UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE

ESCOLA DE QUÍMICA E DE ALIMENTOS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

CARACTERIZAÇÃO DE REGIMES FLUIDODINÂMICOS DE LEITO DE JORRO EMPREGANDO MEDIDAS DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO

MÔNICA CORRÊA DE MELO

PROF. Dr. CARLOS ALBERTO SEVERO FELIPE
Orientador

Rio Grande, RS
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE

ESCOLA DE QUÍMICA E DE ALIMENTOS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

CARACTERIZAÇÃO DE REGIMES FLUIDODINÂMICOS DE LEITO DE JORRO EMPREGANDO MEDIDAS DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO

MÔNICA CORRÊA DE MELO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

PROF. Dr. CARLOS ALBERTO SEVERO FELIPE
Orientador

Rio Grande, RS
2015

M491c Melo, Mônica Corrêa de.
Caracterização de regimes fluidodinâmicos de leito de jorro empregando medidas de flutuação de pressão / Mônica Corrêa de Melo. – 2015.
102 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de pós-graduação em Engenharia Química, Rio Grande/RS, 2015.
Orientador: Dr. Carlos Alberto Severo Felipe.

1. Fluidodinâmica 2. Leito de jorro I. Felipe, Carlos Alberto Severo II. Título.

CDU 66.047

Catalogação na Fonte: Bibliotecário Me. João Paulo Borges da Silveira CRB 10/2130

AGRADECIMENTOS

Obrigada Pai Celestial pela vida, por me dar a oportunidade de evoluir construindo meu caminho através do livre arbítrio. Obrigada pela saúde, energia e fé.

Aos meus familiares, que desde muito antes dessa etapa acadêmica ser desejada, já me indicavam o melhor caminho a seguir, o conhecimento, e ao passar do tempo foram me preparando para voos mais altos, sem deixar a simplicidade e o reconhecimento da origem para trás. Em especial às minhas tias-mães pelo incentivo, orações, palavras e acima de tudo atitudes, mulheres pilares de nossa família, fortes e amadas.

Ao meu irmão, Magnon Corrêa de Melo, meu amigo desde sempre, em tempos difíceis e alegres, meu querido, tenho orgulho de ser tua irmã e poder admirar esse seu coração paciente e bondoso.

Ao meu amor, Carlos Cristiano da Silva Santos, por permitir entrar em sua vida e conviver contigo, aprender com suas atitudes, conhecer seu coração, desejando sonhar e seguir em frente ao seu lado. Obrigada por sua ajuda quando a situação ficou difícil, me animando e ficando ao meu lado em cada etapa. Aliás, essa conquista também é sua.

Às colegas e amigas do PPGEQ, por compartilhar momentos de tensão e de alegria, dúvidas e certezas, esperando que no fim, tudo desse certo, seguindo os diversos caminhos. Obrigada gurias, pelo convívio diário, pelas risadas e momentos de desligamento da rotina.

Ao meu orientador, Dr. Carlos Alberto Severo Felipe, minha gratidão pela paciência e dedicação para comigo. Talvez não saibas, mas obrigada por me deixar mais confiante a cada término de nossas reuniões, nas quais eu entrava com dúvidas, mas saía esperançosa. Obrigada pelos conselhos, pelos exemplos e atitudes; pude conviver com uma pessoa de bom coração, compreensível e profissional, servindo-me de exemplo para toda a vida.

Ao professor Dr. Cezar Augusto da Rosa, pela disponibilidade, pelos ensinamentos e ajuda na etapa experimental, sua participação foi indispensável para a realização desse trabalho.

Aos bolsistas da graduação de engenharia química, Isadora, Raquel e Felipe, meus agradecimentos pela dedicação e atenção que deram a esse trabalho, me ajudando a realizar os experimentos. Aos bolsistas do IFRS Rio Grande, Roni, Laura, Gabriel, Júlia, Mariana e Milene obrigada pela ajuda e empenho nas atividades realizadas.

Aos técnicos de laboratório, servidores e demais colegas do Laboratório de Operações Unitárias, pelas conversas e trocas de experiências. Ao Moisés Ormond, da ECOEducacional, pela cortesia em fornecer um dos polímeros utilizados nos experimentos. À Sabrina Farias, da Embrapa, pelo fornecimento de sementes para complementar o trabalho.

À CAPES, pelo suporte financeiro para aquisição de equipamentos. À FAPERGS, pela bolsa de pós-graduação. À FURG, por minha formação acadêmica e ao PPGEQ e professores pelo acolhimento e confiança a mim depositada.

RESUMO

A identificação e a distinção de regimes fluidodinâmicos típicos de leito de jorro foram realizadas através da obtenção de sinais de medidas de flutuação de pressão. As séries de tempo obtidas foram tratadas por análise no domínio do tempo, através da média e do desvio padrão das medidas de pressão, e no domínio da frequência, por Transformada Rápida de Fourier. Buscou-se caracterizar os principais regimes de contato nesse tipo de leito móvel, dando ênfase nas frequências dominantes e largura do espectro de potência. Uma coluna cilíndrica de 0,21 m de diâmetro e base cônica foi empregada no estudo, e os sólidos empregados foram partículas de vidro, polietileno (em pastilhas e *pellets*), poliuretano e sementes (soja e arroz com casca). A relação entre a altura do leito fixo e o diâmetro de coluna de 1:1 e 1,5:1 e as medidas de flutuação de pressão realizadas em um ponto localizado logo acima da entrada de ar foram as condições empregadas no estudo. A obtenção dos dados fluidodinâmicos foi feita utilizando transdutores de pressão ligados ao leito e a um sistema de aquisição de dados; as informações *online* do leito eram indicadas na rotina desenvolvida no software LabVIEW versão 8.5. Os parâmetros fluidodinâmicos foram obtidos pela curva de queda de pressão do leito por velocidade do ar, que de forma geral apresentaram comportamento típico para todos os sólidos. Por meio da análise espectral, para todos os sólidos estudados, foi possível identificar e distiguir os principais regimes fluidodinâmicos em leito de jorro: leito fixo, jorro interno e jorro estável, esse último confirmado por observações visuais. Além desses, para vidro, polietileno em *pellets*, poliuretano, soja e arroz foi possível a caracterização do regime de jorro instável, também observados visualmente pelas instabilidades no leito devido à pulsação da fonte.

Palavras-chave: leito de jorro, flutuações de pressão, espectro de potência, frequência dominante.

ABSTRACT

The identification and distinction of typical fluid dynamic regimes of spouted bed systems were performed by measuring the pressure fluctuation. The obtained time series were treated by analysis in the time domain, using the average and standard deviation of the pressure measurements, and in the frequency domain by Fast Fourier Transform. This study aimed to characterize the main flow regimes in this type of moving bed, emphasizing the dominant frequency and width of the power spectrum. A cylindrical column 0.21 m in diameter and conical base was used in the work, and were employed the following solids: glass particles, polyethylene (disc-shaped and pellets), polyurethane and seeds (soybeans and rice with hulls). The relationship between the height of the fixed bed and the diameter of column 1:1 and 1.5:1, and the pressure fluctuation measurements in a point located just above the inlet of air were the conditions used in the study. The data acquisition was done using differential pressure transducer connected to the bed and to a data acquisition system; the online informations of the bed were indicated in a routine developed in LabVIEW software version 8.5. The fluid dynamic parameters were obtained by pressure drop-air velocity curves, which generally showed typical behavior for all solids. By spectral analysis for all studied solids was possible to identify and distinguish the main fluid dynamic regimes in spouted bed: fixed bed, internal spouting and stable spouting (confirmed by visual observations). In addition to these, for glass, polyethylene pellets, polyurethane, soybean and rice was possible to characterize the unstable spouting also visually observed by instabilities in bed due to the pulse of the font.

Keywords: spouted bed, pressure fluctuation, power spectrum, dominant frequency

SUMÁRIO

RESUMO I
ABSTRACT II
SUMÁRIO III
LISTA DE TABELAS V
LISTA DE FIGURAS VI
NOMENCLATURA IX
1 INTRODUÇÃO 10
1.1 Objetivos 11
2 REVISÃO DA LITERATURA 13
2.1 Leito de jorro 13
2.1.1 Regimes fluidodinâmicos 15
2.1.2. Curva fluidodinâmica 15
2.2 Identificação de regimes de contato 18
2.3 Estado da arte da identificação de regimes fluidodinâmicos em leito de jorro através de análise de flutuação de pressão 21
3 MATERIAIS E MÉTODOS 25
3.1 Materiais 25
3.2 Equipamentos 27
3.3 Metodologia experimental 31
3.3.1 Obtenção das curvas fluidodinâmicas 31
3.3.2 Obtenção dos espectros de potência 32
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 34
4.1 Caracterização de partículas 34
4.2 Estudo fluidodinâmico 35
4.3 Desvio padrão das flutuações de pressão 41
4.4 Espectros de potência 50
4.4.1 Espectros para vidro 50
4.4.2 Espectros para polietileno I 54
4.4.3 Espectros para polietileno II 59
4.4.4 Espectros para poliuretano 63
4.4.5 Espectros para soja 69
4.4.6 Espectros para arroz 75

4.4.7 Comparação de frequências dominantes entre regimes fluidodinâmicos 83
5 CONCLUSÃO 84
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 86
APÊNDICE 1 – Curvas fluidodinâmicas 88
APÊNDICE 2 – Séries temporais e desvio padrão 91
APÊNDICE 3 – Espectros de potência 93

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1. Caracterização física das partículas estudadas. 34
Tabela 4-2. Parâmetros fluidodinâmicos experimentais para H_O=0,21m. 40
Tabela 4-3. Parâmetros fluidodinâmicos experimentais para *Ho*=0,315m. 41
Tabela 4-4. Frequências dominantes de cada regime fluidodinâmico.....83

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Estrutura do leito de jorro. Adaptado de Mathur e Epstein (1974). 13
Figura 2.2. Regimes fluidodinâmicos típicos em leito de jorro. Esferas de vidro, d_p=1,2mm. Adaptado de Oliveira *et al* (2008). 15
Figura 2.3. Curvas de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar. Adaptado de Mathur e Epstein (1974). 16
Figura 2.4. Efeito da velocidade do gás no espectro de potência. Adaptado de Xu *et al*. (2004). 21
Figura 2.5. Espectros de potência. Adaptado de Lourenço (2006). 23
Figura 3.1. Esquema da unidade experimental. 27
Figura 3.2. Dimensões da coluna de leitos móveis. 28
Figura 3.3. Painel frontal do instrumento virtual utilizado nos experimentos. 30
Figura 3.4. Queda de pressão no leito vazio. 31
Figura 4.1. Curva fluidodinâmica do vidro. Condições: m_p = 5,5 kg; H_O=0,21 m. 35
Figura 4.2. Curva fluidodinâmica do polietileno I. Condições: m_p=2 kg; H_O=0,21 m. 36
Figura 4.3. Curva fluidodinâmica do polietileno II. Condições: m_p=1,95 kg; H_O=0,21 m. 36
Figura 4.4. Curva fluidodinâmica do poliuretano. Condições: m_p=2,1 kg; H_O=0,21 m. 37
Figura 4.5. Curva fluidodinâmica da soja. Condições: m_p=2,76 kg; H_O=0,21 m. 38
Figura 4.6. Curva fluidodinâmica do arroz. Condições: m_p=2,030 kg; H_O=0,21 m. 38
Figura 4.7. Fotografia do leito de arroz. Condições: início do jorro, H_O=0,21m. 39
Figura 4.8. Curva fluidodinâmica da soja. Condições: m_p =5,050 kg; H_O=0,315m. 40
Figura 4.9. Séries temporais. Regimes: leito fixo (v_{ar}=0,1v_{jm}), jorro interno (v_{ar}=0,8v_{jm}), jorro estável (v_{ar}=1,2v_{jm}) e jorro instável (v_{ar}=1,7v_{jm}). Sólido: vidro. H_O=0,21m. 42
Figura 4.10. Desvio padrão da flutuação de pressão. Sólido: vidro. H_O=0,21m. 43
Figura 4.11. Séries temporais. Regimes: leito fixo (v_{ar}=0,1v_{jm}), transição de leito fixo para jorro interno (v_{ar}=0,5v_{jm}), transição de jorro interno para jorro estável (v_{ar}=0,9v_{jm}) e jorro estável (v_{ar}=1,2v_{jm}). Sólido: polietileno I. H_O=0,21m. 43
Figura 4.12. Desvio padrão da flutuação de pressão. Sólido: polietileno I. *Ho*=0,21m. 44
Figura 4.13. Séries temporais. Regimes: leito fixo (v_{ar}=0,1v_{jm}), jorro interno (v_{ar}=0,8v_{jm}), jorro estável (v_{ar}=1v_{jm}) e jorro instável (v_{ar}=1,5v_{jm}). Sólido: polietileno II. H_O=0,21m. 45
Figura 4.14. Desvio padrão da flutuação de pressão. Sólido: polietileno II. *Ho*=0,21m. 46
Figura 4.15. Séries temporais. Regimes: leito fixo (v_{ar}=0,1v_{jm}), jorro interno (v_{ar}=0,9v_{jm}), jorro estável (v_{ar}=1,2v_{jm}) e jorro instável (v_{ar}=1,5v_{jm}). Sólido: poliuretano. H_O=0,21m. 47
Figura 4.16. Desvio padrão da flutuação de pressão. Sólido: poliuretano. *Ho*=0,21m. 47
Figura 4.17. Séries temporais. Regimes: leito fixo (v_{ar}=0,1v_{jm}), jorro interno (v_{ar}=0,8v_{jm}), jorro estável (v_{ar}=1v_{jm}) e jorro instável (v_{ar}=1,4v_{jm}). Sólido: soja. H_O=0,21m. 48
Figura 4.18. Desvio padrão da flutuação de pressão. Sólido: soja. H_O=0,21m. 48
Figura 4.19. Séries temporais. Regimes: leito fixo (v_{ar}=0,1v_{jm}), jorro interno (v_{ar}=0,9v_{jm}), jorro estável (v_{ar}=1,2v_{jm}) e jorro instável (v_{ar}=1,7v_{jm}). Sólido: arroz. H_O=0,21m. 49
Figura 4.20. Desvio padrão da flutuação de pressão. Sólido: arroz. H_O=0,21m. 50
Figura 4.21. Espectro de potência. Regime: leito fixo. Sólido: vidro. H_O=0,21 m. v_{ar}=0,1v_{jm} (0,16 m/s). Ponto de medida: P4. 51
Figura 4.22. Espectro de potência. Regime: jorro interno. Sólido: vidro. H_O=0,21 m. v_{ar}=0,8v_{jm} (1,3m/s). Ponto de medida: P4. 51
Figura 4.23. Espectros de potência. Sólido: vidro. H_O=0,21 m. Velocidades de 0,4 a 0,9v_{jm}. Ponto de medida: P4. 52

Figura 4.24. Espectro de potência. Regime: jorro estável. Sólido: vidro. H_O=0,21 m. $v_{ar}=1v_{jm}$ (1,63 m/s). Ponto de medida: P4. 53
Figura 4.25. Espectros de potência. Sólido: vidro. H_O=0,21 m. Velocidades de 1,1 e 1,2v_{jm}. Ponto de medida: P4. 53
Figura 4.26. Espectro de potência. Regime: leito fixo. Sólido: polietileno I. H_O=0,21 m. v_{ar}=0,2v_{jm} (0,12 m/s). Ponto de medida: P4. 54
Figura 4.27. Espectro de potência. Regime: jorro interno. Sólido: polietileno I. *Ho*=0,21 m. v_{ar}=0,4v_{jm} (0,22 m/s). Ponto de medida: P4. 55
Figura 4.28. Espectro de potência. Regime: jorro estável. Sólido: polietileno I. H_O=0,21 m. v_{ar}=1v_{jm} (0,56 m/s). Ponto de medida: P4. 55
Figura 4.29. Espectros de potência. Sólido: polietileno I. H_O=0,21 m. Velocidades de 1,1 a 2,0v_{jm}. Ponto de medida: P4. 56
Figura 4.30. Espectros de potência. Regime: leito fixo. Sólido: polietileno I. H_O=0,315 m, v_{ar}=0,2v_{jm} (0,12m/s). Ponto de medida: P4. 57
Figura 4.31. Espectros de potência. Regime: jorro interno. Sólido: polietileno I. H_O=0,315 m, v_{ar}=0,3v_{jm} (0,19m/s). Ponto de medida: P4. 57
Figura 4.32. Espectros de potência. Regime: jorro estável. Sólido: polietileno I. *Ho*=0,315 m, v_{ar}=1v_{jm} (0,62m/s). Ponto de medida: P4. 58
Figura 4.33. Espectros de potência. Regime: jorro estável. Sólido: polietileno I. *Ho*=0,315 m, v_{ar}=2,0v_{jm} (1,23m/s). Ponto de medida: P4. 58
Figura 4.34. Espectro de potência. Regime: leito fixo. Sólido: polietileno II, *Ho*=0,21 m. v_{ar}=0,2v_{jm} (0,27 m/s). Ponto de medida: P4. 59
Figura 4.35. Espectros de potência. Sólido: polietileno II, H_O=0,21 m. Velocidades de 0,6 a 0,9v_{jm}. Ponto de medida: P4. 59
Figura 4.36. Espectro de potência. Regime: jorro estável. Sólido: polietileno II, H_O=0,21 m. v_{ar}=1v_{jm} (1,35 m/s). Ponto de medida: P4. 60
Figura 4.37. Espectro de potência. Regime: leito fixo. Sólido: polietileno II, H_O=0,315 m. v_{ar}=0,2v_{jm} (0,34 m/s). Ponto de medida: P4. 61
Figura 4.38. Espectro de potência. Sólido: polietileno II, H_O=0,315 m. Velocidades de 0,3 a 0,6v_{jm}. Ponto de medida: P4. 61
Figura 4.39. Espectro de potência. Sólido: polietileno II, H_O=0,315 m. Velocidades de 0,7 e 0,9v_{jm}. Ponto de medida: P4 e P5, respectivamente. 62
Figura 4.40. Espectro de potência. Sólido: polietileno II. H_O=0,315 m. v_{ar}=1v_{jm} (1,71 m/s). Ponto de medida: P5. 62
Figura 4.41. Espectro de potência. Regime: jorro instável. Sólido: polietileno II. H_O=0,315 m. v_{ar}=1,6v_{jm} (2,74 m/s). Ponto de medida: P5. 63
Figura 4.42. Espectro de potência. Regime: leito fixo. Sólido: poliuretano. H_O=0,21 m. Velocidades de 0,1 e 0,2v_{jm}. Ponto de medida: P4. 63
Figura 4.43. Espectros de potência. Regime: jorro interno. Sólido: poliuretano. H_O=0,21 m. Velocidades de 0,3 e 0,4v_{jm}. Ponto de medida: P4. 64
Figura 4.44. Espectros de potência. Transição de jorro interno para jorro estável. Sólido: poliuretano. H_O=0,21 m. Velocidades de 0,5 a 0,9v_{jm}. Ponto de medida: P4. 64
Figura 4.45. Espectro de potência. Regime: jorro estável. Sólido: poliuretano. H_o=0,21 m. v_{ar}=1 v_{jm} (0,91 m/s). Ponto de medida: P4. 65
Figura 4.46. Espectros de potência. Sólido: poliuretano. H_O=0,21 m. Velocidades de 1,1 a 1,4v_{jm}. Ponto de medida: P4. 66
Figura 4.47. Espectros de potência. Regime: leito fixo. Sólido: poliuretano. *Ho*=0,315 m. v_{ar}=0,1v_{jm} (0,11 m/s). Ponto de medida: P4. 66
Figura 4.48. Espectros de potência. Sólido: poliuretano. H_O=0,315 m. Velocidade de 0,2 a 0,9v_{jm}. Ponto de medida: P4. 67

Figura 4.49. Espectros de potência. Regime: jorro estável. Sólido: poliuretano. H_O=0,315 m. v_{ar}=1v_{jm} (1,12 m/s). Ponto de medida: P4. 68
Figura 4.50. Espectros de potência. Regime: jorro instável. Sólido: poliuretano. H_O=0,315 m. v_{ar}=1,6v_{jm} (1,79 m/s). Ponto de medida: P4. 69
Figura 4.51. Espectro de potência. Regime: leito fixo. Sólido: soja. H_O=0,21 m. v_{ar}=0,2v_{jm} (0,32 m/s). Ponto de medida: P4. 69
Figura 4.52. Espectros de potência. Sólido: soja. H_O=0,21 m. Velocidades de 0,3 a 0,9v_{jm}. Ponto de medida: P4. 70
Figura 4.53. Espectro de potência. Regime: jorro estável. Sólido: soja. H_O=0,21 m. v_{ar}=1v_{jm} (1,64 m/s). Ponto de medida: P4. 71
Figura 4.54. Espectro de potência. Regime: leito fixo. Sólido: soja. H_O=0,315 m. Velocidades de 0,1v_{jm} e 0,2v_{jm}. Ponto de medida P4. 72
Figura 4.55. Espectro de potência. Regime: jorro interno. Sólido: soja. H_O=0,315m. v_{ar}=*0,4*v_{jm} (0,66m/s). Ponto de medida: P4. 72
Figura 4.56. Espectros de potência. Sólido: soja. H_O=0,315 m. Velocidades de 0,5v_{jm} a 0,9v_{jm}. Pontos de medida: P4 e P5. 73
Figura 4.57. Espectros de potência. Regime: jorro estável. Sólido: soja. *Ho*=0,315 m. v_{ar}=1,0v_{jm}. Ponto de medida P5. 74
Figura 4.58. Espectros de potência. Regime: jorro estável. Sólido: soja. *Ho*=0,315 m. v_{ar}=1,3v_{jm}. Ponto de medida P5. 74
Figura 4.59. Espectro de potência. Regime: leito fixo. Sólido: arroz. H_O=0,21 m. v_{ar}=0,3v_{jm} (0,27 m/s). Ponto de medida: P4. 75
Figura 4.60. Espectro de potência. Regime: jorro interno. Sólido: arroz. H_O=0,21 m. v_{ar}=0,9v_{jm} (0,8 m/s). Ponto de medida: P4. 75
Figura 4.61. Espectros de potência. Sólido: arroz. H_O=0,21 m. Velocidades de 0,4 a 0,9v_{jm}. Ponto de medida: P4. 76
Figura 4.62. Espectro de potência. Sólido: arroz. H_O=0,21 m. v_{ar}=1v_{jm} (0,88 m/s). Ponto de medida: P4. 77
Figura 4.63. Espectros de potência. Regime: jorro estável. Sólido: arroz. H_O=0,21 m. v_{ar}=1,1v_{jm} a 1,6v_{jm}. Ponto de medida: P4. 77
Figura 4.64. Espectro de potência. Regime: jorro instável. Sólido: arroz. H_O=0,21 m. v_{ar}=1,7v_{jm}. 79
Figura 4.65. Espectros de potência. Sólido: arroz. H_O=0,21 m. v_{ar}=1,7v_{jm} a 2,0v_{jm}. Ponto de medida: P4. 79
Figura 4.66. Espectros de potência. Regime: leito fixo. Sólido: arroz. H_o=0,315 m. v_{ar}=0,3v_{jm}. Ponto de medida: P5. 80
Figura 4.67. Espectros de potência. Regime: jorro interno. Sólido: arroz. H_O=0,315 m. v_{ar} =0,6v_{jm} (0,75 m/s). Ponto de medida: P4. 80
Figura 4.68. Espectros de potência. Regime: jorro interno. Sólido: arroz. *Ho*=0,315 m. v_{ar}=0,8v_{jm} (1 m/s). Ponto de medida: P4. 81
Figura 4.69. Espectros de potência. Regime: jorro estável. Sólido: arroz. H_O=0,315 m. v_{ar}=1v_{jm} (1,3 m/s). Ponto de medida: P4. 81
Figura 4.70. Espectros de potência. Regime: jorro estável. Sólido: arroz. H_O=0,315 m. Velocidades de 1,1 e 1,2v_{jm}. Ponto de medida: P4. 82
Figura 4.71. Espectros de potência. Regime: jorro instável. Sólido: arroz. H_O=0,315 m. v_{ar}=1,7v_{jm}. Ponto de medida: P4. 82

NOMENCLATURA

d_p	Diâmetro de partícula	mm
D_C	Diâmetro da coluna	m
D_i	Diâmetro orifício entrada do ar	mm
g	Aceleração da gravidade	m/s²
H_o	Altura do leito fixo	m
v_{ar}	Velocidade superficial do ar	m/s
v_{jm}	Velocidade de mínimo jorro	m/s
ΔP_{jm}	Queda de pressão no leito de jorro estável	Pa
ΔP_M	Queda de pressão máxima no leito de jorro	Pa
ΔP_B	Queda de pressão no leito vazio (branco)	Pa
ε	Porosidade do leito	Adimensional
ρ_f	Massa específica do fluido	kg/m³
ρ_S	Massa específica da partícula	kg/m³
φ	Esfericidade da partícula	Adimensional
σ	Desvio padrão da flutuação de pressão	Pa

1 INTRODUÇÃO

O leito de jorro surgiu em 1954, desenvolvido por Mathur e Gishler para secagem de trigo. A técnica possibilitou a utilização de ar em temperaturas mais elevadas do que em secadores convencionais, sem danificar o grão. Os pesquisadores constataram, pelos seus experimentos preliminares, que o mecanismo do fluxo de sólidos bem como do gás nessa técnica era diferente da fluidização, mas alcançava os mesmos propósitos para partículas grossas (maiores que 1 mm) como a fluidização proporcionava para materiais finos. A primeira unidade de leito de jorro foi comercializada no Canadá em 1962, para secagem de ervilha, lentilha e linho. Unidades foram construídas em outros países para a aplicação em secagem, bem como em outros tipos de processos, incluindo mistura de sólidos, resfriamento, recobrimento e granulação (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

Desde a sua concepção, a técnica do leito de jorro vem sendo empregada em uma grande variedade de operações com partículas grossas, isto é, com $d_p > 1$ mm, destacando-se a secagem, recobrimento e granulação de partículas, além de ser um potencial reator químico (XU *et al*., 2004).

Nos processos realizados em leito de jorro, o melhor rendimento é garantido quando se mantém a estabilidade do regime de contato. Dependendo das aplicações a que se destina, certas exigências devem ser cumpridas para manter o regime operando estavelmente, como, por exemplo, as taxas de transferência de calor e de massa, a homogeneidade do produto desejado, assim como sua integridade física e a relação custo/benefício do equipamento.

Embora diferentes abordagens e técnicas experimentais venham sendo aplicadas para identificar os regimes de contato gás-sólido em leito de jorro, a análise de medidas de flutuação de pressão tem demonstrado ser uma das mais eficazes (PISKOVA e MÖRL, 2008). Sensores de pressão são ligados ao leito a fim de registrar medidas da variação de pressão no tempo, que podem ser realizadas de duas formas, por medidas absolutas (um ponto de medida) ou medidas diferenciais (dois pontos de medida). Estas medidas resultam na obtenção de séries de tempo de flutuação de pressão. A análise das séries de tempo de pressão pode ser feita de três modos: no domínio do tempo, no domínio da frequência e por análise de caos (VAN OMMEN *et al*.,2011).

A caracterização fluidodinâmica do leito de jorro por meio de medidas de flutuação de pressão é de fácil realização, em virtude de que o sistema típico de medidas de pressão é robusto, relativamente barato e não é intrusivo, evitando desta forma distorções do fluxo ao redor do ponto de instalação do sensor (VAN OMMEN *et al*., 2011).

A análise de séries de tempo de sinais de flutuação de pressão, obtidas por meio de medidas de pressões absolutas e diferenciais, tem sido utilizadas a algumas décadas em leitos fluidizados para caracterizar o comportamento dos diferentes regimes de contato. Como demonstrado em trabalhos prévios, como os de Xu *et al*. (2004), Oliveira *et al* (2008) e Piskova e Mörl (2008), análise de flutuações de pressão é uma promissora técnica para caracterizar e distinguir também os regimes fluidodinâmicos em leito de jorro, além de identificar a transição entre esses regimes.

Embora os estudos publicados até o momento, envolvendo a caracterização de regimes em leito de jorro por análise espectral, sejam de grande relevância no conhecimento da fluidodinâmica desse tipo de leito móvel, ainda não há na literatura trabalhos sobre a análise de medidas de flutuação de pressão por densidade espectral para uma variedade maior de partículas, no que concerne à forma, tamanho e densidade dos sólidos.

1.1 Objetivos

A partir do exposto, o presente estudo tem como objetivo geral identificar e caracterizar por meio de medidas de flutuação de pressão, os principais regimes fluidodinâmicos existentes em um leito de jorro, com o emprego de sólidos de diferentes propriedades físicas.

Para alcançar este propósito, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Instalar um sistema de aquisição de dados em uma unidade típica de leito de jorro, sistema este constituído de placa de aquisição, condicionador de sinais, computador, software de aquisição e sensores de pressão e temperatura;
- Caracterizar fisicamente os sólidos utilizados no trabalho;
- Realizar o estudo fluidodinâmico dos sólidos, para fins da determinação experimental dos principais parâmetros fluidodinâmicos;

- Identificar visualmente os regimes de contato alcançados com os sólidos;
- Realizar medidas de flutuação de pressão em condições de regimes estáveis e na transição entre os regimes;
- Identificar regimes fluidodinâmicos através da análise da flutuação de pressão no domínio do tempo, empregando parâmetros estatísticos como média e desvio padrão;
- Tratar e analisar as séries de tempo de pressão obtidas dos experimentos no domínio da frequência, empregando a ferramenta Transformada Rápida de Fourier;
- Identificar e distinguir os regimes fluidodinâmicos a partir da frequência dominante e da largura dos espectros de potência de cada regime fluidodinâmico estudado.

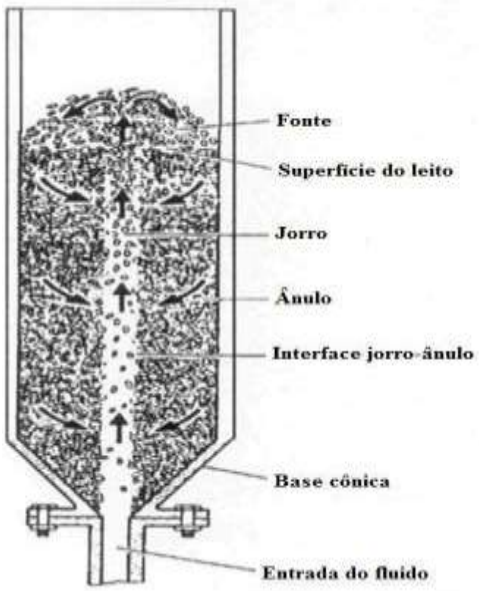
2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Leito de jorro

O leito de jorro teve sua origem no Canadá, no ano de 1954 (MATHUR e GISHLER, 1955). O equipamento foi destinado inicialmente para secagem de trigo, em substituição ao uso do leito fluidizado. Posteriormente, unidades foram utilizadas em outros países para a aplicação em secagem, bem como em outras operações, como cristalização por evaporação, mistura de sólidos, resfriamento, recobrimento, entre outros. A aplicação do leito de jorro em operações que envolvem o contato sólido-fluido é justificada por suas vantagens: movimento cíclico e contínuo das partículas, excelente contato sólido-fluido, altas taxas de transferência de calor e massa (permitindo, por exemplo, no processo de recobrimento, que as partículas sejam recobertas e secas simultaneamente), faixa de tamanho e densidade das partículas utilizadas que não se mostram apropriadas na fluidização (d_p > 1 mm), recobrimento uniforme do sólido (que confere qualidade no produto final), além de possibilitar a secagem de uma vasta gama de materiais, inclusive termicamente sensíveis, como, por exemplo, alguns tipos de pastas alimentícias (ALMEIDA, 2009).

O leito é constituído por uma coluna que pode ter a configuração cônica, ou mais usualmente uma coluna cilíndrica assentada sobre uma base tronco-cônica. Na base do leito está localizado um orifício de menor diâmetro pelo qual o fluido é injetado (Figura 2.1).

Figura 2.1. Estrutura do leito de jorro. Adaptado de Mathur e Epstein (1974).



Considerando a injeção do fluido na coluna à vazão crescente, inicialmente para baixos valores de velocidade não ocorre movimentação das partículas, até determinada velocidade o fluido apenas percola os espaços vazios entre as partículas, mas não apresenta força suficiente para movê-las, caracterizando o regime de leito fixo. Quando a vazão do fluido é suficientemente alta ocorre a formação de um fluxo ascendente de partículas por um canal central. Estas partículas, após atingirem a superfície do leito formam uma fonte e posteriormente deslocam-se para a periferia do mesmo incorporando-se à região anular, que compreende o espaço entre o canal central e as paredes do leito. Ao caírem na região anular, as partículas movem-se lentamente em sentido contrário ao fluxo do fluido até que, chegando à base do leito ocorre o reencontro destas com o fluxo ascendente do fluido na região de jorro, desenvolvendo-se um movimento sistemático, contínuo e cíclico das partículas (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

A configuração mais usual de leito de jorro é a constituída por uma coluna cilíndrica com base cônica, como utilizado por Lima (2004), Xu *et al* (2004) e Almeida (2009).

Outras variações de configurações de leito de jorro que foram propostas mais recentemente incluem: leito jorro-fluidizado, coluna bidimensional ou retangular (FREITAS *et al*, 2004) e configurações com diferentes modelos de distribuidores do fluido, como os propostos por Piskova e Mörl (2008), Li *et al* (2012), entre outros.

Piskova e Mörl (2008) utilizaram três configurações de distribuidores de ar em seus estudos de fluidodinâmica em leito de jorro. Uma dessas configurações é formada por dois distribuidores laterais de pratos retangulares perfurados situados na base da coluna; uma segunda configuração de entrada de ar é constituída de 14 tubos inclinados com área total de $2{,}75.10^{-4}$ m², localizados na seção lateral do cone; e a última configuração estudada com dois cilindros que se movimentavam em sentido rotacional na base da coluna; segundo os autores, esse comportamento dos cilindros evitou a formação de zonas mortas na região anular na base.

Li *et al* (2012) aplicaram modelo de fluidodinâmica computacional para caracterizar o comportamento de partículas em um leito de jorro. A configuração de leito estudada era composta por uma coluna retangular (1,2 m x 0,3m x 30 mm) que apresentava três orifícios de entrada de ar de 10 mm de abertura cada. Os autores validaram o modelo

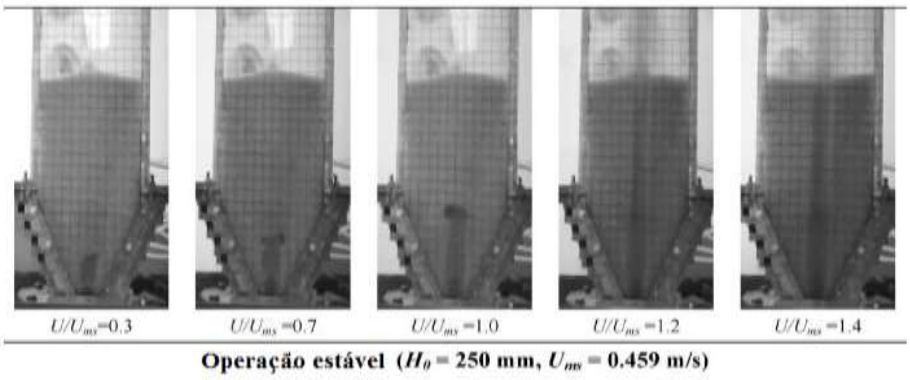
através de corridas experimentais sob condições de leito com alturas de 100, 150 e 200 mm, para partículas com diâmetro entre 1,0 e 1,8 mm e massa específica de 2400 kg/m³.

2.1.1 Regimes fluidodinâmicos

Os modos de contato fluido-partícula típicos de leitos de jorro incluem, além do regime de jorro estável, os regimes de leito fixo, jorro interno, leito borbulhante, *slugging*, jorro instável e jorro incoerente, entre outros menos comuns (FREITAS *et al*, 2004; PISKOVA, MÖRL, 2008; XU *et al*, 2004).

Oliveira *et al* (2008) estudaram os diferentes regimes fluidodinâmicos observados em leito de jorro, empregando uma coluna semicilíndrica, através de análise estatística, análise espectral e análise de Hurst. Nesse estudo os autores identificaram os regimes de leito fixo, jorro interno, jorro estável (Figura 2.2) e instável, para diferentes alturas de leito e velocidades do fluido, usando amostras de esferas de vidro com diâmetros de 1,2 mm e 2,4 mm. Quando a altura do leito fixo excedeu a altura máxima para operar em leito de jorro, foram identificadas instabilidades no processo: jorro instável, crescimento de bolhas e ascensão e rupturas destas na superfície do leito, com o aumento da velocidade do fluido.

Figura 2.2. Regimes fluidodinâmicos típicos em leito de jorro. Esferas de vidro, d_p=1,2mm. Adaptado de Oliveira *et al* (2008).

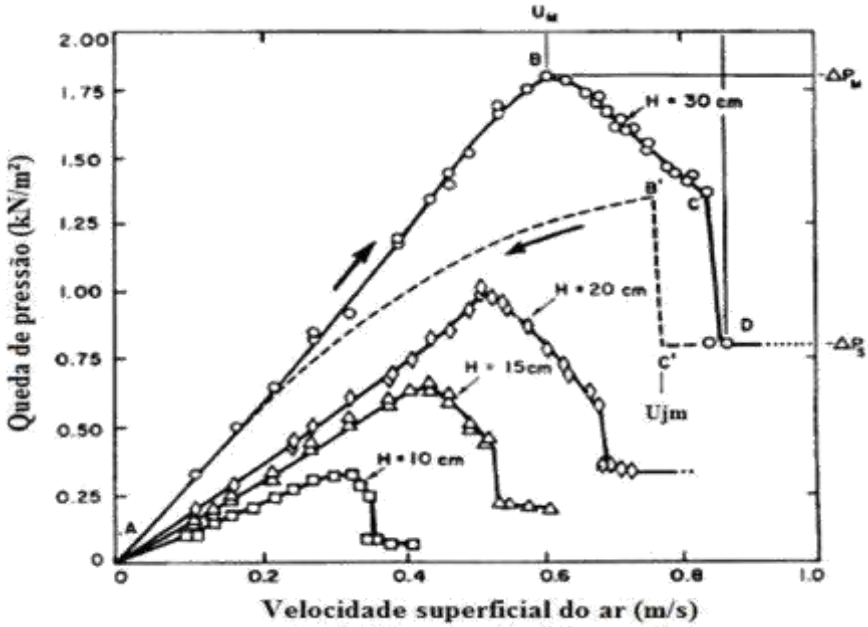


2.1.2. Curva fluidodinâmica

O mecanismo de transição de leito fixo para leito de jorro é obtido experimentalmente e pode ser representado através da curva fluidodinâmica, a qual indica a queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do fluido.

Na Figura 2.3 estão representadas curvas fluidodinâmicas para quatro alturas de leito (10, 15, 20 e 30 cm) em um sistema formado por ar e grãos de trigo, com d_p = 3,6 mm, D_C = 15,2 cm, D_i = 1,27 cm e θ = 60°.

Figura 2.3. Curvas de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar. Adaptado de Mathur e Epstein (1974).



A curva fluidodinâmica é caracterizada pela elevação da velocidade do gás, até a obtenção do jorro (segmento ABCD) e o processo reverso, isto é, a redução da velocidade, ponto no qual há o colapso do jorro, seguindo até o ponto de partida (segmento DC'B'A).

Partindo-se de velocidade zero, com sucessivos acréscimos, inicialmente a vazão do gás é insuficiente para gerar movimentação significativa das partículas no leito. Desta forma o gás apenas percola os espaços vazios entre as partículas, caracterizando o leito fixo. Com o aumento na velocidade, o gás começa a empurrar as partículas mais próximas ao orifício de entrada, formando uma pequena cavidade interna. Deste ponto em diante, as partículas acima da cavidade vão se compactando cada vez mais, oferecendo maior resistência à passagem do gás, ocasionando um aumento na queda de pressão.

