

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



ESTUDO DA FLUIDODINÂMICA DE LEITO VIBRO-
FLUIDIZADO HORIZONTAL

Juliana Miranda de Abreu

Uberlândia – MG

2007



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

ESTUDO DA FLUIDODINÂMICA DE LEITO VIBRO- FLUIDIZADO HORIZONTAL

Juliana Miranda de Abreu

Dissertação de mestrado apresentada à
Universidade Federal de Uberlândia
como parte dos requisitos necessários à
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Química, área de Sistema de
particulados.

Uberlândia –MG

2007

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

A162e Abreu, Juliana Miranda de, 1981-
Estudo da fluidodinâmica de leito vibro-fluidizado horizontal /
Juliana Miranda de Abreu. - 2007.

99 f. : il.

Orientador: Carlos Henrique Ataíde.

Co-orientador: Marcos Antonio de Souza Barrozo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Inclui bibliografia.

1. Fluidização - Teses. 2. Dinâmica de fluídos - Teses. 3. Engenharia química - Teses. I. Ataíde, Carlos Henrique. II. Barrozo, Marcos Antonio de Souza. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV. Título.

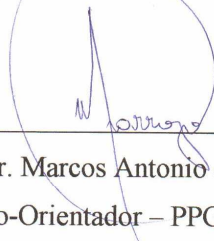
CDU: 66.096.5

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE
MESTRADO DA JULIANA MIRANDA DE ABREU APRESENTADA À
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, EM 24.09.2007.

BANCA EXAMINADORA:



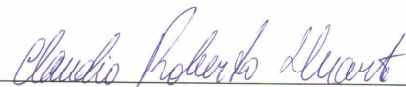
Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde
(Orientador – PPG – EQ/UFU)



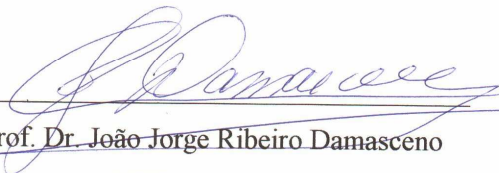
Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo
(Co-Orientador – PPG – EQ/UFU)



Prof. Dr. Roger Valeri Daleffe
(DEQ – UFSCar)



Prof. Dr. Cláudio Roberto Duarte
(PPG – EQ/UFU)



Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno
(PPG – EQ/UFU)

Dedico estes trabalhos à minha família: aos meus pais que nunca pouparam esforços para investir em minha educação e aos meus irmãos que sempre estiveram me apoiando.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me conceder a fé e a capacidade de desenvolver este trabalho.

Aos meu pais, Luiz Carlos de Abreu e Wilma Miranda de Abreu, que sempre acreditaram e apoiaram minhas decisões.

Aos meus irmãos Viviane, Daniela e Guilherme por todos os momentos juntos de alegria e companheirismos.

Ao meu noivo, Fábio Peixoto Silva, que esteve sempre me aconselhando e encorajando em todos os momentos, e que mesmo com a distância sempre esteve ao meu lado acreditando em mim e em meu potencial.

A todos os professores da Faculdade de Engenharia Química da UFU, em particular aos Professores Carlos Henrique Ataíde, Marcos Antonio de Souza Barrozo, Cláudio Roberto Duarte e a Professora Márcia Gonçalves Coelho que de forma direta e indireta me fizeram crescer muito como pessoa e contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os amigos e colegas da Faculdade de Engenharia Química em especial a Andréia, Ricardo, Davi, Fabiana, Alaine, Adriene, Daniel e Sandra, pelos vários momentos agradáveis e divertidos. Às colegas Cássia e Letícia pela grande e importantíssima contribuição na realização deste trabalho.

À Faculdade de Engenharia Química da UFU, onde este trabalho foi desenvolvido. Aos técnicos da FEQUI, em especial ao Anísio, pela realização das adequações e montagem do equipamento.

Ao órgão de fomento a pesquisa CAPES, pela bolsa de mestrado.

A todos que de alguma forma ajudaram na realização deste trabalho.

"Nossa geração não lamenta tanto os crimes dos perversos quanto o estarrecedor silêncio dos bondosos" Martin L. King

SUMÁRIO

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	iv
Lista de Símbolos	v
Resumo	vii
<i>Abstract</i>	viii
 CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	 01
 CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	 04
2.1 Fluidização.....	04
2.1.1 Fluidodinâmica de leito fluidizado.....	07
2.1.2 Aplicações de leitos fluidizados.....	10
2.1.3 Característica das partículas.....	14
2.2 Propriedades relevantes das partículas.....	14
2.3 Classificação das partículas.....	16
2.4 Vibração.....	18
2.4.1 Dinâmica do leito.....	19
2.4.2 Tipos de vibradores.....	21
2.5 Vibro-fluidização.....	21
2.5.1 Adimensional de Vibração.....	23
2.5.2 Definições de velocidade mínima de vibro-fluidização.....	24
2.5.3 Queda de pressão em leitos submetidos à vibração.....	27
2.5.4 Porosidade de leitos vibro-fluidizados.....	32
2.5.5 Desvio Padrão da queda de pressão.....	34
2.6 Efeitos da vibração na secagem.....	36
2.6.1 Tipos de secadores vibro-fluidizados.....	37
2.7 Planejamento de experimentos.....	40
2.8 Análise Canônica.....	43
2.9 Alguns estudos da fluidodinâmica de leitos vibro-fluidizado.....	46
 CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	 50
3.1 Materiais.....	50

3.2	Equipamento.....	50
3.3	Métodos.....	55
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....		60
4.1	Testes de estabilidade do leito.....	60
4.2	Reprodutividade dos dados.....	63
4.3	Análise Fluidodinâmica dos leitos Vibro-fluidizados.....	65
4.4	Análise estatística.....	71
4.4.1	Efeito da Amplitude.....	71
4.4.2	Efeito da Frequência.....	72
4.4.3	Efeito da Carga de Partículas.....	73
4.5	Análise das superfícies de resposta.....	74
4.5.1	Queda de Pressão.....	74
4.5.2	Velocidade mínima vibro-fluidização.....	76
4.6	Análise canônica.....	79
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO E SUGESTÕES.....		82
5.1	Conclusões.....	82
5.2	Sugestões.....	83
REFERÊNCIA		
BIBLIOGRÁFICA.....		84
APÊNDICE A.....		89

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1-1	Comportamento “quase líquido” das partículas em leito fluidizado.....	04
Figura 2.1-2	Várias formas de contato sólido-fluido.....	06
Figura 2.1-3	Perda de carga versus velocidade do ar.....	07
Figura 2.1-4	Gráfico esquemático para obtenção da velocidade de mínima fluidização.....	10
Figura 2.1-5	Um leito fluidizado como refrigerador de sólidos.....	11
Figura 2.1-6	Modelo de <i>Kellogg</i> - unidade FCC <i>Orthoflow</i>	13
Figura 2.2-1	Volume hidrodinâmico de uma partícula.....	15
Figura 2.3-1	Classificação das partículas segundo GELDART (1973).....	17
Figura 2.4-1	Registro de um movimento periódico, THOMSON (1972).....	19
Figura 2.5-1	Esquema industrial de um leito vibo-fluidizado (LVB).....	22
Figura 2.5-2	Velocidade mínima de vibro-fluidização versus parâmetro vibracional Γ	25
Figura 2.5-3	Velocidade mínima de mistura para leito vibo-fluidizado. Efeito do adimensional de vibração, HOVMAND (1987).....	27
Figura 2.5-4	Curva de queda de pressão em relação a velocidade do gás em leito vibo- fluidizado.....	28
Figura 2.5-5	Curvas de fluidização, com e sem vibração, STRUMILLO; PAKOWSKI (1980).....	28
Figura 2.5-6	Queda de pressão em LVF versus parâmetro vibracional Γ	31
Figura 2.5-7	Porosidade do leito em relação ao adimensional de vibração, STUMILLO; KUDRA (1986).....	32
Figura 2.5-8	Porosidade de LVF versus parâmetro vibracional Γ , ERDÉSZ <i>et al.</i> (1986).....	33
Figura 2.5-9	Queda de pressão no leito e desvio padrão em função de velocidade de vibrofluidização; $A=0,009m$; $f=7,43$ Hz.....	35
Figura 2.6-1	Secador vibrado com leito horizontal.....	38

Figura 2.6-2	Secador vertical em espiral, SZALAY (1995).....	38
Figura 2.6-3	Secadores vibro-fluidizado verticais.....	39
Figura 2.6-4	Tipos de secadores vibro-fluidizados.....	39
Figura 2.8-1	Matrizes da análise canônica, Equação (44).....	44
Figura 2.8-2	Forma canônica para uma superfície de resposta em duas variáveis.....	45
Figura 3.2-1	Esquema do leito vibro-fluidizado.....	50
Figura 3.2-2	Placa distribuidora utilizada nos testes.....	51
Figura 3.2-3	Esquema de aquisição de dados no <i>software LabView 8</i>	52
Figura 3.2-4	Esquema do motovibrador.....	53
Figura 3.2-5	Acelerômetro piezoelétrico.....	53
Figura 3.2-6	Inversor de frequência.....	54
Figura 3.2-7	Unidade experimental.....	54
Figura 3.3-1	Esquema do leito antes de algumas modificações.....	55
Figura 3.3-2	Configurações testadas para instalação do leito. (1) soprador, (2) válvula, (3) tomada de velocidade do ar, (4) motovibrador, (5) mangueiras de conexão, (6) molas, (7) acelerômetro.....	56
Figura 3.3-3	Primeira placa distribuidora testada no leito.....	56
Figura 4.2-1	Réplicas para leito fluidizado com 10,5 Kg.....	64
Figura 4.2-2	Quatro pontos centrais do planejamento Composto Central; massa 10,5Kg, frequência 14,6Hz e amplitude 0,45mm.....	64
Figura 4.3-1	Curva característica para leito com massa de 14Kg; teste 1:15,5 Hz e 0,65mm; teste 2: 15,5Hz e 0,25mm; teste 3: 13,7Hz e 0,65 mm; teste 4: 13,7 Hz e 0,25mm.....	65
Figura 4.3-2	Curva característica para leito com massa de 7Kg de esfera; teste 5:15,5 Hz e 0,65mm; teste 6: 15,5Hz e 0,25mm; teste 7: 13,7Hz e 0,65 mm; teste 8: 13,7 Hz e 0,25mm.....	67
Figura 4.3-3	Efeito da amplitude no comportamento do leito; teste 12: 0,45mm; teste13: 0,167mm; teste14: 0,733mm.....	68
Figura 4.3-4	Efeito da frequência no comportamento do leito; teste 12: 14,6Hz; teste 15: 13,33Hz; teste16: 15,87Hz.....	69
Figura 4.3-5	Efeito da massa no comportamento do leito. teste 12: 10,5Kg; teste 17: 5,6Kg; teste 18: 15,4Kg. Amplitude de 0,45mm e frequência de 14,6Hz.....	70

Figura 4.4-1	Efeito da amplitude no leito de 10,5 Kg e 14,6 Hz de frequência. Teste 13: amplitude de 0,167mm; teste 14: amplitude de 0,733mm.....	72
Figura 4.4-2	Efeito da frequência no leito de 10,5 Kg e 0,45mm de amplitude. Teste 15: frequência 13,33Hz; teste 16: frequência de 15,87Hz.....	73
Figura 4.4-3	Efeito da massa no leito com frequência de 14,6Hz e amplitude de 0,45mm.....	74
Figura 4.5-1	Superfície de resposta para a amplitude e massa.....	76
Figura 4.5-2	Superfície de resposta para amplitude e frequência.....	77
Figura 4.5-3	Superfície de resposta para frequência e massa.....	78
Figura 4.5-4	Superfície de resposta para amplitude e massa.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1-1	Aplicações de leito fluidizado para diferentes reações químicas.....	13
Tabela 2.3-1	Classificação de Pós de Geldart.....	18
Tabela 2.5-1	Correlações para a velocidade mínima de vibro-fluidização.....	25
Tabela 2.5-2	Correlações para a perda de carga em um leito vibro-fluidizado.....	30
Tabela 2.5-3	Correlações para a porosidade em leito vibro-fluidizado.....	34
Tabela 2.7-1	Matriz do planejamento composto central.....	42
Tabela 3.3-1	Combinações de frequência e de amplitude para teste de estabilidade.....	57
Tabela 3.3-2	Planejamento composto central com quatro réplicas no centro.....	59
Tabela 4.1-1	Resultado dos testes preliminares de estabilidade.....	60
Tabela 4.1-2	Limites operacionais.....	61
Tabela 4.1-3	Planejamento composto central com quatro réplicas no centro.....	62
Tabela 4.1-4	Adimensionalização das variáveis.....	63
Tabela 4.1-5	Resumo das condições utilizadas analisados no trabalho.....	63
Tabela 4.3-1	Efeito das variáveis investigadas nas respostas de queda de pressão e velocidade do gás.....	71
Tabela 4.4-1	Parâmetros da regressão múltipla para a pressão.....	75
Tabela 4.4-2	Parâmetros da regressão múltipla para a velocidade.....	77

LISTA DE SÍMBOLOS

A	amplitude	[L]
d_i	média aritmética do diâmetro de peneira adjacente	[L]
d_p	diâmetro da partícula	[L]
$d_{\#}$	diâmetro de peneira	[L]
d_v	diâmetro volumétrico	[L]
D	diâmetro do leito	[L]
f	freqüência	$[T^{-1}]$
g	aceleração da gravidade	$[LT^{-1}]$
H	altura do leito	[L]
H_0	altura do leito estático	[L]
K	número de variáveis	[-]
m	massa	[M]
m_i	fração de massa coletada na peneira	[-]
n	níveis centrais do planejamento composto central	[-]
N	força de reação do prato	$[MLT^{-2}]$
R_a	força de arraste	$[MLT^{-2}]$
S_L	área da seção transversal	[M]
t	tempo	[T]
u	velocidade do ar	$[LT^{-1}]$
u_{mf}	velocidade mínima de fluidização	$[LT^{-1}]$
u_{mvf}	velocidade mínima de vibro-fluidização	$[LT^{-1}]$
x_i	variável codificada do planejamento	[-]
x_0	ponto estacionário	[-]
y	variável resposta do planejamento	[-]
Y	distancia da partícula da posição zero (placa)	[L]
Z	deslocamento da partícula em relação ao leito horizontal	[L]
ε	porosidade do leito	[-]
ε_v	porosidade do leito sem fração de volume	[-]

ε_{mf}	porosidade do leito na mínima fluidização	[-]
ρ	densidade do gás	$[M^1L^{-3}]$
ρ_s	densidade do sólido	$[M^1L^{-3}]$
ρ_{abs}	densidade absoluta (partícula porosa)	$[M^1L^{-3}]$
ω	freqüência angular	$[rad\ T^{-1}]$
ζ_i	variável original no nível i	
ΔP	queda de pressão	$[M^1L^{-1}T^{-2}]$
ΔP_{mf}	queda de pressão na mínima fluidização	$[M^1L^{-1}T^{-2}]$
ΔP_{mvf}	queda de pressão na mínima vibro-fluidização	$[M^1L^{-1}T^{-2}]$
Γ	adimensional de vibração	[-]
α	níveis extremos do planejamento	[-]
ν	viscosidade cinemática do gás	$[L^2T^{-1}]$
ϕ	esfericidade da partícula	[-]
LVF	Leito Vibro-Fluidizado	[-]
Re_v	Número de Reynolds vibratório	[-]

RESUMO

Aplicações da vibração mecânica com o intuito de facilitar a fluidização e aumentar as transferências de calor, massa e quantidade de movimento são processos comumente utilizados nas agroindústrias, como por exemplo, na granulação, revestimento e, sobretudo a secagem, onde se concentra o maior número de aplicações. Outras vantagens do uso da vibração sobre os leitos fluidizados convencionais são: o controle mais fácil do tempo de residência das partículas pela manipulação dos parâmetros vibracionais; diminuição da quantidade de ar para a fluidização; redução das dimensões dos equipamentos; secagem mais uniforme e eficiente de materiais aglomerantes; eliminação das zonas mortas dentro do equipamento.

