



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA



FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**IDENTIFICAÇÃO E MONITORAMENTO DE REGIMES DE
ESCOAMENTO EM LEITO DE JORRO**

REIMAR DE OLIVEIRA LOURENÇO

Uberlândia

2006



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA



FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**IDENTIFICAÇÃO E MONITORAMENTO DE REGIMES DE ESCOAMENTO EM
LEITO DE JORRO**

Reimar de Oliveira Lourenço

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

Uberlândia - MG

2006

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

L892i Lourenço, Reimar de Oliveira, 1970-
 Identificação e monitoramento de regimes de escoamento em leito de
 jorro / Reimar de Oliveira Lourenço. - Uberlândia, 2006.
 116f. : il.
 Orientador: Humberto Molinar Henrique.
 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

 Inclui bibliografia.
 1. Processo de leito de jorro - Teses. I. Henrique, Humberto Molinar.
 II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDU: 66.047.79

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 24 /02 /2006.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Humberto Molinar Henrique
Orientador (PPG-EQ/UFU)

Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Barrozo
Orientador (PPG-EQ/UFU)

Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde
(PPG-EQ/UFU)

Prof^ª. Dr^a. Virginia Aparecida da Silva
(UMICAMP/FEQ/DTF)

Dedico este trabalho aos meus dois melhores amigos, Rubem Manoel (*in memorian*) e Maria de Nazaré, pais dedicados e sempre presentes, aos meus irmãos Rubens, Ronaldo (*in memorian*), Roberto e Ricardo, e em especial a minha eterna companheira Aderjane, que sempre me apoiou dando-me forças para lutar ainda mais por meus, ou melhor, nossos objetivos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, a toda minha família e a família de minha mulher que participaram direta e indiretamente para a realização deste trabalho e pela paciência e compreensão nos vários momentos importantes em que estive ausente.

À Faculdade de Engenharia Química e ao programa de Pós-Graduação pelo respaldo técnico que me foi propiciado para a realização deste trabalho, bem como a CAPES pelo incentivo financeiro.

Aos funcionários da unidade avançada de pesquisa, em especial ao Alcides-“Cidão” e a Ione pelo apoio e companhia que me foi oferecida durante a realização deste trabalho.

Aos funcionários do PPGEQ/FEQUI/UFU, em especial ao José Henrique, pelo apoio técnico e administrativo.

Aos amigos de mestrado Ballu, Lucas, Vanessa, Danilo, Polyana, Aline e Demiam, bem como a “galera do postinho”, que estiveram presentes ao longo desta caminhada, dando-me todo apoio necessário e abrindo caminho para uma amizade a qual pretendo manter.

A todos os amigos de Belém, que mesmo de longe me incentivaram e acreditaram na realização deste trabalho. Saibam que jamais os esqueci.

A Jonatas Borges e Alex, pela inestimável ajuda durante os experimentos, bem como ao Cláudio Duarte pela ajuda na parte de CFD.

Ao Prof. Dr. Carlos Ataíde, pela total colaboração durante este trabalho, começando com a cessão de materiais necessários a construção da unidade experimental e indo até sua inestimável contribuição para a elaboração do trabalho final.

E em especial, aos meus Orientadores Prof. Dr. Humberto Molinar Henrique e Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Barrozo, mestres exemplares que tanto contribuíram para o meu crescimento profissional e pessoal. Agradeço ainda pela paciência e confiança em mim depositada para a realização deste trabalho, bem como aos incentivos recebidos em todos os momentos.

Por fim, a Aderjane Lacerda, companheira dedicada e amiga de todas as horas que nunca me deixou desistir desse sonho, até vê-lo tornar-se realidade. Saiba que se eu tivesse que apontar um responsável por essas mudanças em minha vida, seguramente apontaria você. Obrigado meu amor!!!

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	i
Lista de Tabelas.....	vi
Lista de Símbolos.....	vii
Resumo.....	ix
Abstract.....	x
 CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO.....	 1
 CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	 3
2.1- Leito de jorro Cilíndrico.....	3
2.1.1- Alguns tipos de leito de jorro.....	4
2.1.2- Utilização do leito de jorro.....	5
2.1.3 - Limitações do leito de jorro.....	5
2.1.4- Regiões características do jorro.....	6
2.2- Fluidodinâmica do Leito de Jorro.....	7
2.2.1 – Curva Característica.....	7
2.2.2- Queda de pressão.....	9
2.2.3- Queda de pressão máxima.....	9
2.2.4- Queda de pressão de jorro estável.....	11
2.2.5- Velocidade mínima de jorro.....	12
2.2.6 Altura máxima do leito de jorro.....	13
2.2.7- Regimes de Escoamento.....	14
2.3- Flutuação de Pressão.....	15
2.3.1- Análise Estatística.....	16
2.3.2- Domínio de Frequência.....	17
2.3.3 A Transformada de <i>Fourier</i>	18
2.3.3.1 Teorema de <i>Shannon</i> 's.....	20
2.4- Técnica de Fluidodinâmica Computacional.....	22
2.4.1- Revisão dos Modelos Matemáticos Utilizados nas Simulações (CFD).....	24
 CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS.....	 27

3.1 - Material.....	27
3.2- Sistema Experimental.....	30
3.3 - Procedimento Experimental.....	35
3.4 – Execução Numérica.....	37
3.4.1-A Malha Computacional.....	37
3.4.2- Considerações sobre o Modelo Matemático.....	38
 CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	 39
4.1 - Curva Característica.....	39
4.1.2 – Curvas Características do decaimento da vazão de ar no leito.....	42
4.2 – Vazões de jorro mínimo.....	43
4.3 – Comparação do Desvio Padrão.....	44
4.3.1 – Comparação do Desvio Padrão em função do aumento da vazão de ar	44
4.3.2 – Comparação do Desvio Padrão em função da diminuição da vazão de ar.....	46
4.4 – Curvas comparativas da Skwness.....	47
4.5 – Comparação dos Gráficos de flutuação de Pressão.....	52
4.5.1 – Leito fixo.....	52
4.5.2 – Expansão.....	61
4.5.3 – Jato Interno.....	68
4.5.4 – Jorro Estabelecido.....	76
4.6- Resultados das simulações em CFD.....	85
4.6.1- Perfis de Porosidade do leito.....	91
 CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	 102
 CAPÍTULO VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	 105
 APÊNDICE.....	 109

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Esquema de um leito de jorro.....	6
Figura 2.2	Curva Característica do leito de jorro.....	8
Figura 2.3	Figura 2.3 – Flutuações de pressão em função do tempo a várias velocidades de gás, medidas na seção cônica do leito (esferas de vidro de 1,6mm, $D_c = 120\text{mm}$, $H_b = 155\text{mm}$, $D_i = 10\text{mm}$, $U_{ms} = 0,562\text{ m/s}$).[XU <i>et al</i> (2004)].....	16
Figura 2.4	Interpretação da Transformada de <i>Fourier</i> (BRIGHAM, 1988).....	18
Figura 2.5	Transformada de <i>Fourier</i> de uma forma de onda quadrada (BRIGHAM, 1988).....	19
Figura 2.6	Transformada de <i>Fourier</i> de uma forma de onda pulso (BRIGHAM, 1988).....	20
Figura 2.7	Sinal atual dos componentes de frequência (Manual <i>Labview</i> , 2000).....	21
Figura 2.8	Sinal dos Componentes de Frequência e <i>Aliased</i> (Manual <i>Labview</i> , 2000).....	21
Figura 3.1	Sementes de Soja.....	27
Figura 3.2	Sementes de Algodão.....	28
Figura 3.3	Análise de Imagem da Semente de Algodão.....	29
Figura 3.4	Compressor centrífugo.....	30
Figura 3.5	Válvula gaveta.....	31
Figura 3.6	Leito de jorro.....	31
Figura 3.7	Termoanemômetro.....	32
Figura 3.8	Transdutor.....	33
Figura 3.9	Bloco Conector.....	33
Figura 3.10	Placa de aquisição de dados.....	34
Figura 3.11	Computador.....	34
Figura 3.12	Esquema da unidade experimental.....	35
Figura 3.13	Malha típica adotada.....	37
Figura 4.1.a	Curva Característica de queda de pressão <i>versus</i> vazão de ar ($H = 15\text{cm}$). Algodão.....	41
Figura 4.1.b	Curva Característica de queda de pressão <i>versus</i> vazão de ar ($H = 15\text{cm}$). Soja.....	41
Figura 4.1.1.a	Queda de pressão <i>versus</i> decréscimo da vazão de ar. Algodão.....	42
Figura 4.1.1.b	Queda de pressão <i>versus</i> decréscimo vazão de ar. Soja.....	43
Figura 4.3.1.a	Desvio padrão <i>versus</i> velocidade crescente do ar. Algodão.....	45
Figura 4.3.1.b	Desvio padrão <i>versus</i> velocidade crescente do ar. Soja.....	45
Figura 4.3.2.a	Desvio padrão <i>versus</i> velocidade decrescente do ar. Algodão.....	46
Figura 4.3.2.b	Desvio padrão <i>versus</i> velocidade decrescente do ar. Soja.....	47
Figura 4.4.a	Variação da <i>Skewness versus</i> a velocidade para o algodão com $H=15\text{cm}$	48
Figura 4.4.b	Variação da <i>Skewness versus</i> a velocidade para o algodão com $H=19\text{cm}$	48
Figura 4.4.c	Variação da <i>Skewness versus</i> a velocidade para o algodão com $H=22\text{cm}$	49
Figura 4.4.d	Variação da <i>Skewness versus</i> a velocidade para o algodão com $H=25\text{cm}$	49
Figura 4.5.a	Variação da <i>Skewness versus</i> a velocidade para a soja com $H=15\text{cm}$	50

Figura 4.5.b	Varição da <i>Skewness versus</i> a velocidade para a soja com H=19cm.....	50
Figura 4.5.c	Varição da <i>Skewness versus</i> a velocidade para a soja com H=22cm.....	51
Figura 4.5.d	Varição da <i>Skewness versus</i> a velocidade para a soja com H=25cm.....	51
Figura 4.6.a	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Leito Fixo. Algodão - H15. U = 2,02m/s.....	53
Figura 4.6.b	Espectro de potência. Leito fixo. Algodão - H15. U= 2,02 m/s.....	53
Figura 4.6.c	Flutuação de Pressão <i>versus</i> Tempo – Leito Fixo. Algodão - H19. U = 2,03m/s.....	54
Figura 4.6.d	Espectro de potência. Leito fixo. Algodão - H19. U= 2,03 m/s.....	54
Figura 4.6.e	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Leito Fixo. Algodão – H22. U = 2,03m/s.....	55
Figura 4.6.f	Espectro de potência. Leito fixo. Algodão – H22. U= 2,03 m/s.....	55
Figura 4.6.g	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Leito Fixo. Algodão – H22. U = 1,97m/s.....	56
Figura 4.6.h	Espectro de potência. Leito fixo. Algodão – H25. U= 1,97 m/s.....	56
Figura 4.7.a	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Leito Fixo. Soja - H15. U = 1,99m/s.....	57
Figura 4.7.b	Espectro de potência. Leito fixo. Soja - H15. U= 1,99 m/s.....	57
Figura 4.7.c	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Leito Fixo. Soja - H19. U = 2,5m/s.....	58
Figura 4.7.d	Espectro de potência. Leito fixo. Soja - H19. U= 2,5 m/s.....	58
Figura 4.7.e	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Leito Fixo. Soja – H22. U = 3,06m/s.....	59
Figura 4.7.f	Espectro de potência. Leito fixo. Soja – H22. U= 3,06 m/s.....	59
Figura 4.7.g	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Leito Fixo. Soja – H25. U = 3,06 m/s.....	60
Figura 4.8.h	Espectro de potência. Leito fixo. Soja – H25. U= 3,06 m/s.....	60
Figura 4.8.a	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Expansão. Algodão – H15. U = 4,05 m/s.....	61
Figura 4.8.b	Espectro de potência. Expansão. Algodão – H25. U= 3,06 m/s.....	61
Figura 4.8.c	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Expansão. Algodão – H19. U = 5,15 m/s.....	62
Figura 4.8.d	Espectro de potência. Expansão. Expansão – H19. U= 5,15 m/s.....	62
Figura 4.8.e	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Expansão. Algodão – H22. U = 7,3 m/s.....	63
Figura 4.8.f	Espectro de potência. Expansão. Algodão – H22. U= 7,3 m/s.....	63
Figura 4.9.a	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Expansão. Soja – H15. U = 4,1 m/s.....	64
Figura 4.9.b	Espectro de potência. Expansão. Soja – H15. U= 4,1 m/s.....	64
Figura 4.9.c	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Expansão. Soja – H19. U = 6,55 m/s.....	65
Figura 4.9.d	Espectro de potência. Expansão. Soja – H19. U= 6,55 m/s.....	65

Figura 4.9.e	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Expansão. Soja – H22. U = 6,1 m/s.....	66
Figura 4.9.f	Espectro de potência. Expansão. Soja – H22. U= 6,1 m/s.....	66
Figura 4.9.g	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Expansão. Soja – H25. U = 7,35 m/s.....	67
Figura 4.9.h	Espectro de potência. Expansão. Soja – H25. U= 7,35 m/s	67
Figura 4.10.a	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – jato Interno. Algodão – H15. U = 6,1 m/s.....	68
Figura 4.10.b	Espectro de potência. Jato Interno. Algodão – H15. U= 6,1 m/s	69
Figura 4.10.c	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – jato Interno. Algodão – H19. U = 7,55 m/s.....	69
Figura 4.10.d	Espectro de potência. Jato Interno. Algodão – H19. U= 7,55 m/s....	70
Figura 4.10.e	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – jato Interno. Algodão – H22. U = 10 m/s.....	70
Figura 4.10.f	Espectro de potência. Jato Interno. Algodão – H22. U= 10 m/s.....	71
Figura 4.10.g	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – jato Interno. Algodão – H25. U = 8,75 m/s.....	71
Figura 4.10.h	Espectro de potência. Jato Interno. Algodão – H25. U=8,75 m/s.....	72
Figura 4.11.a	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – jato Interno. Soja – H15. U = 6,6 m/s.....	72
Figura 4.11.b	Espectro de potência. Jato Interno. Soja – H15. U= 6,6 m/s.....	73
Figura 4.11.c	Flutuação de Pressão <i>versus</i> Tempo – jato Interno. Soja – H19. U = 8,5 m/s.....	73
Figura 4.11.d	Espectro de potência. Jato Interno. Soja – H19. U= 8,5 m/s.....	74
Figura 4.11.e	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – jato Interno. Soja – H22. U = 8,15 m/s.....	74
Figura 4.11.f	Espectro de potência. Jato Interno. Soja – H22. U= 8,15 m/s.....	75
Figura 4.11.g	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – jato Interno. Soja – H25. U = 9,4 m/s.....	75
Figura 4.11.h	Espectro de potência. Jato Interno. Soja – H25. U= 9,4 m/s	76
Figura 4.12.a	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Jorro Estabelecido. Algodão – H15. U = 13,1m/s.....	77
Figura 4.12.b	Espectro de potência. Jorro Estabelecido. Algodão – H15. U=13,1 m/s.....	77
Figura 4.12.c	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Jorro Estabelecido. Algodão – H19. U = 16,4m/s.....	78
Figura 4.12.d	Espectro de potência. Jorro Estabelecido. Algodão – H19. U=16,4 m/s.....	78
Figura 4.12.e	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Jorro Estabelecido. Algodão – H22. U = 15,6m/s.....	79
Figura 4.12.f	Espectro de potência. Jorro Estabelecido. Algodão – H22. U=15,6 m/s.....	79
Figura 4.12.g	Flutuação de Pressão <i>vs</i> . Tempo – Jorro Estabelecido. Algodão – H25. U = 16,7m/s.....	80
Figura 4.12.h	Espectro de potência. Jorro Estabelecido. Algodão – H25. U=16,7 m/s.....	80
Figura 4.13.a	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Jorro Estabelecido. Soja – H15. U = 13,9m/s.....	81
Figura 4.13.b	Espectro de potência. Jorro Estabelecido. Soja – H15. U=13,9 m/s	81
Figura 4.13.c	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Jorro Estabelecido. Soja –	

	H19. $U = 17,5\text{m/s}$	82
Figura 4.13.d	Espectro de potência. Jorro Estabelecido. Soja – H19. $U=17,5\text{ m/s}$.	82
Figura 4.13.e	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Jorro Estabelecido. Soja – H22. $U = 20,5\text{m/s}$	83
Figura 4.13.f	Espectro de potência. Jorro Estabelecido. Soja – H22. $U=20,5\text{ m/s}$.	83
Figura 4.13.g	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Jorro Estabelecido. Soja – H25. $U = 19,9\text{m/s}$	84
Figura 4.13.h	Espectro de potência. Jorro Estabelecido. Soja – H25. $U=19,9\text{ m/s}$.	84
Figura 4.14.a	Comparação da curva característica de queda de pressão <i>versus</i> vazão de ar. Sementes de Soja ($H=19\text{ cm}$).....	85
Figura 4.14.b	Comparação da curva característica de queda de pressão <i>versus</i> vazão de ar. Sementes de Algodão ($H=19\text{ cm}$).....	86
Figura 4.15.a	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Leito Fixo. Soja – $H=19\text{cm}$. $U= 2,15\text{m/s}$	87
Figura 4.15.b	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Leito Fixo. Algodão – $H=19\text{cm}$. $U=2,81\text{ m/s}$	87
Figura 4.15.c	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Jato Interno. Soja – $H=19\text{cm}$. $U= 23,76\text{ m/s}$	88
Figura 4.15.d	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Jato Interno. Algodão– $H=19\text{cm}$. $U= 25,83\text{m/s}$	88
Figura 4.15.e	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Jorro Mínimo. Soja – $H=19\text{cm}$. $U= 30,30\text{ m/s}$	89
Figura 4.15.f	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Jorro Mínimo. Algodão– $H=19\text{cm}$. $U=29,34\text{ m/s}$	89
Figura 4.15.g	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Jorro Estabelecido. Soja – $H=19\text{cm}$. $U= 33,26\text{ m/s}$	90
Figura 4.15.h	Flutuação de Pressão <i>versus</i> . Tempo – Jorro Estabelecido. Algodão– $H=19\text{cm}$. $U=30,16\text{ m/s}$	90
Figura 4.16.a	Perfil de porosidade para Leito com sementes de algodão. ($H = 19\text{ cm}$, Leito Fixo, $U = 2,81\text{m/s}$).....	91
Figura 4.16.b	Perfil de porosidade para Leito com sementes de algodão. ($H = 19\text{ cm}$, Jato Interno, $U = 9,03\text{ m/s}$).....	92
Figura 4.16.c	Perfil de porosidade para Leito com sementes de algodão. ($H = 19\text{ cm}$, Jato Interno, $U = 14,77\text{ m/s}$).....	92
Figura 4.16.d	Perfil de porosidade para Leito com sementes de algodão. ($H = 19\text{ cm}$, Jato Interno, $U = 21,28\text{m/s}$).....	93
Figura 4.16.e	Perfil de porosidade para Leito com sementes de algodão ($H = 19\text{ cm}$, Jato Interno, $U = 25,83\text{ m/s}$).....	93
Figura 4.16.f	Perfil de porosidade para Leito com sementes de algodão ($H = 19\text{ cm}$, Jorro Mínimo, $U = 29,34\text{ m/s}$).....	94
Figura 4.16.g	Perfil de porosidade para Leito com sementes de algodão ($H = 19\text{ cm}$, Jorro Mínimo, $U = 30,16\text{ m/s}$).....	94
Figura 4.16.h	Perfil de porosidade para Leito com sementes de algodão. ($H = 19\text{ cm}$, Jorro Estável, $U = 33,06\text{ m/s}$).....	95
Figura 4.16.i	– Perfil de porosidade para Leito com sementes de algodão ($H = 19\text{ cm}$, Jorro Estável, $U = 36,16\text{ m/s}$).....	95
Figura 4.17.a	Perfil de porosidade para Leito com soja ($H = 19\text{ cm}$, Leito Fixo, $U = 2,85\text{ m/s}$).....	96
Figura 4.17.b	Perfil de porosidade para Leito com soja. ($H = 19\text{ cm}$, Jato Interno, $U = 9,3\text{ m/s}$).....	96

Figura 4.17.c	Perfil de porosidade para Leito com soja (H = 19 cm, Jato Interno, U = 11,67 m/s)	97
Figura 4.17.d	– Perfil de porosidade para Leito com soja. (H = 19 cm, Jato Interno, U = 19,42 m/s)	97
Figura 4.17.e	Perfil de porosidade para Leito com soja (H = 19 cm, Jato Interno, U = 23,76m/s)	98
Figura 4.17.f	Perfil de porosidade para Leito com soja. (H = 19 cm, Jorro Mínimo, U = 30,30 m/s)	98
Figura 4.17.g	Perfil de porosidade para Leito com soja. (H = 19 cm, Jorro Estável, U = 31,2m/s)	99
Figura 4.17.h	Perfil de porosidade para Leito com soja (H = 19 cm, Jorro Estável, U = 333,26 m/s)	99
Figura 4.17.i	Perfil de porosidade para Leito com soja (H = 19 cm, Jorro Estável , U = 35,33 m/s)	100
Figura A1	Curva característica para sementes de algodão (H ₀ = 19cm).....	110
Figura A2	Curva característica para sementes de algodão (H ₀ = 22cm).....	110
Figura A3	Curva característica para sementes de algodão (H ₀ = 25cm).....	111
Figura A4	Curva característica para sementes de soja (H ₀ = 19cm).....	111
Figura A5	Curva característica para sementes de soja (H ₀ = 22cm).....	112
Figura A6	Curva característica para sementes de soja (H ₀ = 25cm).....	112
Figura B1	Diagrama de Bloco.....	114
Figura B2	Painel Frontal.....	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Propriedades dos Materiais.....	28
Tabela 3.2	Características do Leito.....	32
Tabela 4.1	Comparação das vazões de jorro mínimo experimentais com as vazões pela Equação de MATHUR; GISHLER (1954) para as sementes de soja..	43
Tabela 4.2	Comparação das vazões de jorro mínimo experimentais com as vazões pela Equação de MATHUR; GISHLER (1954) para as sementes de algodão.....	44
Tabela 4.3	Comparação das vazões de jorro mínimo experimentais, com as simuladas por CFD para as sementes de soja e algodão.....	100
Tabela 4.4	Comparação das Quedas de pressão de jorro mínimo experimentais, com as simuladas por CFD para sementes de soja e algodão.....	101

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Amplitude da flutuação de pressão	[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]
D _s	Diâmetro do jorro	[m]
f	Frequência dominante no espectro	[Hz]
f _n	Frequência ponto a ponto	[Hz]
f _c	Frequência crítica	[Hz]
F _g	Frequência de geração de bolhas	[Hz]
F _e	Frequência de erupção de bolhas	[Hz]
F _b	Frequência natural do leito fluidizado	[Hz]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
G	Fluxo mássico de fluido na coluna	[Kg/sm ²]
H	Altura do leito	[m]
H _c	Altura da seção cônica	[m]
H _M	Altura máxima	[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 amostras	[-]
PSD	Função densidade espectral de potência	[Pa ² /Hz]
x	Sinal amostrado na série de tempo	[-]
$\bar{x}$	Média dos sinais amostrados na série de tempo	[-]
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]
(ΔP _S) _{max}	ΔP _S para H = H _M	[-]
T	Intervalo de amostragem	[s]
U _{mf}	Velocidade mínima de fluidização	[m/s]

U_{ms}	Velocidade mínima superficial de jorro	[m/s]
U	Velocidade superficial	[m/s]
U_S	Velocidade superficial de jorro	[m/s]
U_T	Velocidade terminal das partículas	[m/s]
ε	Porosidade do leito	[-]
c_v	Concentração de sólidos	[-]
ξ_{mf}	Porosidade mínima de fluidização	[-]
μ_f	Viscosidade do fluido	[N.s/m ²]
θ ou α	Ângulo da base cônica	[-]
ρ_f	Massa específica do fluido	[Kg/m ³]
ρ_s	Massa específica da partícula	[Kg/m ³]
Ψ ou ϕ	Esfericidade do sólido	[-]

Adimensionais:

$$Re = \text{número de Reynolds} = \frac{d_p U \rho_f}{\mu}$$

Re_i = número de Reynolds no orifício

Re_{ms} = número de Reynolds no jorro mínimo

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

RESUMO

O leito de jorro vem sendo intensivamente estudado, tendo em vista o seu potencial de aplicação em diversos processos e operações. A identificação e caracterização prévia de regimes de escoamento em leito de jorro têm sido reportadas na literatura, predominantemente baseados em observações visuais. Contudo, o reconhecimento desses regimes por observação visual, não é usual ou mesmo possível para equipamentos em escala industrial. Logo, esse trabalho teve por objetivo a construção de uma unidade experimental de leito de jorro monitorada por um sistema de aquisição de dados de pressão estática “on-line”, buscando a identificação de seus regimes fluidodinâmicos. Os resultados experimentais obtidos foram comparados com simulações numéricas, utilizando-se uma técnica de fluidodinâmica computacional (CFD). Nesse trabalho foram utilizadas sementes de soja e algodão. O leito de jorro utilizado foi confeccionado em aço inoxidável com as seguintes dimensões: $H = 85$ cm, $D_e = 21$ cm, $D_i = 3,5$ cm e $\theta = 60^\circ$. As flutuações de queda de pressão no leito foram medidas em tempo real pelo *software* LabVIEW® 7.1. Foi utilizada uma frequência de amostragem de 100 Hz para todos os experimentos. A análise dos gráficos de flutuação de pressão em função do tempo, não mostrou ser um método apropriado para identificação de regimes em leito de jorro. Por outro lado, o uso da técnica de FFT (*Fast Fourier Transform*), sobre os sinais de queda de pressão resultou em espectros de potência. Baseado nesses espectros de potência foi possível propor um critério efetivo de identificação. O uso desses critérios possibilitou a identificação clara de todos os regimes de escoamento no leito: fixo, transição, jorro estável. Os resultados experimentais foram comparados com simulações numéricas obtidas através da técnica de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), com o uso do *software* comercial FLUENT® 6.1.18. Os perfis de porosidade do leito e a curva característica do leito de jorro foram calculados usando-se o modelo Euleriano multifásico. A comparação dos dados simulados frente aos experimentais mostrou uma boa concordância.

Palavras-chave: Leito de jorro, Monitoramento de regimes, Espectro de potência, Flutuação de pressão, Fluidodinâmica computacional.

ABSTRACT

Spouted bed has been studied intensively because of its potential of application in several processes. Identification and characterization of flow regimes in spouted bed based on visual observation have been reported in literature. However, the characterization of flow regimes based on visual observation is not either usual or possible in industrial equipments. Therefore, the aim this thesis is to design an experimental apparatus dotted a data acquisition system in order to identify the flow regime of the spouted bed. The experimental data obtained from the experimental apparatus were compared with data obtained from simulation studies by using a computational fluid dynamic technique (CFD). Soybean and cotton seeds were used in this study. The spouted bed was build in stainless steel with the following dimensions: $H = 85$ cm, $D_c = 21$ cm, $D_i = 3.5$ cm e $\theta = 60^\circ$. The pressure drop fluctuations in the bed were acquired on line by using the LabVIEW® 7.1 software. A 100 Hz sampling frequency was used in all runs. Graphical analysis of the pressure fluctuations versus time showed to be not appropriate for identification of the flow regimes. On the other hand, the use of the fast Fourier transform technique (FFT) over the pressure drop signals yielded a power spectrum. Based on this power spectrum it was possible to propose an effective identification criterion. By using this criterion it was possible to identify clearly all flow regimes in the bed: fixed, transition and spouting. Simulation results used for comparison with experimental data were obtained by using the commercial package FLUENT® 6.1.18. The porosity profiles and the characteristic curve of the spouted bed were calculated by using an Eulerian multiphase model. The comparisons showed a very good agreement between experimental and simulation results.

Keywords: spouted bed, pressure fluctuation, computational fluid dynamics.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O leito de jorro, técnica originalmente desenvolvida no Canadá na década de 50 como uma modificação do leito fluidizado buscando o tratamento de partículas de maior diâmetro, vem sendo estudado, tendo em vista o seu potencial de aplicação em diversos processos e operações que requerem altas taxas de transferências de calor e massa e um produto final homogêneo.

Características como boa agitação das partículas e um efetivo contato gás-sólido, além do baixo investimento inicial e custo operacional, aumentaram ainda mais o interesse do uso desse equipamento na operação de secagem, por exemplo.

Além da secagem de materiais, aplicações como recobrimento de partículas ou reações catalíticas também podem ser realizadas em leito de jorro. Porém, algumas limitações técnicas têm sido observadas no emprego da operação de leito de jorro, o que restringe bastante o uso dessa técnica em escala industrial (CONCEIÇÃO FILHO, 1997). Essa restrição, para leitos com grandes capacidades, se deve às dificuldades de manutenção de um regime fluidodinâmico estável.

A busca da estabilidade dos regimes em qualquer aplicação é, segundo SILVA *et al.* (1999), de suma importância, pois implica numa maior eficiência dos processos. Portanto as definições das faixas de operação em condições estáveis para os leitos de jorro e fluidizados são obtidas experimentalmente, sendo função das propriedades das partículas e fluido, da geometria e das dimensões do leito. Com isso, o mapeamento das regiões de operação com os leitos em regime dinamicamente estável é bastante específico (SILVA *et al.*, 1999).

O regime e a estabilidade em leito de jorro têm sido estudados e equações para estimar a velocidade de jorro mínimo, diâmetro e altura máxima do leito foram desenvolvidas baseadas em observações experimentais. A identificação e caracterização prévia desses regimes têm sido reportados na literatura, predominantemente baseados em observações visuais de leitos confeccionados com paredes transparentes operando à temperatura e pressão ambiente.

No entanto, o reconhecimento de regimes de escoamento por observação visual não é usual em equipamentos em escala industrial ou sujeito a altas pressões, uma vez que os mesmos, via de regra, são confeccionados com materiais opacos não permitindo observação

visual. Logo, necessita-se de técnicas não visuais e não intrusivas para inferir o regime de escoamento a partir de sistema de aquisição de dados de uma medida simples, como a pressão estática ou queda de pressão no leito, por exemplo (XU *et al.*, 2004).

A previsão deste comportamento fluidodinâmico por meio de simulações numéricas desde que validadas por dados experimentais, pode ser também importante para o dimensionamento ou análise de desempenho de um unidade de jorro sem a necessidade da instalação de uma unidade piloto para a identificação desses regimes de escoamento no leito de jorro.

Isto posto, esse trabalho tem por objetivo a montagem de uma unidade experimental de leito de jorro monitorada por um sistema de aquisição de dados “*on-line*”, buscando a identificação da estabilidade de regimes fluidodinâmicos em leito jorro. As flutuações de pressão serão monitoradas e a partir desses dados e do uso de uma rotina baseada na técnica da transformada de Fourier serão produzidos espectros que permitirão identificar os principais regimes de escoamento: leito fixo e jorro estável. Serão usados alguns materiais de interesse comercial da região, como as sementes soja e sementes de algodão, por exemplo. Os resultados obtidos serão comparados com simulações utilizando-se a técnica de fluidodinâmica computacional (CFD) realizadas em um *software* comercial.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- Leito de jorro cilíndrico

A expressão “leito de jorro”, se refere a um leito de partículas contidas em uma coluna cilíndrica através do qual um jato de fluido é injetado por um orifício localizado no centro de sua base tronco-cônica. Ao se alcançar o estado permanente, um trajeto é estabelecido no qual os sólidos são lançados para cima pelo jato central, elevando-se acima do nível da superfície do leito e subseqüentemente descendo por uma região intermediária conhecida como anular, que contorna o canal do jorro, onde um lento movimento para baixo da carga de sólidos na região anular completa o ciclo (FRANCO JR, 1989).

O início da circulação dos sólidos, que caracteriza o leito de jorro, acontece quando a vazão de ar torna-se suficiente para arrastar pneumáticamente as partículas acima do nível do leito. Estas partículas passarão por uma região central, de alta porosidade, denominada jorro central (ou simplesmente jorro), e ao atingir o ponto em que sua velocidade se iguala a zero, passarão a ter um movimento descendente através de uma região de menor porosidade, localizada entre a parede da coluna e o jorro central, denominada região anular. As partículas podem retornar ao jorro ao longo de toda a interface entre o jorro central e a região anular, mas, no entanto, a maior parte dos sólidos desloca-se para baixo e só na região de base tronco-cônica invertem seu sentido de movimento retornando ao deslocamento ascendente, caracterizando assim um movimento cíclico dos sólidos.

O sistema de leito de jorro foi desenvolvido no Canadá por MATHUR; GISHLER (1955), quando testava um leito fluidizado com maior capacidade para secagem de trigo (MEILI *et al*, 2003). Mesmo nos dias atuais, alguns autores consideram o leito de jorro como uma versão modificada do leito fluidizado, isto em função da pequena (pobre) fluidização encontrada nesse tipo de leito quando em contato com partículas maiores (DUARTE, 2002).

DUARTE (2002), comenta em seu trabalho que a consideração de um leito de jorro como uma versão modificada de leito fluidizado não é muito adequada, posto que o leito de jorro exhibe características particulares que o fazem capaz de executar certas operações de ciclo úteis em partículas sólidas, que não podem ser executadas em um leito fluidizado devido ao seu movimento de partículas comparativamente aleatório.

Dentre as justificativas para o uso do leito de jorro destaca-se a boa agitação dos sólidos com um efetivo contato gás-sólido, além do baixo investimento inicial e custo operacional (DUARTE, 2004).

2.1.1- Alguns tipos de leito de jorro

Nos últimos anos têm surgido na literatura diversas alterações na técnica convencional do leito de jorro, dentre as quais destacam-se:

a) Leito de jorro cônico: Constituído apenas por uma base cônica, esse leito tem como principal vantagem a capacidade de carga, ou seja, para uma mesma altura do leito é possível alimentar o equipamento com uma carga inicial maior do que aquela comparada com um leito convencional, onde o ângulo da base tronco-cônica é igual ao ângulo do leito cônico.

b) Leito de jorro com tubo “Draft”: Nesta variação há a inserção de um tubo concêntrico à parte cilíndrica do leito. Com a utilização desse artifício, consegue-se a melhora do comportamento fluidodinâmico, com o direcionamento do ar na região de jorro central, o que possibilita uma redução na queda de pressão máxima. Sua principal vantagem é o aumento no tempo de residência das partículas bem como na homogeneização da circulação de partículas.

Como desvantagens, destacamos o comprometimento da permeação do ar na região anular e a diminuição das taxas de transferência de calor e massa nessa região, o que pode acarretar prejuízo às operações de secagem, por exemplo.

c) Leito de jorro-aerado: A porção cônica do leito recebe uma vazão de ar auxiliar, ocorrendo um aumento da porosidade nessa região, melhorando com isso as taxas de transferência de calor e massa no processo (CONCEIÇÃO FILHO, 1997).

d) Leito de seção retangular: Leito composto de um prisma retangular com uma base de tronco de pirâmide, muito utilizado para o estudo da influência do ângulo da base como uma das variáveis do processo de recobrimento, por exemplo, (CONCEIÇÃO FILHO, 1997).

e) Leito vibro-jorrado: A movimentação das partículas é aumentada pela agitação oriunda de um sistema mecânico de vibração localizado na base do leito (CONCEIÇÃO FILHO, 1997).

2.1.2- Utilização do leito de jorro

Desde que foi descoberto, o leito de jorro tem sido considerado como um bom e versátil sistema de contato gás – sólido. Segundo MEILI (2003), a técnica de leito de jorro pode ser aplicada eficientemente para secagem de grãos, suspensões e pastas, bem como de granulação e recobrimento de partículas. Além das utilizações já mencionadas, DOGAN *et al* (2000) citam o uso da operação em reações catalíticas do tipo gás – sólido. MELLO; GUBULIN (1994), citam, também, a aplicação de leitos móveis na eletrodeposição de metais pesados a partir de soluções diluídas. Esse tipo de leito, segundo eles, apresenta vantagens sobre o leito fixo, tais como, maiores taxas de transferência de massa, além do fato da maior circulação de partículas minimizar problemas da agregação do leito depois de determinado tempo de operação. DUARTE (2002), apresenta algumas aplicações do leito de jorro no revestimento de partículas, estendendo-se a vários setores da indústria como: recobrimento de comprimidos, de sementes com fertilizantes, de sementes de soja com micronutrientes e inoculantes, dentre outros. Estas aplicações de recobrimento têm como objetivos principais a diminuição da taxa de dissolução de substâncias químicas, tornar o manuseio do produto mais fácil, inibir sabores e odores desagradáveis, aumentar o volume para melhor manuseio, adicionar material para suprir futura carência deste pela partícula, proporcionar boa estética ao produto e aumentar resistência mecânica.

2.1.3 - Limitações do leito de jorro

A técnica de leito de jorro, raramente é aplicada em processos de escala industrial devido a uma série de limitações. Em particular, há uma grande dificuldade de “scale – up” em função da inabilidade de se obter um jorro de boa qualidade em vasos de grande porte (DOGAN *et al*, 2000).

DUTRA (1984) cita algumas limitações de utilização da técnica do leito de jorro, são elas:

- a) Elevada perda de carga antes de atingir o jorro estável;
- b) Fluxo de ar governado mais pelas necessidades do jorro do que pelas necessidades de transferência de calor e massa;
- c) Dificuldade no “scale-up”;
- d) Grande faixa de tempo de residência das partículas e um produto heterogêneo;

- e) Existência de uma altura máxima de jorro estável que limita a capacidade do equipamento.

2.1.4- Regiões Características do Jorro

A Figura seguir 2.1 mostra um esquema destacando as regiões características do jorro.

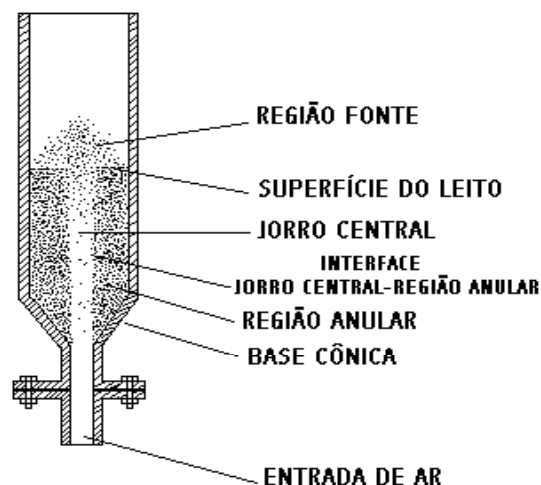


Figura 2.1- Esquema de um leito de jorro.

- a) **JORRO CENTRAL**: Região de maior porosidade no leito onde ocorre o transporte pneumático das partículas com movimento concorrente do material;
- b) **REGIÃO DE FONTE**: Região acima do leito, onde as partículas advindas do jorro central desaceleram caindo na região anular. Para colunas cilíndricas, a altura da fonte aumenta com o aumento da velocidade superficial do gás, diminuindo as dimensões do orifício de entrada de ar e diminuindo o diâmetro das partículas (DOGAN *et al*, 2000);
- c) **REGIÃO ANULAR**: Nesta região as partículas que caem da região de fonte deslizam, em parte, até a base do leito num movimento contracorrente com o ar;
- d) **SUPERFÍCIE DO LEITO**: Cume do leito ao qual irá aflorar a região fonte depois de estabelecido o jorro;
- e) **INTERFACE JORRO CENTRAL – REGIÃO ANULAR**: Fronteira imaginária entre a região anular e o jorro central. Nessa região ocorrem alguns problemas como os “curtos-circuitos”, que nada mais são do que a migração prematura dos sólidos da região anular para o jorro central, diminuindo com isso o tempo de residência da partícula na região anular, afetando fortemente a homogeneidade do produto. Vale lembrar que o circuito ideal a ser percorrido pelo sólido é o arraste ascendente da partícula da base do leito até a

região de fonte, pelo jorro central, para a seguir descer em contra corrente ao fluxo de gás na região anular até a base da coluna onde irá retornar ao jorro central, fechando o ciclo;

f) BASE CÔNICA: A base cônica de um leito de jorro favorece o movimento circulatório das partículas, além de diminuir as regiões conhecidas como “zonas mortas” na base da coluna. O ângulo da base cônica é um parâmetro importante a ser determinado. Os ângulos menores facilitam o fluxo de sólidos da região anular para a região de jorro. Por outro lado, se o ângulo for grande (cone muito fechado) o jorro fica instável já que o leito inteiro tende a ser suspenso pelo gás (DUTRA, 1984);

g) ENTRADA DE AR: O ar é injetado em um leito de jorro por um orifício de entrada localizado na parte central da base da coluna. DUTRA (1984) apresenta como ideal a relação entre o diâmetro da parte cilíndrica da coluna e o diâmetro do orifício de entrada de ar igual a 6 (seis).

2.2- Fluidodinâmica do Leito de Jorro

2.2.1- Curva Característica

O mecanismo de transição do leito estático para o leito de jorro pode ser visualizado graficamente, plotando-se a queda de pressão no leito em função da velocidade superficial. Este diagrama é conhecido como curva característica para o leito de jorro e está apresentado na Figura 2.2.

Na curva característica do leito de jorro (Figura 2.2), observa-se que iniciando com pequenas vazões, o gás, apenas, percola entre as partículas em um leito fixo. O segmento $\overline{AB}$ da curva característica, mostra esse comportamento, ou seja, nessa região a queda de pressão aumenta gradualmente, descompactando o leito até ao ponto de máxima queda de pressão (ponto B).

A partir do ponto B ($-\Delta P_M$), Com o aumento do fluxo de ar, surge próximo ao orifício de entrada do gás uma cavidade provocada pelo arraste das partículas contidas nessas vizinhanças, que por sua vez comprimem as partículas imediatamente acima da cavidade, formando um arco compacto de material, provocando um decaimento na queda de pressão. À medida que a velocidade de ar vai aumentando, a cavidade central vai se alongando dando origem a um jorro interno e a queda de pressão vai diminuindo até o ponto C, conhecido como jorro incipiente, próximo à superfície do leito. Com um incremento na velocidade

superficial o jorro aflora através da superfície, o que pode ser melhor observado através do segmento $\overline{CD}$ da curva característica, ocorrendo uma brusca queda de pressão estabilizando num ponto, ao qual para qualquer aumento no fluxo de gás acarretará apenas na elevação da altura da fonte. Sendo assim, a partir do ponto D da curva característica começa a região de jorro estabelecido.

Reduzindo-se o fluxo de gás a região de jorro estabelecido mantém-se até o ponto C' da curva característica onde se observa a queda de pressão de jorro mínimo e encontra-se a menor vazão de ar capaz de manter um jorro estável. Continuando com a redução da vazão chega-se ao ponto máximo de queda de pressão em vazões decrescentes, ponto B' da curva característica, que não corresponde ao ponto máximo de queda de pressão para vazões de gás crescentes, uma vez que não há mais a necessidade de romper a barreira formada pelo arco de material sólido ao longo do leito, havendo apenas a interação gás sólido. A partir desse ponto a queda de pressão volta a decrescer na medida em que se processa a redução da vazão de gás.

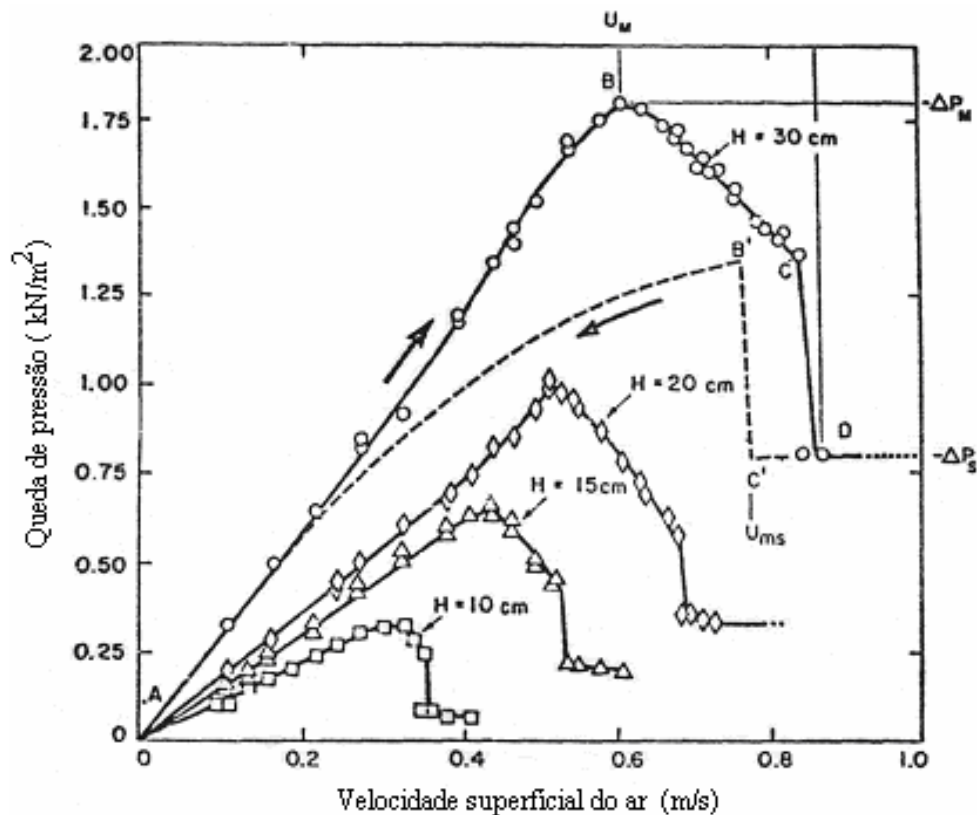


Figura 2.2- Curva Característica do leito de jorro

(trigo, $dp = 3,6\text{ mm}$, $D_c = 15,2\text{ cm}$, $\theta = 60^\circ$ e $Di = 1,27\text{ cm}$). (MATHUR; EPSTEIN, 1974)

2.2.2- Queda de pressão

Os valores de Queda de Pressão de interesse prático no projeto e operação de uma unidade de leito de jorro são os correspondentes aos Pontos B e D da Figura 2.2, vista anteriormente. Esses são, respectivamente, a queda de pressão máxima ($-\Delta P_M$), atingida antes do jorro incipiente e a Queda Pressão no jorro estabelecido ($-\Delta P_S$). O primeiro é notadamente encontrado ao começar uma operação em uma unidade de jorro, enquanto o segundo determinaria a exigência das condições de operação.

2.2.3- Queda de pressão máxima

Considerado um parâmetro importante para o projeto de leitos de jorro, a queda de pressão máxima pode ser usada, por exemplo, para o cálculo da potência do soprador, necessária para atingir o jorro.

A ocorrência do pico de queda de pressão máxima, na curva característica do leito, antecede o início do jorro, podendo, entretanto, ser atribuído como a energia requerida pelo fluxo gás para romper a estrutura do leito compactado, formando um jorro interno. Para que o jorro interno se desenvolva satisfatoriamente de forma a estabelecer um jorro estável, algumas condições críticas como o tamanho das partículas, a abertura de entrada de ar, a altura do leito, entre outros; devem ser levadas em consideração.

MANURUNG (1964) realizou uma quantidade considerável de experimentos com diversos materiais diferentes. Dos resultados experimentais ele formulou uma relação empírica de queda de pressão máxima, vista na Equação (2.1).

$$\frac{-\Delta P_M}{H_0 \rho_b g} = \left[\frac{6,8}{\tan \gamma} \left(\frac{D_i}{D_c} \right) + 0,80 \right] - 34,4 \frac{d_p}{H_0} \quad (2.1)$$

O coeficiente de fricção interna, $\tan \gamma$, introduzido para permitir a variação das características superficiais de diferentes materiais sólidos, foi medido de acordo com o método de ZENZ; OTHMER (1960), e os valores variaram de 1,25 para sementes de colza a 3,2 para carvão. Para partículas de diferentes tamanhos, o diâmetro da partícula (d_p) foi obtido através de uma análise de dados do diâmetro médio recíproco ($\sum x_i / d_{pi}$).

Para vasos de geometria cônica, GALPERIN *et al* (1974) obtiveram a seguinte correlação empírica.

$$\frac{-\Delta P_M}{H\rho_b g} = 1 + 0,062 \left(\frac{D_b}{D_i} \right)^{2,54} \left(\frac{D_b}{D_i} - 1 \right) (\tan \theta / 2)^{-0,18} \quad (2.2)$$

Onde:

- θ = Ângulo do cone ($10^\circ - 15^\circ$);
- ρ_b = densidade aparente do sólido ;
- D_b = Diâmetro da superfície superior do leito;
- H_0 = Altura do leito (10 – 25 cm).

O diâmetro do orifício de alimentação de ar (D_i) foi de 5cm e o material sólido utilizado foi o quartzo fino com faixa de 0,16mm a 0,28mm de tamanho. O termo D_b está relacionado geometricamente às outras dimensões do leito cônico pela Equação a seguir:

$$D_b = D_i + 2H \tan \theta / 2 \quad (2.3)$$

DUTRA (1984), referenda em seu trabalho que foram realizadas experiências utilizando partículas com 3,2 mm de diâmetro em vasos cônicos. Os valores observados para a queda de pressão máxima foram menores que os previstos pela Equação (2.2). Como consequência, a ausência do diâmetro médio da partícula na equação da queda de pressão máxima faz com que sua validade para partículas maiores não seja boa.

Como relatado por outros autores, tanto para leito convencional, como para bidimensional, a queda de pressão máxima aumenta com a altura do leito. Porém, no que diz respeito a abertura de entrada de ar na base, quase não se percebe influência desta na queda de pressão máxima. A queda de pressão máxima varia com o diâmetro e a densidade das partículas (DOGAN *et al*, 2000).

MELLO; GUBULIN (1994), estudando leito de jorro operando com água observaram uma forte influência do ângulo da base do leito na queda de pressão máxima. Segundo os autores, com algumas exceções, a $-\Delta P_M$ diminui com o aumento do ângulo da base nas configurações analisadas.