Com sucessivos acréscimos na velocidade do fluido, a cavidade interna alonga-se formando o canal central, que compacta ainda mais os sólidos, resultando em maiores quedas de pressão, até chegar ao ponto B, onde se obtém a queda de pressão máxima, ΔP_M. A partir do ponto B, com a continuidade do aumento da velocidade do gás, a altura do canal central

torna-se maior do que a das partículas acima do mesmo, o que ocasiona o decréscimo da queda de pressão ao longo do segmento BC. Forma-se neste intervalo o regime de jorro interno. Com apenas um suave acréscimo no fluxo do gás, o jorro interno rompe a camada superficial do leito ocasionando uma redução brusca na queda de pressão, segmento CD. Nesse momento o jorro é obtido e o leito começa a se mover de forma cíclica. O ponto D representa o início do jorro estável, caracterizado por uma queda de pressão que se mantém praticamente constante com aumento de velocidade do gás, visto que o gás passa pelo leito sem significativa resistência das partículas.

O valor da velocidade alcançada no ponto D depende do modo de alimentação dos sólidos no leito e da variação de velocidade até esse ponto. A prévia expansão do leito é uma condição favorável para a reprodutibilidade do ponto D. Contudo, uma velocidade mais reproduzível é a velocidade de jorro mínimo, identificada como U_{jm}, que é alcançada reduzindo-se a vazão do gás até um valor que representa a mínima condição de jorro (ponto C'). Uma leve diminuição da velocidade a partir desse ponto ocasiona o colapso do jorro e a queda de pressão aumenta bruscamente, indicada pelo ponto B' na Figura 2.3. Sucessivas reduções de velocidade provocam o desaparecimento do canal central até o ponto inicial onde não há mais fluxo de gás, segmento B'A.

A curva de redução da velocidade do gás, segmento B'A, sempre se mantém abaixo da obtida pelo aumento de vazão, segmento ABCD, visto que durante o colapso do jorro a resistência das partículas à passagem do gás é menor que para a formação do jorro estável.

A queda de pressão máxima (ΔP_M), que ocorre no ponto B, está geralmente associada à entrada do jato de gás em altas velocidades através do leito. Esta máxima queda de pressão está relacionada à energia requerida para que o jato de gás rompa a estrutura dos sólidos do leito e forme a região de jorro (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

Com a estabilização do jorro, a queda de pressão no leito de jorro estável, (identificada como ΔP_S na Figura 2.3), surge de duas resistências: a do jorro propriamente dito, em que o transporte ocorre em fluxo ascendente em um trecho de alta porosidade do leito; e da região anular, que é caracterizada pelo movimento descendente das partículas em um trecho com baixa porosidade, em contracorrente com o gás (MATHUR e EPSTEIN, 1974)

A menor velocidade do fluido na qual o leito opera em regime de jorro estável (identificada como u_{jm} na Figura 2.3) depende das propriedades dos sólidos e do fluido bem como da geometria do equipamento. Em uma coluna cilíndrica, para uma dada amostra de partículas, a velocidade de jorro mínimo aumenta com o aumento da profundidade do leito e o decréscimo do diâmetro de seção transversal da coluna (EPSTEIN e GRACE, 2011).

2.2 Identificação de regimes de contato

Em processos realizados em leitos móveis, observa-se que um melhor rendimento é obtido quando se alcança e se mantém a estabilidade do regime de contato sólido-fluido, o qual pode ser verificado visualmente, quando o equipamento é construído em material transparente, ou através de medidas diretas e/ou indiretas de variáveis do sistema. Entretanto, a identificação de regimes de contato realizada somente por observação visual pode tornar-se duvidosa visto que, dependendo da configuração do leito, nem todas as partes deste podem ser de fácil visualização, além de que, em processos realizados em maior escala, a coluna é construída em materiais que impossibilitam a visualização do seu interior, o que reforça a utilização de outros métodos de caracterização de regimes de contato.

Dentre os vários métodos experimentais que permitem a caracterização fluidodinâmica de leitos móveis, uma descrição quantitativa pode ser obtida a partir da análise de séries de tempo de sinais de medidas físicas, como temperatura, concentração local de sólidos, porosidade local, análise de imagens e por meio de medidas de flutuação de pressão. Destas técnicas esta última se destaca devido às seguintes razões: facilidade em se realizar as medidas (mesmo em condições industriais inóspitas), em virtude de um sistema de medidas de pressão ser robusto, relativamente barato e ser não intrusivo, evitando desta forma distorções do fluxo ao redor do ponto de instalação do sensor (VAN OMMEN *et al*., 2011).

A identificação de regimes de contato por medidas de flutuação de pressão é realizada através do uso de sensores de pressão, que são ligados ao leito a fim de registrar medidas da variação de pressão no tempo, que podem ser realizadas de duas formas, por medidas absolutas ou medidas diferenciais. Estas medidas resultam na obtenção de séries de tempo de flutuação de pressão. A análise das séries de tempo de pressão pode ser feita de três modos: no domínio do tempo, no domínio da frequência e por análise de caos (VAN OMMEN *et al*., 2011).

A análise no domínio do tempo de uma medida física em um meio resulta na obtenção de curvas do comportamento dessa variável em função do tempo. A análise estatística das medidas é a técnica de tratamento dos dados mais simples e mais comumente empregada, pois é de rápida e de fácil aplicação (XU *et al*, 2004).

Na análise estatística, para cada série de tempo, o desvio padrão da flutuação de pressão (σ), isto é, a amplitude média do sinal de flutuação de pressão, é calculada conforme a Equação (2.1).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} * \sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2} \tag{2.1}$$

Na Equação (2.1) N é o número de medidas da série de tempo, x_i é o valor da pressão, $\bar{x}$ é o valor da pressão média.

Na análise no domínio da frequência das medidas de flutuação de pressão em leito de jorro, a distribuição de frequência, expressa na forma de espectros de potência, é determinada por tratamento matemático aplicando a Transformada Rápida de Fourier (SILVA, 1998; XU *et al*, 2004; LOURENÇO, 2006; OLIVEIRA *et al*, 2008; PISKOVA e MÖRL, 2008; BUTZGE, 2012).

A Transformada de Fourier separa uma função em senóides de diferentes frequências. A integral de Fourier é representada pela Equação (2.2).

$$\mathrm{X(f)} = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathrm{x(t)}\, \mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi \mathrm{ft}} \mathrm{dt} \qquad -\infty < \mathrm{f} < \infty \tag{2.2}$$

X(*f*) existirá se:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)| dt < \infty \tag{2.3}$$

O valor de X(*f*) é a Transformada de Fourier direta de x(t). Por outro lado, conhecendo-se X(*f*), a Transformada de Fourier inversa de X(*f*) fornece x(t), conforme a Equação (2.4).

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f)\, e^{j2\pi ft} df \qquad -\infty < f < +\infty \tag{2.4}$$

A quantidade x(t) expressa a quantidade física no domínio do tempo, já X(*f*) expressa a quantidade física no domínio da frequência.

A Transformada de Fourier em um intervalo de tempo finito do registro x(t) é definida conforme Equação (2.5).

$$X(f, T) = \int_{0}^{T} x(t) e^{-j2\pi ft}\, dt \tag{2.5}$$

A distribuição de frequência, obtida por FFT, é expressa em espectros de potência, indicados pela função *power spectrum* no software LabVIEW.

Como a FFT do sinal real é um número complexo, o espectro retorna uma matriz que contém a parte positiva e a negativa (reflexo) do espectro. A função *power spectrum* computa os dois lados do espectro de potência, e dessa forma mede e examina componentes de frequência de um sinal (BUTZGE, 2012).

O espectro de potência $S_{XX}(f)$ de uma função x(t) é dado pela Equação (2.6):

$$S_{xx} = \frac{FFT(x).FFT^{*}(x)}{n^2} \tag{2.6}$$

onde FFT*(x) é o complexo conjugado da transformada FFT(x) e n é número de amostras de entrada de x, $n=2^m$, m= 1, 2, 3, ..., 23.

Os valores do sinal espectral são tratados pela média RMS (*root mean square*), que indica a raiz quadrada do valor médio do sinal ao quadrado. Seja x(t) uma função contínua no tempo, a média RMS do sinal é dada pela Equação (2.7), onde t2-t1 é o tempo de integração.

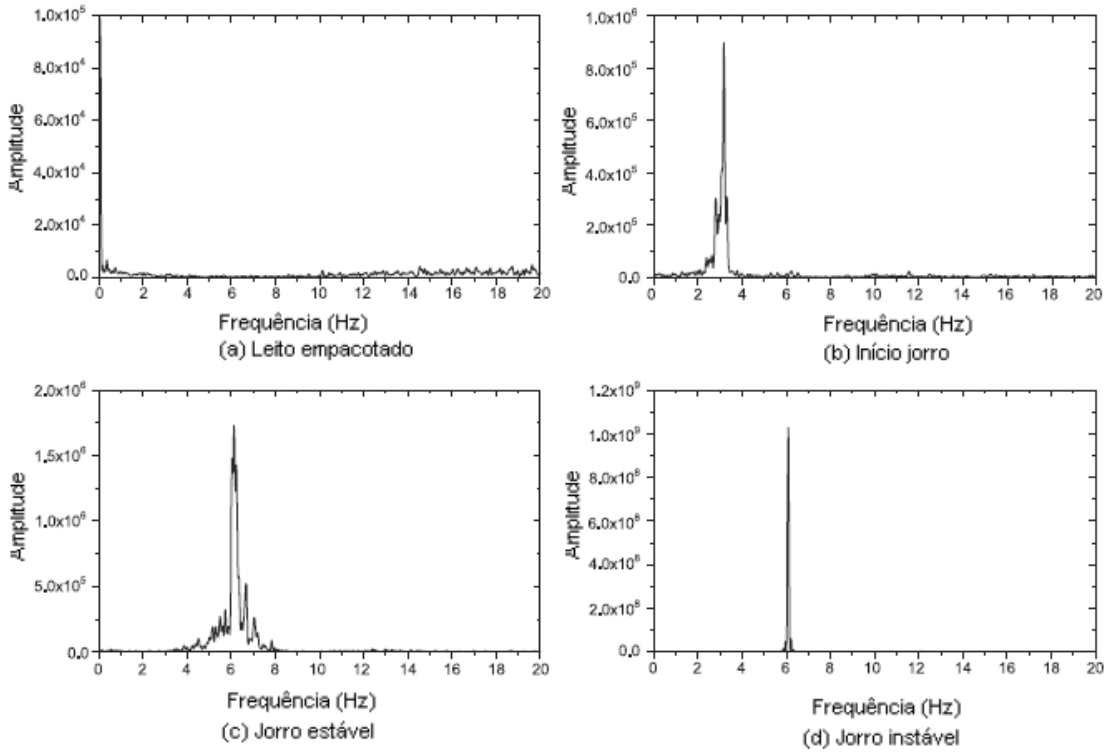
$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{(t2 - t1)} \int_{t1}^{t2} x^2(t) dt} \tag{2.7}$$

2.3 Estado da arte da identificação de regimes fluidodinâmicos em leito de jorro através de análise de flutuação de pressão

Através das análises estatística e de frequência dominante, Xu *et al.* (2004) investigaram o comportamento fluidodinâmico em leitos de jorro com diferentes alturas e diâmetros internos. Os autores constataram que a flutuação da pressão teve características diferentes para leitos rasos e leitos profundos, sendo que as flutuações de pressão em leito raso mostraram-se aleatórias, enquanto que no leito profundo essas se comportaram de modo periódico. Nesse trabalho foram caracterizados três regimes de contato para as configurações do equipamento: leito fixo, jorro estável e jorro instável.

Como exemplo, a Figura 2.4, obtida por Xu *et al.* (2004), demonstra os efeitos da velocidade do gás nos espectros de potência de queda de pressão total no leito, com 345 mm de altura, D_C = 120 mm, D_i = 10 mm, usando esferas de vidro de d_p = 1,6 mm.

Figura 2.4. Efeito da velocidade do gás no espectro de potência. Adaptado de Xu *et al*. (2004).



A Figura 2.4a apresenta o espectro de potência para velocidade do gás inferior à velocidade de jorro mínimo, onde nenhuma movimentação do leito de partículas é observada. O espectro de potência é largo e tem baixa amplitude, além de não apresentar uma frequência

dominante de destaque. Frequências notáveis começam a aparecer quando a velocidade do gás alcança a velocidade de jorro mínimo (Figura 2.4b), quando a frequência dominante registrada no experimento foi de 3,2 Hz. Com acréscimos na velocidade do gás, o leito de jorro operou de forma estável e, pelo espectro de potência da Figura 2.4c, tem-se uma frequência dominante de 6,3 Hz, com picos variando entre 4 e 8 Hz. Comparando a amplitude dos espectros das Figuras 2.4b e 2.4c, observa-se que essa é maior nas condições de jorro estável do que nas condições de jorro mínimo.

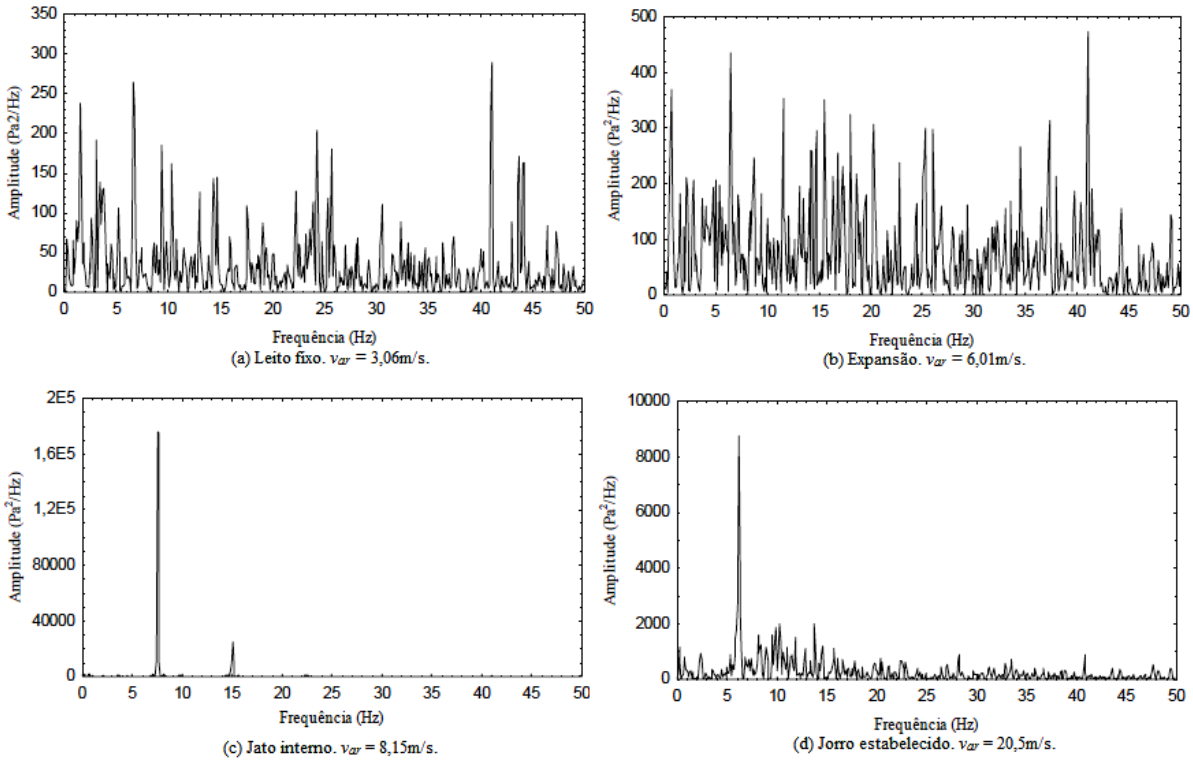
A Figura 2.4d apresenta o espectro de potência nas condições de jorro instável. Segundo Xu *et al.* (2004), o jorro instável difere do jorro estável principalmente na pulsação natural do primeiro, seu espectro de potência é caracterizado por um único pico com frequência dominante de 6,1 Hz, quase não diferindo daquela observada no jorro estável. Porém, a magnitude do espectro do jorro instável é muito maior do que a observada no jorro estável.

Freitas *et al* (2004) trabalharam com partículas de vidro de 1,4mm em leito retangular com largura variável. Os autores conseguiram identificar, visualmente e por análise estatística e espectral, os regimes de leito fixo, formação de jorro interno, estável, incoerente e a transição entre jorro interno e estável, cada condição representada por distribuições de frequência distintas. Para regime de jorro interno foi identificada uma largura de frequência no intervalo entre 1 e 3 Hz; na transição para jorro estável dois picos de frequência bem definidos em 1,5 e 5 Hz; no regime de jorro estável, dependendo da configuração do leito, frequências dominantes de 5 a 7 Hz, enquanto que na condição de jorro incoerente essas frequências se estenderam para a faixa de 10 a 15 Hz.

Lourenço (2006) investigou a fluidodinâmica em leito de jorro através do monitoramento dos sinais de pressão estática com uso de um sistema de aquisição de dados. Foram utilizadas sementes de soja e de algodão em um leito com D_C = 0,21m, D_i = 3,5cm e θ = 60°, com altura de leito fixo variando de 15 a 25 cm. O autor empregou a técnica da Transformada Rápida de Fourier nos sinais de queda de pressão obtidos no leito a fim de gerar espectros de potência que identificassem particularidades para cada regime de contato (Figura 2.5). Em altura de leito de 22 cm, o autor identificou quatro fluidodinâmicas diferente no leito de soja: regime de leito fixo, a expansão do leito (conforme o autor, condição em que a velocidade do ar no leito equivalia ao ponto de perda de carga máxima), a formação do jorro interno e o jorro estabelecido. Identificou-se a presença de uma banda larga de frequências

significativas no leito fixo e na expansão do leito. No regime de jorro interno, o autor constatou dois picos de frequências de alta magnitudes, uma entre 7 e 8 Hz e outra entre 14 e 15 Hz (Figura 2.5c), em leito de jorro estabelecido, Lourenço (2006) registrou espectro de potência com banda larga de frequências significativas com uma componente dominante de 6 Hz (Figura 2.5d).

Figura 2.5. Espectros de potência. Adaptado de Lourenço (2006).



Pavanelli (2006) investigou a estabilidade de regime de jorro estável em um leito cilíndrico para partículas de vidro, poliestireno e ABS, utilizando um controlador PI e pela técnica de análise espectral de flutuação de queda de pressão no leito. O autor observou frequências dominantes na faixa de 7,2 a 7,9 Hz, características de jorro estável. Perturbações foram geradas no sistema, como adição de carga de partículas e alteração na posição de abertura da válvula de ar de entrada do leito, a fim de validar a aplicação do controlador PI naquele sistema, o que segundo o autor, mostrou-se satisfatório.

Piskova e Mörl (2008) investigaram a ocorrência de regimes fluidodinâmicos típicos de leito de jorro, formado por esferas de madeira, para três diferentes configurações de entrada de ar, através de análise estatística e de frequência dominante das flutuações de pressão. Os regimes de contato observados foram os seguintes: leito fixo, jorro estável,

formação de jorro interno, formação de bolhas e *slugging*. Todos os regimes fluidodinâmicos foram confirmados por observações visuais, já que a coluna era feita de material transparente. O regime de jorro estável foi caracterizado por uma baixa amplitude de flutuação de pressão, baixo desvio padrão e uma máxima amplitude na frequência dominante. Para cada configuração de leito, diferentes amplitudes na frequência dominante foram registradas. As diferenças na dinâmica dos regimes no leito de jorro foram nitidamente percebidas no espectro de potência através da frequência dominante, apresentando picos entre 2 e 6 Hz.

Oliveira *et al* (2008) investigaram os regimes fluidodinâmicos em leito de jorro semicilíndrico transparente, para partículas de vidro de 1,2 e 2,4 mm, trabalhando com alturas de leito de 150 a 500 mm; foram registradas, através de fotografias, as mudanças ocorridas no leito nas condições de jorro estável e instável. Segundo os autores, a condição fluidodinâmica estável foi afetada pela altura do leito de partículas bem como pela velocidade do ar. Diferenças entre sistema estável e instável tornaram-se mais perceptíveis (pelas fotografias e também pelos espectros de potência) na relação de $v_{ar}>v_{jm}$ e em alturas do leito fixo superiores a 350 mm. Enquanto que na condição de jorro estável os espectros apresentaram uma ampla faixa de frequências (de 9 a 15 Hz), no jorro instável foram observados três picos de frequência dominante (9, 5 e 2 Hz). O regime pulsante foi identificado no espectro por apresentar somente um pico de frequência, de 9 Hz com alta magnitude.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os materiais utilizados no estudo, detalhes sobre o sistema experimental e a metodologia empregada.

3.1 Materiais

As partículas utilizadas nesse trabalho foram vidro, polietileno (em formato de pastilhas e *pellets*, ou polietileno I e polietileno II respectivamente) e poliuretano, além de grãos de soja e arroz com casca. Esferas de vidro são empregadas em leito de jorro para diversos fins, como na secagem de pastas para fabricação de corantes em pó (Shuhama *et al*, 2003), nos processos de adsorção, recobrimento e em secagem de soluções químicas; polímeros são utilizados em secagem de pastas e suspensões (LOPES *et al*, 2009, BRAGA, 2012). Já os grãos de soja e arroz, por exigirem determinado limite de umidade para sua posterior armazenagem, podem passar pelo processo de secagem. Sementes de soja e arroz podem também ser tratadas em leito de jorro, onde recebem a adição de nutrientes, micronutrientes, fungicidas e herbicidas.

O conhecimento das características físicas de uma partícula ou de uma população de partículas é de fundamental importância para a ciência de sistemas particulados, visto que tais sistemas são regidos pela interação partícula/partícula e partícula/fluido. As características físicas e morfológicas das partículas afetam desde fenômenos moleculares que ocorrem no interior e/ou entre partículas, até o dimensionamento de uma coluna. Independentemente do processo, o conhecimento das propriedades físicas e morfológicas das partículas como porosidade, tamanho e massa específica é de suma importância no entendimento dos fenômenos que ocorrem em uma determinada operação unitária (CREMASCO, 2012).

A picnometria tem por objetivo a determinação da massa específica de líquidos e, de forma indireta, a determinação do diâmetro e massa específica de partículas. A técnica consiste na imersão de uma quantidade conhecida de partículas em um recipiente de volume conhecido (picnômetro), que é posteriormente preenchido por um líquido, usualmente água; o volume de líquido deslocado corresponde ao volume ocupado pelas partículas no picnômetro (CREMASCO, 2012).

Para os sólidos inertes utilizados nesse estudo (vidro, polietileno e poliuretano), água foi o fluido empregado na determinação da massa específica por picnometria; já para os grãos de soja e arroz, hexano foi o líquido usado, evitando dessa forma a absorção deste pelas sementes, o que afetaria a determinação da propriedade.

A técnica da paquimetria consiste na medição direta de dimensões dos sólidos a fim de obter o diâmetro de partícula. Dependendo da forma dos sólidos, podem-se considerar duas ou mais medidas de diferentes orientações. O diâmetro é calculado pela média dos diâmetros médios, dos sólidos amostrados,indicado na Equação 3.1:

$$d_p = \frac{\sum \bar{d}_i}{i} \tag{3.1}$$

onde d_i é o diâmetro médio da partícula e d_p é a média dos diâmetros médios.

Desta forma, as partículas de arroz, polietileno e poliuretano tiveram seus diâmetros determinados pela paquimetria. Para o arroz e poliuretano foram consideradas três dimensões. enquanto que para as partículas do polietileno I e II somente duas, visto que se trata de um sólido com forma de pastilha circular e outro de forma cilíndrica, respectivamente. Foram amostradas 20 partículas de cada sólido.

A esfericidade, φ, é o índice que indica o quanto a forma de uma partícula se aproxima à de uma esfera. Sua definição é dada pela razão entre o diâmetro de uma esfera de igual volume ao volume da partícula e o diâmetro da menor esfera circunscrita à área projetada da partícula em repouso (WADELL, *apud* CREMASCO, 2012).

Neste trabalho, a esfericidade das partículas foi determinada pelo quociente entre o diâmetro inscrito e o diâmetro circunscrito da projeção da sombra das partículas, conforme técnica citada por Cremasco (2012). Foram projetadas as áreas de uma amostra de 80 partículas para cada tipo de sólido (vidro, polietileno I, polietileno II, poliuretano, arroz e soja), das quais se obtiveram os diâmetros médios inscritos e circunscritos e finalmente, o valor da esfericidade.

O ensaio de proveta consiste na obtenção da massa específica aparente de um conjunto de partículas. O método consiste em pesar uma proveta graduada seca e posteriormente pesá-la com um volume conhecido de amostra, obtendo a relação massa/volume ocupada pelos sólidos (CREMASCO, 2012). De forma indireta, pode-se

determinar a porosidade do leito através da relação entre a massa específica aparente e a massa específica real de partículas (Equação 3.2):

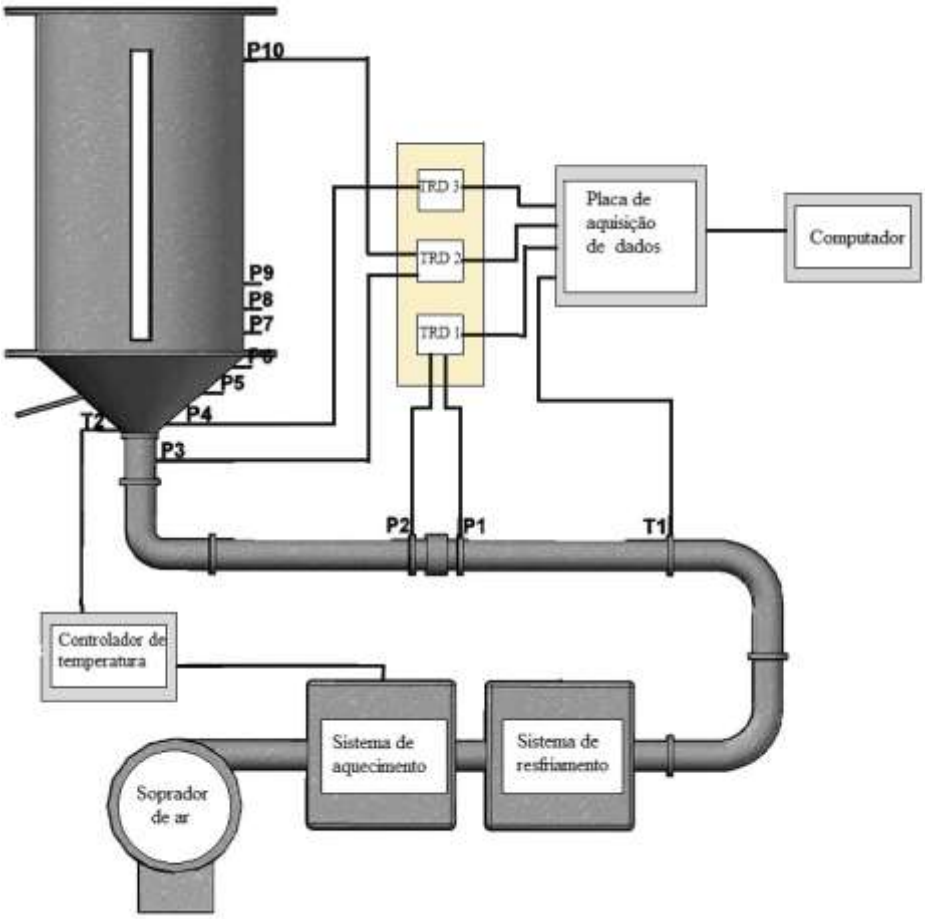
$$\varepsilon_p = 1 - \frac{\rho_{p_A}}{\rho_{p_R}} \tag{3.2}$$

onde ρ_{pA} é a massa específica aparente da partícula, ρ_{pR} é a massa específica real da partícula e ε é a porosidade do leito.

3.2 Equipamentos

O sistema experimental para a realização desse trabalho foi composto por uma coluna de leito móvel (adaptado para operar em leito de jorro e leito fluidizado), sistema de fornecimento de fluido (com soprador de ar Ibram de 7,5 cv) bem como o sistema de aquisição de dados (Figura 3.1).

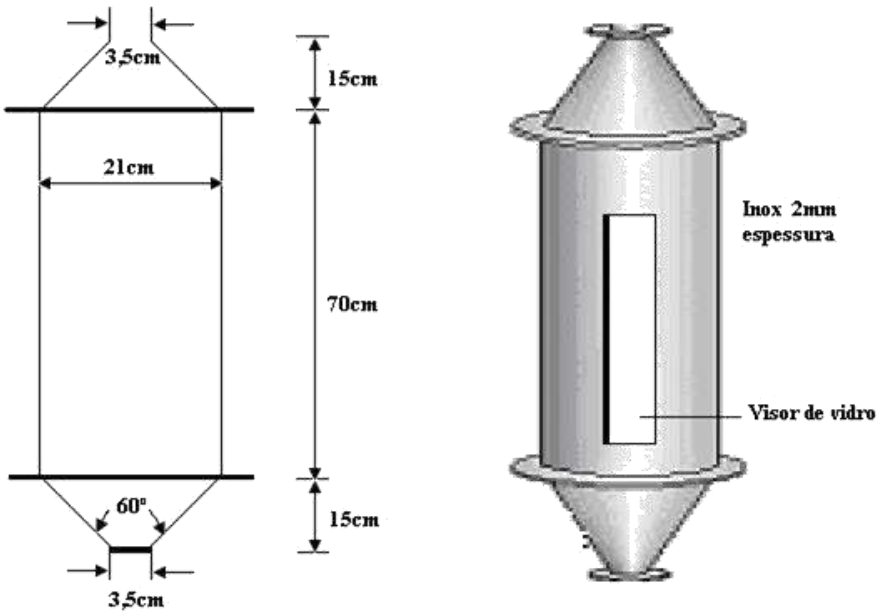
Figura 3.1. Esquema da unidade experimental.



A coluna de leitos móveis empregada neste trabalho foi fabricada em aço inox com um visor de vidro, a fim de possibilitar a visualização parcial do seu interior, quando o leito de jorro estivesse operando.

A Figura 3.2 ilustra a estrutura da coluna, que apresenta diâmetro da seção cilíndrica de 0,21 m, diâmetro de orifício de entrada do ar de 3,5 cm e altura total de 1 m.

Figura 3.2. Dimensões da coluna de leitos móveis.



Os sistemas de aquecimento e de resfriamento de ar estavam inseridos na unidade experimental para, quando houvesse a necessidade, fornecer ou retirar energia do ar a fim de manter sua temperatura em uma faixa desejável. Por intermédio de um controlador e um termopar, era possível regular e controlar a temperatura do ar que ingressava no leito.

A temperatura em diferentes posições na coluna pôde ser registrada através de termopares conectados à placa de aquisição de dados. No total eram sete termopares disponíveis no sistema experimental, que podiam ser ligados ao leito e em sete canais do módulo condicionador de sinais. Entretanto, nesse estudo registraram-se somente a temperatura a montante da placa de orifício e da seção de entrada de ar para o leito, como forma de monitorar a temperatura ao longo dos experimentos.

Três transdutores de pressão foram conectados à coluna e à placa de aquisição de dados, todos da marca *Dwyer*. Os transdutores tinham a função de receber os sinais físicos de

pressão atuantes na região de medida e transformá-los em sinal analógico de corrente, que foi enviado até a placa de aquisição de dados. O transdutor que registrou a pressão diferencial na placa de orifício, TRD 1, ligado aos pontos P1 e P2, de modelo 616-6, tinha faixa de leitura de 0 a 100 in H_2O; o transdutor que recebeu os sinais da queda de pressão total do leito, TRD 2, de modelo 616-5, ligado aos pontos P3 e P10, tinha faixa de leitura de 0 a 40 in H_2O; e o transdutor TRD 3, de modelo 616-3, com faixa de leitura de 0 10 in H_2O. Todos os transdutores apresentavam sinal de saída de 4 a 20 mA.

Outros pontos de medida de pressão eram encontrados na coluna (P5 ao P9), destinados à obtenção de dados em várias alturas de leito, necessitando somente trocar as conexões dos transdutores até o ponto do qual se desejava trabalhar.

A placa de orifício foi calibrada utilizando dados de corrente elétrica registrados pelo software LabVIEW no transdutor TRD 1 (posteriormente convertidos em pressão) e por verificação de vazão de ar com um anemômetro, originando a Equação 3.3:

$$Q = 6{,}50.10^{-4}(\Delta P^{0{,}529}) \qquad R^2 = 0{,}998 \qquad (3.3)$$

onde Q é a vazão de ar (em m³/s) e ΔP é a diferença de pressão na placa de orifício (em Pa).

O sistema de aquisição de dados foi formado por transdutores de pressão, módulo condicionador de sinais, placa de aquisição, computador e o software LabVIEW.

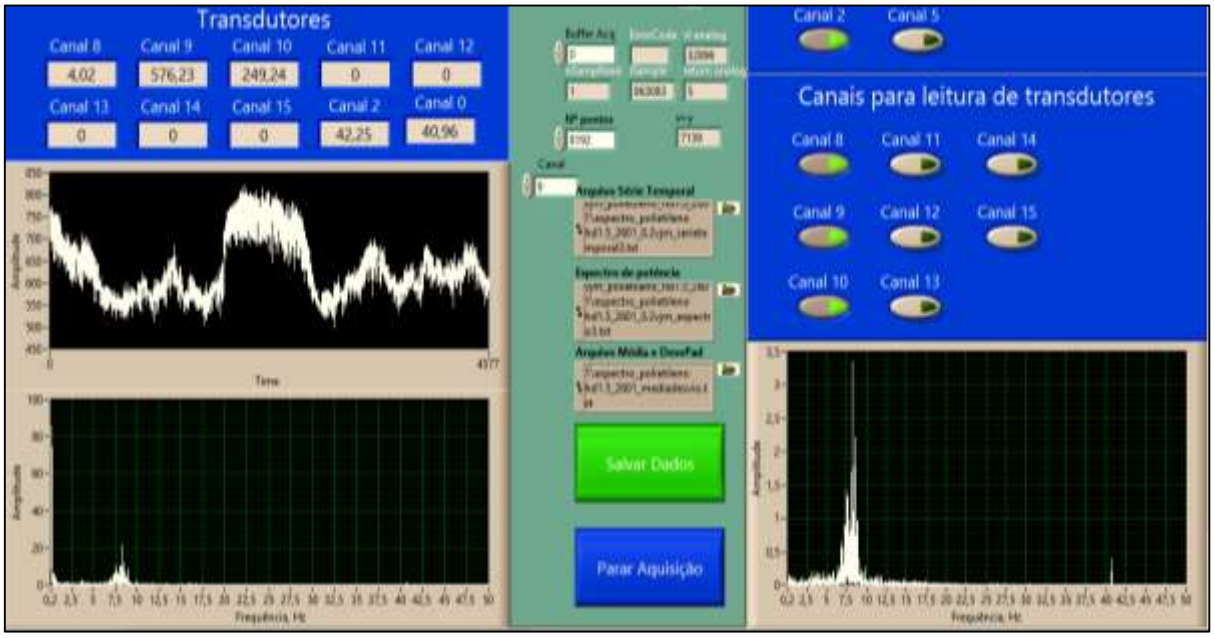
A placa de aquisição de dados era da marca Lynx Tecnologia Eletrônica Ltda., modelo ADS0500 de 12 bits. Possuía conversor analógico-digital com 16 canais diferenciais dentre os quais somente foram empregados 3 para medidas de pressão pelos transdutores e 7 para os termopares.

O software LabVIEW versão 8.5 foi utilizado para o registro dos dados obtidos durante os experimentos no leito. Desenvolvido pela National Instruments, o LabVIEW oferece ao usuário a possibilidade de criar programas através de Instrumentos Virtuais (VI), com o emprego de linguagem de programação gráfica. O monitoramento *online* é feito pelo

Painel Frontal, onde se pode acompanhar a aquisição dos dados bem como interromper ou modificar condições desta.

O Instrumento Virtual desenvolvido para o experimento permitiu ao usuário a escolha das variáveis que se desejavam registrar os dados, através do comando de liga/desliga, de cada canal ativo ligado ao leito, localizados no Painel Frontal. A leitura da qualquer variável era possível através de telas gráficas de acompanhamento, bem como a visualização dos espectros gerados após tratamento de cada conjunto de aquisição. A taxa de amostragem também era definida pelo usuário, bem como o número de pontos de medidas para cada conjunto. A Figura 3.3 ilustra o painel frontal do VI utilizado no estudo.

Figura 3.3. Painel frontal do instrumento virtual utilizado nos experimentos.



Através de algoritmo criado para o sistema experimental no LabVIEW 8.5, arquivos com registros de todas as variáveis medidas foram gerados e salvos em local definido pelo usuário no computador. Esses arquivos eram compostos pelas amostras de séries temporais (com matrizes de 16 colunas e número de linhas igual ao número de pontos por medidas), medidas dos espectros de potência gerados pela função *Spectral Measurements* e por amostras de matrizes geradas pelo cálculo da média e desvio padrão das séries temporais.

3.3 Metodologia experimental

3.3.1 Obtenção das curvas fluidodinâmicas

As curvas fluidodinâmicas de cada leito de partículas foram construídas para alturas de leito de 0,21m e 0,315m, que correspondiam a uma relação altura de leito/diâmetro de coluna de 1:1 e 1,5:1, respectivamente. A queda de pressão máxima, queda de pressão no jorro estável e velocidade de jorro mínimo foram os parâmetros obtidos das curvas. A taxa de aquisição de dados foi fixada em 100 Hz, onde para cada valor médio de pressão e velocidade foi coletado um grupo de 1024 pontos.

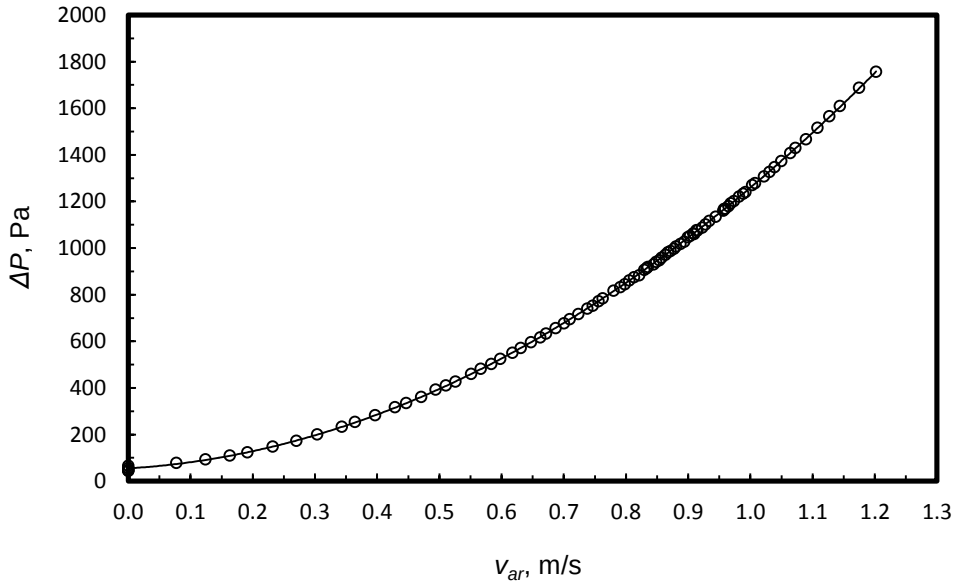
As variáveis que compõem a curva fluidodinâmica são a velocidade do ar e a queda de pressão no leito de partículas. A velocidade superficial do ar, v_{ar}, foi calculada através da equação de calibração da placa de orifício, considerando a área da seção cilíndrica do leito (Equação 3.4).

$$\mathrm{v_{ar}} = 0{,}0188 * \Delta \mathrm{P}^{0{,}529} \tag{3.4}$$

A queda de pressão total no leito foi obtida pela diferença das pressões entre os pontos *P3* e *P10*, e sua leitura foi feita pelo transdutor TRD 2.