O presente trabalho estudou a fluidodinâmica de um leito vibro-fluidizado horizontal construindo para isto as curvas características de queda de pressão e desvio padrão da queda de pressão em relação a velocidade do ar no leito em diferentes condições de vibração. Avaliou-se a influência de parâmetros como frequência e amplitude de vibração e a carga de material no leito.

O equipamento utilizado no trabalho foi um leito vibro-fluidizado horizontal de aço carbono formado por uma seção retangular de 0,9 m de comprimento, 0,34 m de largura e 0,77 m de altura. O leito é sustentado por um sistema de quatro molas helicoidais conectado a um suporte de 0,74 m de altura. A partícula usada no estudo foram esferas de vidro com diâmetro médio de $3,89 \times 10^{-4}$ m e densidade de $2,5 \text{ g/cm}^3$ encontrando-se no grupo B de GELDART (1973). Para o monitoramento dos valores de velocidade superficial do gás e queda de pressão no leito, utilizaram-se um termoanemômetro e dois transdutores de pressão diferencial acoplados a uma placa de aquisição de dados. Os dados foram processados e analisados num microcomputador com o auxílio do *software LabVIEW*®. De acordo com testes preliminares foi possível definir as condições de vibração na qual o leito apresentou maior estabilidade utilizando assim um intervalo de 13 a 16 Hz para a frequência de vibração e limites de 0,167 a 0,733 mm de amplitude.

Para avaliar a influência dos parâmetros operacionais escolhidos utilizou-se a técnica de planejamento composto central com quatro réplicas no centro, gerando 18 experimentos. Pela análise estatística dos dados, pôde-se observar que a massa apresentou maior significância, seguida da amplitude e que a frequência não apresentou um efeito significativo na queda de pressão. Uma interpretação visual dos resultados por meio das superfícies de resposta do planejamento apresentou efeitos não só das variáveis isoladas, mas também suas interações.

Pôde-se observar uma influência fortemente linear da massa na queda de pressão do leito para todos os níveis de amplitude, encontrando nível mais elevado para valores intermediários de amplitude. Já para a amplitude percebeu-se uma função quadrática com relação a pressão gerando valores mínimos de pressão quando utilizados valores maiores de amplitude. De forma análoga, nota-se pela superfície de resposta que, para o nível mais baixo de frequência de vibração encontraram-se os maiores valores de velocidade sendo mais acentuado para níveis intermediários de amplitude.

Seguindo esta linha de raciocínio, verificou-se o efeito da massa de partículas no leito nos diversos níveis de frequência, onde seu incremento acarretou num aumento na resposta da velocidade ao longo da superfície de resposta. Para a velocidade de mínima vibro-fluidização encontrou-se valores mais elevados para a mesma na condição de maior massa e valores intermediários de amplitude.

Palavras-chaves: Fluidodinâmica, vibro-fluidização, leito fluidizado, leito vibro-fluidizado.

ABSTRACT

Applications of the mechanical vibration with the intention of to facilitate the fluidization and to increase the transfers of heat, mass and amount of movement are processes commonly used in the agribusinesses, as for instance, in the granulation, covering and, above all the drying, where ponders the largest number of applications. Other advantages of the use of the vibration on the beds conventional fluidized are: the control easiest of the time of residence of the particles for the manipulation of the vibration parameters; decrease of the amount of air for the fluidization; reduction of the dimensions of the equipments; more uniform and efficient drying of materials agglomerates; elimination of the areas died inside from the equipment.

The present work studied the fluid dynamic behavior of horizontal vibrate-fluidized bed building for this the characteristic curves of pressure drop and standard deviation of the pressure drop in relation to velocity of the air of the bed in different vibration conditions. The influence of parameters was evaluated as frequency and width vibration and the material load in the bed.

The equipment used in the work was a horizontal vibrate-fluidized bed of steel carbon formed by a rectangular section of 0,9 meter of length, 0,34 meter of width and 0,77 meter of height. The bed is sustained by a system of four springs connected to support of 0,74 meter of height. The particle used in the study were glass spheres with medium diameter of $3,89 \times 10^{-4}$ meter and density of $2,5 \text{ g/cm}^3$ meeting in the group B of GELDART (1973). For the monitoring of the values of superficial velocity of the gas and pressure drop in the bed, an termanemometer and two transductions of differential pressure were used coupled the a plate of acquisition of data. The data were processed and analyzed in a microcomputer with the aid of the software *LabVIEW*. In agreement of preliminary tests was possible to define the vibration conditions in which the bed presented larger stability using like this an interval from 13 to 16 Hz for the vibration frequency and limits from 0,167 to 0,733 width millimeters.

To evaluate the influence of the chosen operational parameters the technique of central planning it was used with four replicas in the center, generating 18 experiments. For the statistical analysis of the data, it could be observed that the mass presented larger significance, following by the width and that the frequency didn't present a significant effect in the pressure drop. A visual interpretation of the results through the surfaces of answer of the planning presented effects not only of the isolated variables, but also their interactions.

An influence could be observed strongly lineal of the mass in the pressure drop of the bed for all of the width levels, finding higher level for intermediate values of width. Already for the width it was noticed a quadratic function regarding pressure generating minimum values of pressure when used maximum values of width. In a similar way, it is noticed by the answer surface that, for the lowest level of vibration frequency they were the largest values of velocity being more accentuated for intermediate levels of width.

The effect mass was verified in the several frequency levels, where the increment carted in an increase in the answer of the velocity along the answer surface. For the minimum vibrate-fluidization velocity found the higher values for the same in the condition of larger mass and intermediate values of width.

Keywords: fluid dynamic, vibrate-fluidization, fluidized bed, vibrated-fluidized bed.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A secagem durante muitos séculos, foi realizada com métodos totalmente sem técnica, (KEEY, 1972). Durante a Revolução Industrial na França foi descrita uma das primeiras técnicas de secagem de papel em folhas em uma sala com circulação de ar. Um século depois, outra técnica foi descrita em Londres na “Grande Exibição”, também para a secagem de papel em cilindros aquecidos. Leite em pó e vegetais também eram secos por de um pequeno aquecimento. Fornos simples eram usados para a secagem de amido e porções de sal.

A partir daí uma série de novas técnicas de secagem foram surgindo, devido à crescente necessidade de métodos mais eficientes e rápidos. Apesar desta evolução na arte da secagem, métodos complexos de secagem começaram a ser propostos apenas no fim do século XIX, como, por exemplo, patentes de secador à radiação térmica e secador a vácuo. Estas inovações foram gradualmente sendo proliferadas e incorporadas pela indústria.

Atualmente, a secagem de material sólido particulado pode ser efetuada industrialmente numa grande variedade de equipamentos, caracterizada por condições operacionais distintas, como em leitos fixo, deslizante ou fluidizado, em cascata ou em transporte pneumáticos. A escolha da técnica de secagem específica para a tarefa desejada depende de fatores como aqueles associados às características do próprio sistema particulado e às propriedades e produções requeridas para o produto final, BROOKER *et al.* (1974), STRUMILLO; KUDRA (1986) (Apud TOPICOS ESPECIAIS EM SECAGEM, 1992).

A utilização de leito fluidizado apresenta algumas restrições quanto a utilização de partículas muito finas que tendem a aglomerar, devido a forças coesivas relacionadas a áreas específicas muito grandes, apresentando um efeito negativo sobre o contato entre sólido-fluido e a produtividade do processo em geral.

O surgimento da necessidade de secagem de materiais como os citados anteriormente (coesivos, adesivos e pastosos) trouxeram o aperfeiçoamento do processo de secagem utilizando uma vibração mecânica no leito fluidizado diminuindo as forças interpartículas, diminuindo a formação de aglomerados ou tornando-os móveis. A eficiência da vibração na fluidização é fortemente dependente das propriedades das partículas usadas (grupo de GELDART, distribuição de tamanho e formato) e dos parâmetros de vibração (frequência e amplitude) aplicado.

Grande parte da literatura disponível, relativa a pesquisas em leitos vibro-fluidizados, encontrava-se em língua não inglesa e geralmente pouco acessível. Extensas revisões da literatura sobre leitos vibro-fluidizados são apresentados por GUPTA; MUJUMDAR (1980 a e b) e STRUMILLO; PAKOWSKI (1980).

A avaliação e o uso da vibração mecânica no comportamento dinâmico de materiais granulares é um tema de grande interesse na engenharia de processos, destacando-se não somente a secagem, mas também: a aglomeração de partículas, a carga e descarga de silos, classificação com peneiras vibratórias, fluidização, granulação, revestimento, etc.

As vantagens do uso da vibração sobre os leitos fluidizados convencionais na secagem segundo GUPTA; MUJUMDAR (1983) são:

- o controle mais fácil do tempo de residência das partículas pela manipulação dos parâmetros vibracionais;
- diminuição da quantidade de ar para a fluidização (cerca de 20 a 40% da vazão na condição de mínima fluidização em um leito fluidizado convencional);
- redução das dimensões dos equipamentos; secagem mais uniforme e eficiente de materiais aglomerantes;
- eliminação das zonas mortas dentro do equipamento.

Devido a essas vantagens grandes empresas de nossa região vêm empregando esta técnica como, por exemplo, a *Cargill* na secagem de ácido cítrico de densidade de $1,665\text{kg/m}^3$ (http://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%81cido_c%C3%ADtrico, 22/07/2007). Outra empresa que também utiliza leito vibro-fluidizado é a *Sousa Cruz* na secagem do fumo.

A aplicação da vibro-fluidização à secagem e resfriamento de fertilizantes vem sendo empregada em nossa região (Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba) por grandes empresas como *Bunge* (Araxá) e *Fosfertil* (Uberaba) merecendo destaque devido ao crescente aumento da demanda nacional de fertilizantes granulados nos últimos anos, tornando Minas Gerais um dos maiores pólos de produção de fertilizantes fosfatados da América Latina.

O sistema de secagem e resfriamento de fertilizantes na unidade da *Bunge* em Uberaba consiste em um leito fluidizado vibratório contínuo com capacidade máxima de 56,4 ton/h. A umidade do fertilizante à entrada é de 14% e granulometria entre 0,32 mm e 2,0 mm. A descarga de material é de até 50 ton/h com umidade máxima de 3,0 % e temperatura máxima de 45°C. A frequência de vibração pode ser ajustada entre 550 e 650 ciclos/min. E a amplitude máxima de vibração é de 3mm. A pressão requerida no leito varia de 1667 a 2451 Pa. A altura de material no leito é variável podendo chegar até 350 mm.

O estudo da fluidodinâmica de leitos vibro-fluidizados em escala laboratorial auxiliará na otimização do processo global de secagem. Usualmente, nas operações industriais, as condições de secagem são estabelecidas pelo ajuste da temperatura da fornalha. Ensaio em uma unidade protótipo permitirão manipular as condições fluidodinâmicas do leito vibro-fluidizado, avaliando diversas condições de interação sólido-gás, tanto por meio da intensidade vibracional quanto da velocidade do gás de secagem.

Portanto, considerando a importância da atividade industrial em nossa região, que vem utilizando a tecnologia de leitos vibro-fluidizados, e a necessidade de melhorias e otimização do processo, este trabalho terá como objetivo estudar a fluidodinâmica de um leito vibro-fluidizado horizontal. Para tanto, serão avaliados o efeito da amplitude e frequência de vibração e da carga de partículas sobre o comportamento dinâmico de partículas inertes, utilizando técnica de planejamento composto central para racionalizar o número de experimentos e quantificar os efeitos das variáveis citadas e suas interações lineares na fluidodinâmica do leito.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Antes de iniciar o estudo de leitos vibro-fluidizados torna-se necessário apresentar alguns conceitos importantes como a fluidização, a classificação das partículas estudadas na fluidização, os tipos de mecanismos de vibração e os tipos de leito vibro-fluidizados. Durante os estudos de leitos vibro-fluidizados definiu-se alguns conceitos importantes como o adimensional de vibração, que quantifica a vibração imposta ao equipamento, e maneiras de qualificar a vibro-fluidização: sua curva característica, o valor de queda de pressão do leito e a velocidade mínima de vibro-fluidização. Torna-se importante também apresentar a técnica do planejamento de experimentos usada neste trabalho para avaliar o efeito das condições operacionais na fluidodinâmica do leito.

2.1 Fluidização

Segundo KUNII; LEVENSPIEL (1991), fluidização é uma operação na qual partículas sólidas são levadas ao estado “quase líquido” por meio da passagem de um gás ou líquido por elas, conforme mostrado na Figura 2.1-1.

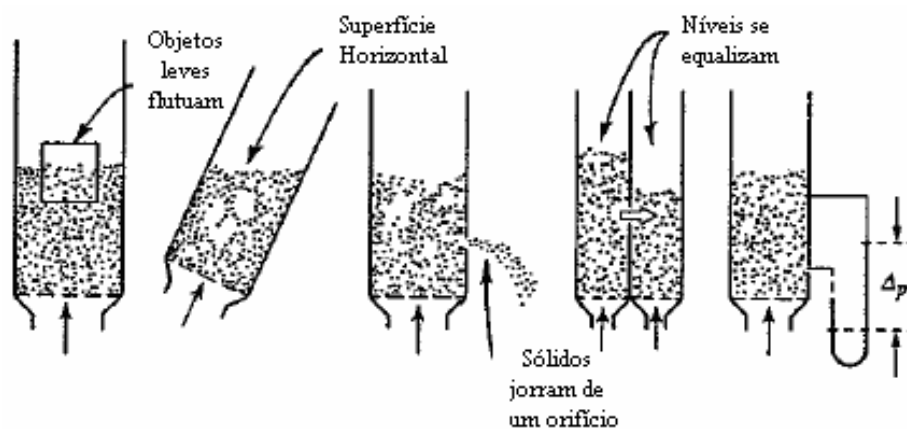


Figura 2.1-1: Comportamento “quase líquido” das partículas em leito fluidizado, KUNII; LEVENSPIEL (1991).

Quando um fluxo baixo de ar passa através de um leito com partículas, ocorre apenas um preenchimento pelo fluido nos espaços vazios do leito que permanece estático - *leito fixo*, conforme mostrado na Figura 2.1-2(a). Quando um pequeno aumento do fluxo de ar movimenta apenas algumas partículas que vibram em regiões restritas tem-se o *leito expandido*.

Com um crescente aumento no fluxo de ar, todas as partículas são suspensas em um estado similar a de um fluido, tendo um comportamento semelhante ao de um líquido ebuliente. Neste ponto a força de atrito entre as partículas e o fluido contrabalança o peso das partículas, o componente vertical da força de compressão entre partículas adjacentes desaparece e a queda de pressão através de uma seção do leito se iguala ao peso do fluido e das partículas nesta seção. Neste estado, o leito é considerado como fluidizado e é referido como um *leito fluidizado incipiente* ou um leito à *mínima fluidização*, Figura 2.1-2(b).