COSTA; TARANTO (1999), estudando a fluidodinâmica e a ampliação de escala em leito de jorro bidimensional observaram forte influência da largura do leito na queda de pressão máxima. Também, a altura do leito bem como a densidade das partículas é destacada

pelos autores como influentes na variação da queda de pressão máxima. Segundo eles, o efeito do ângulo da base é sinérgico com o aumento do tamanho do leito. Logo, genericamente, quanto mais inclinado for o ângulo da base do leito, maior é o valor da queda de pressão máxima.

2.2.4- Queda de pressão de jorro estável

Outro parâmetro considerado importante no projeto de leitos de jorro é a queda de pressão de jorro estável, que juntamente com a velocidade de jorro mínimo determinam a potência e operação do leito.

MAMURO; HATTORI (1968), após algumas considerações chegaram a uma equação para a queda de pressão no jorro estável, como segue:

$$-\Delta P_s = (\rho_s - \rho_f)(1 - \xi_{mf})g \left(\frac{3}{4} H_M \right) \quad (2.4)$$

Uma correlação que se aplica satisfatoriamente a leitos de jorro convencional, é a correlação de NASCIMENTO *et al* (1976), mostrada a seguir.

$$-\Delta P_{ms} = \frac{2}{3} (1 - \xi_{mf}) H_0 \cdot \rho_s \cdot g \quad (2.5)$$

Para vasos cônicos, MUKHLENOV; GORSHTAIN (1965) propuseram a seguinte correlação empírica de queda de pressão na condição de jorro estável:

$$\frac{-\Delta P_s}{H_0 \rho_b g} = \frac{7,68 \left(\tan \frac{\theta}{2} \right)^{0,2}}{\text{Re}_i^{0,2} \left(\frac{H}{D_i} \right)^{0,33}} \quad (2.6)$$

Onde Re_i é o número de Reynolds baseado no diâmetro da partícula e na velocidade do gás através do orifício de entrada de ar, θ é o ângulo do cone, D_i é o diâmetro do orifício de entrada de ar e H altura do leito.

DOGAN *et al* (2000), ao estudarem a hidrodinâmica e a estabilidade em leitos bidimensionais correlacionaram a queda de pressão de jorro estável com a abertura de entrada de ar para quatro diferentes alturas de leito e dois tipos de partículas com diâmetros diferentes. Observou que, para partículas relativamente pequenas, ocorreu um aumento no

ΔP_s a medida que aumentou-se a abertura de entrada de ar na base (abertura λ). No que diz respeito a altura do leito, a queda de pressão de jorro estável aumentou, independentemente do tamanho das partículas, com o aumento da altura do leito. Esta tendência é similar para leitos cilíndricos de base tronco-cônica, bem como leitos cônicos.

2.2.5- Velocidade de jorro mínimo

A velocidade de jorro mínimo (U_{ms}) é a menor velocidade de um fluido, na qual é possível a permanência do estado de jorro em um leito. A velocidade de jorro mínimo depende, por um lado, das propriedades do sólido e do fluido, por outro, da geometria do leito. Num leito de jorro convencional, a velocidade de jorro mínimo, para um dado material, aumenta com o aumento da altura do leito de sólidos e com a diminuição do diâmetro da coluna.

Muitos pesquisadores propuseram correlações empíricas para velocidade de jorro mínimo em vasos cilíndricos de base tronco-cônica. Uma das mais usadas foi proposta por MATHUR; GISHLER (1954):

$$U_{ms} = \left(\frac{d_p}{D_c} \right) \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{1/3} \left(\frac{2gH(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right)^{1/2} \quad (2.7)$$

Onde d_p é o diâmetro da partícula, D_c o diâmetro da coluna, D_i o diâmetro do orifício de entrada do ar e ρ_f a massa específica do fluido.

Para vasos com geometria cônica são propostas, também, várias correlações da velocidade mínima do fluido no jorro estável. Dentre elas podemos citar a correlação de MUKHLENOV; GORSHTAIN (1965), que trabalhando com partículas de quartzo, areia e silicato de alumínio com d_p entre 0,5 e 2,5mm; ρ_s entre 0,98 e 2,36 g/cm³ e D_i entre 1,0 e 1,3 cm; H entre 3,0 e 15,0 cm; θ entre 120° e 60°, chegaram a seguinte expressão:

$$(Re_i)_{ms} = 0,174 \frac{(Ar)^{0,50}}{(\tan(\theta/2))^{2,5}} \left(\frac{D_b}{D_i} \right)^{0,85} \quad (2.8)$$

Onde:

$$\text{Re}_i = \frac{d_p U \rho_f}{\mu_f} \quad (2.9)$$

COSTA; TARANTO (1999), apresentaram, para leito de jorro bidimensional, uma correlação geral para a velocidade de jorro mínimo baseada nos mesmos princípios fluidodinâmicos dos leitos de jorro convencionais, em que o diâmetro da coluna e o diâmetro de entrada de ar são substituídos pela largura do leito (L_1) e largura do jorro (L_j), respectivamente.

$$U_{ms} = 3,0(2gH)^{0,5} \left(\frac{L_1}{L_j} \right) \left(\frac{L_1}{d_p \phi} \right)^{0,75} \left(\frac{H}{L_1} \right)^{0,16} \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right)^{0,23} \quad (2.10)$$

Segundo DOGAN *et al* (2000), para leitos de jorro convencional os resultados experimentais mostram que U_{ms} é proporcional a raiz quadrada de H_0 (altura do leito) para leitos fundos, enquanto que para leitos rasos U_{ms} é aproximadamente proporcional a H_0 .

2.2.6- Altura máxima do leito de jorro

A altura do material no leito é um fator determinante na operação em leito de jorro, ou seja, para a obtenção de um jorro estável deve-se obedecer a uma altura máxima do leito que, via de regra, leva em consideração a uma combinação de parâmetros do gás, sólido e configuração do vaso. Diversas correlações para altura máxima são encontradas na literatura. MALEK; LU (1965) apresentam uma correlação empírica para a previsão da altura máxima de jorro estável de um leito de jorro convencional, mostrada na Equação (2.11).

$$\frac{H_M}{D_c} = 0,105 \left(\frac{D_c}{d_p} \right)^{0,75} \left(\frac{D_c}{D_i} \right)^{0,4} \left(\frac{1}{\phi^2 \rho_s^{1,2}} \right) \quad (2.11)$$

COSTA; TARANTO (1999), obtiveram uma correlação para a altura máxima de jorro estável para o leito bidimensional. Nesta equação são incluídos todos os parâmetros geométricos do leito bidimensional e as propriedades do gás e das partículas. A correlação é a seguinte:

$$\frac{H_M}{L_1} = 39,47 \left(\frac{L_1}{L_j} \right)^{0,075} \left(\frac{L_1}{\phi d_p} \right)^{-0,317} [Ar\phi]^{-0,145} \left(\frac{tg\theta}{2} \right)^{0,69} \quad (2.12)$$

2.2.7- Regimes de Escoamento

O regime de escoamento varia consideravelmente com a modificação da abertura de entrada de ar de um leito de jorro e nada menos que oito regimes de escoamento diferentes foram identificados por DOGAN *et al* (2000). Muitos desses regimes, já foram identificados na apresentação da curva característica do leito de jorro (Item 2.21 e Figura 2.2), são eles:

- a) Leito Fixo : Observado para pequenas vazões de ar. Nesse caso o gás apenas percola por entre as partículas.
- b) Jato Interno : Nesse regime, uma cavidade se forma logo acima da abertura de entrada, enquanto o restante do leito permanece como um leito fixo. Com o aumento da altura do leito, há a necessidade, também, do aumento do fluxo de gás para se atingir esse regime.
- c) Leito Fluidizado : Após a formação do jato interno, um aumento no fluxo de gás leva a fluidização na parte superior do leito.
- d) Jorro : Nesse regime de escoamento o leito toma a forma do jorro convencional. Partículas são transportadas pneumáticamente para cima, em movimento concorrente, através de um vão central conhecido como jorro central, onde após atingir um ápice, já na região de fonte, descem suavemente em um movimento contracorrente ao fluxo de gás, numa região periférica do leito conhecida como região anular até atingir a base do leito onde retornam ao jorro central, fechando um movimento cíclico que é característico da operação em leito de jorro. Nesse regime de escoamento, algumas instabilidades foram observadas e serão discutidas mais adiante.
- e) Jorro em Fase Diluída : Para alturas de leito relativamente pequenas e alta relação de escoamento de ar ($U \cong 2U_{ms}$), o jorro em fase diluída foi descrito por EPSTEIN; GRACE (1997). Esse regime é reconhecido visualmente quando a região anular tem a mesma concentração de partícula que o jorro central.
- f) “Slugging” : Os slugs surgem no leito de jorro, para situações onde a altura estática de material no leito encontra-se acima da altura máxima de jorro estável. Quando isto ocorre, não é possível o estabelecimento de um jorro estável e o fluxo de ar passa a formar bolhas de ar no leito. Essas bolhas aumentam de tamanho conforme vão

ascendendo através do leito, tornando-se grandes o suficiente para expandirem-se pelo mesmo. A porção de partículas localizadas acima dessas bolhas é, então, empurrada para cima, como um pistão. Porém, algumas partículas caem para o *slug* de baixo e conforme vão subindo, essas porções de sólidos desaparecem. Após esse período, outros *slugs* formam-se e o movimento oscilatório instável é repetido.

- g) Jorro Inconsistente: Esse regime foi observado para grandes fluxos de gás e alturas intermediárias do leito. Ele é marcado por extrema pulsação de partículas na altura da fonte.

2.3- Flutuação de Pressão

Como mencionado anteriormente, a identificação prévia de regimes de escoamento que tem sido apresentado na literatura é predominantemente baseada em observação visual através de colunas de parede transparentes operadas a temperatura ambiente. Porém o reconhecimento de regimes de escoamento por observação visual não é possível em equipamentos de escala industrial. Logo, faz-se necessário o desenvolvimento de instrumentação que utilize métodos não visuais para identificar ou inferir os diversos regimes de escoamento. Esses métodos são baseados na análise de sinais de pressão para identificar as características hidrodinâmicas de um leito fluidizado e os sinais podem ser analisados por três diferentes caminhos: por análise estatística no domínio do tempo, por análise espectral da frequência ou domínio de Fourier e por análise do caos no espaço do sistema.

As flutuações de pressão em leitos fluidizados são usualmente causadas pela formação e erupção de bolhas. Essas flutuações de pressão têm sido analisadas em leitos fluidizados para determinar características como: velocidade mínima de fluidização, comprimento de penetração do jato, transição de bolhas para fluidização turbulenta, frequência de bolhas e qualidade da fluidização.

Alguns exemplos de sinais de pressão e seus correspondentes desvios de probabilidade, para diferentes velocidades do ar e em diferentes posições do leito de jorro, foram observadas por XU *et al* (2004) como mostradas na Figura 2.3 a seguir:

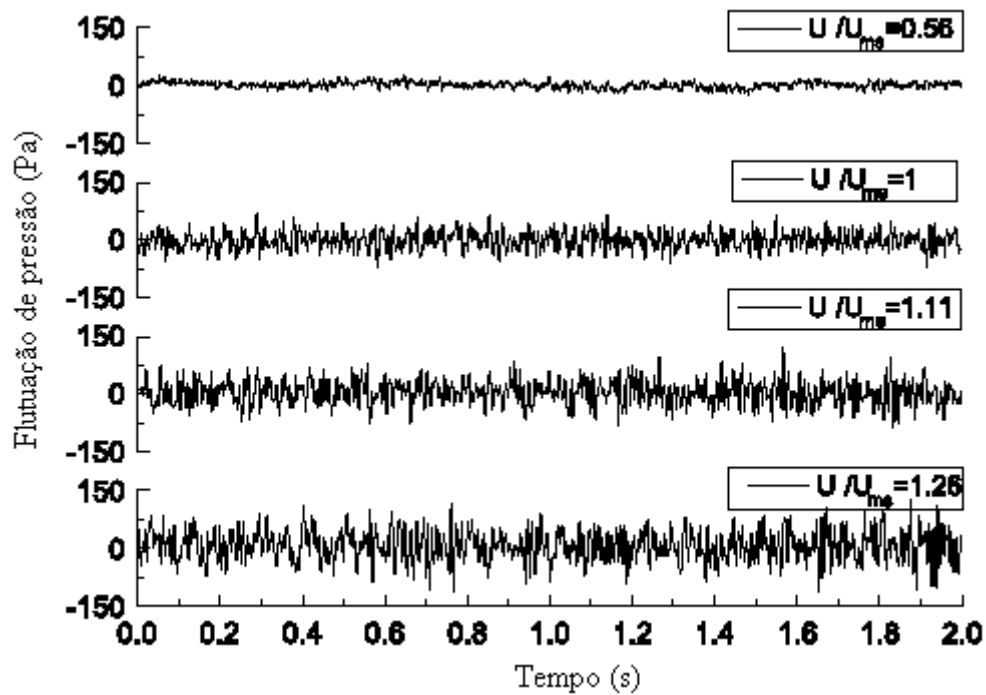


Figura 2.3 – Flutuações de pressão em função do tempo a várias velocidades de gás, medidas na seção cônica do leito (esferas de vidro de 1,6mm, $D_c = 120\text{mm}$, $H_b = 155\text{mm}$, $D_i = 10\text{mm}$, $U_{ms} = 0,562\text{ m/s}$).[XU *et al* (2004)]

2.3.1- Análise Estatística

A análise estatística no domínio do tempo é uma análise simples e comumente empregada. O método do domínio do tempo estuda a amplitude de sinais, expressa na forma de um desvio padrão. A variação da amplitude em função das condições de operação do leito tem sido muito pesquisada para leitos fluidizados, visando à identificação da transição entre os diferentes regimes de escoamento.

Segundo FREITAS *et al* (2000), a característica de cada regime de escoamento difere consideravelmente em relação aos outros. Em geral o desvio padrão e a amplitude média aumentam com o aumento do fluxo de ar, indo desde o leito fixo, passando pelos demais regimes, até o "slugging". Para um sinal, x_i , ($i=1,2,3,\dots,N$) o Desvio Padrão é calculado por :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.13)$$

Com Média:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.14)$$

Uma informação adicional que vem sendo aplicada por muitos autores para identificar os regimes de transição em leitos fluidizados é o momento estatístico de terceira ordem ou “Skewness”. O momento normalizado de terceira ordem da Função de Densidade de Probabilidade (“Skewness”), é definido como:

$$S_k = \frac{1}{\sigma^3} \int_{-\infty}^{+\infty} (P - \bar{P})^3 \cdot f(P) dP \quad (2.15)$$

A “Skewness” ou desvio representa a falta de simetria em torno do valor médio, e é igual a zero para distribuições simétricas como a distribuição Normal. Em geral a “Skewness” aumenta com o aumento do fluxo de ar. Entretanto, o começo do jorro é marcado por um súbito decaimento do desvio do sinal de pressão, após o qual volta a aumentar linearmente (FREITAS *et al*, 2000).

Tanto o Desvio Padrão como a “Skewness” têm sido empregados na literatura para identificar a natureza e a qualidade da fluidização do leito.

2.3.2- Domínio de Frequência

Na análise do domínio de frequência, a distribuição de frequência é expressa pela estimativa da função densidade espectral que prevê a informação sobre as características na escala de tempo ou da frequência da pressão no tempo. A função densidade espectral de potência (PSD) transforma a informação do domínio do tempo no domínio de frequência através da técnica da Transformada Rápida de Fourier (FFT). Matematicamente ela pode ser definida como:

$$PSD = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{E|F(P)|^2}{T} \quad (2.16)$$

Onde F(P) representa uma Função Transformada de Fourier, que será vista mais detalhadamente a seguir.

A análise da distribuição de frequência tem sido amplamente aplicada na análise de série do tempo, para a caracterização dos regimes de escoamento e para a verificação das relações de aumento de escala em leitos fluidizados (XU *et al*, 2004).

2.3.3) A Transformada de *Fourier*

Uma interpretação simplificada da Transformada de *Fourier* é ilustrada na Figura 2.4, a seguir. Como é apresentada, a essência da Transformada de *Fourier* de uma forma de onda é decompor ou separar a forma de onda em uma soma de senóides de diferentes frequências. Se estas senóides somam a forma de onda original, então é determinada a Transformada de *Fourier* da forma de onda. A representação gráfica da Transformada de *Fourier* é um diagrama que possui a amplitude e a frequência de cada uma das senóides determinadas.

A Figura 2.4 apresenta, também, um exemplo da Transformada de *Fourier* de uma forma de onda simples. A Transformada de *Fourier* são as duas senóides que se acrescentam para gerar a forma de onda.

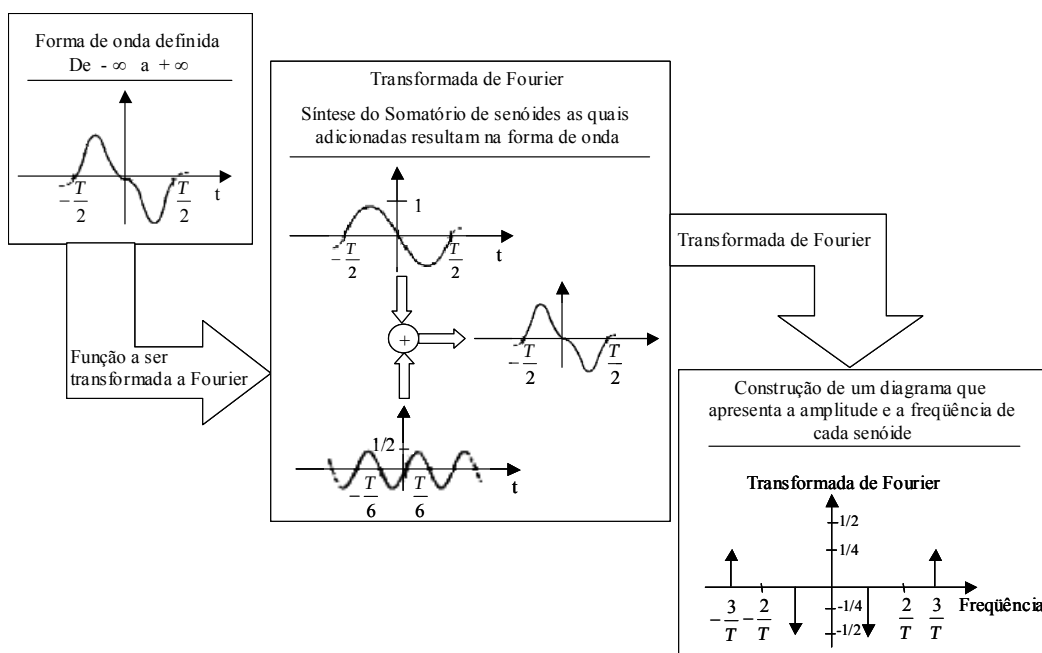


Figura 2.4 – Interpretação da Transformada de *Fourier* [BRIGHAM, 1988].

Como apresentado, o diagrama da Transformada de *Fourier* apresenta a amplitude e a frequência de cada senóide. Segue-se a convenção usual e apresentação da senóide de frequência positiva e negativa para cada frequência; a amplitude é dividida ao meio do modo devido. Assim, a Transformada de *Fourier* decompõem a forma de onda dada, dentro de seus dois componentes senoidais individuais.

A Transformada de *Fourier* identifica ou distingue as diferentes frequências de senóides e suas respectivas amplitudes que se combinam para formar uma forma de onda arbitrária. Matematicamente, esta relação é declarada como:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.17)$$

Sendo que $s(t)$ é a forma de onda a ser decomposta dentro de uma soma de senóides, $S(f)$ é a Transformada de *Fourier* de $s(t)$, e $j = \sqrt{-1}$. Um exemplo de Transformada de *Fourier* de uma função onda quadrada é mostrada na Figura 2.5 (a). Uma justificativa intuitiva de uma forma de onda quadrada pode ser decomposta dentro de um grupo de senóides determinados pela Transformada de *Fourier* é apresentada na Figura 2.5 (b). Normalmente associa-se a análise de cada função periódica como uma onda quadrada com séries de *Fourier* até a Transformada de *Fourier*. No entanto, as séries de *Fourier* são um caso especial de Transformada de *Fourier*:

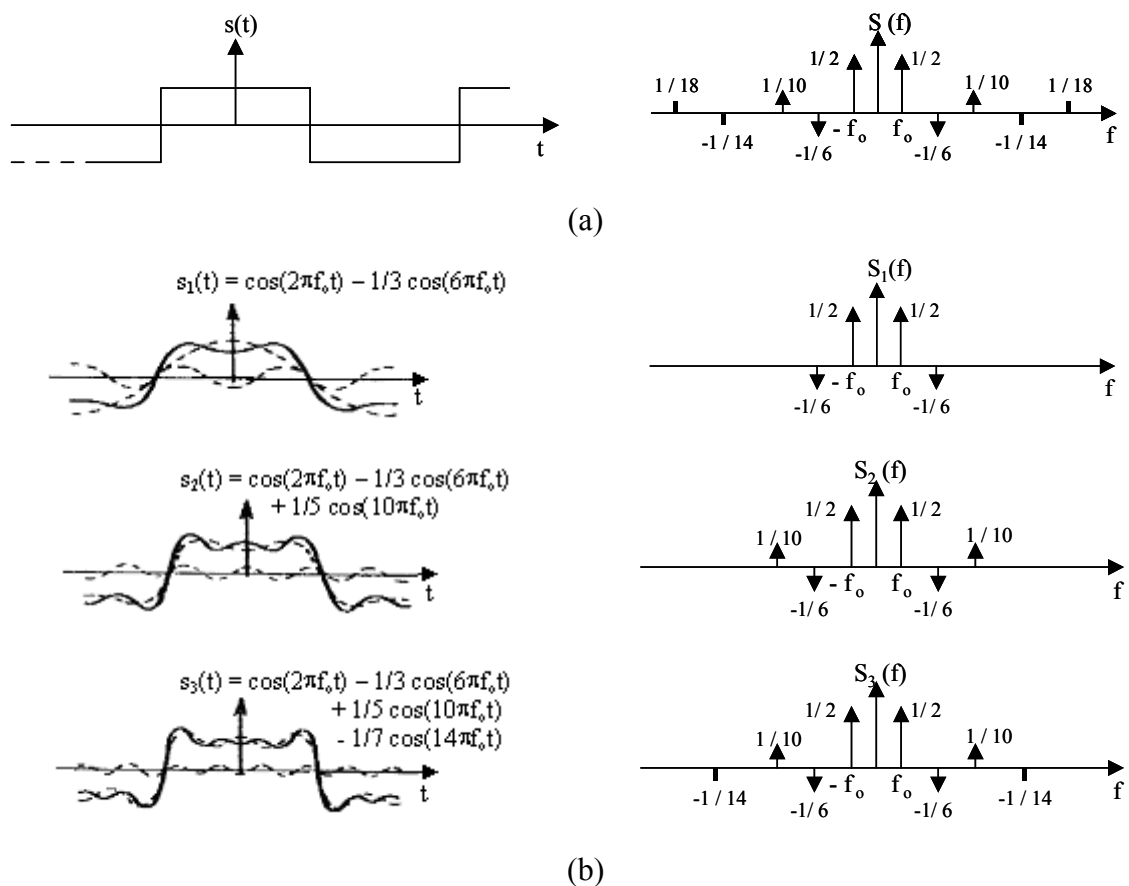


Figura 2.5 – Transformada de *Fourier* de uma forma de onda quadrada (BRIGHAM, 1988).

Se a forma de onda $s(t)$ não é periódica, então a Transformada de *Fourier* será uma função contínua de frequência, isto é, $s(t)$ é representada pelo somatório das senóides de todas as frequências. Para ilustrar, considere a forma de onda pulso e sua Transformada de *Fourier*, como apresentado na Figura 2.6. Neste exemplo, a Transformada de *Fourier* indica que a frequência senoidal torna-se indistinguível para a próxima e como resultado, todas as frequências devem ser consideradas.

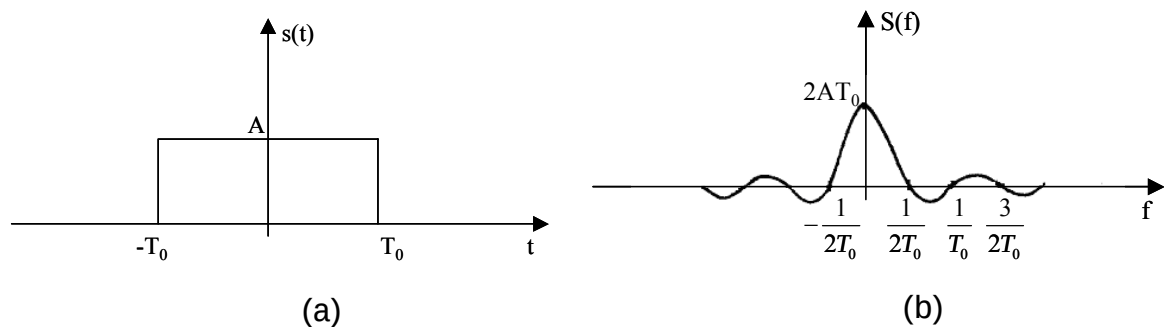


Figura 2.6 – Transformada de *Fourier* de uma forma de onda pulso (BRIGHAM, 1988).

A Transformada de *Fourier* é então uma representação da frequência dominante de uma função. Conforme apresentado acima nas Figuras 2.5 e 2.6, a Transformada de *Fourier* da frequência dominante contém exatamente a mesma informação que a função original, uma vez que elas diferem apenas na maneira da representação. Análises de *Fourier* permitem examinar uma função por outro ponto de vista, o domínio da transformada. O método de análise da Transformada de *Fourier* empregado, como apresentado na Figura 2.4, é frequentemente a chave para a solução de muitos problemas relacionados a aquisição de sinais.

2.3.3.1) Teorema de Shannon's

Segundo o teorema de Shannon's, para evitar *aliasing* (sobreposição de forma de onda) deve-se amostrar a uma taxa duas vezes maior que a componente da frequência máxima no sinal que se deseja adquirir. Para uma dada taxa de amostras, a frequência máxima que pode ser representada exatamente, sem *aliasing*, é conhecida como a frequência *Nyquist* (f_N). A frequência *Nyquist* é a metade da frequência de amostragem (f_s). Sinais com componentes de frequência acima da frequência *Nyquist* apresentaram *aliased* entre os sinais de corrente direta e a frequência *Nyquist*. A frequência *alias* é o valor absoluto da diferença entre o sinal da frequência de amostragem multiplicado por um múltiplo inteiro da taxa de amostragem menos

o sinal de entrada (Manual *Labview*, 2000). As Figuras 2.7 e 2.8 ilustram este fenômeno: ao assumirmos uma frequência de amostragem de 100 Hz ($f_s = 100\text{Hz}$) e sinal de entrada contendo as seguintes frequências – 25Hz, 70Hz, 160Hz, e 510 Hz, conforme Figura 2.10.

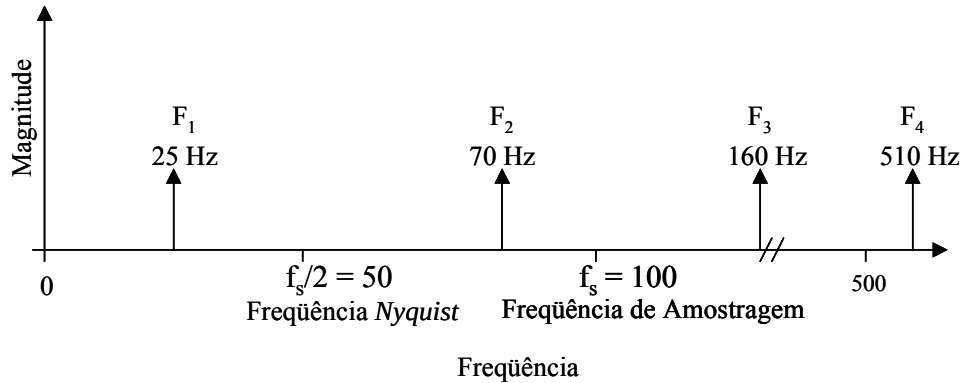


Figura 2.7 – Sinal atual dos componentes de frequência [Manual *Labview*, 2000].

Na Figura 2.8 pode ser observado que as frequências abaixo da frequência *Nyquist* ($f_N = f_s/2 = 50\text{ Hz}$) são mostradas corretamente. Já as frequências acima da frequência *Nyquist* apresentam *aliases*. Por exemplo, F_1 (25Hz) apresenta a frequência correta, mas F_2 (70Hz), F_3 (160Hz), e F_4 (510Hz) apresentam *aliases* de 30Hz, 40Hz, e 10Hz respectivamente. Para calcular a frequência *alias*, utiliza a seguinte equação:

$$\text{Frequência Alias} = |[(\text{múltiplo inteiro da } f_s) f_s - f_{\text{entrada}}]| \quad (2.18)$$

$$\text{Alias } F_2 = |100 - 70| = 30\text{ Hz}$$

$$\text{Alias } F_3 = |100(2) - 160| = 40\text{ Hz}$$

$$\text{Alias } F_4 = |100(5) - 510| = 10\text{ Hz}$$

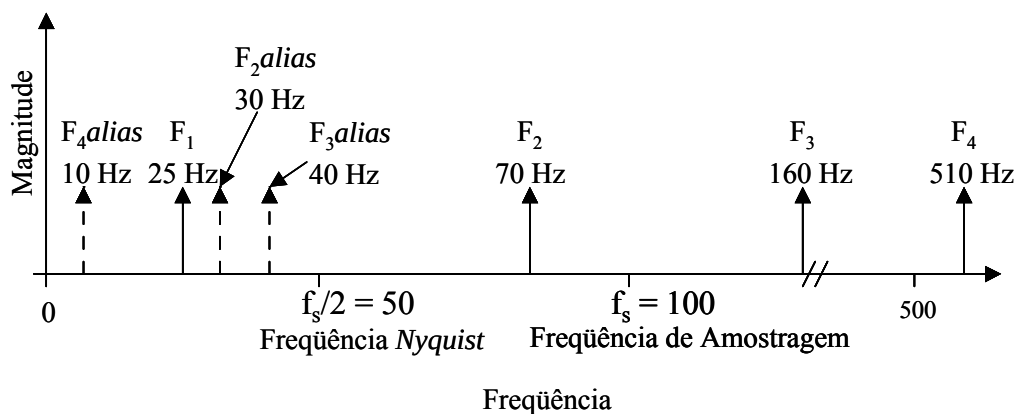


Figura 2.8 – Sinal dos Componentes de Frequência e *Aliased* [Manual *Labview*, 2000].

Em trabalho realizado por FREITAS *et al* (2000) para a identificação de regimes de escoamento em leito de jorro, a densidade espectral de potência para diferentes condições de regime de jorro estabelecido foi caracterizado por uma frequência dominante bem definida entre 5,0 e 7,0 Hz para as condições estudadas.

TARANTO (1996), estudou regimes de operação em leitos de jorro bidimensional, usando a técnica de FFT, com o objetivo de desenvolver um método para o monitoramento contínuo do regime de operação em leitos de jorro. Com o uso de uma frequência de amostragem de 100 Hz e um número de pontos de aproximadamente 1100 pontos por amostra, foi possível a identificação de regimes de escoamento tais com: leito fixo, jorro estável e *slugging*.

SILVA *et al* (1999), estudaram uma metodologia para identificar a estabilidade do regime fluidodinâmico do leito de jorro cone-cilíndrico, através de medidas de queda de pressão em tempo real usando FFT. Segundo os estudos, a técnica da transformada da Fourier aplicada às flutuações da queda pressão no leito de jorro, permitiram a identificação de regimes de leito fixo, jorro estável e *slugging*.

FREITAS *et al* (2000), estudaram o monitoramento de leito de jorro bidimensional carregado com esferas de vidro, através da flutuação de pressão, usando ferramentas estatísticas, do Caos e FFT para identificar regimes de escoamento. Os pesquisadores concluíram que o uso da técnica de FFT aplicada às flutuações de pressão no leito de jorro podem ser usadas satisfatoriamente para diagnosticar os tipos de regime de escoamento em leitos onde a observação visual não seja possível.

2.4- Técnica de Fluidodinâmica Computacional

A análise numérica é um ramo da matemática que estuda e desenvolve métodos numéricos aplicados na solução de problemas, geralmente complexos e sem solução analítica, na ciência e engenharia. Considerado um importante e promissor ramo de pesquisa teve seu avanço a partir de 1946, culminando com a era dos computadores. Embora seja uma área da matemática, a análise numérica sempre será fortemente dependente do desenvolvimento da tecnologia e da ciência computacional.

As soluções de problemas práticos em dinâmica dos fluidos eram, antes do surgimento dos computadores, de exclusividade da pesquisa experimental, que através de observações em laboratórios estudavam situações próximas da realidade. Por outro lado, os pesquisadores teóricos, se restringiam à resolução de problemas bem formulados e bastante simplificados,

geralmente fazendo uso de modelos analíticos. Com o advento dos computadores e a intensificação da pesquisa na área da análise numérica, surgiu um segmento direcionado ao estudo da dinâmica dos fluidos que atualmente é conhecida como Dinâmica de Fluido Computacional, ou CFD (**Computational Fluid Dynamics**). A simulação de escoamentos em torno de perfis aerodinâmicos, a simulação de escoamento com reações químicas, ou, ainda, a simulações de sistemas multifásicos, são algumas das importantes aplicações da análise numérica computacional.

A indústria aerodinâmica foi a principal impulsionadora dos estudos e do avanço da fluidodinâmica computacional e, por exemplo, a solução do escoamento turbulento supersônico sobre um aerofólio que na década de 60 consumiria um tempo de computação de aproximadamente 30 anos a um custo de 10 milhões de dólares, usando computadores do tipo IBM 704, nos dias de hoje, utilizando os computadores atuais, não iriam requerer mais do que minutos de CPU com custo de centenas de dólares (MALISKA, 1995).

O avanço na capacidade de processamento e armazenamento de dados dos computadores proporcionou um grande avanço na geração de “softwares” de CFD comerciais.

Mais que simples resolvedores de sistemas de equações, os pacotes de CFD comerciais são códigos que permitem a geração de malhas, o controle e acompanhamento da solução ao longo das iterações, além de disponibilizarem um display de resultados com alta capacidade gráfica para geração dos resultados, tendo como uma de suas principais vantagens, a rápida geração de resultados para sistemas simples (geometria simples, uma única fase e 2D).

A maior parte dos códigos CFD comerciais usam a metodologia de volumes finitos, na qual equações governantes são discretizadas na forma de um volume integral. Estes códigos possuem diferentes esquemas de interpolação e métodos de discretização que podem ser adotados conforme exigência de estabilidade ou outros critérios que o usuário julgue importantes.

A simulação em CFD é uma importante ferramenta capaz de fornecer detalhes sobre fenômenos de turbulência e a cerca do escoamento no interior de leitos; logo, esta técnica tem sido cada vez mais adotada no estudo de perfis de escoamentos bifásicos gás-partícula. No entanto, a aplicação em sistemas mais densos, como o leito de jorro, tem sido pouco explorada (DUARTE, 2005).

2.4.1 – Revisão do modelo matemático utilizado nas simulações (CFD)

DUARTE (2005), propõe um tratamento Euleriano para cada fase, onde as fases estudadas foram: gasosa e sólida. O modelo Euleriano multifásico, descrito a seguir, permite a modelagem matemática de diversas fases levando em consideração a interação entre as mesmas.

O desenvolvimento das equações de conservação pode ser feito utilizando um balanço médio local instantâneo para cada fase. A fração de volume para a fase sólida α_s é calculada a partir da equação da continuidade:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \vec{v}_s) = 0 \quad (2.19)$$

onde: $\vec{v}_s$ é a velocidade da fase sólida s

$\vec{v}_f$ é a velocidade da fase fluida f .

O termo α_f representa a fração de volume da fase fluida. O volume da fase fluida, V_f , é definido por:

$$V_f = \int_V \alpha_f dV \quad (2.20)$$

A solução da Equação 2.19 para a fase dispersa (fase sólida), considerando a condição de que a soma das frações volumétricas é igual a um, permite calcular a fração volumétrica da fase primaria (fase fluida). Este tratamento é comum para escoamentos fluido-fluido e escoamentos granulares (usado neste trabalho).

A conservação de *momentum* para a fase sólida s é:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = & -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_s + \\ & \alpha_s \rho_s \vec{g} + K_{fs} (\vec{v}_f - \vec{v}_s) \end{aligned} \quad (2.21)$$

onde:

- $\vec{g}$: Aceleração devido a gravidade;
 $\vec{\tau}_s$: Tensor tensão de sólidos;
 $\vec{v}_s$: Velocidade da fase sólida s ;
 ρ_s : densidade do sólido;
 $K_{fs}=K_{sf}$: Coeficiente de troca de momentum entre a fase fluida f e a fase sólida s ;
 p : Pressão total incluindo todas as fases
 p_s : Pressão de sólido.

O coeficiente de troca fluido-sólido K_{sf} pode ser escrito na seguinte forma geral:

$$K_{sf} = \frac{\alpha_s \rho_s f_d}{\tau_s} \quad (2.22)$$

onde: f_d é a força de arraste e τ_s “o tempo de relaxação da partícula”, o qual é definido como:

$$\tau_s = \frac{\rho_s d_s^2}{18\mu_f} \quad (2.23)$$

onde: d_s é o diâmetro das partículas e μ_f é a viscosidade da fase fluida.

A definição de f_d inclui o coeficiente de arraste (C_D) que é baseado no número de Reynolds relativo (Re_s). Neste trabalho foi usado o modelo de GIDASPOW *et al.* (1992), o qual é uma combinação dos modelos de WEN; YU (1966) e de ERGUN (1952).

O coeficiente de troca fluido-partícula K_{fs} é da seguinte forma para $\alpha_f > 0,8$:

$$K_{fs} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_f \rho_f |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{d_s} \alpha_f^{-2.65} \quad (2.24)$$

onde:

$$C_D = \frac{24}{\alpha_f \text{Re}_s} \left[1 + 0,15 (\alpha_f \text{Re}_s)^{0,687} \right] \quad (2.25)$$

quando $\alpha_f \leq 0,8$

$$K_{fs} = 150 \frac{\alpha_s (1 - \alpha_f) \mu_f}{\alpha_f d_s^2} + 1,75 \frac{\rho_f \alpha_s |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{d_s} \quad (2.26)$$

A pressão de sólidos na Equação 2.21 é obtida segundo a Equação 2.27.

$$p_s = \alpha_s \rho_s \Theta_s + 2 \rho_s (1 + e_{ss}) \alpha_s^2 g_{0,ss} \Theta_s \quad (2.27)$$

onde:

$g_{0,ss}$: a função distribuição radial (OGAWA *et al.*, 1980);

Θ_s : temperatura granular a qual é proporcional à energia cinética das partículas (DING; GIDASPOW, 1990);

e_{ss} : coeficiente de restituição elástica. Neste trabalho foi adotado o valor de *default* indicado para sistemas granulares $e_{ss} = 0,9$.

A função de distribuição radial é um fator de correção que modifica a probabilidade de colisões entre grãos quando a fase granular ficar densa. Esta função também pode ser interpretada como a distância adimensional entre esferas:

$$g_{0,ss} = \frac{D_s + d_s}{D_s} \quad (2.28)$$

Onde D_s é a distância entre as partículas. Esta distância não é constante nas várias posições do leito, porque a porosidade do leito também é variável.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido na Unidade Avançada de pesquisa da FEQUI/UFU, mais especificamente, laboratório de monitoramento em leito de jorro, destinada a abrigar a unidade experimental. A seguir, uma descrição dos materiais, equipamentos e metodologia experimental utilizada no desenvolvimento desse trabalho.

3.1 – Material

O estudo experimental foi realizado com dois materiais diferentes: sementes de soja e sementes de algodão, como mostradas nas Figuras 3.1. e 3.2.



Figura 3.1: Sementes de soja.



Figura 3.2: Sementes de Algodão.

As sementes de algodão, foram gentilmente cedidas pela empresa Cotton Tecnologia em Sementes LTDA ao programa de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Química e as sementes de soja foram cedidas pelo grupo Algar A&P.

Para a caracterização dos materiais foram obtidos dados como: densidade da partícula (ρ_s), diâmetro característico: (diâmetro da esfera de igual volume, d_p), esfericidade (ϕ) e porosidade do leito fixo (ε).

A Tabela 3.1 apresenta as características dos sólidos utilizados na realização dos experimentos propostos para o desenvolvimento deste trabalho.

Tabela 3.1: Propriedades dos Materiais

PROPRIEDADES	MATERIAL	VALOR OBSERVADO	MÉTODO
ρ_s (g/cm ³)	Soja	1,173	Picnometria com álcool etílico
	Algodão	1,155	
d_p (cm)	Soja	0,60	Picnometria
	Algodão	0,57	
ϕ	Soja	0,98	Razão do diâmetro inscrito e o diâmetro circunscrito na área projetada da partícula num plano estável. Análise de imagem.
	Algodão	0,51	
ε	Soja	0,37	Obtida através da fração volumétrica de espaços vazios interpartícula, quando o material está na condição de leito fixo.
	Algodão	0,38	

Todas as medidas de caracterização das partículas apresentadas na Tabela 3.1 são bastante utilizadas na literatura e não cabem maiores comentários nessa dissertação. Entretanto, a seguir será feito uma breve descrição da metodologia utilizada na medida da esfericidade por meio de análise de imagem.

Para a medida da esfericidade da partícula foram selecionadas, aleatoriamente, partículas dos materiais estudados e através da utilização da técnica de análise de imagem, foi obtida a esfericidade do material. O material foi colocado em contraste com uma fonte luminosa, juntamente com um corpo padrão (esférico), para posterior caracterização do material, como mostrada a seguir:

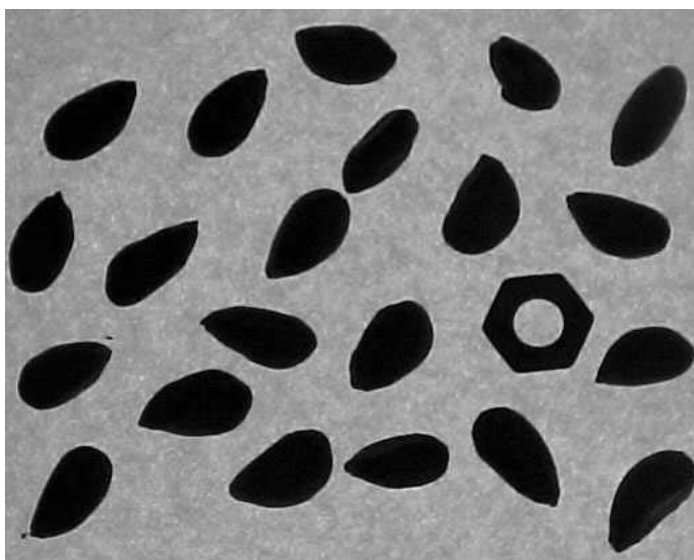


Figura 3.3: Imagem da Semente de Algodão e do corpo padrão.

A Partir da figura projetada foi possível, com a definição descrita por MOHSENIN (1970), calcular a esfericidade do material como uma relação entre o diâmetro do círculo inscrito e o diâmetro do círculo circunscrito, através da utilização do software de análise de imagem *Global Lab^R*.

O desenvolvimento no software se deu da seguinte forma: depois de selecionada a partícula, criou-se uma célula em torno da mesma e o *software* calculou a área que a partícula ocupava na célula. A seguir, determinou-se o centro da superfície, gerando-se um círculo inscrito e um círculo circunscrito de tal forma que os mesmos tangenciassem a partícula. A partir daí obteve-se dois pontos que interceptavam a superfície do círculo inscrito passando pelo centro do mesmo, obtendo-se assim o diâmetro inscrito. O mesmo se fez para o diâmetro circunscrito e a relação entre os diâmetros encontrados forneceu a esfericidade do material.

De acordo com MOHSENIN (1970), a partícula se comporta como um elipsóide triaxial e a esfericidade pode ser determinada por:

$$\phi = \frac{d_i}{d_c} \quad (3.1)$$

em que:

d_i : diâmetro do maior círculo inscrito;

d_c : diâmetro do menor círculo circunscrito.

3.2- Sistema experimental

Para o desenvolvimento desse trabalho, tornou-se necessário a montagem da unidade experimental composta dos seguintes equipamentos:

(1) Um compressor centrífugo da marca Ibram com 7,5 cv, 3500 rpm e 60 Hz que impulsiona o ar para o sistema;

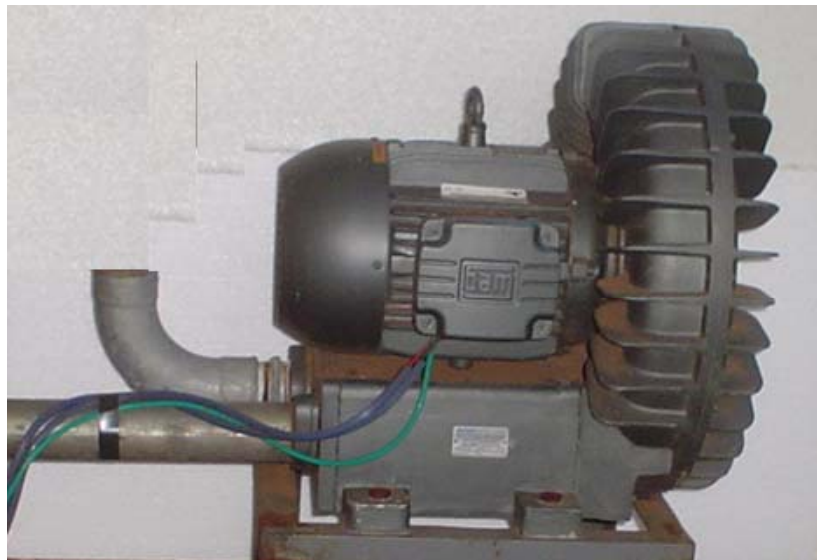


Figura 3.4 – Compressor centrífugo.

(2) Duas válvulas tipo gaveta. Uma válvula primária instalada após a saída do compressor em um sistema de *bypass* para regular a vazão de ar e outra, secundária, instalada na linha de admissão de ar ao leito, para um maior controle sobre a vazão do fluido;



Figura 3.5 – Válvula gaveta.

- (3) Tubulação de aço galvanizado com 50,8 mm de diâmetro e, aproximadamente, 3000 mm de comprimento, uma curva em 90°, uma luva de união e uma conexão T, todos em aço galvanizado de 2”;
- (4) Um leito de jorro do tipo cone-cilíndrico, construído em aço inoxidável, com visor de vidro (ao longo da parte cilíndrica) que permite observar o andamento dos experimentos.



Figura 3.6 – Leito de jorro.

As dimensões características do leito de jorro utilizado neste trabalho, estão apresentadas na Tabela 3.2;

Tabela 3.2 – Características do Leito

Características do leito	
Altura da base cônica	150 mm
Altura do corpo cilíndrico	700 mm
Diâmetro de entrada do ar (D_i)	35 mm
Diâmetro do corpo cilíndrico(D_c)	210 mm
Relação D_c / D_i	6
Ângulo da base cônica	60°

(5) Um termoanemômetro de fio quenteda marca VelociCalc TSI, modelo 8357 com faixa de operação de 0 à 25 m/s, foi instalado a 600mm antes da curva em 90° para a coleta dos dados de velocidade e temperatura do ar na linha como mostra a Figura 3.7;

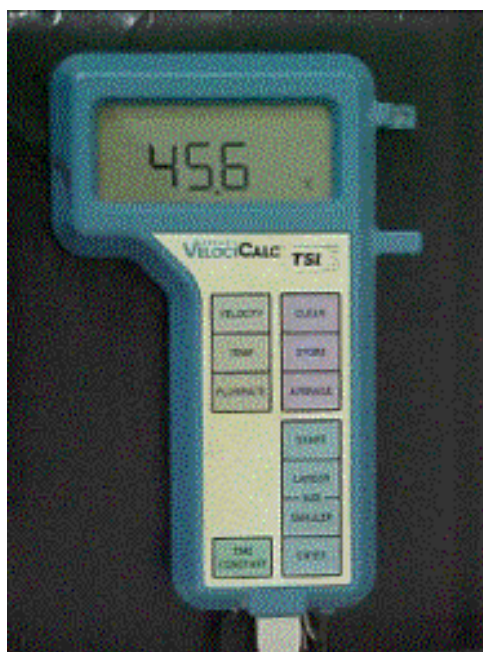


Figura 3.7 – Termoanemômetro de fio quente.

(6) Sistema de aquisição de dados que é composto por:

(6.1) Um transdutor de pressão da marca *DRUCK INCORPORATED* - PTX500, com faixa de escala de 0 a 1 psig, instalado na base cônica do leito, logo acima da entrada de ar mostrado na Figura 3.8;



Figura 3.8 – Transdutor de pressão.

(6.2) O bloco conector marca *NATIONAL INSTRUMENTS* – CB-68LP, faz a conexão entre os sinais emitidos pelo transdutor de pressão e a placa de aquisição de dados A/D (analógico-digital) apresentado na Figura 3.9;

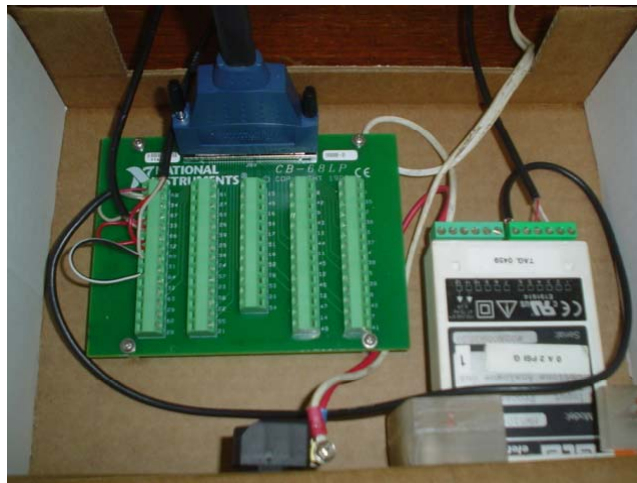


Figura 3.9 – Bloco conector.