Antes da realização das corridas experimentais, realizou-se a curva com o leito vazio, a fim de obter a equação da queda de pressão no leito nesta condição (Figura 3.4).

Figura 3.4. Queda de pressão no leito vazio.



A curva da Figura 3.4 forneceu a equação de queda de pressão no leito vazio, que posteriormente foi descontada da queda de pressão total do leito (Equação 3.5):

$$\Delta P_B = 1046{,}1 * {v_{ar}}^2 + 158{,}38 * v_{ar} + 55{,}113 \qquad R^2 = 0{,}999 \qquad (3.5)$$

onde ΔP_B é a queda de pressão no leito vazio, dada em Pa.

Para obtenção das variáveis da curva fluidodinâmica, a coluna foi carregada com massa conhecida de partículas, correspondendo à altura necessária para satisfazer a relação de H_o/D_c desejada. Partindo-se de velocidade de ar nula, gradualmente em ascensão, valores médios de pressões diferenciais foram coletados.

Além do monitoramento do registro dos dados coletados durante o experimento, foram realizadas observações visuais da movimentação das partículas no leito, conforme as mudanças na velocidade do ar, como outra forma de identificação dos regimes.

O aumento da velocidade do ar ocorreu até a observação de queda de pressão manter-se constante no leito, correspondente ao regime de jorro estável. Em seguida, realizou-se a coleta de pontos do seguimento da curva correspondente à diminuição da velocidade do ar, até que não houvesse movimentação de partículas.

3.3.2 Obtenção dos espectros de potência

Os espectros de potência gerados por análise espectral das flutuações de pressão, apresentados neste trabalho, resultaram da média de três espectros obtidos nas condições operacionais estudadas.

Quanto ao número de pontos por janela de tempo, foram empregadas 8.192 medidas, número suficiente para a obtenção de espectros de potência com resolução satisfatória (FELIPE, 2004), em uma taxa de aquisição de 100 Hz. Portanto, cada espectro de potência levou aproximadamente 1 minuto e 22 segundos para ser obtido.

A partir das curvas fluidodinâmicas das relações altura de leito estático/diâmetro de coluna de 1:1 e 1,5:1, observaram-se faixas de velocidade de ar no qual o regime de leito fixo se estabeleceu, bem como o regime de jorro interno e jorro estável, indicando dessa

forma em qual vazão de ar os espectros de potência destes regimes de contato deviam ser obtidos.

Os espectros de potência para leito fixo foram gerados em baixas velocidades, garantindo dessa forma a sua existência. Já para jorro interno, o método empregado foi de registrar os dados desse regime ligeiramente após o colapso do leito, ou seja, provocando o surgimento do jorro estável, e lentamente seu colapso, isso porque a observação visual do jorro interno não foi feita diretamente na configuração de coluna empregada.

Tomando-se os valores de velocidade de jorro mínimo, realizou-se a obtenção de espectros de potência em condições de jorro estável com maiores velocidade do ar. Observações visuais desse regime puderam ser feitas tanto na seção transparente da coluna como na parte superior, quando não oferecessem riscos nem perda de partículas em altas velocidades. A estabilidade do jorro, homogeneidade na movimentação das partículas na região da fonte bem como altura do leito foram cuidadosamente observadas com intuito de confirmar, em altas velocidades, a evolução de jorro estável para outros regimes de contato.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização de partículas

As propriedades físicas dos sólidos são apresentadas na Tabela 4-1. Dentre os sólidos empregados, os que apresentaram maior massa específica foram o vidro, seguido pelo arroz e pela soja, esses últimos com os maiores diâmetros médios, de 5,18 e 5,97 mm, respectivamente. Embora a porosidade do leito das diferentes partículas tenha apresentado resultados muito próximos entre si, exceto para o arroz, a esfericidade das mesmas foi bastante discrepante, isso devido às formas geométricas dos sólidos bem diversas. Por exemplo, enquanto as partículas de vidro e as sementes de soja indicaram esfericidades próximas de 1 (0,92 e 0,89, respectivamente), as sementes de arroz resultaram em 0,22. A diversidade de diâmetros de partículas e massa específica dos sólidos salientam a importância dos resultados deste trabalho quanto à análise espectral dos regimes de leito de jorro.

Tabela 4-1. Caracterização física das partículas estudadas.

Partículas	d_p, mm	ρ_s, kg/m³	ε	φ
Soja	5,97*	1277,6	0,44	0,89 ± 0,04
Arroz	5,18 ± 0,04	1436,08	0,55	0,22 ± 0,07
Polietileno II	4,97 ± 0,04	941,68	0,41	0,63 ± 0,05
Poliuretano	3,02 ± 0,03	918,93	0,40	0,70 ± 0,04
Vidro	2,99*	2792,62	0,46	0,92 ± 0,03
Polietileno I	2,37±0,02	1042,50	0,44	0,83 ± 0,04

* Diâmetros médios obtidos por picnometria em duplicata.

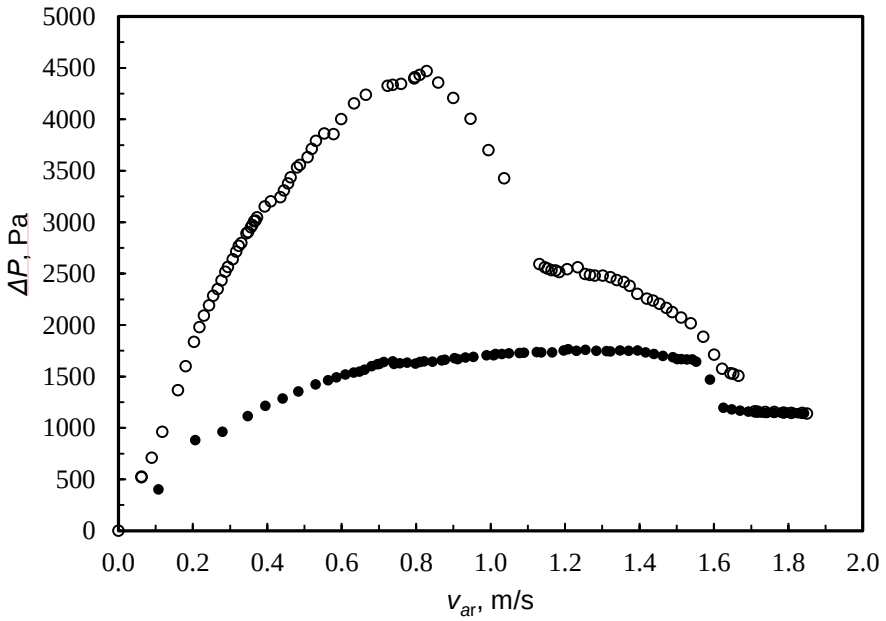
4.2 Estudo fluidodinâmico

As curvas fluidodinâmicas obtidas apresentaram padrão típico nos seus perfis, tornando-se fácil a determinação dos parâmetros fluidodinâmicos através delas, bem como a identificação de três regimes de contato sólido-gás, leito fixo, jorro interno e jorro estável, sendo que os dois primeiros não puderam ser caracterizados visualmente.

A Figura 4.1 mostra a queda de pressão no leito de partículas de vidro em função da velocidade superficial do ar. A resistência das partículas de vidro à passagem do ar e consequentemente à formação do jorro implicou nos maiores valores de queda de pressão máxima e de jorro estável, em comparação aos outros sólidos estudados.

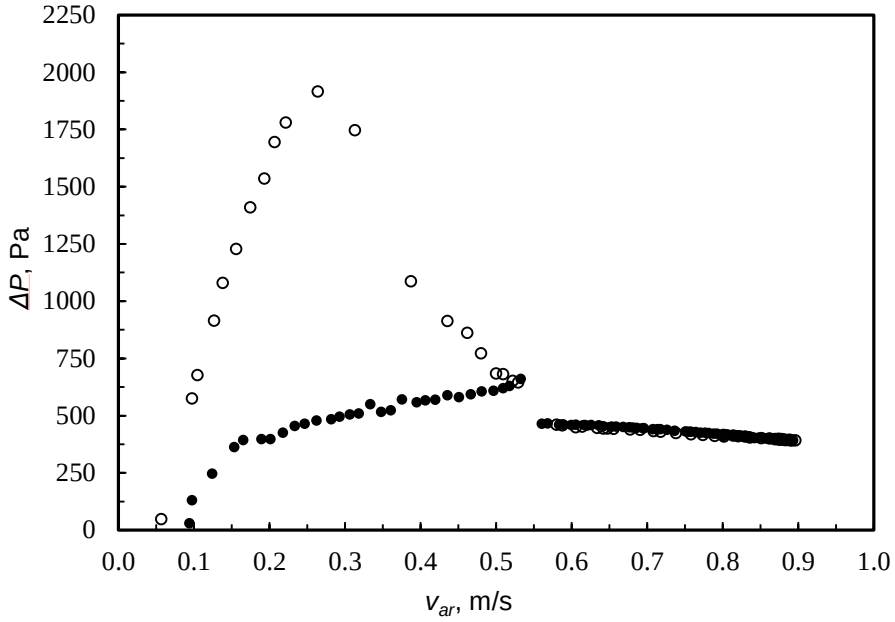
O leito de partículas de vidro apresentou, durante o regime de jorro estável, movimentação homogênea das partículas ao retornarem à base pela região anular e sua fonte não sofreu oscilações de altura em velocidades constantes. Este foi o único sólido em que só foi possível realizar experimentos com relação altura do leito fixo/diâmetro da coluna de 1:1, dada a elevada massa específica do vidro. Esta característica física não permitiu que o soprador de ar superasse a máxima queda de pressão exigida pelo leito.

Figura 4.1. Curva fluidodinâmica do vidro. Condições: m_p = 5,5 kg; H_O=0,21 m**.**



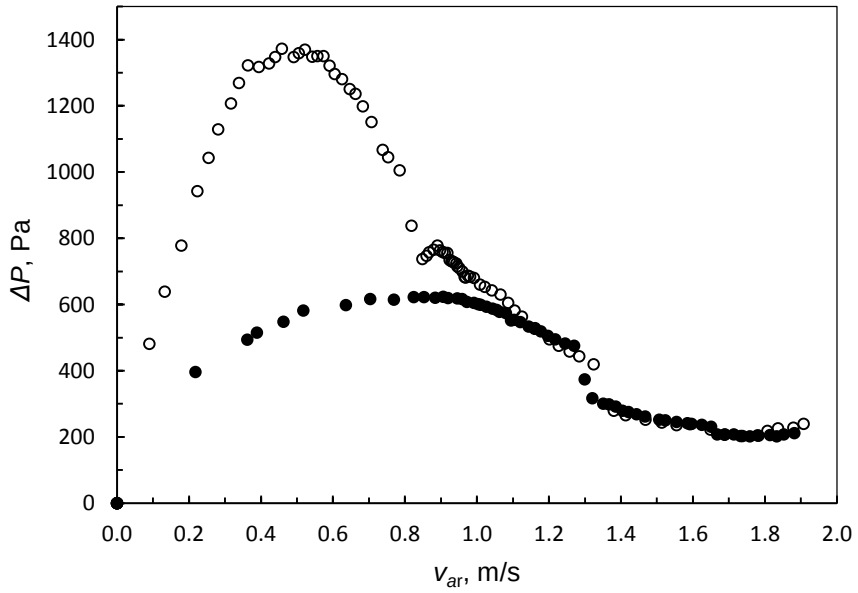
O leito de jorro formado pelas partículas de polietileno I alcançou regime de jorro estável com a menor velocidade do ar dentre todos os sólidos (Figura 4.2).

Figura 4.2. Curva fluidodinâmica do polietileno I. Condições: m_p=2 kg; H_O=0,21 m**.**



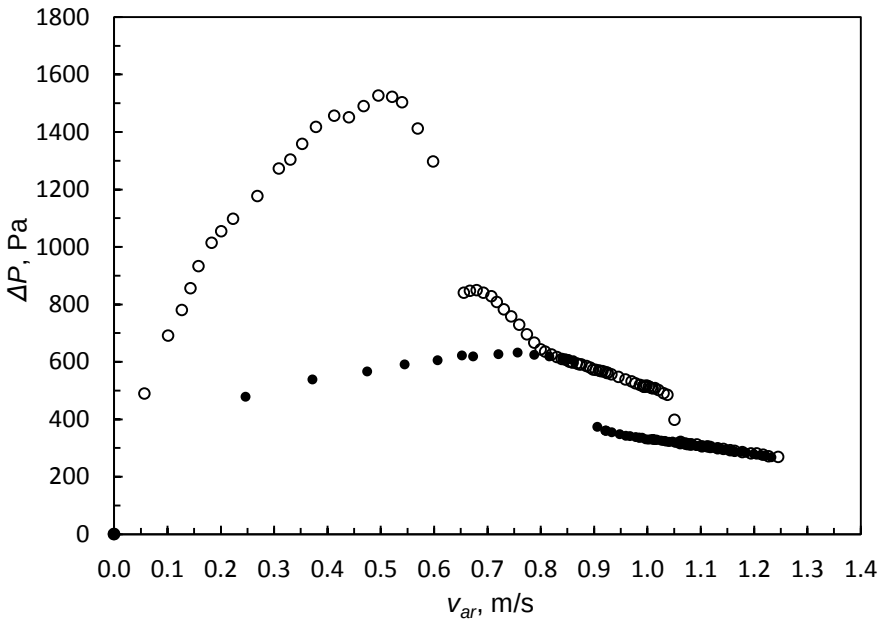
A Figura 4.3 apresenta a curva fluidodinâmica do leito do polietileno II. Para o leito de partículas deste sólido, quando o jorro se formou, a fonte comportou-se de forma regular, ou seja, para a faixa de velocidade de ar correspondente à condição de jorro estável, a fonte se manteve homogênea, com baixa variação de altura.

Figura 4.3. Curva fluidodinâmica do polietileno II. Condições: m_p=1,95 kg; H_O=0,21 m**.**



O leito de partículas de poliuretano apresentou singularidades a partir da condição de jorro mínimo, embora sua curva fluidodinâmica tenha apresentado padrão típico (Figura 4.4).

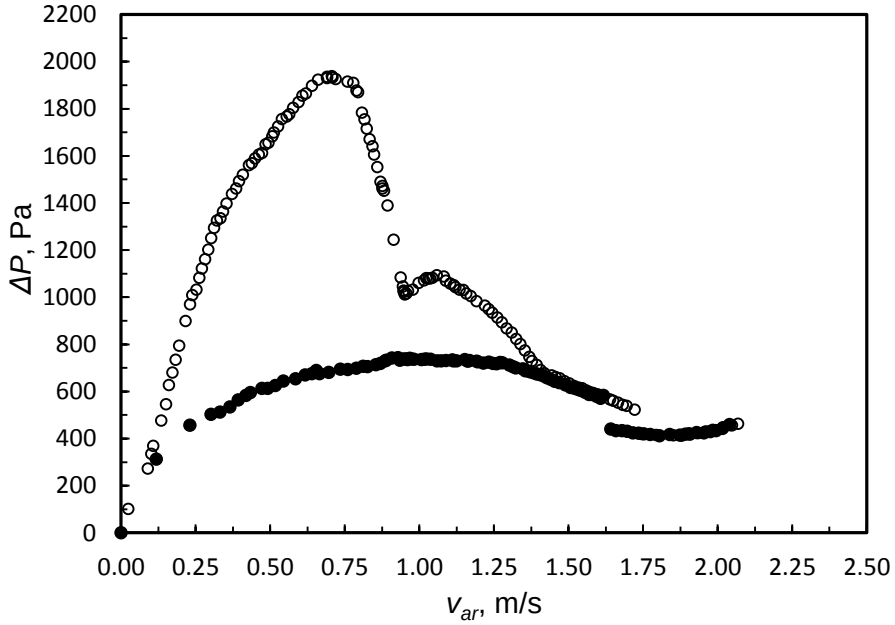
Figura 4.4. Curva fluidodinâmica do poliuretano. Condições: m_p=2,1 kg; H_O=0,21 m.



No leito do poliuretano, quando o leito de jorro se estabeleceu, na velocidade de mínimo jorro, a fonte passou a oscilar entre duas direções na região anular, fazendo com que as partículas caíssem ora em maior quantidade para um lado e ora para outro, o que ocasionou variações momentâneas na altura do leito. Já para a velocidade de 0,99 m/s, o que correspondeu a 1,1v_{jm}, a movimentação da fonte passou a ser exclusivamente centralizada e com circulação homogênea das partículas. Enquanto ocorria o registro dos dados para a curva fluidodinâmica, o regime de leito de jorro se manteve estável.

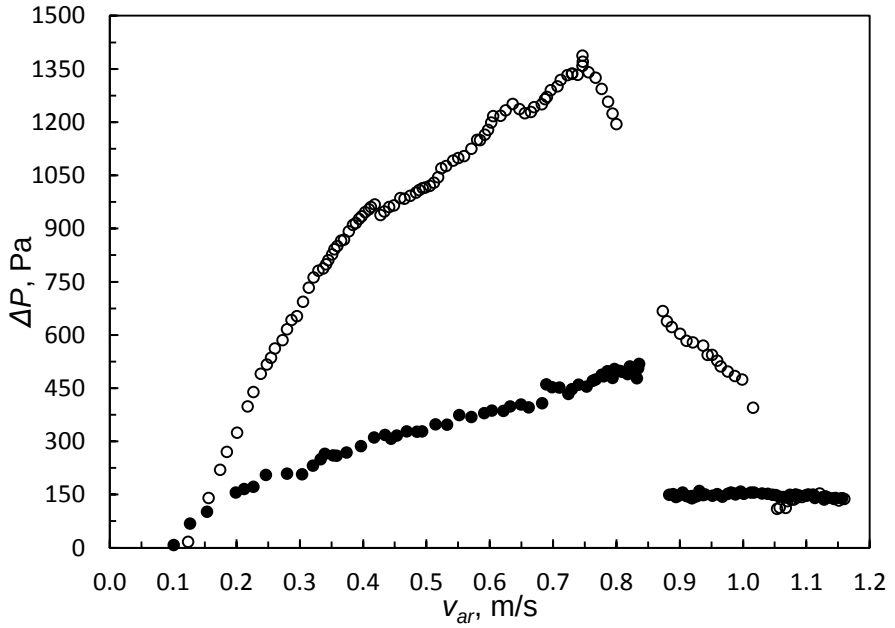
A Figura 4.5 indica a queda de pressão no leito da soja em função da velocidade superficial do ar. O leito de partículas de soja apresentou fluidodinâmica semelhante ao das partículas de vidro no que se refere à homogeneidade da movimentação dos sólidos durante o jorro, podendo-se justificar esse fato à forma desses dois sólidos, que possuem geometria esférica e, portanto, apresentam maior facilidade de escoamento na região anular e circulação no leito. Entretanto, a soja possui massa específica menor que o vidro e maior diâmetro de partícula, o que acarretou em menores valores de queda de pressão no leito devido à menor resistência à passagem do ar no leito.

Figura 4.5. Curva fluidodinâmica da soja. Condições: m_p=2,76 kg; H_O=0,21 m**.**



A curva de queda de pressão em função de velocidade do ar para o leito de arroz está representada na Figura 4.6. A fluidodinâmica das partículas de arroz se mostrou muito diferente dos outros sólidos, o que pôde ser observado visualmente.

Figura 4.6. Curva fluidodinâmica do arroz. Condições: m_p=2,030 kg; H_O=0,21 m**.**



Na transição do jorro interno para jorro estável, o canal de jorro alcançou a superfície do leito e formou uma região de alta porosidade, porém sem ocorrer arraste de partículas nessa seção, não formando ainda a fonte (Figura 4.7).

Figura 4.7. Fotografia do leito de arroz. Condições: início do jorro, H_O=0,21m**.**

Esse fenômeno ocorreu até uma determinada velocidade do ar, a partir da qual a fonte surgiu e as partículas localizadas na região do jorro foram arrastadas desordenadamente até o topo da coluna, provocando oscilações na altura da fonte. Pode-se justificar o fato ao formato das partículas de arroz (esferoide prolato) que favoreceu o fenômeno. Pôde-se observar um caminho preferencial das partículas de arroz no retorno dessas à região anular, ocorrendo predominantemente de um único lado da coluna, caracterizando assim uma movimentação irregular dos sólidos durante o leito de jorro operante.

Os parâmetros fluidodinâmicos das seis curvas de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para H_o = 0,21m, anteriormente apresentadas, estão resumidos na Tabela 4-2.

Nesta altura de leito, o polietileno I foi o sólido que apresentou a menor velocidade de mínimo jorro, sendo um dos sólidos mais leves estudados (dentre esses, o poiletileno I foi o que apresentou a maior porosidade de leito). Já os maiores valores de v_{jm}

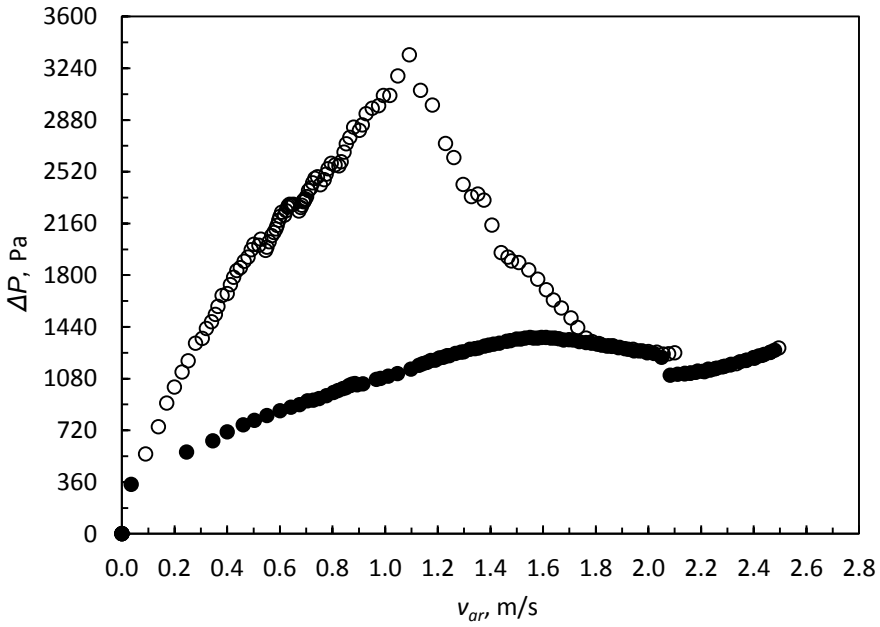
foram os da soja e do vidro, os leitos com maiores cargas de partículas para a mesma altura, apresentando os mais altos valores de ΔP_M.

Tabela 4-2. Parâmetros fluidodinâmicos experimentais para H_O=0,21m.

Partícula	v_{jm}, m/s	ΔP_{jm}, Pa	ΔP_M, Pa
Soja	1,64	440,82	1937,72
Vidro	1,63	1194,83	4468,31
Polietileno II	1,35	300,94	1372,19
Poliuretano	0,91	372,82	1525,71
Arroz	0,88	148,09	1386,50
Polietileno I	0,56	464,69	1916,15

A Figura 4.8 mostra a curva fluidodinâmica do leito de soja na altura de leito H_o = 0,315m, correspondente à relação alturade leito/diâmetro de coluna de 1,5:1.

Figura 4.8. Curva fluidodinâmica da soja. Condições: m_p =5,050 kg; H_O=0,315m**.**



As curvas dos demais sólidos estão demonstradas no APÊNDICE 1. Na altura de H_o = 0,315m, não foi obtida a curva fluidodinâmica do vidro pois, devido à massa específica elevada desse sólido, a vazão máxima fornecida pelo soprador de ar não foi suficiente para o surgimento do regime de jorro, portanto, nessas condições o estudo da análise espectral do vidro também não foi realizado.

A Tabela 4-3 indica os parâmetros fluidodinâmicos experimentais para a H_o = 0,315m.

Tabela 4-3. Parâmetros fluidodinâmicos experimentais para *Ho*=0,315m.

Partícula	v_{jm}, m/s	ΔP_{jm}, Pa	ΔP_M, Pa
Soja	2,08	1102,90	3332,94
Polietileno II	1,71	776,22	2260,98
Arroz	1,30	536,42	2332,62
Poliuretano	1,12	647,42	2293,37
Polietileno I	0,62	872,04	3582,49

Para a H_o = 0,315m, o polietileno I foi o sólido que apresentou a menor v_{jm}, um dos maiores valores de ΔP_{jm} e o maior valor de $\Delta P_{M.}$ Já o leito de arroz, sólido com maior massa específica empregado nessa altura, apresentou a menor ΔP_{jm}.

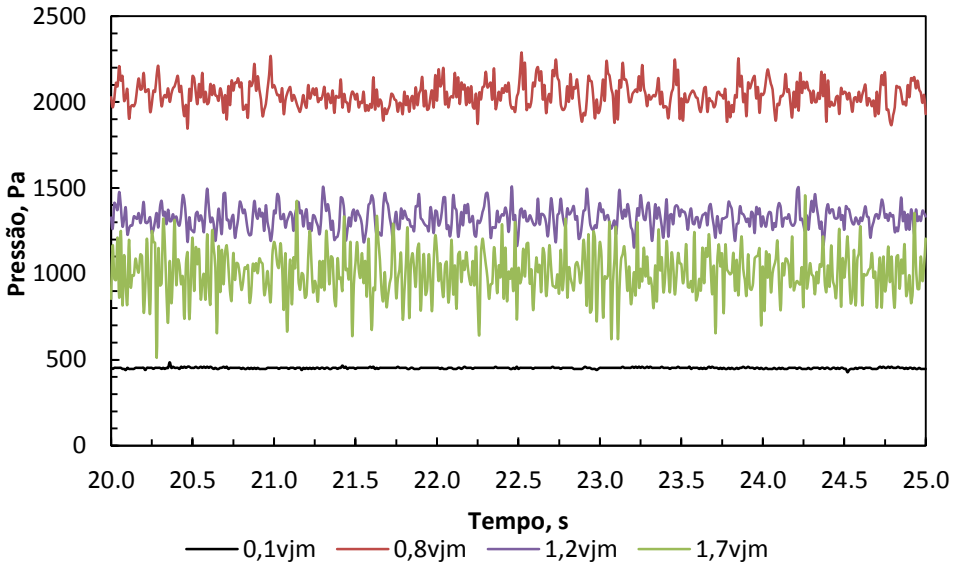
4.3 Desvio padrão das flutuações de pressão

A seguir é apresentada a análise no domínio do tempo dos registros de flutuação de pressão para todos os sólidos empregados nesse estudo. São apresentadas em sequência as séries temporais de pressão e desvio padrão para vidro, polietileno I, polietileno II, poliuretano, soja e arroz.

As séries temporais de flutuação de pressão do leito de vidro em algumas velocidades estão indicadas na Figura 4.9. Em velocidades muito baixas (por volta de 0,1v_{jm}) não houve movimentação significativa das partículas no leito, o que implicou em pouca

variação na pressão medida na base da seção cônica da coluna. A amplitude aumentou com o aumento na velocidade de ar, gerando perturbações no leito, ocasionadas devido à formação da cavidade central, que deu origem ao jorro. Comparando as curvas das velocidades de 0,8, 1,2 e 1,7v_{jm}, observa-se a flutuação de pressão com menores amplitudes na condição de jorro estável, em virtude da movimentação homogênea das partículas no leito, ao passo que na situação de velocidade muito elevada (v_{ar} = 1,7v_{jm}) instabilidades na fluidodinâmica do leito implicaram em grandes amplitudes do sinal de pressão.

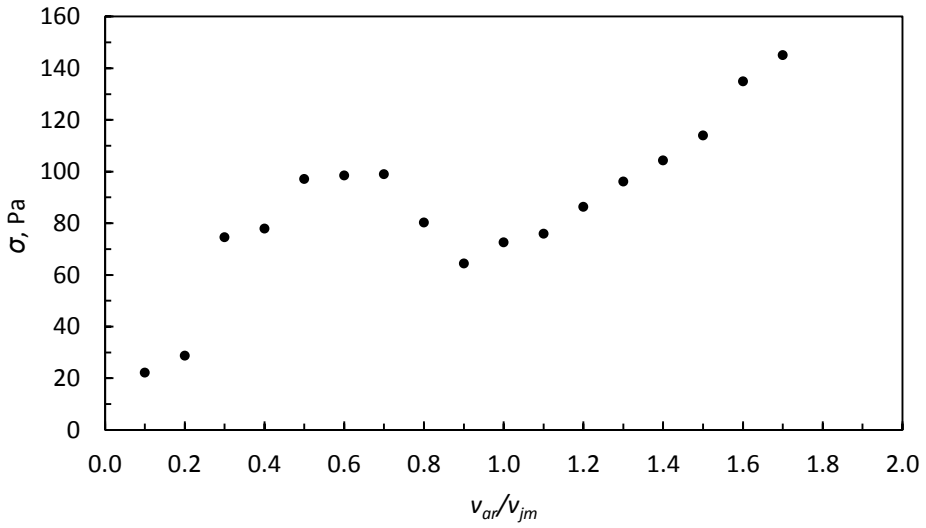
Figura 4.9. Séries temporais. Regimes: leito fixo (v_{ar}=0,1v_{jm}), jorro interno (v_{ar}=0,8v_{jm}), jorro estável (v_{ar}=1,2v_{jm}) e jorro instável (v_{ar}=1,7v_{jm}). Sólido: vidro. H_O=0,21m.



A Figura 4.10 indica o comportamento do desvio padrão da flutuação de pressão no leito de vidro.

Para o leito de vidro, a velocidade do ar de aproximadamente 0,5v_{jm} correspondeu à velocidade de 0,81 m/s e caracterizou a região de transição entre leito fixo e jorro interno, verificada na curva fluidodinâmica através da queda de pressão máxima. Após sucessivos acréscimos na velocidade do ar, o desvio padrão decresceu na transição de jorro interno para jorro mínimo, chegando a um valor mínimo, 64,4 Pa, em 0,9v_{jm} . Após a formação da fonte, para velocidades acima da velocidade de mínimo jorro, o desvio padrão ascendeu para todas as condições de estudo.

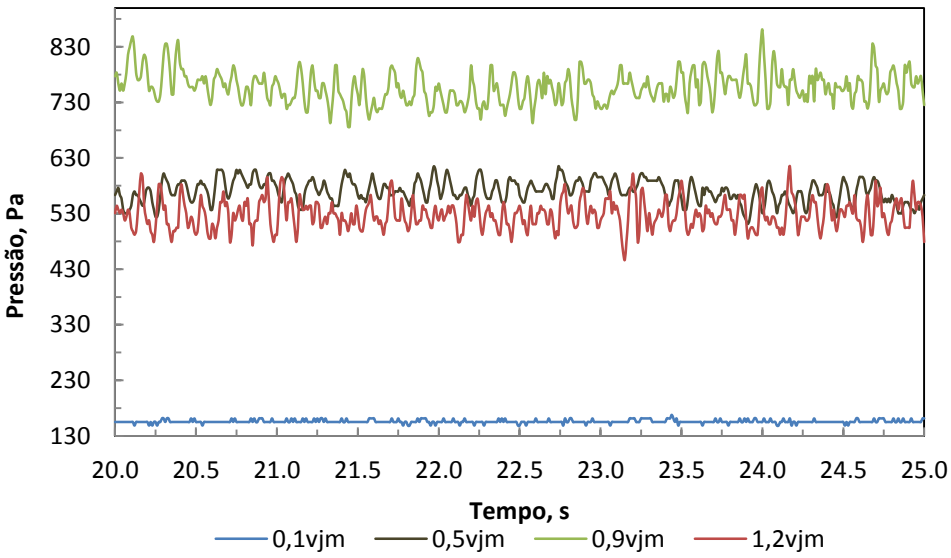
Figura 4.10. Desvio padrão da flutuação de pressão. Sólido: vidro. H_O=0,21m**.**



O regime de jorro instável não foi alcançado no leito de vidro, pois, devido à elevada densidade do sólido e ao limite de vazão máxima fornecida pelo soprador, velocidades acima de 1,7v_{jm} não puderam ser empregadas.

A Figura 4.11 apresenta séries temporais de flutuação de pressão do leito de polietileno I em algumas velocidades para regimes de leito fixo, jorro interno e jorro estável e transição entre eles.

Figura 4.11. Séries temporais. Regimes: leito fixo (v_{ar}=0,1v_{jm}), transição de leito fixo para jorro interno (v_{ar}=0,5v_{jm}), transição de jorro interno para jorro estável (v_{ar}=0,9v_{jm}) e jorro estável (v_{ar}=1,2v_{jm}). Sólido: polietileno I. H_O=0,21m**.**

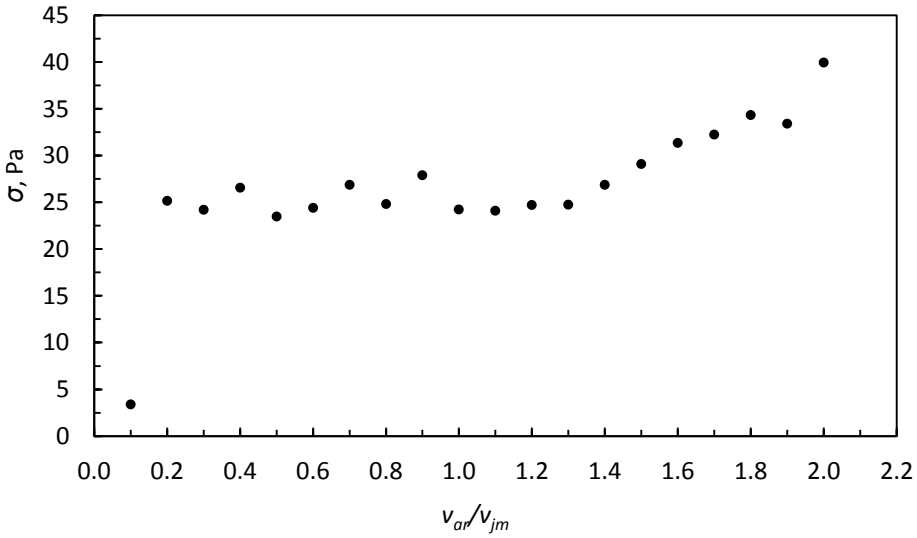


No regime de leito fixo, a passagem de ar em baixa velocidade pelos espaços vazios do leito causou vibrações nos sólidos, resultando em baixa queda de pressão e flutuações de pressão com pouca amplitude. Conforme a velocidade do ar aumentou, a formação da cavidade interna gerou flutuações de pressão mais periódicas, como é observado para v_{ar} = 0,5v_{jm}.

Para o leito de polietileno I, até a velocidade relativa de 0,9v_{jm}, visualmente pôde-se observar apenas uma pequena expansão do leito. Na velocidade de aproximadamente 0,9v_{jm} observou-se na superfície do leito um caminho preferencial de passagem do ar, na região anular, próximo da parede, com movimentação irregular de poucas partículas. Esse comportamento cessou quando se alcançou a velocidade de mínimo jorro, 0,56m/s, na qual o jorro estável se estabeleceu até a velocidade de 0,95 m/s (o que corresponde à velocidade relativa de 1,7v_{jm}).

A Figura 4.12 demonstra o comportamento do desvio padrão da flutuação de pressão do leito do polietileno I em função da velocidade do ar. Percebe-se que o desvio padrão oscilou em torno de aproximadamente 25 Pa desde leito fixo até 1,3v_{jm}. Somente a partir desta velocidade o desvio padrão passou a crescer com o acréscimo da velocidade do ar.

Figura 4.12. Desvio padrão da flutuação de pressão. Sólido: polietileno I. *Ho*=0,21m**.**



Na velocidade de 1,7v_{jm} a fonte não era mais homogênea e atingiu altura próxima ao limite da altura da coluna cilíndrica. Na velocidade de 1,07m/s (1,9v_{jm}) a movimentação irregular das partículas de polietileno I na fonte se intensificou, impossibilitando a visão do

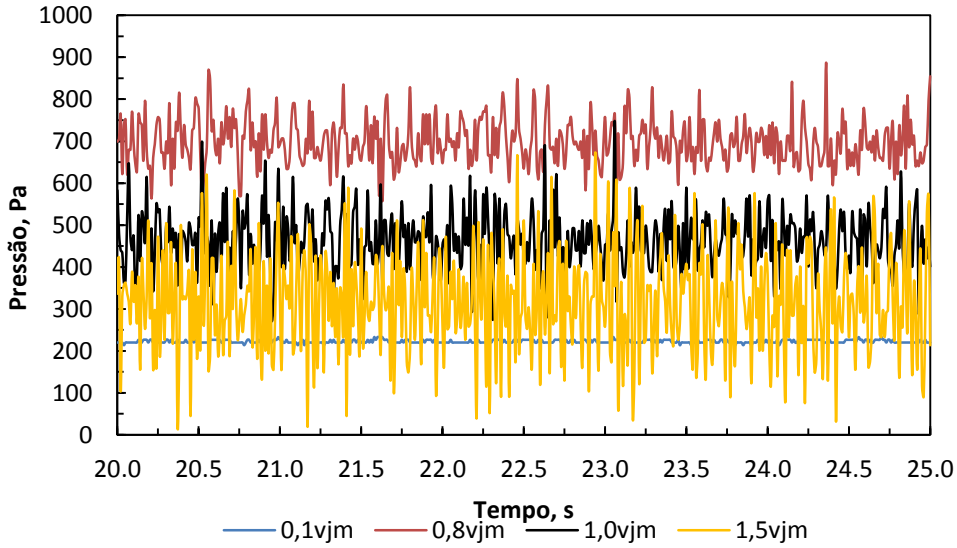
canal de jorro. Esse fenômeno se assemelhou ao observado no leito de soja, podendo ser confirmado pelos espectros de potência comentados mais adiante no texto.

No início do regime de jorro instável, com velocidade relativa de 1,9v_{jm}, o desvio padrão novamente apresentou redução, 33,4 Pa, sugerindo um perfil de comportamento deste parâmetro estatístico quanto às transições de regimes do leito de polietileno I, que sempre estiveram em diminuição.

As séries temporais para o polietileno II, em quatro regimes (leito fixo, jorro interno, jorro estável e jorro instável) são representadas na Figura 4.13.

A distinção entre os regimes de jorro interno (na velocidade de 0,8v_{jm}) e jorro estável (registrado na velocidade de mínimo jorro) não é confirmada pelas séries de tempo de pressão, pois ambas apresentam o mesmo comportamento de oscilação. Já a série temporal do regime de jorro instável se destaca, pois indica maiores amplitudes de sinais de pressão, causadas pela instabilidade fluidodinâmica dentro do leito operando em altas velocidades.

Figura 4.13. Séries temporais. Regimes: leito fixo (v_{ar}=0,1v_{jm}), jorro interno (v_{ar}=0,8v_{jm}), jorro estável (v_{ar}=1v_{jm}) e jorro instável (v_{ar}=1,5v_{jm}). Sólido: polietileno II. H_O=0,21m.