Em sistemas líquido-sólidos, um aumento no fluxo acima da mínima fluidização, usualmente resulta em uma fluidização suave, com uma progressiva expansão do leito, tal comportamento é chamado de *fluidização suave*, *leito particularmente fluidizado* ou *leito fluidizado homogêneo*, Figura 2.1-2(c).

Sistemas gás-sólidos comportam-se diferentemente, com um aumento do fluxo além da mínima de fluidização, são observadas grandes instabilidades com borbulhamento e canais preferenciais do gás, caracterizando o estado de *leito fluidizado agregado*, *leito fluidizado heterogêneo* ou *leito fluidizado borbulhante*, Figura 2.1-2(d).

Com o aumento do fluxo, as bolhas de gás crescem à medida que sobem pelo leito, e em leitos delgados de diâmetro pequeno elas podem se tornar grandes o suficiente para se espalhar por todo o leito. No caso de partículas finas, as bolhas fluem suavemente, resultando em um regime denominado *pistonado com bolhas axiais*, Figura 2.1-2(e). Para partículas maiores, uma porção do leito é movimentada para cima como o movimento de um pistão, denominado de *regime pistonado com bolhas planas* Figura 2.1-2(f).

Quando partículas finas são fluidizadas a uma velocidade suficiente do gás, a velocidade terminal dos sólidos é atingida e um *regime de fluidização turbulenta* é atingido, conforme mostrado na Figura 2.1-2(g). Com um aumento ainda maior do fluxo

de gás, sólidos são transportados para fora do leito, representando a *fase dispersa, diluída ou delgada com transporte pneumático de sólidos*, Figura 2.1-2(h).

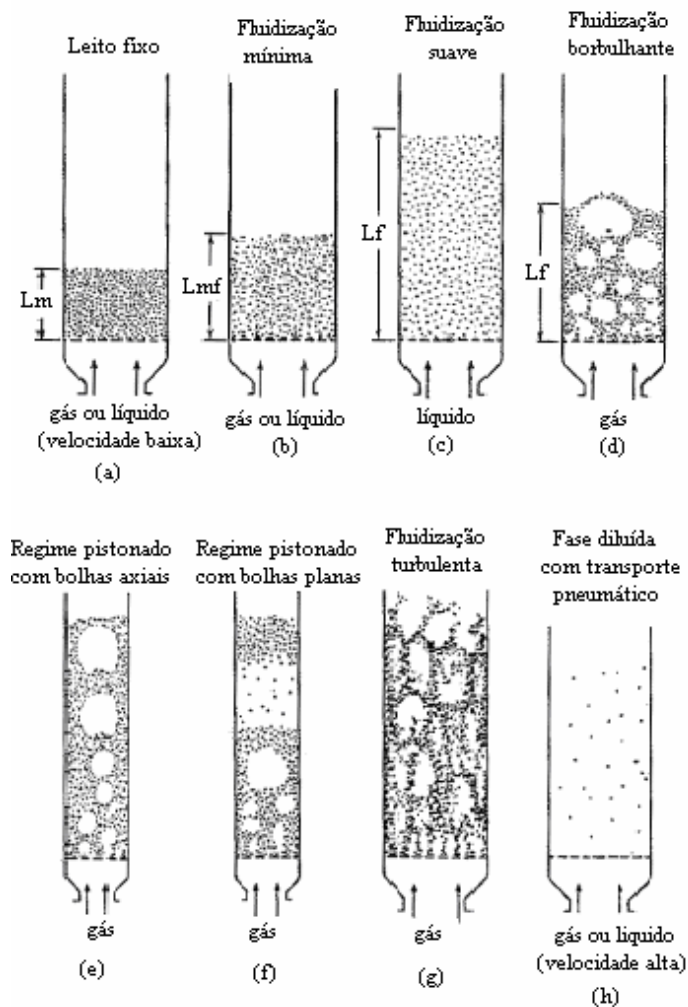


Figura 2.1-2: Varias formas de contato sólido-fluido, KUNII; LEVENSPIEL (1991).

A facilidade com que as partículas fluidizam e a gama de condições operacionais que sustenta a fluidização variam entre sistemas gás-sólidos e numerosos fatores afetam o modo de contato. Primeiro é o tamanho e a distribuição de tamanho das partículas. Em geral, partículas finas, úmidas ou pastosas tendem a aglomerar, assim o leito pode ser agitado para manter a condição satisfatória de fluidização. Isto pode ser feito utilizando agitadores mecânicos ou operando a velocidades de gás relativamente altas e usando a energia cinética de entrada do gás para agitar os sólidos. Partículas finas com ampla distribuição de tamanho podem ser fluidizadas em uma extensa faixa de fluxo de gás, permitindo operações flexíveis com leitos fundos e grandes, KUNII; LEVENSPIEL (1991).

Ao contrário, leitos de grande uniformidade de tamanho de sólidos, frequentemente fluidizam mal, com trepidações e formação de jorros e *sluggings*, os quais podem causar sérios danos estruturais em leitos grandes. A qualidade de fluidização destes leitos pode ser freqüentemente melhorada somando uma quantia pequena de finos para agir como lubrificante, KUNII; LEVENSPIEL (1991).

Um segundo fator é a razão de densidade fluido-sólido. Normalmente, sistemas líquido-sólido fluidizam homoganeamente e sistemas gás-sólidos exibem heterogeneidade. Porém pode-se ter divergências da norma com partículas de baixa densidade em gás denso ou partículas de alta densidade em líquido de baixa densidade.

Vários outros fatores podem afetar a qualidade de fluidização tais como geometria do leito, arranjo da entrada do gás (placa distribuidora), tipo de sólido usado, e se os sólidos são livre-correntes ou sujeito à aglomeração.

2.1.1 Fluidodinâmica de leito fluidizado

Para o estudo e caracterização de um determinado tipo de leito, seja ele fixo, fluidizado, jorrado, pneumático, vibrado ou vibro-fluidizado é necessário ter preliminarmente a sua curva característica conforme mostrado na Figura 2.1-3. Esta curva trata da variação da queda de pressão no leito em relação à velocidade ou vazão com que o fluido percola o leito.

As principais características da fluidodinâmica (ou aerodinâmica) do leito fluidizado são: velocidade mínima de fluidização u_{mf} , a queda de pressão na velocidade mínima de fluidização Δp_{mf} , e a porosidade média do leito, ϵ_{mf} .

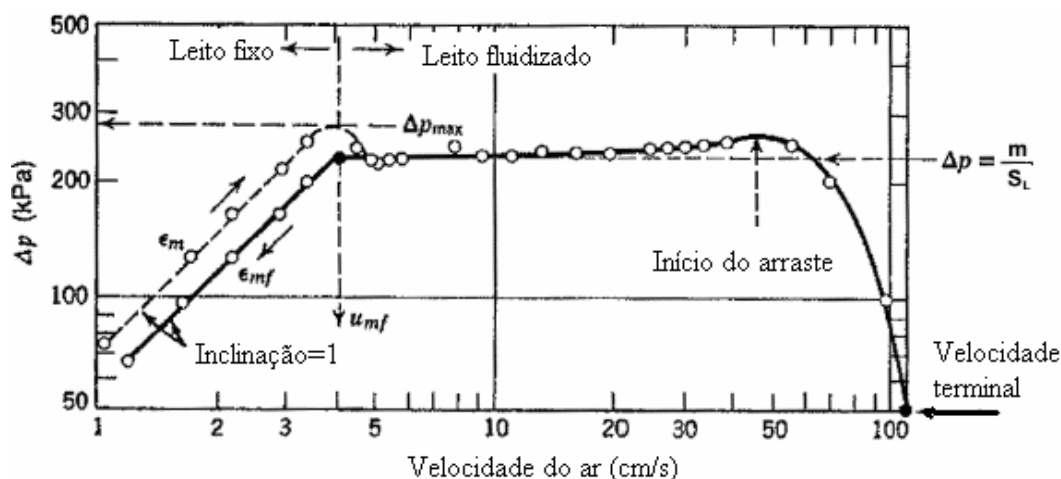


Figura 2.1-3 Perda de carga versus velocidade do ar, KUNII; LEVENSPIEL (1991).

A porosidade de um leito pode ser encontrada experimentalmente ou pode ser descrita da seguinte maneira, Equação (1):

$$\varepsilon = \frac{\text{volume de poros abertos e cavidades}}{\text{volume total do material}} = 1 - \frac{\rho_{\text{aparente}}}{\rho_{\text{real}}} \quad (1)$$

A velocidade mínima de fluidização (u_{mf}) é um importante parâmetro na caracterização do sistema, e vários autores têm proposto correlações generalizadas para prever o seu valor.

Apesar do elevado número de equações disponíveis na literatura a correlação de ERGUN (1952) é a mais utilizada.

Para leito fixo a equação de ERGUN (1952) é dada por:

$$\frac{\Delta P}{H} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu u_0}{(\phi_s d_p)^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho u_0^2}{\phi_s d_p} \quad (2)$$

Com o aumento do fluxo de gás no leito de partículas o estado de fluidização é alcançado, ou seja, o peso aparente do sólido se iguala à força de arraste obtendo a Equação (3):

$$\frac{\Delta P}{H} = (1-\varepsilon)(\rho_s - \rho)g \quad (3)$$

A queda de pressão da Equação (2) é igual a (3) no estado de mínima fluidização e, a equação abaixo é obtida.

$$150 \frac{(1-\varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\mu u_{mf}}{\phi_s^2 d_p^2} + 1,75 \frac{1-\varepsilon_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\rho u_{mf}^2}{\phi_s d_p} = (1-\varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho)g$$

ou

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \text{Re}_{p,mf}^2 + \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \text{Re}_{p,mf} = \text{Ar} \quad (4)$$

$$\text{Ar} = \frac{d_p^3 \rho (\rho_s - \rho) g}{\mu^2} \quad (5)$$

$$\text{Re}_{p,mf} = \frac{u_{mf} \rho d_p}{\mu} \quad (6)$$

Em que $Re_{p,mf}$ é o número de Reynolds da partícula na mínima fluidização, e Ar é o número de Arquimedes.

No caso em que as partículas são muito pequenas, a Equação (4) é simplificada para (KUNII; LEVENSPIEL, 1991):

$$u_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho) g \epsilon_{mf}^3 \phi_s^2}{150 \mu (1 - \epsilon_{mf})}, \quad Re_{p,mf} < 20 \quad (7)$$

Para partículas grandes,

$$u_{mf}^2 = \frac{d_p (\rho_s - \rho) g}{1,75 \rho} \epsilon_{mf}^3 \phi_s, \quad Re_{p,mf} > 1000 \quad (8)$$

Outras correlações freqüentemente utilizadas são as Equações (9) e (10) propostas por WEN; YU (1966) mostradas a seguir:

$$u_{mf} = \left[\left((33,7)^2 + 0,0408 Ar \right)^{1/2} - 33,7 \right] \rho d_p \quad \text{para partículas finas, } Re_{mf} < 20, \text{ e} \quad (9)$$

$$u_{mf} = \left[\left[(28,7)^2 + 0,0494 Ar \right]^{1/2} - 28,7 \right] d_p \rho \quad \text{para partículas grossas, } Re_{mf} > 1000. \quad (10)$$

Normalmente, a u_{mf} pode ser determinada experimentalmente pela interseção de duas retas traçadas tangencialmente à curva característica do gráfico de queda de pressão em relação a velocidade superficial do ar, na região de leito fixo e na queda de pressão constante onde a condição de mínima fluidização já foi ultrapassada, conforme mostrado na Figura 2.1-4. Este ponto freqüentemente é obtido na curva de velocidade decrescente do gás, pois o estado fluidizado provê uma condição inicial de reprodutibilidade do leito, e a fração de vazio do leito, ϵ , tem seu valor máximo.

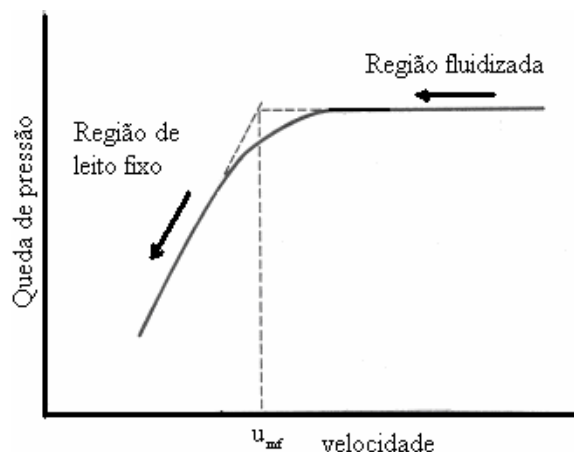


Figura 2.1-4: Gráfico esquemático para obtenção da velocidade de mínima fluidização

2.1.2 Aplicações de leitos fluidizados

Os leitos fluidizados são empregados em processos físicos onde os benefícios relativos às elevadas taxas de transferência de calor e massa são explorados. Os leitos fluidizados gás-partícula também apresentam importantes aplicações na indústria química por proporcionarem um bom efeito de mistura entre as fases e altas taxas de transferência de calor e massa requerendo para isso baixo consumo de energia.

Processos Físicos

Processos físicos que usam leitos fluidizados incluem secagem, mistura, granulação, recobrimento, aquecimento e resfriamento. Todos estes processos tiram proveito da excelente capacidade de mistura fluido-partícula. A boa mistura de sólidos conduz a uma alta transferência de calor, uniformidade de temperatura e facilidade de controle do processo. Uma das aplicações mais importantes do leito fluidizado é na secagem de sólidos. Leitos fluidizados atualmente são usados comercialmente para secar materiais como minerais esmagados, areia, polímeros, produtos farmacêuticos, fertilizantes e produtos cristalinos. As razões para a popularidade da secagem em leito fluidizado são (RHODES, 1998):

- ✓ Os secadores são compactos, de construção simples e de custo relativamente baixo.

- ✓ A ausência de partes móveis, a exceção dos dispositivos de alimentação e de descarga, conduz a operação segura e de baixa manutenção.
- ✓ A eficiência térmica desses secadores é relativamente alta.

Algumas desvantagens na aplicação de leitos fluidizados são:

- ✓ Partículas muito finas tendem a aglomerar devido a forças coesivas relacionadas a áreas específicas muito grandes; estas partículas normalmente não fluidizam bem a fluxos de gás nas quais a taxa de elutriação excessiva pode ser minimizada.
- ✓ Limitação no grau de uniformidade do conteúdo de umidade do produto.
- ✓ Considerável expansão na distribuição de tempo de residência do sólido devido ao “backmixing” de partículas sólidas.
- ✓ Formação de aglomerados na fluidização de partículas finas e úmidas.
- ✓ Dificuldade de fluidizar materiais coesivos, abrasivos ou pastosos.

Leitos fluidizados são usados freqüentemente para resfriar sólidos particulados após uma reação. O resfriamento pode ser por meio de ar fluidizante ou pelo uso de água de refrigeração passando através de tubos imersos no leito, conforme mostrado na Figura 2.1-5.