(6.3) Na Figura 3.10 tem-se a placa de aquisição de dados marca *NATIONAL INSTRUMENTS* – PCI-6021E com 16 entradas analógicas, converte os sinais do transdutor de pressão para a forma digital.

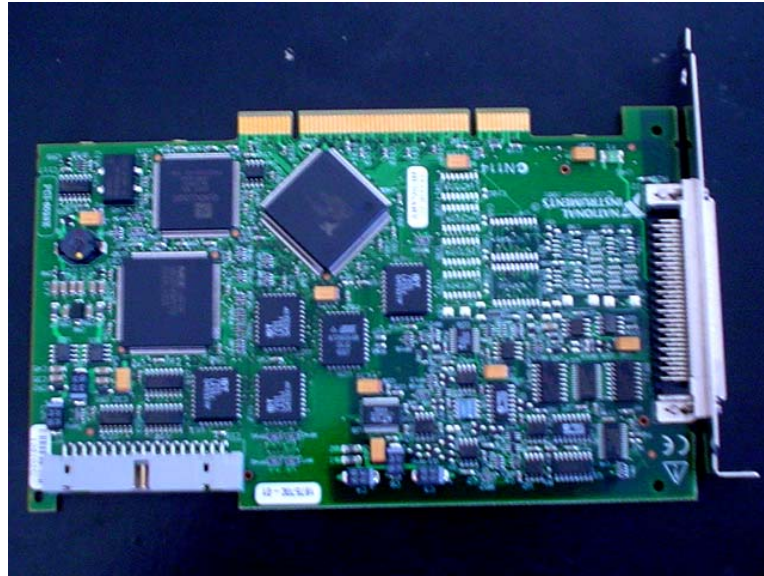


Figura 3.10 – Placa de aquisição de dados.

(6.4) Os sinais digitais foram processados e analisados num microcomputador, como mostra a Figura 3.11, com o auxílio do *software* LabVIEWTM, versão 7.1, escolhido para ajustar a frequência de coleta do sinal de pressão no leito.

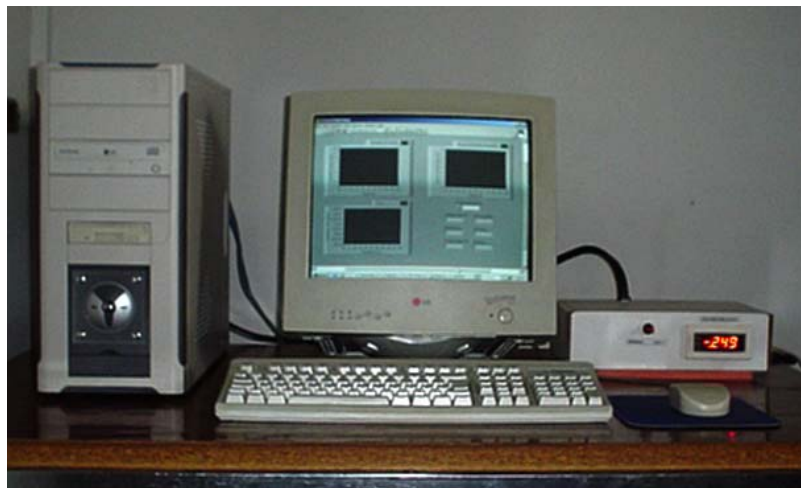


Figura 3.11 – Computador.

A Figura 3.12 ilustra de forma detalhada a unidade experimental que foi construída para o desenvolvimento deste trabalho, seguindo a ordem da numeração utilizada na descrição de cada componente, visto anteriormente.

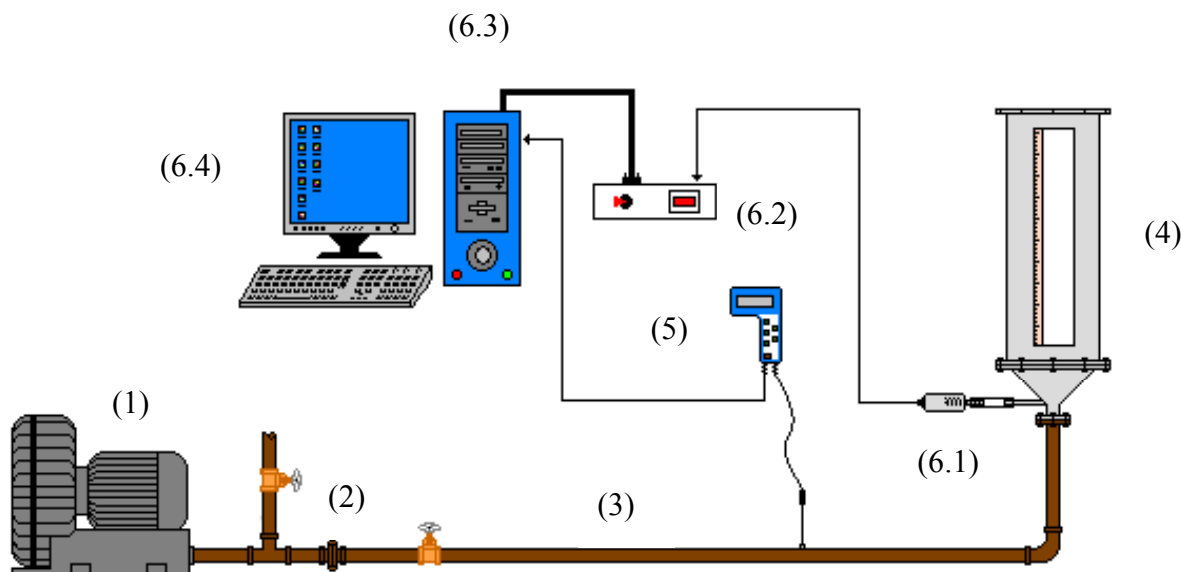


Figura 3.12 – Esquema da unidade experimental.

3.3 - Procedimento Experimental

Inicialmente, como forma de reconhecimento do protótipo montado, os testes experimentais foram conduzidos com a finalidade de determinar a capacidade real de trabalho do equipamento. Posteriormente os ensaios foram desenvolvidos para inferir os regimes predominantes de contato gás-partícula durante os experimentos.

O seguinte procedimento experimental aplicado neste trabalho apresenta as seguintes etapas:

a) Material

Antes de iniciar o ensaio experimental definiu-se primeiramente a altura do leito fixo a ser trabalhado. Foram definidas quatro alturas diferentes para os dois materiais utilizados neste estudo, são elas: $H_o = 15, 19, 22$ e 25 cm. Uma vez definida as alturas, definiu-se a massa equivalente da carga do material, para cada altura.

b) Acionamento do compressor

Como a unidade não era dotada de sistema de controle de temperatura, então optou-se por determinar um tempo de estabilização da temperatura na linha. Logo, antes do início das corridas experimentais, ligava-se o compressor centrífugo por cerca de 60 minutos para que o sistema estabilizasse termicamente.

c) Acionamento do term oanemômetro

Primeiramente deixava-se o sistema operando por alguns minutos para que o mesmo estabilizasse. O term oanemômetro era acionado pouco tempo depois da partida do compressor para monitorar a estabilização da temperatura a uma velocidade pré-fixada em, aproximadamente, 4 m/s. A seguir o equipamento era utilizado para verificar a velocidade de operação do sistema durante os ensaios.

d) Acionamento do sistema de aquisição

Após a realização das etapas apresentadas anteriormente ligou-se o sistema de aquisição de dados (transmissores de pressão, manômetros digitais e o micro-computador) para dar início ao teste experimental. Decidiu-se trabalhar com uma frequência de amostragem igual a 100 pontos por segundo. O número de pontos (N) adotados foi de 1024 pontos, equivalente a 2^{10} ($N=2^\gamma$, onde $\gamma = 10$).

e) Procedimento de coleta de dados

O procedimento adotado para aquisição de dados foi o seguinte: primeiramente era escolhido o intervalo de coleta de dados. Uma vez atingido a condição desejada, esperava-se aproximadamente 30 segundos para garantir que nenhuma perturbação, como, por exemplo, as de manobra da válvula, não prejudicasse a leitura dos dados para então alterar a condição para uma nova aquisição. Para os dados de velocidade e temperatura foram escolhidas quatro posições ao longo da seção transversal do duto para se fazer as medidas. Em cada ponto de medida, três valores foram coletados e em seguida era retirado um valor médio representativo da velocidade e da temperatura naquela condição de coleta.

Paralelamente com as medidas do term oanemômetro eram coletados os dados no transdutor de pressão, como mencionado acima, a uma taxa de coleta de 100 pontos por segundo e um número de pontos igual a 1024 pontos por amostra, num intervalo de tempo de aproximadamente 10 segundos. Para o estudo de identificação dos regimes no leito foi utilizada uma análise com Transformada de Fourier dos dados adquiridos. O *software LabVIEW*, versão 7.1, permitiu a leitura e interpretação de todos os sinais recebidos pela placa de aquisição de dados permitindo ainda, um gerenciamento desses dados através de tratamentos matemáticos e estatísticos e armazenamento de resultados em arquivos. Cada experimento possibilitou a determinação do espectro de potência, desvio padrão, *Skewness* e a

pressão estática para cada tipo de regime ou padrão de operação no leito de jorro, utilizando-se uma rotina de FFT (*Fast Fourier Transform*). Por fim, todos esses resultados experimentais foram comparados com simulações numéricas utilizando-se técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD), realizadas em um *software FLUENT 6.1.18*.

3.4 – Execução Numérica

Como dito anteriormente as simulações numéricas foram realizadas através do software comercial *FLUENT 6.1.18*.

3.4.1 – A Malha Computacional

A malha adotada neste trabalho pode ser observada na Figura 3.12. Na parte cônica foram adotadas malhas não estruturadas com células triangulares, enquanto que na parte cilíndrica foram adotadas malhas estruturadas, com células retangulares. As malhas usadas no desenvolvimento deste trabalho tiveram em média 8400 células.

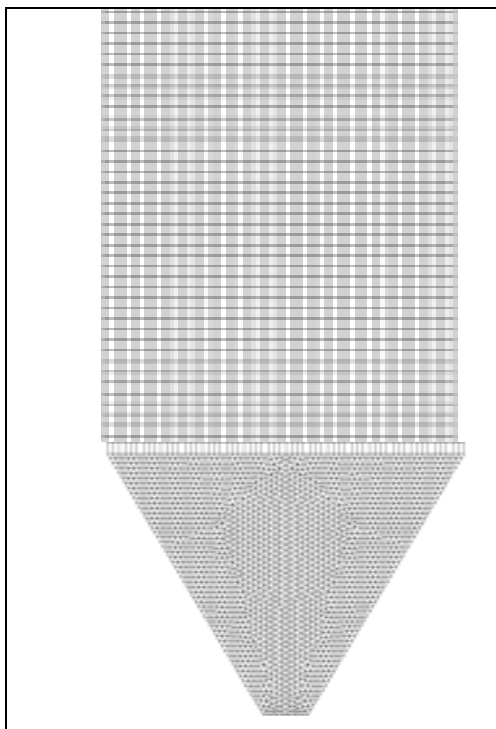


Figura 3.12: Malha típica adotada

O tamanho das células foi fixado em 10% acima do tamanho da partícula estudada. Esta é uma importante característica destas malhas e se deve ao fato de que a célula deve ser suficientemente grande para acomodar uma partícula em seu interior.

3.4.2 – Considerações sobre o modelo matemático

Neste trabalho foi usado um modelo multifásico Euleriano, no qual as diferentes fases foram tratadas matematicamente como interpenetradamente contínuas. As frações volumétricas foram assumidas como sendo funções contínuas do espaço e tempo e sua soma igual a um. Este modelo multifásico foi resolvido no código de fluidodinâmica computacional (CFD) *Fluent*[®] 6.1.18 que possui capacidade para resolver n equações da continuidade e de momentum para cada fase. O acoplamento foi obtido através da pressão e coeficientes de troca na interface. O equacionamento desse modelo foi apresentado na Seção 2.4.1 (DUARTE, 2004). O leito de jorro foi modelado assumindo um eixo de simetria, uma vez que o esforço computacional é reduzido quando se trabalha com perfis simétricos nas equações básicas do escoamento.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo tratar-se-á dos resultados obtidos a partir da aquisição dos dados na unidade experimental, com o intuito de se utilizar um procedimento de identificação e monitoramento de regimes em leito de jorro, como descrito no capítulo anterior. Os resultados apresentados nesse capítulo compreendem a combinação dos dois materiais estudados (soja e algodão), com a respectiva altura do leito fixo adotadas. Os regimes abordados nesse trabalho foram o jorro estável, o leito fixo e a transição entre os mesmos.

Foram efetuadas aquisições de dados de flutuação de pressão em função do tempo, para os dois materiais nas quatro alturas escolhidas. Com os dados desses experimentos foram analisadas, através de gráficos, a variação das curvas características dos materiais para cada altura, a flutuação de pressão em função do tempo, a *skewness* e o desvio padrão em função da velocidade do ar adimensional.

Por fim, são comparados alguns resultados experimentais com as simulações realizadas pela técnica da fluidodinâmica computacional.

4.1 - Curva Característica

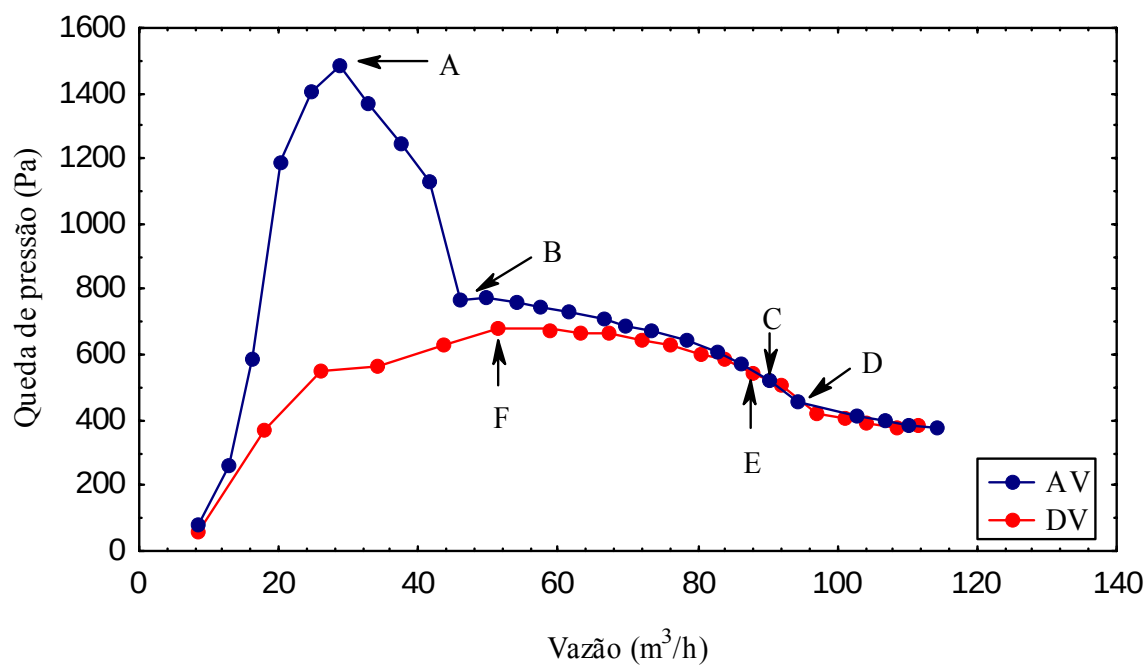
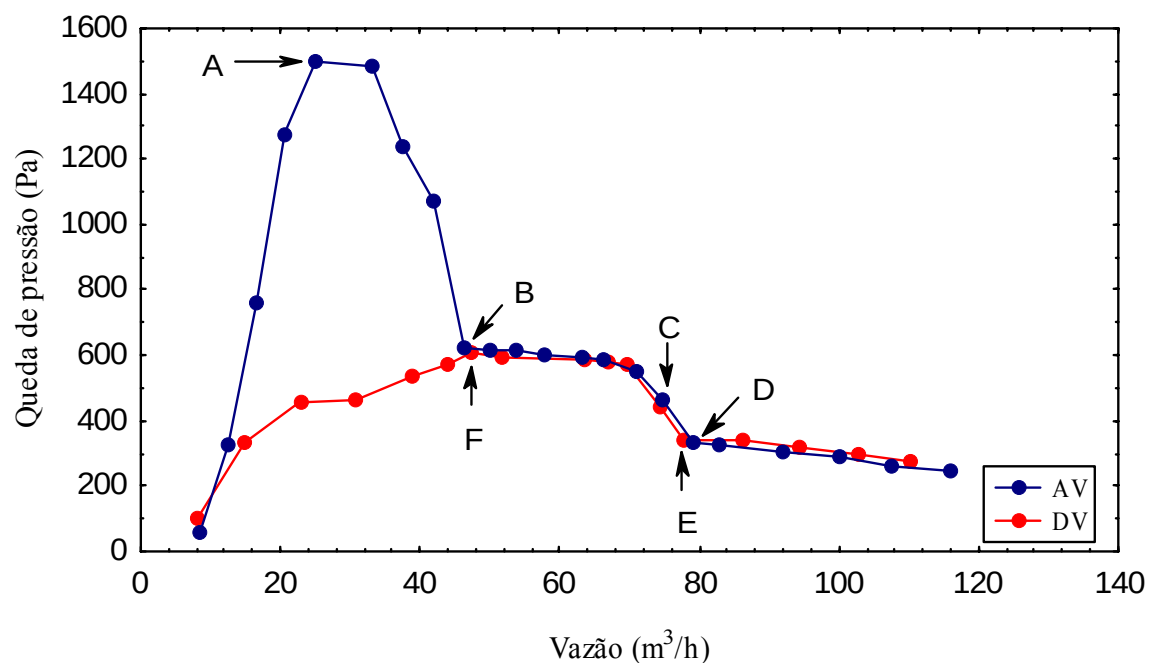
Através das observações feitas no decorrer dos experimentos, foi possível identificar, visualmente, as etapas do desenvolvimento de formação do jorro estabelecido. Esta identificação visual foi confrontada com os dados de queda de pressão no leito de jorro, obtidos no sistema de aquisição. Esses resultados puderam ser melhor visualizados através da curva característica do leito de jorro.

As curvas características obtidas experimentalmente para o algodão e soja, com uma altura de leito estático de 15cm, são apresentadas a seguir.

Inicialmente, como visto nas Figuras 4.1a e 4.1b, verificou-se que com pequenas vazões de ar o fluido apenas percolou entre as partículas e o sistema comportou-se como um leito fixo, até o ponto de perda de carga máxima, assinalado no gráfico como ponto A. A perda de carga máxima observada para os materiais estudados, em vazões crescentes, foi de 1496,2 Pa, para o algodão e de 1486,8 Pa, para soja, para o leito estático de 15cm de altura. A partir do ponto A, até o ponto B, iniciou-se a fase de expansão do leito, nesse momento ocorreu um

decréscimo da perda de carga, indicando que o fluxo de ar começou a vencer a força resistiva que as partículas, acima da entrada de ar, exerciam contra o movimento de deslocamento das mesmas. Visualmente, não foi possível observar a variação na altura do leito. Após o ponto B, com o aumento da vazão de ar, notou-se uma agitação maior das partículas na base do leito, caracterizando-se assim a formação de uma cavidade interna devido à ação do jato de ar, já suficiente para deslocar as partículas. Esta cavidade foi aumentando gradualmente dando origem a um canal preferencial central conhecido como jato interno, que se estendeu até o ponto de jorro incipiente, ficando na iminência de aflorar na superfície do leito (ponto C). A partir do ponto C, o canal interno foi rompido, propiciando a formação do jorro na superfície do leito, dando origem a região de fonte (ponto D). Desse ponto em diante, qualquer incremento na vazão de ar provocou, apenas, a elevação da altura da fonte e uma pequena diminuição da perda de carga.

No processo inverso, visto também, nas Figuras 4.1.1.a e 4.1.1.b, notou-se que com a redução da vazão de ar, o jorro manteve-se até o ponto E (jorro mínimo), onde foi observado a menor vazão de ar, com a qual se pôde verificar um jorro estável. Para altura de leito estático adotada, encontrou-se uma vazão de jorro mínimo da ordem de 87,89 m³/h, para a soja e 74,75 m³/h, para o algodão. As quedas de pressão de jorro mínimo assinaladas para o algodão e soja foram respectivamente 339,21 Pa e 543,57 Pa, e a altura de fonte observada nessa região foi de aproximadamente 2 à 3cm para soja e 3 à 4cm para o algodão. Reduzindo-se a vazão de ar chegou-se ao máximo ponto de queda de pressão (ponto F). Os valores de queda de pressão assinalados nessa região foram de 680,10 Pa e 604,91 Pa, para soja e algodão respectivamente. A partir do ponto F, a queda de pressão voltou a diminuir acompanhando a vazão de ar em um sistema de leito fixo.



4.1.1 – Curvas Características do decréscimo da vazão de ar no leito

Nas Figuras 4.1.1.a e 4.1.1.b, mostradas a seguir, apresenta-se as curvas características com os dados experimentais de vazões decrescentes, para as quatro alturas de leito estático estudadas neste trabalho. De uma forma geral, os resultados obtidos mantiveram-se dentro do esperado, ou seja, o comportamento qualitativo das curvas foi o mesmo, havendo apenas um deslocamento crescente entre as mesmas, proporcional à quantidade de material usada em cada altura de leito estático. Observou-se, também, que as curvas referentes as sementes de soja possuem um comportamento mais suave que as curvas referentes as sementes de algodão. Isto, provavelmente, ocorre em função de algumas diferenças entre os dois materiais, principalmente no que se refere à esfericidade e a rugosidade da partícula.

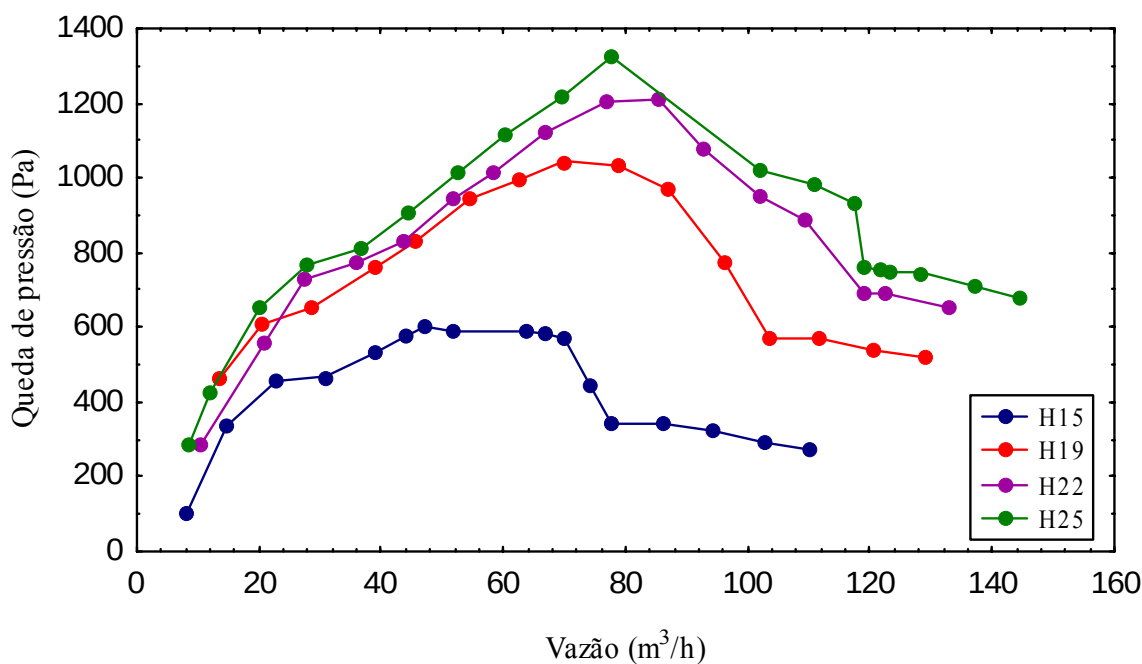


Fig.4.1.1a - Queda de pressão versus decréscimo da vazão de ar. Algodão

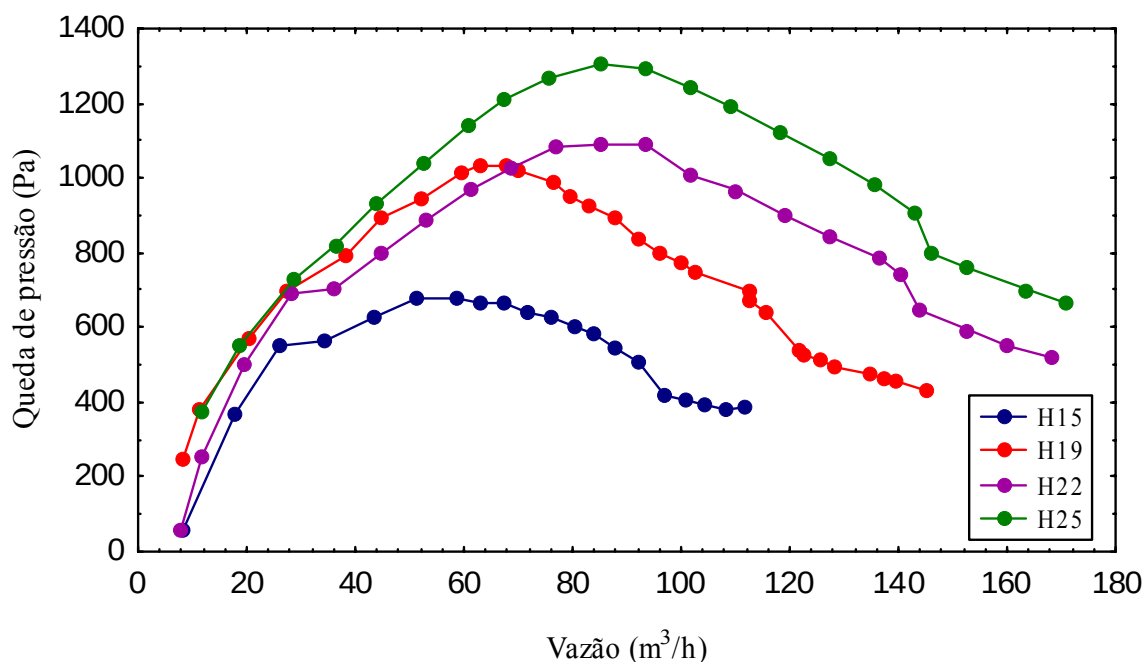


Fig.4.1.1 b - Queda de pressão versus decréscimo vazão de ar. Soja.

4.2 –Vazões de Jorro Mínimo

As tabelas a seguir mostram uma comparação entre vazões de jorro mínimo, obtidas experimentalmente e calculadas a partir da Equação 2.7 de MATHUR; GISHLER (1954).

No caso da Tabela 4.1, referente à semente de soja, o menor erro relativo foi obtido para um leito carregado com soja a uma altura de 25 cm (0,3%) e o maior para a altura de 15 cm com (18%).

Tabela 4.1- Comparação das vazões de jorro mínimo experimentais com as vazões pela Equação de MATHUR; GISHLER (1954) para as sementes de soja.

H ₀ Leito (m)	qjm (m³/h) Experimental	qjm (m³/h) MATHUR e GISHLER (1954)	Desvio relativo (%)
0,15	87,89	104,0	18,3
0,19	118,28	117,0	1,0
0,22	140,46	134,5	4,2
0,25	142,93	143,4	0,3
Desvio Médio (%)			5,9

Já no caso do algodão, apresentado na Tabela 4.2, o menor erro relativo foi obtido para um leito carregado com soja a uma altura de 19 cm (0,3%) e o maior para a altura de 25 cm com (8,3%).

A diferença entre o nível de proximidade entre os dados experimentais e a correlação empírica, para as diferentes alturas, pode ser devido à proximidade ou distanciamento dos dados em relação às condições utilizadas pelos autores da referida equação. Entretanto, o desvio médio para os dois materiais foi muito pequeno, indicando a boa previsão da velocidade de jorro mínimo por esta correlação.

Tabela 4.2- Comparação das vazões de jorro mínimo experimentais com as vazões pela Equação de MATHUR; GISHLER (1955) para as sementes de algodão

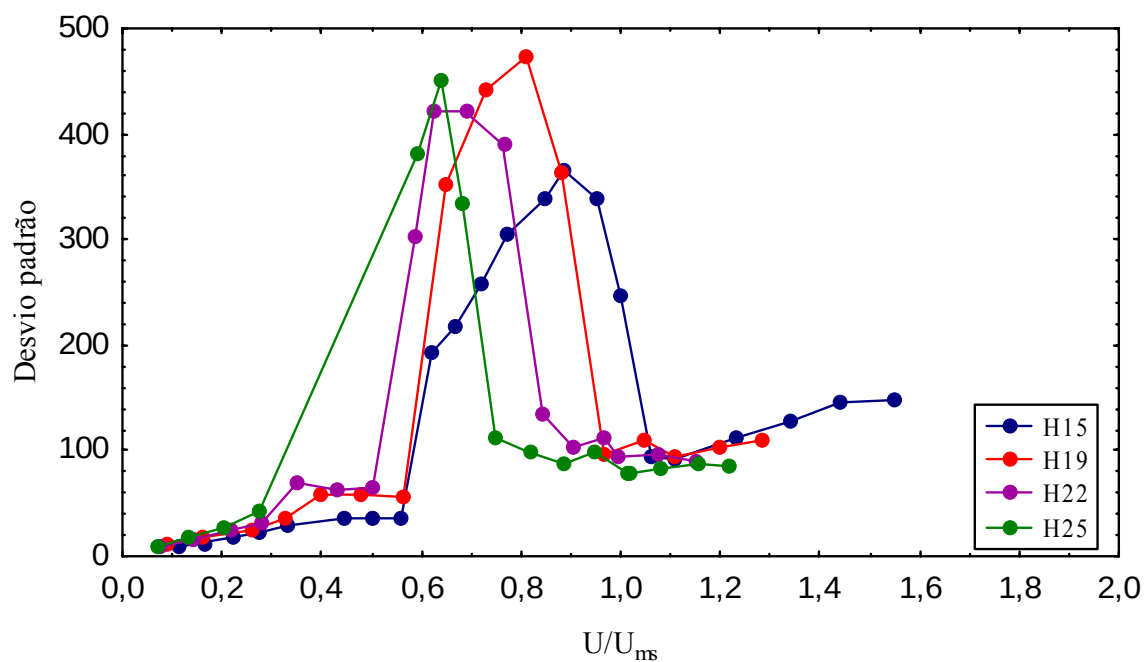
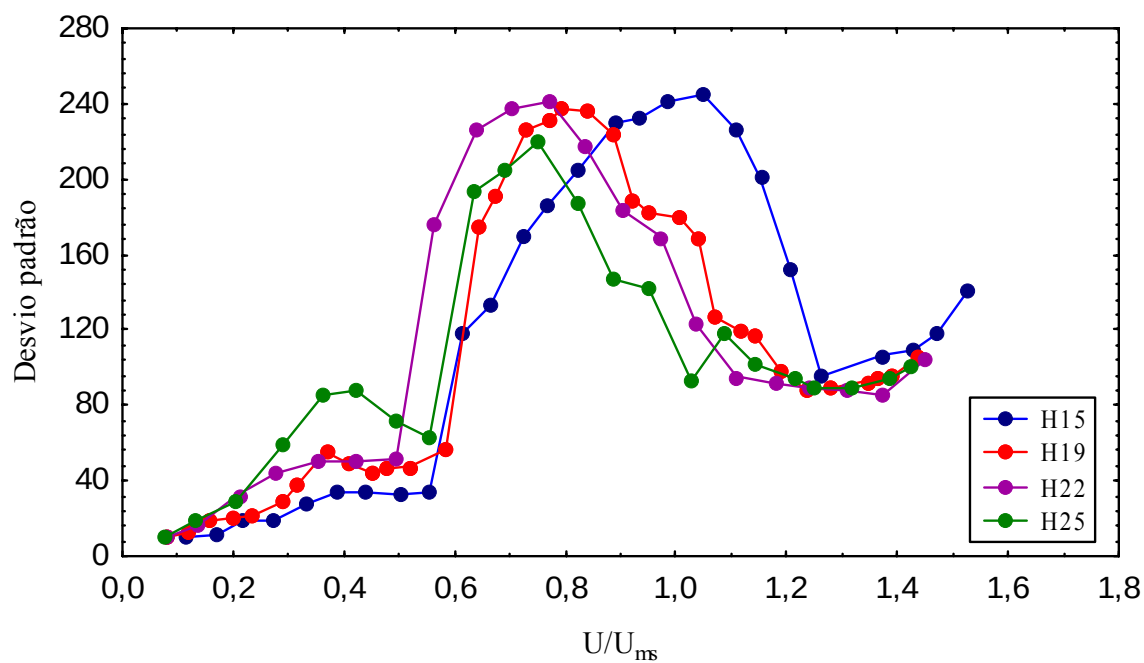
H_ Leito (m)	qjm (m ³ /h) Experimental	qjm (m ³ /h) MATHUR e GISHLER	Desvio relativo (%)
0,15	74,75	72,8	2,6
0,19	115,82	115,5	0,3
0,22	119,11	124,3	4,5
0,25	122,39	132,45	8,3
Desvio Médio (%)			3,9

4.3 – Comparação do desvio padrão do sinal de pressão

Uma possibilidade de se obter um monitoramento dos possíveis regimes de um leito de jorro, se pauta na utilização do desvio padrão das flutuações de pressão, coletadas durante os experimentos. A partir dos desvios coletados foi possível realizar as seguintes observações.

4.3.1 – Comparação do desvio padrão da pressão em função do aumento da vazão de ar

Como pode ser visto nas figuras a seguir, à medida que ocorre o aumento da velocidade do ar, há, também, um ligeiro aumento do desvio padrão até o ponto equivalente à perda de carga máxima. A partir desse ponto ocorre uma breve diminuição do desvio padrão, para, a seguir, ocorrer um drástico aumento deste, referente a primeira parte da expansão do leito. Quando percebe-se a formação da cavidade e em seguida o jato interno, o desvio padrão volta a diminuir, passando pela região de jorro mínimo para em seguida estabilizar num patamar correspondente ao jorro estabelecido.

Figura 4.3.1.a –Desvio padrão *versus* velocidade crescente do ar. AlgodãoFigura 4.3.1.b–Desvio padrão *versus* velocidade crescente do ar. Soja

4.3.2 – Comparação do Desvio Padrão de pressão em função da diminuição da vazão de ar

No caso das medidas feitas com vazões de ar decrescentes, observa-se a partir do patamar correspondente ao jorro estabelecido, que à medida que ocorre a diminuição da velocidade do ar, os valores do desvio padrão tendem a aumentar, mostrando que o leito passou de uma condição de jorro estabelecido, para a formação da cavidade interna, diminuindo em seguida devido ao desaparecimento gradual dessa cavidade. Esse comportamento pôde ser observado, também, durante as análises dos espectros de potência das flutuações de pressão, que serão comentados mais adiante.

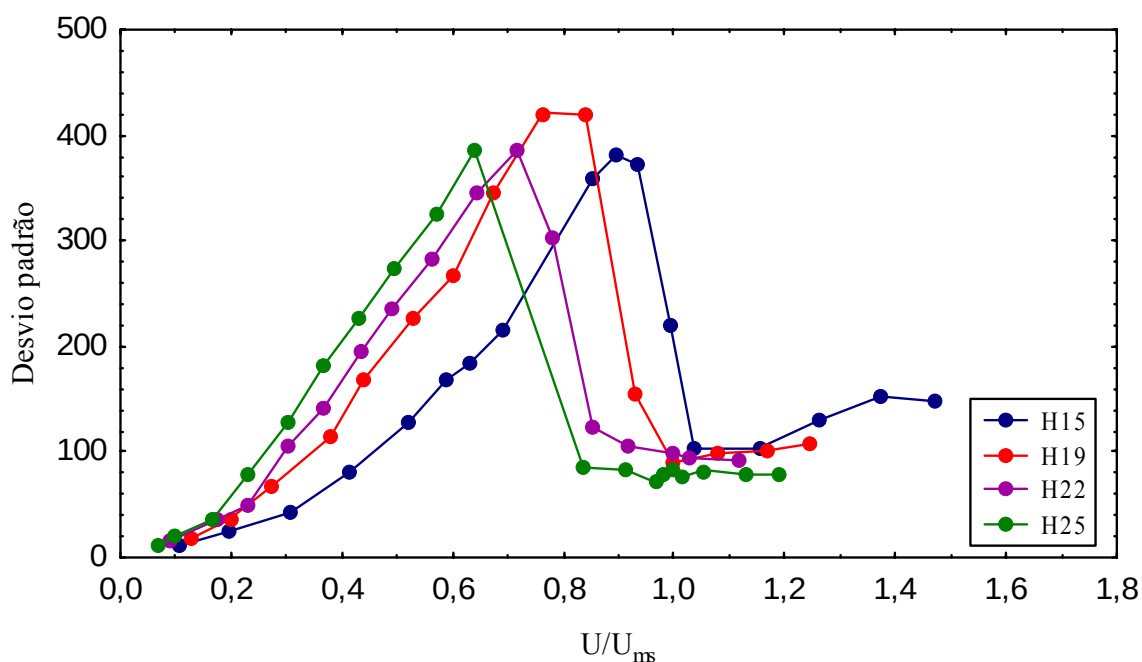


Figura 4.3.2.a –Desvio padrão *versus* velocidade decrescente do ar. Algodão.

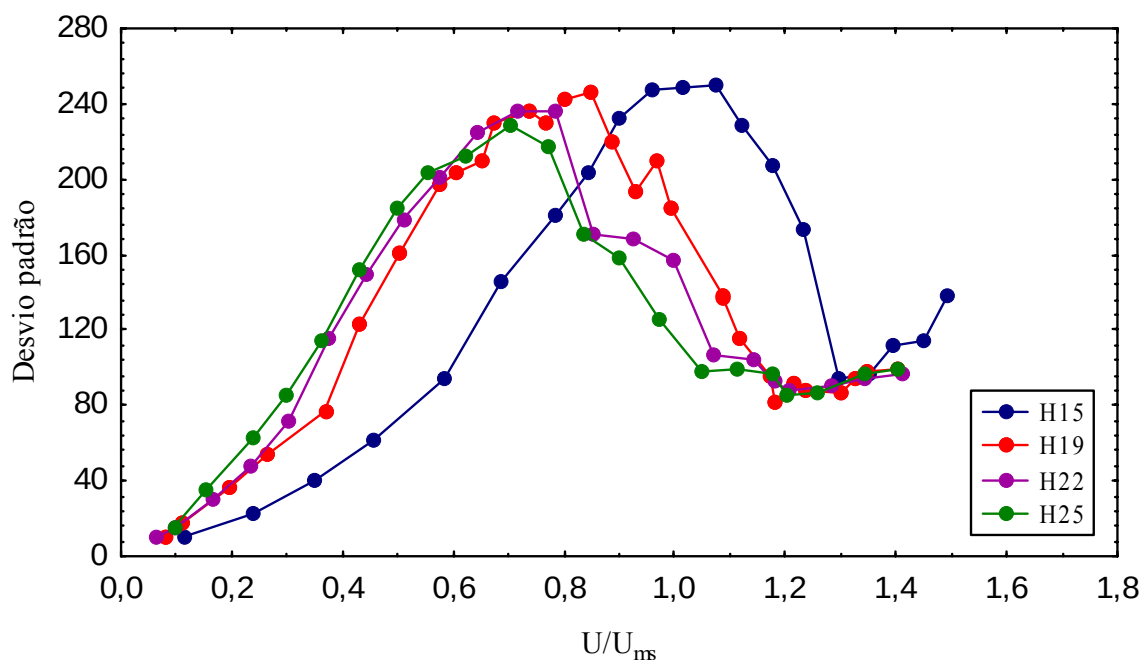


Figura 4.3.2.b–Desvio padrão *versus* velocidade decrescente do ar. Soja

4.4 – Curvas da *Skewness*

Como visto anteriormente, a *Skewness* representa um desvio de simetria em relação a uma distribuição normal e quanto menor for o valor, em módulo, da *Skewness*, mais próximo ela vai estar de uma distribuição normal.

Nesse sentido pode-se observar, que em geral para o algodão (Figura 4.4), partindo-se da região de jorro estabelecido localizado nos pontos de maior velocidade que, à medida que ocorre a diminuição da velocidade do ar, ocorre, a partir do ponto de jorro mínimo, um aumento abrupto da *Skewness*, provavelmente em função da formação da cavidade interna. Após esse aumento há um contínuo decréscimo da *skewness* devido à diminuição gradual da cavidade interna.

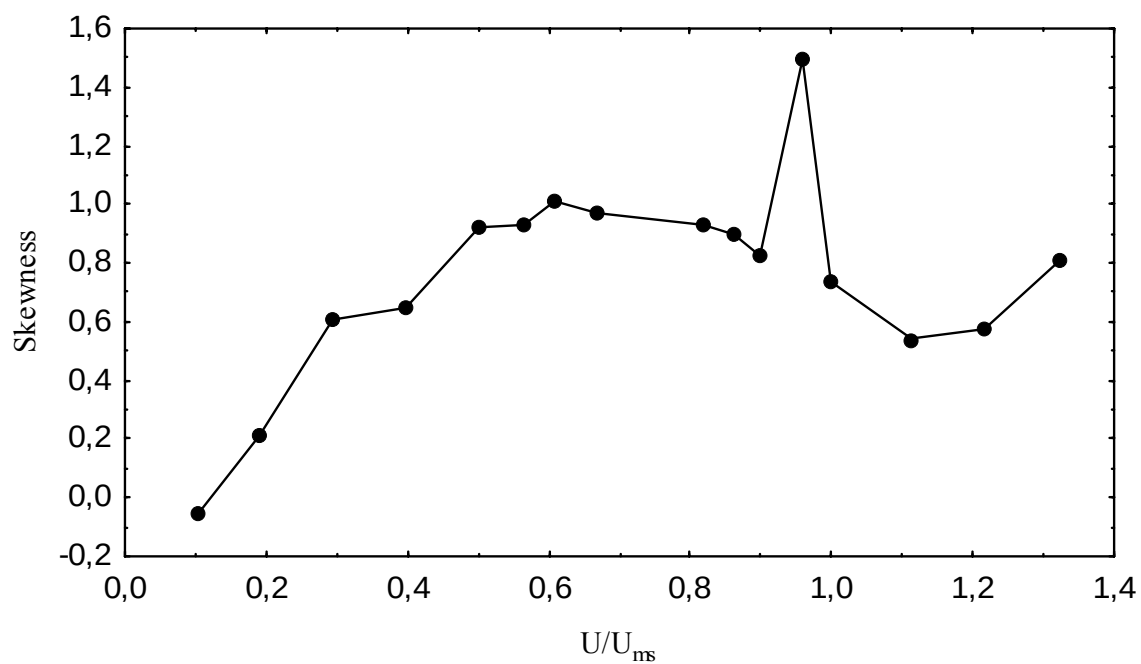


Fig 4.4.a. Variação da *Skewness* versus a velocidade para o algodão com $H=15\text{cm}$.

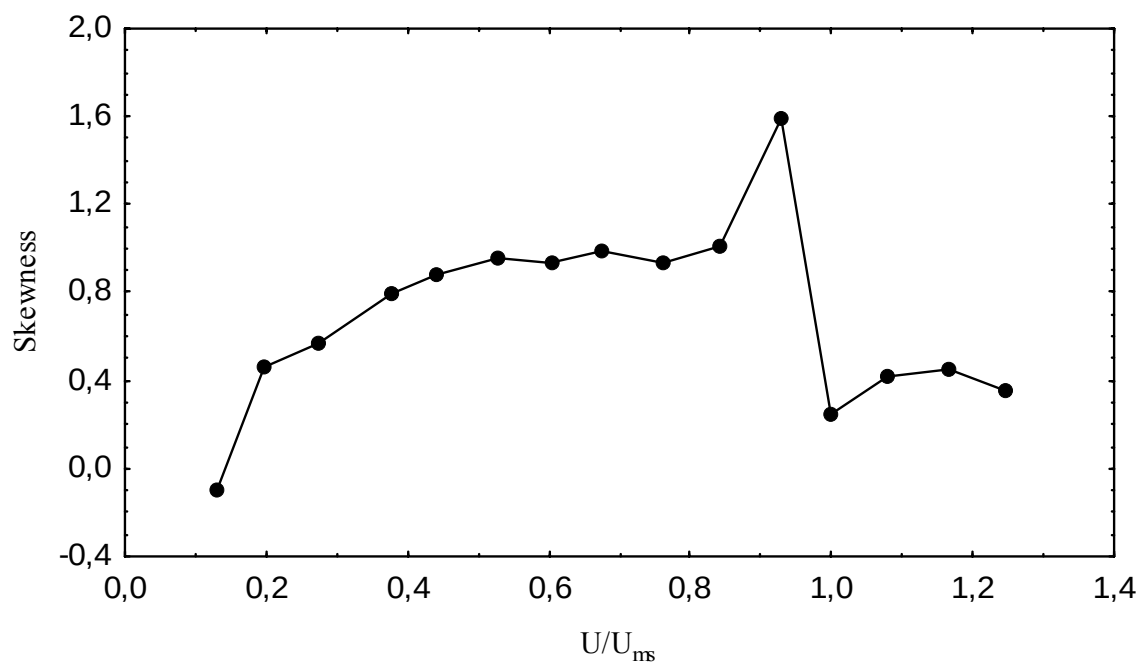


Fig 4.4.b. Variação da *Skewness* versus a velocidade para o algodão com $H=19\text{cm}$.

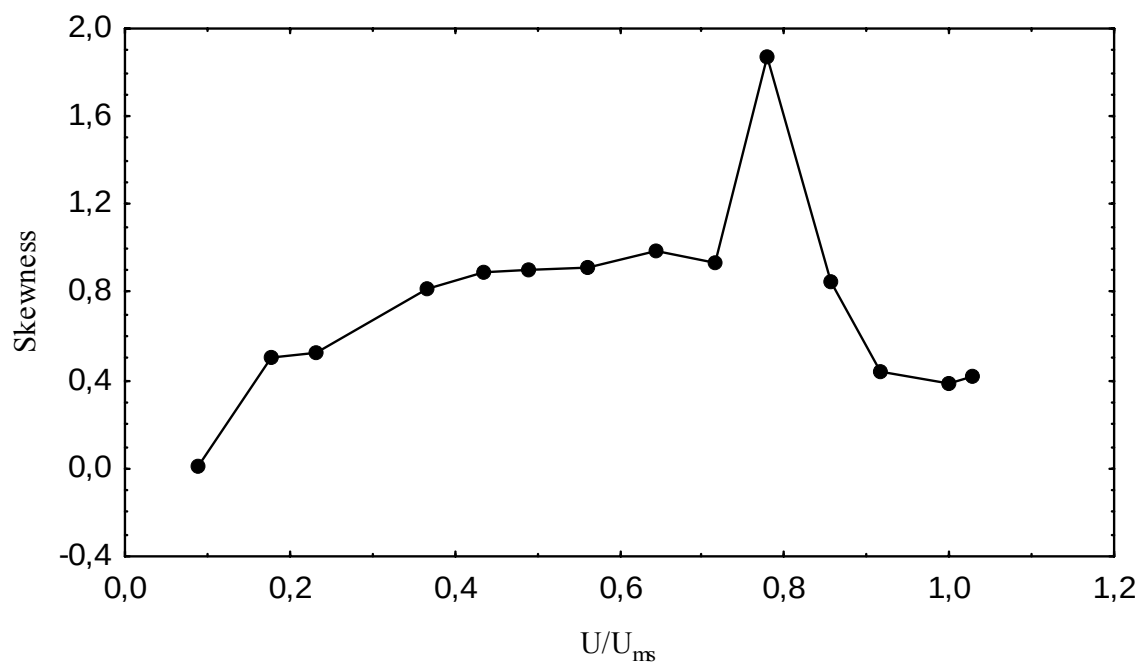


Fig 4.4.c. Variação da *Skewness* versus a velocidade para o algodão com $H=22\text{cm}$.

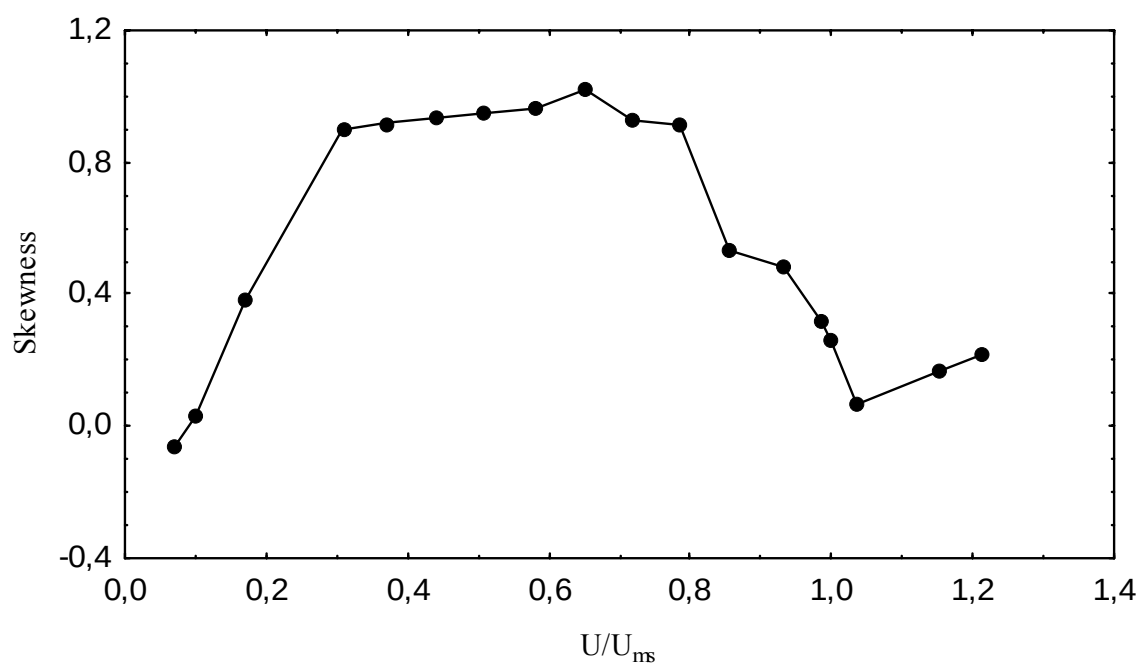


Fig 4.4.d. Variação da *Skewness* versus a velocidade para o algodão com $H=25\text{cm}$

Uma tendência semelhante foi observada também para a soja, conforme pode ser observada na Figura 4.5.