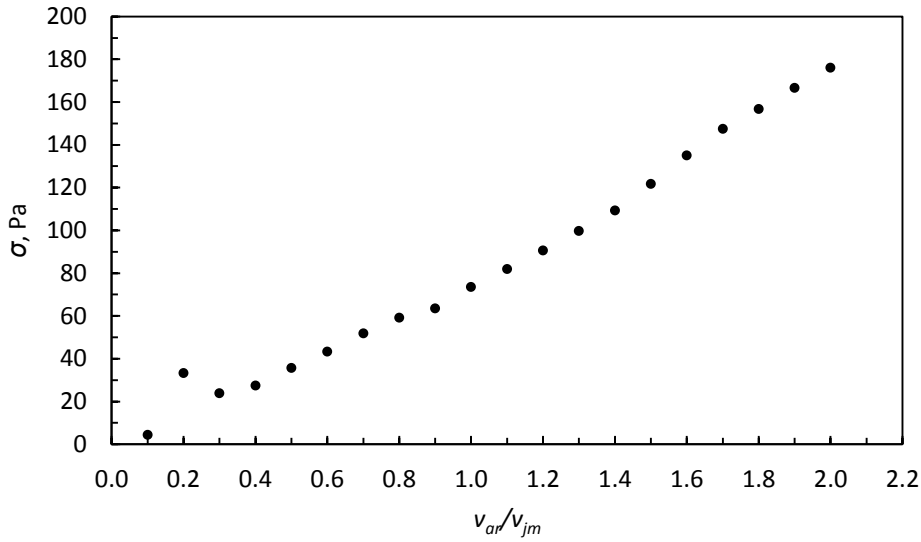
O leito de polietileno II apresentou comportamento típico de jorro estável até a velocidade de 1,5v_{jm}, quando a altura da fonte começou a oscilar, de forma que significativa quantidade de partículas alcançou o topo da seção cilíndrica, o que ocasionou uma redução na altura do leito. Esse comportamento foi percebido até a velocidade de 2,0v_{jm}, quando a maior parte dos sólidos passou a ser arrastada pelo ar, descaracterizando a fonte do jorro estável e

passando a ocorrer o jorro instável. Nessa situação observou-se uma diminuição acentuada na altura do leito na região cônica, impossibilitando sua visualização, da mesma forma como ocorreu com o leito de arroz.

A Figura 4.14 retrata o desvio padrão do leito de polietileno II em função de velocidades de ar. Na velocidade de mínimo jorro, o desvio padrão do sinal de flutuação de pressão foi de 73,5 Pa.

Visualmente pôde-se registrar a transição do jorro estável para jorro instável em velocidade de ar de 2,16m/s, o que corresponde a 1,6v_{jm}. A altura da fonte passou a oscilar e teve sua largura aumentada a ponto da fluidodinâmica tornar-se instável, além da redução na altura do leito. O desvio padrão para esse condição foi de 135,1 Pa.

Figura 4.14. Desvio padrão da flutuação de pressão. Sólido: polietileno II. *Ho*=0,21m**.**



Para o leito de poliuretano foi observado que, na velocidade de mínimo jorro, 0,9m/s, a fonte oscilou em direção à região anular, ocasionando variação na altura do leito. Nesta condição, foi registrado desvio padrão de 38,5 Pa. Para velocidades superiores a 1,1v_{jm}, a fonte passou a ter movimentação homogênea, típica de jorro estável. Algumas séries temporais do poliuretano são indicadas na Figura 4.15. Observou-se que com o aumento na velocidade do ar, houve a tendência das séries se tornarem mais aleatórias, além de gerarem maiores amplitudes na flutuação de pressão (Figura 4.16).

Figura 4.15. Séries temporais. Regimes: leito fixo (v_{ar}=0,1v_{jm}), jorro interno (v_{ar}=0,9v_{jm}), jorro estável (v_{ar}=1,2v_{jm}) e jorro instável (v_{ar}=1,5v_{jm}). Sólido: poliuretano. H_O=0,21m.

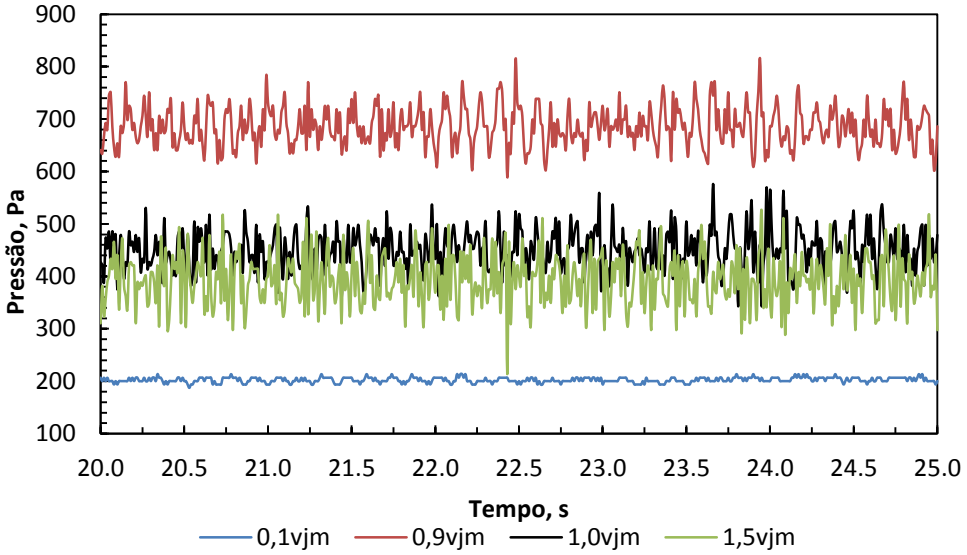
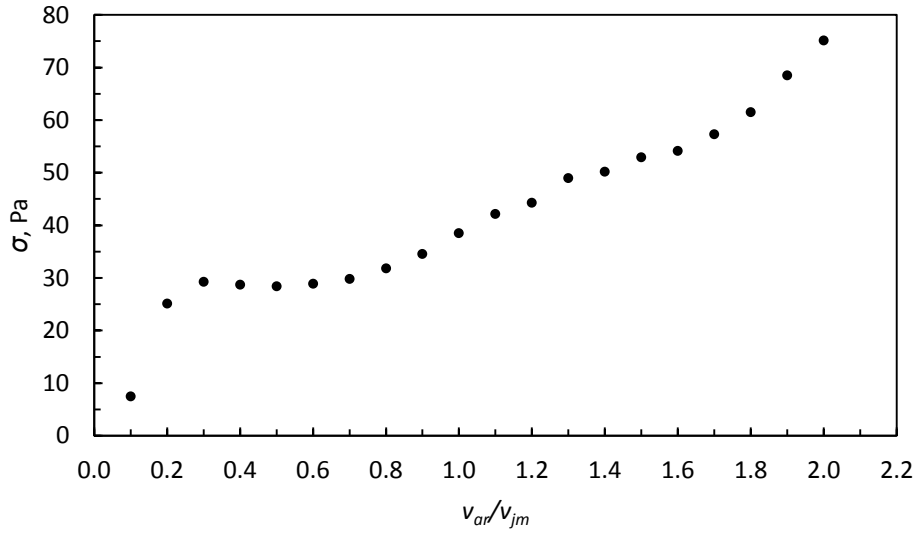
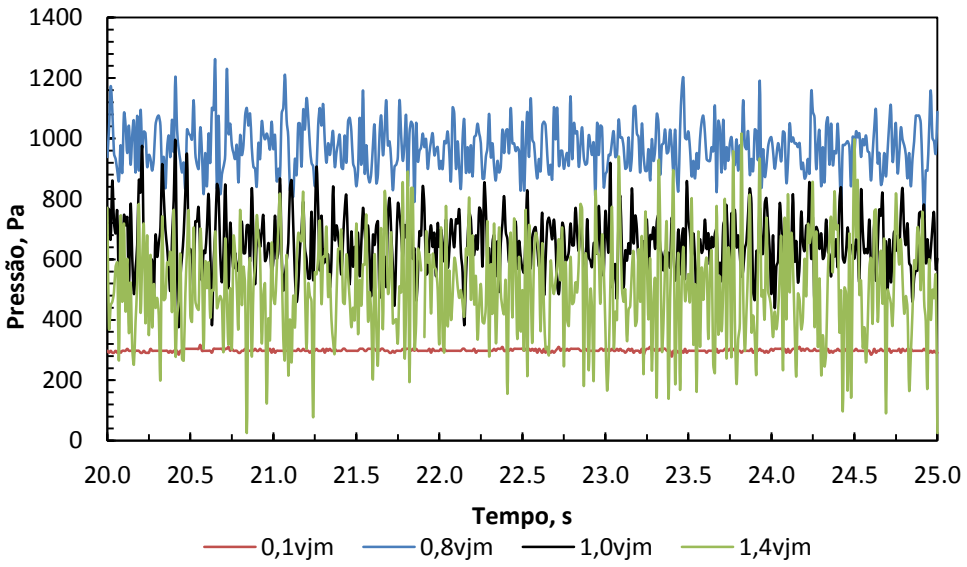


Figura 4.16. Desvio padrão da flutuação de pressão. Sólido: poliuretano. *Ho*=0,21m**.**



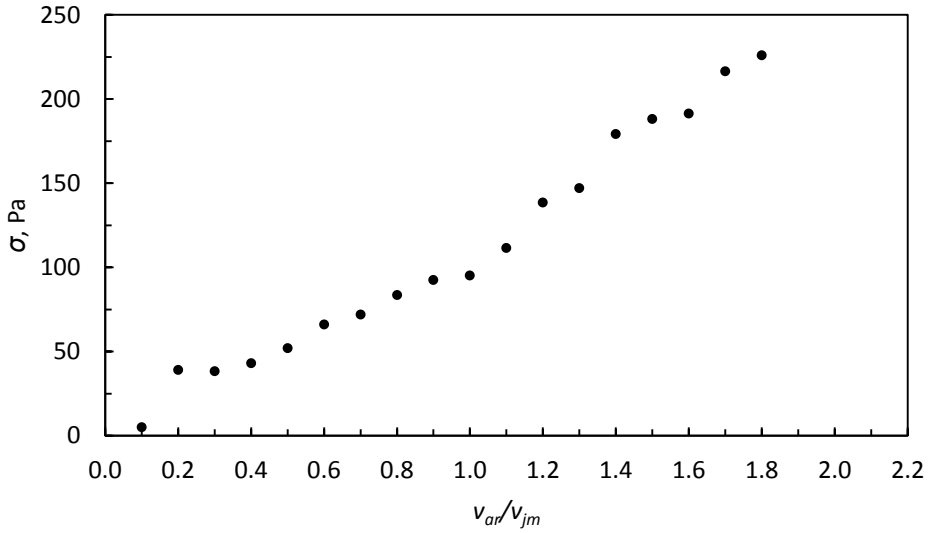
O leito de partículas de soja teve fluidodinâmica muito semelhante à do vidro, devido à esfericidade desses sólidos. Assim como ocorreu com o vidro, condições de velocidade acima de 1,8v_{jm} também não foram atingidas pelo leito de soja. Quatro regimes fluidodinâmicos do leito de soja são comparados em séries temporais na Figura 4.17. As flutuações de pressão da soja oscilaram de forma semelhante àquelas vistas no leito de vidro.

Figura 4.17. Séries temporais. Regimes: leito fixo (v_{ar}=0,1v_{jm}), jorro interno (v_{ar}=0,8v_{jm}), jorro estável (v_{ar}=1v_{jm}) e jorro instável (v_{ar}=1,4v_{jm}). Sólido: soja. H_O=0,21m.



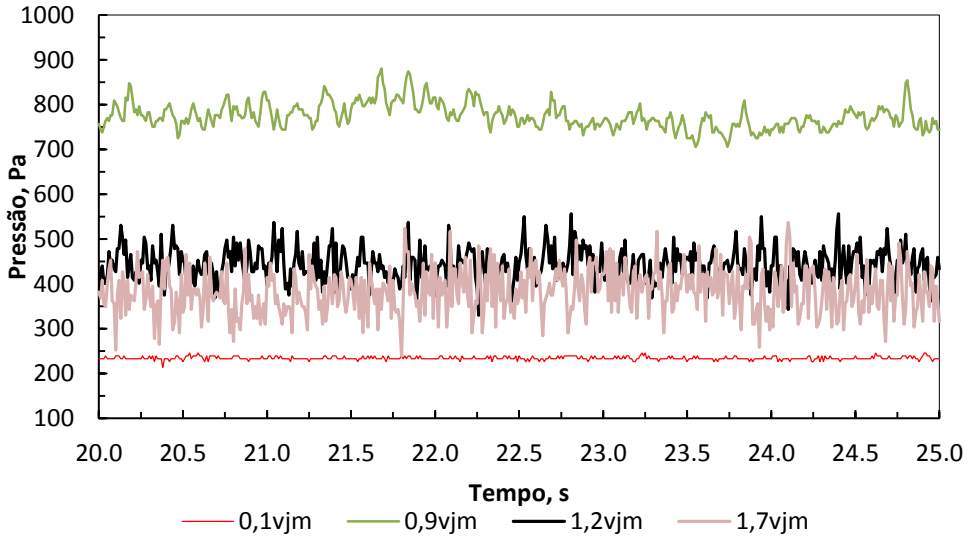
Embora a fluidodinâmica do leito de soja visualmente tenha se assemelhado ao comportamento do leito de vidro, no que diz respeito à curva do desvio padrão, se diferenciaram bastante. A soja apresentou comportamento do desvio padrão muito parecido ao do polietileno II e do poliuretano, com sucessivos aumentos com o aumento da velocidade do ar (Figura 4.18).

Figura 4.18. Desvio padrão da flutuação de pressão. Sólido: soja. H_O=0,21m.



A Figura 4.19 apresenta quatro séries temporais de flutuação de pressão, para regimes de leito fixo, jorro interno, jorro estável e para jorro instável, caracterizado assim devido à pulsação da fonte.

Figura 4.19. Séries temporais. Regimes: leito fixo (v_{ar}=0,1v_{jm}), jorro interno (v_{ar}=0,9v_{jm}), jorro estável (v_{ar}=1,2v_{jm}) e jorro instável (v_{ar}=1,7v_{jm}). Sólido: arroz. H_O=0,21m.

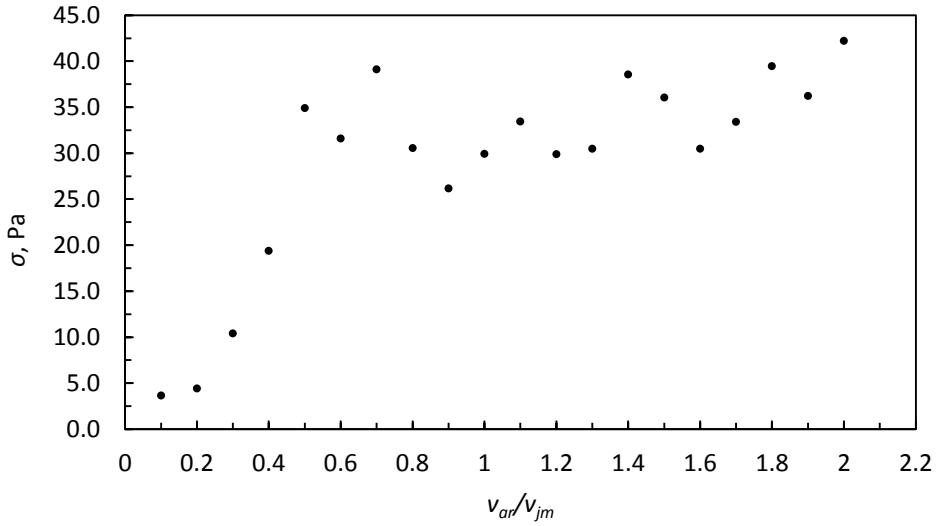


No leito de arroz a movimentação das partículas foi singular, como descrito no item 4.2 Estudo fluidodinâmico. Em velocidade de 0,9v_{jm}, o canal de jorro interno alcançou a superfície do leito formando uma região de alta porosidade, porém sem ocasionar o arraste de partículas nem a origem da fonte. Em situações de jorro plenamente desenvolvido, a fonte chegou a atingir a altura limite da coluna, com movimentação instável dos sólidos.

No regime de leito fixo a flutuação de pressão teve pouca amplitude. Conforme a velocidade do ar aumentava, a formação da cavidade interna implicava em maiores amplitudes na flutuação de pressão, porém com oscilações aleatórias como é observado na curva para v_{ar} = 0,9v_{jm}, gerando o crescimento do desvio padrão acima da velocidade de mínimo jorro.

A curva fluidodinâmica indicou queda de pressão máxima na velocidade do ar de 0,75 m/s, que fica dentro da faixa de velocidades relativas de 0,8 e 0,9v_{jm}; essa região representou a transição de leito fixo para jorro interno. Porém o comportamento do desvio padrão, Figura 4.20, não distingue essa transição; o que se observou foi o aumento do desvio padrão em velocidades até 0,5v_{jm} e, após essa condição, oscilações de flutuação de pressão foram predominantes em velocidades maiores.

Figura 4.20. Desvio padrão da flutuação de pressão. Sólido: arroz. H_O=0,21m.



4.4 Espectros de potência

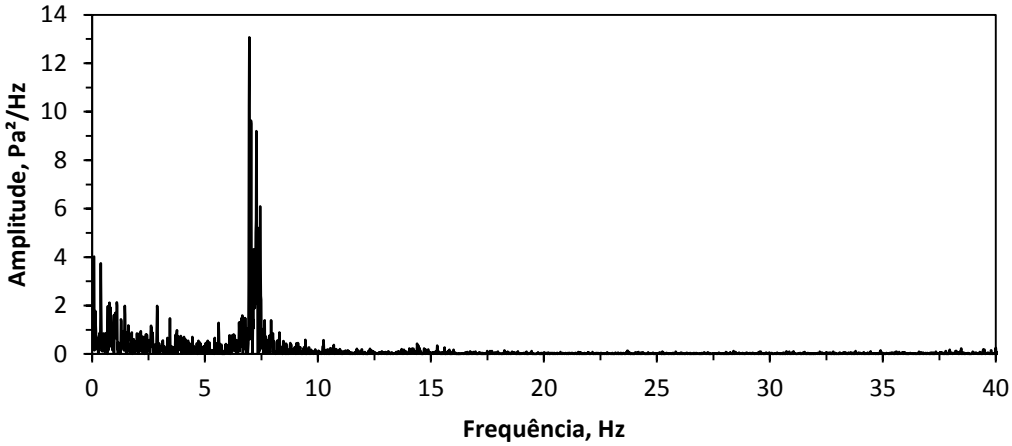
Todos os espectros de potência foram obtidos conforme metodologia descrita no item 3.3 Metodologia experimental, utilizando taxa de aquisição de 100 Hz e 8192 pontos coletados por amostra. Os sinais de flutuação de pressão foram registrados em pontos de medidas na região de entrada do ar, na base cônica do leito, e tratadas por Transformada Rápida de Fourier pelo software LabVIEW 8.5.

4.4.1 Espectros para vidro

As Figura 4.21, Figura 4.22 e Figura 4.23 demonstram os espectros do leito de vidro para os regimes de leito fixo e jorro interno em diferentes velocidades. Já a Figura 4.24 indica o espectro de potência do vidro na condição de mínimo jorro.

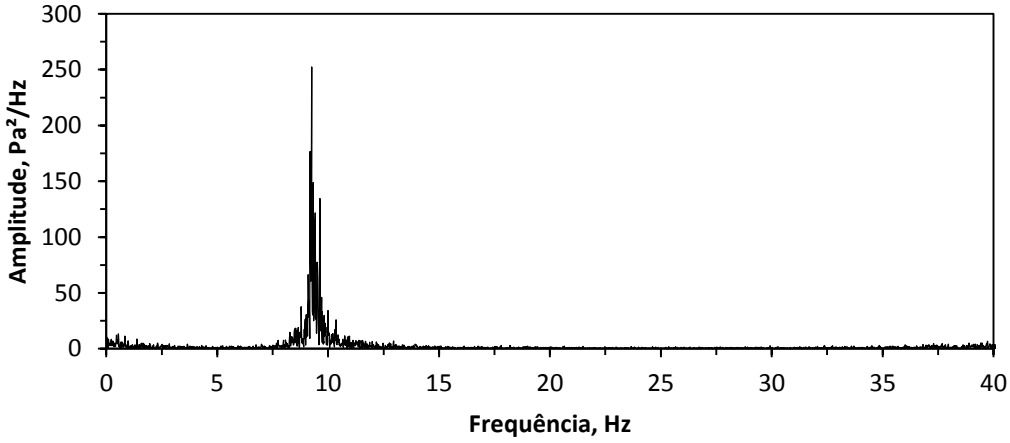
Em regime de leito fixo (Figura 4.21), o espectro apresenta uma frequência dominante de destaque próximo de 7,5 Hz. Esse comportamento do espectro no regime de leito fixo se confirmou para todos os sólidos empregados no estudo, nas duas alturas de leito analisadas.

Figura 4.21. Espectro de potência. Regime: leito fixo. Sólido: vidro. H_O=0,21 m. v_{ar}=0,1v_{jm} (0,16 m/s). Ponto de medida: P4.



Em regime de jorro interno, houve o início da formação do canal central do leito, e a movimentação das partículas que ocorreu nesta região implicou em flutuações de pressão expressivas, cujos sinais geraram espectros com frequência dominante bem nítida, como se observa na Figura 4.22. Nesta figura observa-se o espectro de potência do regime de jorro interno do leito de vidro na velocidade de 0,8v_{jm}, com componentes de frequência de alta amplitude entre 7,5 a 10 Hz e frequência dominante de aproximadamente 9,2 Hz.

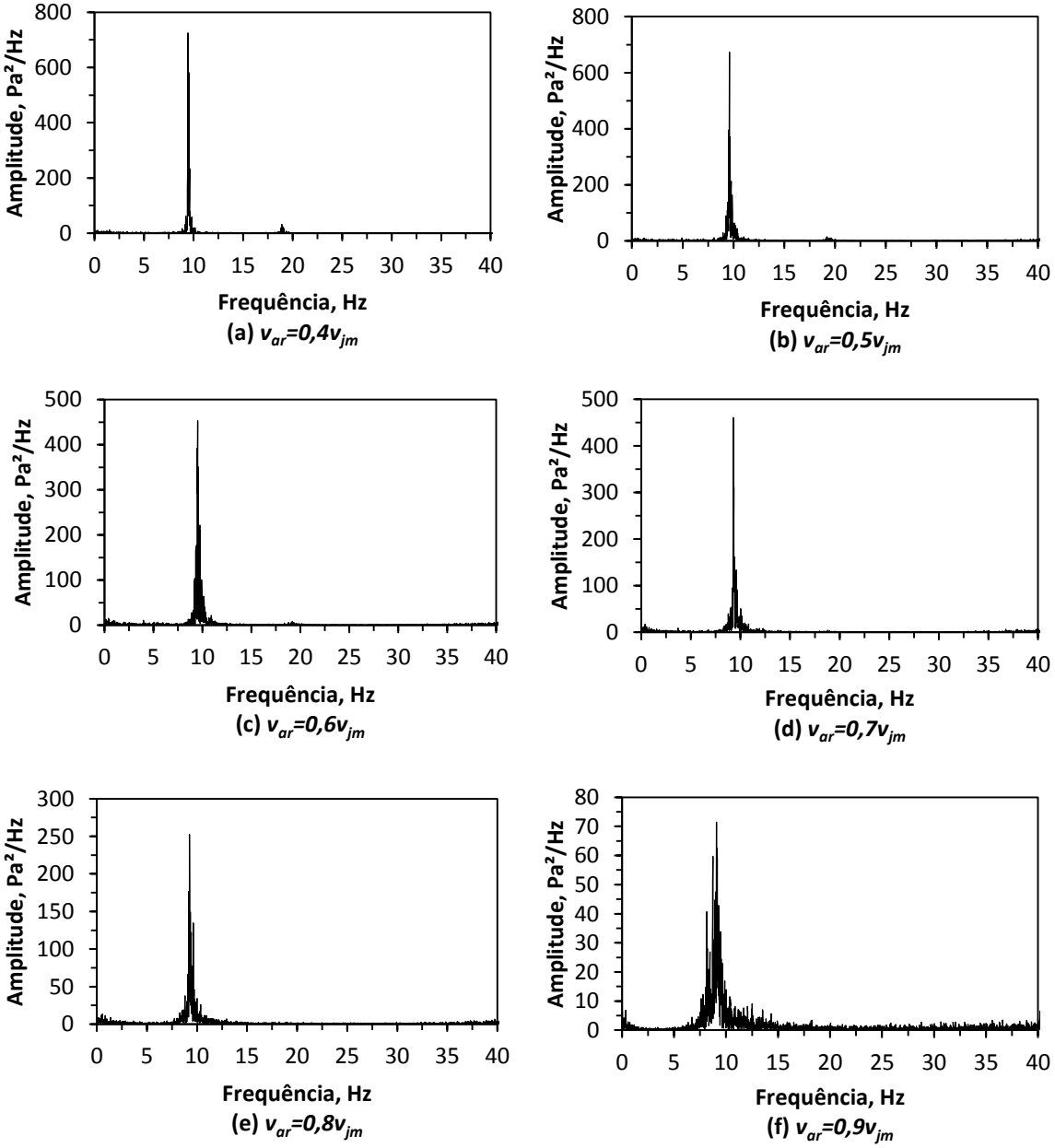
Figura 4.22. Espectro de potência. Regime: jorro interno. Sólido: vidro. H_O=0,21 m. v_{ar}=0,8v_{jm} (1,3m/s). Ponto de medida: P4**.**



Durante a obtenção dos espectros do jorro interno do leito de vidro, pôde-se notar através dos registros *online* no VI do LabVIEW a presença de uma frequência dominante em torno de 9,5 Hz em todas as velocidades observadas no regime de jorro interno. Esse dado foi confirmado pela comparação dos espectros de potência de velocidades de 0,4 a 0,9v_{jm} (Figura

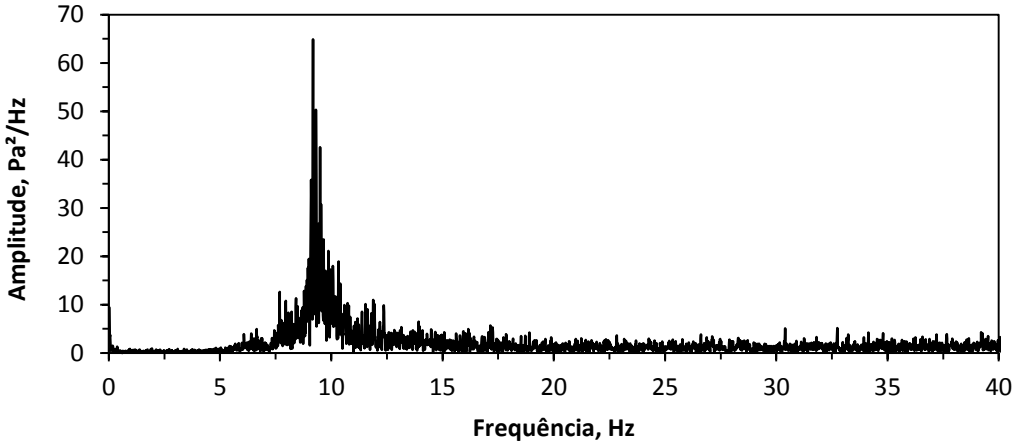
4.23). Notou-se também, que com o aumento na velocidade do ar, a amplitude do sinal de flutuação de pressão foi reduzindo, ao passo que a largura dos espectros aumentou. A mudança na largura dos espectros sugere uma transição para o regime de jorro estável, quando mais componentes de frequência se manifestam nas séries de tempo. Pode ser constatado na sequência, na Figura 4.24, que corresponde ao espectro de potência na condição de mínimo jorro, que o espectro acusou banda significativamente mais larga que os correspondentes ao jorro interno.

Figura 4.23. Espectros de potência. Sólido: vidro. H_O=0,21 m. Velocidades de 0,4 a 0,9v_{jm}. Ponto de medida: P4**.**



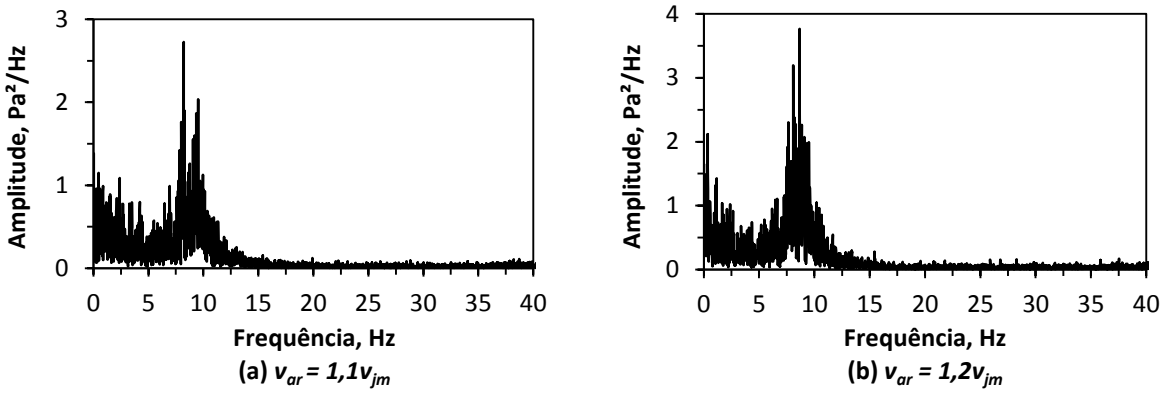
A Figura 4.24 apresenta o espectro do jorro estável do vidro, na velocidade de mínimo jorro, 1,63 m/s; observa-se a faixa de frequências acentuadas entre 7,5 a 12,5 Hz, com frequência dominante de 9,5 Hz.

Figura 4.24. Espectro de potência. Regime: jorro estável. Sólido: vidro. H_O=0,21 m. $v_{ar}=1v_{jm}$ (1,63 m/s). Ponto de medida: P4**.**



Em velocidades superiores à velocidade de mínimo jorro, os espectros de potência apresentaram perfis semelhantes (Figura 4.25), indicando espectros largos e frequência dominante por volta de 8,6 Hz.

Figura 4.25. Espectros de potência. Sólido: vidro. H_O=0,21 m. Velocidades de 1,1 e 1,2v_{jm}. Ponto de medida: P4**.**



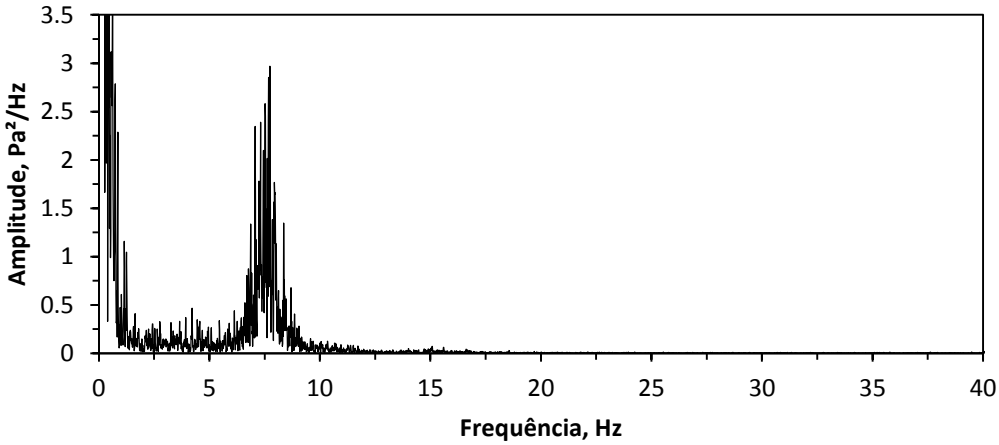
Xu *et al* (2004), em seus estudos de comportamento fluidodinâmico em leito de jorro com esferas de vidro, não identificaram frequência dominante em regime de leito fixo, porém registraram características semelhantes aos espectros de potência reportados nesse trabalho, que além de apresentar picos de frequência dominante em jorro interno e jorro

estável, verificou-se também o aumento na frequência dominante, próximo de 3 Hz em jorro interno para aproximadamente 6 Hz em jorro estável. Freitas *et al* (2004) registraram em leito com esferas de vidro frequências dominantes de 5 Hz a 7 Hz em regime de jorro estável. Oliveira *et al* (2008) observaram em seus espectros de potência de leito semicilíndrico com esferas de vidro uma ampla faixa de frequências de 9 Hz a 15 Hz em regime de jorro estável.

4.4.2 Espectros para polietileno I

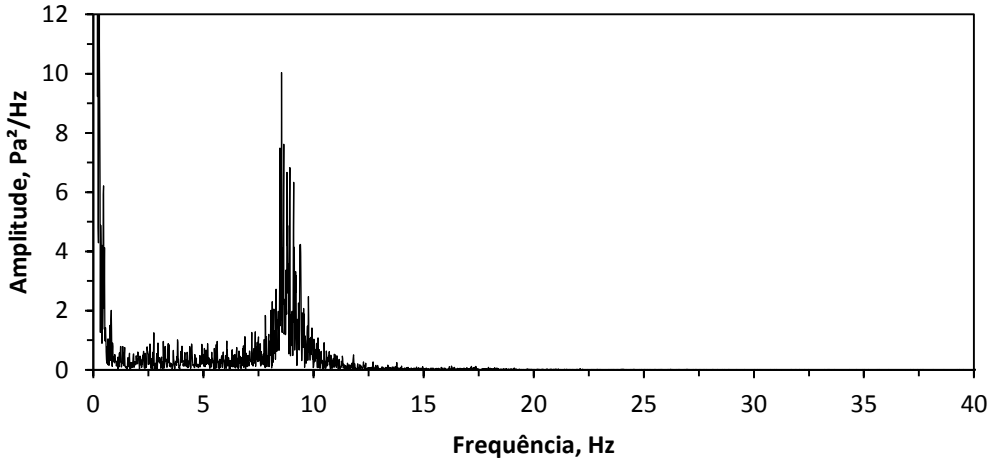
A Figura 4.26 indica o espectro de potência do leito de polietileno I para a condição de leito fixo na velocidade de $0{,}2v_{jm}$. Nesta condição há presença de frequência dominante de aproximandamente 7,6 Hz.

Figura 4.26. Espectro de potência. Regime: leito fixo. Sólido: polietileno I. H_O=0,21 m. v_{ar}=$0{,}2v_{jm}$ (0,12 m/s). Ponto de medida: P4**.**



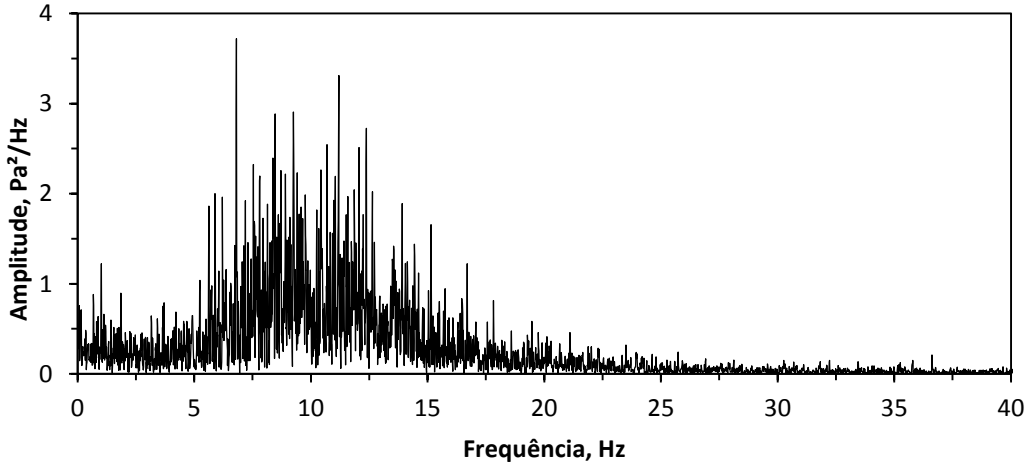
A Figura 4.27 apresenta o espectro de potência do regime de jorro interno do leito de polietileno I na velocidade de $0{,}4v_{jm}$. Constata-se a presença de componentes de frequência de destaque 7,5 e 10 Hz, e frequência dominante em torno de 9 Hz.

Figura 4.27. Espectro de potência. Regime: jorro interno. Sólido: polietileno I. *Ho*=0,21 m. v_{ar}=0,4v_{jm} (0,22 m/s). Ponto de medida: P4.



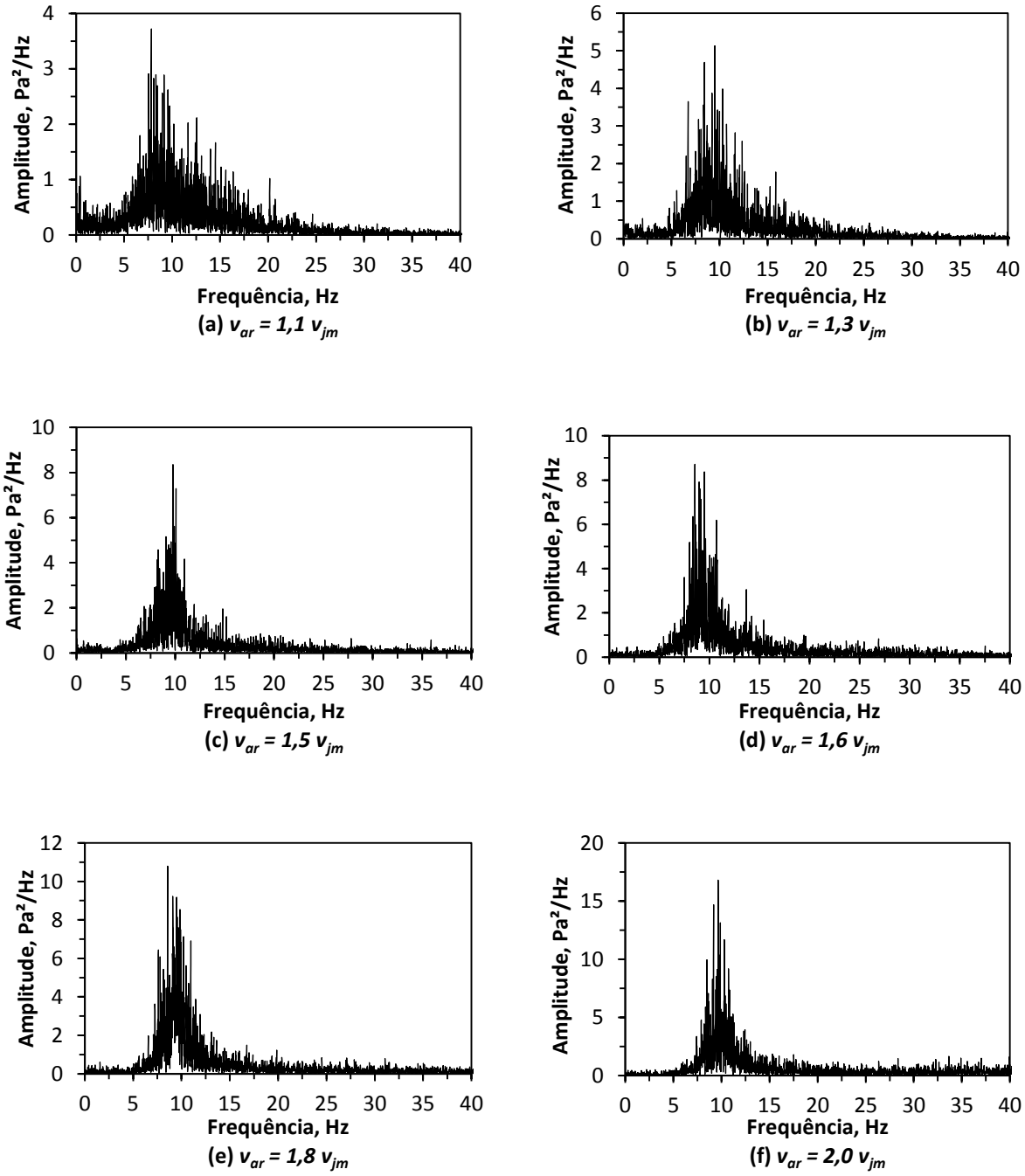
A mudança nos perfis dos espectros, quando se alcançou e se superou a velocidade de jorro mínimo (Figuras 4.28 e 4.29) se deu novamente na largura dos espectros, que ficou visivelmente maior na condição de jorro estável frente ao jorro interno.