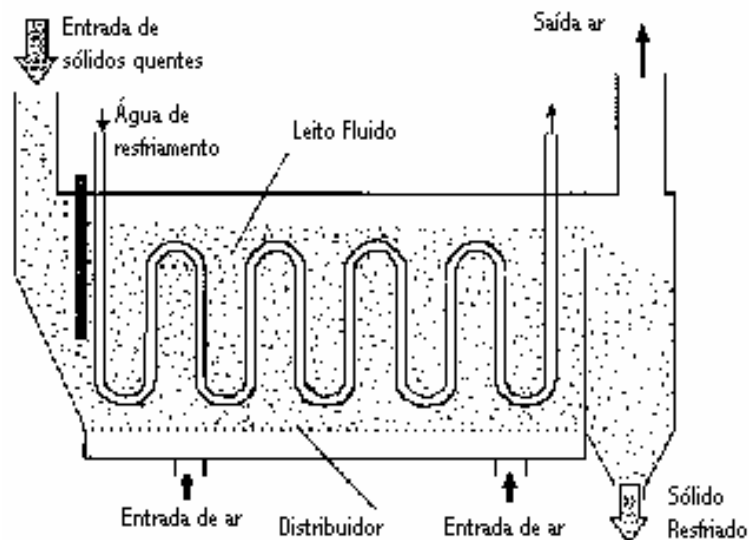


Figura 2.1-5: Um leito fluidizado como refrigerador de sólidos, (adaptado de RHODES (1998)).

Leitos fluidizados também são usados para recobrir partículas nas indústrias farmacêutica e agrícola.

Processos Químicos

O leito fluidizado de gás é um bom meio para processar reações químicas envolvendo um gás e um sólido. As vantagens do leito fluidizado para reação química incluem (RHODES, 1998):

- ✓ O bom contato gás-sólido.
- ✓ A excelente circulação de sólidos no leito promove uma boa transferência de calor entre as partículas do leito e o gás fluidizante e entre o leito e as superfícies de transferência de calor submersas nele.
- ✓ Aproximação do leito às condições isotérmicas quando as reações são fortemente exotérmicas ou endotérmicas.
- ✓ A boa transferência de calor também facilita o controle da reação.
- ✓ A fluência do leito torna fácil a remoção de sólidos do reator.

A Figura 2.1-6 é um diagrama esquemático de uma unidade de quebra catalítica de um fluido (FCC - *fluid catalytic cracking*) - um exemplo célebre da tecnologia do leito fluidizado – para quebra de moléculas grandes de óleo cru em moléculas pequenas satisfatórias para gasolina.

Outros exemplos de aplicação da tecnologia do leito fluidizado para tipos diferentes de reação química são mostrados na Tabela 2.1-1.

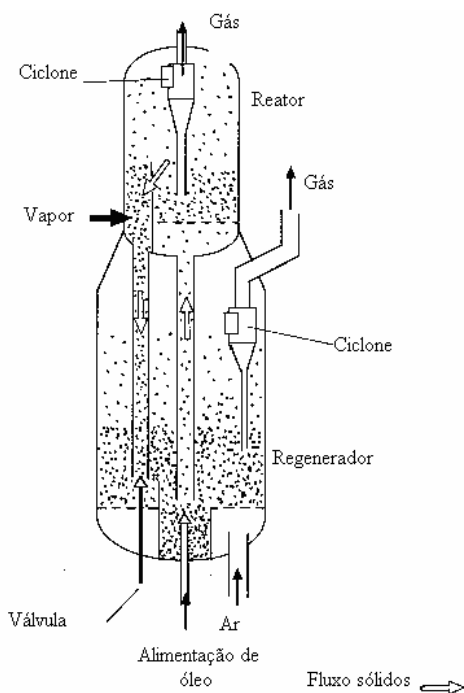


Figura 2.1-6: Modelo de Kellogg - unidade FCC Orthoflow, (adaptado de RHODES (1998)).

Tabela 2.1-1: Aplicações de leito fluidizado para diferentes reações químicas.

Tipo	Exemplo	Razões para usar leito fluidizado
Reações gás-fase homogênea	Hidrogenação do etileno	Rápido aquecimento do gás de entrada. Temperatura uniforme controlável.
Reações heterogêneas não-catalítica	Queima do minério de sulfeto, Combustão	Fácil manuseio de sólidos. Uniformidade de temperatura e boa transferência de calor
Reações heterogêneas catalíticas	Quebra dos Hidrocarbonetos, Anidrido ftálico Acrilonitrila	

2.1.3 Característica das partículas

A facilidade de se fluidizar materiais granulados é um fator decisivo no projeto de um secador de leito fluidizado. Materiais granulados nos quais as forças coesivas entre as partículas, devido ao efeito de superfície, tornam a aeração e/ou fluidização impossível recebe o nome de materiais não-fluidizáveis. A medida do ângulo de repouso pode dar uma indicação na capacidade de fluidização do material; porém isto não é uma medida segura, particularmente para materiais pegajosos, HOVMAND (1987).

Segundo HOVMAND (1987), para se obter uma fluidização em secadores de leito fluidizado os materiais empregados devem satisfazer a alguns critérios como:

- ✓ O tamanho médio das partículas deve estar entre 20 μ m e 10mm para evitar excessivos canais preferenciais e borbulhamento.
- ✓ A distribuição de tamanho de partícula deve ser razoavelmente estreita, assim uma taxa de gás de fluidização pode ser selecionada para obter uma fluidização efetiva sem excessivo arraste de partículas finas.

- ✓ As partículas devem apresentar um formato razoavelmente regular, em particular quando a faixa de tamanho das partículas for grande, ou fibras que não fluidizam corretamente.
- ✓ A partícula deve ter dureza suficiente para resistir a abrasão que acontece entre as partículas fluidizadas, já que elas são vigorosamente misturadas pelas bolhas de gás ascendentes.
- ✓ O produto final deve apresentar umidade baixa o suficiente para evitar a aglomeração e a desfluidização do leito.

Um secador de leito vibro-fluidizado pode ser aplicado para superar os quatro primeiros problemas mencionados acima, já o último pode ser prontamente minimizado.

2.2 Propriedades relevantes das partículas

A densidade mais usual para uso nas equações de fluidização é a densidade aparente da partícula, Equação (11), definida como a massa de uma partícula dividida por seu volume hidrodinâmico. Este é o volume "visto" pelo fluido em sua interação fluidodinâmica com a partícula e inclui o volume de todos os poros abertos e fechados, conforme mostrado na Figura 2.2-1, (RHODES, 1998):

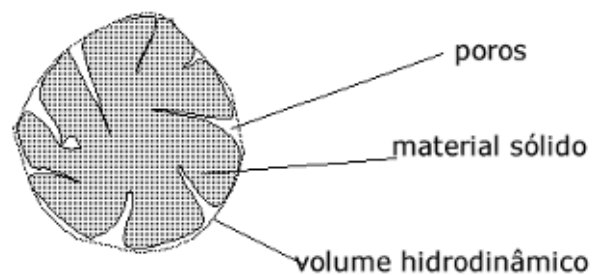


Figura 2.2-1 Volume hidrodinâmico de uma partícula

$$\text{Densidade aparente da partícula} = \frac{\text{Massa da partícula}}{\text{Volume hidrodinâmico da partícula}} \quad (11)$$

Para sólidos não porosos, ela é facilmente medida por um picnômetro de gás ou aparelho de massa específica, mas estes dispositivos não devem ser usados para sólidos porosos já que eles dão a densidade verdadeira ou absoluta, ρ_{abs} , do material do qual a partícula é composta, Equação (12), e isto não é apropriado quando envolve a interação com fluxo de fluido.

$$\text{Densidade absoluta} = \frac{\text{Massa da partícula}}{\text{Volume do material sólido que compõe a partícula}} \quad (12)$$

Para partículas porosas, a densidade da partícula ρ_s (também chamada aparente) é de difícil medida embora vários métodos sejam apresentados em GELDART (1990).

Outra densidade usada é a densidade global ou *bulk*, Equação (13), definida de modo semelhante à densidade do leito fluido (porosidade):

$$\text{Densidade bulk} = \frac{\text{Massa das partículas}}{\text{Volume ocupado pelas partículas e o vazio entre elas}} \quad (13)$$

O diâmetro de partícula mais apropriado para usar em equações relativas a interações de fluido-partícula é o **diâmetro hidrodinâmico**; isto é, o diâmetro da esfera equivalente derivada de uma técnica de medida que envolve a interação hidrodinâmica entre a partícula e o fluido. Na prática, porém, na maioria das aplicações industriais a medição do tamanho é feita por peneiramento e as correlações usam tanto o diâmetro de peneira, ($d_{\#}$) como o diâmetro volumétrico (d_v). Para partículas esféricas ou aproximadamente esféricas d_v é igual a $d_{\#}$. Para partículas angulares $d_v \approx 1,13 d_{\#}$.

Para uso em fluidização, a partir de uma análise de peneira o tamanho médio de Sauter é calculado freqüentemente pela Equação (14) a seguir:

$$\text{Média } \bar{d}_p = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{m_i}{d_i} \right)} \quad (14)$$

Em que d_i é a média aritmética de peneiras adjacentes entre as quais uma fração de massa m_i é coletada.

2.3 Classificação das partículas

Segundo o estudo de GELDART *et al.* (1984), pequenas mudanças no tamanho da partícula e em outros parâmetros que possam afetar as forças interpartículas podem transformar um pó fino de escoamento livre em pó coesivo. Partículas finas são difíceis de fluidizar devido às suas propriedades coesivas. O termo “partícula fina” é um pouco vago, e por este motivo GELDART (1973) classificou as partículas em quatro grupos de acordo com seu comportamento de fluidização e caracterizado pela diferença de densidade ($\rho_s - \rho$) e pelo diâmetro médio da partícula ($\bar{d}_p$).

A Figura 2.3-1 mostra a classificação de GELDART (1973) para a fluidização com ar nas condições ambiente e para u_o menor que $10 u_{mf}$. Para qualquer sólido de densidade conhecida ambiente (ρ_s) e diâmetro médio da partícula ($\bar{d}_p$), este gráfico mostra o tipo de fluidização esperada (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Observando cuidadosamente a fluidização de todos os tipos e tamanhos de sólidos, Geldart propôs claramente quatro tipos reconhecíveis de comportamento de partículas, como segue:

Grupo A: partículas muito finas, sensíveis a forças externas, com diferenças apreciáveis entre a velocidade mínima de borbulhamento e a mínima de fluidização. Quando estes sólidos são fluidizados o leito expande consideravelmente antes das bolhas aparecerem.

Grupo C: partículas de baixa densidade, finas e coesivas com fortes forças interpartículas; extremamente difíceis de fluidizar, com formação de canais preferenciais e sem a formação de bolhas. Proporcionam baixa expansão do leito e pobre mistura dos sólidos;

Grupo B: partículas de tamanho intermediário, formação de bolhas à velocidade incipiente de fluidização. Apresentam mistura de partícula moderada; Estes sólidos fluidizam bem com ação borbulhante vigorosa e bolhas grandes.

Grupo D: partículas irregulares e fluidizáveis, de alta densidade, requerem alta velocidade para fluidizar e proporcionam baixa expansão do leito e baixa mistura dos sólidos. Partículas mais utilizadas em leito de jorro.

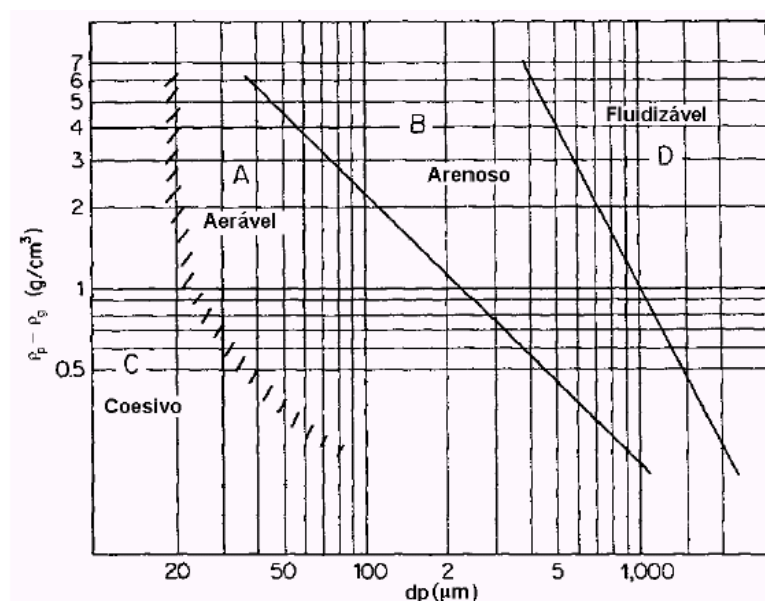


Figura 2.3-1 Classificação das partículas segundo Geldart (1973).

As propriedades de fluidização de um pó em ar podem ser preditas, estabelecendo em qual grupo ele está situado. É importante notar que à temperatura operacional e pressões acima da ambiente um pó pode aparecer em um grupo diferente do que ocupa em condições ambientes. Isto é devido ao efeito das propriedades do gás no agrupamento e pode ter implicações sérias até onde a operação do leito fluidizado tem interesse. A Tabela 2.3-1 apresenta um resumo das propriedades típicas das diferentes classes de partículas.

Tabela 2.3-1 Classificação de Partículas de Geldart.

Grupo →	Grupo C	Grupo A	Grupo B	Grupo D
Característica mais relevante	Coesivo; de fluidização difícil.	Ideal para fluidização — Exibe uma faixa de fluidização não-borbulhante	Inicia o borbulhamento a u_{mf}	Sólidos grossos
Sólidos típicos	Farinha de trigo Cimento	<i>Cracking</i> catalítico	Areia de construção	Cascalho Grão de café
Expansão do leito	Baixa devido a canalização	Alta	Moderada	Baixa
Taxa de aeração	Inicialmente rápida em seguida exponencial.	Lenta, linear	Rápida	Rápida
Propriedades das bolhas	Sem bolhas – só canalização	As bolhas quebram e coalecem; tamanho de bolha máximo	Sem limites de tamanho	Sem limites de tamanho
Mistura de sólidos	Muito baixo	Alto	Moderado	Baixo
Gás “backmixing”	Muito baixo	Alto	Moderado	Baixo
Jorro	Não	Não	Somente na superfície	Sim, mesmo em leitos profundos

2.4 Vibração

O uso e a avaliação da influência da vibração mecânica no comportamento dinâmico de materiais granulados é tema de amplo interesse na engenharia de processos, destacando-se: aglomeração de partículas, classificação com peneiras vibratórias, fluidização, granulação, revestimento, e, sobretudo a secagem onde se concentra o maior número de aplicações (FINZER; KIECKBUSCH 1992).

2.4.1 Dinâmica do leito

Um movimento oscilatório pode repetir-se regularmente como o pêndulo de um relógio ou se comportar irregularmente como nos terremotos. Se o movimento oscilatório repete-se a intervalos de tempos iguais, ele é denominado movimento periódico. O tempo de repetição τ é denominado período da oscilação e seu recíproco, $f=1/\tau$, é a frequência (FINZER; KIECKBUSCH 1992).

A Figura 2.4-1 esquematiza a oscilação de um pequeno corpo suspenso em uma mola. Supõe-se que não existe amortecimento do movimento pelo atrito da mola com o meio externo ou pelas forças internas da mola. Fixando-se ao corpo uma fonte luminosa, o seu movimento pode ser registrado num filme, sensível a luz, que se move com velocidade constante a sua frente.