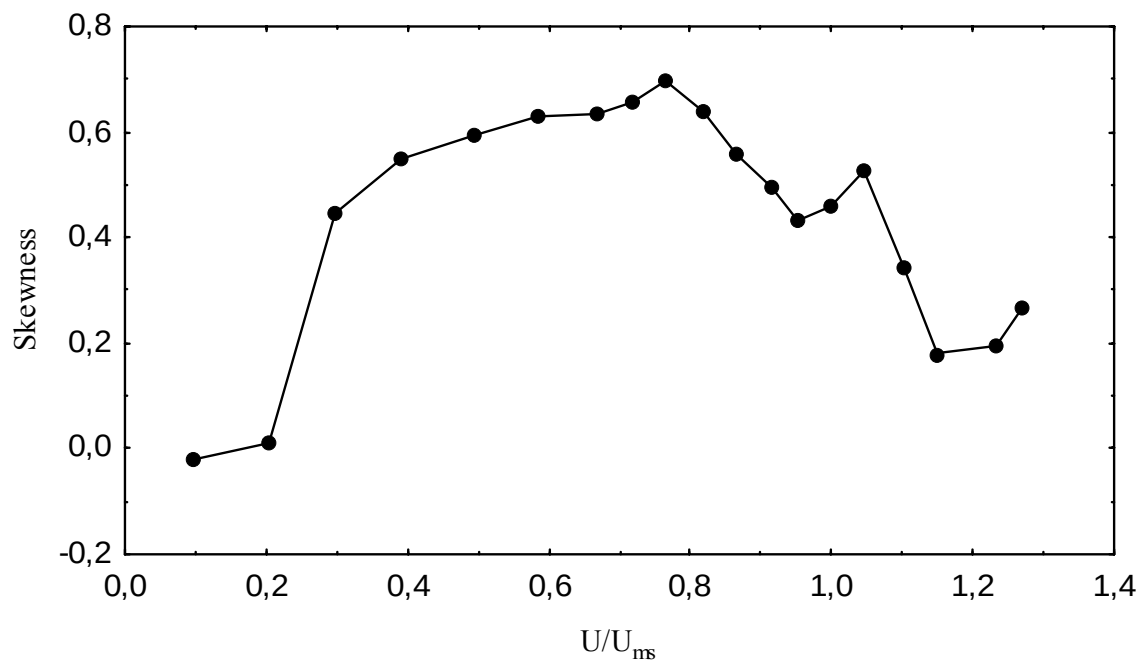


Fig 4.5.a - Variação da *Skewness* versus a velocidade para a soja com $H=15\text{cm}$.

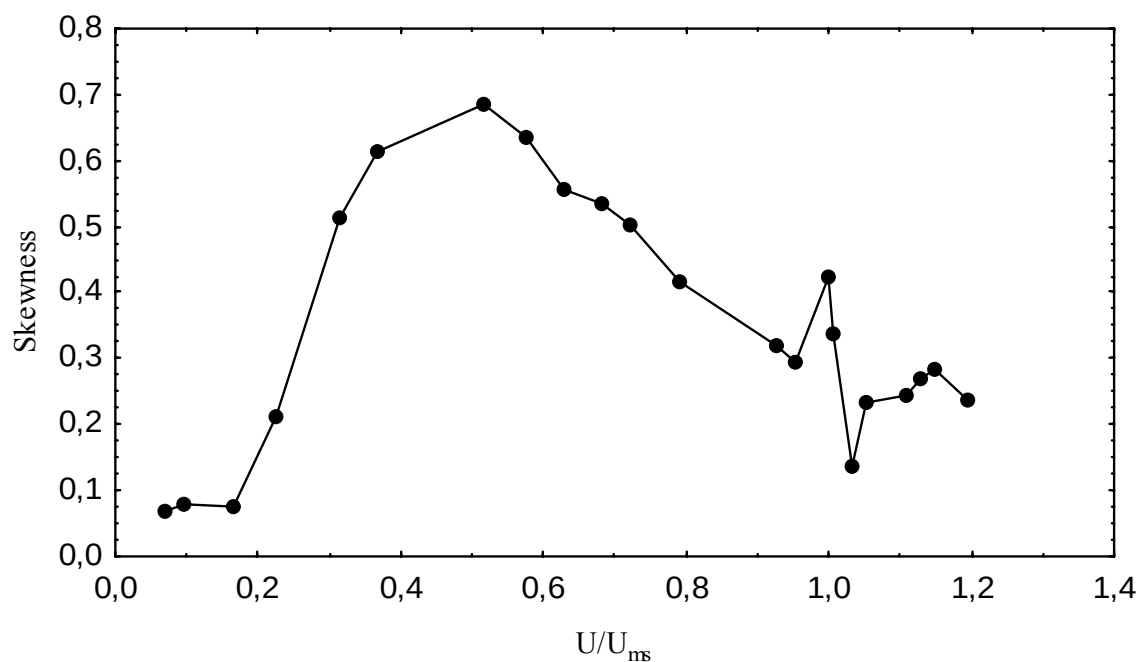


Fig 4.5.b - Variação da *Skewness* versus a velocidade para a soja com $H=19\text{cm}$

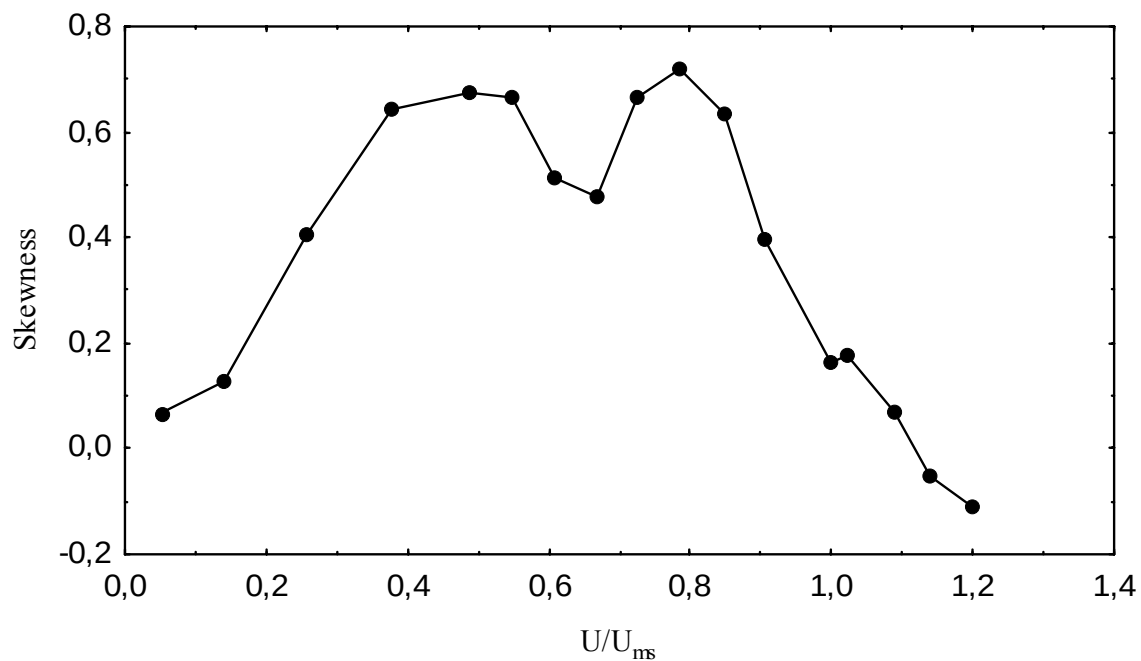


Fig 4.5.c- Variação da *Skewness* versus a velocidade para a soja com H=22cm

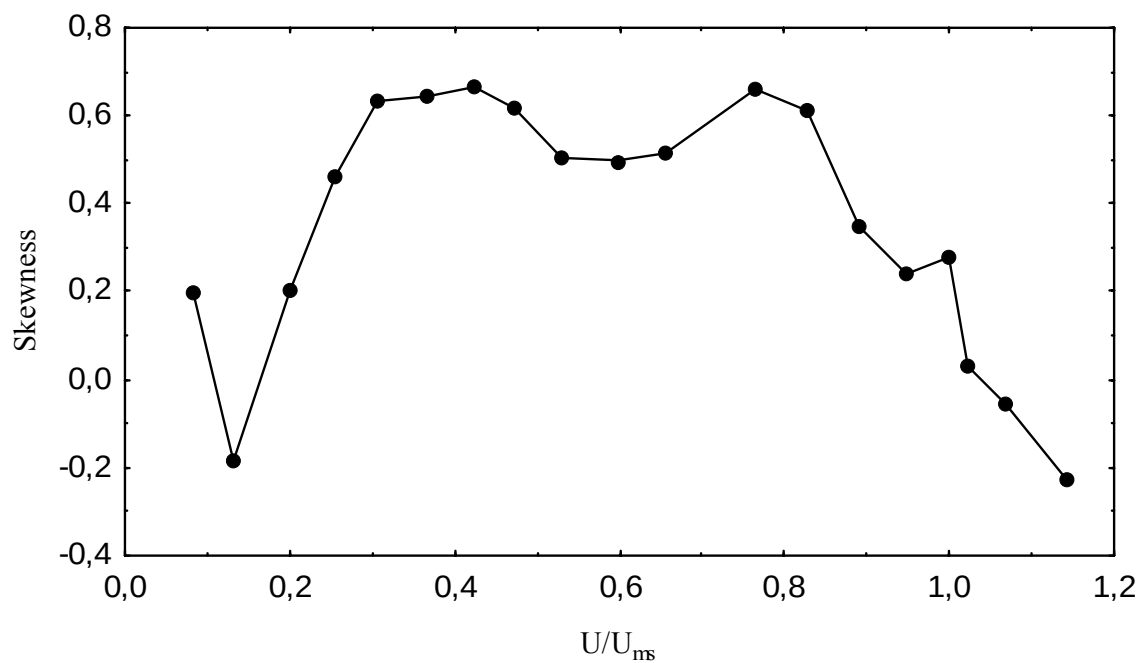


Fig 4.5.d- Variação da *Skewness* versus a velocidade para a soja com H=25cm.

Em síntese pode-se dizer que a *Skewness* das flutuações de pressão variaram de -0,1 a 1,9 para o algodão e para a soja variaram de -0,2 a 0,7, mostrando que função densidade

probabilidade pode diferir de uma distribuição normal. Este resultado também foi encontrado por FREITAS *et al.* (2000).

4.5 – Curvas de flutuação de Pressão

De acordo com os procedimentos descritos anteriormente no Capítulo 3, foram coletados dados de flutuação de pressão, através do sistema de aquisição de dados, sendo tratados pelo software LabVIEW 7.1. A partir dos dados adquiridos, foram gerados gráficos de flutuação de pressão em função do tempo de análise, bem como de densidade espectral de potência, para cada condição estudada.

A seguir serão apresentados alguns resultados típicos obtidos. De uma forma geral, observou-se que as diferenças entre os gráficos de flutuação de pressão em função do tempo, para os vários regimes, foram pequenas. Basicamente, residiram no espaçamento entre as oscilações e na amplitude das flutuações. Essas observações estão condizentes com alguns trabalhos descritos na literatura como, por exemplo, em TARANTO (1996), onde o autor não recomenda a utilização deste tipo de gráfico para a identificação de regimes de um leito de jorro, posto que o mesmo não compõe um método objetivo de identificação. Por outro lado, os espectros de potência extraídos em cada etapa dos experimentos mostraram diferenças que merecem uma atenção maior e, portanto devem ser analisados separadamente em cada tipo de regime observado nesse trabalho.

A seguir serão apresentados e discutidos os dados de alguns regimes característicos do leito de jorro.

4.5.1 – Leito fixo

Como descrito anteriormente o leito fixo é caracterizado pela passagem do gás pelos interstícios interpartículas, não promovendo dessa forma movimento das mesmas. Para esse tipo de regime (leito fixo) foi possível observar, nas Figuras 4.6.a-h, para sementes de algodão, bem como nas Figuras 4.7.a-h, para sementes de soja, que os espectros não demonstraram, de uma forma geral, picos característicos e sim uma tendência de picos ao longo da região estudada. Contudo, o aparecimento de forma mais pronunciada, de um ou dois picos na região compreendida entre 40Hz e 45Hz chamaram a atenção. Qualitativamente, esta tendência foi encontrada por outros autores, como, por exemplo, TARANTO (1996), que utilizou um leito bidimensional.

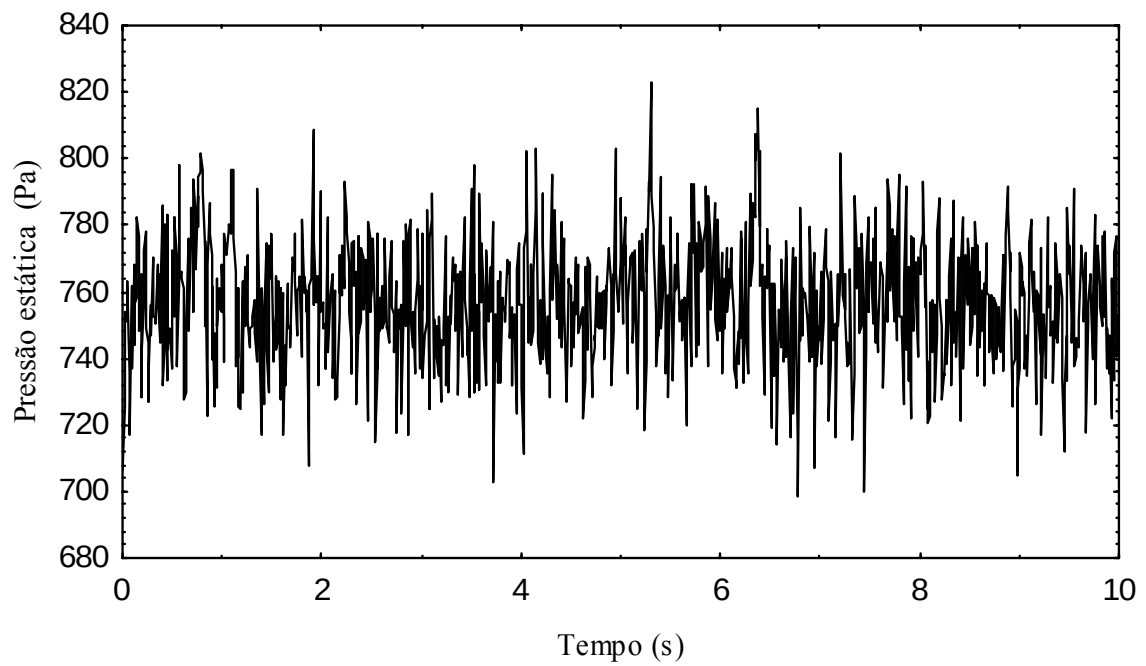


Fig. 4.6.a - Flutuação de Pressão *versus* Tempo. Leito Fixo. Algodão - H15. $U = 2,02\text{m/s}$

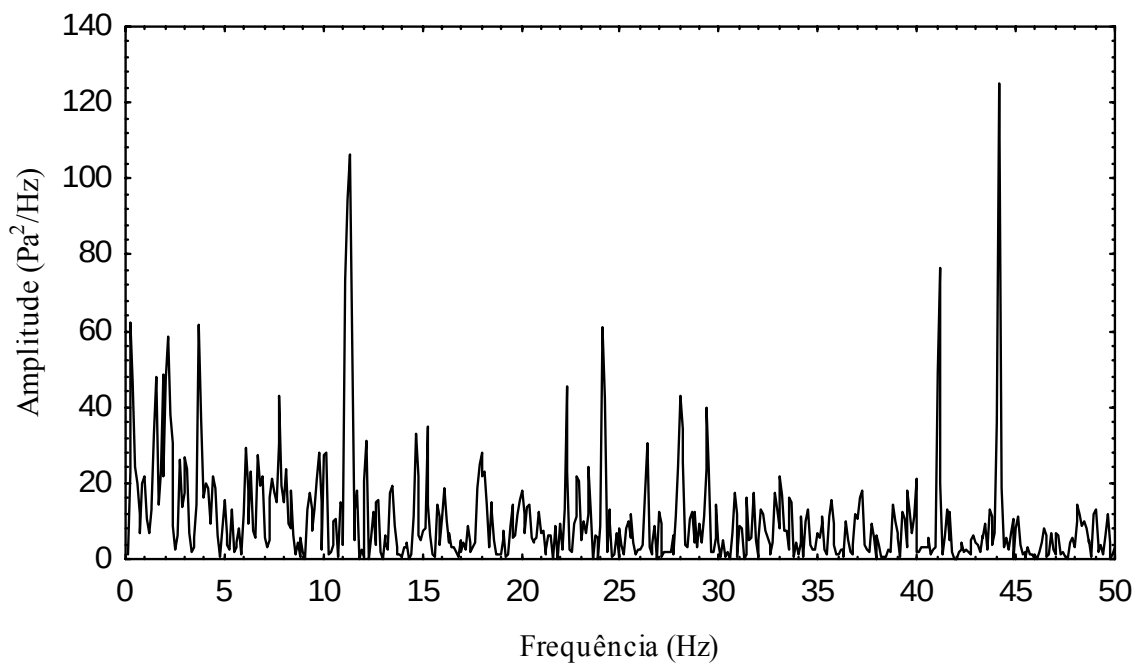


Fig 4.6.b – Espectro de potência. Leito fixo. Algodão - H15. $U = 2,02\text{ m/s}$.

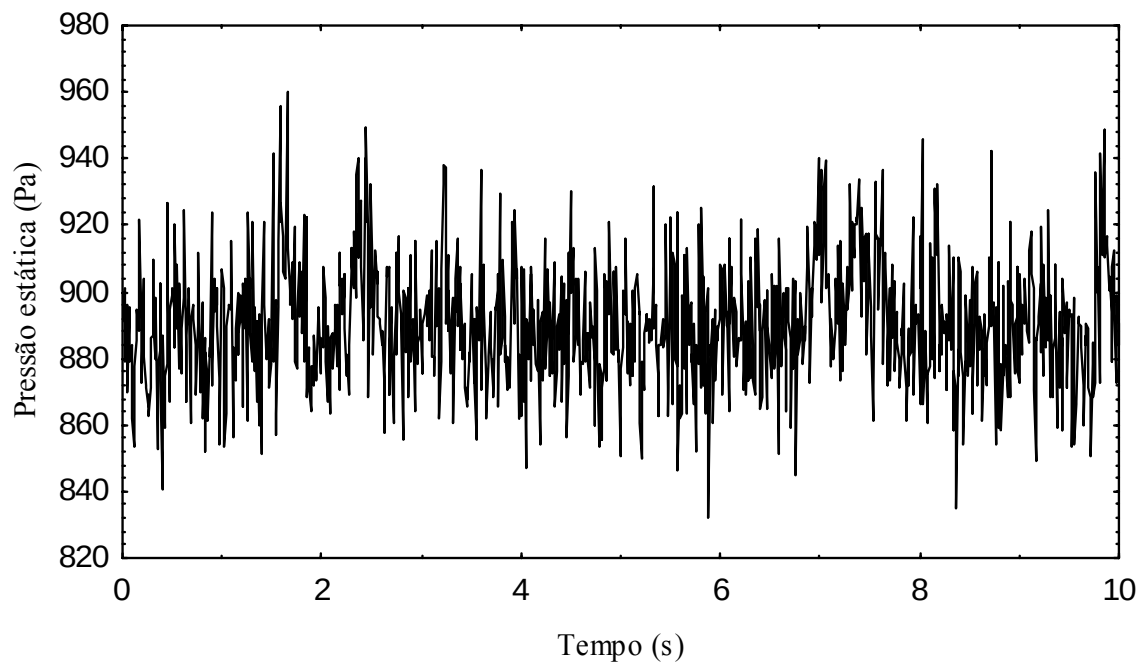


Fig. 4.6.c - Flutuação de Pressão *versus*. Tempo. Leito Fixo. Algodão - H19. $U = 2,03\text{m/s}$

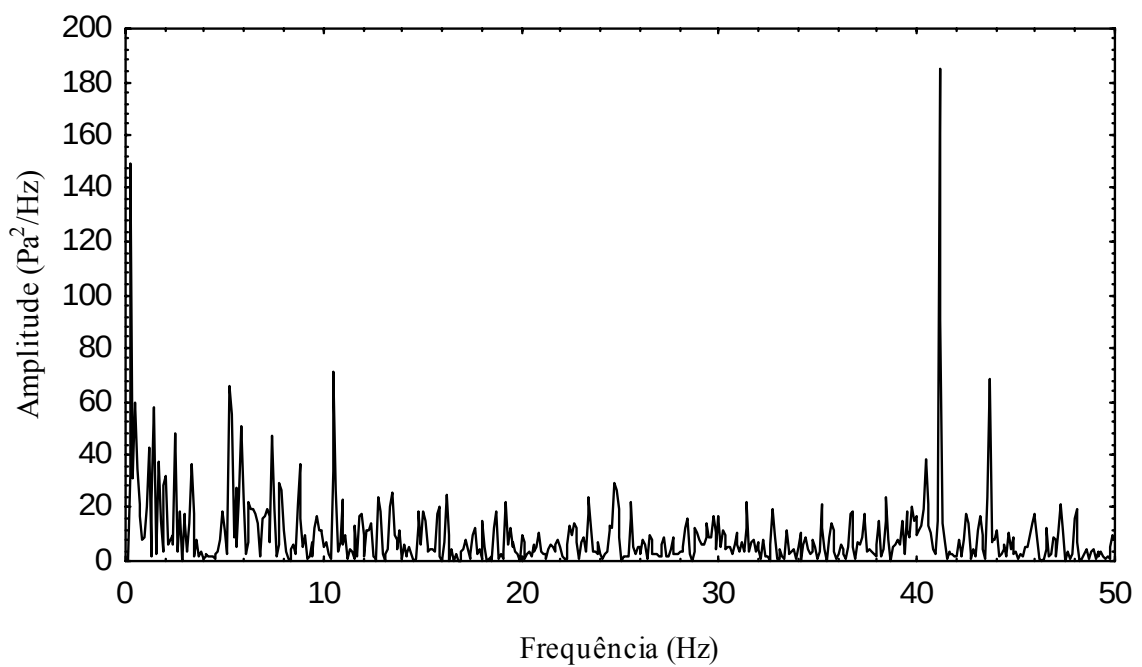


Fig 4.6.d – Espectro de potência. Leito fixo. Algodão - H19. $U = 2,03\text{ m/s}$.

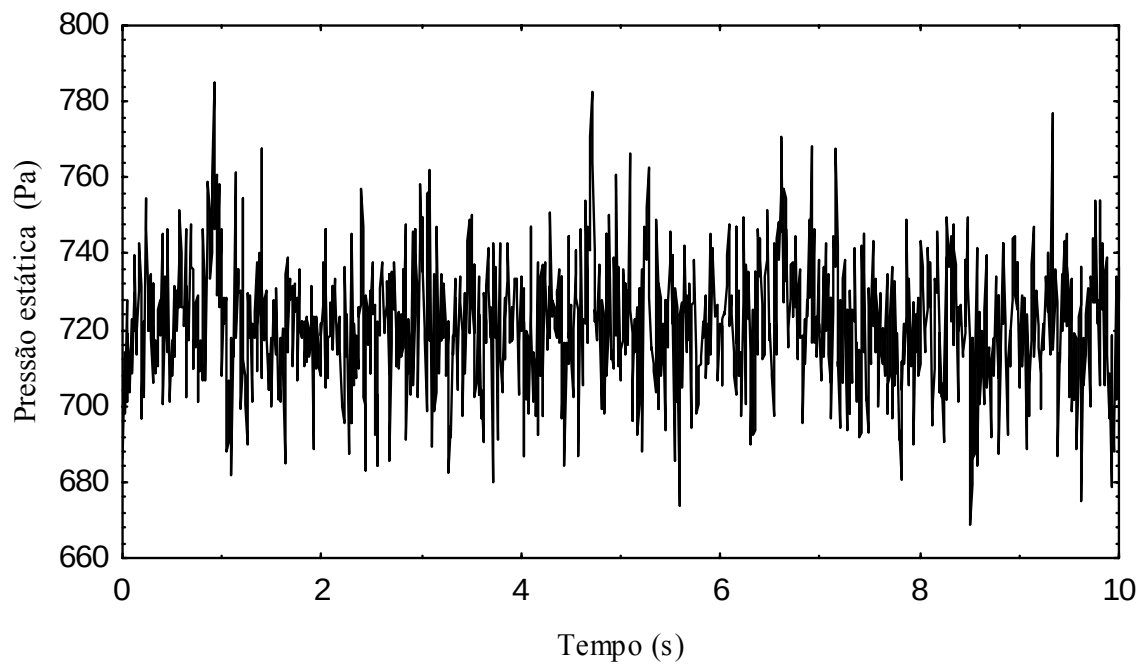


Fig. 4.6.e - Flutuação de Pressão *versus*. Tempo. Leito Fixo. Algodão – H22. $U = 2,03\text{m/s}$

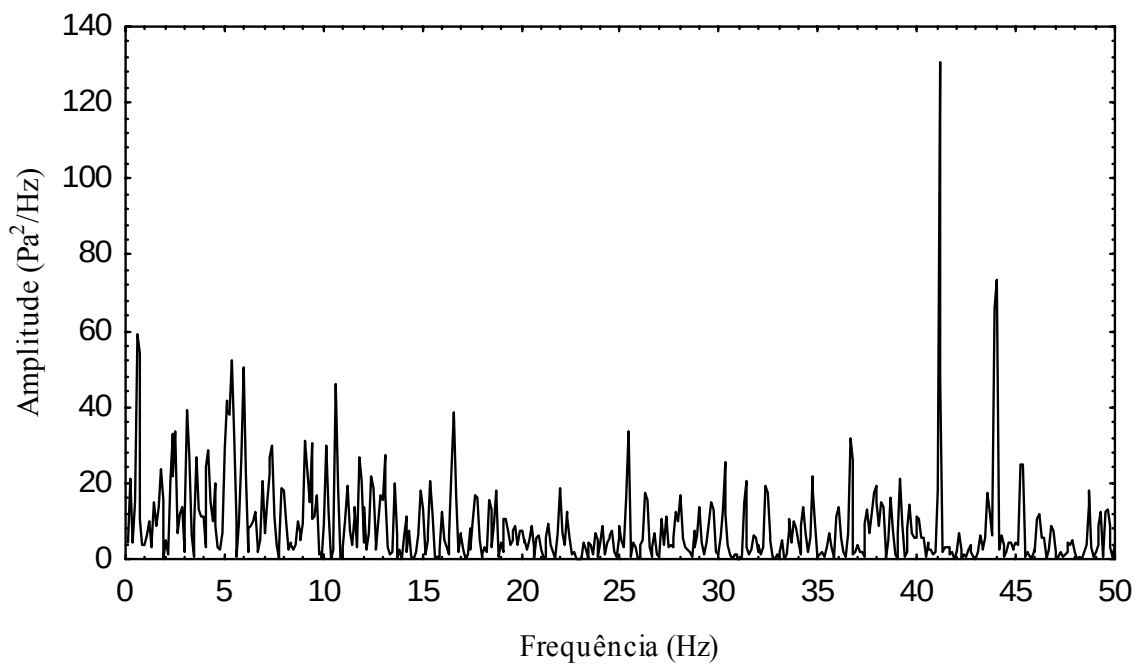


Fig 4.6.f – Espectro de potência. Leito fixo. Algodão – H22. $U = 2,03\text{ m/s}$.

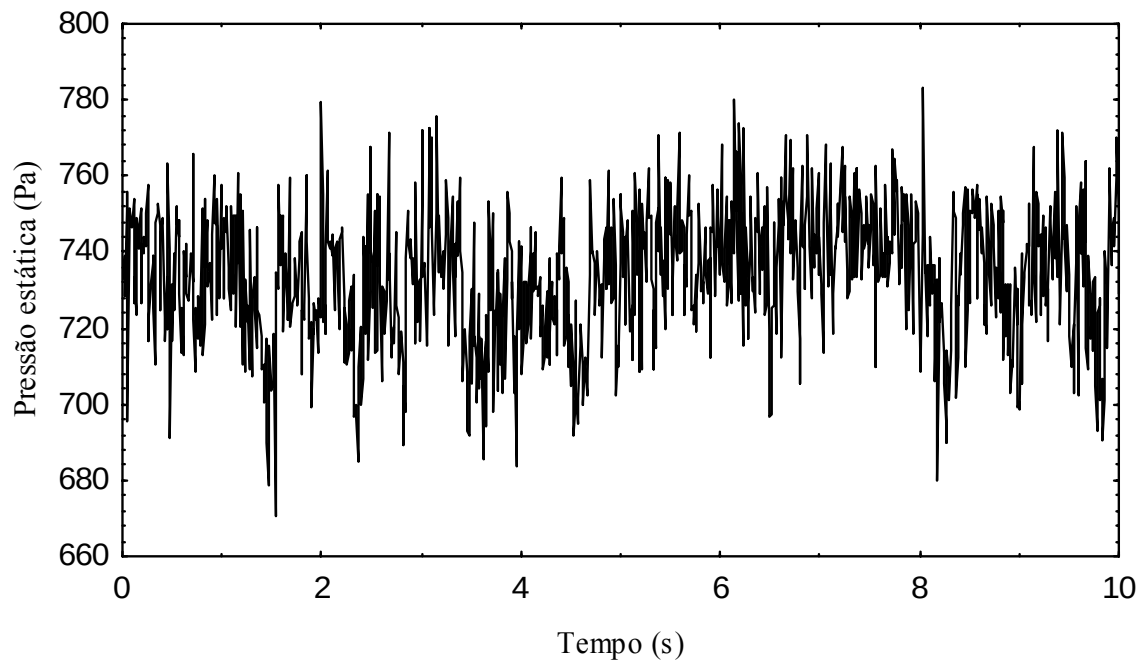


Fig. 4.6.g - Flutuação de Pressão *versus*. Tempo. Leito Fixo. Algodão – H25. $U = 1,97\text{m/s}$

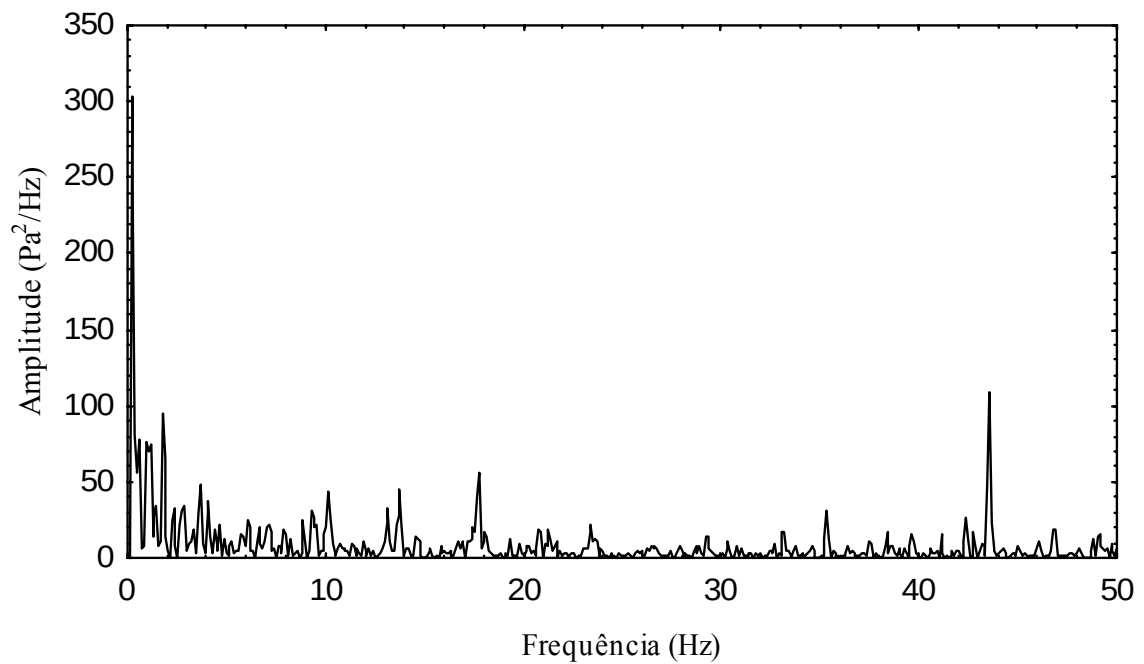


Fig 4.6.h – Espectro de potência. Leito fixo. Algodão – H25. $U = 1,97\text{ m/s}$.

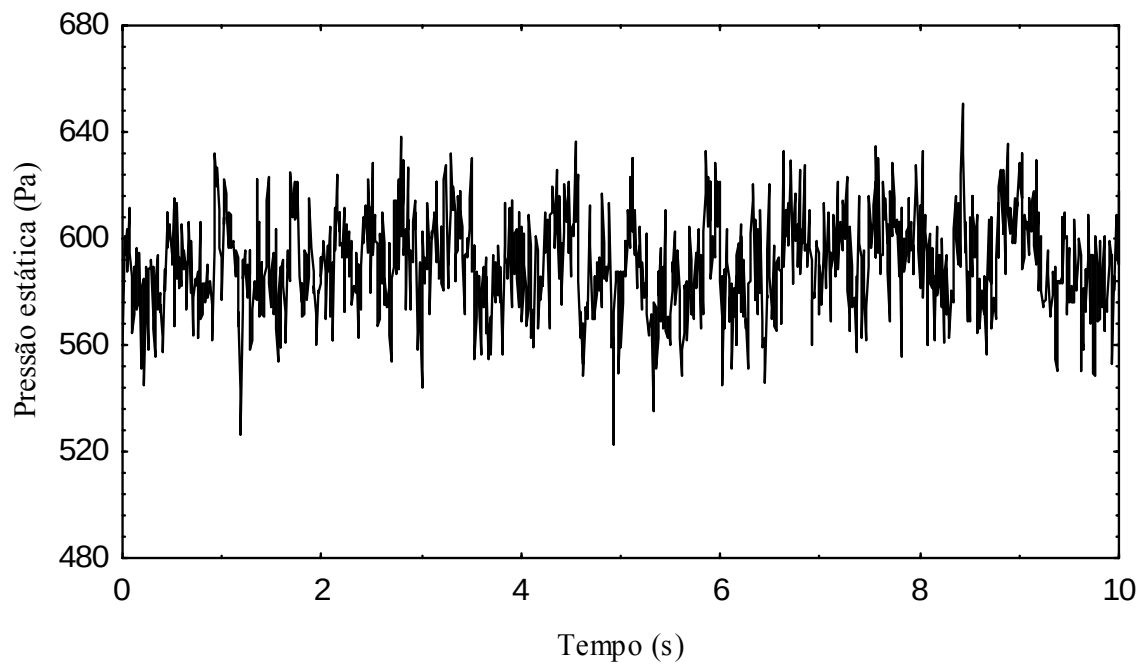


Fig. 4.7.a - Flutuação de Pressão *versus*. Tempo. Leito Fixo. Soja - H15. $U = 1,99\text{m/s}$

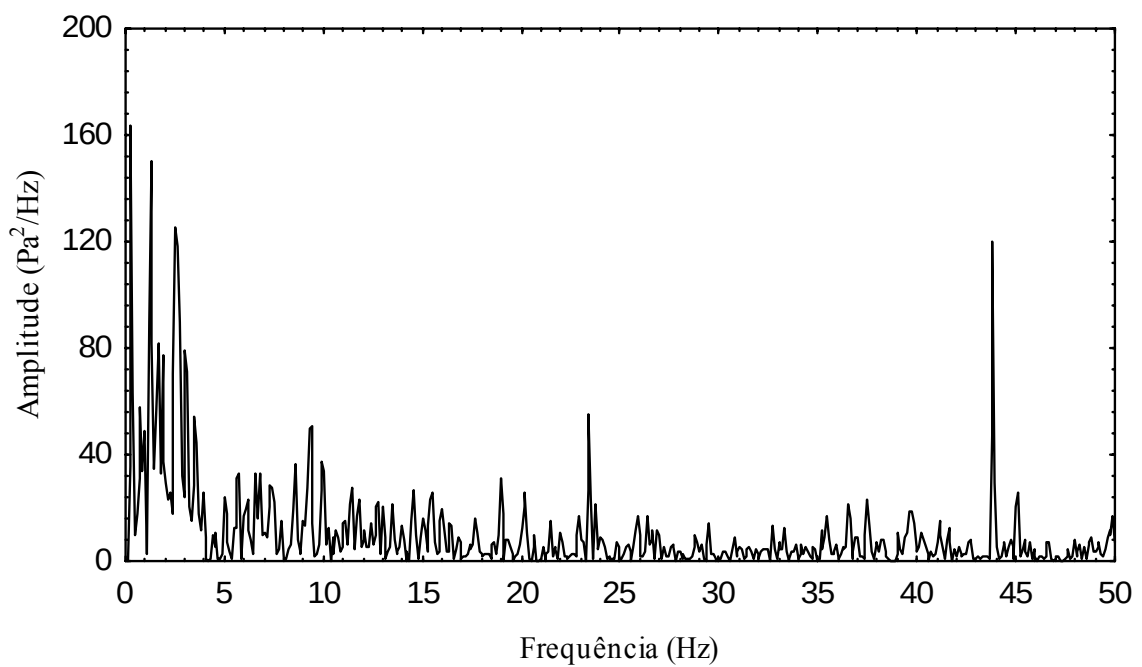


Fig 4.7.b – Espectro de potência. Leito fixo. Soja - H15. $U = 1,99\text{ m/s}$.

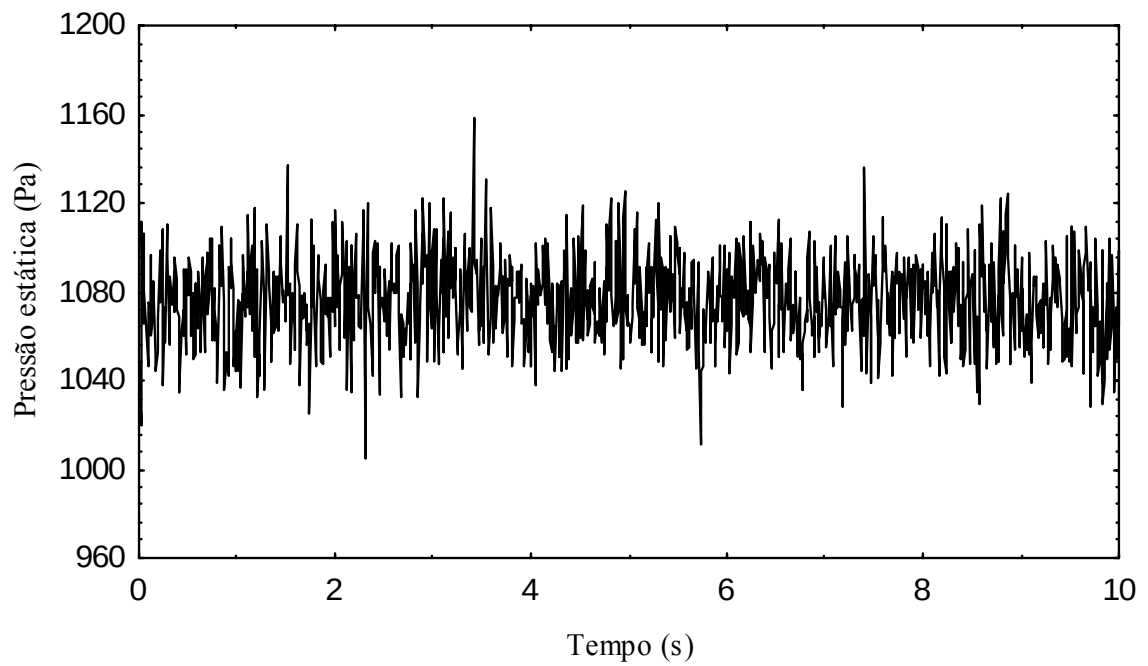


Fig. 4.7.c - Flutuação de Pressão *versus* Tempo. Leito Fixo. Soja - H19. $U = 2,5\text{m/s}$

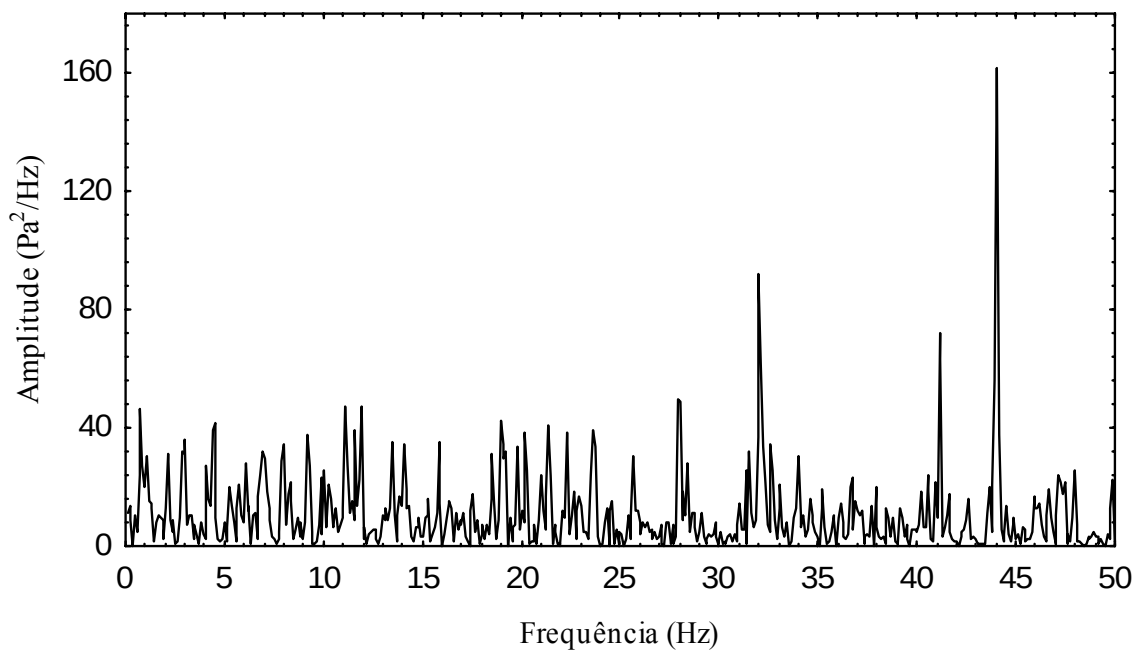


Fig 4.7.d – Espectro de potência. Leito fixo. Soja - H19. $U = 2,5\text{ m/s}$.

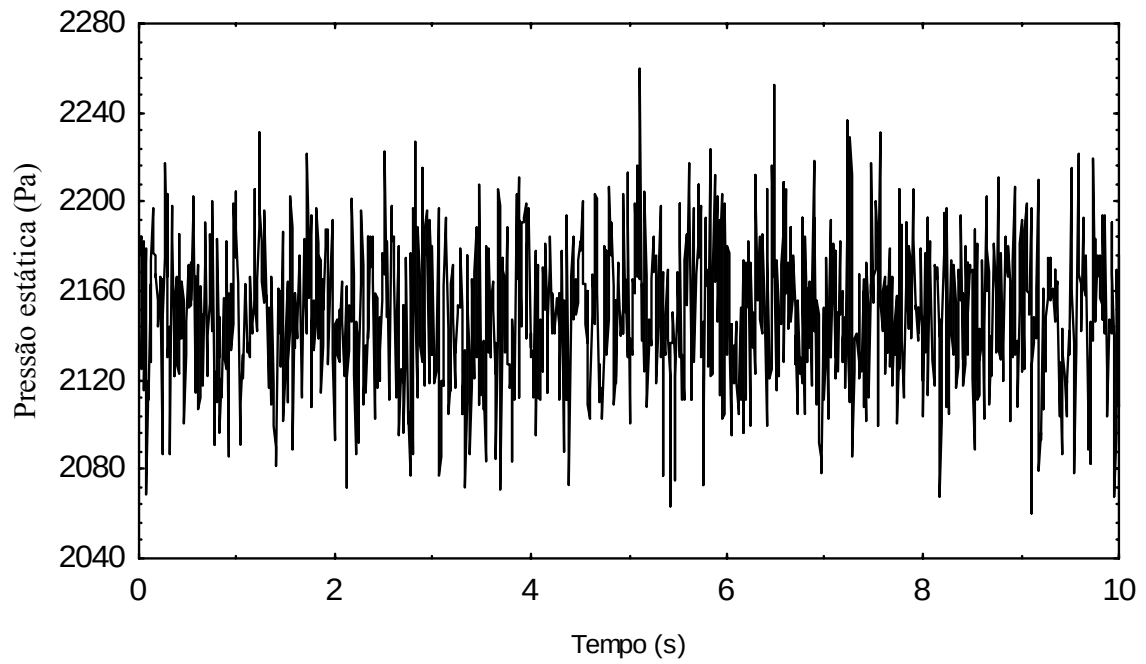


Fig. 4.7e - Flutuação de Pressão *versus*. Tempo. Leito Fixo. Soja – H22. $U = 3,06\text{m/s}$

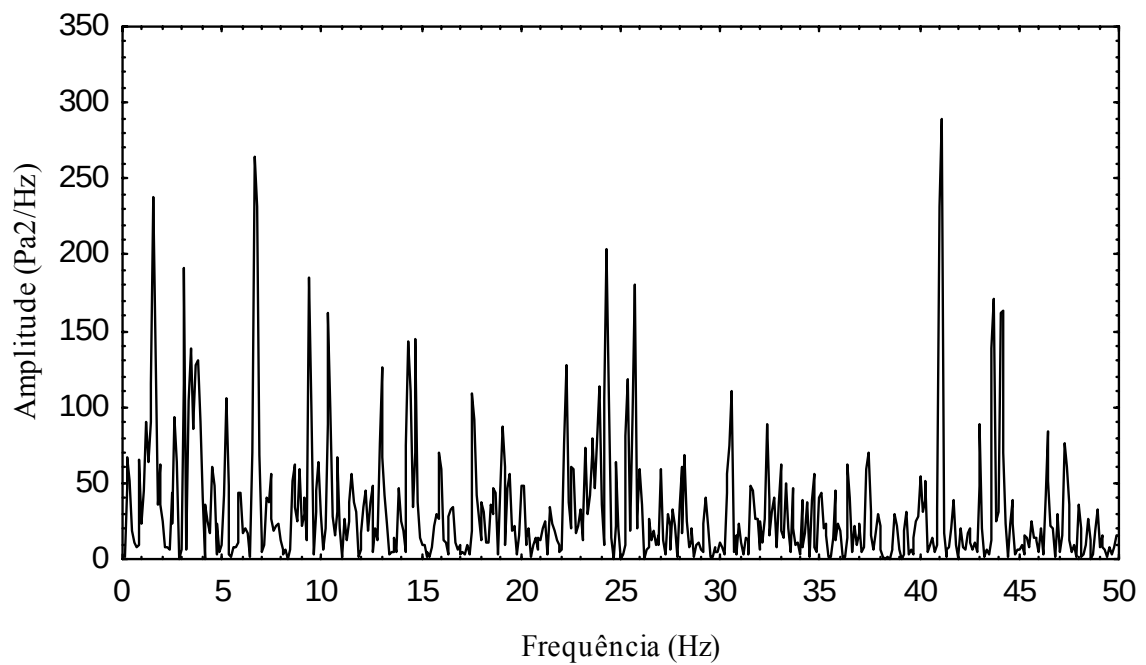


Fig 4.7.f – Espectro de potência. Leito fixo. Soja – H22. $U = 3,06\text{ m/s}$.