Figura 4.28. Espectro de potência. Regime: jorro estável. Sólido: polietileno I. H_O=0,21 m. v_{ar}=1v_{jm} (0,56 m/s). Ponto de medida: P4**.**



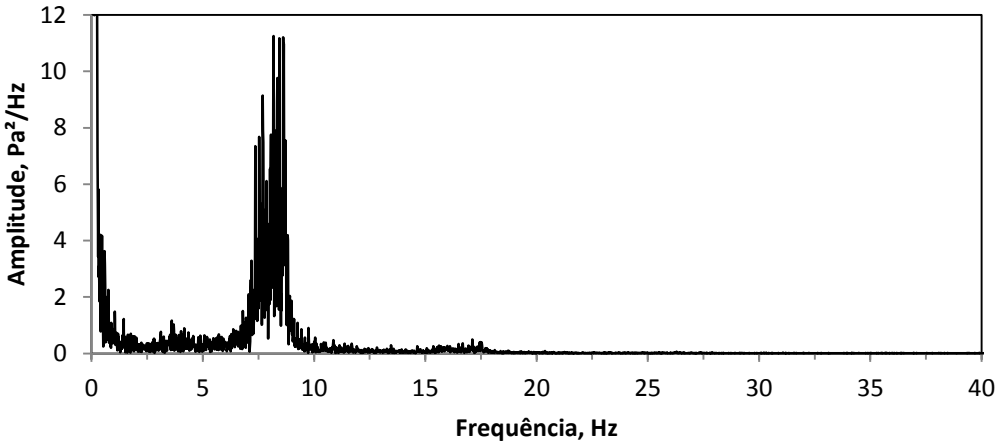
Os espectros do polietileno I em velocidades superiores à velocidade de mínimo jorro são representados na Figura 4.29. A frequência dominante deste conjunto de espectros ficou em aproximadamente 10 Hz, apresentando, no geral, larguras de banda bastante similares, o que indica a estabilidade do regime de jorro ao longo dos sucessivos aumentos de vazão do ar.

Figura 4.29. Espectros de potência. Sólido: polietileno I. H_O=0,21 m. Velocidades de 1,1 a 2,0v_{jm}. Ponto de medida: P4**.**



A Figura 4.30 indica o espectro de potência do leito de polietileno I para a relação altura do leito/diâmetro da coluna de 1,5:1 no regime de leito fixo.

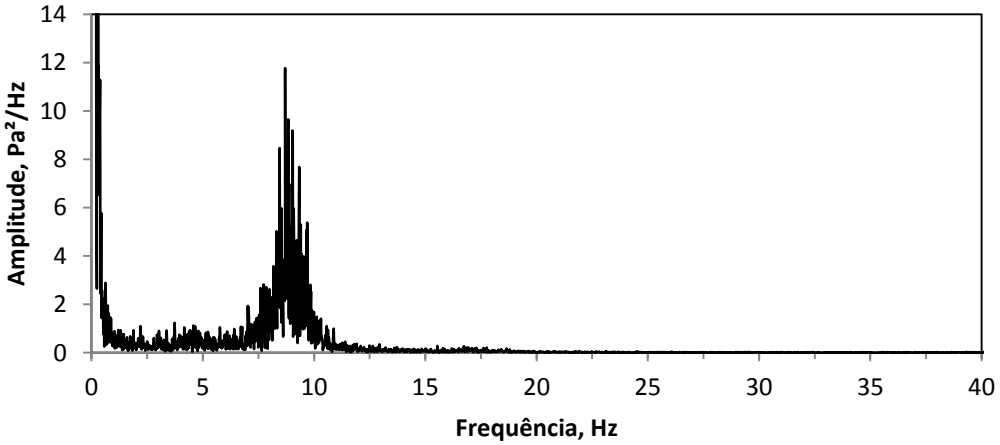
Figura 4.30. Espectros de potência. Regime: leito fixo. Sólido: polietileno I. H_O=0,315 m, v_{ar}=0,2v_{jm} (0,12m/s). Ponto de medida: P4**.**



De forma geral, o que se observou nos regimes de leito fixo e jorro interno, para todos os sólidos empregados em leito de H_O=0,315m, foi a presença de componentes de frequência, por vezes com baixa amplitude, mas seguindo a mesma tendência: em regime de leito fixo a frequência dominante foi menor do que em regime de jorro interno.

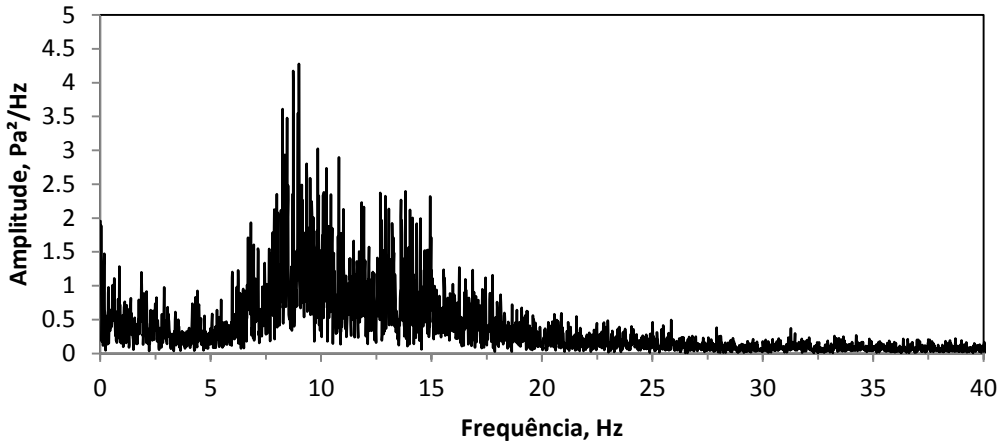
A Figura 4.31 indica o espectro de potência para o regime de jorro interno do leito de polietileno I.

Figura 4.31. Espectros de potência. Regime: jorro interno. Sólido: polietileno I. H_O=0,315 m, v_{ar}=0,3v_{jm} (0,19m/s). Ponto de medida: P4**.**



A Figura 4.32 indica o espectro de potência para a velocidade de mínimo jorro do polietileno I.

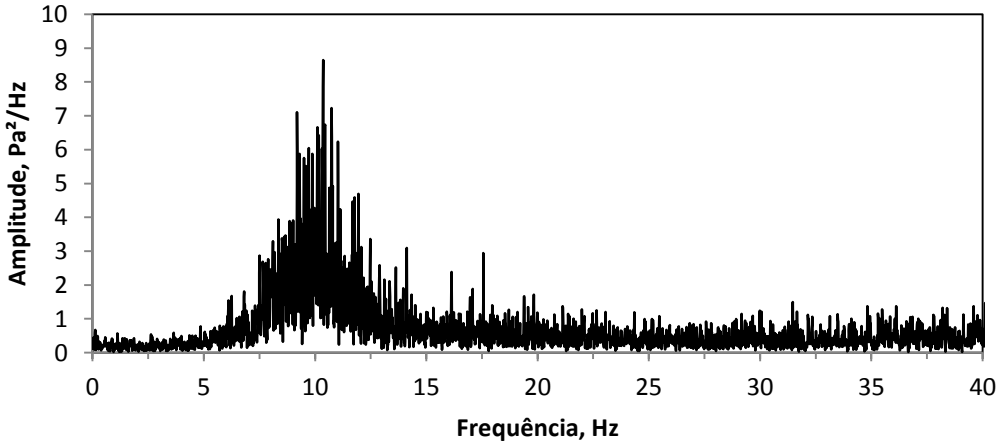
Figura 4.32. Espectros de potência. Regime: jorro estável. Sólido: polietileno I. *Ho*=0,315 m, v_{ar}=1v_{jm} (0,62m/s). Ponto de medida: P4.



Na velocidade de mínimo jorro, as flutuações de pressão no leito de polietileno I geraram um espectro largo, com uma região de componentes de frequências típicas de jorro, entre 5 e 20 Hz, com frequências de maiores amplitudes em torno de 8,5 Hz. Visualmente, observou-se a formação da fonte homogênea, sem oscilações na sua altura.

A Figura 4.33 indica o espectro de potência gerado para as flutuações de pressão no leito de polietileno I na v_{ar} =2,0v_{jm}.

Figura 4.33. Espectros de potência. Regime: jorro estável. Sólido: polietileno I. *Ho*=0,315 m, v_{ar}=2,0v_{jm} (1,23m/s). Ponto de medida: P4**.**



Em velocidades superiores à velocidade de mínimo jorro, todos os espectros indicaram componentes de frequência dominante, variando entre 9 e 10 Hz. Esses espectros estão listados no APÊNDICE 3 – Espectros de potência.

4.4.3 Espectros para polietileno II

O espectro de potência do leito fixo de polietileno II, se apresentou com frequência dominante de 6,9 Hz e largura de espectro estreita (Figura 4.34).

Para o polietileno II, frequências dominantes são registradas desde regimes de leito fixo até jorro interno (Figura 4.35). Conforme a velocidade do ar aumentava, frequências pronunciadas em torno de 8 Hz alargavam o espectro, precedendo o regime de jorro estável, como observado nos espectros do vidro.

Figura 4.34. Espectro de potência. Regime: leito fixo. Sólido: polietileno II, *Ho*=0,21 m. v_{ar}=0,2v_{jm} (0,27 m/s). Ponto de medida: P4**.**

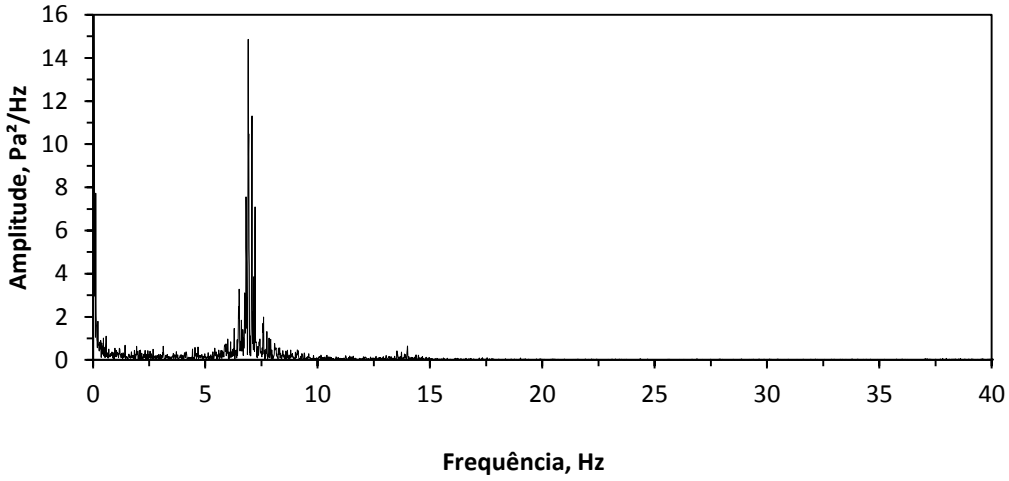


Figura 4.35. Espectros de potência. Sólido: polietileno II, H_O=0,21 m. Velocidades de 0,6 a 0,9v_{jm}. Ponto de medida: P4.

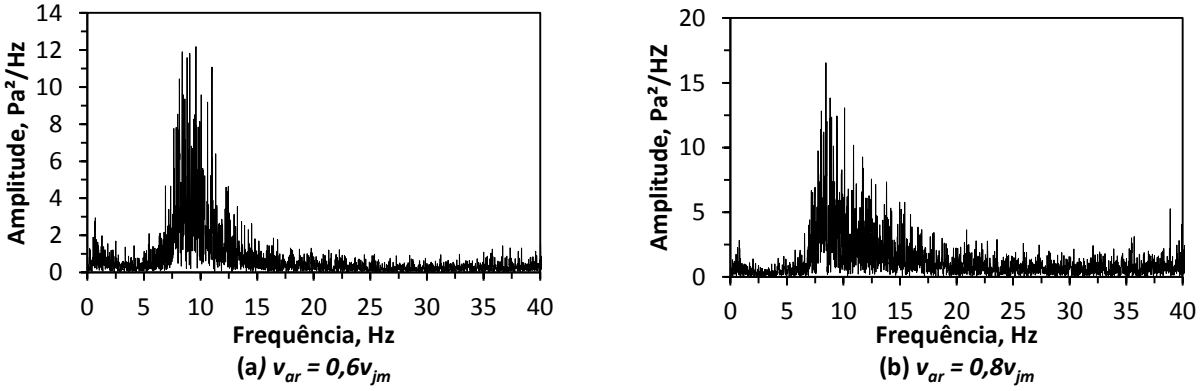
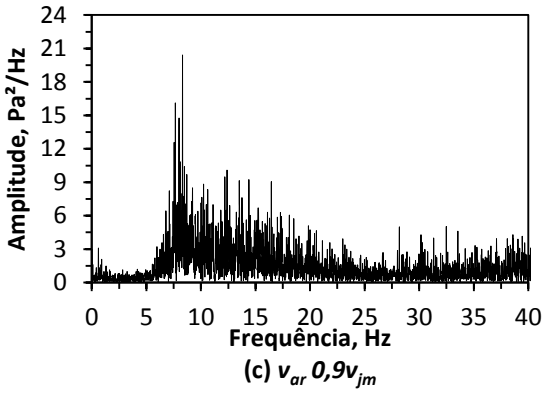
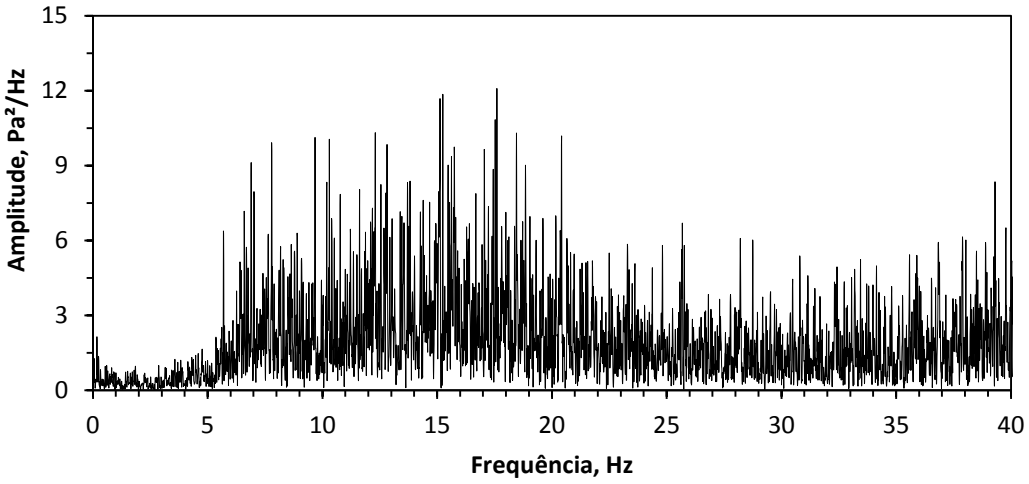


Figura 4.35. Continuação.



Em contrapartida, o que se observou para a condição de mínimo jorro no espectro do polietileno II não seguiu o mesmo comportamento do espectro do vidro, pois para o polímero não foi possível a identificação de frequência dominante, mas sim uma região de frequências de alta amplitude, variando de 6 a 20 Hz (Figura 4.36).

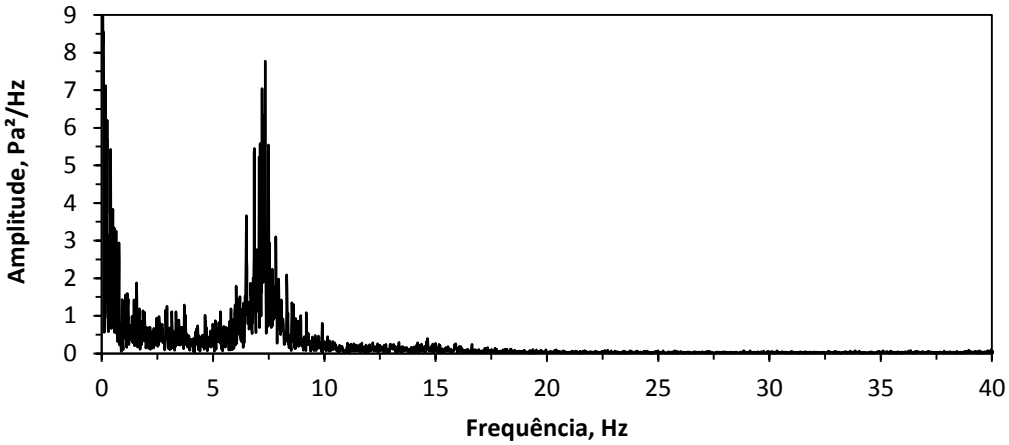
Figura 4.36. Espectro de potência. Regime: jorro estável. Sólido: polietileno II, H_O=0,21 m. v_{ar}=1v_{jm} (1,35 m/s). Ponto de medida: P4**.**



O jorro se manteve estável até a velocidade de 1,5v_{jm}. Visualmente pôde-se registrar a transição do jorro estável para jorro instável em velocidade de ar de 2,16m/s, o que corresponde a 1,6v_{jm}. A altura da fonte passou a oscilar e teve sua largura aumentada a ponto da fluidodinâmica tornar-se instável, além da redução na altura do leito.

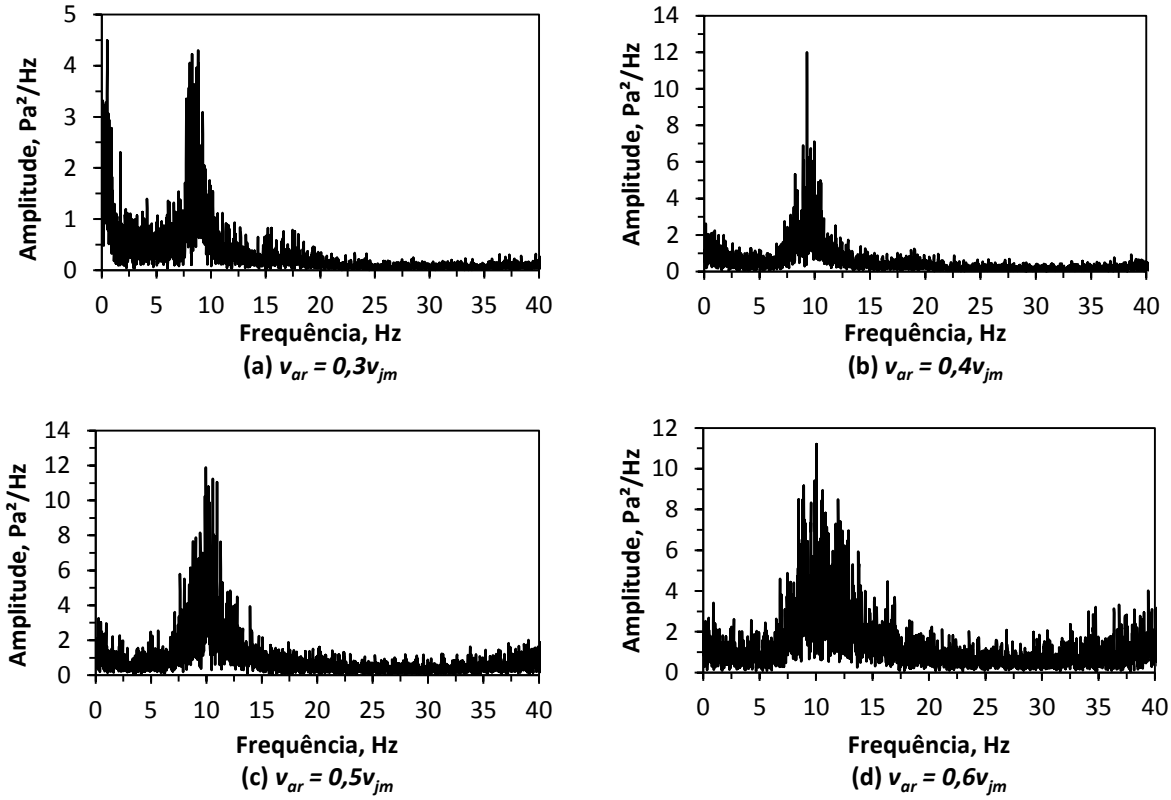
A Figura 4.37 indica a análise espectral, na condição de H_O=0,315m, para o leito de polietileno II em regime de leito fixo, que apresentou espectro de potência com frequência dominante de 7,3 Hz.

Figura 4.37. Espectro de potência. Regime: leito fixo. Sólido: polietileno II, H_O=0,315 m. v_{ar}=0,2v_{jm} (0,34 m/s). Ponto de medida: P4**.**



Para velocidades entre 0,3 e 0,6v_{jm} (Figura 4.38), frequências características de leito de jorro surgiram em regiões espectrais mais largas em comparação ao espectro da velocidade do ar de 0,2v_{jm}.

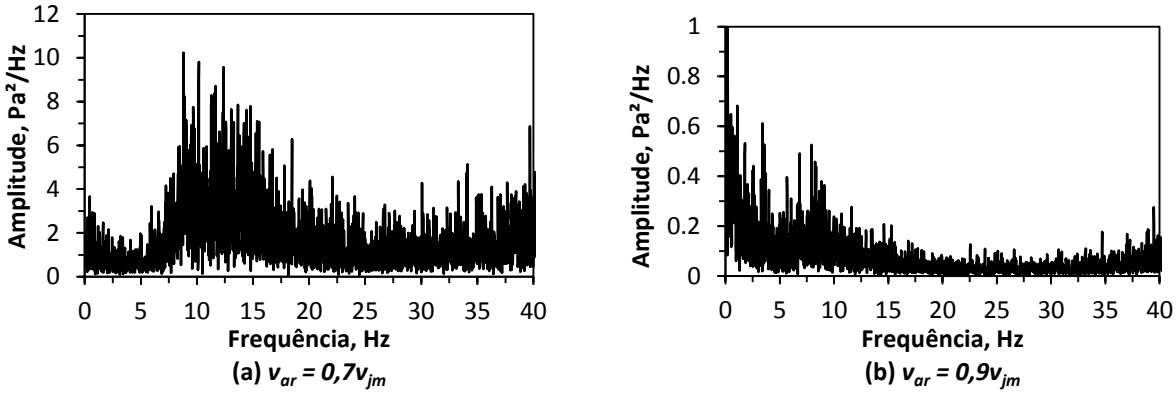
Figura 4.38. Espectro de potência. Sólido: polietileno II, H_O=0,315 m. Velocidades de 0,3 a 0,6v_{jm}. Ponto de medida: P4**.**



A Figura 4.39 indica os espectros do leito do polietileno II para as velocidades de 0,7 e 0,9v_{jm}. Observa-se a ausência de frequência dominante nessas condições, porém o

alargamento dos espectros nessas velocidades indica a transição entre jorro interno e jorro estável.

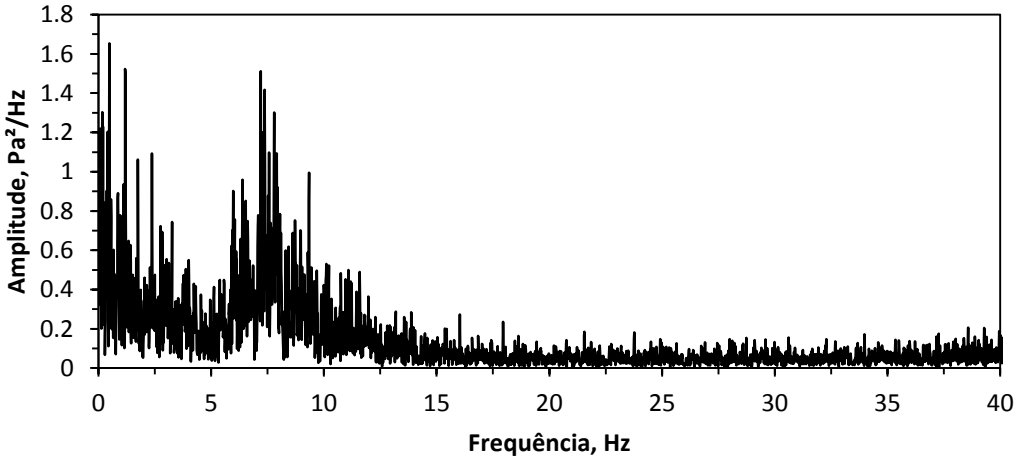
Figura 4.39. Espectro de potência. Sólido: polietileno II, H_O=0,315 m. Velocidades de 0,7 e 0,9v_{jm}. Ponto de medida: P4 e P5, respectivamente**.**



Na velocidade de 0,9v_{jm}, visualmente o que se constatou foi o surgimento de zonas de vibração intensa de partículas, como iminência de surgimento de várias pequenas fontes ao longo da região anular.

A Figura 4.40 indica o espectro do polietileno II para a velocidade de mínimo jorro.

Figura 4.40. Espectro de potência. Sólido: polietileno II. H_O=0,315 m. v_{ar}=1v_{jm} (1,71 m/s). Ponto de medida: P5**.**

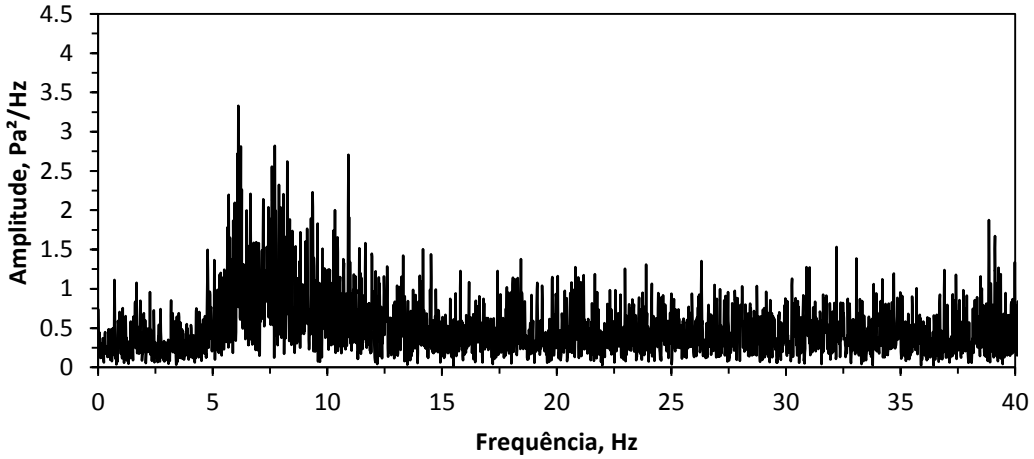


Na velocidade de mínimo jorro observou-se região de frequência típica de leito de jorro, com componentes entre 6 e 12 Hz. Nessa velocidade de ar a fonte permaneceu baixa,

oscilando em direção à região anular e fazendo com que a altura do leito variasse com a movimentação das partículas.

A Figura 4.41 demonstra o espectro de potência para o regime de jorro instável do leito de polietileno II na H_O=0,315m.

Figura 4.41. Espectro de potência. Regime: jorro instável. Sólido: polietileno II. H_O=0,315 m. v_{ar}=1,6v_{jm} (2,74 m/s). Ponto de medida: P5**.**

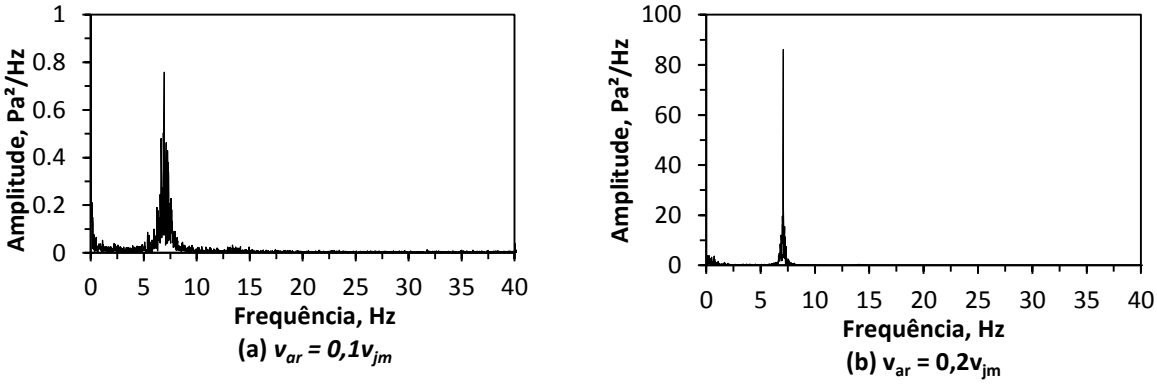


O espectro representado na Figura 4.41 apresenta componentes de frequência pronunciadas entre 6 e 11 Hz. O regime foi identificado como jorro instável pois a fonte tornou-se pulsante embora estive bem centralizada.

4.4.4 Espectros para poliuretano

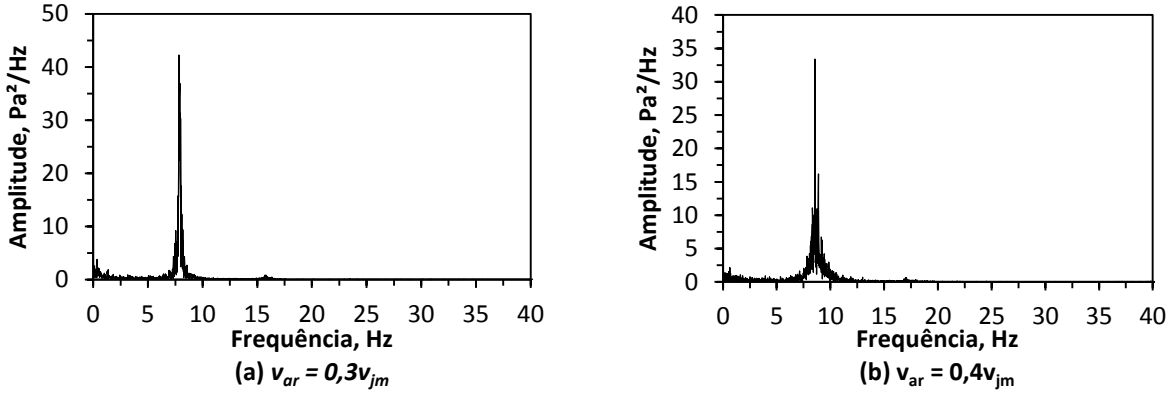
O regime de leito fixo do poliuretano apresentou um pico de frequências de baixa magnitude na região entre 6,9 e 7 Hz, como demostrado na Figura 4.42.

Figura 4.42. Espectro de potência. Regime: leito fixo. Sólido: poliuretano. H_O=0,21 m. Velocidades de 0,1 e 0,2v_{jm}. Ponto de medida: P4**.**



A Figura 4.43 indica os espectros de jorro interno do leito do poliuretano. Da mesma forma que no leito de vidro, polietileno I e polietileno II, registrou-se no jorro interno frequência dominante maior do que a observada para o leito fixo, confirmando mais uma vez este comportamento. Enquanto em regime de leito fixo, as frequências registradas foram de 6,9 e 7 Hz, para jorro interno o pico de frequência dominante com alta magnitude, foi de 7,9 e 8,5 Hz.

Figura 4.43. Espectros de potência. Regime: jorro interno. Sólido: poliuretano. H_O=0,21 m. Velocidades de 0,3 e 0,4v_{jm}. Ponto de medida: P4**.**



A Figura 4.44 indica os espectros de transição entre os regimes de jorro interno e jorro estável no leito de poliuretano.

Figura 4.44. Espectros de potência. Transição de jorro interno para jorro estável. Sólido: poliuretano. H_O=0,21 m. Velocidades de 0,5 a 0,9v_{jm}. Ponto de medida: P4**.**

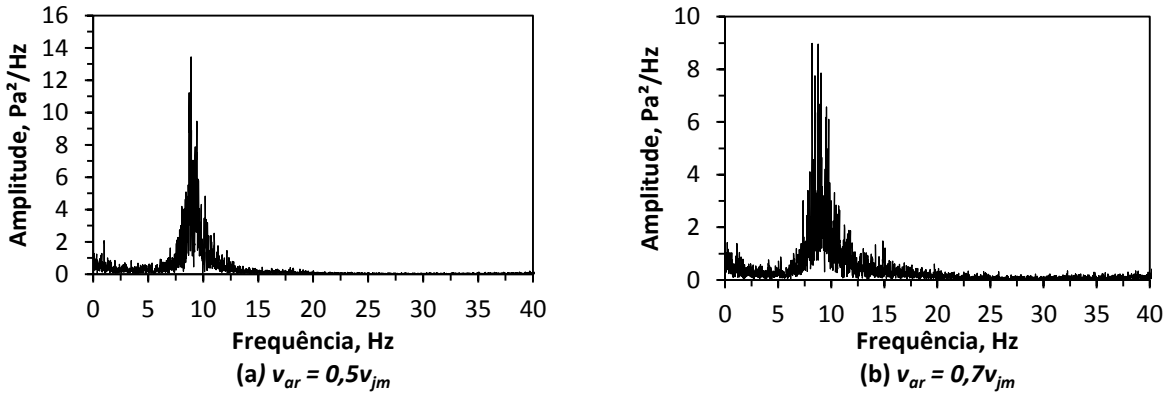
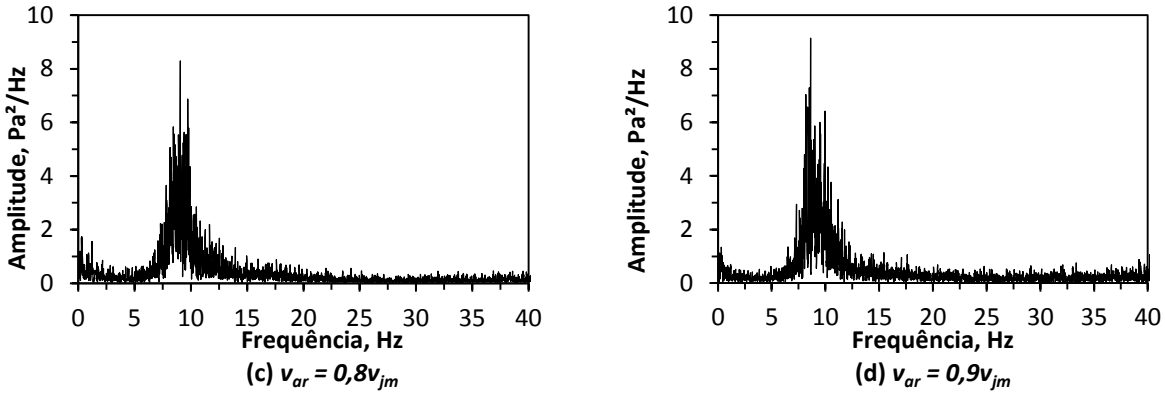
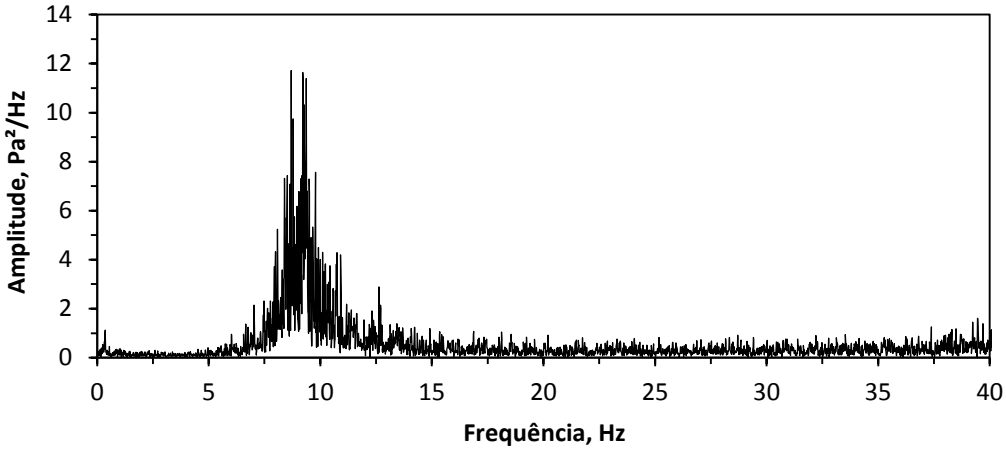


Figura 4.44. Continuação



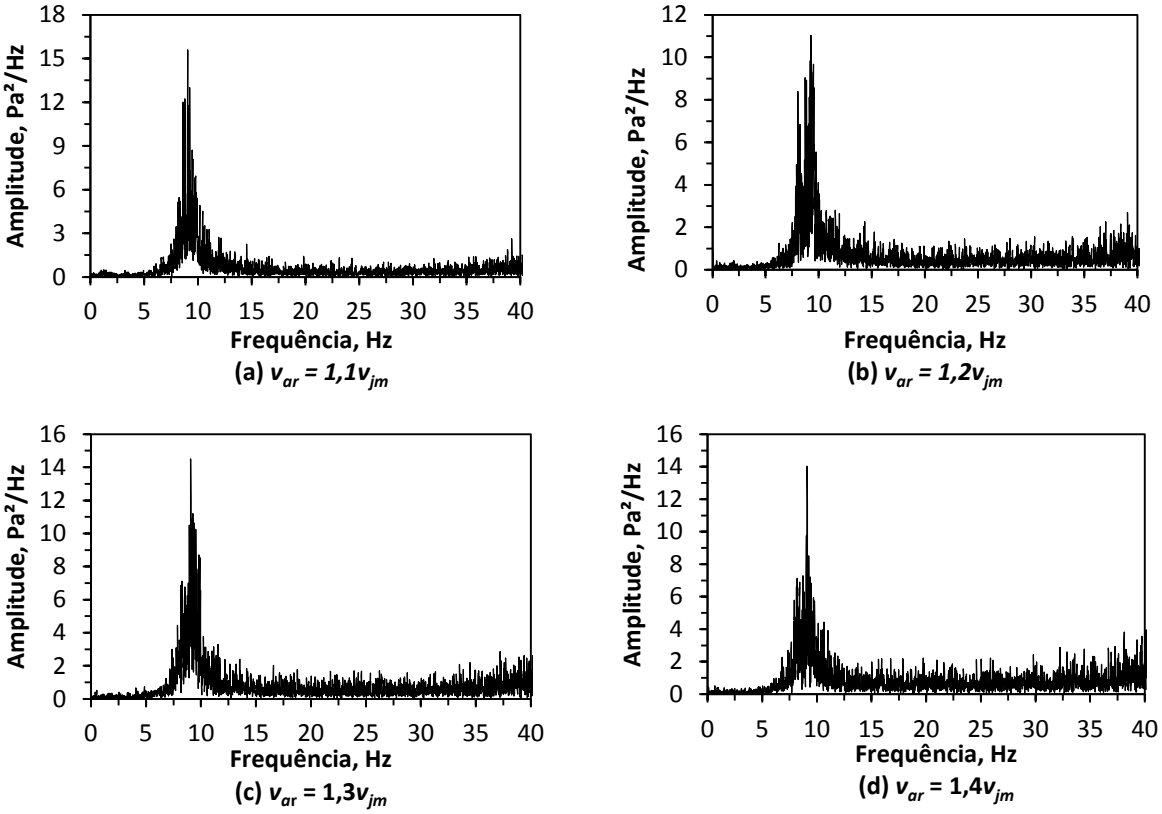
A Figura 4.45 indica o espectro de potência para o regime de jorro estável do poliuretano na v_{ar}=1v_{jm}. O pico de frequência dominante evidenciado em velocidades menores que a do mínimo jorro deu origem a um espectro mais largo, condizente com o comportamento observado para outros sólidos no mesmo regime. Além disso, a região de frequências mais pronunciadas apresentou maiores valores, em torno de 8,6 e 9,2 Hz.