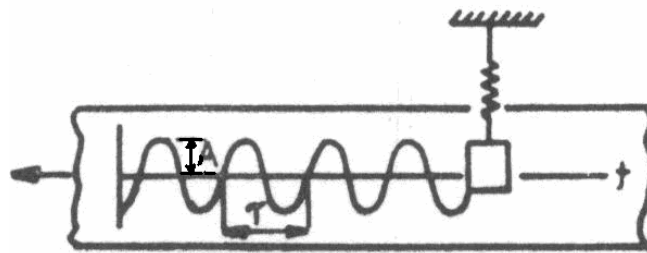


Figura 2.4-1 Registro de um movimento periódico, THOMSON (1972).

O movimento registrado no filme mostrado na Figura 2.4-1 é expresso pela Equação (15),

$$Y = A \sin 2\pi \frac{t}{\tau} \quad (15)$$

Em que: Y é a distância da posição zero, A é a amplitude da oscilação, medida a partir da posição de equilíbrio do corpo. O movimento é repetido quando $t = \tau$, a cada 2π radianos e a frequência angular ω , é expressa pela Equação (16):

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau} \quad (16)$$

Será discutido o caso mais simples de um leito que será representado por uma única partícula que movimenta em um prato horizontal vibrando com movimento oscilatório na direção vertical. A equação de movimento do prato é expressa pela Equação (15) (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

A equação do movimento da partícula em relação a uma coordenada fixa do sistema pode ser expressa pela Equação (17):

$$-m \left(\frac{d^2 Z}{dt^2} + \frac{d^2 Y}{dt^2} \right) - mg + R_a + N = 0 \quad (17)$$

Z é o deslocamento da partícula em relação ao leito horizontal, mg é a força da gravidade, R_a é a força de arraste do gás e N é a força de reação do prato. Considerando que a partícula no momento de separação não está em contato com o suporte do prato a força de reação do prato desaparece ($N=0$). Considerando apenas a aceleração na direção vertical temos que:

$$\frac{d^2 Z}{dt^2} = 0 \quad (18)$$

A aceleração da vibração para a separação da partícula (negligenciando a interação do gás) será:

$$\frac{d^2 Y}{dt^2} = |g| \quad (19)$$

O menor valor do produto $A\omega^2$ que causará a separação do leito é igual a $A\omega^2 = g$. Como um importante parâmetro pode-se usar a definição de intensidade de vibração.

Genericamente as vibrações são classificadas em duas classes: a livre e a forçada. A vibração livre acontece quando o sistema oscila sob a ação de forças que lhe

são inerentes (na ausência de forças externas), como as oscilações que ocorrem quando um corpo suspenso em uma mola é deslocado da posição de equilíbrio e a seguir solto. Um corpo sob vibração livre irá vibrar em uma ou mais de suas frequências naturais. A vibração que ocorre sob excitação de forças externas é chamada de vibração forçada. Quando a excitação externa é oscilatória, o sistema é forçado a vibrar na frequência da oscilação imposta. Entretanto a resposta do corpo depende da relação entre a frequência externa e a natural. Se a frequência de excitação coincidir com uma das frequências naturais do sistema, é atingida uma condição de ressonância. Nesta condição o sistema vibra com uma amplitude máxima, pois ocorre a absorção máxima de energia do sistema excitador, THOMSON 1972 (Apud TOPICOS ESPECIAIS EM SECAGEM, 1992).

2.4.2 Tipos de vibradores

A movimentação das partículas por vibração é promovida por dispositivos geradores da ação vibratória. Esses vibradores são classificados em: KOZHEVNIKOV *et al.* (1975), CARROL; COLIJN (1975) (Apud TOPICOS ESPECIAIS EM SECAGEM, 1992):

- a) Vibrador mecânico de inércia, que produz uma considerável força de excitação mediante a rotação de massas desequilibradas (utilizado neste trabalho).
- b) Vibrador excêntrico, recomendado para geração de forças de excitação intensas e de baixa frequência.
- c) Vibrador pneumático ou hidráulico, os quais são recomendados para a promoção de alta frequência de vibração.
- d) Vibrador eletromagnético, seguramente o melhor dispositivo para promover a vibração, além de produzir frequências altas, possui uma precisa regulação de frequência.
- e) Vibrador sonoro produz ondas sonoras quando o ar escoar num gerador de som.

Estes dispositivos geradores de vibração são responsáveis pela totalidade do escoamento dos sólidos nos leitos vibrados, e tem uma influência parcial nos leitos vibro-fluidizados. O escoamento dos sólidos pode ser controlado para que ocorra no regime pistonado, com um mínimo de dispersão de partículas na direção do escoamento. No caso de secadores de leito horizontal a mistura pode ser controlada para ocorrer apenas na

direção vertical. No projeto dos secadores existem duas tendências de utilização de vibradores: os de inércia ou eletromagnéticos, operando em alta frequência e baixa amplitude de vibração ($f = 50\text{Hz}$ e $A < 1\text{mm}$); e vibradores excêntricos a baixa frequência e alta amplitude ($f = 4$ a 10Hz e $A = 4$ a 6mm), STRUMILLO; KUDRA (1986).

2.5 Vibro-fluidização

Com os conceitos de fluidização e vibração, pode se perceber a possibilidade da obtenção de inúmeras vantagens com a associação da agitação mecânica das partículas com a ação pneumática do ar de secagem.

Um leito vibro-fluidizado consiste de um leito fluidizado convencional, ao qual se aplica uma vibração mecânica (vertical ou horizontal) para melhorar as características de transporte. A Figura 2.5-1 apresenta um esquema industrial de um leito vibro-fluidizado. Esta estrutura compreende um subsistema que fornece a energia vibracional e outro que absorve esta energia, BROD (1999).

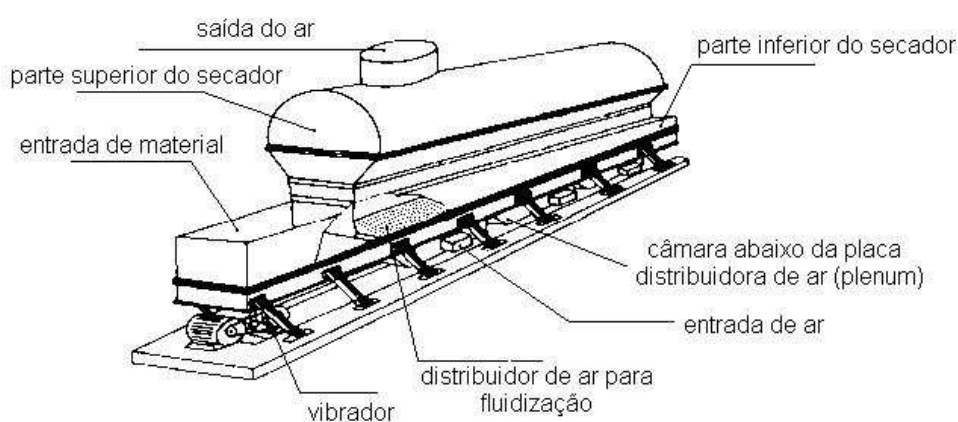


Figura 2.5-1 Esquema industrial de um leito vibro-fluidizado (LVF), BROD (1999).

De acordo com GUPTA; MUJUMDAR (1980 a e b), que apresentaram uma das primeiras revisões sobre leitos vibro-fluidizados, a primeira aplicação comercial de um LVF foi reportada nos anos de 1938 por Allis-Chalmers que operou uma unidade para a secagem de molibdênio mineral. Atualmente alguns exemplos de suas aplicações podem ser encontrados na aglomeração de leite em pó, secagem de fertilizantes, açúcar, raspas de polímeros, sais inorgânicos, produtos farmacêuticos, fibras de asbestos etc.

O leito vibro-fluidizado é um dos mais indicados para a secagem de material particulado com características adesivas, coesivas e pastosas. Nestes casos, a vibração pode facilitar a fluidização tanto pela energia fornecida para impulsionar as partículas verticalmente quanto pela redução da formação de aglomerados no leito, devido à quebra das pontes líquidas e/ou sólidas. A efetividade da vibração na fluidização é fortemente dependente das propriedades das partículas usadas (tipo de partícula de Geldart, distribuição de tamanho e formato) e dos parâmetros de vibração (frequência, amplitude e ângulo) aplicados. Portanto, materiais que são difíceis de fluidizar em um leito não vibrado são freqüentemente excelentes candidatos a serem processados em um secador de leito vibro-fluidizado.

Segundo READY; BAKER (1985), basicamente as únicas exigências que devem ser satisfeitas são que o material seja levado pelo secador sob influência das vibrações e o tempo de residência seja suficiente para realizar a secagem. As vibrações servem para manter qualquer aglomerado formado em uma condição móvel.

Segundo ERDÉZS *et al.* (1986) a análise fluidodinâmica do leito vibro-fluidizado é similar ao do leito fluidizado, sendo necessário o estudo da velocidade mínima de vibro-fluidização, a queda de pressão no leito, a porosidade e o parâmetro vibracional.

2.5.1 Adimensional de Vibração

No estudo de leitos vibro-fluidizados, é importante quantificar a energia vibracional imposta ao sistema, a qual tem influência sobre a dinâmica do leito. A forma mais utilizada de quantificar a energia vibracional é por meio do adimensional de vibração, sugerido por CHLENOV; MIKHAILOV (1965), chamado de parâmetro vibracional (Γ), definido pela Equação (20) a seguir:

$$\Gamma = \frac{A(2\pi f)^2}{g} \quad (20)$$

No qual, A e f são a amplitude e frequência de vibração respectivamente e g a aceleração gravitacional.

Os leitos de partículas, submetidos à influência de vibração na direção vertical apresentam uma variedade de regimes de comportamento, ERDÉSZ *et al.* (1986) (Apud TÓPICOS ESPECIAIS EM SECAGEM, 1992). A nomenclatura proposta por

STRUMILLO; PAKOWSKI, 1980 (Apud TÓPICOS ESPECIAIS EM SECAGEM, 1992) é a mais abrangente e está baseada no adimensional de vibração, Γ , que é a razão entre a aceleração vibracional e a da gravidade:

- ✓ Leito vibrado: para $A\omega^2/g > 1$, sem escoamento de ar;
- ✓ Leito vibro-fluidizado: são os leitos aerados nos quais o ar escoar com velocidade inferior a de mínima de fluidização (u_{mf}) e a vibração produzir $A\omega^2/g < 1$.
- ✓ Leito fluidizado-vibrado: para $u > u_{mf}$, independente da aceleração vibracional.

BRATU; JINESCU (1971), definiram três regimes de operação para sistemas vibrados dependentes da componente vertical de aceleração vibracional, que são:

- ✓ Leito vibrátil: quando $A\omega^2/g < 1$, o leito se comporta como um leito fluidizado simples e a vibração somente aumenta a estabilidade e a homogeneidade do leito fluidizado;
- ✓ Leito vibro-fluidizado: quando $A\omega^2/g \cong 1$, o fluxo de ar e a vibração contribuem para a fluidização e o comportamento do leito é influenciado pela magnitude dos dois;
- ✓ Leito fluidizado vibrado: quando $A\omega^2/g > 1$, o leito é essencialmente influenciado por forças vibratórias, que tendem a suspender o leito durante a secagem.

2.5.2 Definições de velocidade mínima de vibro-fluidização.

No regime vibro-fluidizado o ar escoar a velocidades muito baixas e, por si só, não teria condições de movimentar as partículas do leito. Estas são fluidizadas devido ao efeito redutor da vibração sobre a velocidade mínima de fluidização.

O estado vibro-fluidizado inicia-se no leito, quando a força gravitacional atuando sobre a partícula é exatamente equilibrada pela soma da força resistiva do gás e pela componente vertical da força vibracional.

Do equilíbrio de forças pode-se deduzir que:

$$u_{mvf} = u_{mf} \left(\left| 1 - \frac{A\omega^2}{g} \right| \right) \quad (21)$$

Conclui-se pela Equação (21), que a vibração atua no sentido de reduzir a velocidade de mínima fluidização. Entretanto na prática a extensão dessa redução é menor do que prevê esta relação, devido ao amortecimento de vibração pela influência da altura do leito.

Existem várias correlações propostas para o cálculo da velocidade incipiente de vibro-fluidização, conforme mostra a Tabela 2.5-1.

O modelo apresentado por BRATU; JINESCU (1972) na Equação (23) é baseado na colisão entre as partículas sólidas e a superfície de vibração, onde E é o coeficiente de colisão elástica e j é a razão entre o tempo ascendente e descendente da partícula. BRATU; JINESCU (1972) conduziram experimentos para validar seu modelo e obtiveram 0,09 para o coeficiente $\frac{1+E}{2\pi j}$, afirmando que para $\Gamma < 1$ a vibração não afetaria a velocidade mínima de vibro-fluidização. Isto contrasta com as observações de MUSHTAYEV *et al.* (1973) que mostraram que a vibração tem efeito relevante sobre a velocidade mínima de vibro-fluidização, mesmo para $\Gamma < 1$, chegando a Equação (23).

Tabela 2.5-1 Correlações para a velocidade mínima de vibro-fluidização

Propriedade	Autor	Correlação	Tipo*	Γ	Eq.
Vel. Mínima de Vibro fluidização u_{mvf}	Bratu, Jinescu ¹	$u_{mvf} = u_{mf} \left[1 - \frac{1+E}{2\pi j} \Gamma \right]$ E, j constantes experimentais	A e B	0-15	(22)
	Mushtaiev Planovsky ¹	$u_{mvf} = u_{mf} [1 - 0,09\Gamma]$	B	0-30	(23)
	Mushtaiev et al. ¹	$u_{mvf} = u_{mf} 0,12 \left[\frac{\rho_p}{\rho_g} \right]^{0,63} \left[\frac{1}{v_g} \right]^{0,33} d_p^{0,38} [1 - 0,95\Gamma]$ v_g viscosidade cinemática do gás	B	0-30	(24)
Velocidade mínima de mistura u_{mmv}	Gupta Mujumdar ¹	$u_{mmv} = u_{mf} [1,952 - 0,275\Gamma - 0,686\Gamma^2]$	D	0-3	(25)

¹ ERDÉSZ *et al.* (1986); * Classificação de Geldart.

ERDÉSZ *et al.* (1986) apresentaram um gráfico, para as partículas de areia, retratando a velocidade mínima de vibro-fluidização em relação ao parâmetro vibracional conforme ilustrado na Figura 2.5-2, no qual H é a altura inicial do leito fixo:

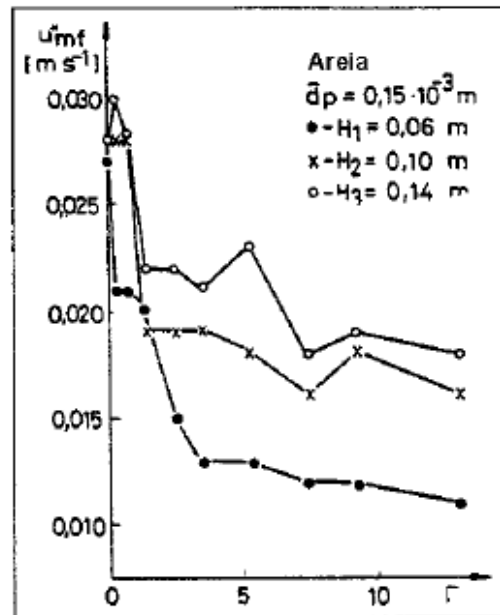


Figura 2.5-2: Velocidade mínima de vibro-fluidização (u_{mf}) versus parâmetro vibracional (Γ), ERDÉSZ *et al.* (1986).

