. of Japan*, V. 33 (2), p. 265-272 (1993).

PALLAI, I. e NÉMETH, J. Analysis of flow forms in a spouted bed apparatus by the so-called phase diagram. *Int. Congr. Chem. Eng. (CHISA)*, 3°, Praga, 1969, Artigo N.C2.4, Czechoslovak Society for Industrial Chemistry.

PEÇANHA, P. R e MASSARANI, G. Dimensão Característica e Forma de Partículas, *Anais XIV Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos*, p. 302-312, 1986.

PUNCHOCHAR, M. J et al. Evaluation of Minimum Fluidizing Velocity Gas Fluidized Bed from Pressure Fluctuation . *Chemical Engineering Commun.*, V. 73, p. 562-565, 1985

QUEIROZ FILHO, V. A. *Análise do Recobrimento de Comprimidos em Leito de Jorro Bidimensional para três Posições de Atomização de Suspensão*. Campinas, FEQ-DTF / UNICAMP ,1997. Tese (Mestrado)

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.*, V. 62 (2), p. 113-120 (1996).

SHIBUYA, E.; BAI, D.; KATO, K. Characterization of gas Fluidization Regimes Using Pressure Fluctuations. *Power Techonology*, V.87, p. 105-111 (1996).

TARANTO, O.P. *Monitoramento de Regimes e Recobrimento de Partículas em Leito de Jorro Bidimensional*. Campinas, FEQ – DTF / UNICAMP, 1996. 141p. Tese (Doutorado).

UEMAKI, O.; YAMADA R. e KUGO, M. Particle segregation in a spouted bed of binary mixtures. *Can. J. Chem. Eng.*, V. 61, p. 303-307 (1983).

YOKOGAWA, A. e ISAKA, M.; Hitachi Zosen Giho, V. 32 (1), p. 47, 1971

WILKINSON, D. Determination of Minimum Fluidization Velocity by Pressure Fluctuation Measurement. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, V.73, p. 562-565 (1995).