Figura 4.45. Espectro de potência. Regime: jorro estável. Sólido: poliuretano. H_o=0,21 m. v_{ar}=1 v_{jm} (0,91 m/s). Ponto de medida: P4**.**



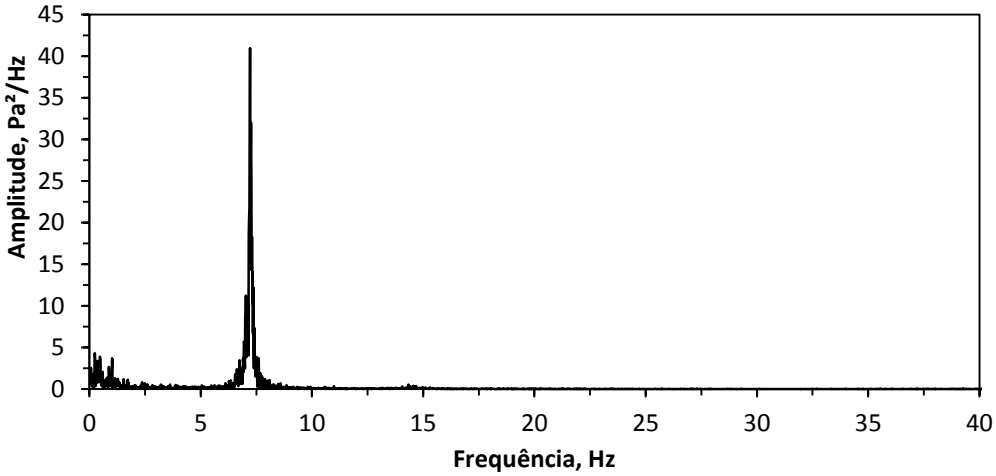
A Figura 4.46 demonstra os espectros nas velocidades de 1,1 a 1,4$v_{jm.}$ Durante o acompanhamento da fluidodinâmica no leito do poliuretano, não se observaram modificações no jorro estável de forma que, para a altura de leito de 0,21 m, não se registrou o regime de jorro instável.

Figura 4.46. Espectros de potência. Sólido: poliuretano. H_O=0,21 m. Velocidades de 1,1 a 1,4v_{jm}. Ponto de medida: P4**.**



A Figura 4.47 indica o espectro na H_O=0,315m para o regime de leito fixo do poliuretano.

Figura 4.47. Espectros de potência. Regime: leito fixo. Sólido: poliuretano. *Ho*=0,315 m. v_{ar}=0,1v_{jm} (0,11 m/s). Ponto de medida: P4**.**



Mesmo estando em leito fixo, as flutuações de pressão no leito do poliuretano geraram espectros de potência com pico de frequência de 7,2 Hz.

A Figura 4.48 indica os espectros de potência do leito do poliuretano entre as velocidade de 0,2 e 0,9v_{jm}.

Figura 4.48. Espectros de potência. Sólido: poliuretano. H_O=0,315 m. Velocidade de 0,2 a 0,9v_{jm}. Ponto de medida: P4**.**

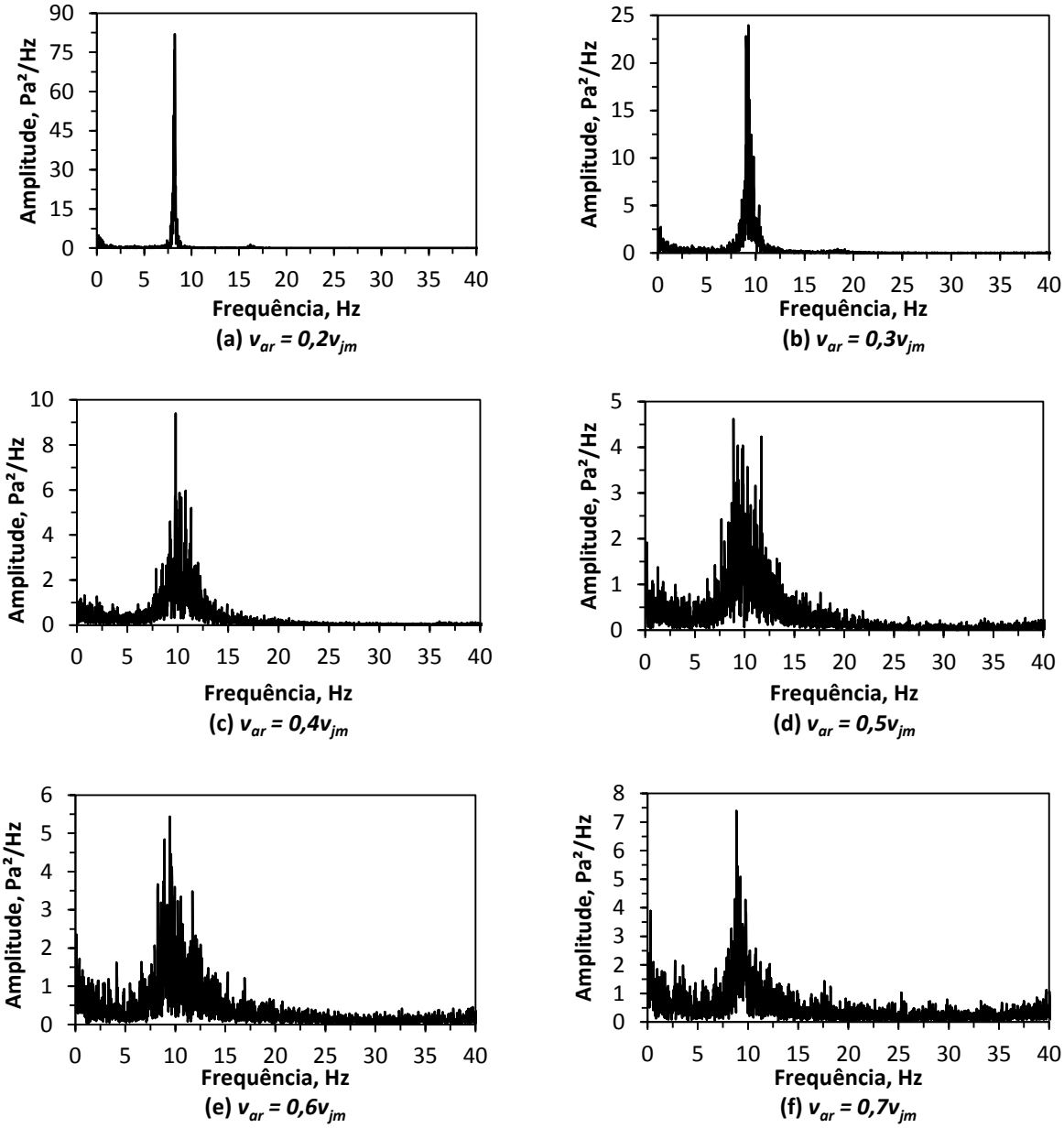
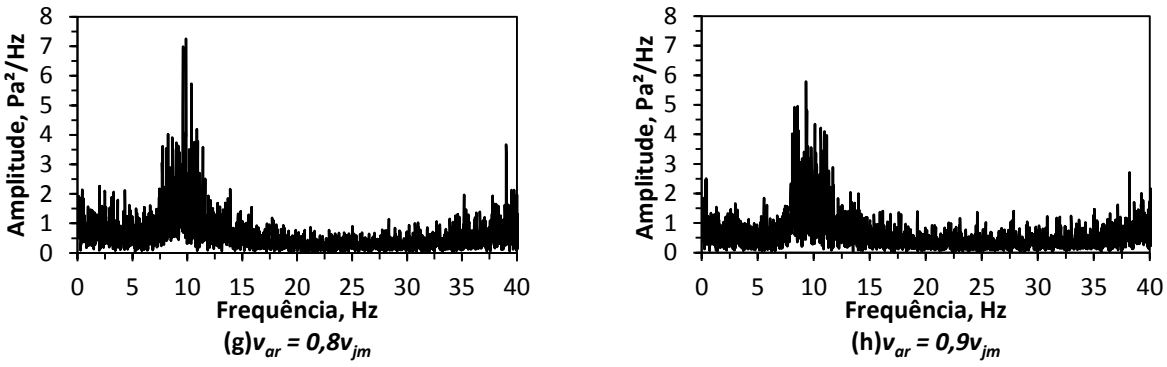


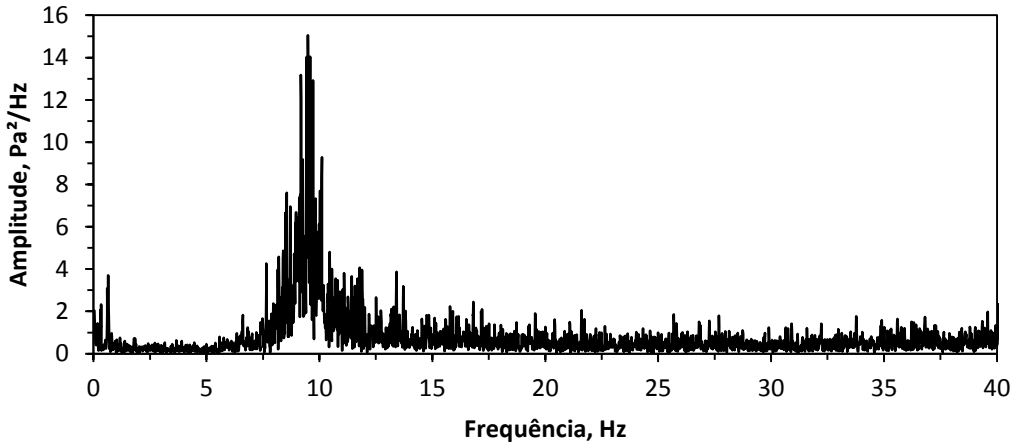
Figura 4.48. Continuação



A transição de leito fixo para jorro interno foi registrada nos espectros da Figura 4.48(a), onde observou-se um leve aumento no valor da frequência dominante, passando de 7,2 para 8,1 Hz. Já os espectros das Figura 4.48(b) e (c) correspondem ao regime de jorro interno, e os seguintes indicam a transição do jorro interno para o jorro estável, Figura 4.48(d) a (h), devido ao alargamento gradual dos espectros de potências.

A Figura 4.49 mostra o espectro de potência para a velocidade de mínimo jorro do leito de poliuretano.

Figura 4.49. Espectros de potência. Regime: jorro estável. Sólido: poliuretano. H_O=0,315 m. v_{ar}=1v_{jm} (1,12 m/s). Ponto de medida: P4.

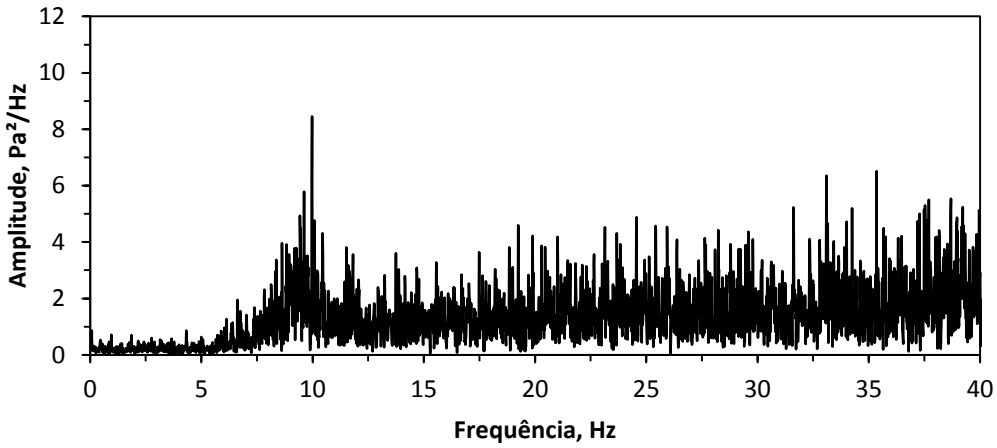


Na velocidade de mínimo jorro o que se observou no leito foi a formação da fonte que se manteve oscilando até a velocidade do ar de 1,1v_{jm}. Apesar da irregularidade da fonte, o espectro das flutuações de pressão gerado representou o regime de jorro estável típico, com

componentes de frequência de banda estreita e frequência pronunciada próxima de 10 Hz. A partir da velocidade de ar acima de 1,2v_{jm} até 1,5v_{jm} a fonte manteve-se estável e bem centralizada, gerando espectros com frequência característica de 10 Hz (APÊNDICE 3).

A Figura 4.50 expressa o início do regime de jorro instável para o leito de poliuretano. Em velocidades superiores a 1,6v_{jm} observou-se o alargamento da fonte no topo da coluna, formando aglomerados de partículas que, ao retornarem à região anular, se chocavam com as que ascendiam, causando instabilidades fluidodinâmicas.

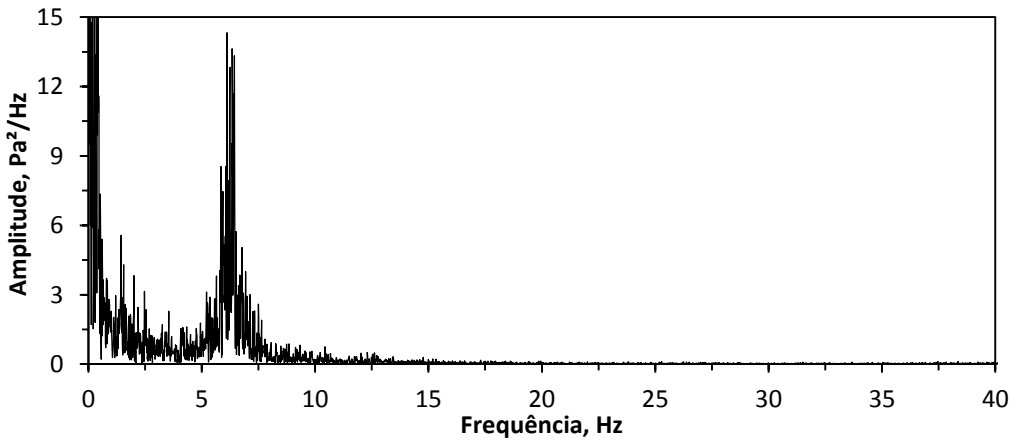
Figura 4.50. Espectros de potência. Regime: jorro instável. Sólido: poliuretano. H_O=0,315 m. v_{ar}=1,6v_{jm} (1,79 m/s). Ponto de medida: P4**.**



4.4.5 Espectros para soja

A Figura 4.51 indica o espectro de potência do leito da soja em regime de leito fixo para a H_o=0,21m.

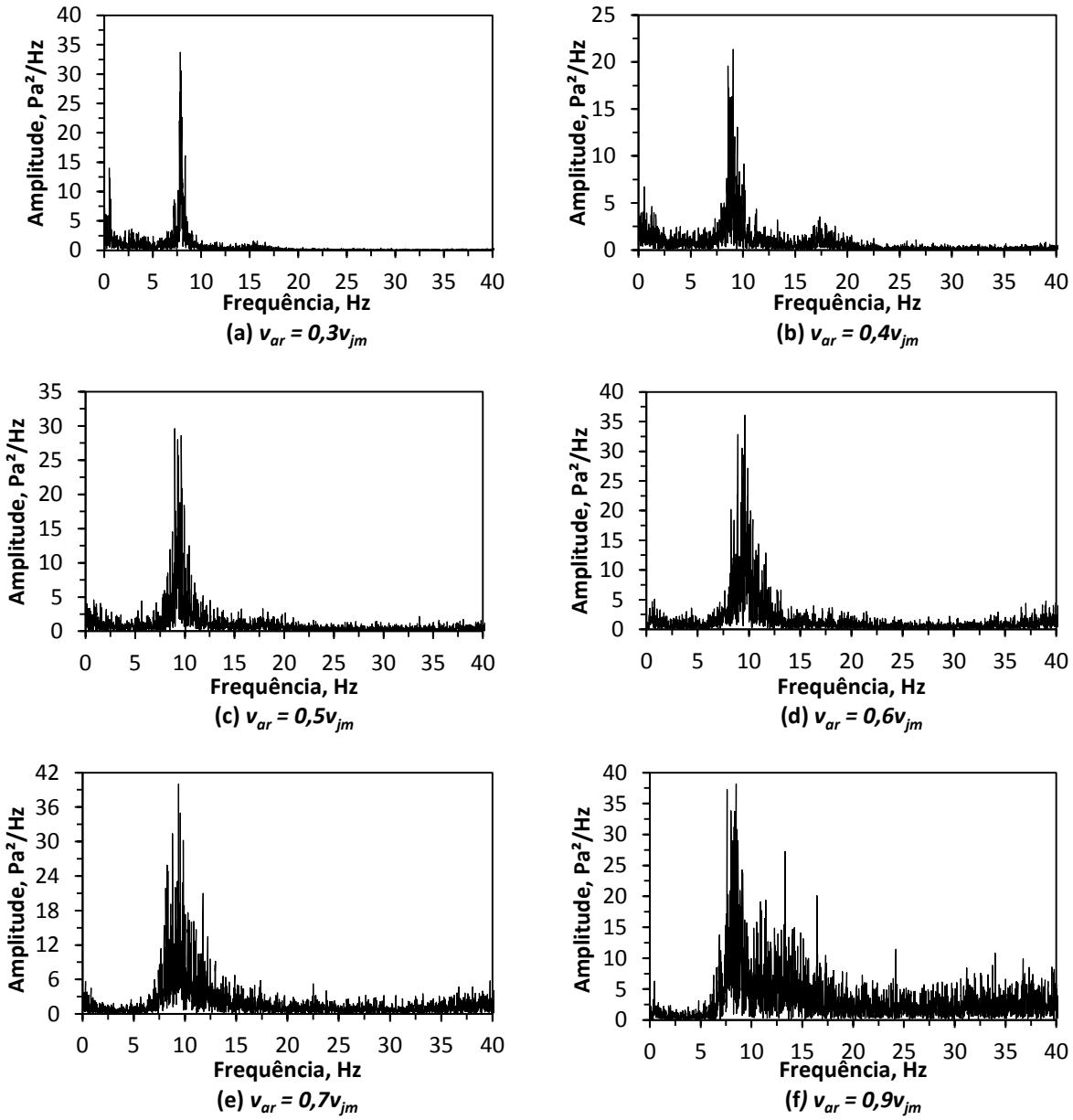
Figura 4.51. Espectro de potência. Regime: leito fixo. Sólido: soja. H_O=0,21 m. v_{ar}=0,2v_{jm} (0,32 m/s). Ponto de medida: P4**.**



O regime de leito fixo da soja apresentou perfil de espectro que se assemelhou aos encontrados para os outros sólidos estudados, com um pico de frequência dominante, com valor de 6,1 Hz.

A Figura 4.52 expressa o que ocorreu na sequência, para velocidades entre 0,3 e 0,9v_{jm}. Esse comportamento já foi relatado anteriormente no leito de vidro, polietileno I, polietileno II e poliuretano com a existência de um pico de frequência de grande magnitude.

Figura 4.52. Espectros de potência. Sólido: soja. H_O=0,21 m. Velocidades de 0,3 a 0,9v_{jm}. Ponto de medida: P4**.**

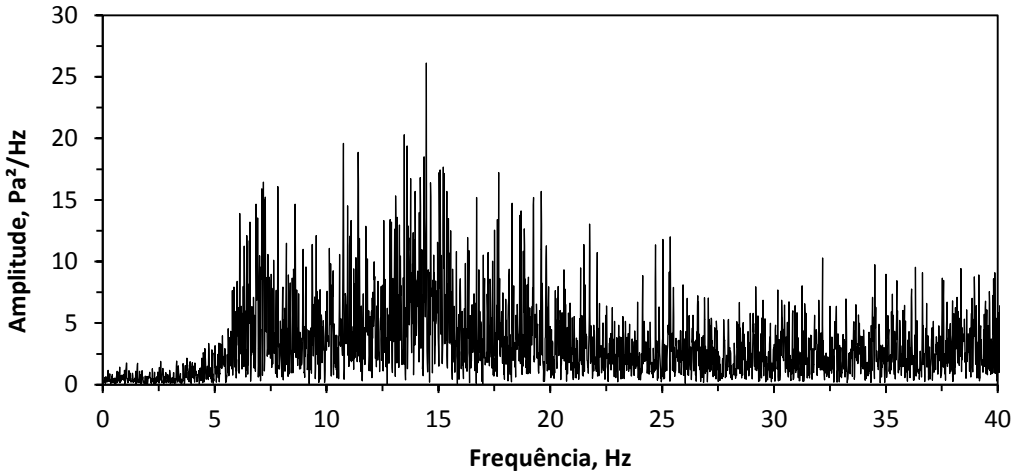


A Figura 4.52(a), para a v_{ar}=0,3v_{jm}, representa uma transição de regime de leito fixo para jorro interno, visto que seu espectro indica frequência dominante de 7,8 Hz, maior que aquela observada no espectro do regime de leito fixo, porém inferior aos demais espectros da mesma figura que, que manteve-se próxima de 10 Hz e estável.

A transição do jorro interno para jorro estável, observada pelo alargamento do espectro, ficou evidente na sequência de espectros das Figura 4.52(c) até 4.52(f).

Na condição de mínimo jorro, o espectro de potência apresentou frequências com elevadas magnitudes na faixa de 6 a 20 Hz, com uma frequência dominante em 14,5 Hz (Figura 4.53).

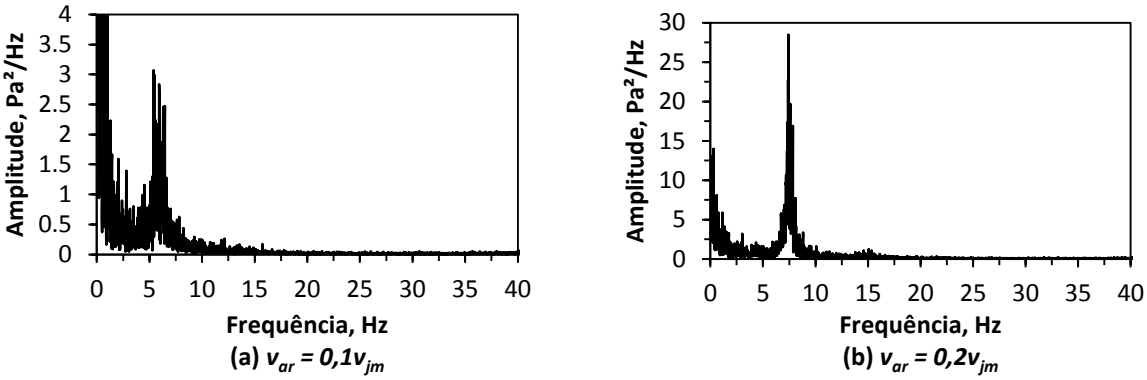
Figura 4.53. Espectro de potência. Regime: jorro estável. Sólido: soja. H_O=0,21 m. v_{ar}=1v_{jm} (1,64 m/s). Ponto de medida: P4**.**



Lourenço (2006), utilizando sementes de soja em uma coluna com dimensões semelhantes à empregada no presente estudo, para altura de leito de 22 cm, registrou as seguintes características: em leito fixo o espectro de potência obtido por FFT não indicou frequência dominante mas sim, como reportado pelo autor, uma tendência de picos ao longo da região estudada; em regime de jorro interno foi possível a identificação de duas bandas bem definidas no espectro, a mais significativa em torno de 7Hz a 8Hz e outra, de menor amplitude, na faixa de 15Hz e, em regime de jorro estável, o autor registrou frequência dominante de 6 Hz.

A Figura 4.54 indica os espectros de potência do regime de leito fixo para a soja na condição de H_O=0,315m.

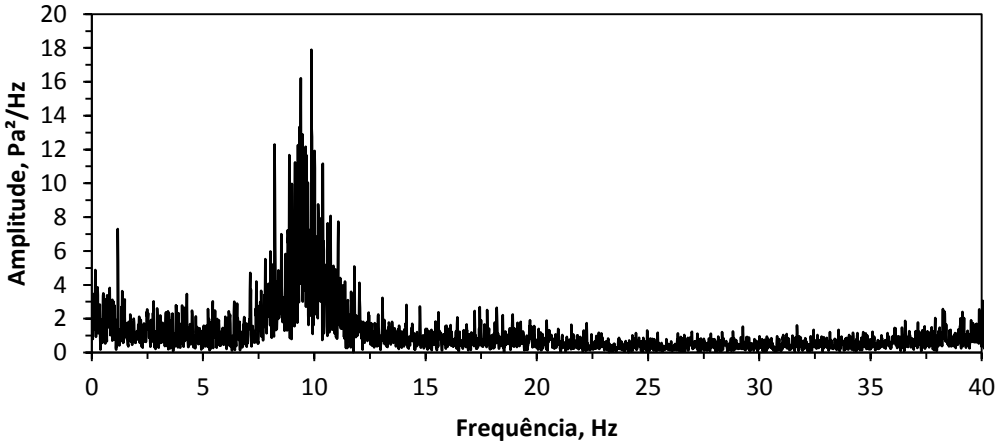
Figura 4.54. Espectro de potência. Regime: leito fixo. Sólido: soja. H_O=0,315 m. Velocidades de 0,1v_{jm} e 0,2v_{jm}. Ponto de medida P4**.**



Em conformidade com o comportamento dos leitos dos outros sólidos, o leito de soja para a H_O=0,315m também apresentou pico de frequência dominante no leito fixo, 6 Hz para v_{ar} = 0,1v_{jm} e 7,4 Hz para v_{ar} = 0,2v_{jm}.

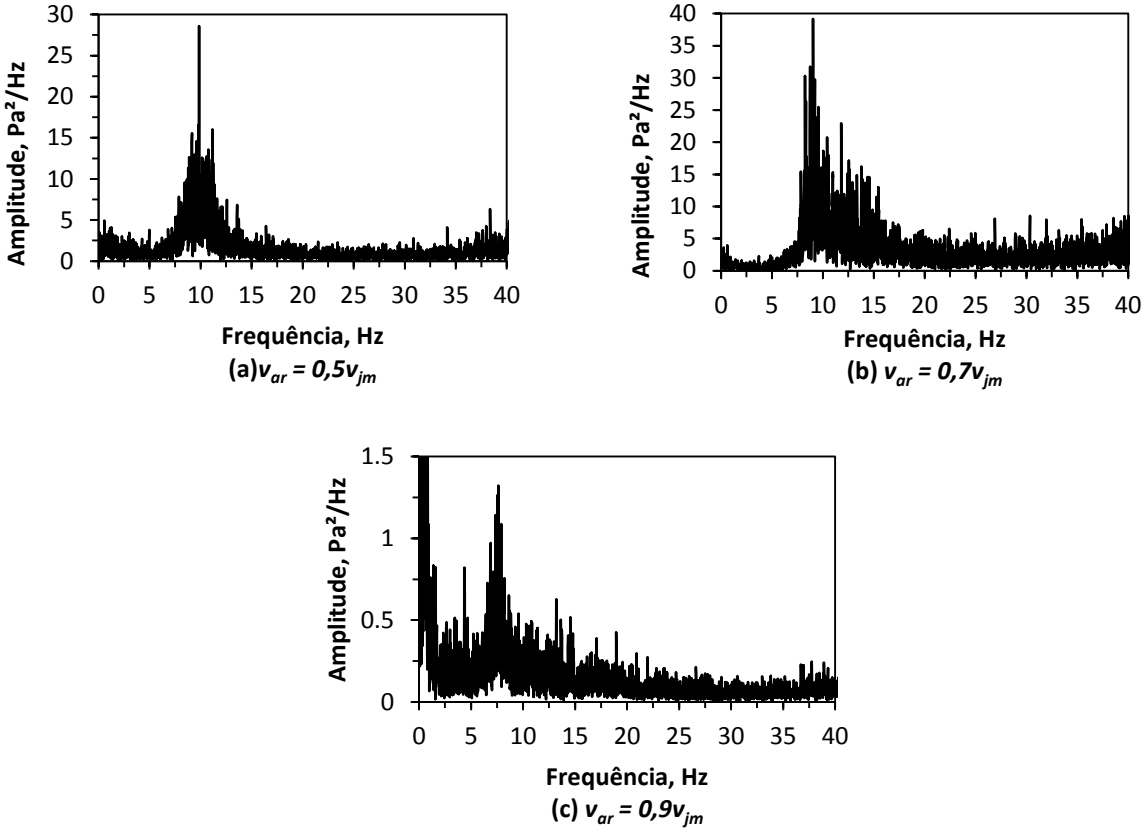
A Figura 4.55 mostra o espectro de potência do regime de jorro interno no leito de soja. Observou-se o alargamento do espectro de potência destacando-se uma frequência de aproximadamente 9,8 Hz.

Figura 4.55. Espectro de potência. Regime: jorro interno. Sólido: soja. H_O=0,315m. v_{ar}=0,4v_{jm} (0,66m/s). Ponto de medida: P4**.**



A Figura 4.56 mostra alguns espectros da transição do regime de jorro interno para jorro estável.

Figura 4.56. Espectros de potência. Sólido: soja. H_O=0,315 m. Velocidades de 0,5v_{jm} a 0,9v_{jm}. Pontos de medida: P4 e P5.

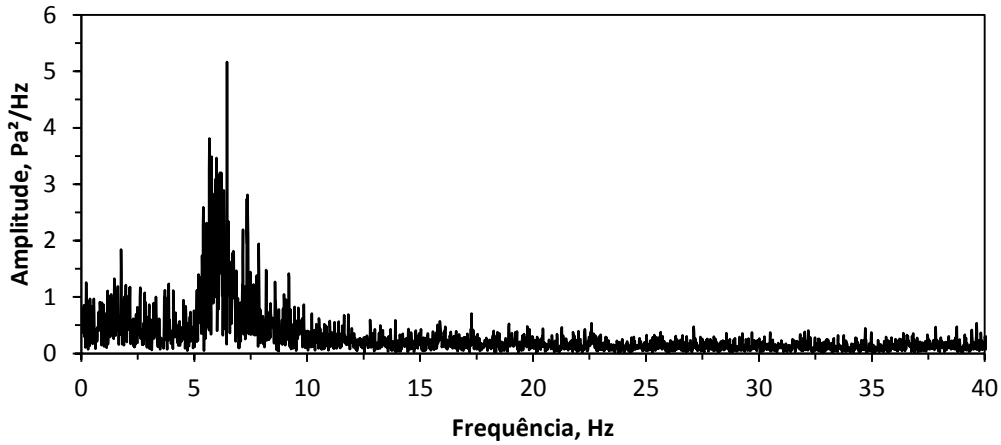


Os espectros de transição de jorro interno para jorro estável apresentam uma base mais larga em comparação ao da Figura 4.55.

Na velocidade de 0,9v_{jm}, muito próximo ao surgimento da fonte, visualmente pôde-se observar movimentações de partículas na região anular, próximas da parede da coluna do leito, criando oscilações na altura do leito estático. O espectro nessa condição indicou uma faixa de frequência de baixa amplitude entre 6 e 9 Hz.

A Figura 4.57 demostra o espectro de potência da soja na velocidade de mínimo jorro.

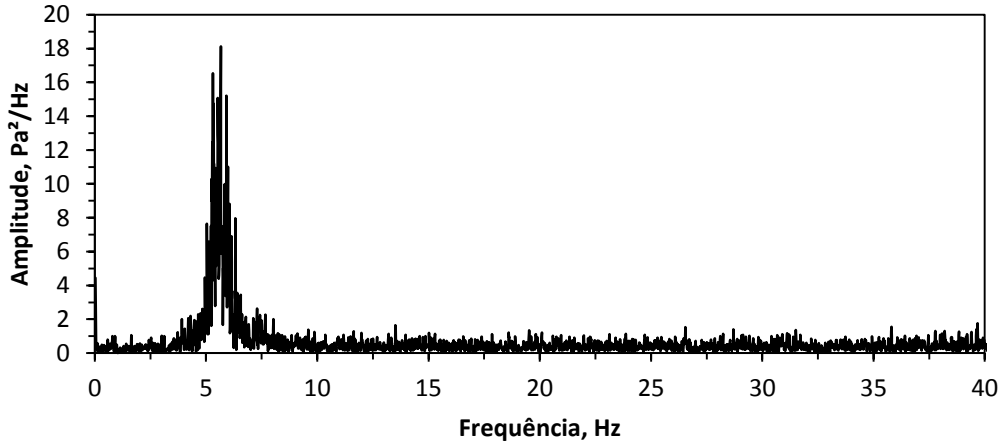
Figura 4.57. Espectros de potência. Regime: jorro estável. Sólido: soja. *Ho*=0,315 m. v_{ar}=1,0v_{jm}. Ponto de medida P5.



O espectro da soja para $v_{ar} = 1v_{jm}$ indica uma região de frequências pronunciadas, com frequência dominante de aproximandamente 6,5 Hz. Visualmente, observou-se a formação da fonte bem baixa e centralizada. Com o aumento da velocidade do ar, o jorro manteve-se estável, sem variações na altura do leito estático, isso ocorreu até a última velocidade registrada de 1,3$v_{jm.}$

A Figura 4.58 ilustra o espectro de potência da soja na v_{ar} = 1,3$v_{jm.}$ Nessa condição a movimentação das partículas permaneceu estável, de forma que o regime ainda era jorro estável.

Figura 4.58. Espectros de potência. Regime: jorro estável. Sólido: soja. *Ho*=0,315 m. v_{ar}=1,3v_{jm}. Ponto de medida P5.

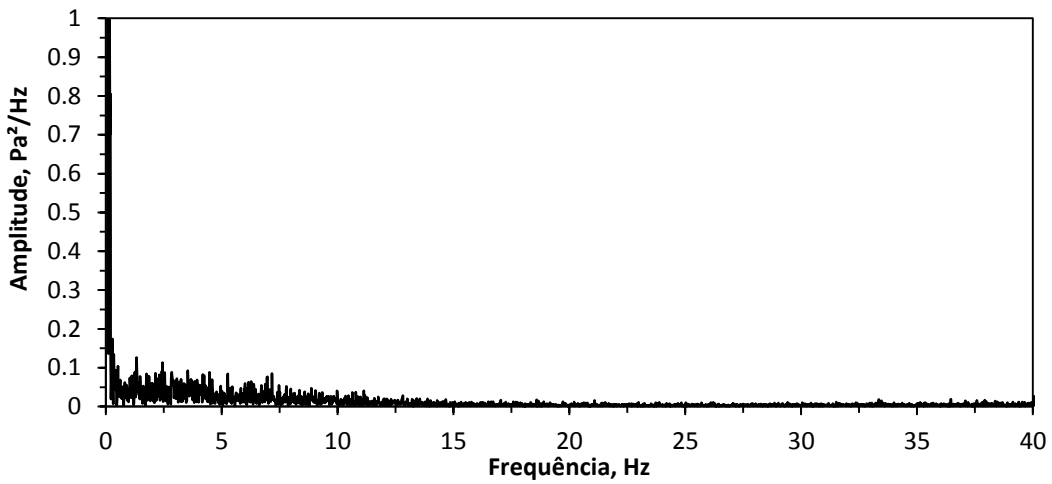


4.4.6 Espectros para arroz

Os espectros de potência da flutuação de pressão no leito de arroz apresentaram comportamento destoante dos espectros dos outros sólidos estudados.

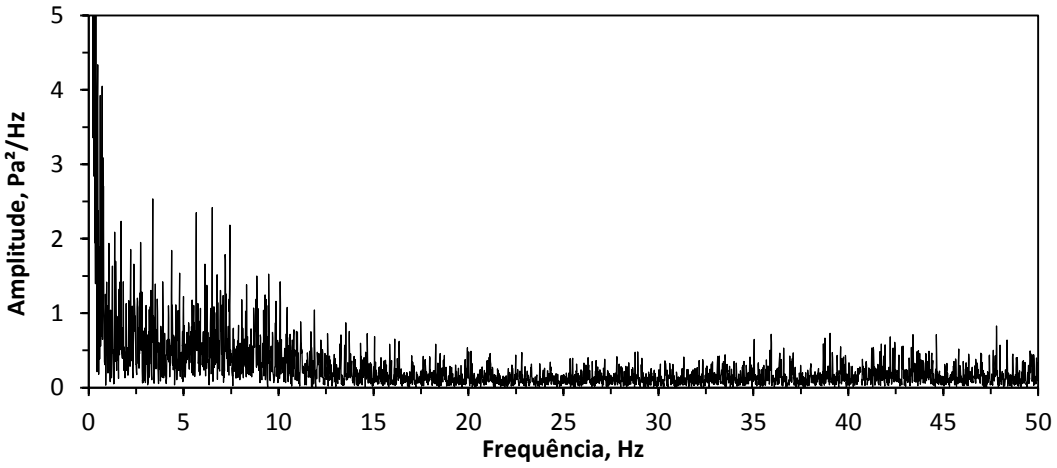
Na condição de H_O=0,21m, os regimes de leito fixo e jorro interno não apresentaram frequências dominantes nos espectros de potência (Figura 4.59 e Figura 4.60), como visto para outros sólidos nessa altura. E, na condição de H_O=0,315m, no regime de leito fixo além de não indicar componentes de frequência dominante, também não manteve a região espectral de frequências em jorro interno, percebida em todos os demais sólidos.

Figura 4.59. Espectro de potência. Regime: leito fixo. Sólido: arroz. H_O=0,21 m. v_{ar}=0,3v_{jm} (0,27 m/s). Ponto de medida: P4**.**



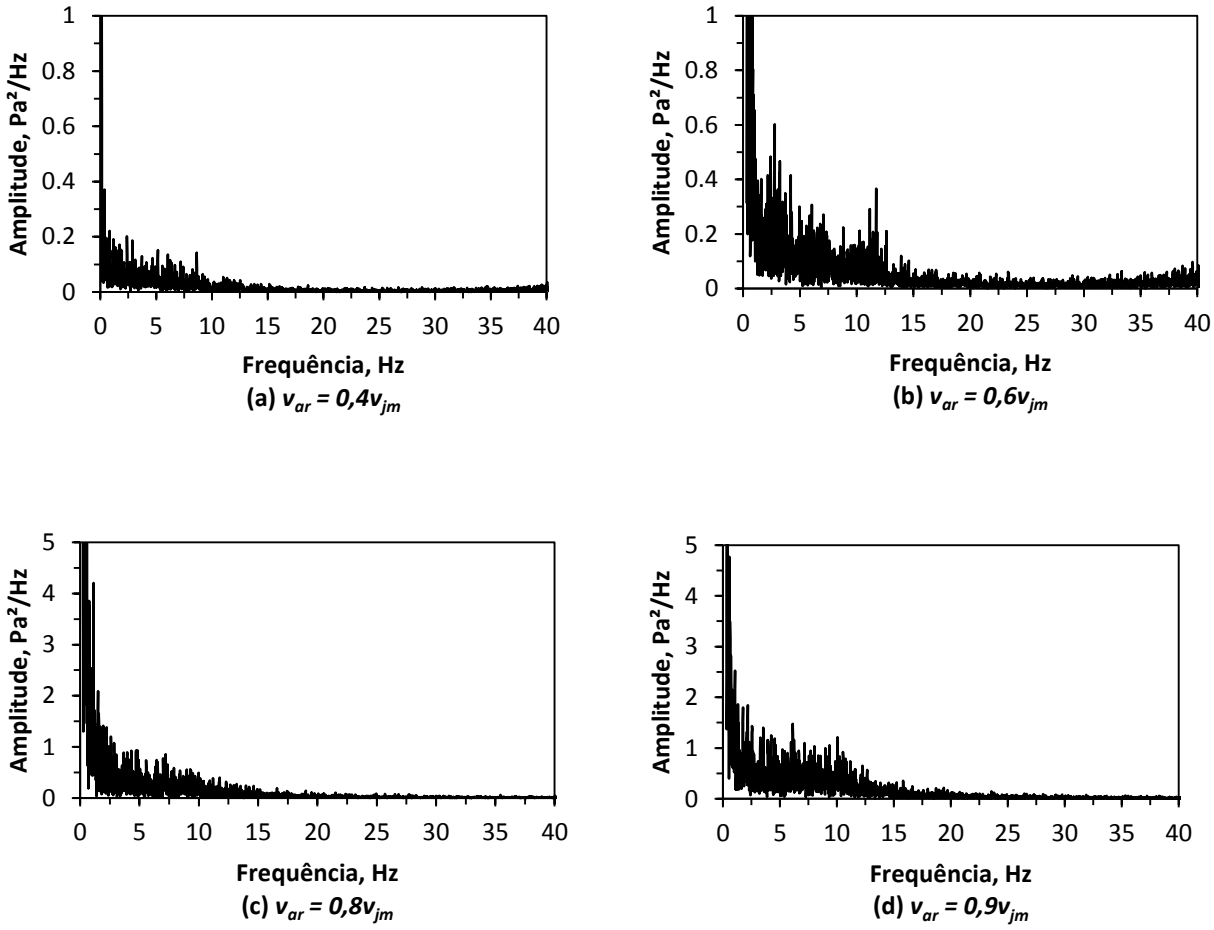
O espectro de potência da flutuação de pressão na velocidade de 0,9v_{jm} está representado na Figura 4.60.