A determinação da velocidade mínima de vibro-fluidização é feita através da intersecção de duas retas sobre a curva característica de queda de pressão em relação a velocidade do ar, uma tangente a região de leito fixo e outra tangente a região de queda de pressão constante, conforme a metodologia clássica apresentada por BRATU; JINESCU (1971), descrito para leito fluidizado.

Segundo GUPTA; MUJUMDAR (1980 a e b) a metodologia utilizada para determinar a velocidade mínima de vibro-fluidização baseada no modelo acima pode apresentar resultados fisicamente incoerentes como os encontrados em seus experimentos, Figura 2.5-3. A velocidade mínima de vibro-fluidização, obtida desta forma, aumentava em algumas situações com o aumento do adimensional de vibração (Γ), mantendo a amplitude constante. Desta forma introduziram o conceito de velocidade mínima de mistura.

GUPTA; MUJUMDAR (1980 a e b) declararam que do ponto de vista prático o estado do leito é importante quando a mistura das partículas se inicia no mesmo, isto é,

quando as partículas iniciam movimento umas em relação as outras no interior do leito. Eles chamam a velocidade do gás quando este fenômeno ocorre de velocidade mínima de mistura e propõe uma correlação para o cálculo, Equação (26):

$$\frac{u_{mm}}{u_{mf}} = 1,952 - 0,389\Gamma - 1,372(\Gamma)^2 \quad (26)$$

Esta equação não é definida para $\Gamma < 1$.

A Figura 2.5-3, abaixo, ilustra o efeito do adimensional de vibração na velocidade mínima de mistura do leito vibro-fluidizado.

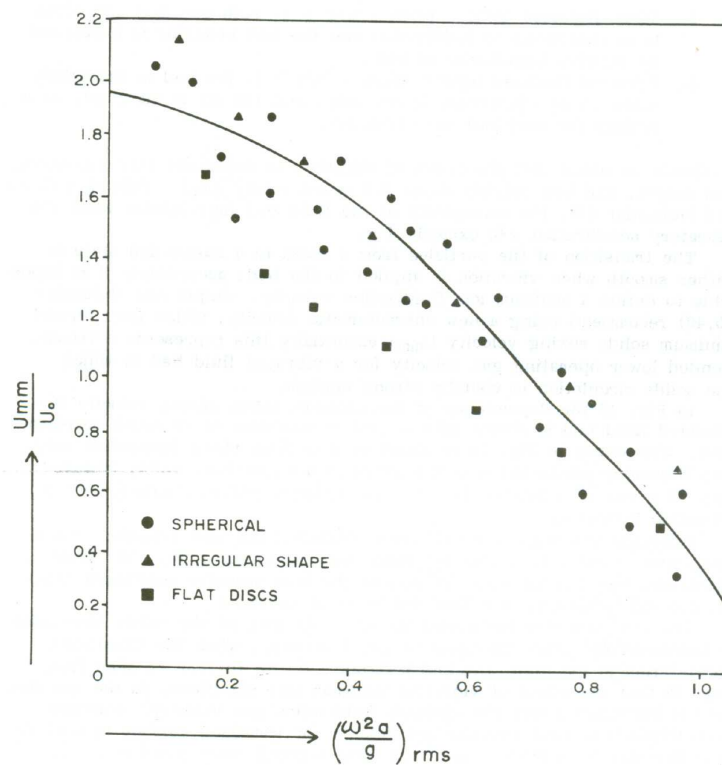


Figura 2.5-3: Velocidade mínima de mistura para leito vibro-fluidizado. Efeito do adimensional de vibração, HOVMAND (1987).

A determinação da velocidade mínima de mistura é feita visualmente, sendo, portanto dependente da sensibilidade do observador.

2.5.3 Queda de pressão em leitos submetidos à vibração

A técnica tradicionalmente usada para analisar a fluidodinâmica da interação gás-leito faz uso da curva de fluidização, ou seja, da relação entre a queda de pressão do

gás que escoar através de um leito e a velocidade do gás. Experimentos realizados nas duas últimas décadas indicaram que a forma da curva de fluidização é dependente dos adimensionais de vibração, conforme mostrado na Figura 2.5-4 (STUMILLO; KUDRA, 1986) em que K é o adimensional de vibração definido como Γ :

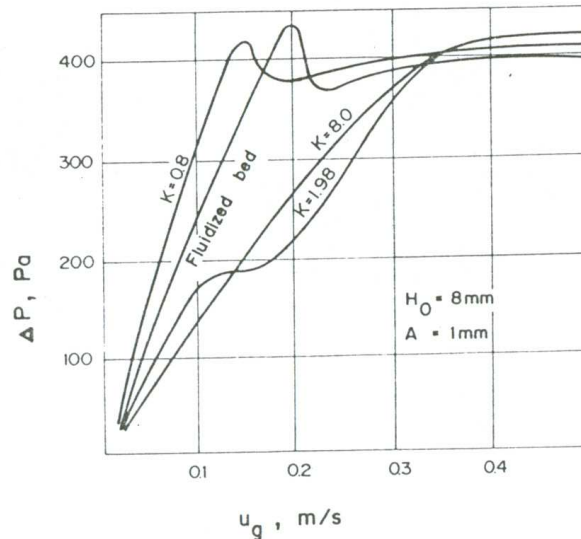


Figura 2.5-4: Curva de queda de pressão em relação a velocidade do gás em leito vibro-fluidizado, STUMILLO; KUDRA (1986).

BRATU; JINESCU (1969) foram os primeiros a publicarem curvas de fluidização de leitos submetidos à ação vibracional para uma faixa ampla de velocidade do ar. A Figura 2.5-5 apresenta curva típica de fluidização normalmente observadas, STRUMILLO; PAKOWSKI (1980).

Na Figura 2.5-5 a curva “a” representa a fluidização convencional, com ausência de vibração. Nos leitos excitados, a forma da curva de fluidização é dependente da relação entre as forças vibracionais e aerodinâmicas atuando no leito. No caso de alta aceleração vibracional, curva “b”, o pico de pressão não é observado. Para valores intermediários de aceleração vibracional, as curvas são da forma “c” e “d”. Na curva “c”, u_{mvf} (velocidade mínima de vibro-fluidização), representa o limite de velocidade do ar que promove o início de movimentação, o que corresponde à extremidade do primeiro patamar da curva.

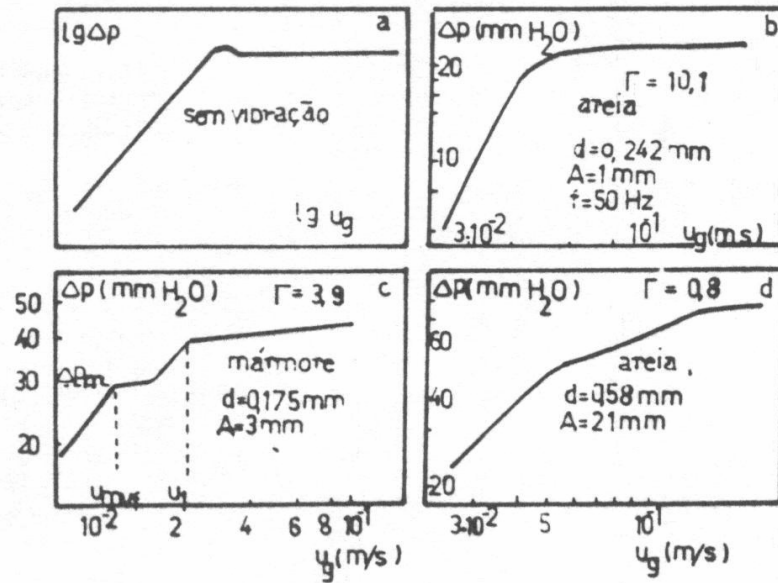


Figura 2.5-5 Curvas de fluidização, com (b, c, d) e sem (a) vibração, STRUMILLO; PAKOWSKI (1980).

Para o segundo patamar da curva “c”, que se inicia na velocidade do ar u_1 , não existe uma interpretação física. Entretanto, quando a frequência de vibração aumenta, mantida constante a amplitude, a velocidade u_1 tende à velocidade mínima de vibro-fluidização e a curva “c” torna-se similar a “b”, STRUMILLO; PAKOWSKI (1980).

A curva “d” destaca uma situação de excitação do leito sob baixa aceleração vibracional, além de o leito ser mais profundo e formado por partículas maiores. A comparação da forma da curva “d” com as anteriores torna-se difícil, pois nesta situação com as condições de vibração utilizadas, tem-se $\Gamma < 1$, ocorrendo então a compactação do leito. Os efeitos de compactação, juntamente com a maior altura do leito, são responsáveis pela queda de pressão mais intensa no mesmo.

Apesar de não ser mostrado na Figura 2.5-5, os leitos submetidos à vibração apresentam o fenômeno da histerese quando a velocidade do ar é inferior a u_{mvf} . Operando com velocidade do ar além de u_{mvf} , o fenômeno não mais se manifesta, PAKOWSKI *et al.* (1984).

Parâmetros que influenciam na redução da queda de pressão do leito associada à vibração são: forma de partícula, tamanho, densidade, altura do leito, a frequência de vibração e a amplitude. As correlações empíricas apresentadas na Tabela 2.5-2 seguinte foram propostas para ΔP_{mvf} :

Tabela 2.5-2 Correlações para a perda de carga em um leito vibro-fluidizado.

Autor	Correlação	Tipo*	Γ	Eq.
Bratu e Jinescu (1961) ¹	$\Delta P_{mvf} = \Delta P_{mf} \left(\frac{A\omega^2}{g} \right)^{-n}$ $n = 0,15 + 24,17d_p\rho_p$	A e B	0-15	(27)
Gupta e Mujumdar (1979) ¹	$\Delta P_{mvf} = \Delta P_{mf} \left(1 - 0,935 \left(\frac{d_p}{H} \right)^{0,946} (\Gamma)^{0,606} \phi_s^{1,637} \right)$	B e D	0-22	(28)
Ramzin ²	$\Delta P_{mvf} = H (u_{mvf})^n$ $n=1,43$	D	1-10	(29)
Drogalin Karpova ²	$\Delta P_{mvf} = aHu_{mvf} + bH(u_{mvf})^2$ $a = 191,5 \quad b = 1120$	D	1-10	(30)
Freger ²	$\Delta P_{mvf} = K_0 a H (u_{mvf})^n$ $K_0 = f(\Gamma) \quad n = \text{const}$	D	0-5	(31)
Bahman Zhirnova Mikhailov ²	$Eu = \frac{\Delta P_{mvf}}{\rho_g (u_{mvf})^2} = K_0 Re^{K_1} Re_v^{K_2} (\Gamma)^{K_4} \left(\frac{m}{D^3 \rho_g} \right)^{K_3}$ $\left(\frac{\rho_s}{\rho_g} \right)^{K_5} \left(\frac{A}{d_p} \right)^{K_6}$ $\text{onde: } Re = \frac{d_p u_{mvf}}{v_g} \quad Re_v = \frac{d_p \omega}{v_g}$	B e D	3,5-13	(32)
Erdész e Ormós ²	$\frac{\Delta P_{mvf}}{\Delta P_{mf}} = (1,06 - 0,034\Gamma + 0,006\Gamma^2 - 0,0007\Gamma^3)$	B	1-12,9	(33)

¹ GUPTA; MUJUMDAR (1983), ² ERDÉSZ *et al.* (1986), * Classificação de Geldart.

ERDÉSZ *et al.* (1986) apresentaram um gráfico de queda de pressão em relação ao parâmetro vibracional para partículas de areia ($d_p=0,15 \cdot 10^{-3} \text{ m}$) conforme mostrado na Figura 2.5-6.

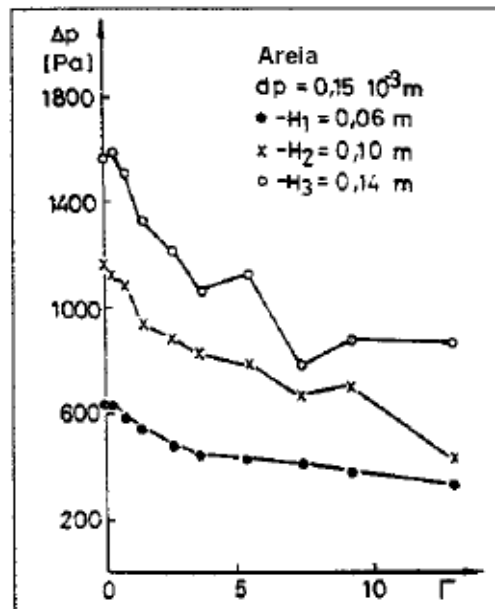


Figura 2.5-6 Queda de pressão em LVF versus parâmetro vibracional Γ , ERDÉSZ *et al.* (1986).

Há uma considerável discordância entre as correlações empíricas, principalmente devido às diferenças nas operações consideradas por vários investigadores. Algumas das conclusões importantes com respeito ao comportamento de LVF são resumidas abaixo, (GUPTA; MUJUMDAR (1983)).

1. Segundo CHLENOV; MIKHAILOV (1967) e GUPTA; MUJUMDAR (1979) em estado de vigorosa mistura, o fenômeno chamado de pseudo-fluidização, pode ser alcançado sem fluidização. Isto ocorre quando $\Gamma \geq 1$.

2. Prejuízo e melhoria em transferência de calor de superfície-leito em LVFs foram reportados. Na maioria dos casos, o máximo coeficiente de transferência de calor h pode ser relacionado aos parâmetros de vibração. Outros parâmetros que influenciam a taxa de transferência de calor são os valores entre a relação vibração e velocidade do ar

(Af/u_0), tamanho da partícula e a localização do trocador de calor com relação ao prato distribuidor.

A condição ótima dos parâmetros de vibração (A e f) pode ser encontrada na secagem de material granulado no leito vibro-fluidizado. A condição ótima operacional, por definição, é a que proporciona maior taxa de secagem para um determinado produto. GUPTA (1979) obteve uma redução na taxa de secagem para LVF operando a $\Gamma < 1$, e melhoria para valores além deste.

2.5.4 Porosidade de leitos vibro-fluidizados

Para leito vibro-fluidizado a porosidade está intimamente relacionada com a intensidade da vibração. Teoricamente a porosidade do leito tenderia a diminuir devido à homogeneidade do leito. Porém na prática não é isso que ocorre, conforme mostrado na Figura 2.5-7.