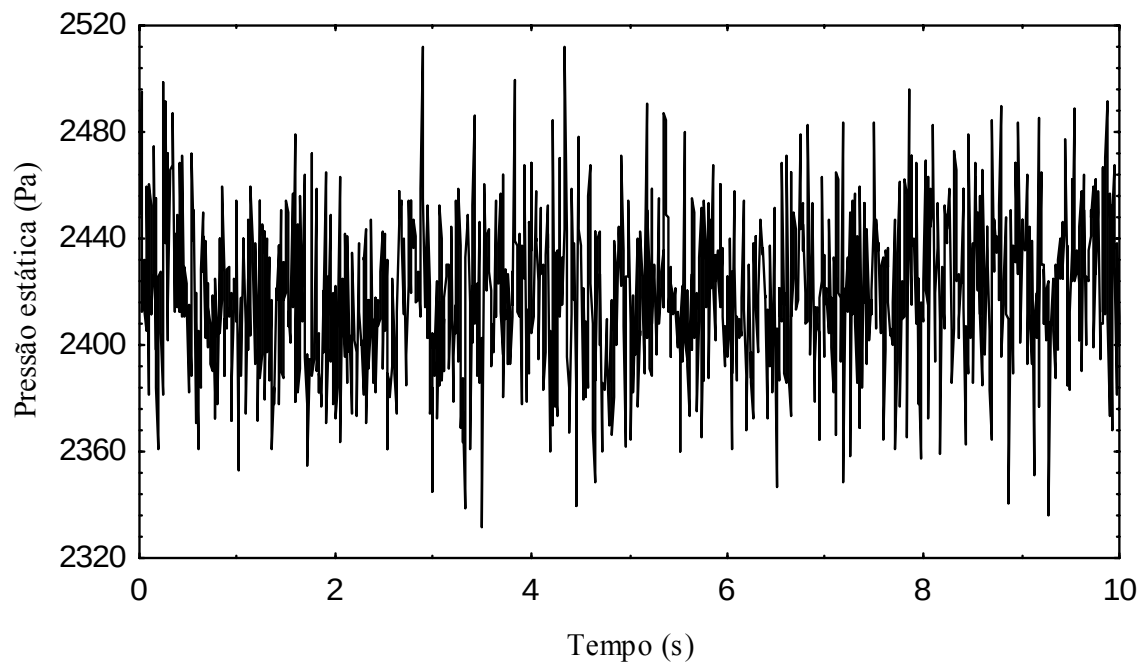


Fig. 4.7.g - Flutuação de Pressão *versus* Tempo. Leito Fixo. Soja – H25. $U = 3,06$ m/s

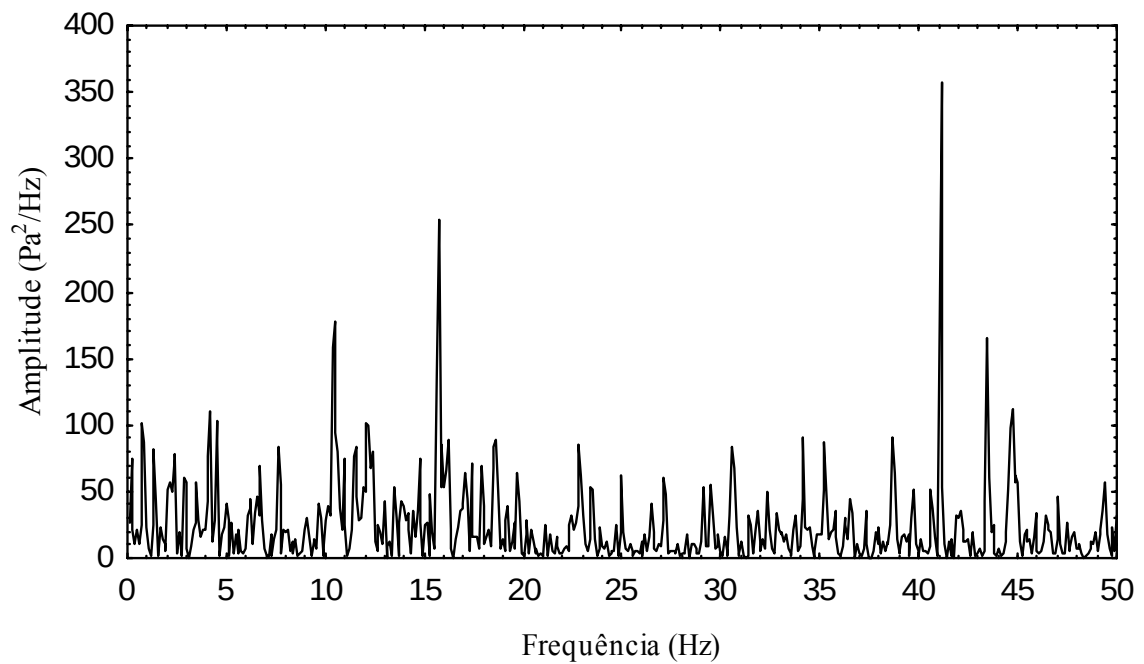


Fig 4.7.h – Espectro de potência. Leito fixo. Soja – H25. $U = 3,06$ m/s.

4.5.2 – Expansão

As figuras a seguir mostram como os espectros de potência se comportam em vazões próximas a equivalente ao ponto de perda de carga máxima. Neste caso, mesmo já se iniciando o deslocamento das partículas, continua-se a se perceber uma tendência de picos em toda a região de frequência estudada.

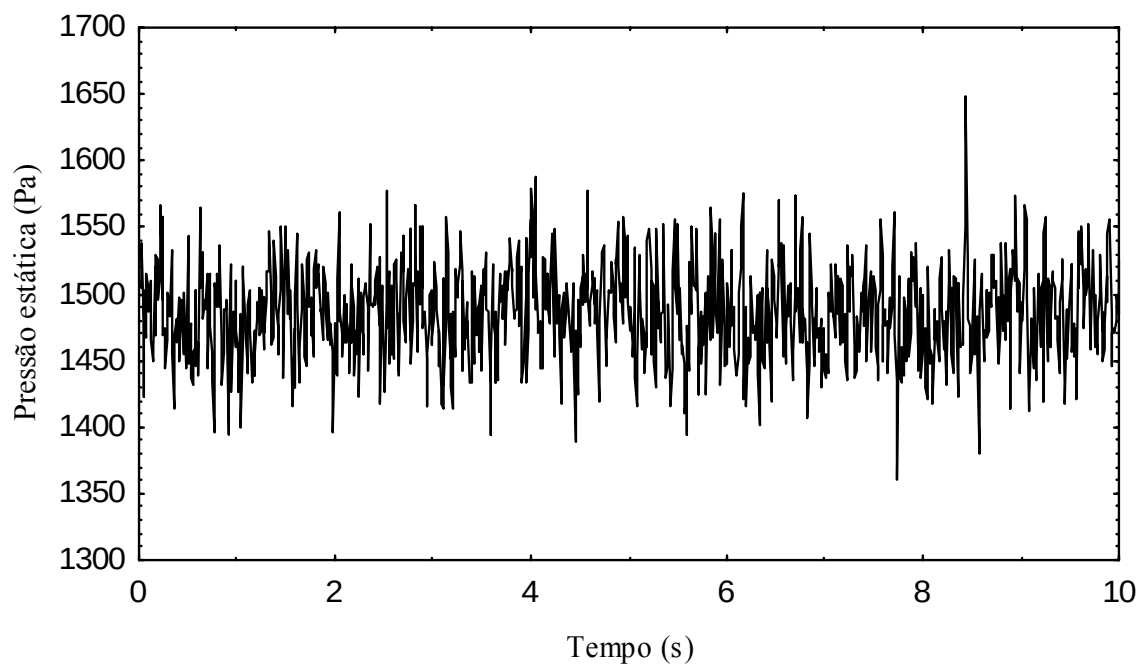


Fig. 4.8 a - Flutuação de Pressão *versus* Tempo. Expansão. Algodão – H15. $U = 4,05$ m/s

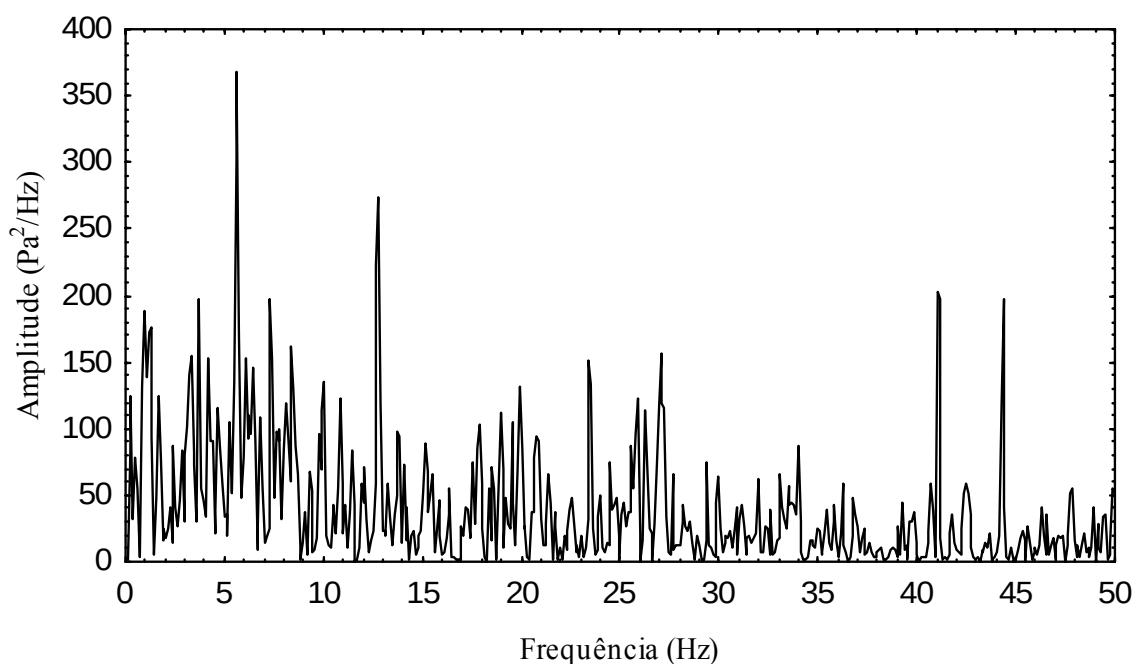


Fig 4.8 b – Espectro de potência. Expansão. Algodão – H15. $U = 4,05$ m/s.

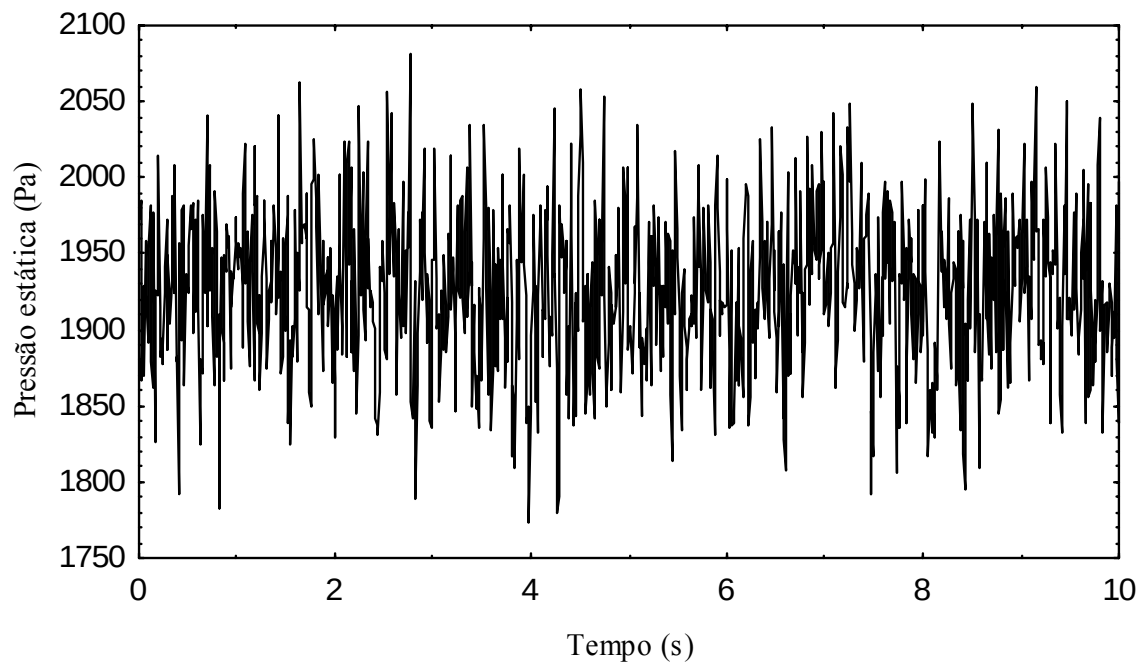


Fig. 4.8 c - Flutuação de Pressão *versus*. Tempo – Expansão. Algodão – H19. $U = 6,05$ m/s

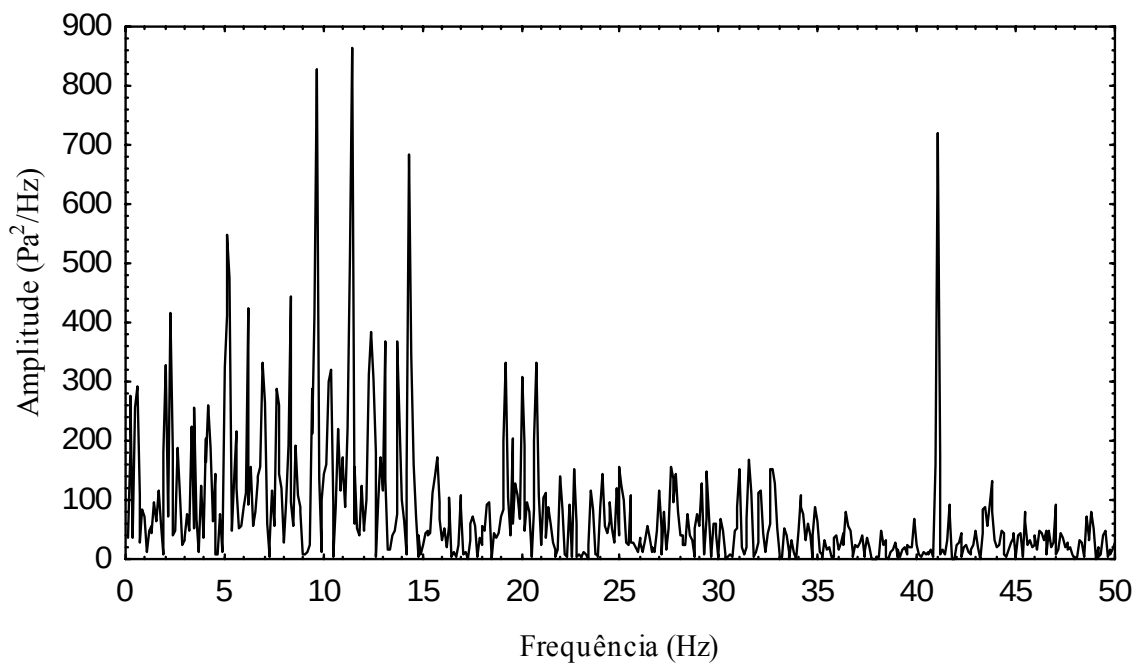


Fig 4.8.d – Espectro de potência. Expansão. Algodão – H19. $U = 6,05$ m/s.

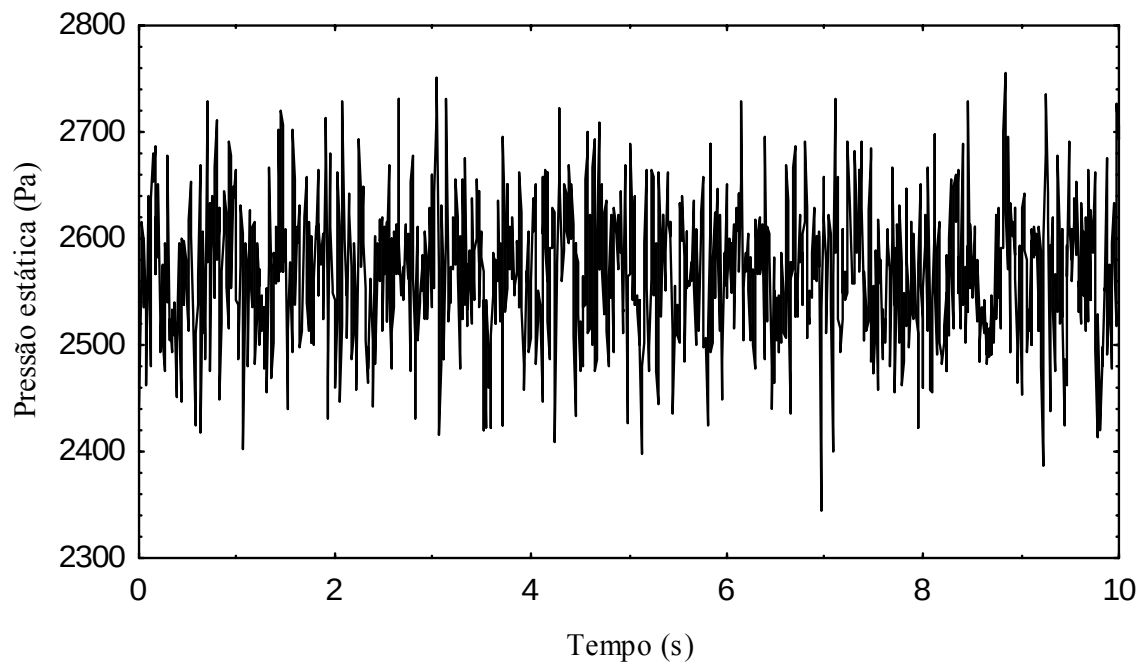


Fig. 4.8 e - Flutuação de Pressão *versus*. Tempo. Expansão. Algodão – H22. $U = 7,3$ m/s

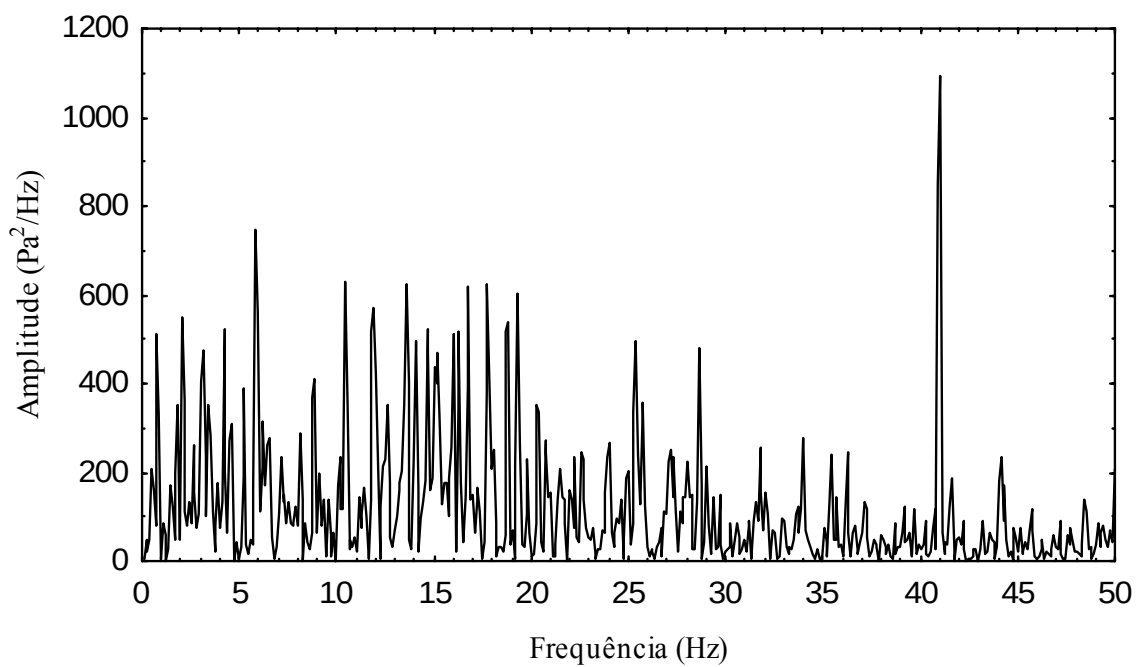


Fig 4.8.f – Espectro de potência. Expansão. Algodão – H22. $U = 7,3$ m/s.

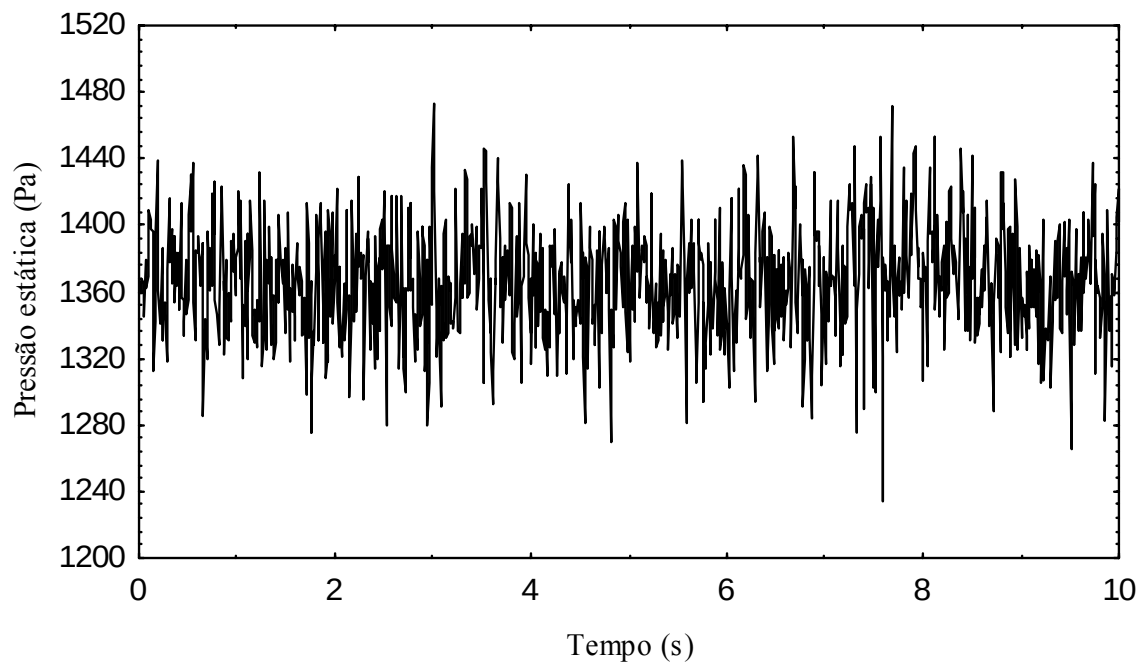


Fig. 4.9 a - Flutuação de Pressão *versus*. Tempo – Expansão. Soja – H15. $U = 4,1$ m/s

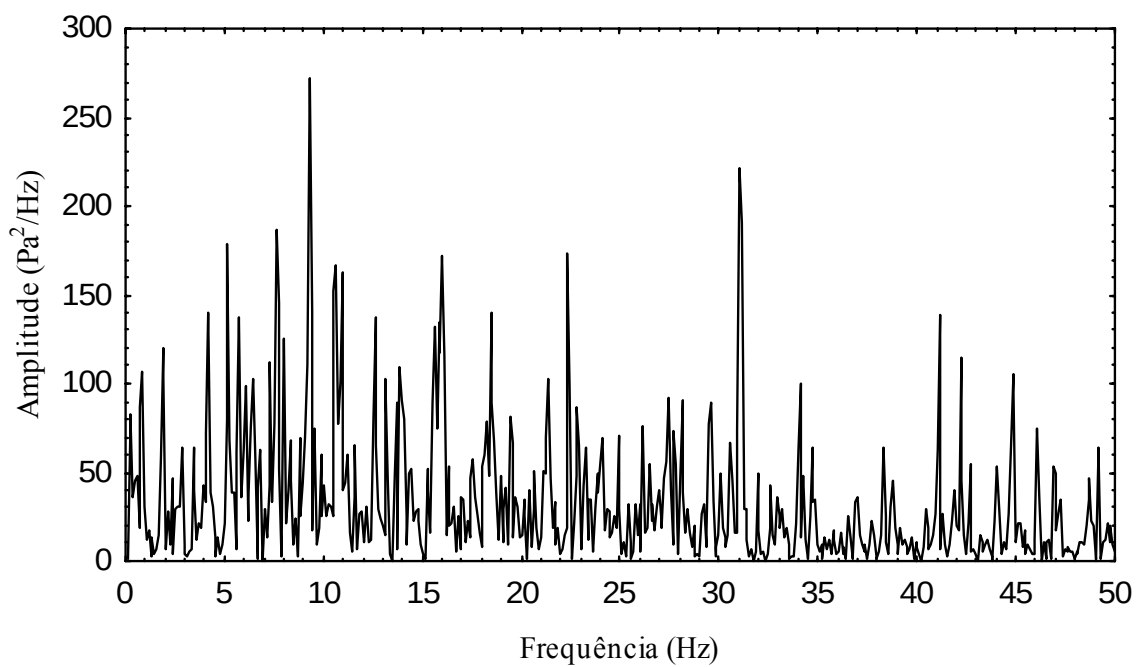


Fig 4.9 b – Espectro de potência. Expansão. Soja – H15. $U = 4,1$ m/s.

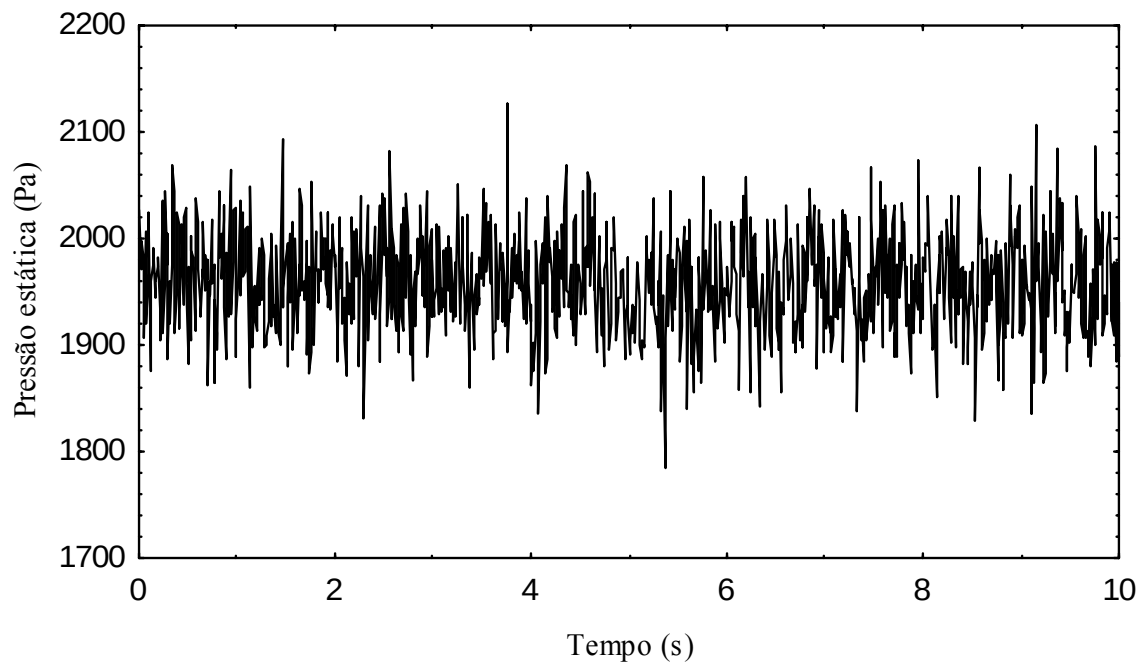


Fig. 4.9 c - Flutuação de Pressão *versus*. Tempo – Expansão. Soja – H19. $U = 6,55$ m/s

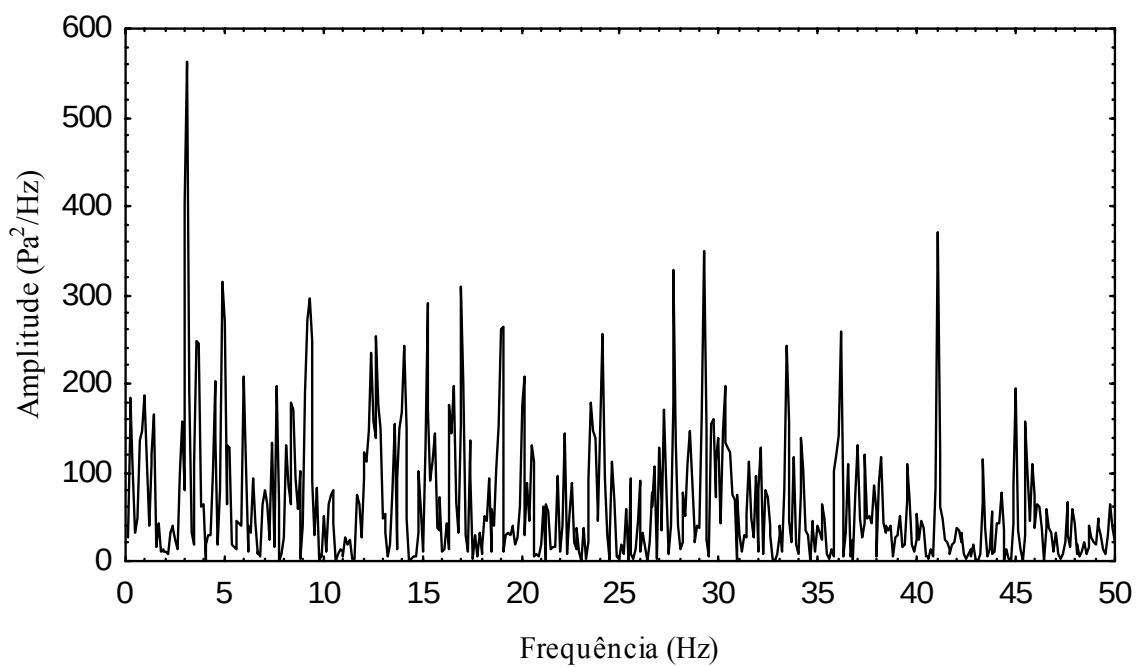


Fig 4.9 d – Espectro de potência. Expansão. Soja – H19. $U = 6,55$ m/s.

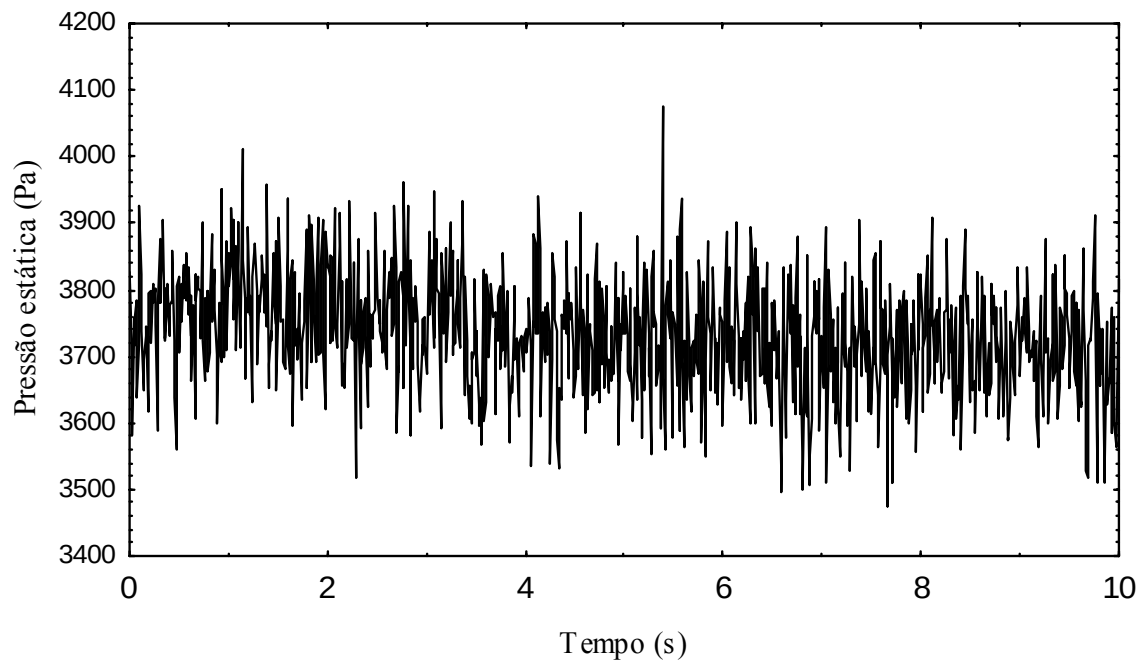


Fig. 4.9 e - Flutuação de Pressão *versus*. Tempo – Expansão. Soja – H22. $U = 6,1$ m/s

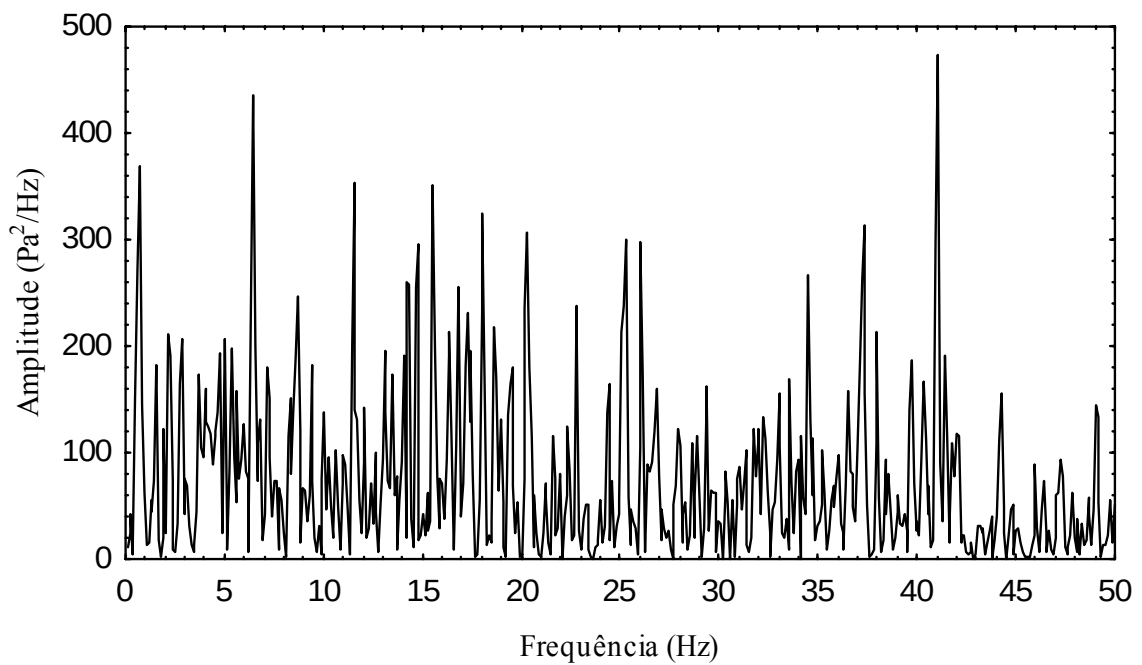


Fig 4.9 f – Espectro de potência. Expansão. Soja – H22. $U = 6,1$ m/s.

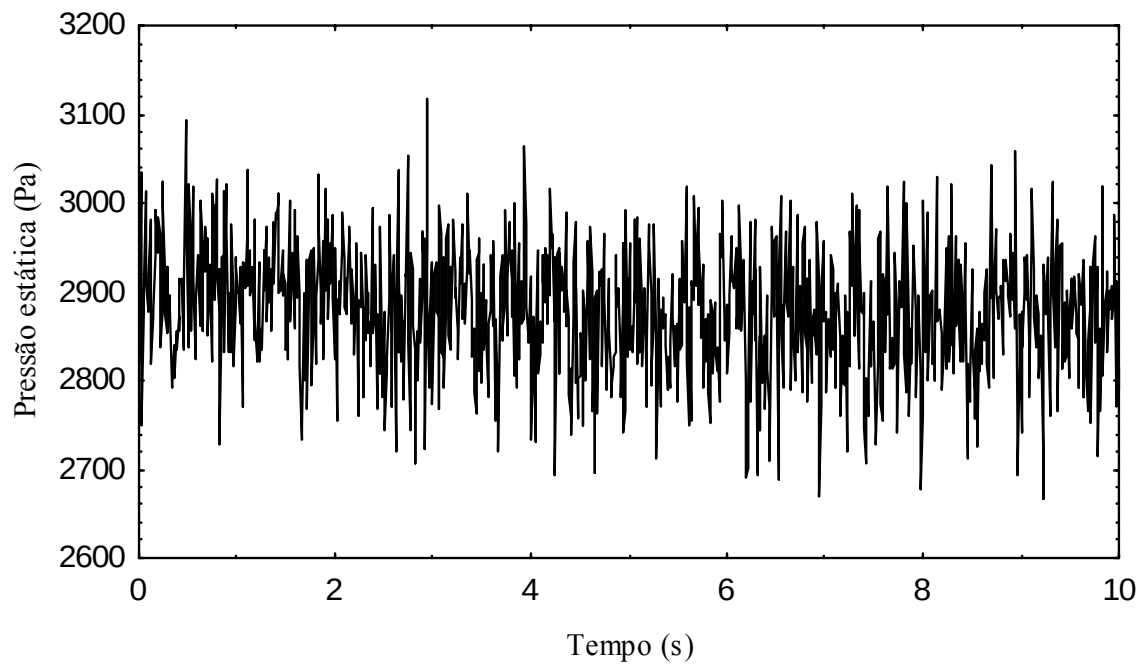


Fig. 4.9 g - Flutuação de Pressão *versus*. Tempo – Expansão. Soja – H25. $U = 7,35$ m/s

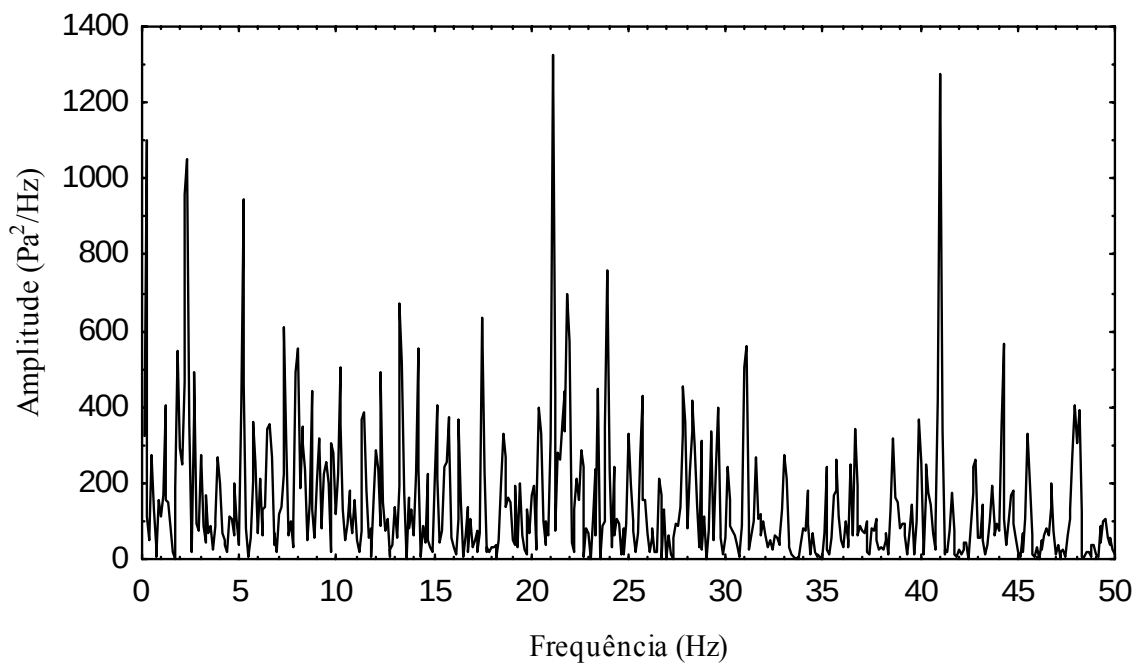


Fig 4.9 h – Espectro de potência. Expansão. Soja – H25. $U = 7,35$ m/s.

4.5.3 – Jato Interno

Quando se notou a presença da formação da cavidade interna, que dá origem ao canal preferencial central, verificou-se uma mudança no comportamento dos espectros de potência. A partir daí tornou-se possível a identificação de duas bandas bem definidas. A primeira, e mais significativa, encontrou-se na região de 7Hz a 8Hz, e a outra, em menor amplitude, na faixa de 14Hz a 16Hz. Esse comportamento foi observado tanto para as sementes de soja, quanto para as sementes de algodão, nas quatro alturas estudadas. Resultado semelhante a este foi encontrado por FREITAS *et al*, (2000), estudando leito de jorro bidimensional. Este autor também observou que, a banda de maior amplitude possuía uma frequência equivalente a metade do valor daquela de menor amplitude. Resultado muito próximo do que foi encontrado nessa dissertação.

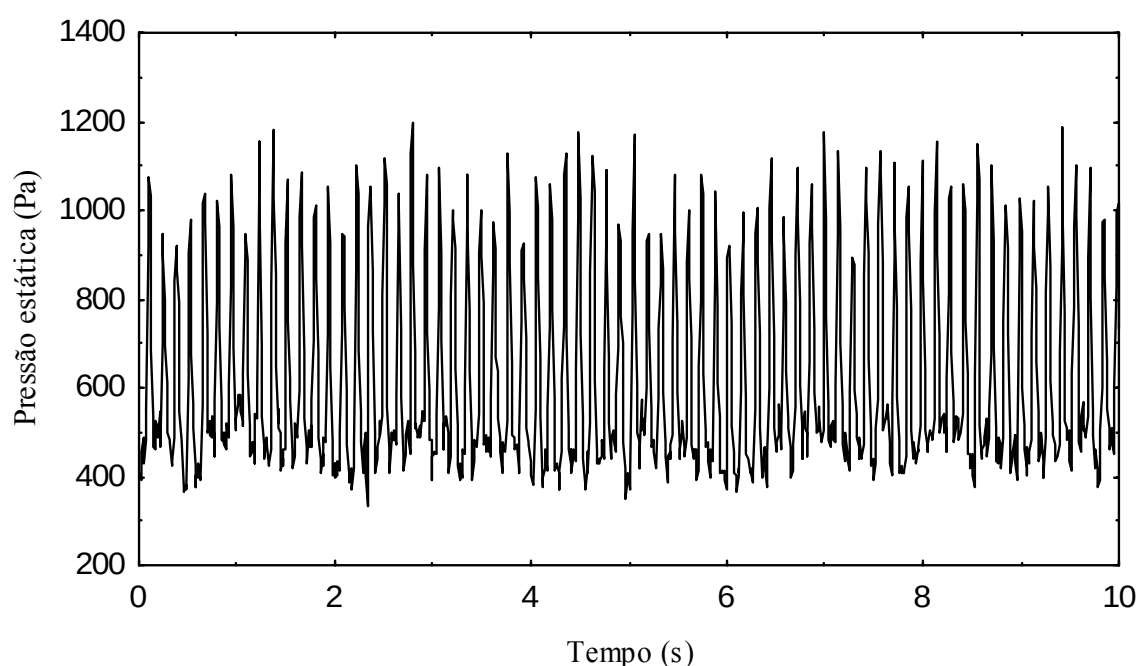


Fig. 4.10 a - Flutuação de Pressão *versus*. Tempo. Jato Interno. Algodão – H15. $U = 6,1$ m/s

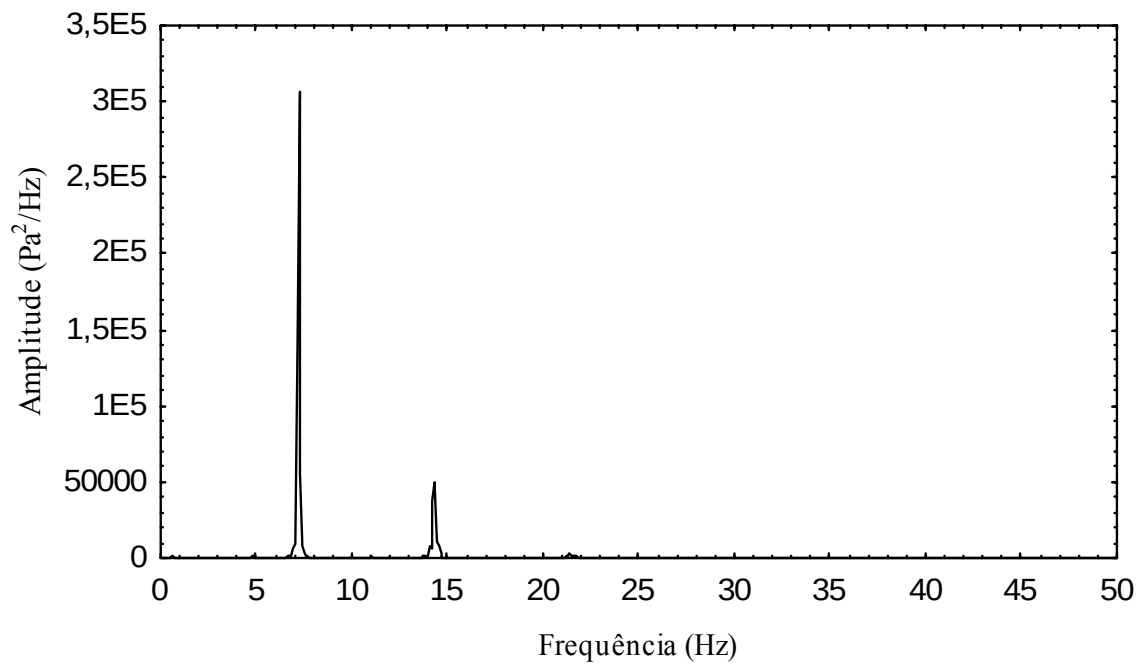


Fig 4.10.b – Espectro de potência. Jato Interno. Algodão – H15. $U = 6,1$ m/s.

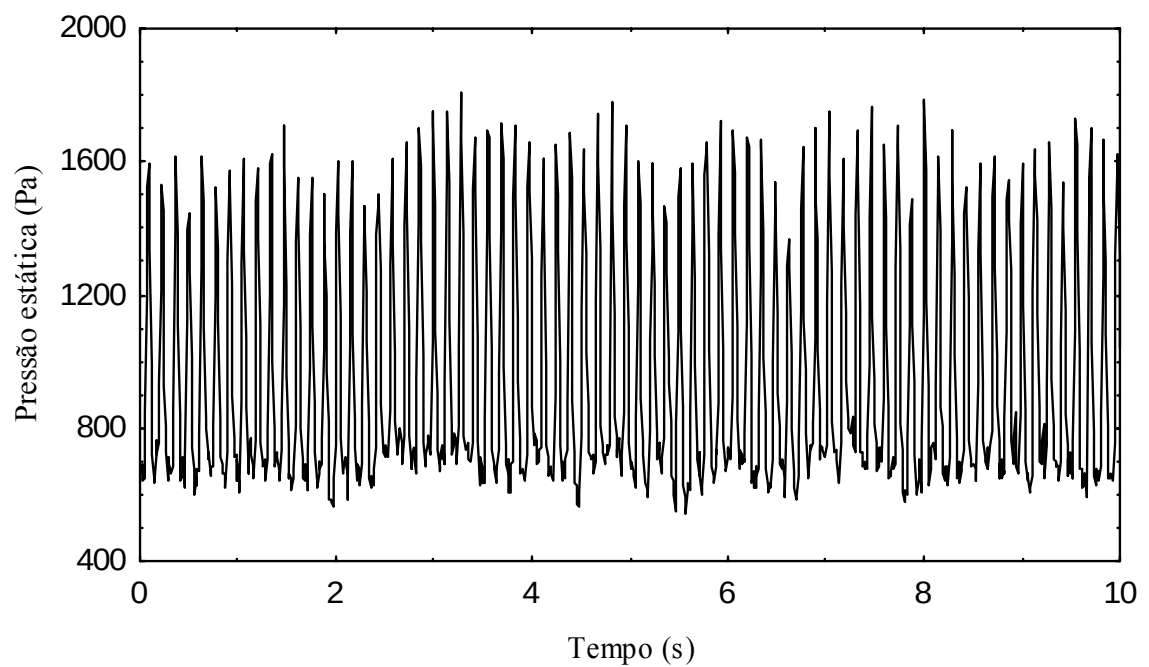


Fig. 4.10 c - Flutuação de Pressão *versus*. Tempo. Jato Interno. Algodão – H19. $U = 7,55$ m/s

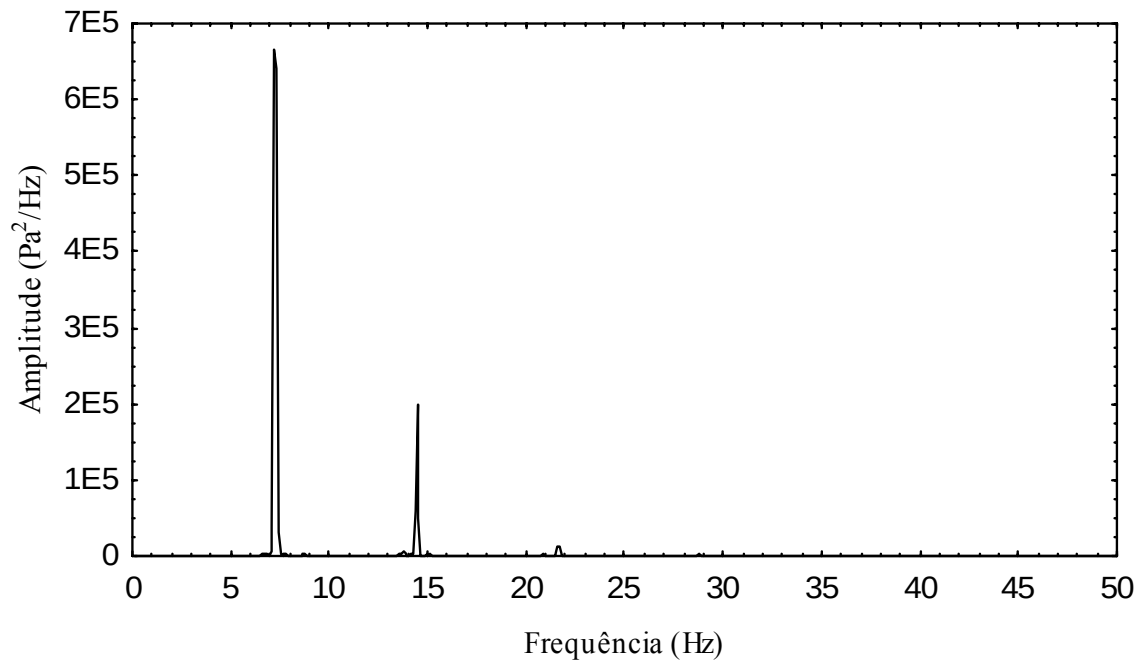


Fig 4.10.d – Espectro de potência. Jato Interno. Algodão – H19. $U = 7,55$ m/s.