Figura 4.60. Espectro de potência. Regime: jorro interno. Sólido: arroz. H_O=0,21 m. v_{ar}=0,9v_{jm} (0,8 m/s). Ponto de medida: P4**.**



A evolução dos espectros de potência ao longo dos acréscimos de velocidade do ar, nos regimes de leito fixo até jorro interno, é representada em sequência na Figura 4.61.

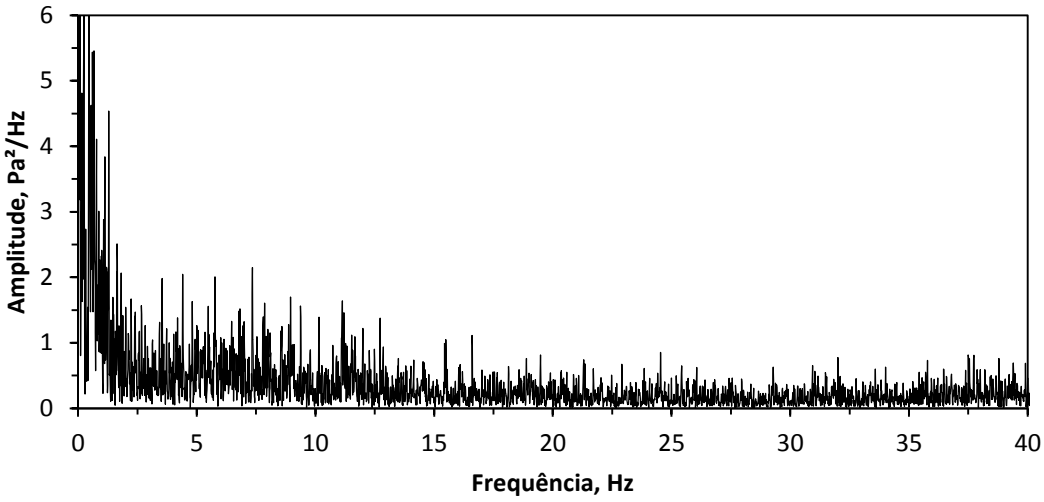
Figura 4.61. Espectros de potência. Sólido: arroz. H_O=0,21 m. Velocidades de 0,4 a 0,9v_{jm}. Ponto de medida: P4**.**



Em condições de jorro estável, o leito de arroz apresentou características típicas desse regime, com movimentação homogênea de sólidos e sem alteração na altura do leito, até a velocidade de 1,7v_{jm} quando instabilidades modificaram o comportamento da fonte. Percebeu-se no estudo desse sólido o alongamento da fonte, em direção ao topo da coluna, bem mais pronunciado em comparação aos outros materiais empregados no trabalho. Esse fato pode ser atribuído à geometria do arroz (esferoide prolato), apresentando facilidade ao arraste ao longo da coluna.

O espectro do leito de arroz na velocidade de mínimo jorro, Figura 4.62, não apresentou frequência dominante, somente uma região entre 5 e 7,5 Hz com maiores amplitudes.

Figura 4.62. Espectro de potência. Sólido: arroz. H_O=0,21 m. v_{ar}=1v_{jm} (0,88 m/s). Ponto de medida: P4**.**



Não foi possível a identificação clara de uma frequência dominante na condição de mínimo jorro do leito de arroz, nem pelas medidas de flutuação de pressão no ponto P4 nem no ponto P5. Isto se deve ao comportamento fluidodinâmico de leito de jorro atípico apresentado por este sólido, comparado aos demais.

Na condição de jorro estável (Figura 4.63) registraram-se espectros largos, com as componentes de frequência de maior amplitude registradas entre 5 e 15 Hz.

Figura 4.63. Espectros de potência. Regime: jorro estável. Sólido: arroz. H_O=0,21 m. v_{ar}=1,1v_{jm} a 1,6v_{jm}. Ponto de medida: P4**.**

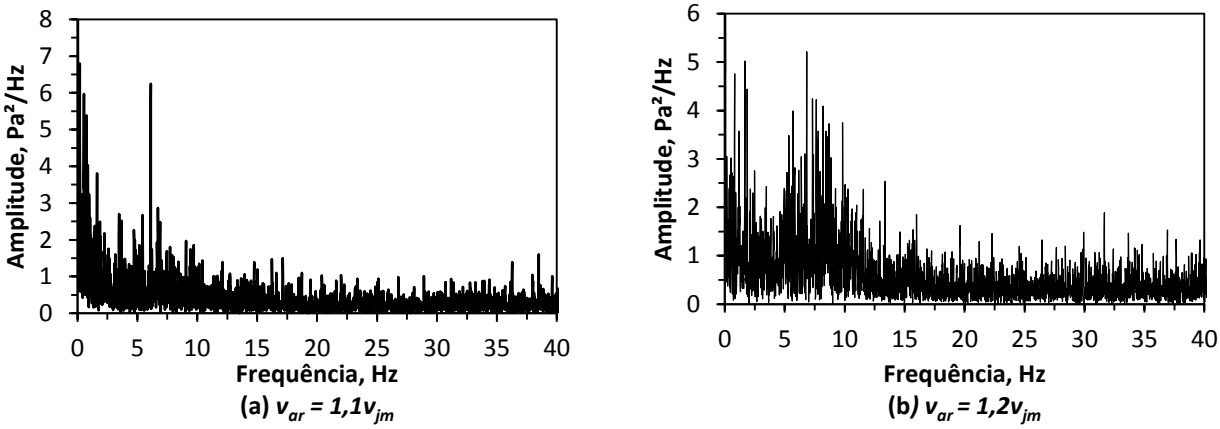
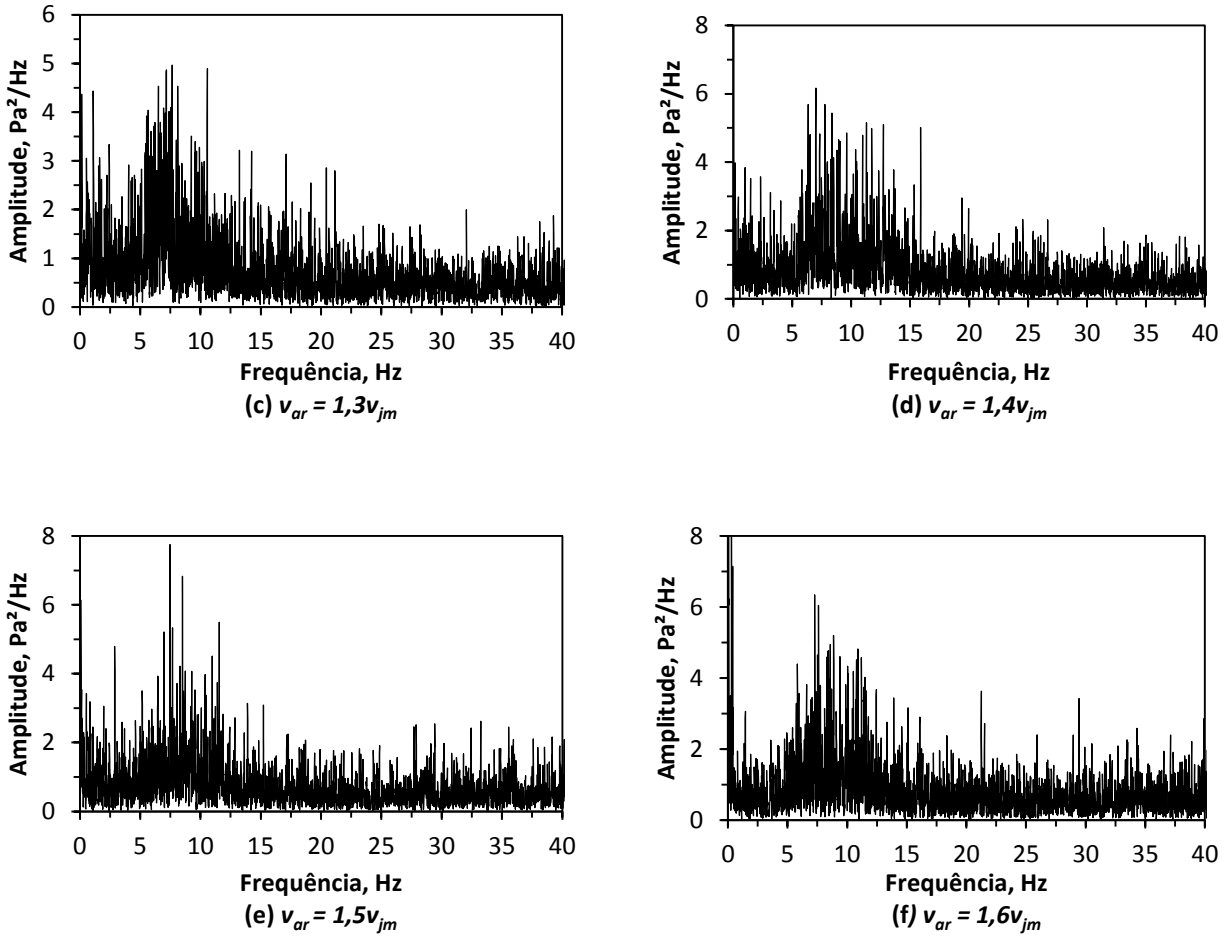


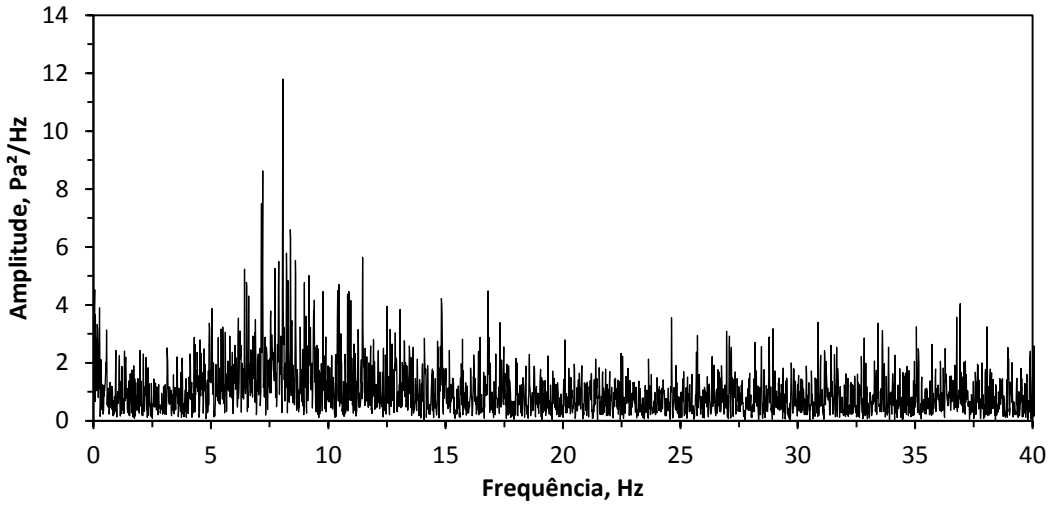
Figura 4.63. Continuação.



A medida que se aumentou a velocidade do ar, as partículas de arroz cada vez mais alcançavam o topo da coluna em maior quantidade e ficavam suspensas por algum tempo até se chocarem com aquelas ascendentes, formando aglomerados. Nessas condições, observou-se a redução na altura do leito, e também um alargamento da região da fonte, o que ocasionou o comportamento de pulsação da fonte, caracterizando um regime de jorro instável.

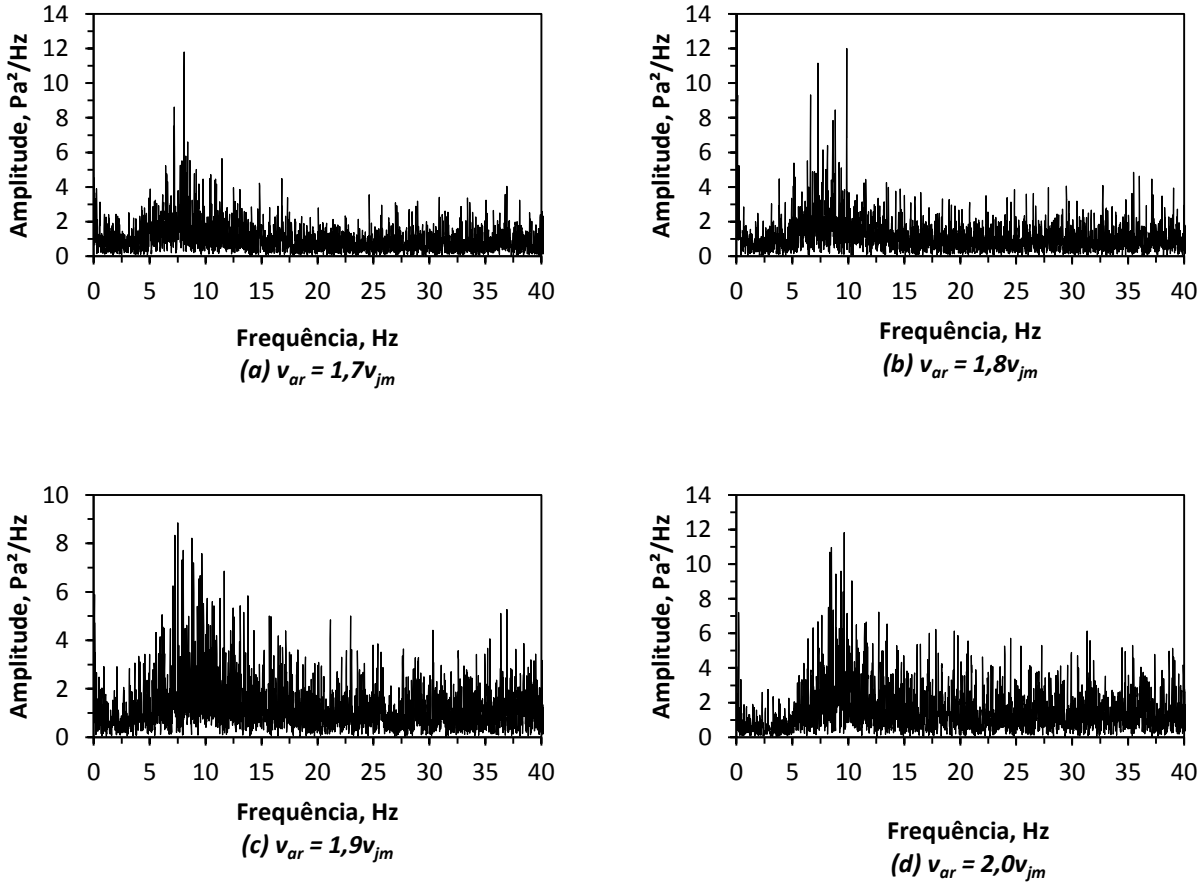
A Figura 4.64 indica o espectro de potência para o regime de jorro instável em velocidade de 1,50 m/s, equivalente a 1,7v_{jm}, onde observou-se o surgimento de uma frequência dominante de aproximadamente 8 Hz.

Figura 4.64. Espectro de potência. Regime: jorro instável. Sólido: arroz. H_O=0,21 m. v_{ar}=1,7v_{jm}.



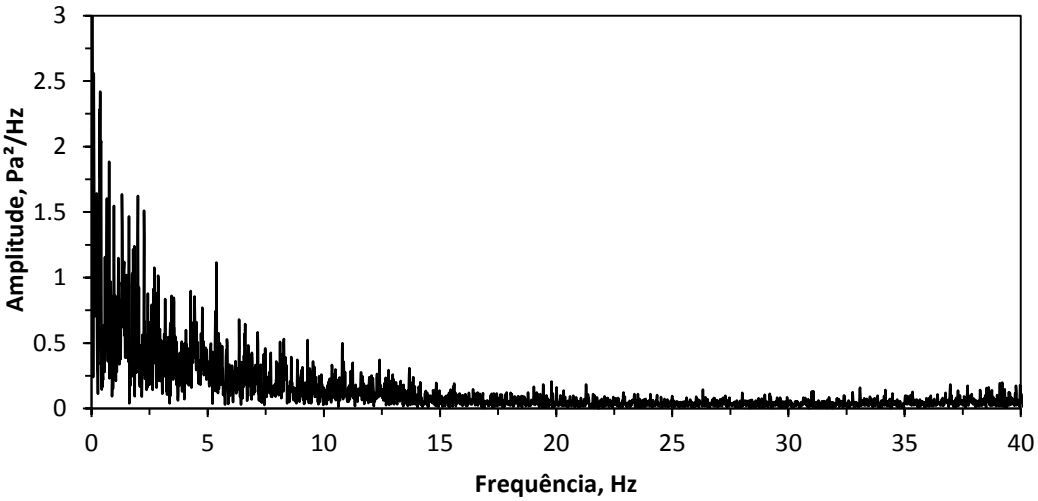
Acima dessa velocidade, frequências dominantes entre 7 e 10 Hz foram registradas (Figura 4.65).

Figura 4.65. Espectros de potência. Sólido: arroz. H_O=0,21 m. v_{ar}=1,7v_{jm} a 2,0v_{jm}. Ponto de medida: P4.



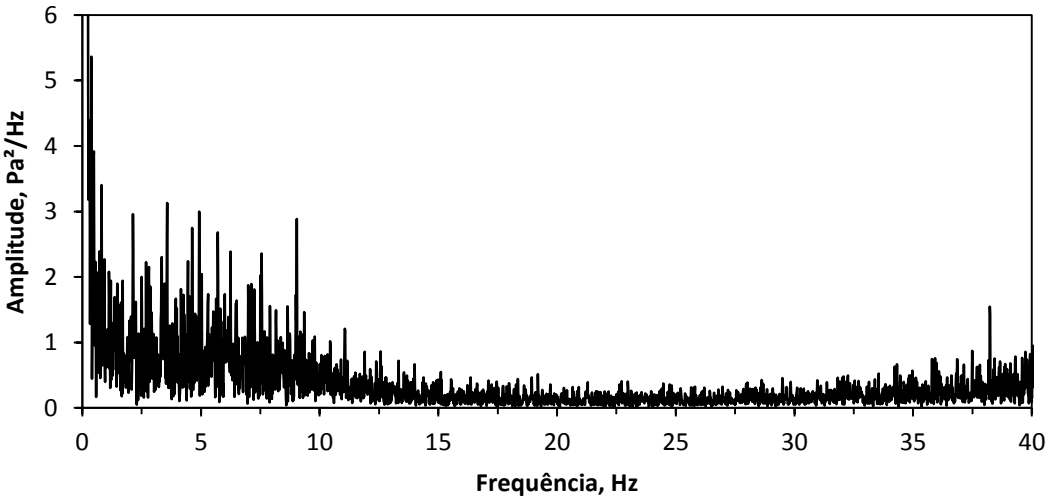
A Figura 4.66 indica o espectro do leito fixo do arroz. Não houve pico de frequência nesse regime, mas uma região de baixas componentes de frequência.

Figura 4.66. Espectros de potência. Regime: leito fixo. Sólido: arroz. H_o=0,315 m. v_{ar}=0,3v_{jm}. Ponto de medida: P5**.**



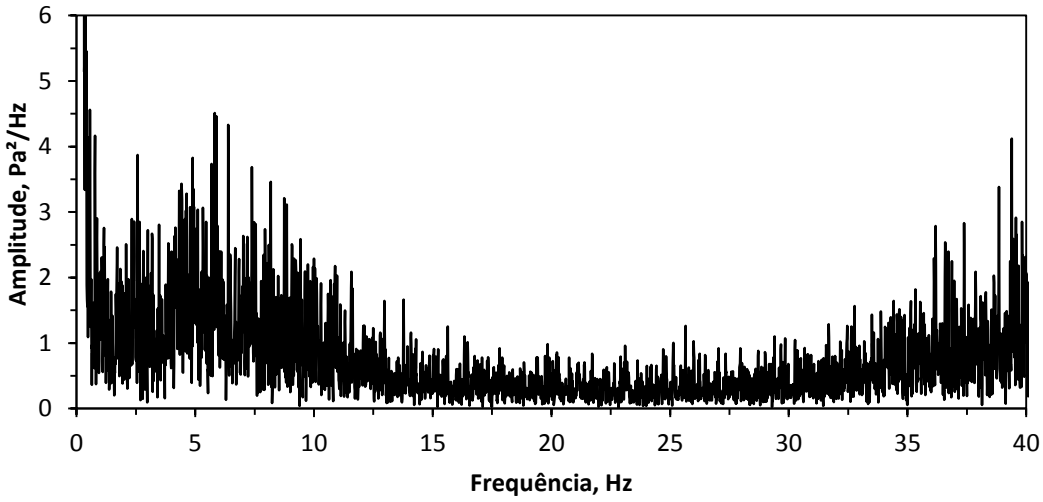
A Figura 4.67 registra o espectro de potência do arroz para o regime de jorro interno. Observou-se o aumento na amplitude do espectro e alargamento nas componentes acima de 5 Hz.

Figura 4.67. Espectros de potência. Regime: jorro interno. Sólido: arroz. H_O=0,315 m. v_{ar} =0,6v_{jm} (0,75 m/s). Ponto de medida: P4**.**



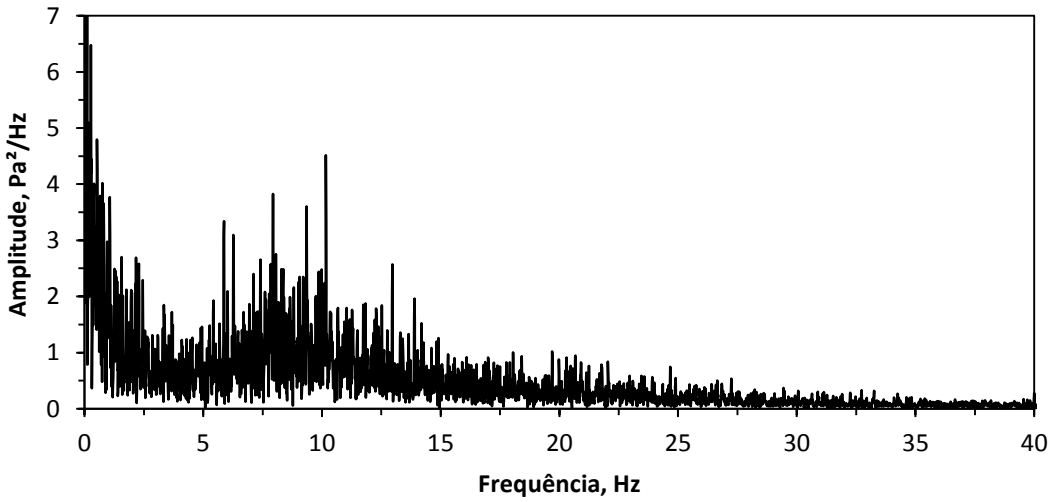
Com o aumento na velocidade do ar e o surgimento da cavidade interna do jorro, os espectros gerados no regime de jorro interno indicaram regiões de frequências pronunciadas entre 5 e 7,5 Hz, como indicado na Figura 4.68.

Figura 4.68. Espectros de potência. Regime: jorro interno. Sólido: arroz. *Ho*=0,315 m. v_{ar}=0,8v_{jm} (1 m/s). Ponto de medida: P4**.**



A Figura 4.69 indica o espectro na velocidade de jorro mínimo do leito de arroz. Registrou-se a presença de uma frequência dominante de aproximadamente 10 Hz.

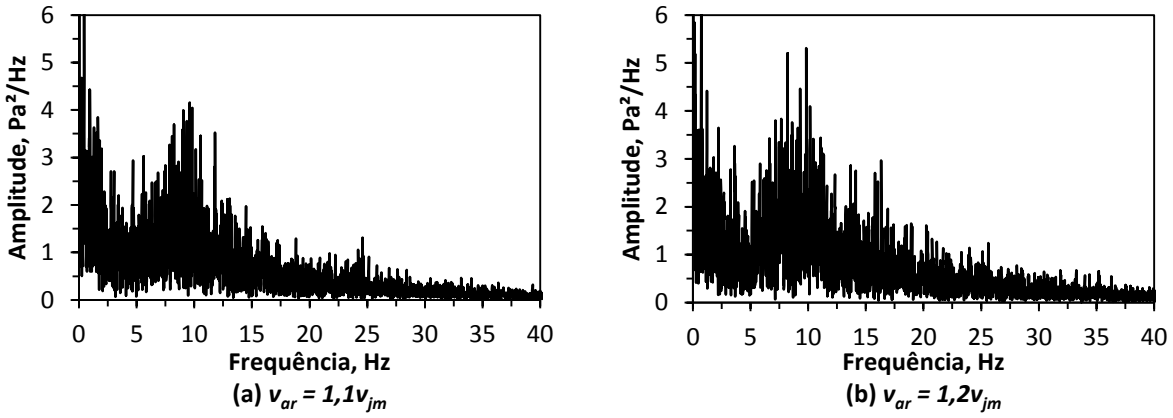
Figura 4.69. Espectros de potência. Regime: jorro estável. Sólido: arroz. H_O=0,315 m. v_{ar}=1v_{jm} (1,3 m/s). Ponto de medida: P4**.**



Visualmente pôde-se registrar a irregularidade da movimentação das partículas na fonte, causando pulsações e variando a altura da mesma, como foi visto para a H_O = 0,21m.

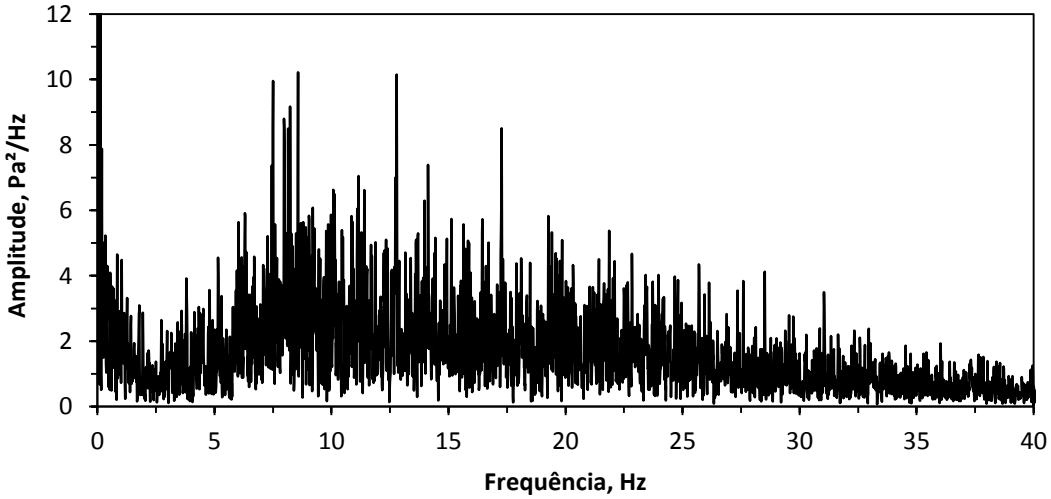
A Figura 4.70 indica os espectros para as velocidade de 1,1v_{jm} e 1,2v_{jm} para o leito de arroz. Na velocidade de 1,1v_{jm}, registrou-se a diminuição da altura do leito; já na velocidade de 1,2v_{jm} observou-se a estabilidade da fonte, mais centralizada e pouco pulsante. Os espectros apontam a existência de uma região de frequências mais destacadas variando de 5 a 15 Hz.

Figura 4.70. Espectros de potência. Regime: jorro estável. Sólido: arroz. H_O=0,315 m. Velocidades de 1,1 e 1,2v_{jm}. Ponto de medida: P4**.**



Com o aumento na velocidade do ar além de 1,7v_{jm} observou-se o surgimento de instabilidades na movimentação das partículas no jorro. Por vezes, não era possível visualisar a superfície do leito pois aglomerados de partículas, suspensos no topo da coluna, retornavam à região anular com grande intensidade, variando a altura do leito. Essas instabilidades foram registradas no espectro da Figura 4.71.

Figura 4.71. Espectros de potência. Regime: jorro instável. Sólido: arroz. H_O=0,315 m. v_{ar}=1,7v_{jm}. Ponto de medida: P4.



O espectro da velocidade de 1,7v_{jm} indica frequências pronunciadas na faixa de 5 a 20 Hz, destacando quatro componentes de 7,5 , 8,5 , 12 e 17 Hz.

4.4.7 Comparação de frequências dominantes entre regimes fluidodinâmicos

A Tabela 4-4 reune as frequências dominantes para cada regime fluidodinâmico observado no leito de jorro, além de apresentar resumidamente algumas informações relevantes da movimentação dos sólidos durantes os experimentos.

Tabela 4-4. Frequências dominantes de cada regime fluidodinâmico.

	Leito fixo	Jorro interno	Jorro estável	Observações
Soja	6,1 Hz	10 Hz	14,5 Hz	Espectro largo com magnitudes de 6 a 20 Hz.
Arroz	Ausência de frequência dominante	Ausência de frequência dominante	5-15 Hz	Espectros com baixa magnitude no leito fixo e jorro interno; fonte instável acima de 1,7 Hz, com frequência de 8 Hz.
Polietileno II	6,9 Hz	8 Hz	6-20 Hz	Sem frequência dominante no jorro estável; instabilidades acima de 1,5 v_{jm}.
Poliuretano	7,0 Hz	8,5 Hz	9,2 Hz	Instabilidades da fonte e altura do leito em H_O = 0,315m.
Vidro	7,5 Hz	9,2 Hz	9,5 Hz	Movimentação homogênea das partículas.
Polietileno I	7,6 Hz	9 Hz	10 Hz	Movimentação homogênea das partículas.

5 CONCLUSÃO

As flutuações de pressão nos leitos de vidro, polietileno I, polietileno II, poliuretano, soja e arroz foram analisadas no domínio do tempo e no domínio da frequência, por desvio padrão e Transformada Rápida de Fourier (FFT), respectivamente, a fim de identificar e caracterizar regimes fluidodinâmicos e transições entre estes, em uma coluna de leito de jorro cônica-cilíndrica.

Os parâmetros fluidodinâmicos obtidos experimentalmente para a relação de altura do leito/diâmetro da coluna de 1:1 e 1,5:1 foram velocidade de jorro mínimo, queda de pressão no jorro estável e queda de pressão máxima no leito. De forma geral, todos os sólidos apresentaram curvas fluidodinâmicas típicas, como as reportadas na literatura.

A análise no domínio do tempo possibilitou a verificação do comportamento do desvio padrão da flutuação de pressão em função da velocidade de ar. Para a maioria dos sólidos, o desvio padrão aumentou gradativamente conforme a velocidade do ar era aumentada, à exceção dos leitos de vidro, que apresentou redução no desvio próximo da condição de mínimo jorro e, do arroz que acima de $0{,}5v_{jm}$ indicou muitas oscilações no desvio padrão.

Nas duas alturas de leito empregadas, características diferentes foram registradas nos espectros de cada regime fluidodinâmico. Na maioria dos resultados, obteve-se: frequência dominante no leito fixo, transição de leito fixo para jorro interno com aumento da frequência dominante, transição de jorro interno para jorro estável marcada por espectros mais largos e frequência dominante semelhante à do jorro interno, e regime de jorro instável com espectros largos e componentes de frequências maiores que no jorro estável.

A transição de jorro interno para jorro estável teve início em diferentes faixas de velocidade, dependendo das caracterísicas dos sólidos: enquanto que para sólidos com maiores massas específicas ela teve início em velocidades de 0,8 a $0{,}9v_{jm}$, para sólidos mais leves ela iniciou mais cedo, entre 0,5 e $0{,}7v_{jm}$.

De maneira geral, nos regimes de leito fixo observou-se um pico de frequência dominante em torno de 7 Hz, variando entre cada sólido de 6,1 Hz para a soja e 8,3 para polietileno I. O regime de jorro interno foi caracterizado por espectros mais largos e frequência significativa de aproximadamente 9 Hz, também variando para cada sólido

empregado. Os espectros para jorro estável apresentaram bandas de frequências largas variando de 6 a 20 Hz (como no leito de polietileno II) mas de forma geral com apenas uma frequência significativa em torno de 10Hz. As flutuações de pressão no regime de jorro instável originaram espectros largos, sem indicar frequências dominantes, e sim componentes maiores do que encontradas no regime de jorro estável.

A exceção do comportamento dos espectros de potência obtidos foi o leito de arroz. O leito não apresentou flutuações de pressão que gerassem frequências dominantes nos regimes de leito fixo e jorro interno, e na velocidade de mínimo jorro. Já para velocidades maiores que $1v_{jm}$, registrou-se espectros largos com frequências destacadas entre 5 e 15 Hz.

.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A R. F. **Análise da secagem de pastas em leito de jorro**. Tese de Doutorado. São Carlos: UFSCar, 2009.

BRAGA, M. B. **Efeitos da molhabilidade e adesão em sistemas sólido-suspensão e filme-suspensão no desempenho do recobrimento em leito de jorro**. Campinas: Unicamp, 2012.Dissertação de Mestrado.

BUTZGE, J. J. **Controle do regime fluidodinâmico estável durante o processo de umedecimento de inertes em leito de jorro utilizando análise espectral.** Campinas – SP: FEQ/UNICAMP, 2012, 142p.,Dissertação de Mestrado.

CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidodinâmicos**. São Paulo: Blucher, 2012.

EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. **Spouted and Spout-Fluid Beds.**Cambridge: Cambridge University Press, 2011.

FELIPE, C. A. S. **Identificação e monitoramento de regime fluidodinâmico emleitos fluidizados gás-sólido**. Campinas - SP: FEQ/DTF/UNICAMP, 2004,172p.,Tese de Doutorado.

FELIPE, C. A. S.; ROCHA, S. C. S. Time-series analysis of pressure fluctuation in gas-solid fluidized beds. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**. v. 21, n. 3, p. 497-507, 2004.

FREITAS, L.; DOGAN, O. M.; JIM LIM, C.; GRACE, J. R.; BAI, D. Identification of flow regimes in slot-rectangular spouted beds using pressure fluctuations. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 82, p. 60–73, 2004.

LI, Y.; CHE, D.; LIU, Y..CFD simulation of hydrodynamic characteristics in a multiple-spouted bed.**Chemical Engineering Science**.80, p. 365 – 379, 2012.

LIMA, P. M.. **Análise da fluidodinâmica e transferência de calor em leito de jorro com alimentação contínua de sólidos pela base**. São Carlos: UFSCar,2004.Dissertação de Mestrado.

LOPES, N. E. C.; MORIS, V. A. S; TARANTO, O. P. Analysis of spouted bed pressure fluctuations during particle coating. **Chemical Engineering and Processing.** v. 48, p. 1129-1134, 2009.

LOURENÇO, R. M. **Identificação e Monitoramento de Regimes de Escoamento em Leito de Jorro**. Uberlândia – MG: FEQ/UFU, 2006,133p., Dissertação de Mestrado.

MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. **Spouted beds.** New York: Academic Press, 1974.

MATHUR, K. B.; GISHLER, P. E.A study of the application of the spouted bed technique to wheat drying. **Journal of Applied Chemistry.**5, p.624 – 636, 1955.

OLIVEIRA, W. P.; SOUZA, C.R.F.; LIM, C.J.; GRACE, J.R. Evaluation of flow regimes in a semi-cylindrical spouted bed through statistical, mutual information, spectral and Hurst's analysis. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**. v. 86, p. 582–597, 2008.

PAVANELLI, P. E. **Controle e monitoramento em tempo real do regime de jorro estável através da análise espectral**. Campinas – SP: FEQ/Universidade Estadual de Campinas, 2006, 121p. Dissertação de Mestrado.

PISKOVA, E.; MÖRL, L. Characterization of spouted bed regimes using pressure fluctuation signals.**Chemical Engineering Science.**63, p. 2307 – 2316, 2008.

SILVA, V. A. **Monitoramento de regimes de contato gás-sólido em leito de jorro cone-cilíndrico por medidas de queda de pressão em tempo real**. Campinas - SP: FEQ/ Universidade Estadual de Campinas, 1998, 130p. Dissertação de Mestrado.

SHUHAMA, I. K.; AGUIAR, M. L.; OLIVEIRA, W. P.; FREITAS, L. A. P. Experimental production of annatto powders in spouted bed dryer. **Journal of Food Engineering**. v. 59, p. 93–97, 2003.

VAN OMMEN, J. R.; SASIC, S.; SCHAAF, J. V. D.; GHEORGHIU, S.; JOHNSSON,F. Time-series analysis of pressure fluctuations in gas-solid fluidized beds – A review. **International Journal of Multiphase Flow**. v. 37, p. 403 – 428, 2011.

XU, J.; BAO, X.; WEI, W.; SHI, G.; SHEN, S.; BI, H. T.; GRACE, J. R.; LIM, C. J. Statistical and frequency analysis of pressure fluctuations in spouted beds. **Powder Technology**. v. 140, p. 141 – 154, 2004.