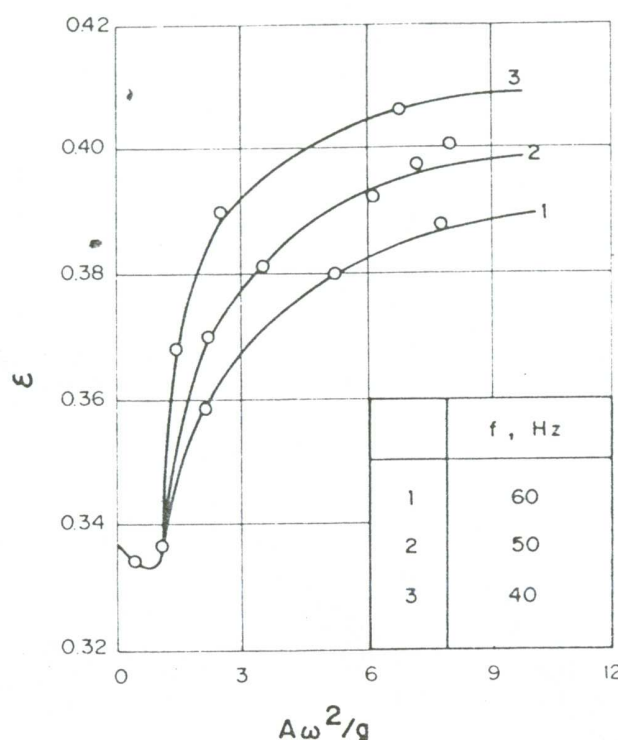


Figura 2.5-7: Porosidade do leito em relação ao adimensional de vibração, STUMILLO e KUDRA (1986).

A Figura 2.5-8, a seguir, apresentada por ERDÉSZ *et al.* (1986), usando partículas de areia ($d_p = 0,15 \cdot 10^{-3}$ m) e diferentes altura de leito, mostra uma variação da porosidade que pode ser explicada com a diminuição de seu valor até $A\omega^2/g = 1$, no qual ocorre a compactação do leito, ocorrendo uma elevação até $A\omega^2/g = 5$ e em seguida uma flutuação imprevisível.

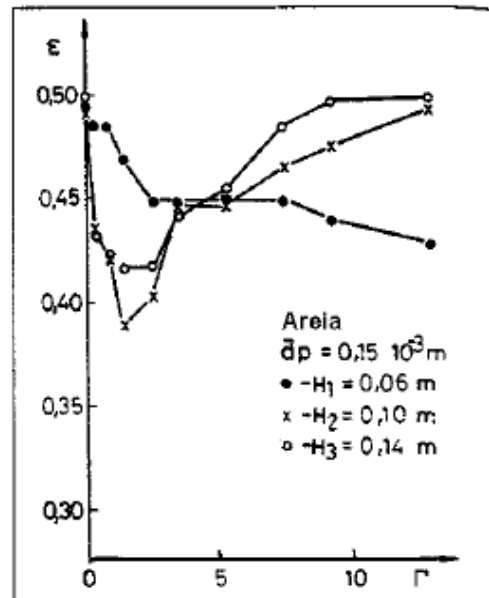


Figura 2.5-8 Porosidade de LVF versus parâmetro vibracional Γ , ERDÉSZ *et al.* (1986).

Um dos poucos trabalhos publicados a tratar exclusivamente da mistura de partículas e expansão volumétrica em leitos vibrados é o de HUNT *et al* (1994). Utilizando recursos de imagens de vídeo, eles estudaram o comportamento de partículas esféricas de diversas cores, num leito vibrado de paredes de vidro. Verificaram um vazio (uma lacuna) na base do leito no instante em que esta base está separada das partículas. Neste instante a base do leito se move para baixo e a aceleração vibracional é maior que a gravitacional. Em seguida as partículas em queda livre se chocam com a base do leito, onde as partículas superiores são lançadas em “vôo livre”, expandindo o leito.

Medindo a altura do leito expandido para diferentes acelerações e diferentes cargas de partículas, HUNT *et al* (1994) observaram que esta se mantém constante até um certo valor de adimensional de vibração (Γ), aumentando em seguida para valores maiores que podem ser até o dobro do inicial. Com estes dados HUNT *et al* (1994) também analisaram a fração de sólidos como função da aceleração vibracional. A fração

de sólidos foi definida como a razão entre o volume de sólidos e o volume do leito. Estes pesquisadores verificaram que a expansão do leito aumenta significativamente acima de uma frequência crítica (10 Hz) e que a expansão não dependeu da amplitude de vibração, (CAMARGO (2003)).

A Tabela 2.5-3 apresenta algumas correlações empíricas para a porosidade do leito.

Tabela 2.5-3 Correlações para a porosidade em leito vibro-fluidizado

Autor	Correlação	Tipo *	Γ	Eq
Bahman, Zhirnova, Mikhailova, Tyabin ¹	$\varepsilon = K_0 \text{Re}_v^{k_1} \left[\frac{A}{d_p} \right]^{k_2} \left[\frac{m}{D^3 \rho_s} \right]^{k_3} (\Gamma)^{k_4}$ onde: $\text{Re}_v = \frac{\rho_g d_p \omega}{\mu_g}$	B e D	3,5-13	(34)
Ginzburg, Syroiedov ¹	$\varepsilon = \frac{1 - \varepsilon_o}{1 + 5,48 \frac{A}{H_o}}$ H_o altura estática do leito	B	1-7	(35)
Konsetov, Matrosova, Garbuzova ¹	$\varepsilon = \frac{1 - \varepsilon_o}{1 + \frac{A^a}{H_o}}$ onde $\varepsilon_o = 1 - \frac{m}{\rho_s H_o S_L}$ a cons tan te experimental m massa do leito S_L seção transversal	B	1-5	(36)
Ringer, Mujumdar ¹	$\varepsilon = \varepsilon_o + a \left[\frac{w_o^2}{g - \frac{\Delta p_{mvf}}{H_o \rho_s}} \right]^b$ a, b cons tan te experimental	B e D	0-3	(37)

¹ERDÉSZ *et al.* (1986) * Classificação de Geldart.

2.5.5 Desvio Padrão da queda de pressão

Muitos autores utilizam transdutores de pressão para as medidas de queda de pressão no leito. Estas medidas são uma média dos valores obtidos num intervalo pequeno de tempo, ajustado de acordo com o pesquisador através do software de aquisição de dados. Com esse conjunto de dados é possível calcular estatisticamente o desvio padrão da queda de pressão.

GARIM; FREIRE (1999) combinaram a análise da queda de pressão versus curvas da velocidade do ar e desvios padrão da queda de pressão versus curvas da velocidade do ar para obter uma caracterização boa da fluidodinâmica do leito fluidizado e vibro-fluidizado.

CAMARGO; FREIRE (2001) analisaram o comportamento fluidodinâmico do leito cilíndrico vibro-fluidizado, utilizando partículas esféricas de vidro com diâmetro $700\mu\text{m}$, densidade de $2,6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, amplitude de 10^{-2}m e alturas do leito fixadas em 7, 9 e $11 \times 10^{-3}\text{m}$, respectivamente para Γ variando de 0 a 6,6. Eles concluíram que quanto maior a altura do leito de partículas maior é o desvio padrão encontrado e, que, para baixas velocidades de ar e menores valores de frequência de vibração, maiores são os valores de desvio padrão.

DALEFFE; FREIRE (2003) observaram que as curvas do desvio padrão da queda de pressão são uma ferramenta útil para compreender o comportamento fluidodinâmico do leito vibro-fluidizado, pois permitem a detecção das mudanças no comportamento fluidodinâmico que não foram observadas analisando somente a curva queda de pressão em relação a velocidade do ar.

DALEFFE; FREIRE (2004) apresentaram a Figura 2.5-9, abaixo mostrando o efeito no desvio padrão quando se atinge a região de fluidização para partículas de esfera de vidro com massa específica de 2.500kg/m^3 com diâmetros médios de $1,29 \times 10^{-3}$, $2,18 \times 10^{-3}$ e $3,67 \times 10^{-3}\text{m}$.

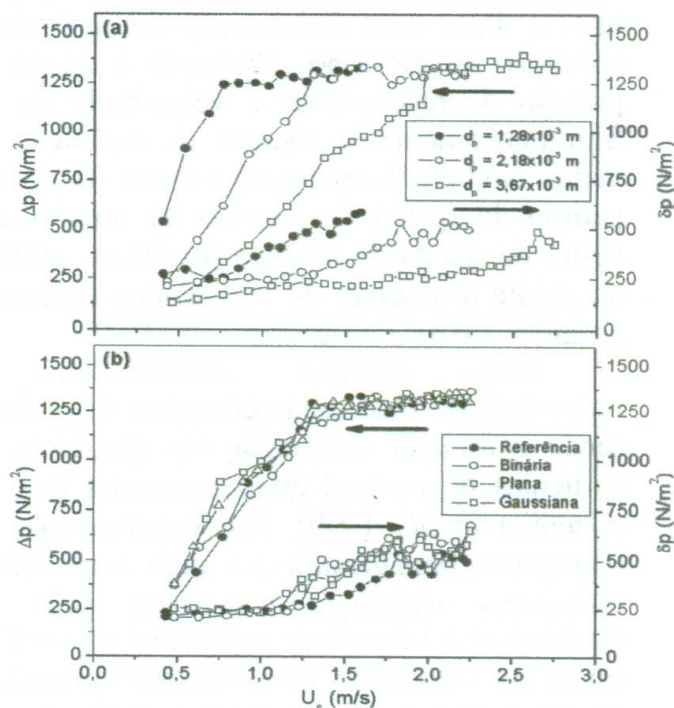


Figura 2.5-9: Queda de pressão no leito e desvio padrão em função de velocidade superficial do gás; $A=0,009\text{m}$; $f=7,43\text{ Hz}$.

2.6 Efeitos da vibração na secagem

Segundo ERDESZ (1990) quando se agita um leito de secagem sob ação vibracional, pode ocorrer aumento da taxa de secagem, dependendo das condições de operação, de parâmetros geométricos e das características físicas do leito. A influência da vibração sobre a taxa de secagem depende da faixa de velocidade do ar. Para $u_g < u_{mf}$, a influência é maior do que quando $u_g > u_{mf}$. Para, $\Gamma \gg 1$ o aumento de u_g acima de u_{mf} , pode reduzir a taxa de secagem. Quando ocorre aumento da taxa de secagem a mistura das partículas é mais intensa e ocorre desagregação de aglomerados, ERDESZ *et al.* (1989). Os processos de transferência de calor e massa ocorrem em maior intensidade quando a operação é realizada em regime de ressonância.

Segundo PAKOWSKI *et al.* (1984) a secagem em leitos vibratórios é apropriada para processamentos de materiais em que a vazão de ar é governada pela exigência de fluidização e não pelo calor requerido na secagem, ou quando vazões elevadas de ar não são recomendadas para processamento de materiais facilmente oxidáveis.

Alguns autores como MONHEBEL; MOSS (1971), GUPTA; MUJUMDAR (1983), ERDÉSZ; ORMÓS (1984), ERDÉSZ *et al.* (1986), ERDÉSZ (1990) e

CARDOSO; KIECKBUSCH (1998) estudaram leite vibro-fluidizado e puderam relatar as seguintes vantagens em relação aos leitos fluidizados e de jorro:

- ✓ Facilidade de controle da distribuição do tempo de residência e intensidade de agitação pela manipulação dos parâmetros vibracionais;
- ✓ Possibilidade de maiores coeficientes de transferência de calor e massa;
- ✓ A agitação mecânica pode reduzir a velocidade de mínima fluidização e pode reduzir a queda de pressão, de forma que minimiza o consumo de energia térmica e mecânica e minimiza a eluriação (arraste) de partículas finas;
- ✓ A vibração atenua zonas mortas, canais preferenciais e formação de bolhas, resultando em operações mais higiênicas e uniformes para produtos alimentícios;
- ✓ Possibilidade de fluidizar materiais coesivos, adesivos e pastosos;
- ✓ Vários processos como secagem, granulação, revestimento e recobrimento podem ser realizados no mesmo equipamento;
- ✓ É possível a manipulação de materiais inflamáveis, explosivos e tóxicos em um leito vibro-fluidizado operando em um ciclo fechado e,
- ✓ O movimento do material através do secador é mais suave, reduzindo o atrito entre partículas possibilitando o tratamento de materiais frágeis.

Nas últimas décadas muitas pesquisas têm sido desenvolvidas para obter condições ótimas de vibração para materiais específicos. Entre elas: secagem de resina de troca iônica (“polystyrol”), nos períodos de velocidade de secagem constante e decrescente, SUZUKI *et al.* (1980 B); secagem de partículas de vidro com característica aglomerante, SUZUKI *et al.* (1980 A); secagem de farelo de arroz, FITO *et al.* (1977); secagem de fatias de cebola, FINZER (1984); secagem de suspensões alimentícias em leito de partículas inertes, NOVY; KIECKBUSCH (1987); secagem de cubos de batata e grãos de soja, FINZER (1989). Em escala industrial, numerosos produtos são desidratados em secadores vibrados, tais como: sais, fertilizantes, plásticos e produtos alimentícios, STRUMILLO; PAKOWSKI (1980).

CRUZ *et al.* (2004) avaliaram a secagem do leite em pó em leito vibro-fluidizado analisando a influência da temperatura do ar de entrada, amplitude de vibração e vazão de ar na cinética de secagem e na característica do leite em pó relativo a sua reconstituição, utilizando planejamento fatorial com três réplicas no centro.

SILVA MORIS; ROCHA (2003) analisaram o efeito da vibração na secagem de ácido adipico em leito fluidizado estudando variáveis como amplitude e frequência de vibração e umidade das partículas.

2.6.1 Tipos de secadores vibro-fluidizados.

Em escala industrial os tipos de secadores vibrados mais utilizados são:

✓ Secadores contínuos com leitos posicionados na horizontal, os quais são geometricamente simples e requerem pouca manutenção, FINZER; KIECKBUSCH (1992). Exemplo deste equipamento é mostrado na Figura 2.6-1.

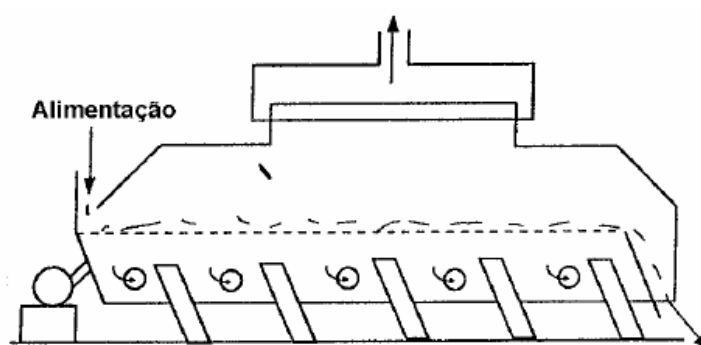


Figura 2.6-1 Secador vibrado com leito horizontal, KEEY (1992)

✓ Secadores verticais, que geralmente são construídos com múltiplas bandejas, na forma espiral ou cilíndrica conforme mostrado nas Figuras 2.6-2 e 2.6-3. Estes dispositivos possibilitam operações com tempos de residência elevados, ERDÉSZ *et al.* (1989); MUJUMDAR; ERDÉSZ (1988) (Apud TÓPICOS ESPECIAIS EM SECAGEM, 1992):

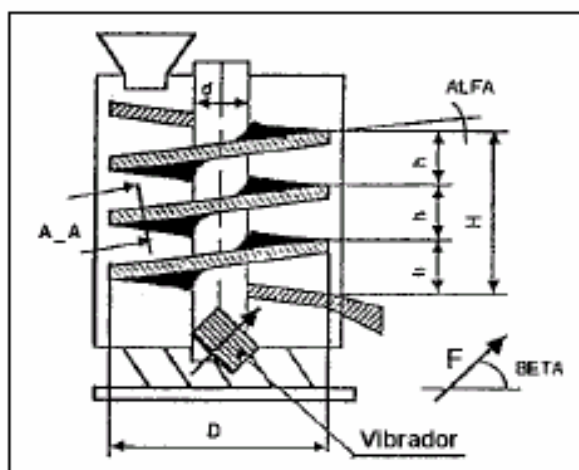


Figura 2.6-2 Secador vertical em espiral, SZALAY (1995).