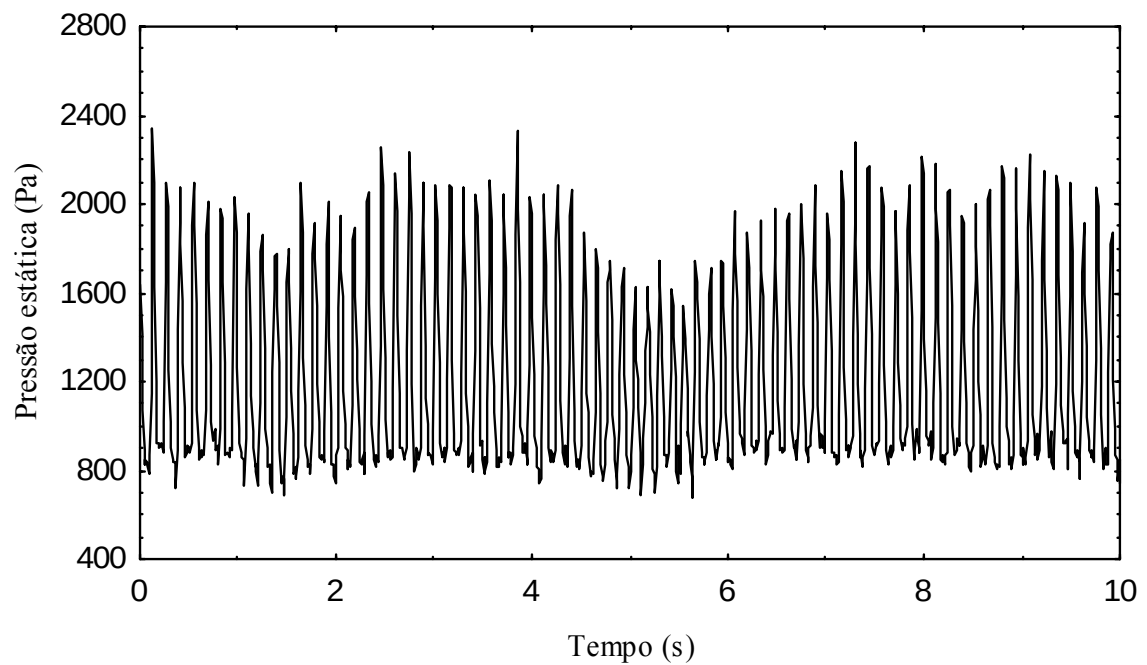


Fig. 4.10 e - Flutuação de Pressão *versus*. Tempo. Jato Interno. Algodão – H22. $U = 10$ m/s

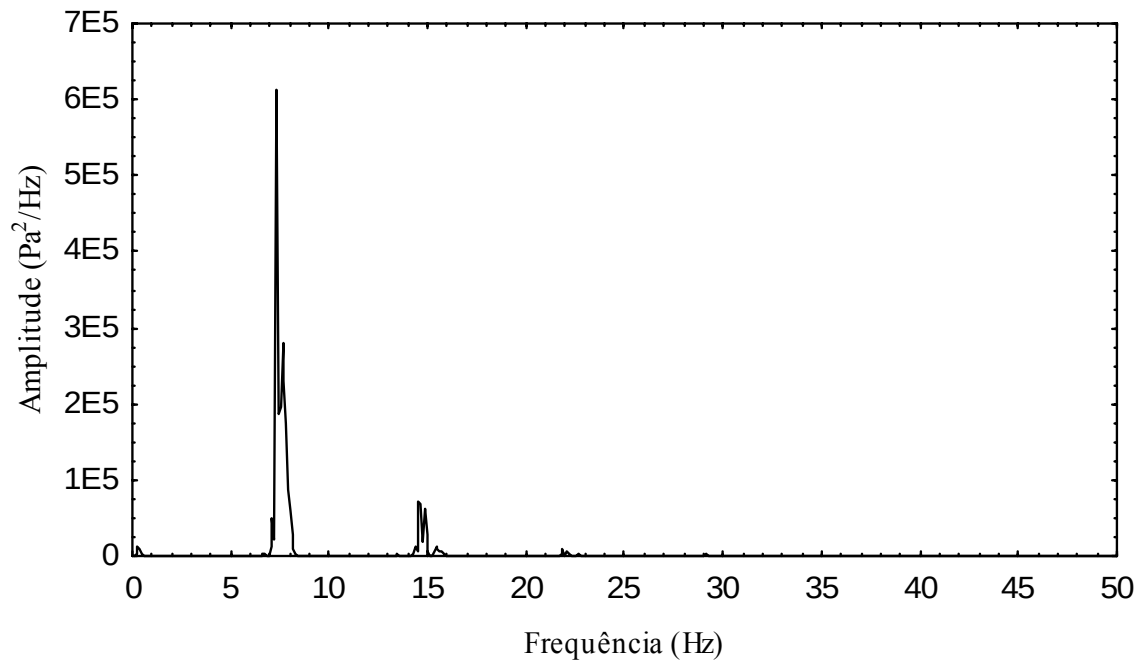


Fig 4.10.f – Espectro de potência. Jato Interno. Algodão – H22. $U = 10 \text{ m/s}$.

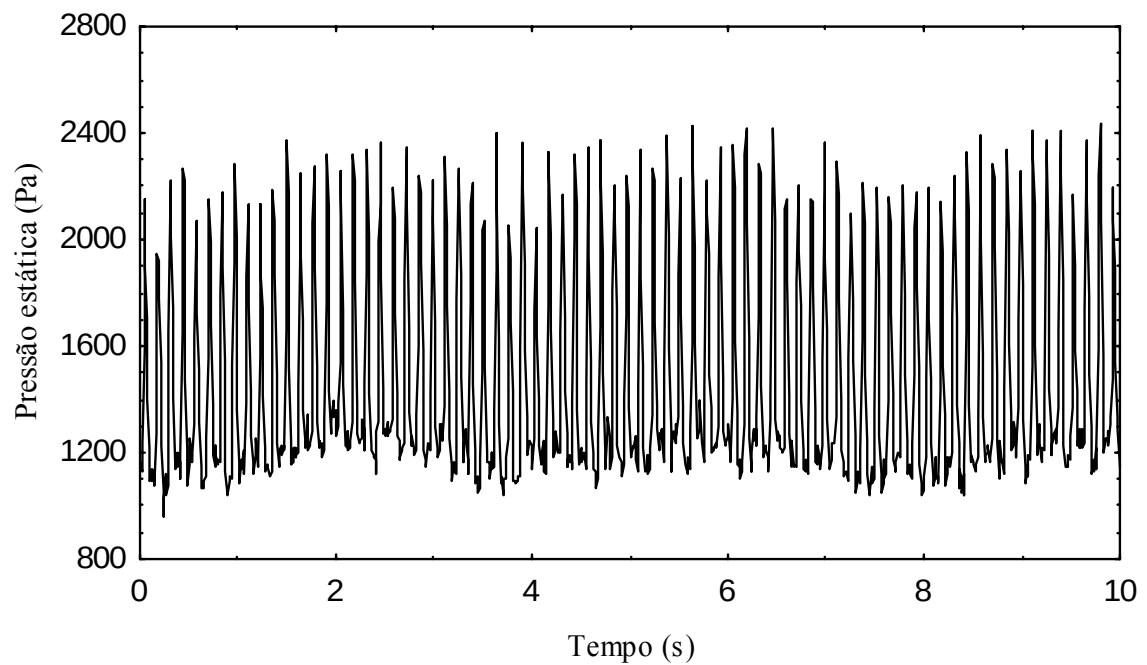


Fig. 4.10 g - Flutuação de Pressão *versus* Tempo – Jato Interno. Algodão – H25. $U = 8,75 \text{ m/s}$

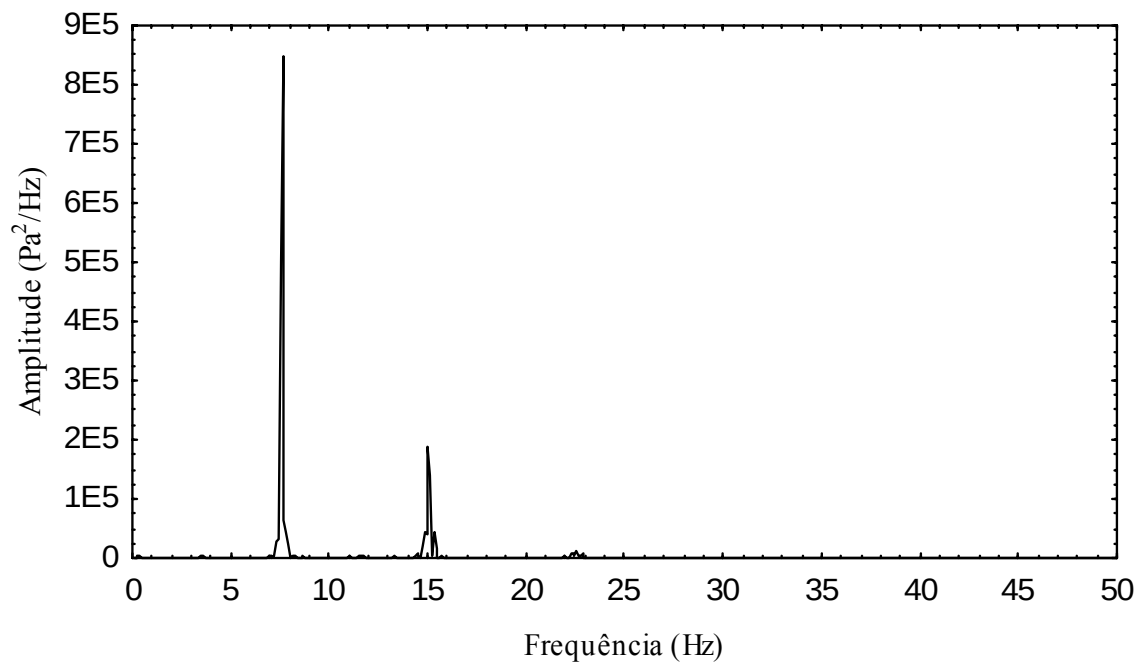


Fig 4.10.h – Espectro de potência. Jato Interno. Algodão – H25. $U=8,75$ m/s.

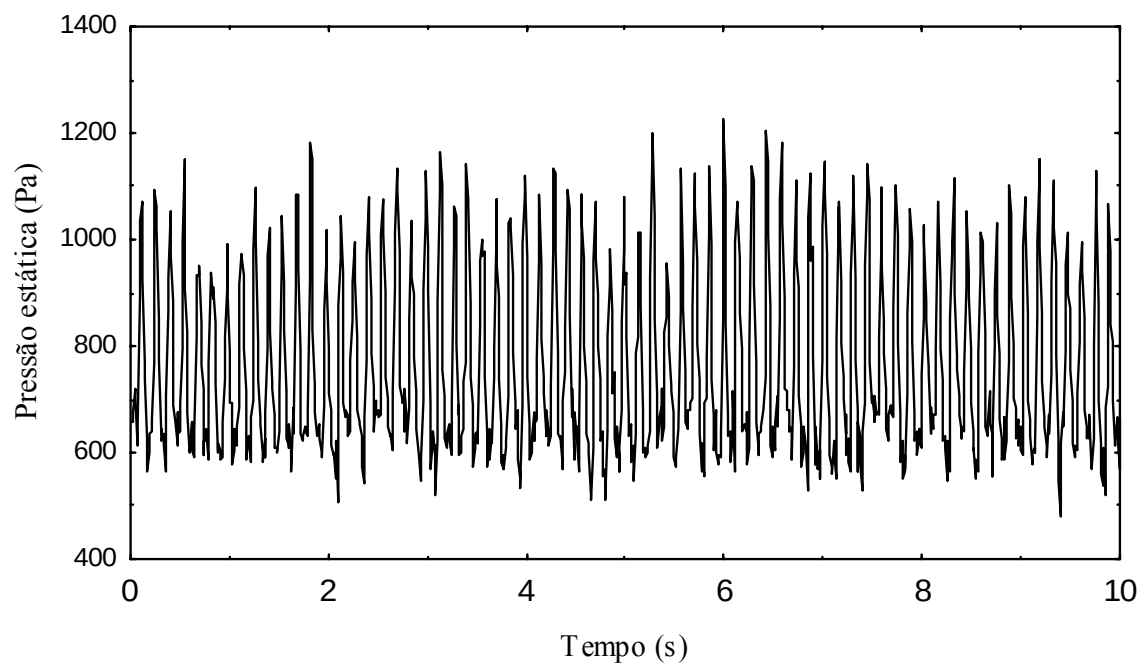


Fig. 4.11 a - Flutuação de Pressão versus Tempo. Jato Interno. Soja – H15. $U = 6,6$ m/s

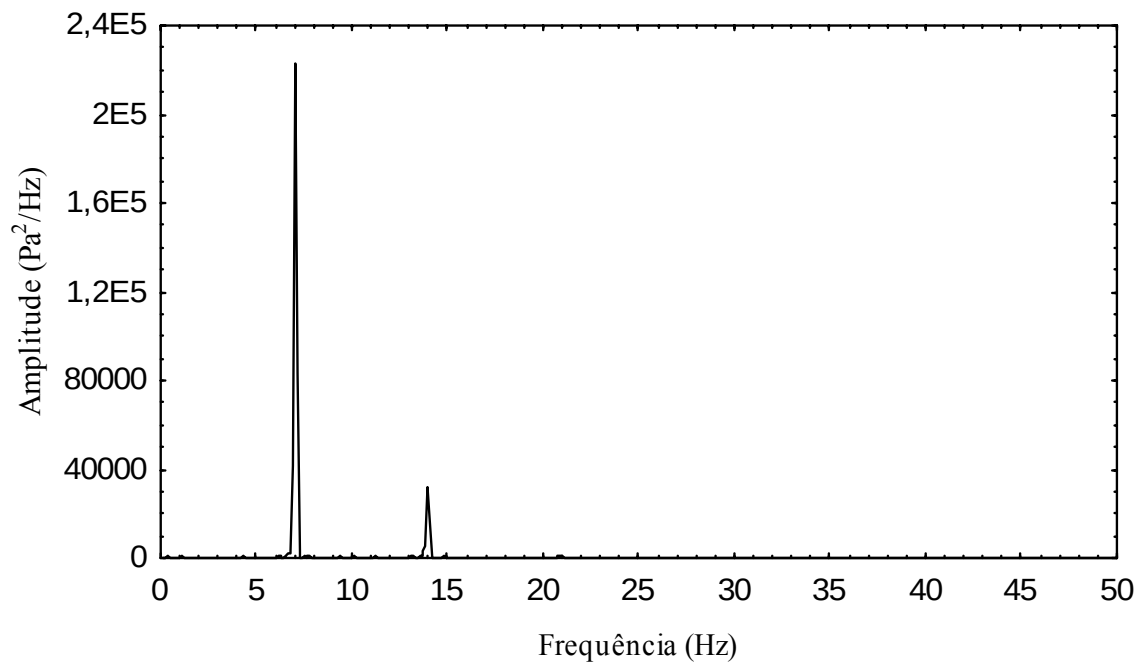


Fig 4.11 b – Espectro de potência. Jato Interno. Soja – H15. $U = 6,6$ m/s.

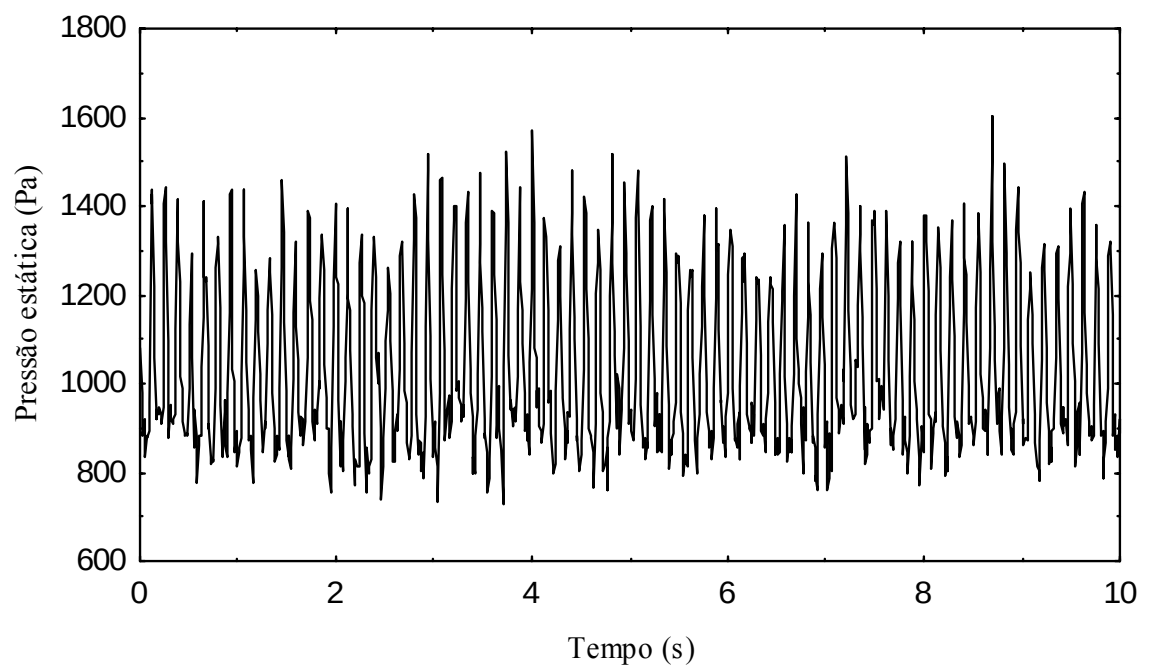


Fig. 4.11 c - Flutuação de Pressão *versus* Tempo. Jato Interno. Soja – H19. $U = 8,5$ m/s

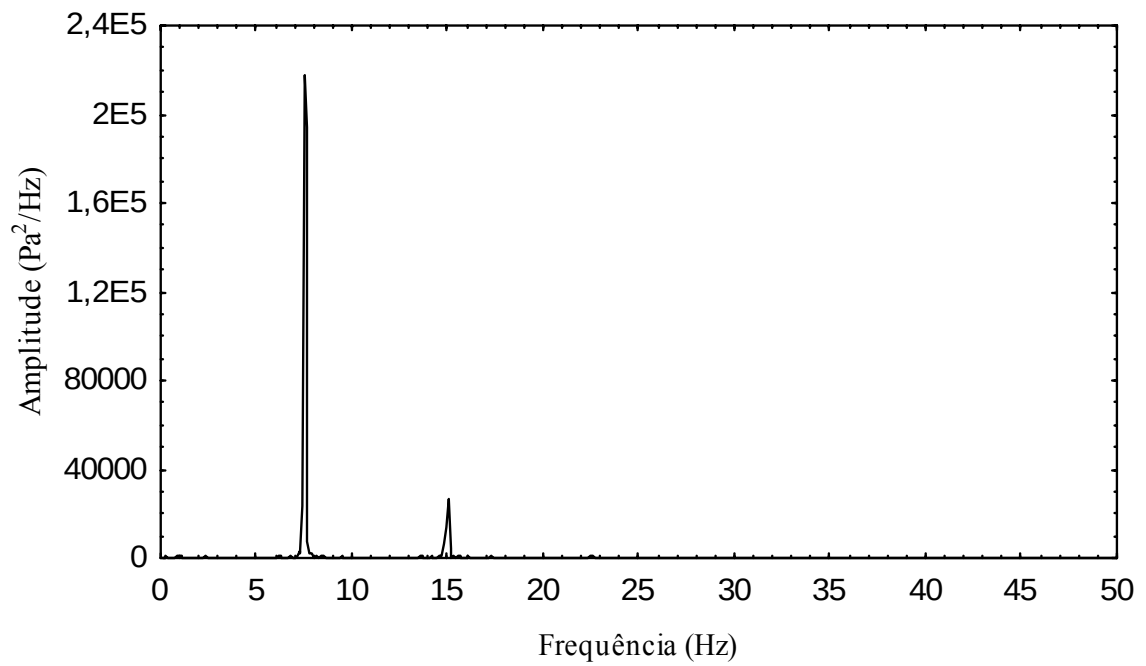


Fig 4.11 d – Espectro de potência. Jato Interno. Soja – H19. $U = 8,5$ m/s.

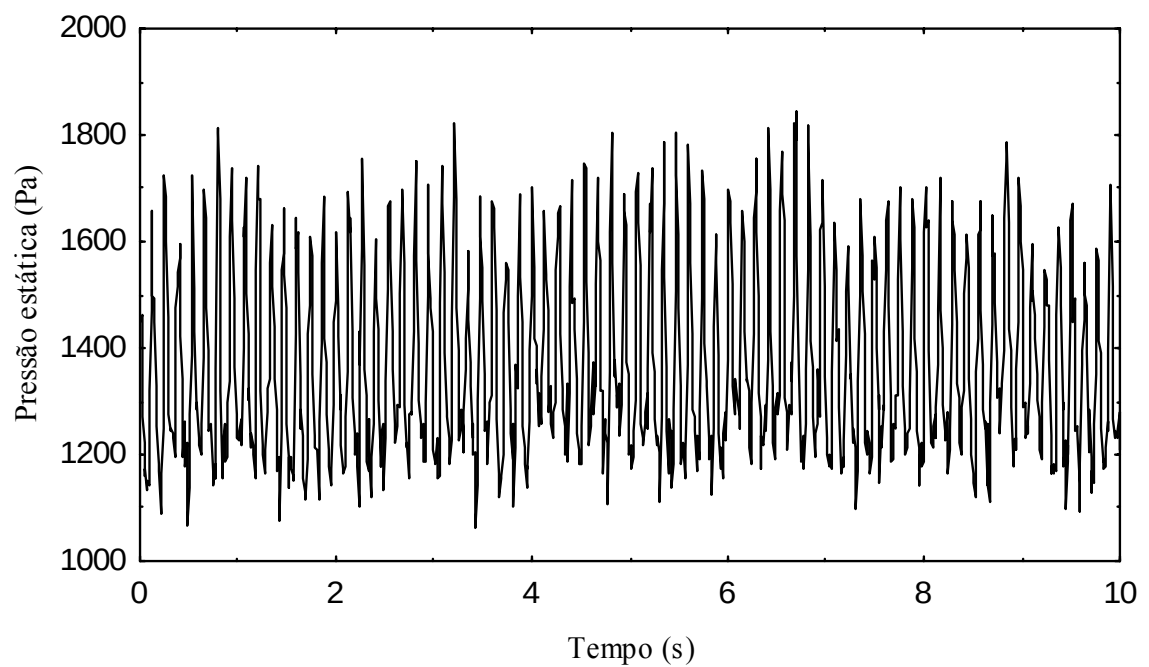


Fig. 4.11 e - Flutuação de Pressão *versus* Tempo. Jato Interno. Soja – H22. $U = 8,15$ m/s

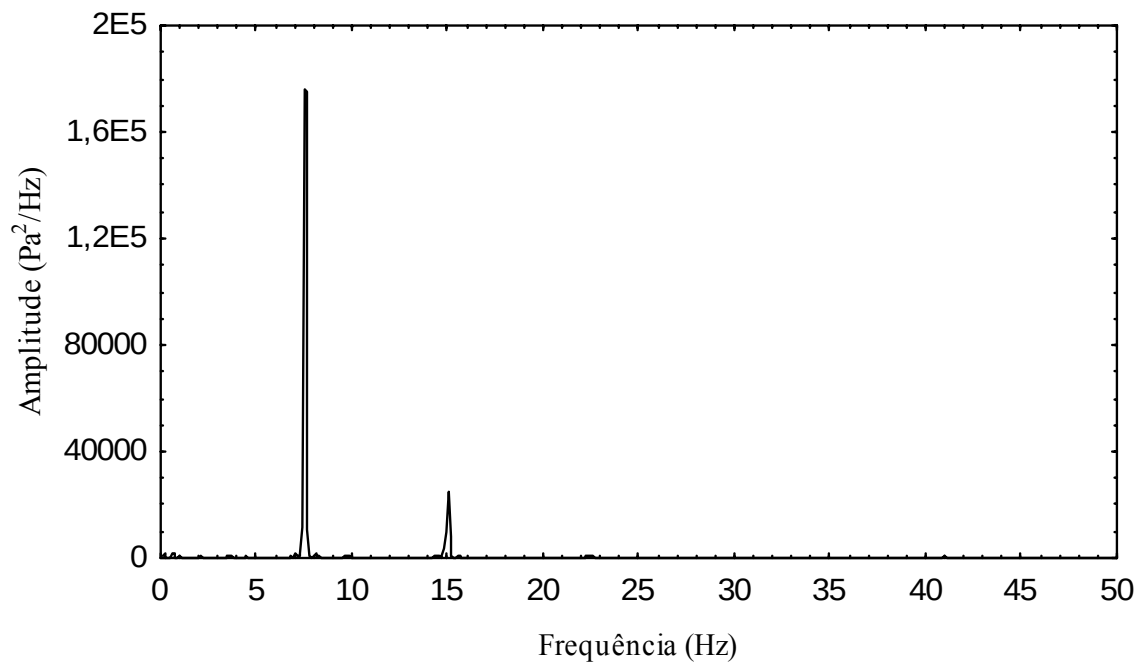


Fig 4.11 f – Espectro de potência. Jato Interno. Soja – H22. $U = 8,15$ m/s.

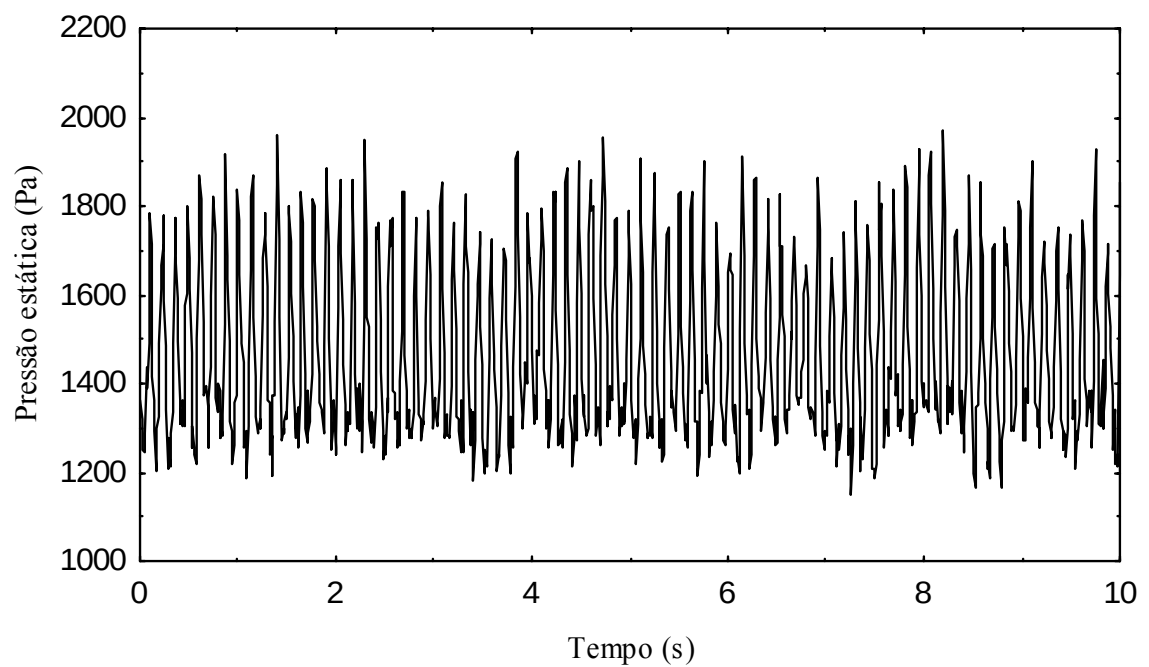


Fig. 4.11 g - Flutuação de Pressão *versus*. Tempo. Jato Interno. Soja – H25. $U = 9,4$ m/s

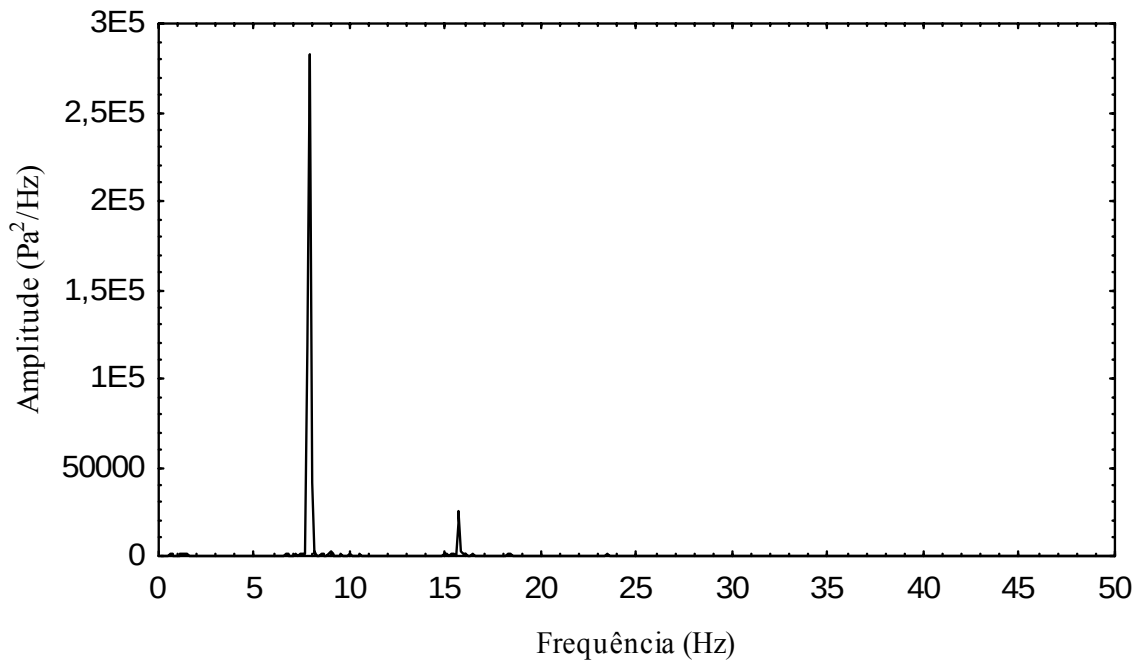


Fig 4.11 h – Espectro de potência. Jato Interno. Soja – H25. $U = 9,4$ m/s.

4.5.4 – Jorro Estabelecido

No caso da região de jorro estabelecido, observou-se uma banda de frequência dominante na região entre 6Hz e 7Hz, para todos os materiais estudados. XU *et al* (2004), trabalhando com jorro convencional, operando com esferas de vidro, encontrou bandas dominantes de frequência na região de 6Hz a 8Hz. Já pesquisadores como TARANTO (1996), trabalhando com leitos bidimensionais encontraram frequências dominantes na faixa de 5Hz, o mesmo acontecendo com FREITAS *et al* (2000), que utilizou esferas de vidro, também, em leitos bidimensionais e SILVA (1998), que estudando o monitoramento da fluidodinâmica de diversos materiais sintéticos em leito de jorro convencional.

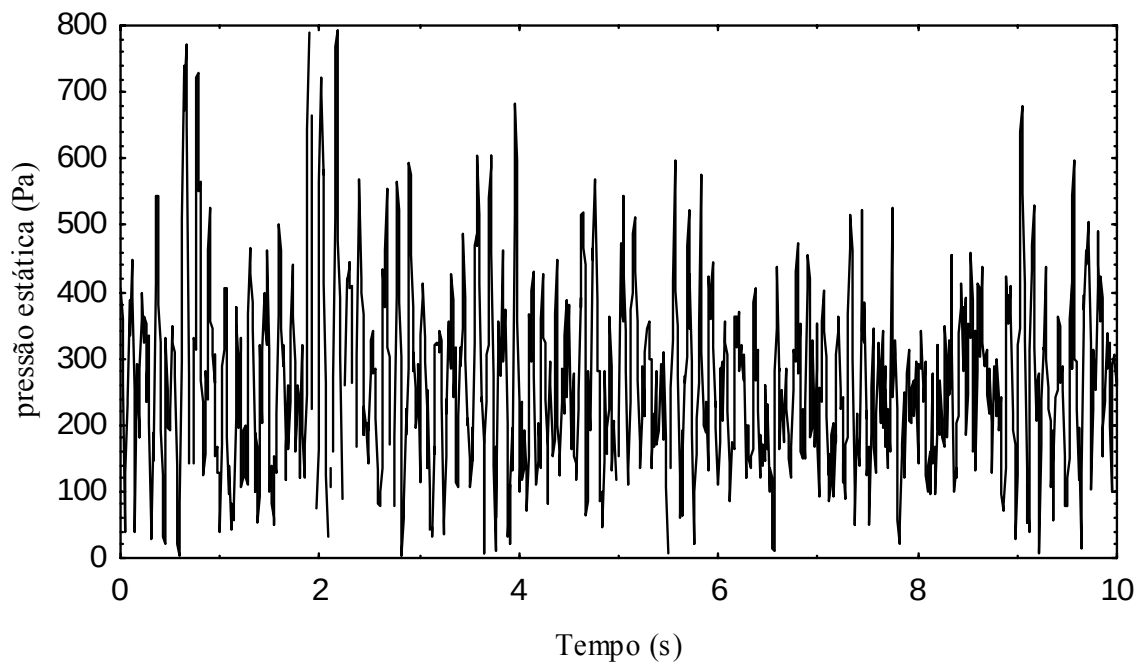


Fig. 4.12 a - Flutuação de Pressão *versus* Tempo. Jorro Estabelecido. Algodão – H15. $U = 13,1\text{m/s}$

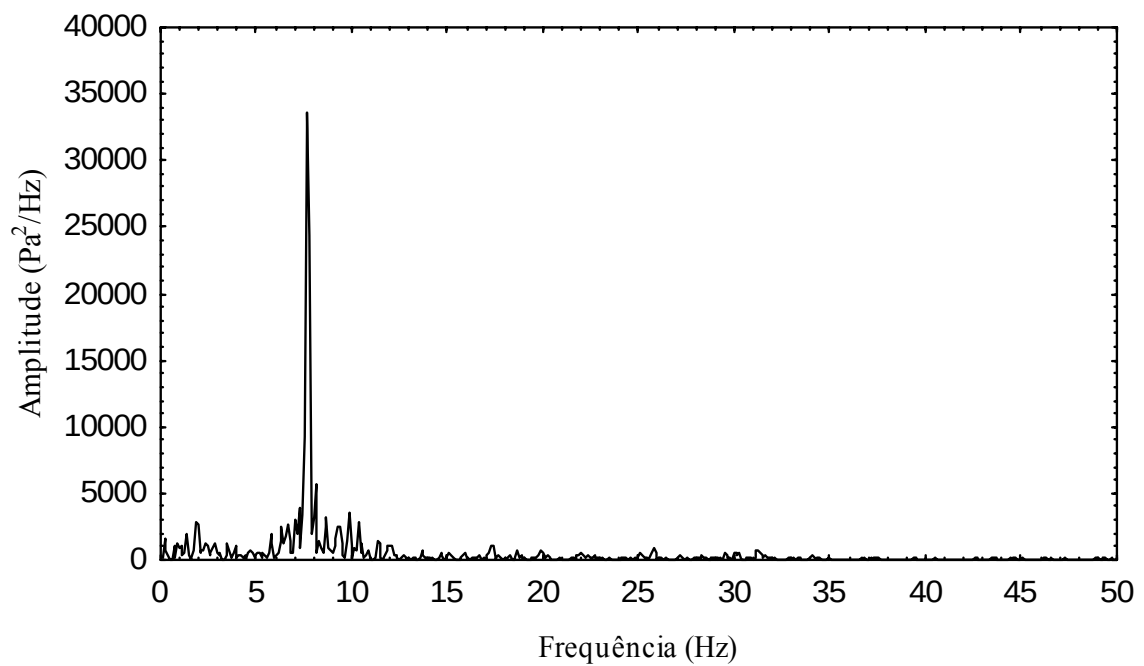


Fig 4.12.b – Espectro de potência. Jorro Estabelecido. Algodão – H15. $U=13,1\text{ m/s}$.

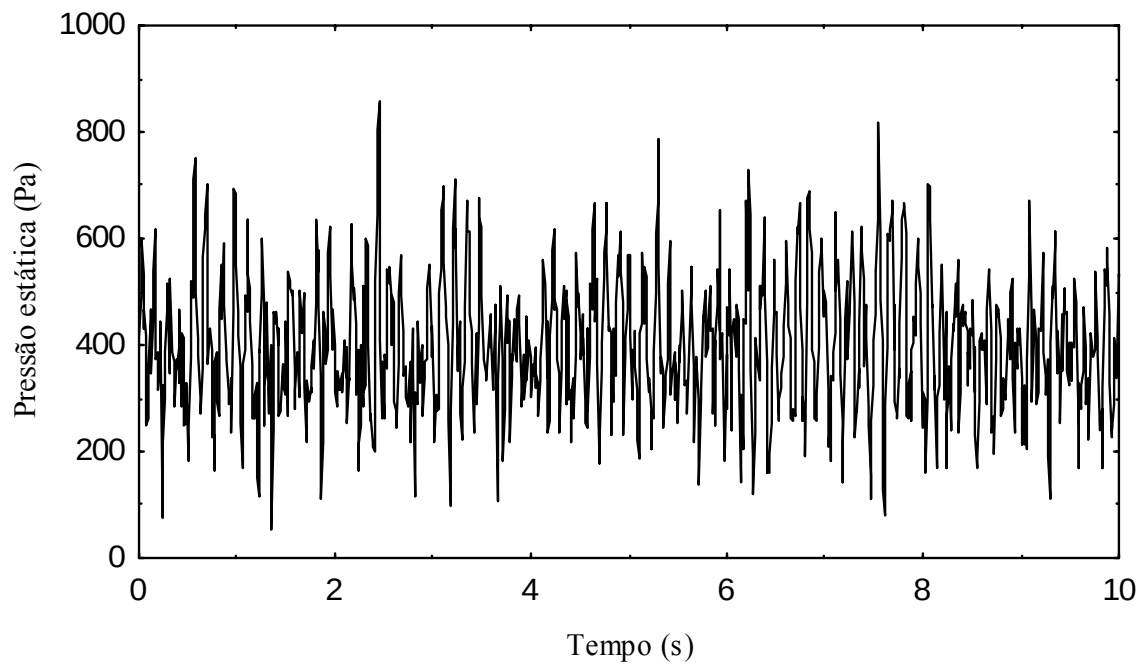


Fig. 4.12 c - Flutuação de Pressão *versus* Tempo. Jorro Estabelecido. Algodão – H19. $U = 16,1\text{m/s}$

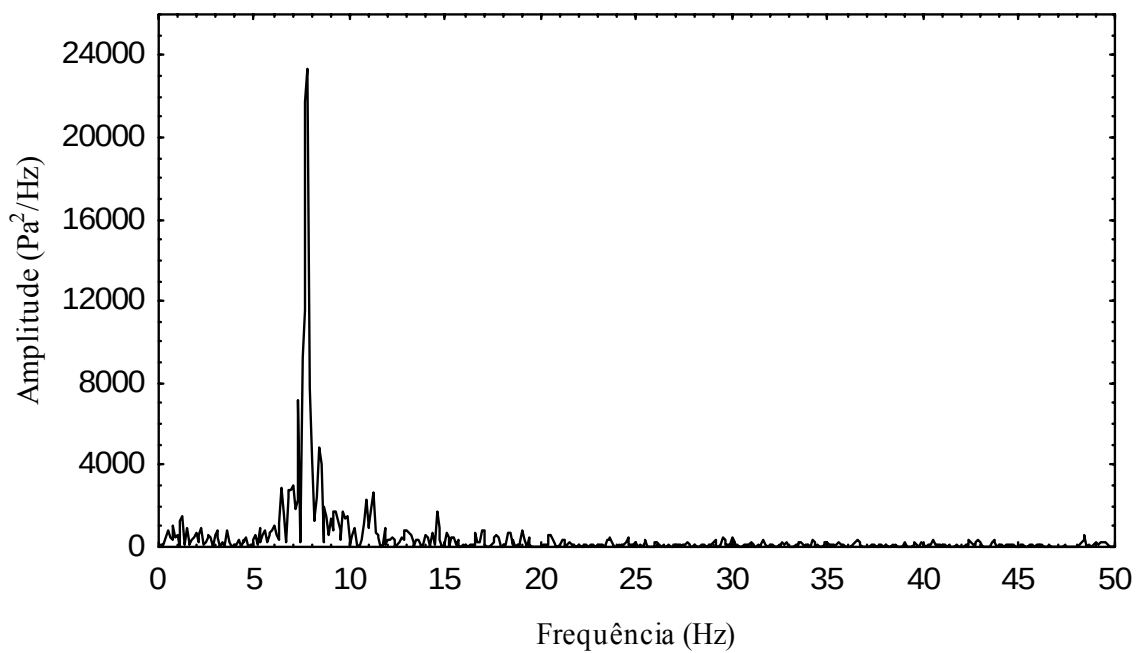


Fig 4.12.d – Espectro de potência. Jorro Estabelecido. Algodão – H19. $U=16,1\text{ m/s}$.

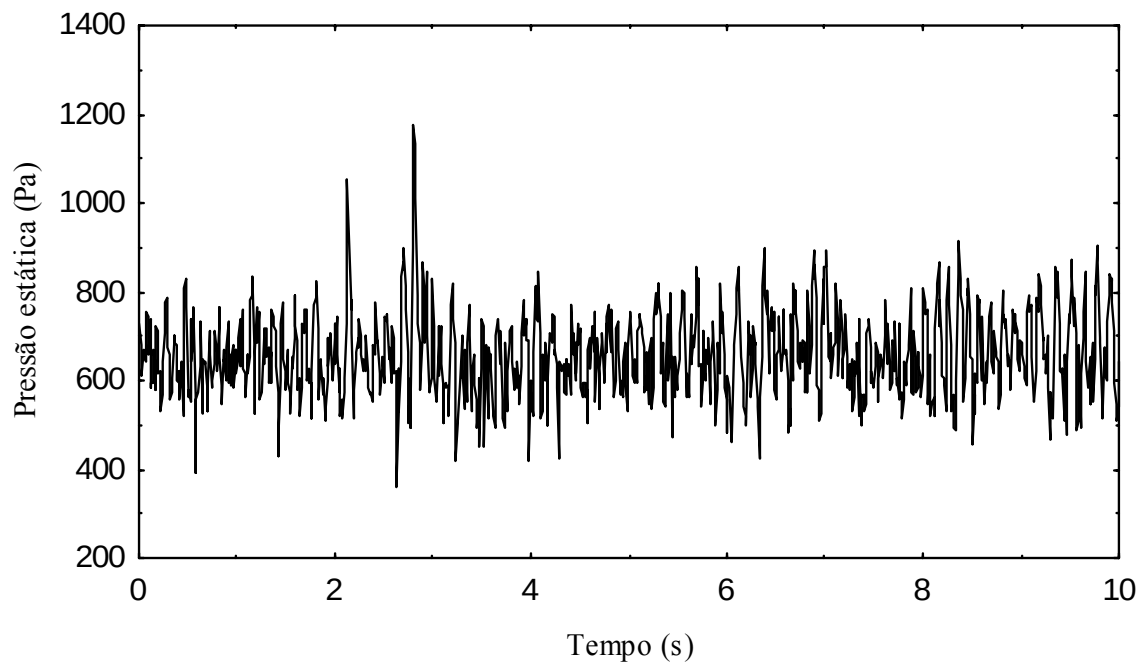


Fig. 4.12 e - Flutuação de Pressão *versus* Tempo. Jorro Estabelecido. Algodão – H22. $U = 15,6\text{m/s}$

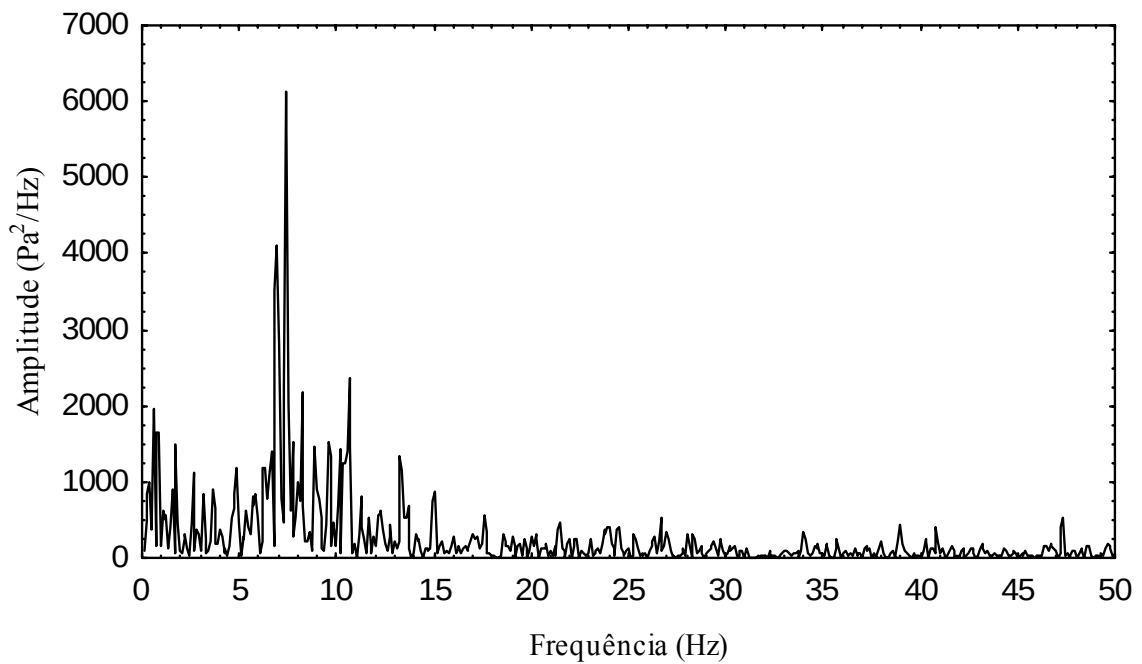


Fig 4.12.f – Espectro de potência. Jorro Estabelecido. Algodão – H22. $U=15,6\text{ m/s}$.

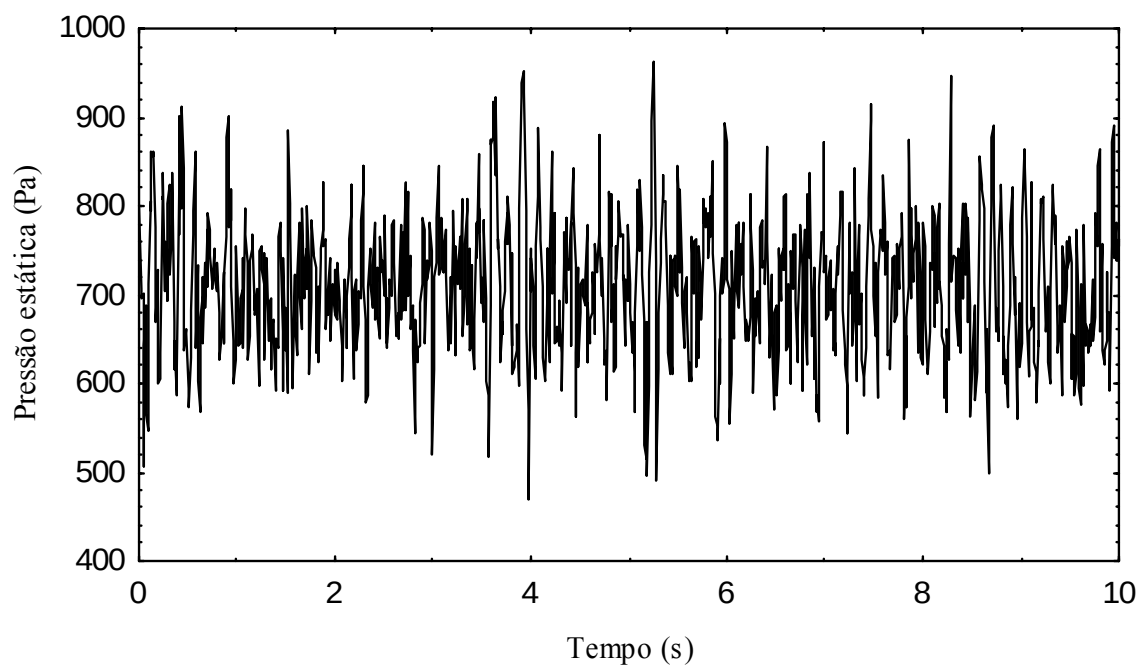


Fig. 4.12 g - Flutuação de Pressão *versus*. Tempo – Jorro Estabelecido. Algodão – H25. $U = 16,7\text{m/s}$

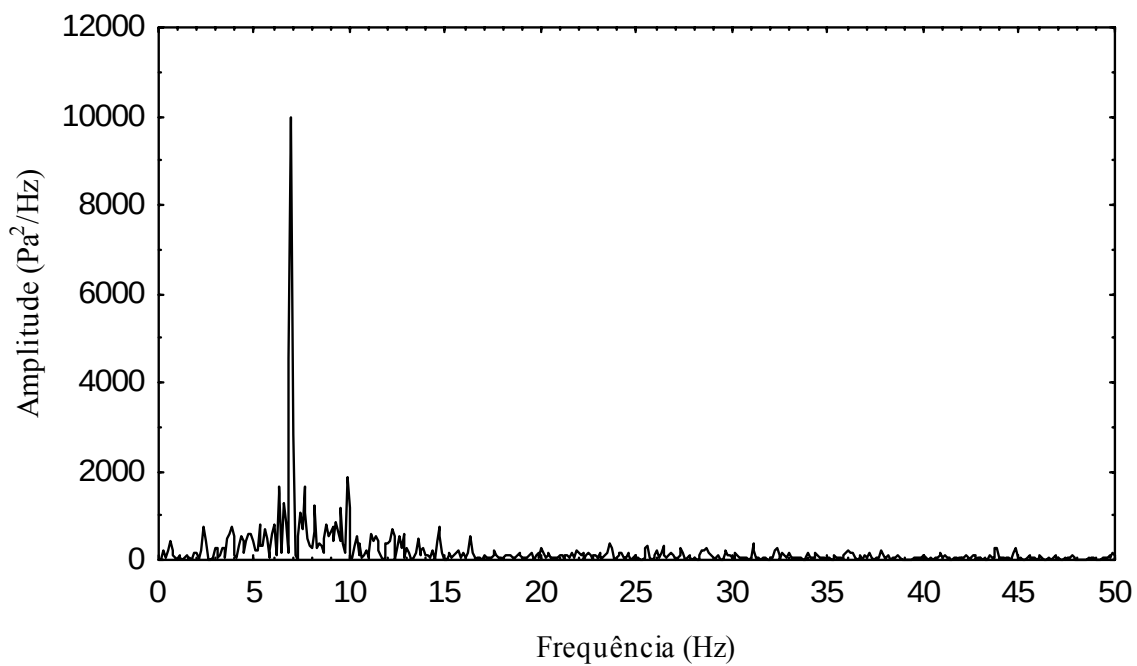


Fig 4.12.h – Espectro de potência. Jorro Estabelecido. Algodão – H25. $U=16,7\text{ m/s}$.