APÊNDICE 1 – CURVAS FLUIDODINÂMICAS

Figura 1. Curva fluidodinâmica do polietileno I. Condições: m_p = 3,750 kg; H_o = 0,315m**.**

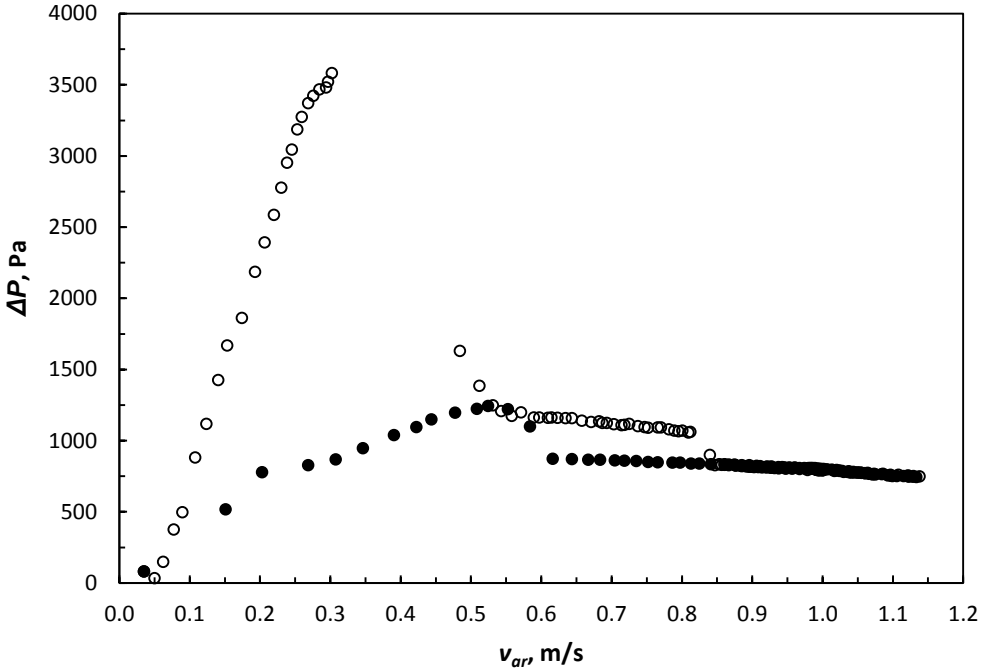


Figura 2. Curva fluidodinâmica do polietileno II. Condições: m_p = 3,880 kg; H_o = 0,315m**.**

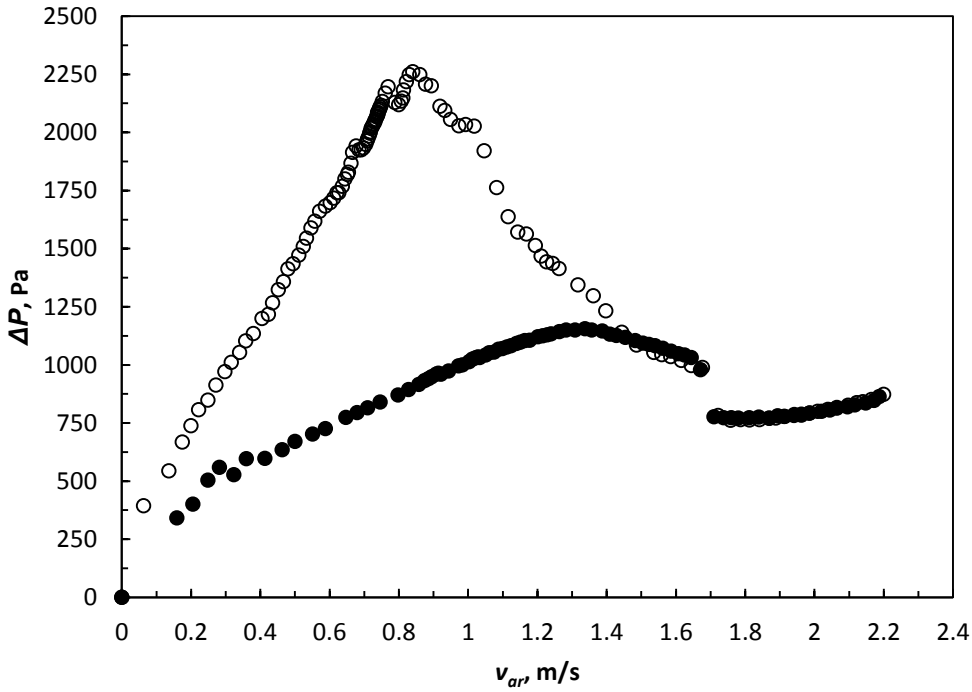


Figura 3. Curva fluidodinâmica do poliuretano. Condições: m_p = 3,790 kg; H_o = 0,315m**.**

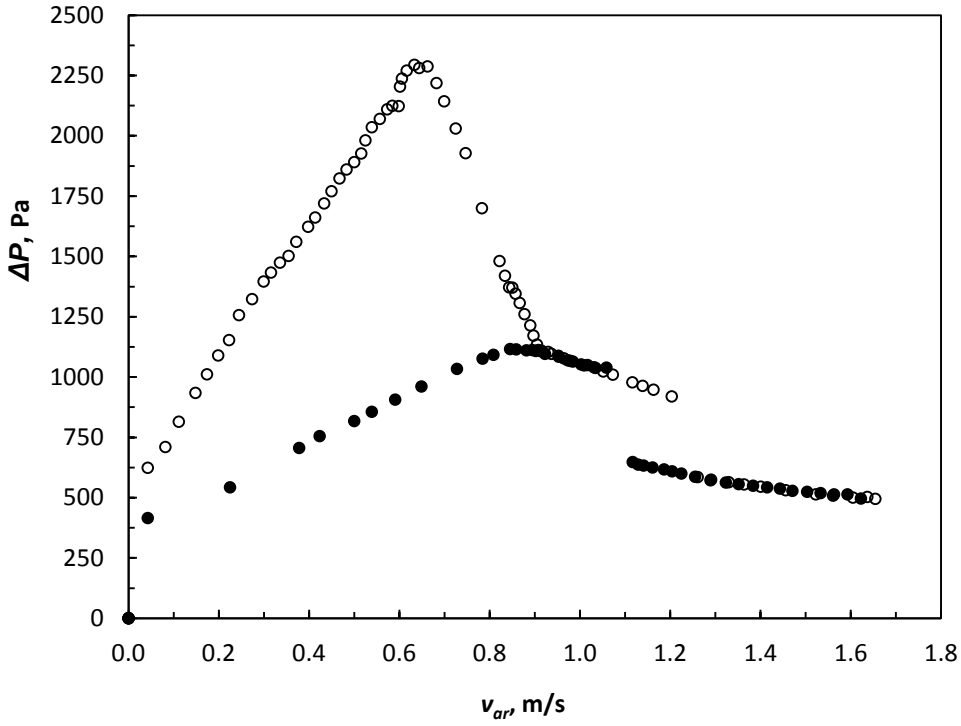


Figura 4. Curva fluidodinâmica da soja. Condições: m_p = 5,050 kg; H_o = 0,315m**.**

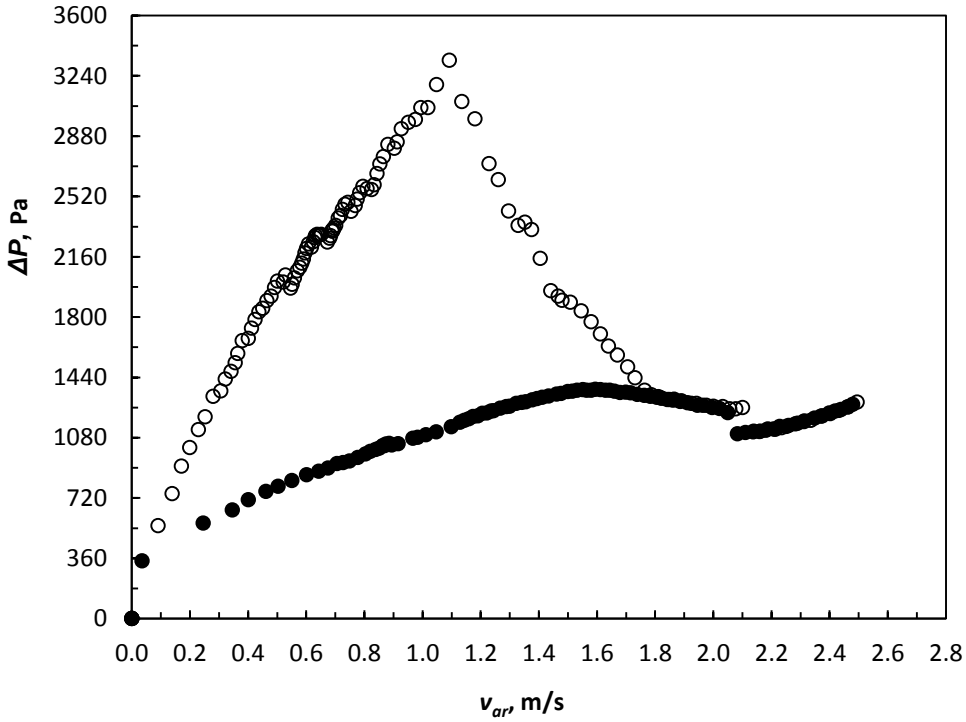
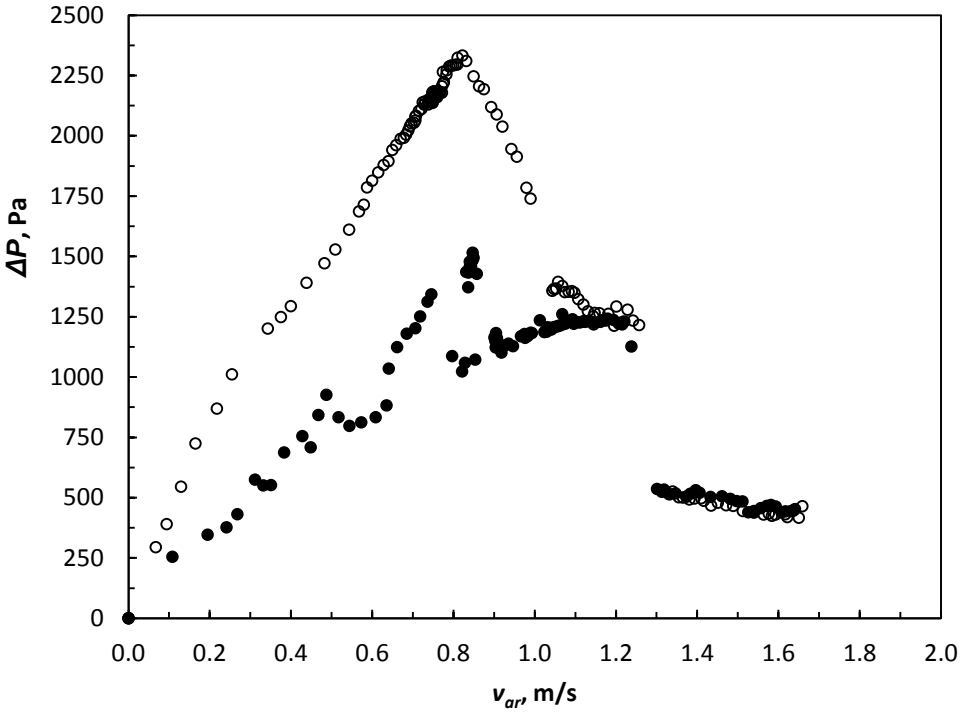


Figura 5. Curva fluidodinâmica do arroz. Condições: m_p = 4,040 kg; H_o = 0,315m**.**



APÊNDICE 2 – SÉRIES TEMPORAIS E DESVIO PADRÃO

Figura 1. Séries temporais e desvio padrão da flutuação de pressão do polietileno I. Ponto de medida: P5. H_O = 0,315m.

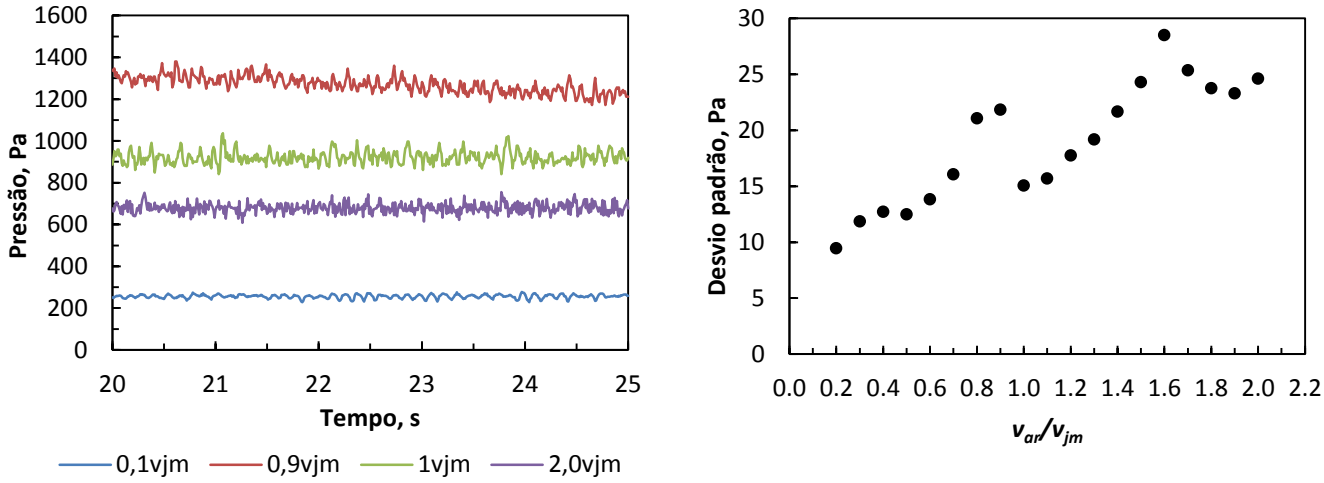


Figura 2. Séries temporais e desvio padrão da flutuação de pressão do polietileno II. Ponto de medida: P4. H_O = 0,315m.

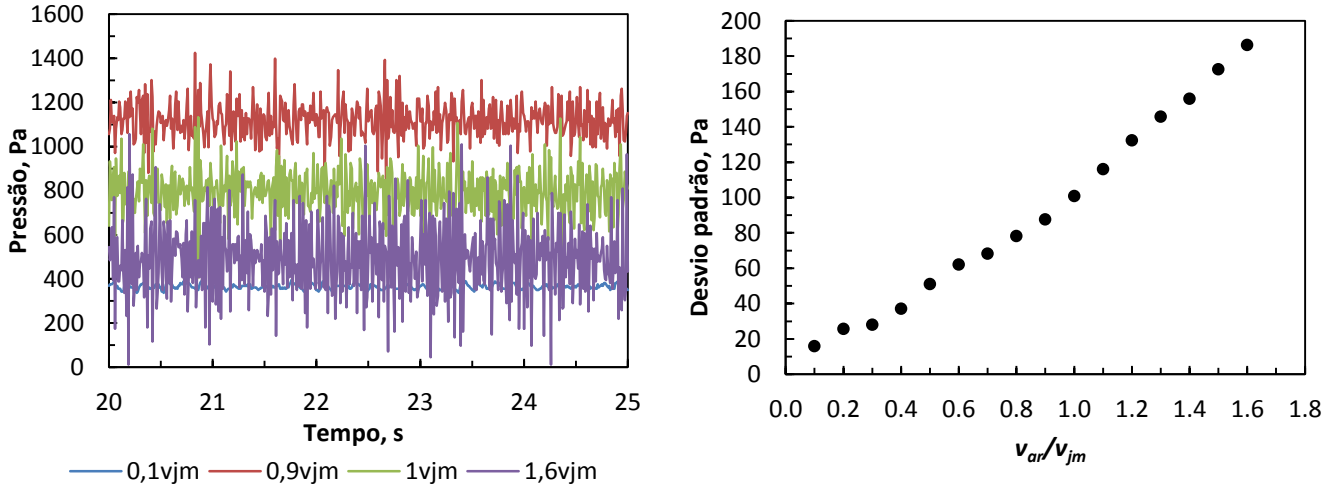


Figura 3. Séries temporais e desvio padrão da flutuação de pressão do poliuretano. Ponto de medida: P5. H_O = 0,315m.

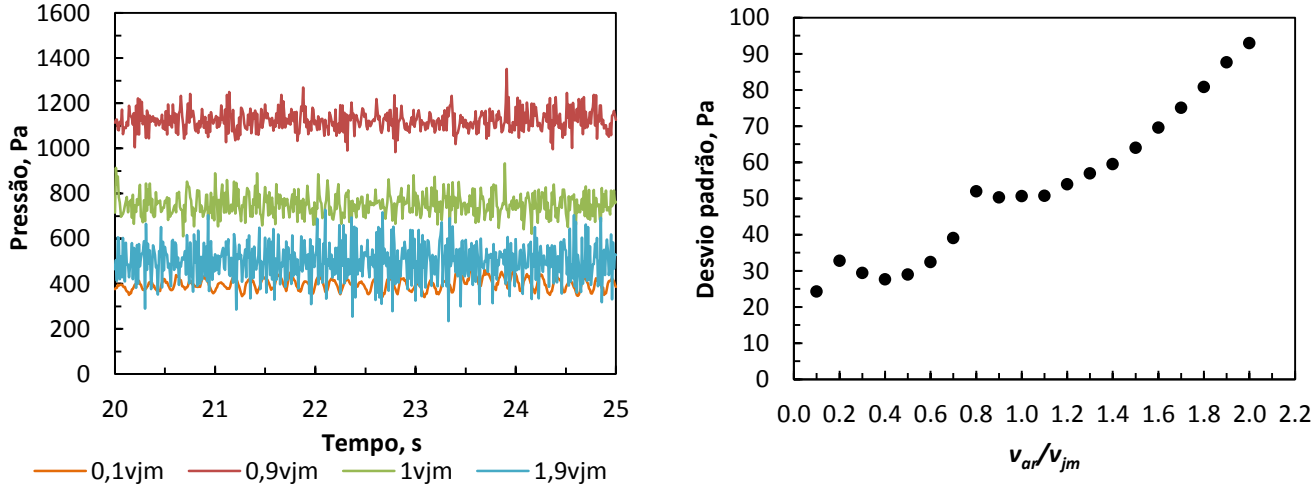


Figura 4. Séries temporais e desvio padrão da flutuação de pressão da soja. Ponto de medida: P4. H_O = 0,315m.

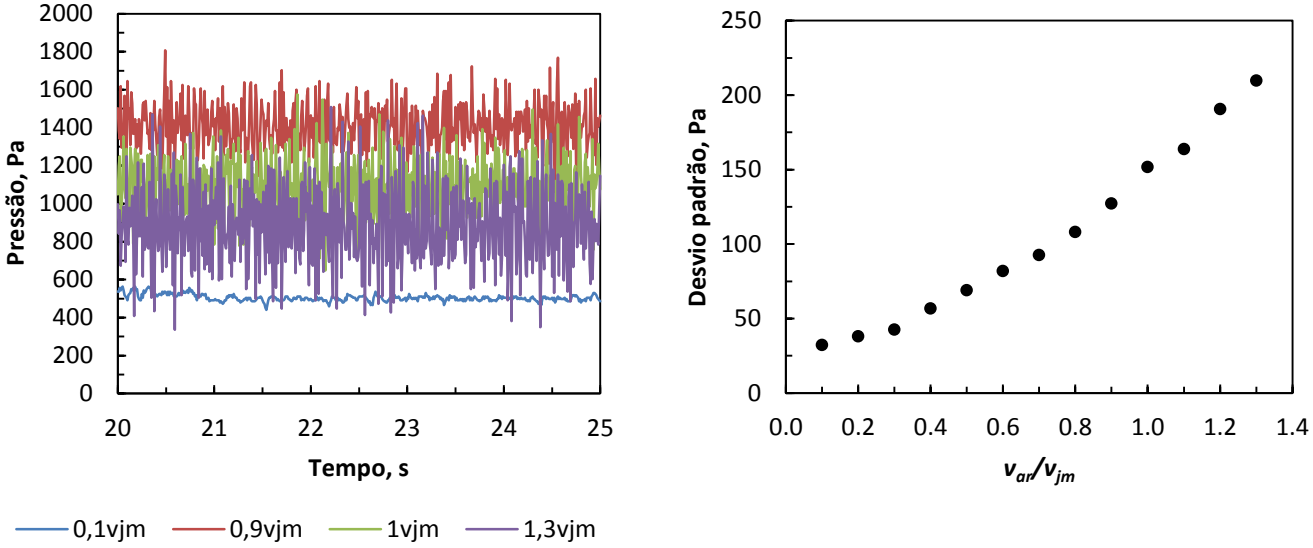
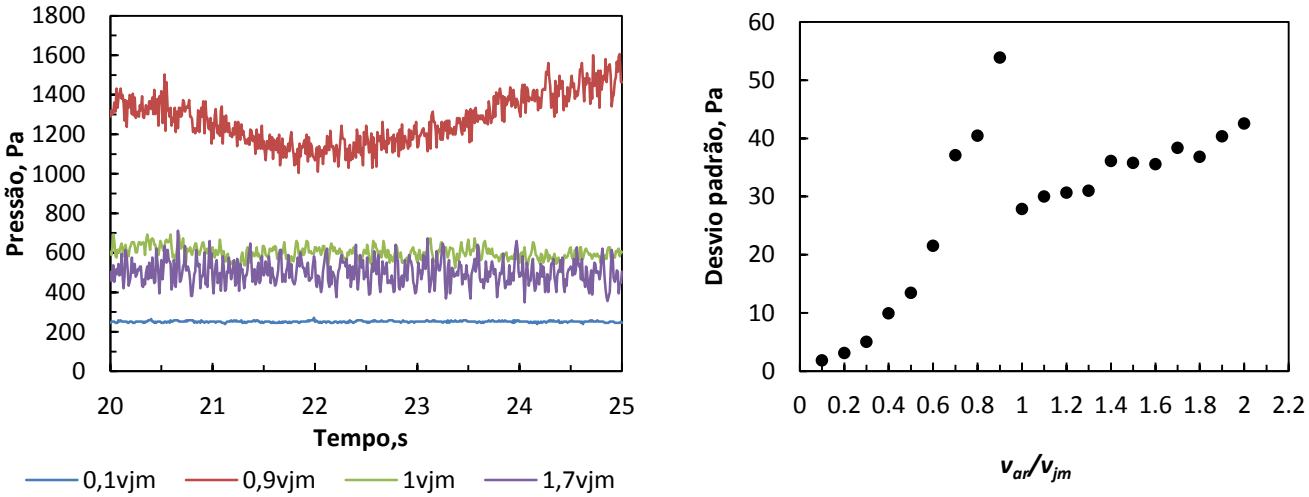


Figura 5. Séries temporais e desvio padrão da flutuação de pressão do arroz. Ponto de medida: P5. H_O = 0,315m.



APÊNDICE 3 – ESPECTROS DE POTÊNCIA

Figura 1. Espectros de potência. Sólido: polietileno I. H_O = 0,315m.

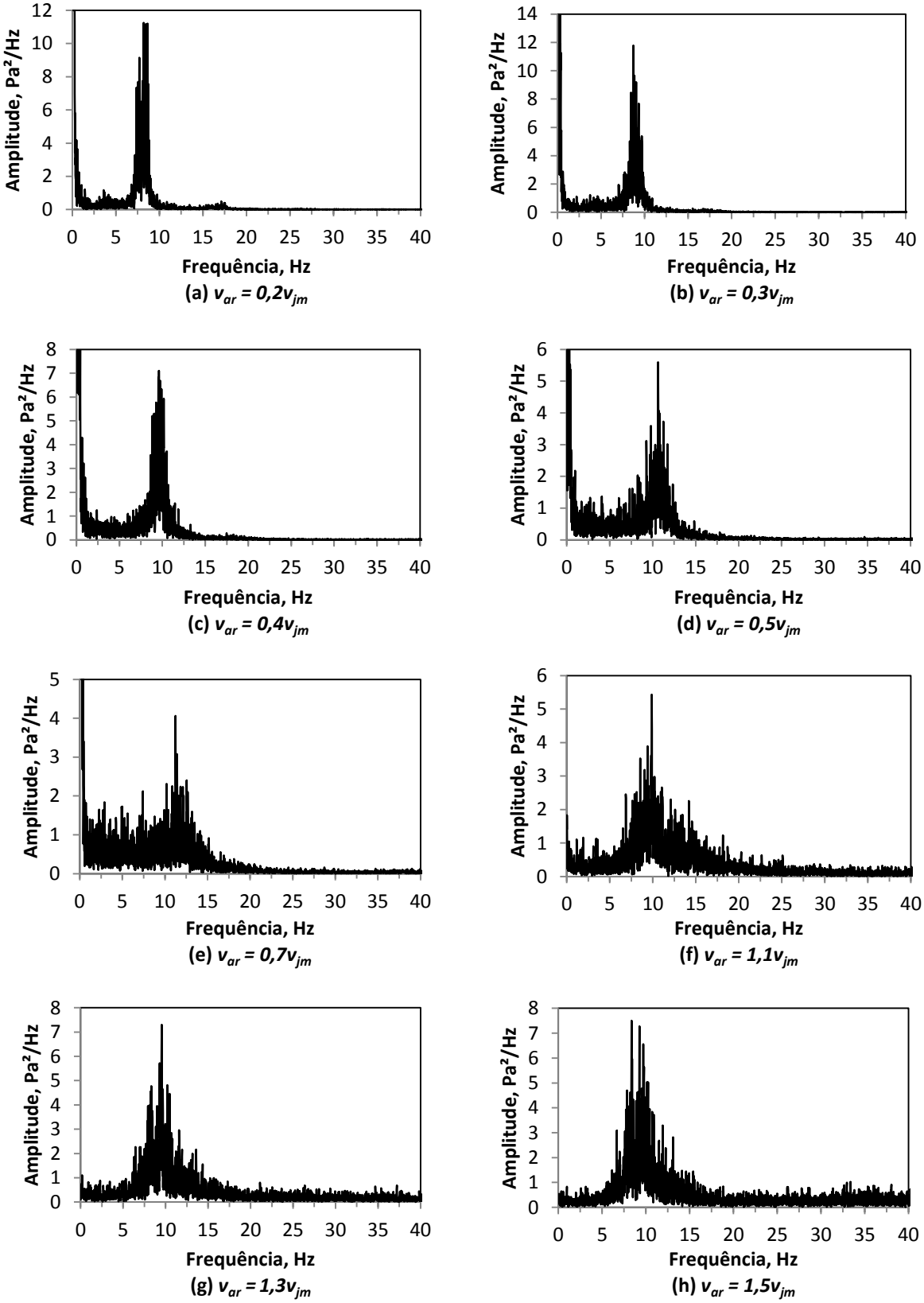


Figura 1. Continuação.

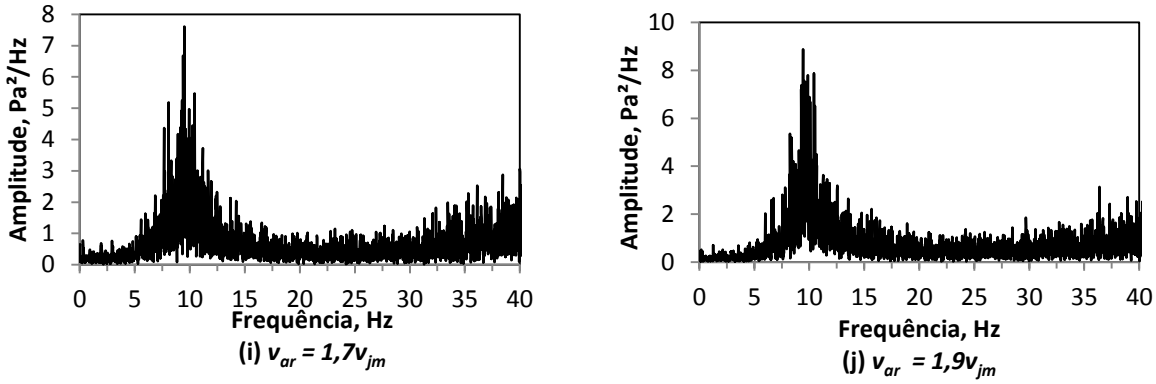


Figura 2. Espectros de potência. Sólido: polietileno II. H_O = 0,315m.

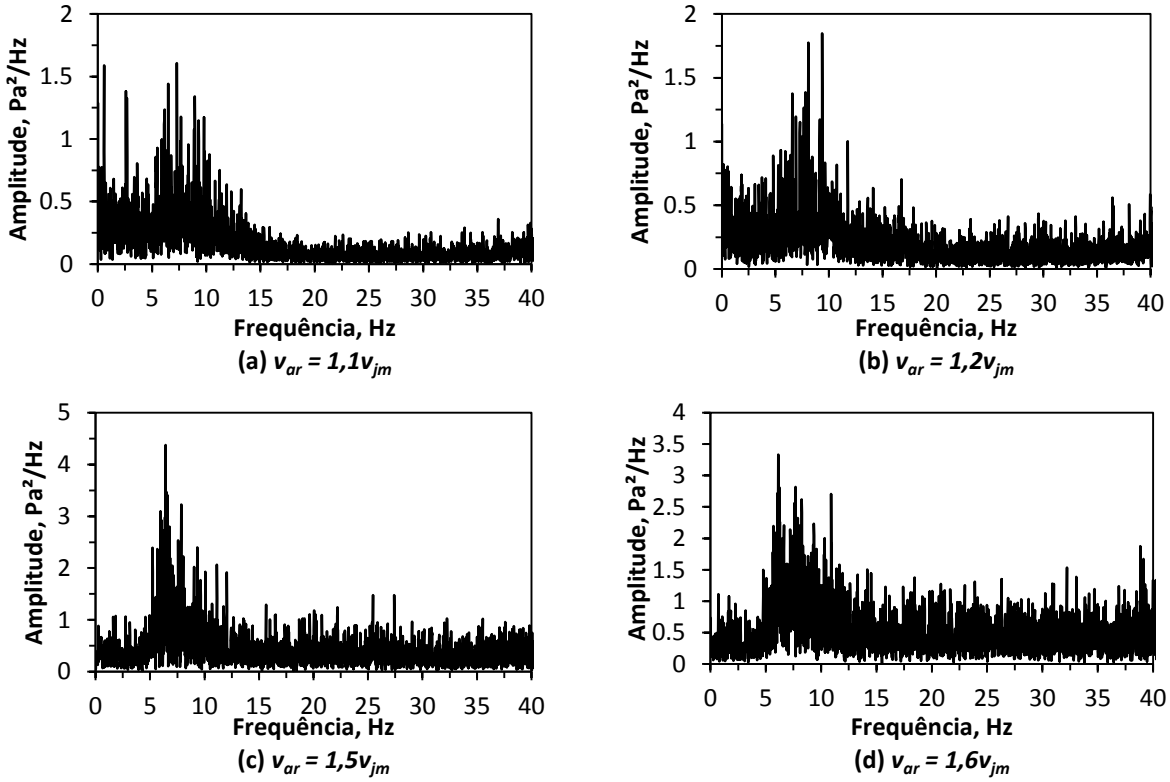


Figura 3. Espectros de potência. Sólido: poliuretano. H_O = 0,315m.

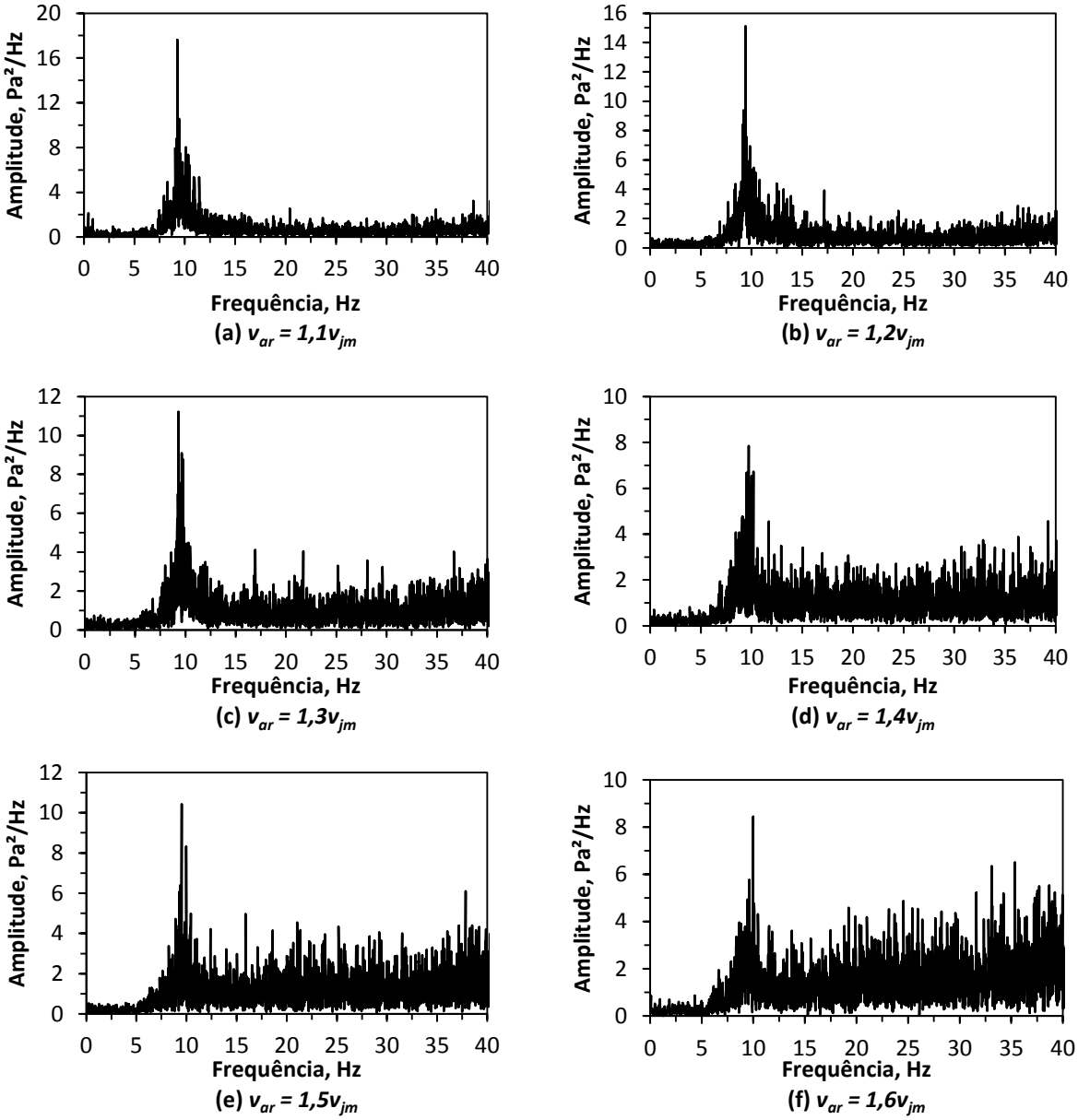


Figura 4. Espectros de potência. Sólidos: soja. H_O = 0,315m.

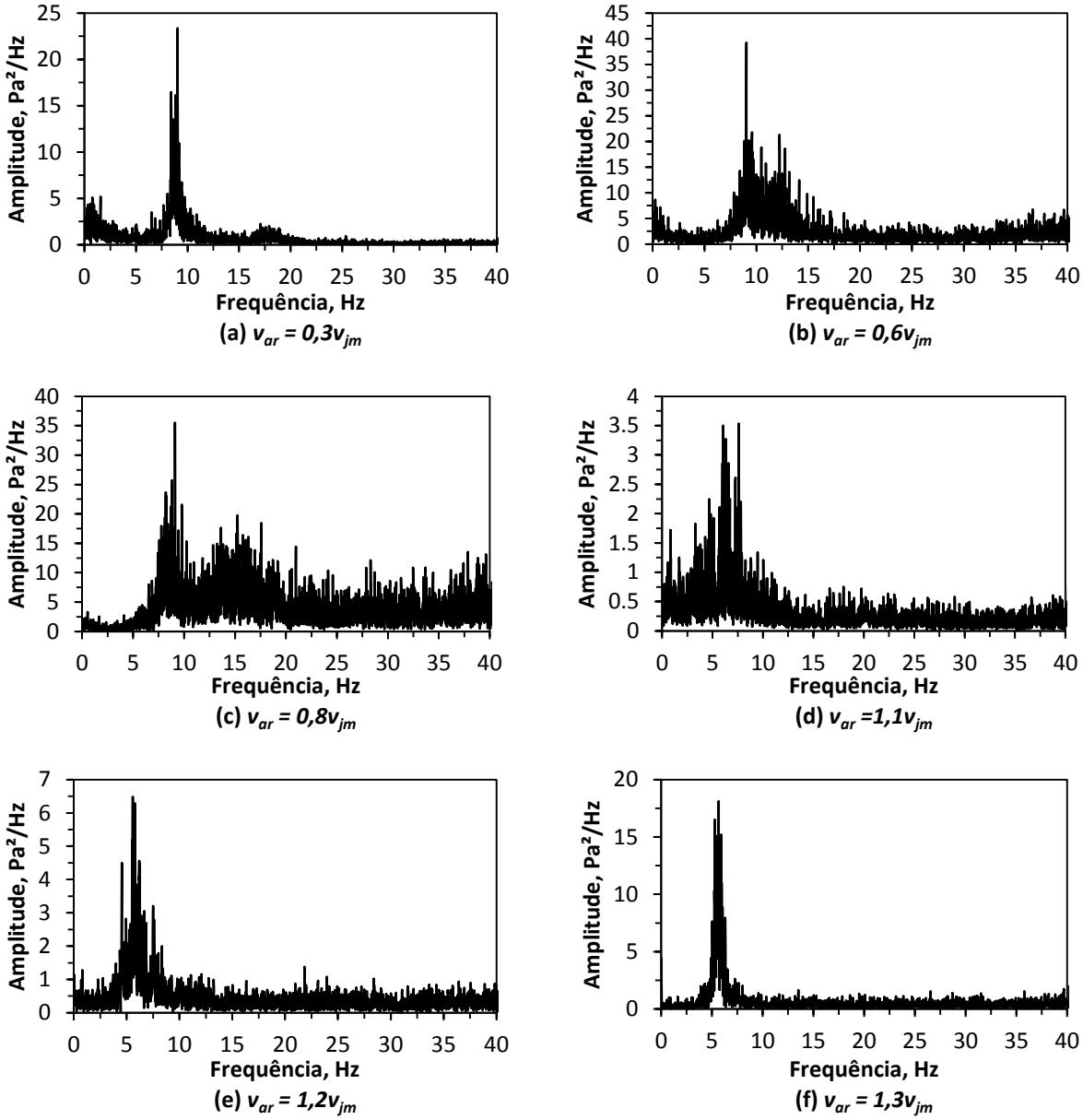
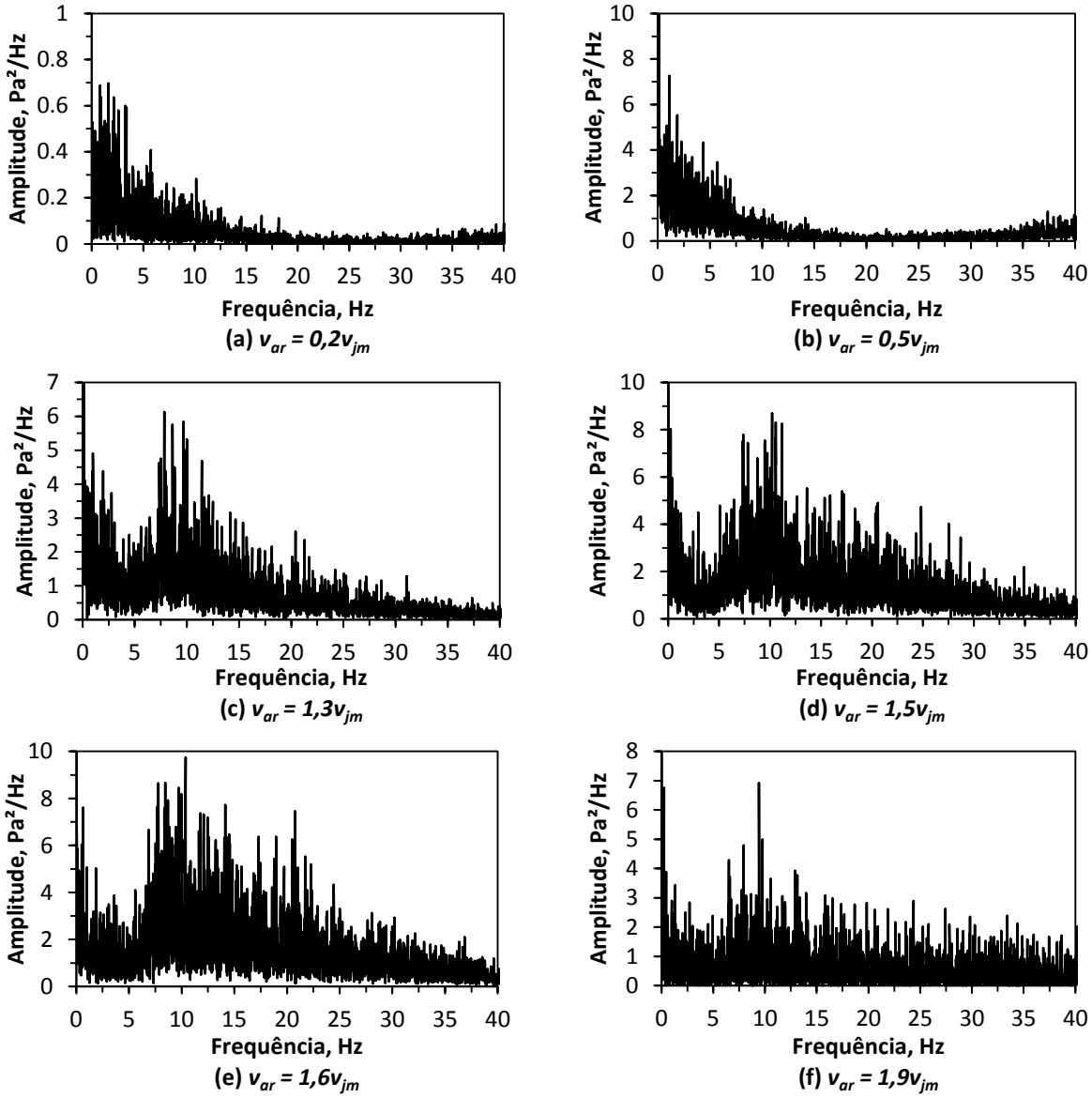



Figura 5. Espectros de potência. Sólido: arroz. H_O =0,315m.