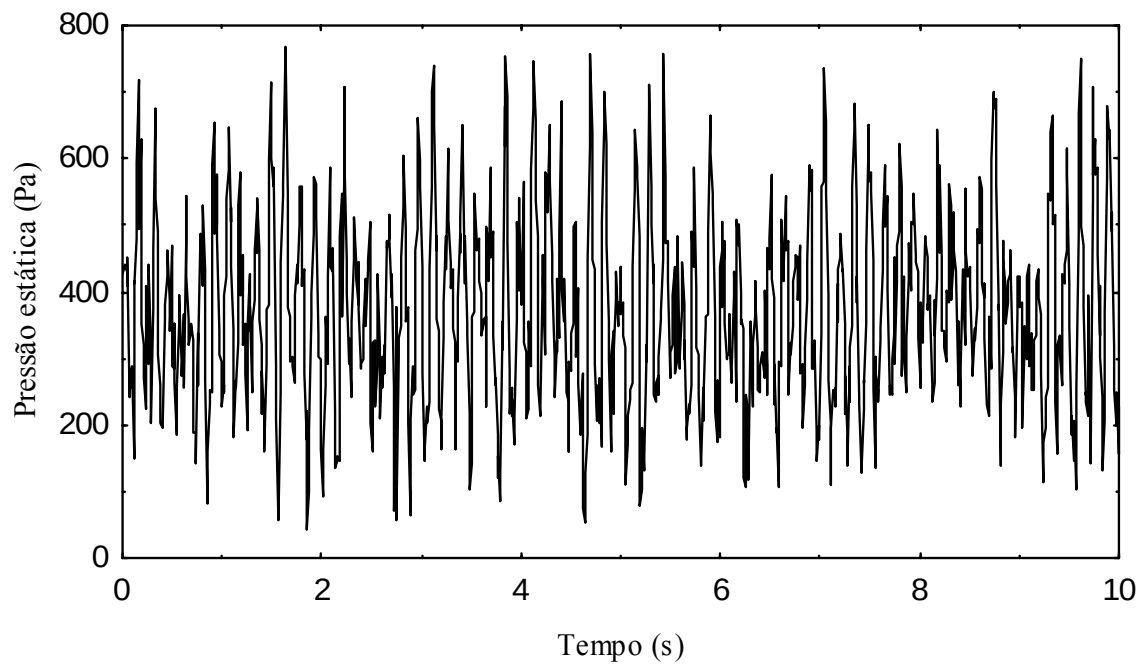


Fig. 4.13 a - Flutuação de Pressão *versus*. Tempo. Jorro Estabelecido. Soja – H15. $U = 13,9\text{m/s}$

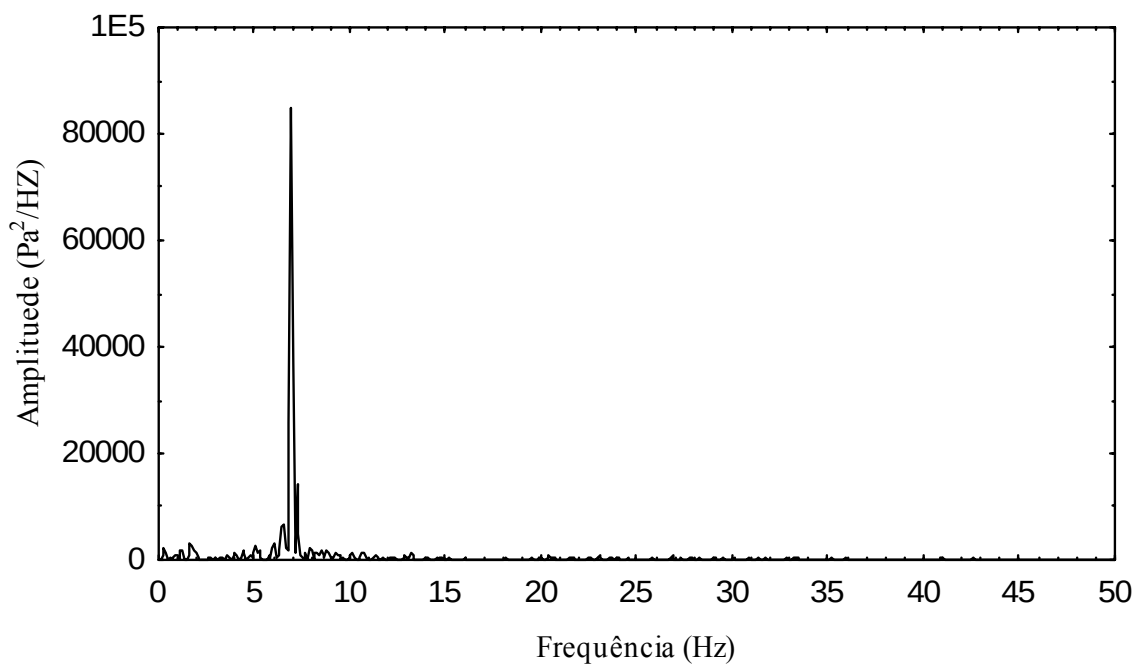


Fig 4.13 b – Espectro de potência. Jorro Estabelecido. Soja – H15. $U=13,9\text{ m/s}$.

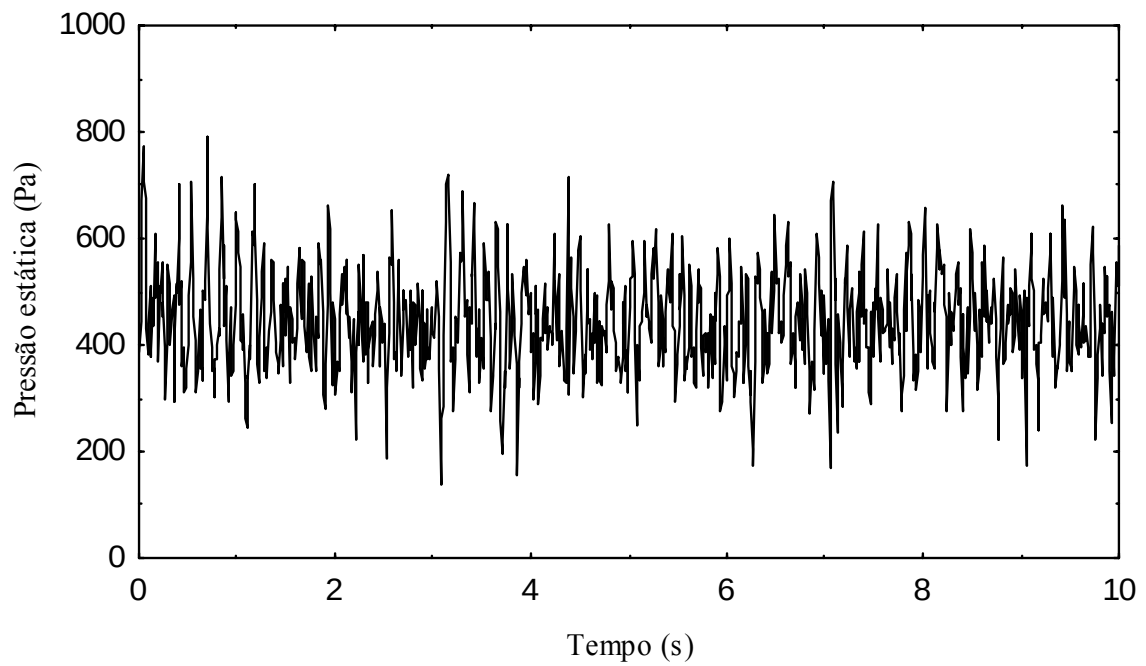


Fig. 4.13 c - Flutuação de Pressão *versus*. Tempo. Jorro Estabelecido. Soja – H19. $U = 17,5\text{m/s}$

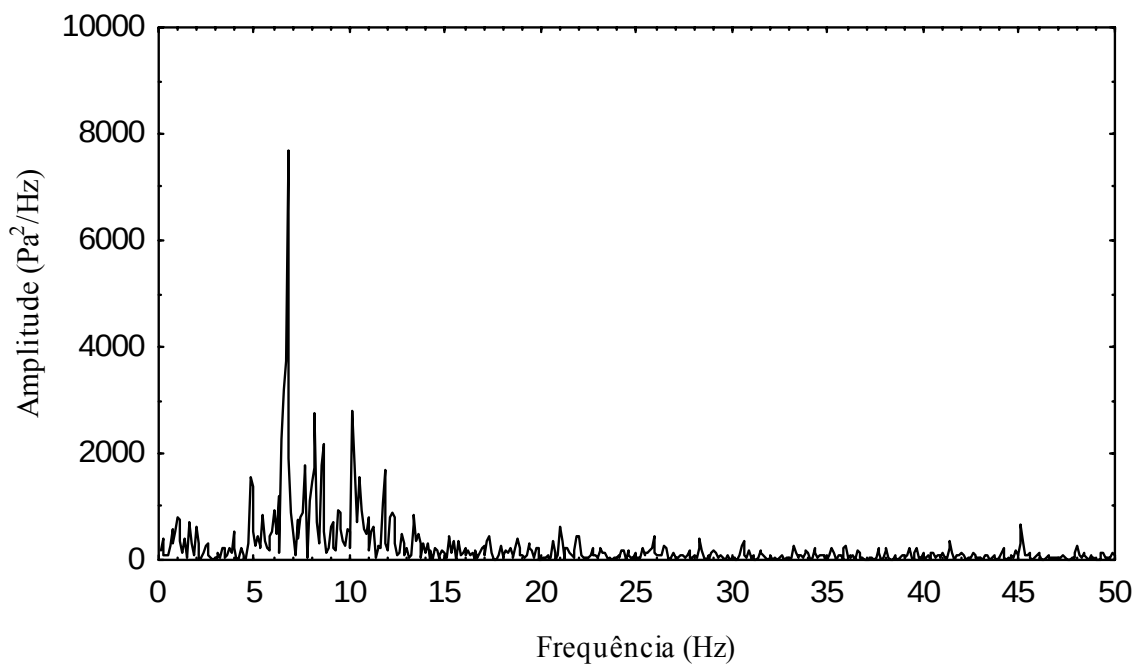


Fig 4.13 d – Espectro de potência. Jorro Estabelecido. Soja – H19. $U=17,5\text{ m/s}$.

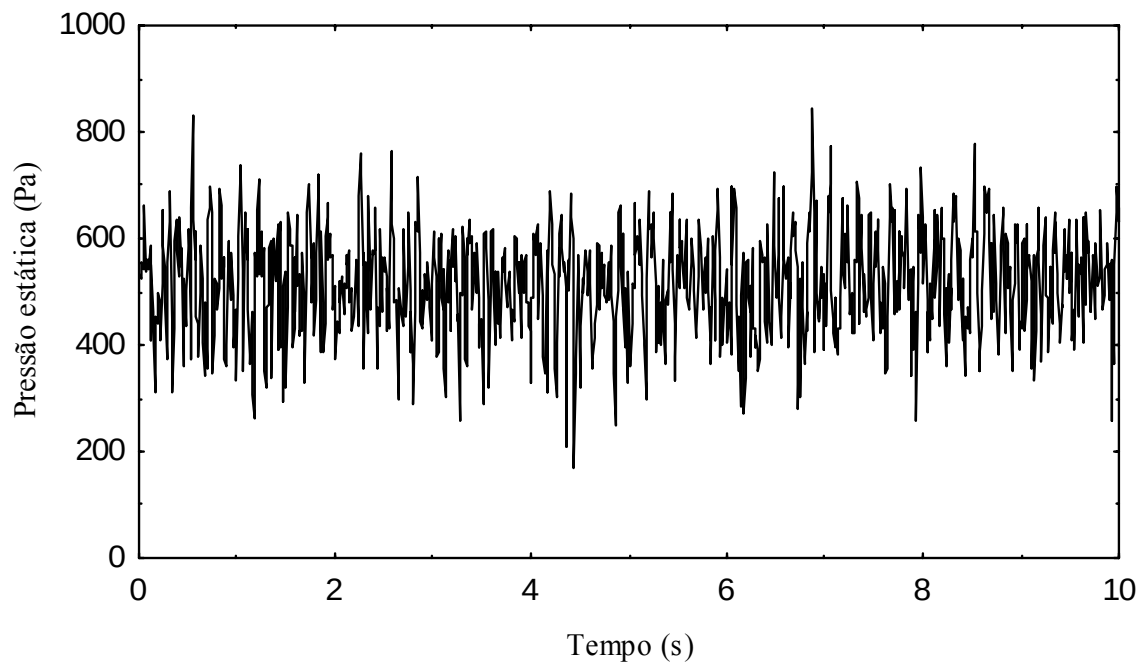


Fig. 4.13 e - Flutuação de Pressão *versus*. Tempo. Jorro Estabelecido. Soja – H22. $U = 20,5\text{m/s}$

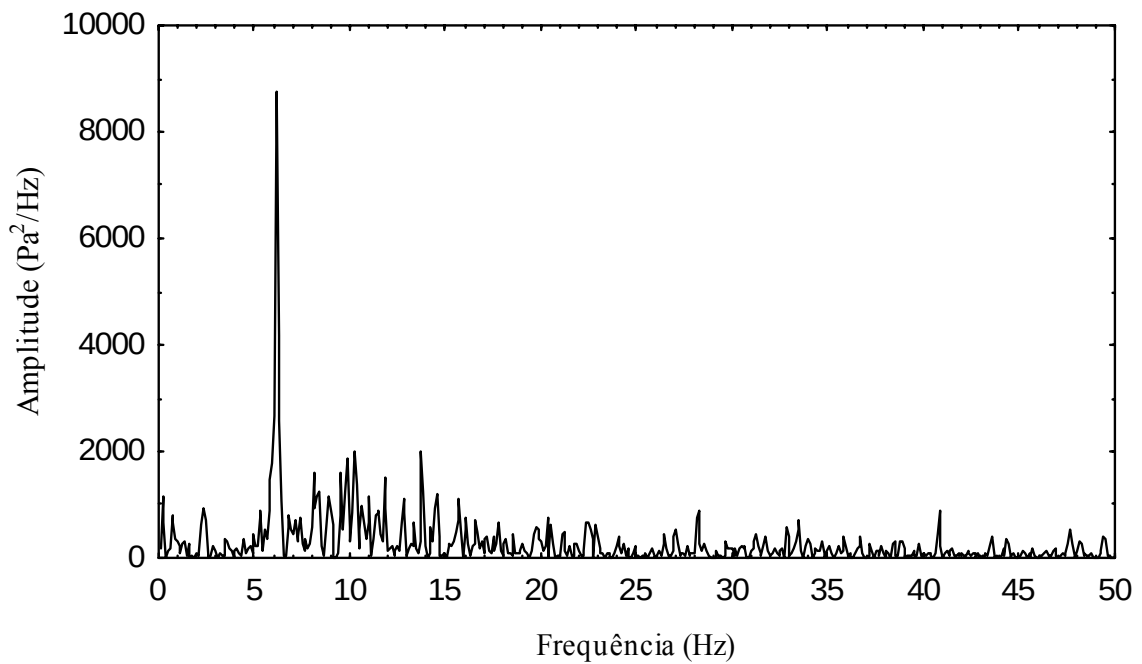


Fig 4.13 f – Espectro de potência. Jorro Estabelecido. Soja – H22. $U=20,5\text{ m/s}$.

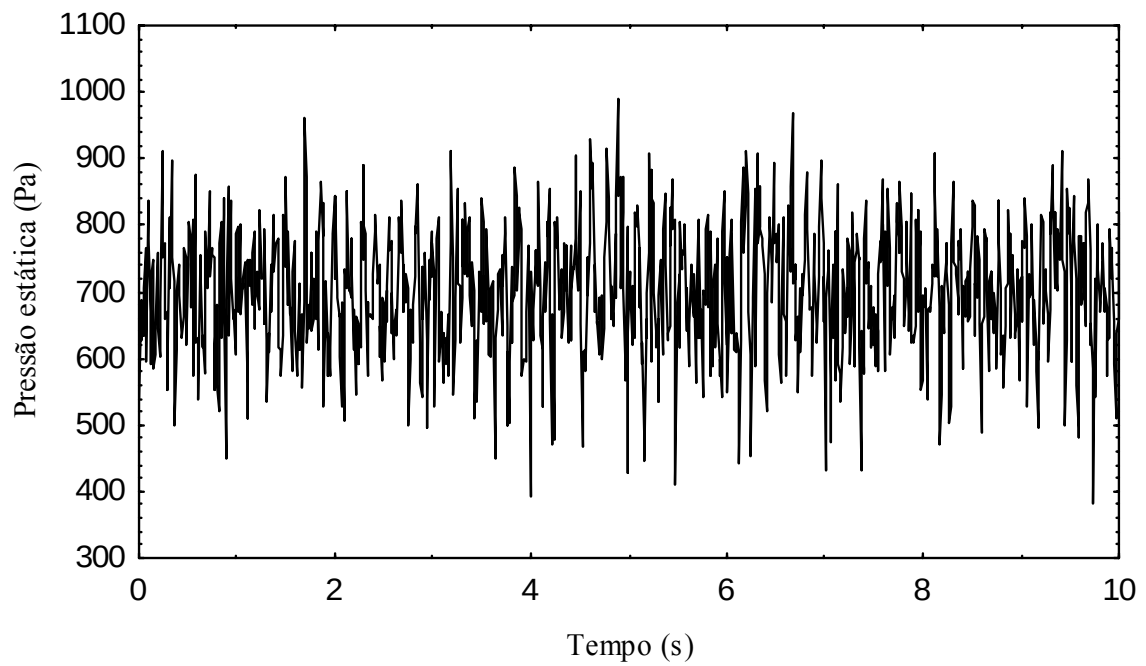


Fig. 4.13 g - Flutuação de Pressão *versus* Tempo. Jorro Estabelecido. Soja – H25. $U = 19,9\text{m/s}$

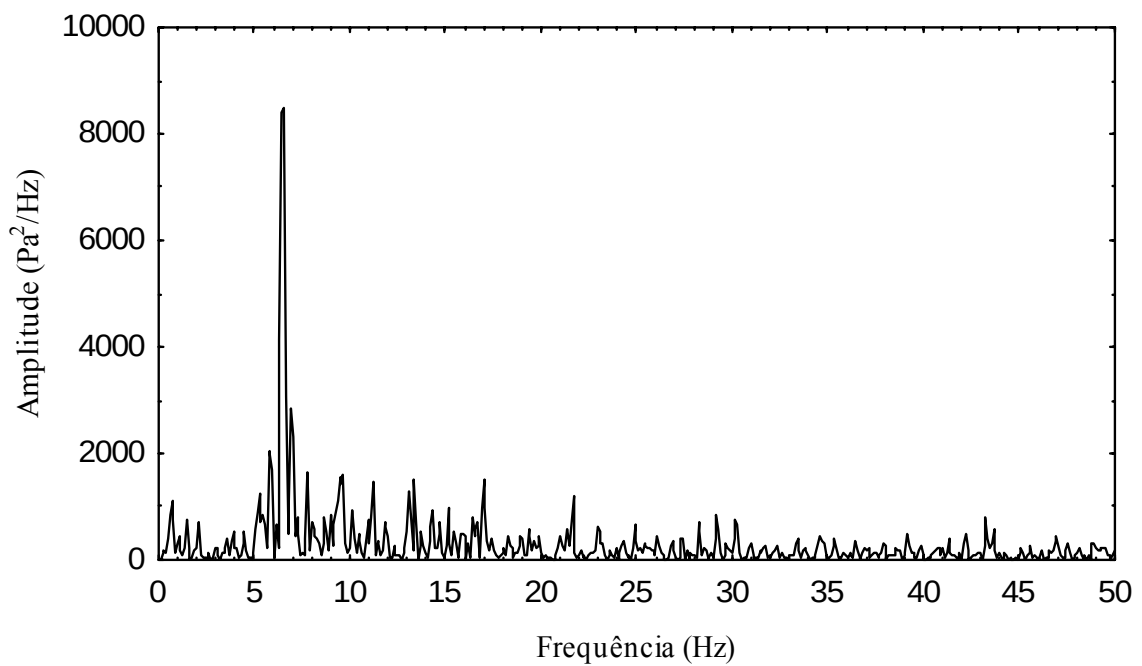


Fig 4.13 h – Espectro de potência. Jorro Estabelecido. Soja – H25. $U=19,9\text{ m/s}$.

4.6- Resultados das simulações em CFD

Uma vez realizados os experimentos, foi escolhida de forma aleatória uma altura para simulação, através da técnica de fluidodinâmica computacional (CFD), com o auxílio do *software* comercial FLUENT (versão - 6.1.18). Os resultados referentes às simulações do leito de jorro convencional para altura de 19 cm, carregados com sementes de soja e algodão, são apresentados a seguir.

As Figuras 4.14.a e 4.14.b referem-se à comparação das curvas características simuladas em CFD para soja e algodão, frente aos dados experimentais obtidos no sistema de aquisição para o leito com $H_0 = 19$ cm. Nota-se pelas Figuras 4.14.a e 4.14.b, uma adequada concordância entre os valores simulados e experimentais. De uma forma geral, os valores simulados ficaram posicionados de forma intermediária, em relação aos valores experimentais de vazões de ar crescentes e decrescentes. Na região de maior queda de pressão a adequação da simulação aos dados experimentais foi muito boa.

DUARTE (2004), também encontrou boa concordância entre valores experimentais e simulados, das curvas características, para leito de jorro carregado com soja.

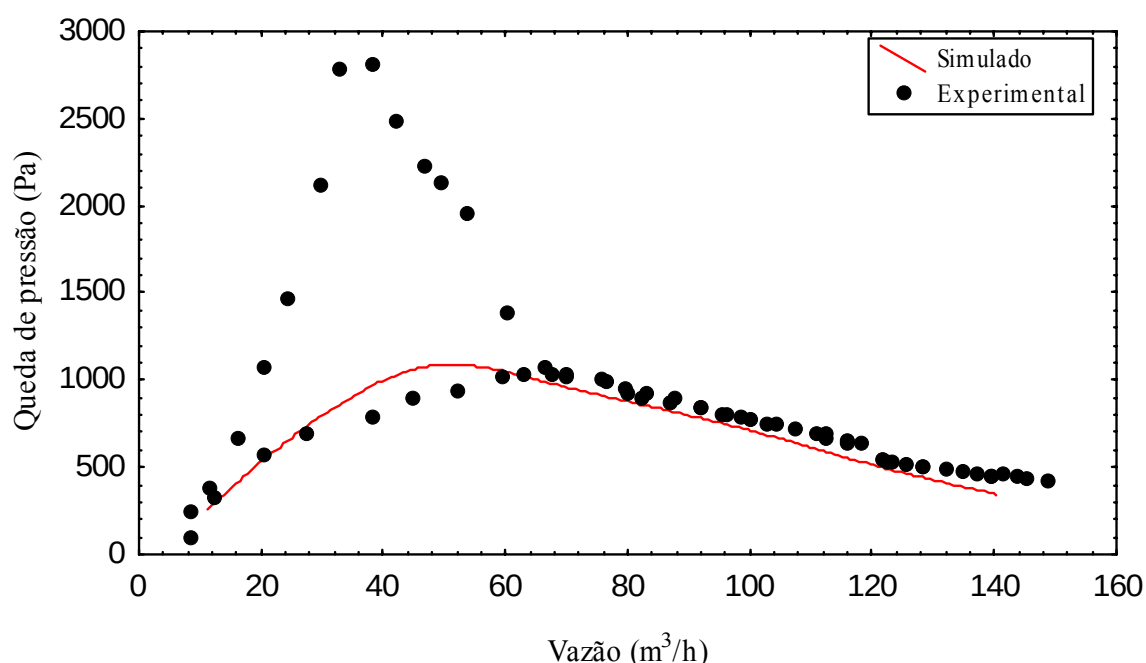


Fig. 4.14.a: Comparação da curva característica de queda de pressão *versus* vazão de ar. Sementes de Soja ($H=19$ cm)

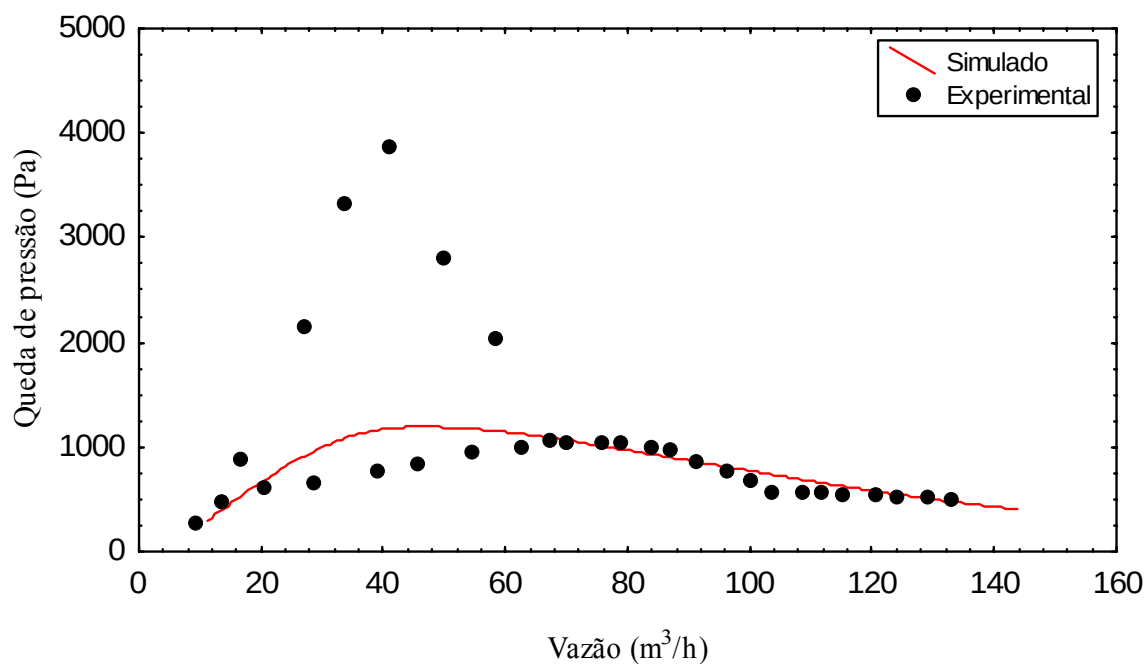


Fig. 4.14.b Comparação da curva característica de queda de pressão *versus* vazão de ar .Sementes de Algodão (H=19 cm)

As curvas características simuladas para cada situação de leito estático foram obtidas com base em simulações referentes a diferentes valores de vazão de ar alimentada no leito. Para cada simulação foram obtidos gráficos de flutuação de pressão em função do tempo. O valor da pressão adotado como resultado de cada simulação foi o valor médio. A seguir, a Figura 4.15, mostra alguns gráficos típicos usados na determinação de um ponto simulado.

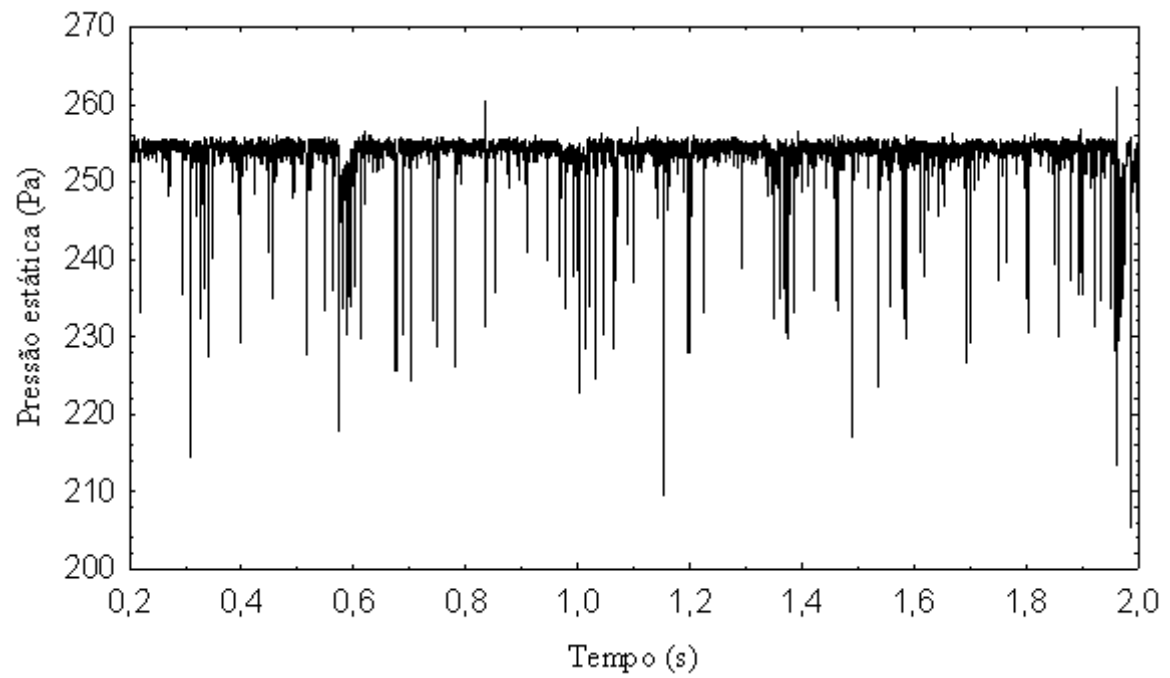


Fig. 4.15.a- Flutuação de Pressão *versus*. Tempo. Leito Fixo. Soja – H=19cm. U= 2,85m/s

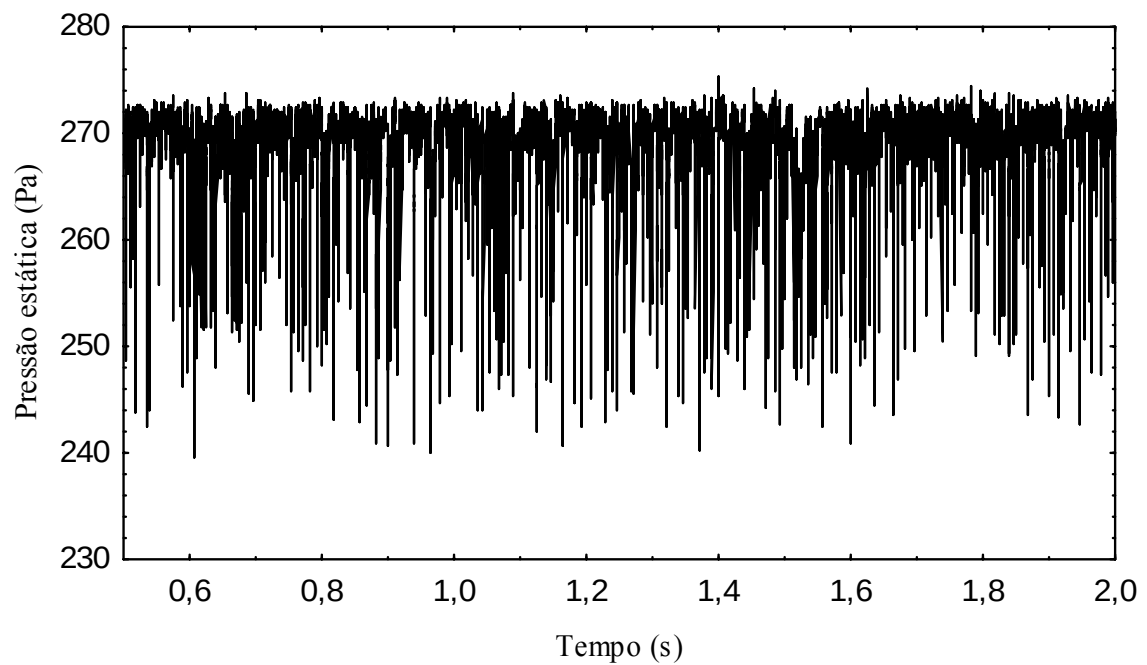


Fig. 4.15.b- Flutuação de Pressão *versus*. Tempo. Leito Fixo. Algodão – H=19cm.U=2,81 m/s.

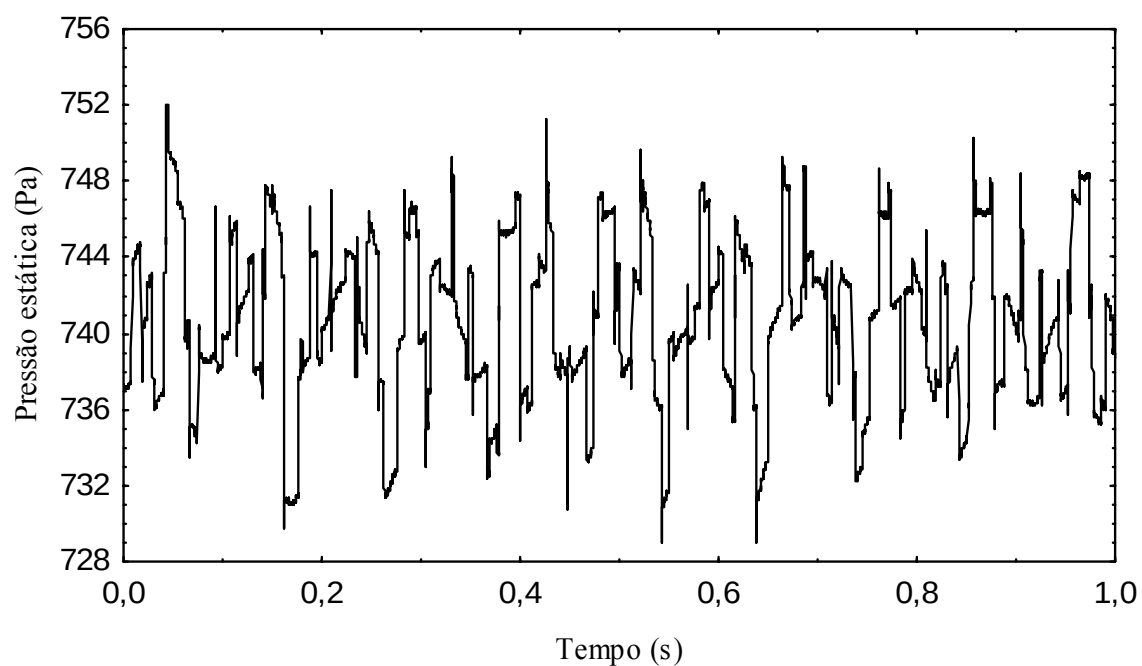


Fig. 4.15.c- Flutuação de Pressão *versus* Tempo. Jato Interno. Soja – H=19cm. U= 8,5 m/s.

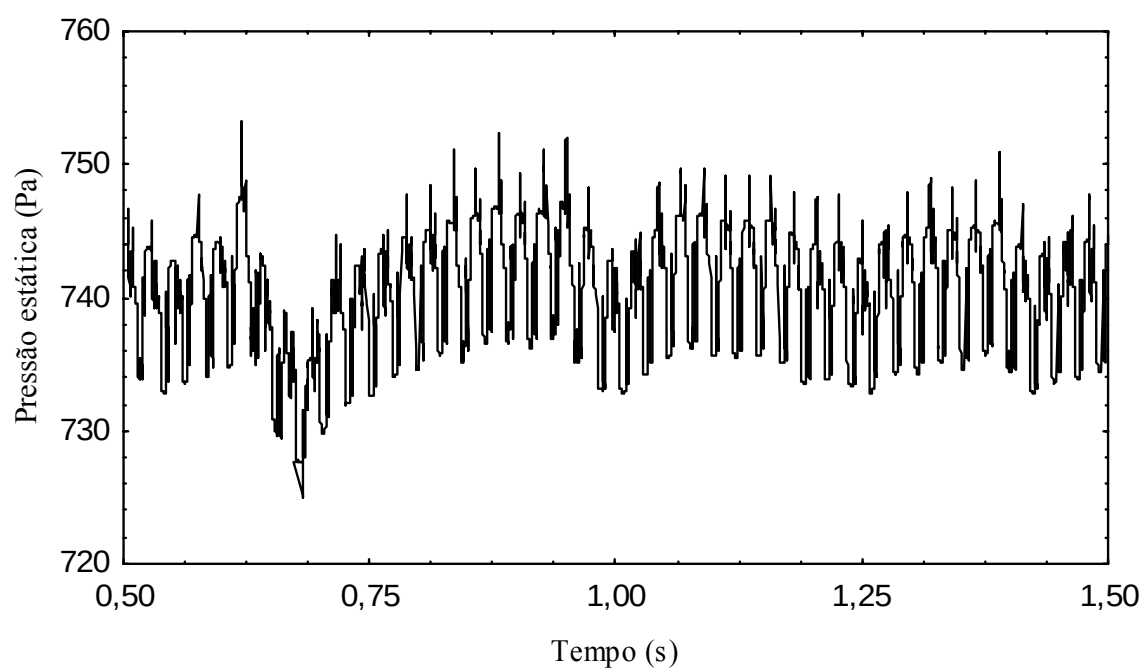


Fig. 4.15.d- Flutuação de Pressão *versus* Tempo. Jato Interno. Algodão– H=19cm. U= 7,55m/s.

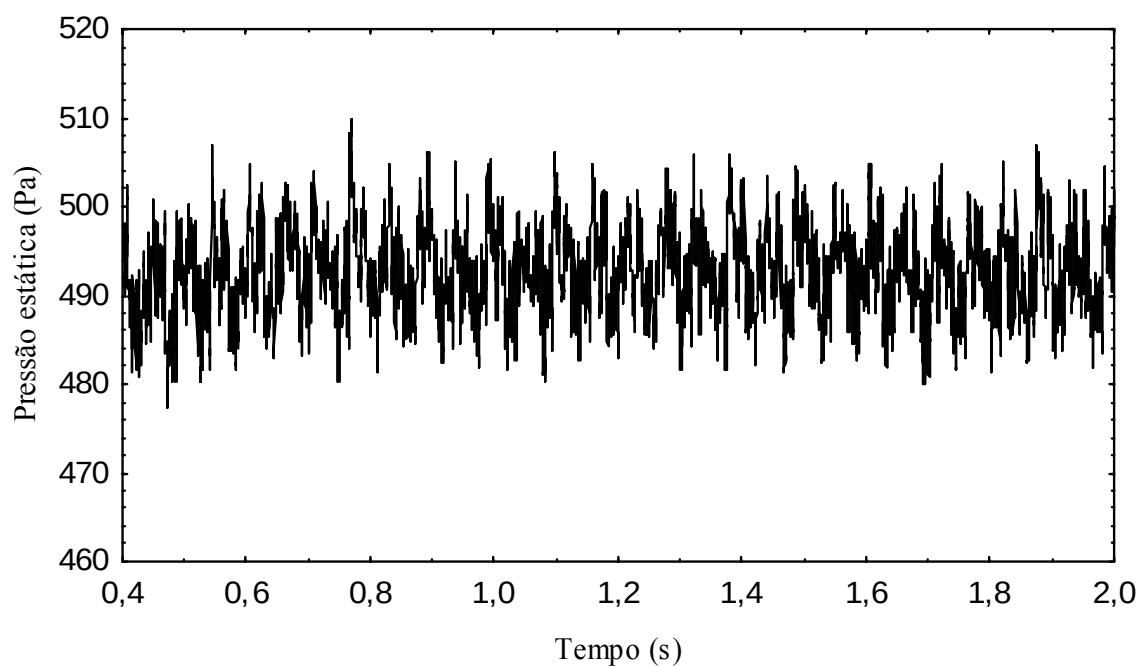


Fig. 4.15.e- Flutuação de Pressão *versus*. Tempo. Jorro Mínimo. Soja – H=19cm. U= 30,30 m/s.

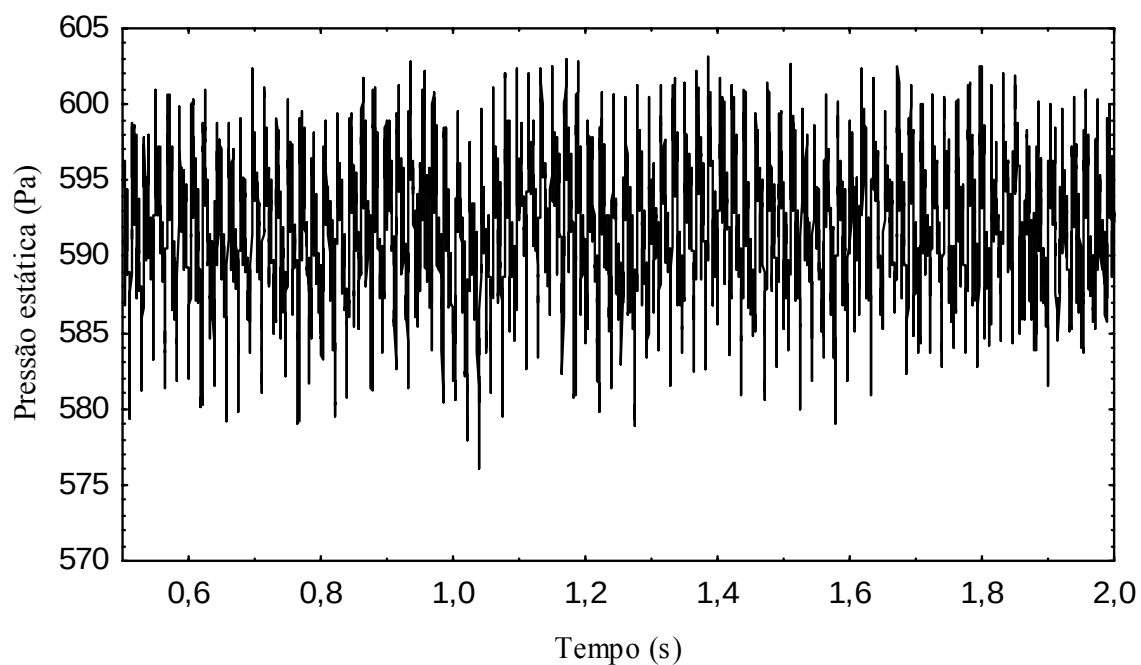


Fig. 4.15.f- Flutuação de Pressão *versus*. Tempo. Jorro Mínimo. Algodão– H=19cm. U=29,34 m/s

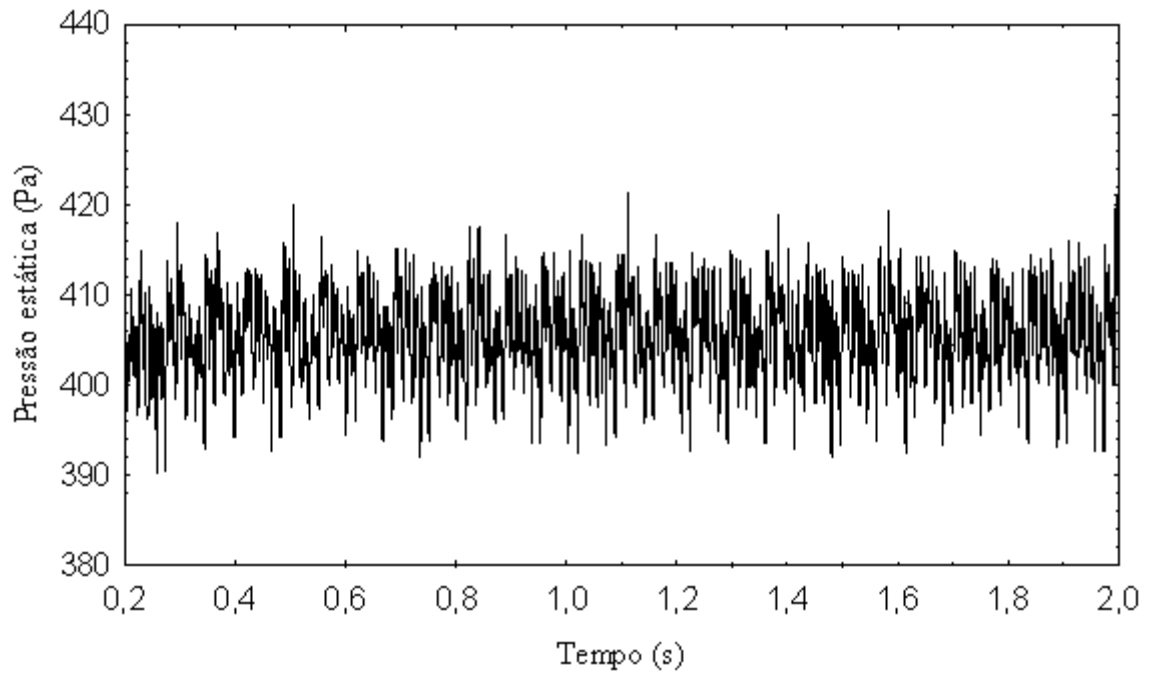


Fig. 4.15.g- Flutuação de Pressão *versus* Tempo. Jorro Estabelecido. Soja – H=19cm. U=33,26 m/s

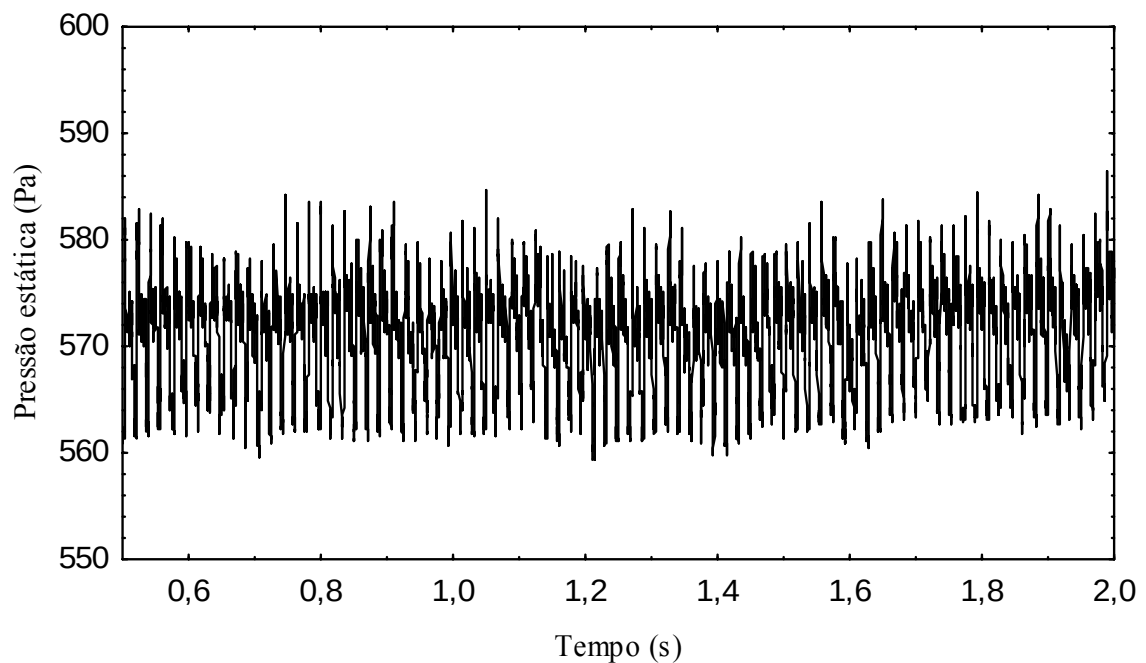


Fig. 4.15.h- Flutuação de Pressão *versus* Tempo. Jorro Estabelecido. Algodão–H=19cm. U=16,4 m/s

4.6.1- Perfis de Porosidade do leito

Os perfis de fração de volume de sólidos obtido por simulação podem ser observados nas Figuras (4.16 e 4.17). Através destas figuras é possível a observação do comportamento do leito em cada fase de sua operação: o leito fixo,, o jorro estabelecido e a transição entre eles, bem como distinguir as três diferentes regiões características do leito de jorro: região anular, de jorro e fonte. Pode-se notar, também, que como era esperado na região anular a fração de sólidos é praticamente constante.

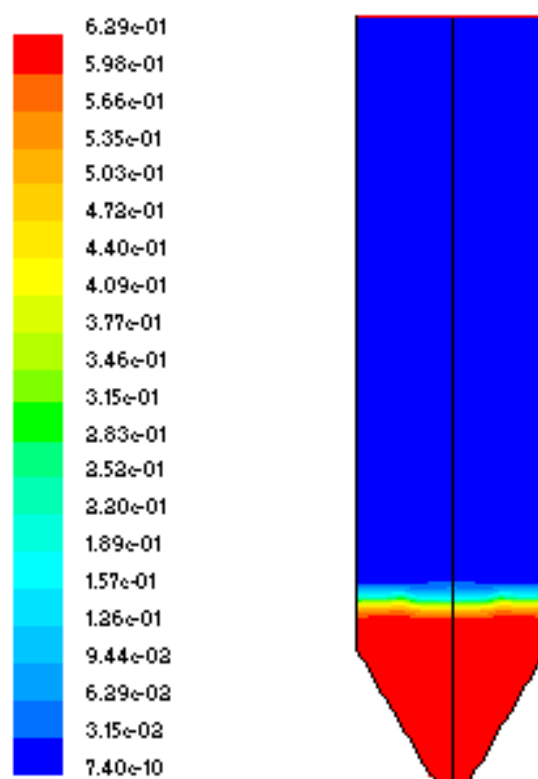


Figura 4.16.a – Perfil de porosidade para Leito com sementes de algodão.
($H = 19$ cm, Leito Fixo, $U = 2,81$ m/s)

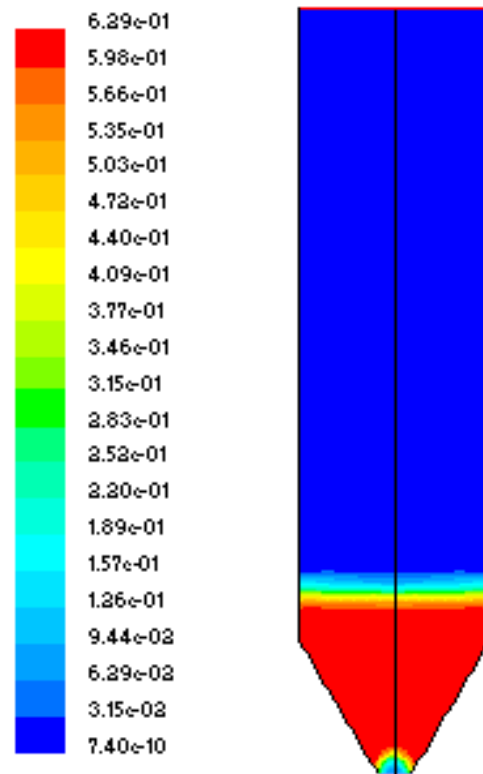


Figura 4.16.b – Perfil de porosidade para Leito com sementes de algodão.
($H = 19$ cm, Jato Interno, $U = 9,03$ m/s)

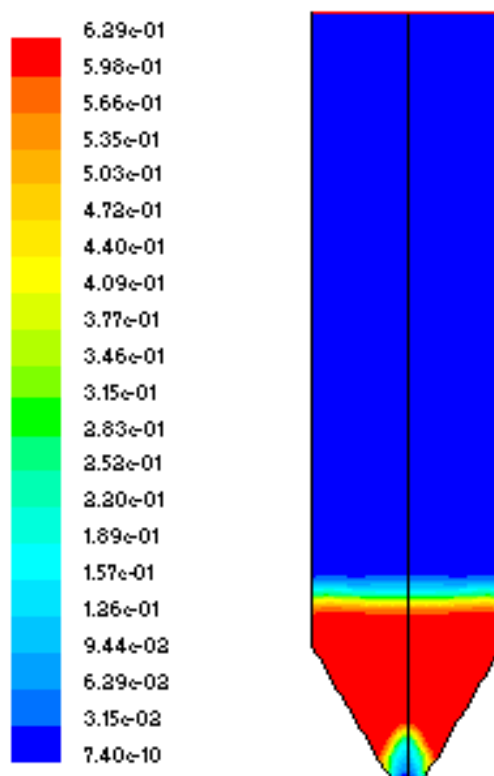


Figura 4.16.c – Perfil de porosidade para Leito com sementes de algodão.
($H = 19$ cm, Jato Interno, $U = 14,77$ m/s)

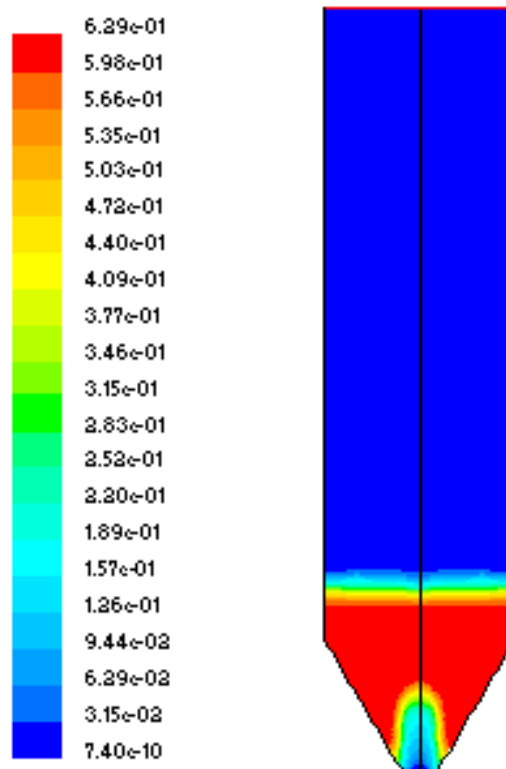


Figura 4.16.d – Perfil de porosidade para Leito com sementes de algodão.
($H = 19$ cm, Jato Interno, $U = 21,28$ m/s)

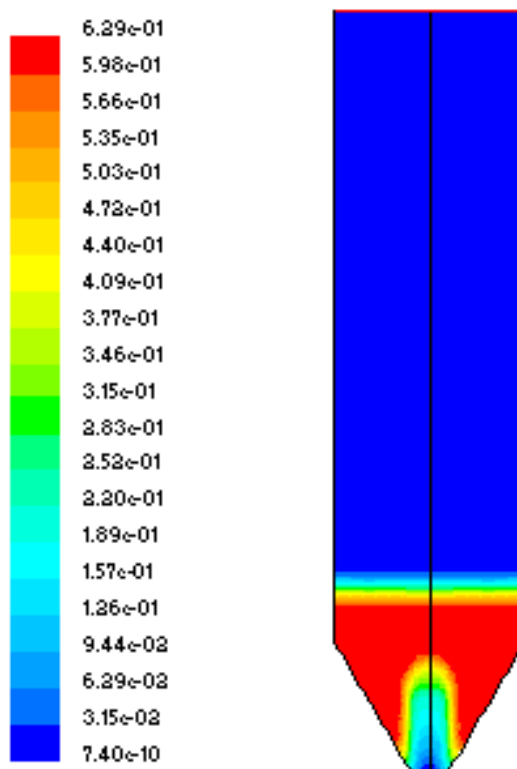


Figura 4.16.e – Perfil de porosidade para Leito com sementes de algodão
($H = 19$ cm, Jato Interno, $U = 25,83$ m/s)

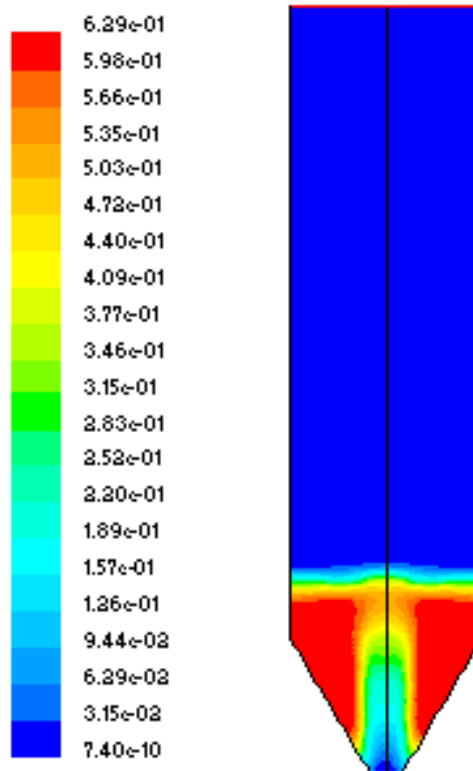


Figura 4.16.f – Perfil de porosidade para Leito com sementes de algodão
($H = 19$ cm, Jorro Mínimo, $U = 29,34$ m/s)

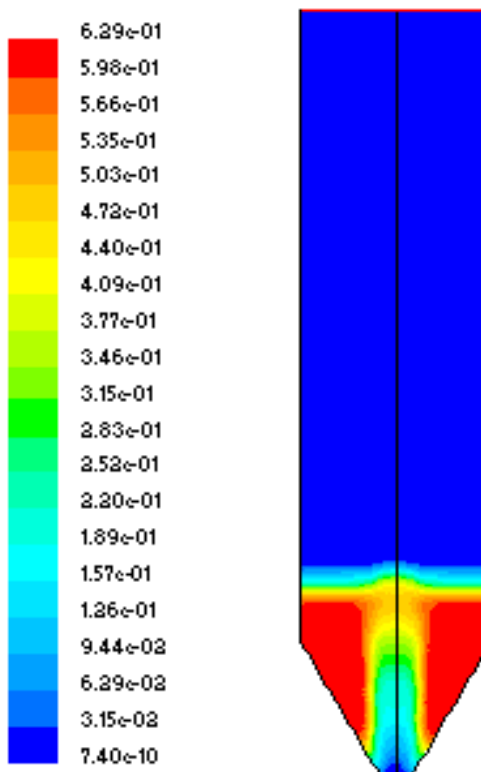


Figura 4.16.g – Perfil de porosidade para Leito com sementes de algodão
($H = 19$ cm, Jorro Mínimo, $U = 30,16$ m/s)

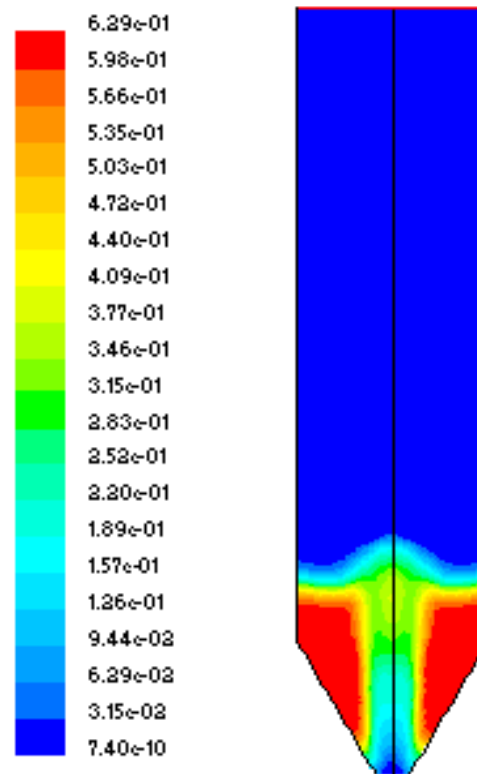


Figura 4.16.h – Perfil de porosidade para Leito com sementes de algodão.
($H = 19$ cm, Jorro Estável, $U = 33,06$ m/s)

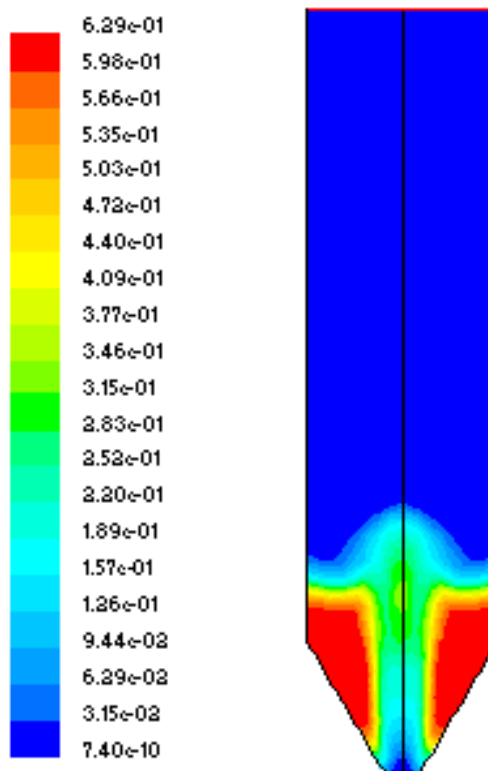


Figura 4.16.i – Perfil de porosidade para Leito com sementes de algodão
($H = 19$ cm, Jorro Estável, $U = 36,16$ m/s)

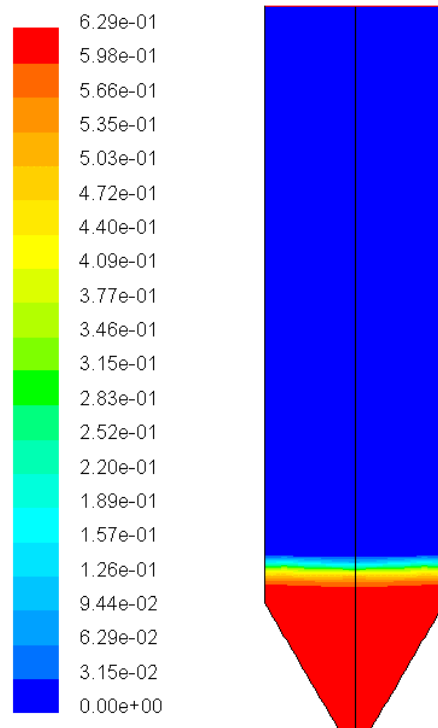


Figura 4.17.a – Perfil de porosidade para Leito com soja
($H = 19$ cm, Leito Fixo, $U = 2,85$ m/s)

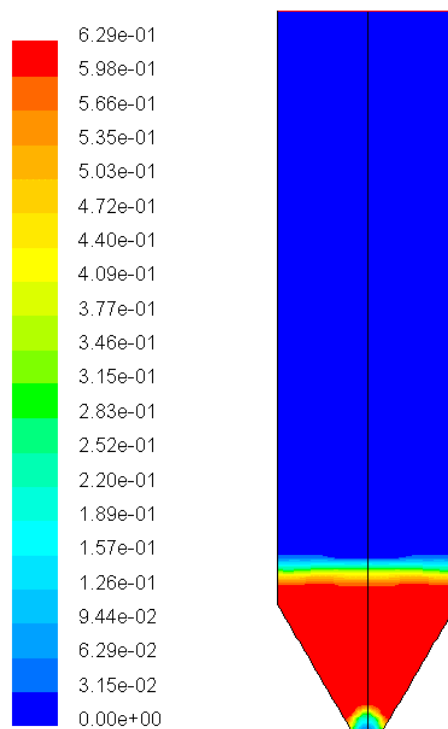


Figura 4.17.b – Perfil de porosidade para Leito com soja.
($H = 19$ cm, Jato Interno, $U = 9,3$ m/s)

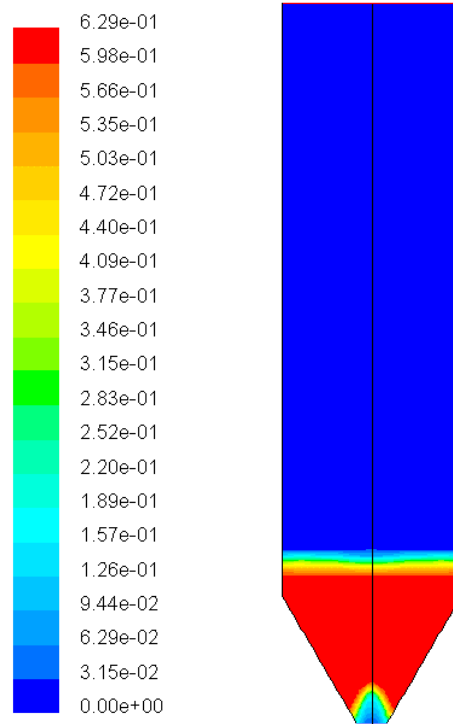


Figura 4.17c – Perfil de porosidade para Leito com soja
($H = 19$ cm, Jato Interno, $U = 11,67$ m/s)

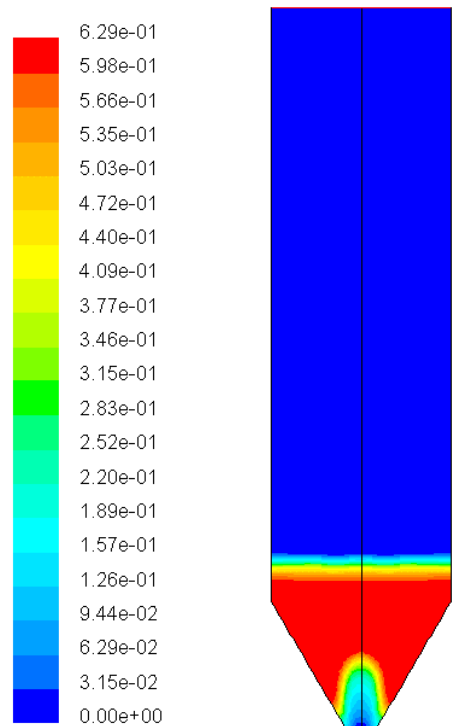


Figura 4.17.d – Perfil de porosidade para Leito com soja.
($H = 19$ cm, Jato Interno, $U = 19,42$ m/s)

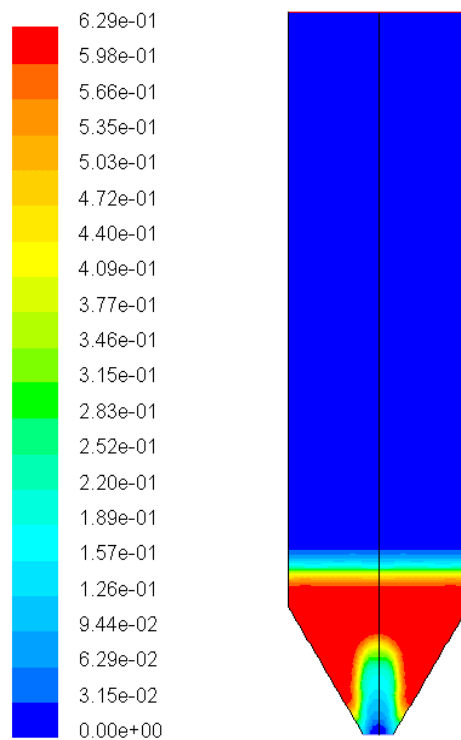


Figura 4.17.e – Perfil de porosidade para Leito com soja
($H = 19$ cm, Jato Interno, $U = 23,76$ m/s)

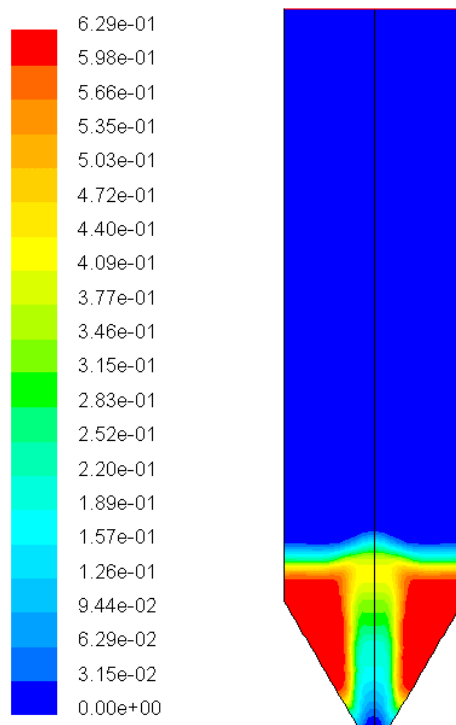


Figura 4.17.f – Perfil de porosidade para Leito com soja.
($H = 19$ cm, Jorro Mínimo, $U = 30,30$ m/s)

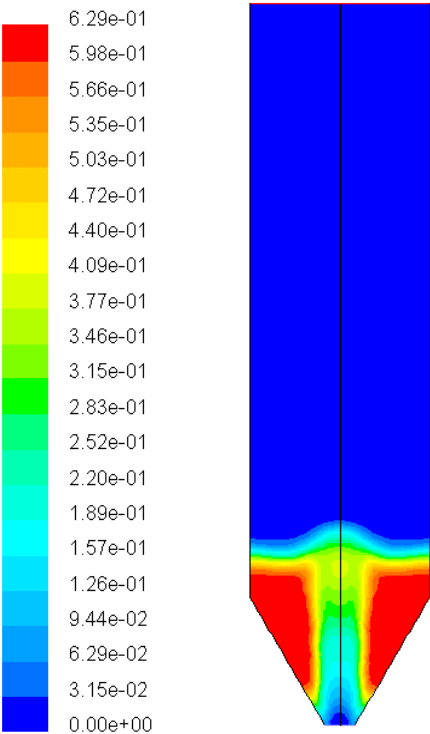


Figura 4.17.g – Perfil de porosidade para Leito com soja.
(H = 19 cm, Jorro Estável, U = 31,2m/s)

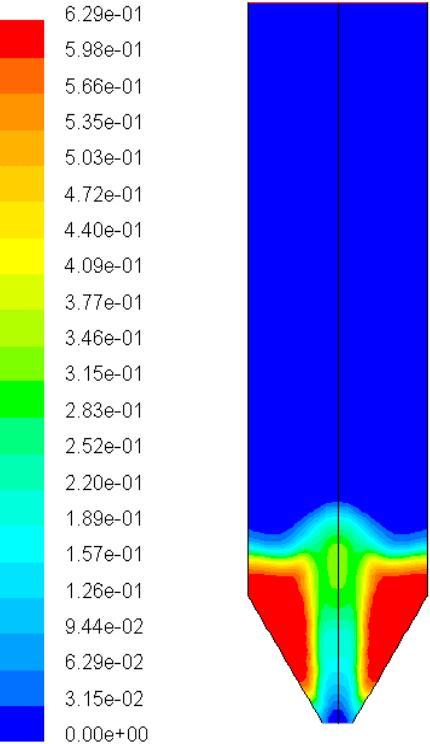


Figura 4.17.h – Perfil de porosidade para Leito com soja
(H = 19 cm, Jorro Estável, U = 333,26 m/s)

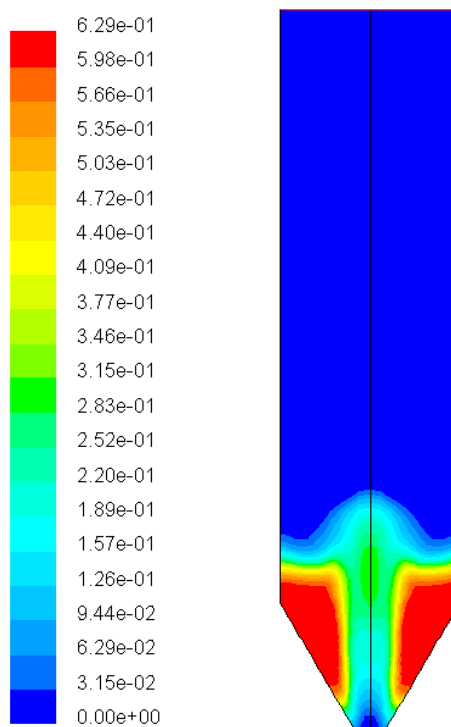


Figura 4.17.i – Perfil de porosidade para Leito com soja
($H = 19$ cm, Jorro Estável, $U = 35,33$ m/s)

A seguir é apresentada uma comparação entre vazões de jorro mínimo obtidas experimentalmente e simuladas pela técnica de fluidodinâmica computacional no *Software* FLUENT (versão 6.1.18).

A Tabela 4.3 apresenta os resultados de vazão de jorro mínimo obtidos para a soja e o algodão, onde se destaca a boa reprodutibilidade dos dados simulados frente aos experimentais, observados através do erro relativo que para o algodão foi da ordem de 3,4%, enquanto que para a soja não passou de 1,9%.

Tabela 4.3- Comparação das vazões de jorro mínimo experimentais, com as simuladas por CFD para as sementes de soja e algodão.

H_ Leito (m)	Material	qms (m^3/h) Experimental	qms (m^3/h) Simulado	Desvio relativo (%)
0,19	Soja	118,28	120,6	1,9
	Algodão	115,82	119,7	3,4

No caso da queda de pressão de jorro mínimo no leito, observa-se também, uma boa reprodutibilidade dos resultados simulados frente aos experimentais, observados através do pequeno erro relativo encontrado para os materiais estudados, como visto na Tabela 4.4.

Tabela 4.4- Comparação das Quedas de pressão de jorro mínimo experimentais, com as simuladas por CFD para sementes de soja e algodão.

H_ Leito (m)	Material	ΔP_{ms} (Pa) Experimental	ΔP_{ms} (Pa) Simulado	Desvio relativo (%)
0,19	Soja	538,94	493,0	8,5
	Algodão	571,13	592,03	3,7

No geral, a comparação dos resultados simulados pela técnica de fluidodinâmica computacional (CFD) frente aos resultados obtidos experimentalmente, mostraram boa concordância, o que demonstra a importância do uso dessas técnicas na previsão das condições de operação de um leito de jorro. DUARTE (2004), usando a técnica de fluidodinâmica computacional para simular condições distintas de um leito de jorro carregado com sementes de soja, operando com diferentes alturas de leito estático, obteve também bons resultados.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Os resultados dessa dissertação possibilitaram a obtenção das seguintes conclusões:

Os valores da vazão de jorro mínimo obtidos experimentalmente mostraram boa concordância com os valores calculados a partir da equação de MATHUR; GISHLER (1955);

O uso do desvio padrão das flutuações de pressão com o aumento da vazão de ar mostrou ser um bom indicativo de caracterização de regimes no leito de jorro;

Na análise do desvio padrão em função da vazão decrescente de ar observou-se que o desvio padrão tende a aumentar quando se passa da condição de jorro estabelecido para a condição em que ocorre a cavidade interna, diminuindo em seguida devido ao desaparecimento gradual dessa cavidade;

A *Skewness* das flutuações de pressão variaram de -0,1 a 1,9 para o algodão e para a soja variaram de -0,2 a 0,7, mostrando que função densidade probabilidade pode diferir significativamente de uma distribuição normal;

A utilização de gráficos de flutuação de pressão em função do tempo para a identificação do regime instalado num leito de jorro não mostrou ser um método objetivo de identificação;

Por outro lado, a análise dos espectros de potência dos regimes citados mostrou a viabilidade da utilização das medidas de flutuação de pressão para a obtenção de um método objetivo de identificação de padrões de escoamento em leito de jorro. Os espectros de potência dos regimes citados, para as sementes de soja e algodão, mostraram os seguintes resultados:

- Jorro Estável: Para esse tipo de regime, que é a condição de operação de um leito de jorro, o espectro de potência apresenta um único pico bem definido na região de 6Hz – 7Hz;

- Leito Fixo: Para leitos empacotados sem movimento o espectro de potência apresenta uma tendência de picos que compreende toda a região de frequência estudada. Contudo há o aparecimento de forma mais pronunciada de uma ou duas bandas de frequência na região de 40 Hz a 45Hz;

- Jato Interno: É caracterizado por duas bandas de frequência nas regiões de 7Hz – 8 Hz e a outra em menor amplitude na faixa de 14Hz -16 Hz. Contudo, o pico existente na

região de 14Hz -16 Hz tende a desaparecer quando o leito se encontra próximo das regiões de jorro estável;

- Expansão: Mesmo já iniciando o deslocamento das partículas manteve-se a tendência de picos em toda a região de frequência estudada, tal qual a região de leito fixo.

Os perfis de porosidade do leito e a curva característica do jorro foram obtidos por simulação usando um modelo granular multifásico Euleriano;

Os resultados obtidos pela simulação mostraram uma boa concordância com os dados experimentais nas condições estudadas;

Através dos perfis de fração de volume é possível observar-se o comportamento do leito em cada fase da operação.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Simular o comportamento da fluidodinâmica do leito de jorro cone-cilíndrico, com tubo “Draft”, usando a técnica de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), e comparar com resultados experimentais;
- Usar a técnica de FFT (*Fast Fourier Transform*), para monitorar um leito de jorro convencional, durante a operação de recobrimento de partículas;
- Estudar o comportamento fluidodinâmico do leito de jorro convencional, carregado com partículas de diferentes tamanhos, usando as técnicas de CFD e FFT.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BARROZO, M.A.S. Operações Unitárias – Notas de Aula. Uberlândia, UFU, 2004.

BECKER, H. A, *In Investigation of Laws Governing the spouting of coarse particles. Chem. Eng. Science.* Vol. 13, p. 245-262, 1961.

BRIGHAM, E. O. The fast Fourier Transform and its applications. Pretice-Hall, Inc. 1988.

CONCEIÇÃO FILHO, R. S. Recobrimento de Sementes de Soja com Fertilizantes em Leito de Jorro. Dissertação de Mestrado, Uberlândia, UFU. 1997.

COSTA, M. A, TARANTO, O. P., *Fluidodinâmica e ampliação de Escala de leitos de jorro Bidimensionais, Ciência e Engenharia*, 8(2): p. 91 – 99, 1999.

DOGAN, O. M., FREITAS, L.A P., LIM, C.J., GRACE, J.R., LUO, B., *Hidrodynamics and stability of slot-rectangular spouted beds. Part I: thin bed.* Chem. Eng. Comm., Vol. 181, p 225 – 242. 2000.

DUARTE, C. R. O Uso de Modelo de Balanço Populacional no Estudo de Inoculação de Sementes de Soja em Leito de Jorro. Dissertação de Mestrado, Uberlândia. UFU. 2002.

DUARTE, C. R., SANTANA, R. C., NETO, J. L. V., BORGES, J. E., MURATA, V.V. e BARROZO, M.A.S. Estudo experimental e de simulação sobre a movimentação das partículas em um leito de jorro. XXXI – Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 2004.

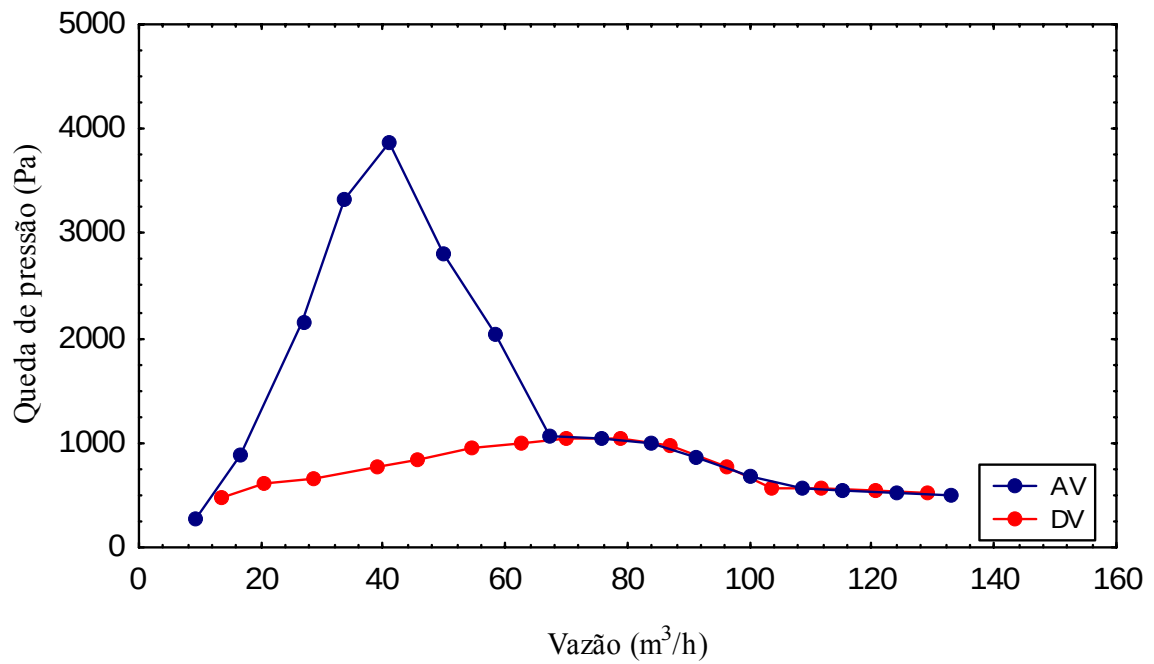
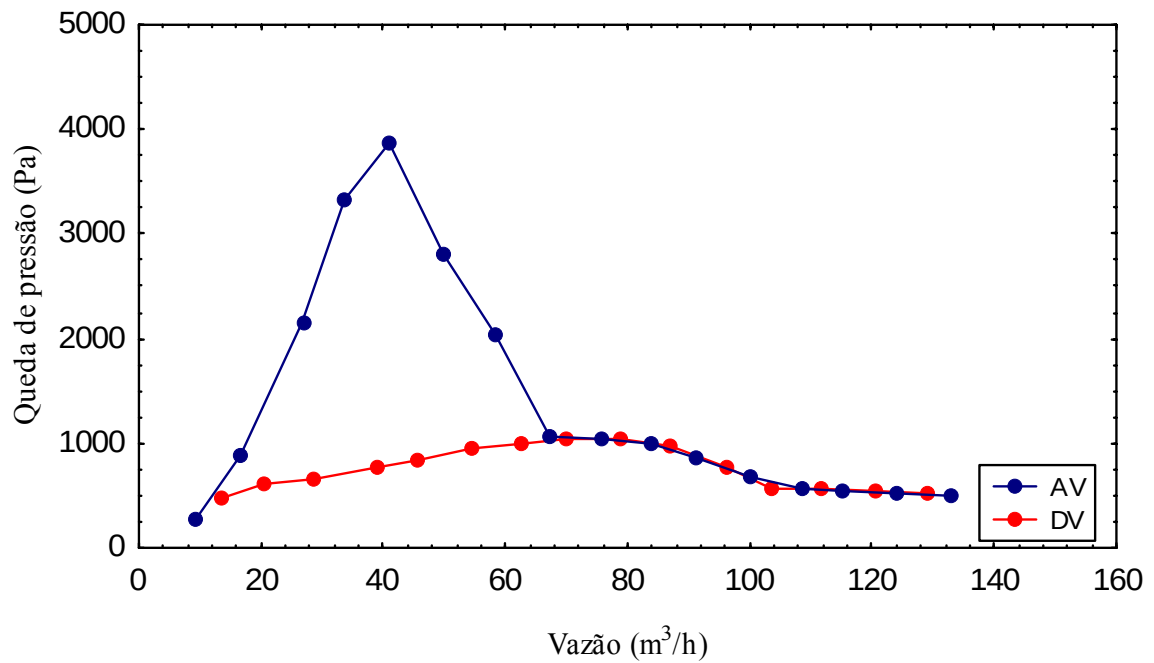
DUARTE, C. R., NETO, J. L. V., SANTANA, R. C., BORGES, J. E., MURATA, V.V. e BARROZO, M.A.S. Experimental and numerical study of the spouted bed fluid-dynamics. 4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering. 2005.

- DUTRA, C. H. M. C. Dinâmica do Leito de Jorro Não Convencional. Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, COPPE / UFRJ, 1984.
- DING, J. e GIDASPOW D., A Bubbling Fluidization Model Using Kinetic Theory of Granular Flow. *AIChE Journal*, 36, p. 523-538.1990.
- ERGUN, S. *Fluid flow through packed columns*. *Chem. Eng. Prog.*, 48(2), p. 89-94. 1952.
- EPSTEIN, N. & GRACE, J. R., Spouting of particule solids, Chap.10, in: M. E. Fayed, L. Otten (Eds.) *Hanbook of Powder Science and Technology*, Second edition, Chapman & Hall, New York, p.532-567, 1997.
- FRANCO JR, M. R. Leito de Jorro com Escoamento de Ar Complementar na Região Anular: Estudo Hidrodinâmico. Dissertação de Mestrado, São Carlos, UFSCar. 1989.
- FREITAS, L. A P, DOGAN, O. M., LIM, C.J, GRACE, J.R., BAI, B., *Identificação do Regime de Escoamento em Leito de Jorro Bidimensional usando Flutuação de Pressão*, *Chem. Eng. Comm.*, 2000,
- FREITAS, L.A P, DOGAN,O. M., LIM, C.J, GRACE, J.R., LUO, B., *hidrodynamics and Stability of slot-rectangular spoud beds, Part II: increasing bed thickness*, *Chem. Eng. Comm.*, 2000, vol 181, p. 243-258.
- GALPERIN, N. I.; AINSHTEIN, V. G.; GELPERRIN, E. N.; L' VOVA, S. D., "Hidrodynamic properties of fluidized granular materials in conical and conical-cylindrical sets" citado por Mathur, K. B. e Epstein, N., "Spouted beds", Academic Press Inc., New York, 1974.
- GIDASPOW, D., BEZBURUAH, R., and DING, J. Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds: Kinetic Theory Approach. *Proc. of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization* , 75-82. .1992.

- Labview™ *Measurements Manual*, National Instruments Corporation, Edition July 2000, Part Number 322661A-01.
- MALEK, M. A. & LU, B. C. Y., *Pressure Drop and Soutable Bed Height in Spouted beds. I&EC Process Design and Development*, Vol. 4, p. 123-128, 1965.
- MALISKA, C. R., “Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional: Fundamentos e Coordenadas Generalizadas”, ed. LTC, Rio de Janeiro, 1995.
- MAMURO, T.; HATTORI, H. *Flow pattern of fluid in spouted beds. J. Chem. Eng. Jap.*, p.1, 1968.
- MANURUNG, F., *Studies in the spouted bed technique with particular reference to low temperature coal carbonization. Ph. D. thesis, University of New South Wales, Kensington, Australia, 1964.*
- MATHUR, K.B. & EPSTEIN, N. *Spouted Bed*, New York, Academic Press, 304 p. 1974
- MATHUR, K.B. & GISHLER, P. E. *A technique for contacting gases with coarse solid particles. AIChE.*, Vol.1, p. 157, 1955.
- MEILI, L., MORTOLA, V. B., SILVA, R. R., MARTINS, I., PINTO, L. A. A. *Análise das Condições de Secagem de Cebola em Pasta em Leito de Jorro.* Fundação Universidade Federal de Rio Grande – FURG, 2003.
- MELLO, M.V.D., GUBULIN, J.C., *Estudo da influência de variáveis no Projeto de um Leito móvel do tipo vórtice utilizando como fluido água*, anais do XXII ENEMP, vol I, pp 329-336, Florianópolis, 1994.
- MUKHLENOV, I. P. & GORSHTAIN, A. *Investigation of a spouting bed. Khim. Prom. Moscow. Vol. 41, p. 443, 1965.*
- NASCIMENTO et al (1976), citado em “Secagem de Produtos agrícolas” de Giulio Massarani, Vol. 2, p. 56, 1987.

- OGAWA, S., UMEMURA, A., and OSHIMA, N., J.. On the Equations of Fully Fluidized Granular Materials. *Appl. Math. Phys.*, 31, 483.1980.
- PALLAI, I. & NEMETH, J. *Analysis of flow in a spoud bed apparatus by the so-called phase diagram. Int. Congr. Chem. Eng. (CHISA), 3º, Praga, 1969, Artigo N. C2.4, Czechoslovak Society for Industrial Chemistry.*
- SILVA, V. A.; Monitoramento de Regimes de Contato G's-Sólido em Leito de Jorro Cone-Cilindrico por medidas de Queda de Pressão em Tempo Real. Dissertação de Mestrado, Campinas, UMICAMP (1998)
- SILVA, V. A., ROCHA, S. C. S., TARANTO, O. P., RAGHAVAN, G. S. V. *Analysis of the stability of spoud bed fluid dynamic regime through bed drop fluctuations measurements, Science & Engineering Jornal*, 8 (2) p. 129-137, 1999.
- TARANTO, O. P. Monitoramento de regimes de recobrimento de partículas em leito de jorro bidimensional. Tese de Doutorado, Campinas, UMICAMP (1996).
- WEN, C. Y. and YU, Y. H.). *Mechanics of Fluidization. Chem. Eng. Prog. Symp. Series*, 62, p.100-111, 1966.
- XU, J., BAO, X., WEI, W., SHI, G., SHEN, S., BI, H. T., GRACE, C. J. LIM, C.J. *Statistical and frequency analysis of pressure fluctuations in spouted beds. Powder Technology*, Vol. 140, p. 141-154, 2004.
- ZENZ, E. A. & OTHMER, D. F., *Fluidization and fluid-particle systems.* Van Nostrand-Reinhold, Princeton, New Jersey, 1960.

APÊNDICE A
CURVAS CARACTERÍSTICAS PARA AS SEMENTES DE SOJA E
ALGODÃO

Figura A1: Curva característica para sementes de algodão ($H_0 = 19\text{cm}$)Figura A2: Curva característica para sementes de algodão ($H_0 = 22\text{cm}$)

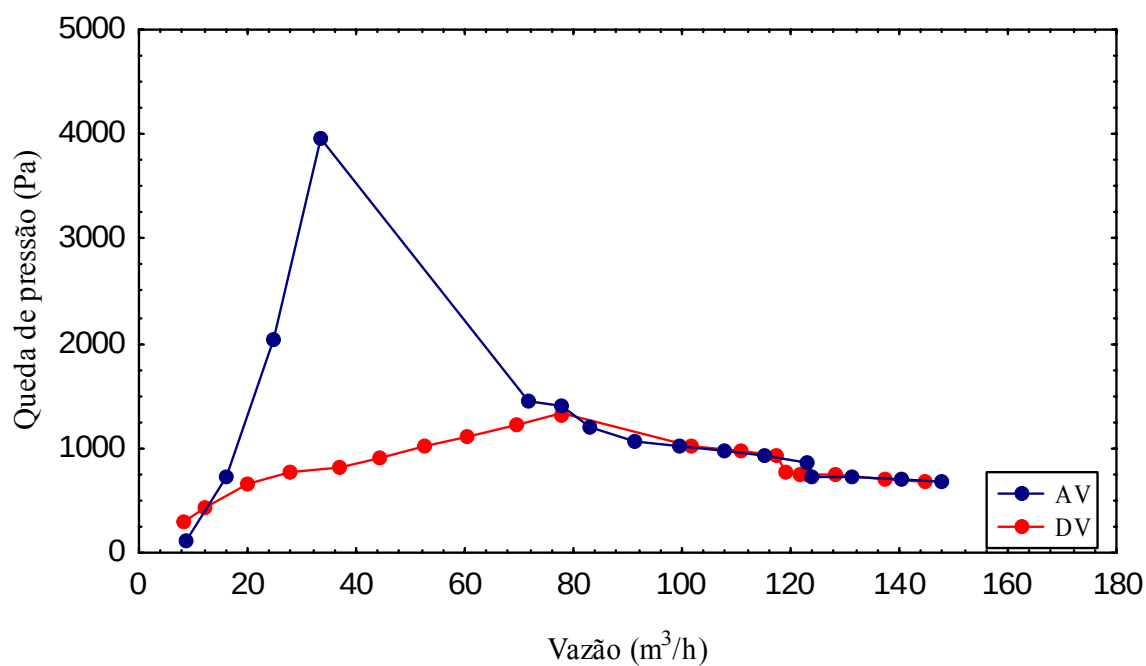


Figura A3: Curva característica para sementes de algodão ($H_0 = 25\text{cm}$)

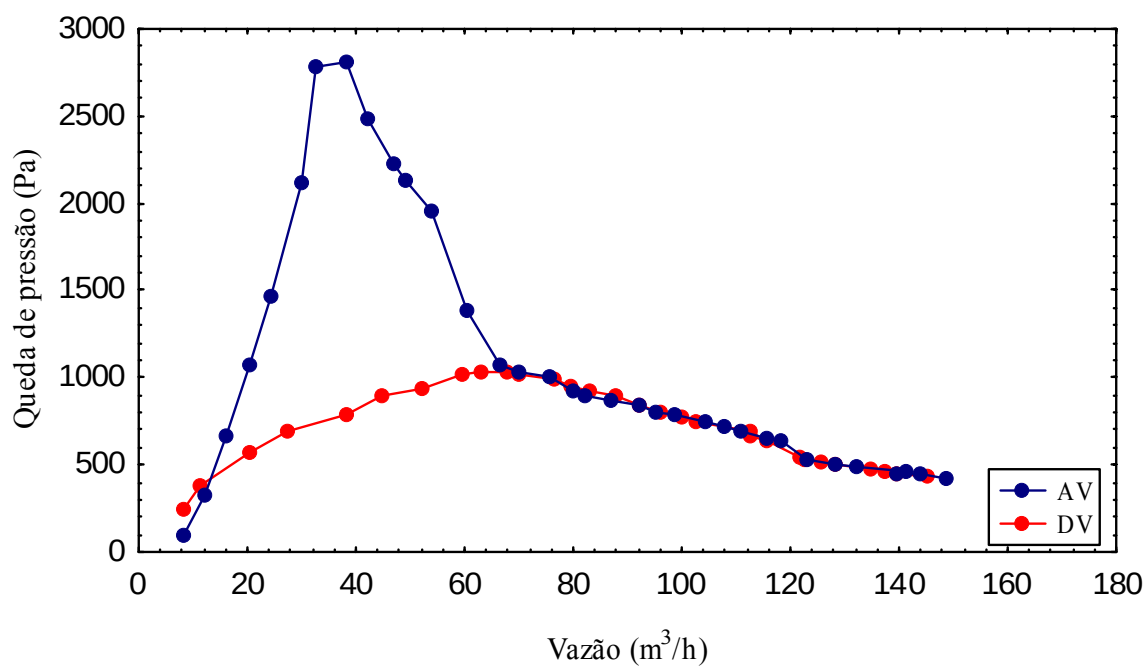


Figura A4: Curva característica para sementes de soja ($H_0 = 19\text{cm}$)

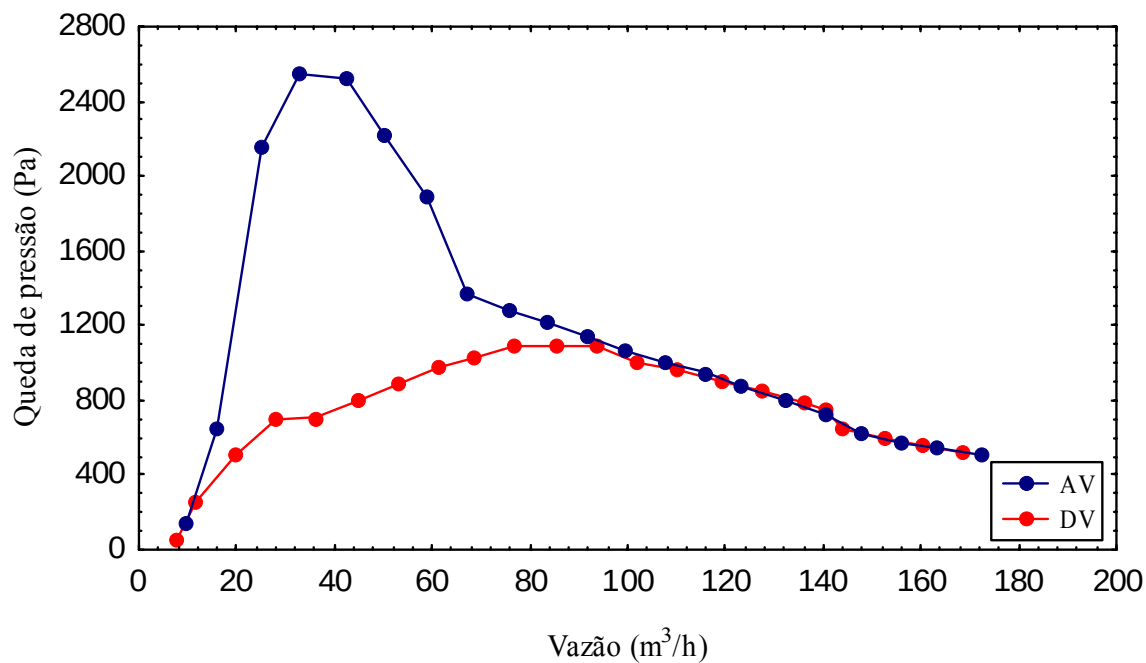


Figura A5: Curva característica para sementes de soja ($H_0 = 22\text{cm}$)

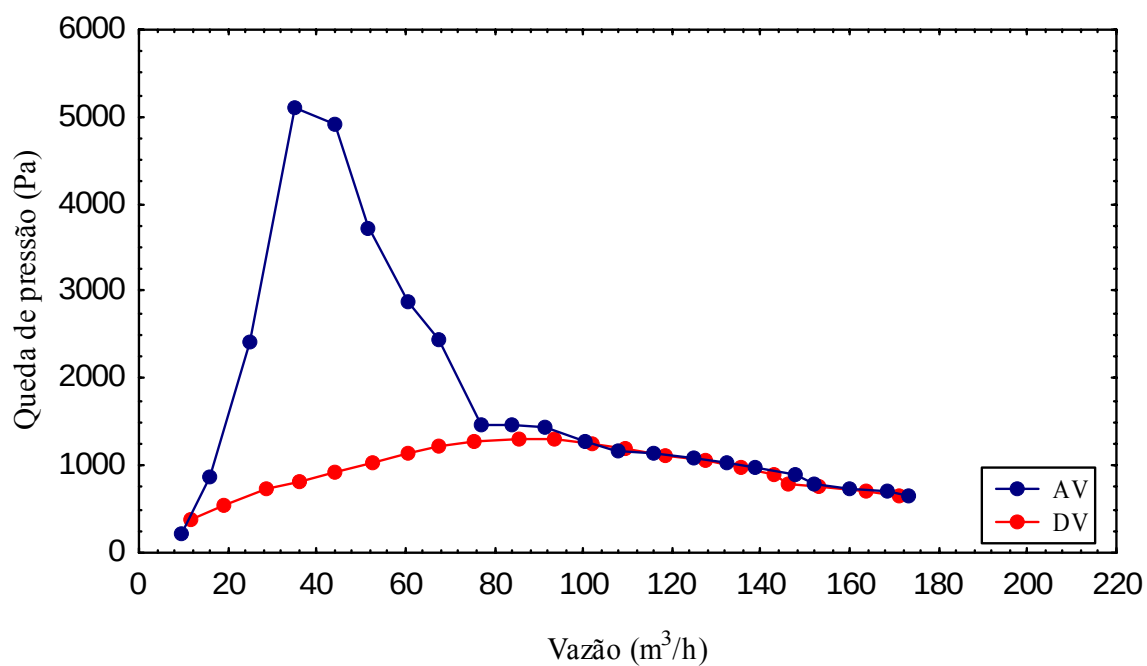


Figura A6: Curva característica para sementes de soja ($H_0 = 25\text{cm}$)

APÊNDICE - B
DIAGRAMA DE BLOCO E PAINEL FRONTAL

PAINEL FRONTAL