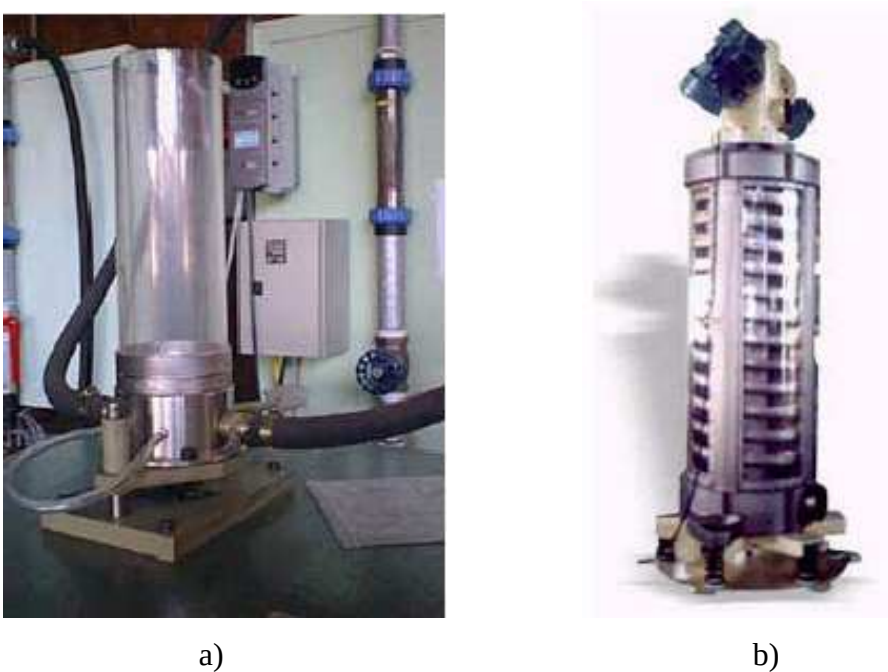


Figura 2.6-3 Secadores vibro-fluidizado verticais; a) Laboratorial (UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE, 2002); b) Industrial (DAESUNG, 2002).

STRUMILLO; PAKOWSKI (1980) descrevem os seguintes tipos de secadores vibro-fluidizados mostrados na Figura 2.6-4:

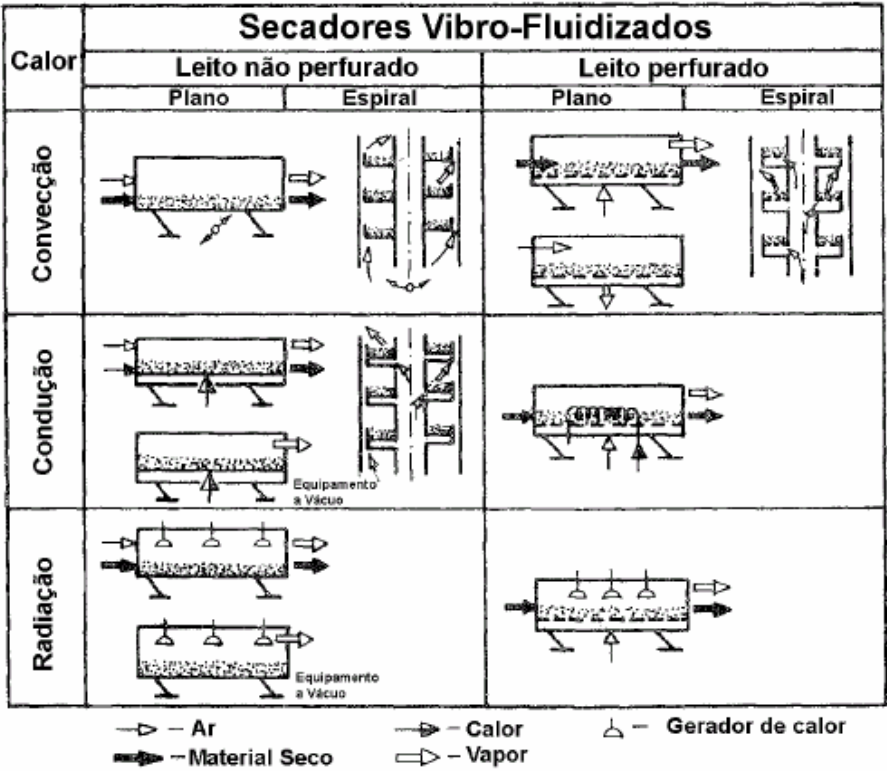


Figura 2.6-4 Tipos de secadores vibro-fluidizados, STRUMILLO; PAKOWSKI (1980).

A câmara de secagem pode ser toda vibrada. Entretanto nos secadores verticais o mais racional, em termos de consumo energético e taxas de recirculação, é promover a vibração apenas no suporte do leito.

A secagem de dispersões pode ser promovida em colunas vibradas contendo corpos inertes, sobre os quais efetua-se a distribuição da dispersão processada, NOVY; KIECKBUSCH (1988); MUJUMDAR; ERDÉSZ (1988).

2.7 Alguns estudos da fluidodinâmica de leitos vibro-fluidizado

ERDÉSZ; ORMÓS (1984) estudaram a influência do aumento da amplitude de vibração utilizando partículas inertes de areia, de diversos diâmetros. A amplitude de vibração variou entre 0,6 e 1,85 mm. Os resultados obtidos mostraram que com o aumento da amplitude vibracional há uma redução da queda de pressão através do leito em função do aumento da energia vibracional imposta ao mesmo, neste caso o adimensional de vibração variou de 2,5 a 7,39.

MARRING *et al.* (1994) predisseram a velocidade mínima de vibro-fluidização para leito vibro-fluidizado usando equação de KOZENY-CARMAN (1956). Eles utilizaram partículas do grupo A de Geldart. Quando se aplicou vibração no leito de partículas de vidro, que poderiam ser fluidizadas sem a vibração houve uma diminuição na porosidade e na velocidade mínima de fluidização.

MAWATARI *et al.* (2002) determinaram a velocidade mínima de vibro-fluidização utilizando a equação de ERGUN (1952) e compararam com os resultados experimentais. Partículas do grupo A (30, 60 e 100 μm) e partículas do grupo C de Geldart (6 e 10 μm) foram usados. O nitrogênio foi utilizado como gás de fluidização. O adimensional de vibração foi obtido variando a amplitude (0-1,5mm) e a frequência (30-45 Hz) de vibração. A porosidade inicial no estado de mínima vibro-fluidização foi obtida por observação visual. Os valores calculados pela equação de ERGUN (1952) apresentaram boa aproximação com os resultados experimentais, porém para a predição da velocidade mínima de vibro-fluidização das partículas do grupo C foi necessário obter o diâmetro de aglomeração.

MORIS (2002) estudou a fluidodinâmica e a secagem de ácido adípico em leito vibro-fluidizado. O ácido utilizado apresenta dificuldades em atingir o regime de

fluidização em leito fluidizado convencional, quando úmido. O efeito da vibração ajudou a manter o aglomerado em estado móvel e melhorou a taxa de circulação com quebra das bolhas, quando seco. O estudo fluidodinâmico foi realizado a partir das curvas de queda de pressão em função da velocidade do gás para o leito fluidizado convencional e vibrado. Verificou-se uma redução na queda de pressão na condição de mínima vibro-fluidização entre 4 e 32% e com o aumento da carga de partículas o efeito da vibração foi reduzido. A análise do fator de vibração em função da frequência de vibração mostrou que as partículas menores foram mais afetadas pelo efeito da vibração, comparando com as partículas maiores. A análise estatística mostrou que a queda de pressão e a velocidade na condição de mínima vibro-fluidização foram fortemente influenciadas pela carga de partículas presentes no leito.

DALEFFE (2002) estudou as influências do grau de saturação de glicerol, do tamanho de partículas inertes, dos parâmetros vibracionais e da temperatura sobre a velocidade mínima de fluidização (u_{mf}) em leito fluidizado e velocidade de mínima vibro-fluidização para leito vibro-fluidizado. Utilizou para isso uma faixa de $1,1 \times 10^{-3}$ a $1,85 \times 10^{-3}$ m para o diâmetro das partículas, temperatura entre 40 e 60°C, frequência de vibração entre 0 e 11,1 Hz e amplitude de vibração entre 3×10^{-3} a 80×10^{-3} m, gerando adimensionais de vibração de 0; 0,5; 1,0 e 1,5. De forma geral, o autor verificou que a variação de Γ (por meio da variação da frequência) praticamente não influenciou o comportamento dinâmico do leito sob o ponto de vista de velocidade mínima de vibro-fluidização, apresentando apenas uma pequena tendência ao aumento. Verificou também uma pequena suavização da região de transição entre o leito fixo e o fluidizado quando foi inserida a vibração no leito, nas condições operacionais estudadas. DALEFFE (2002) também estudou o comportamento da queda de pressão no leito vibro-fluidizado. De maneira geral, para o menor diâmetro de partícula utilizado no trabalho, o aumento de frequência de vibração praticamente não influenciou o comportamento da queda de pressão.

OLIVEIRA; FREIRE (2004) estudaram a fluidodinâmica das partículas de alumina e sílica-gel (grupo D de Geldart) em leitos vibro-fluidizados e fluidizados quando submetidos à variação de amplitude e frequência vibracional, altura do leito e diâmetro das partículas. Quando imposta uma energia vibracional ao leito ocorreu uma

redução da queda de pressão no leito, em virtude da maior facilidade do ar percolar através do mesmo. Houve uma redução na velocidade mínima de fluidização para leito vibro-fluidizado quando comparado com leito fluidizado. Um aumento na altura do leito de partículas resultou no aumento da queda de pressão do leito. O aumento da amplitude vibracional, para um valor fixo do adimensional de vibração contribuiu para a redução da queda de pressão e esta redução é pouco observada em partículas de menores diâmetros. OLIVEIRA; FREIRE (2004) também constataram um aumento da queda de pressão na região de leito fixo devido a compactação do leito. Na região fluidizada houve uma redução da queda de pressão com o aumento do adimensional de vibração, comparativamente ao leito fluidizado. A redução da queda de pressão foi menos perceptível para partículas de menores diâmetros. Na região fluidizada o aumento do diâmetro das partículas contribuiu para o aumento da queda de pressão no leito fluidizado promovendo a redução da queda de pressão para o leito vibro-fluidizado. As curvas de desvio padrão foram significativamente influenciadas pelo parâmetro vibracional e pela velocidade do ar.

XU; ZHU (2005) realizaram o estudo sobre o efeito da vibração na fluidização de partículas finas (4,8-216 μ m) mostrando que a qualidade da fluidização de partículas finas pode ser aumentada com a vibração mecânica, conduzindo a uma queda de pressão maior a uma baixa velocidade do ar e valores baixos de u_{mvf} . Este aumento na queda de pressão no leito é justificado pelo efeito da compactação do leito antes de atingir o estado de mínima fluidização. Este efeito é fortemente influenciado pelas propriedades das partículas (tipo de partícula de Geldart, distribuição de tamanho e forma) usadas e dos parâmetros vibracionais (frequência e amplitude) aplicados. O efeito da vibração é mais significativo para partículas do grupo C de Geldart e menor para partículas do grupo A e B, ou seja, quanto menor a partícula maior será o efeito da vibração. De acordo com os autores citados acima o aumento na intensidade de vibração reduz a velocidade mínima de fluidização. A vibração reduz o efeito da segregação e elimina canais preferenciais (resultando numa maior queda de pressão), efeitos importantes para uma melhor qualidade de fluidização. Os possíveis papéis da vibração mecânica na fluidização de partículas finas foi estudado com respeito a porosidade, queda de pressão, aglomeração e força interpartícula. Foi encontrada uma vibração que reduz a média de tamanho e a

segregação dos aglomerados no leito, assim melhorando a qualidade de fluidização de partículas coesivas.

DALEFFE; FREIRE (2005) efetuaram uma investigação do comportamento fluidodinâmico do leito vibro-fluidizado e fluidizado, constituído de partículas inertes e utilizando o glicerol para simular a presença de um líquido. A proposta apresentada por eles foi efetuar uma investigação detalhada dos efeitos da amplitude, da frequência, do adimensional de vibração, do grau de saturação de líquido, do tamanho e da densidade das partículas inertes sobre o comportamento fluidodinâmico do leito. No intervalo de condições experimentais utilizadas nos experimentos fluidodinâmicos, observou-se que isoladamente o adimensional de vibração não representou de maneira única o comportamento fluidodinâmico do sistema devido às combinações de amplitude e frequência de vibração que geram o mesmo adimensional, porém o comportamento do leito é diferente. A vibração melhorou a movimentação das partículas, minimizando a aglomeração e atenuando a formação de canais preferenciais. Quando empregada uma distribuição de partículas no leito, observou-se de uma forma global a ocorrência de segregação em quase todos os casos. No leito fluidizado, houve a migração das partículas menores para parte superior do leito, no vibrado ocorreu a migração das partículas maiores para parte superior do leito. Para o leito vibro-fluidizado submetido à uma baixa amplitude de vibração (0,003 m) houve segregação, mas em menor quantidade que no leito fluidizado, enquanto que, quando submetido à alta amplitude de vibração (0,009 m), não ocorreu a segregação granulométrica.

2.8 Planejamento de experimentos

Um método científico de planejamento e análise deve ser seguido para que se obtenha um plano de experimentos visando minimizar o esforço experimental. Quando o problema envolve dados que possam conter erros experimentais, um modo adequado de análise é por métodos estatísticos. Em qualquer experimento, há duas etapas: o planejamento do experimento e a análise estatística dos dados obtidos. Estas etapas estão intimamente ligadas, uma vez que o método a ser utilizado para análise depende diretamente do planejamento realizado, (PEREIRA 2006).

O método univariado onde o pesquisador altera uma variável enquanto as outras são mantidas constantes, é totalmente inviável nos casos em que se possuem variáveis múltiplas, por exigir um número muito elevado de experimentos. Além disso, este método não permite uma análise sobre as possíveis interações entre as variáveis independentes.

Quando existem diversas possibilidades de combinação das variáveis relevantes no processo a análise dos experimentos é mais confiável utilizando técnicas estatísticas para esse fim. O planejamento fatorial dos experimentos (BOX *et al.*, 1978) permite verificar a influência de efeitos individuais, como também, os de interação entre as variáveis. A técnica de superfície de resposta proporciona o ajuste empírico de equações que relacionam as respostas obtidas em função de variáveis estudadas (MYERS, 1976).

Pelo planejamento fatorial são selecionados os níveis das variáveis a serem estudadas e as combinações possíveis do experimento são determinadas. A determinação da quantidade de experimentos é feita de acordo com a quantidade de variáveis estudadas e com os níveis estipulados para essas variáveis. Um planejamento do tipo 2^K determina a quantidade de experimentos de um estudo em dois níveis com 'K' variáveis. Os planejamentos fatoriais a dois níveis são recomendados para sistemas cujas equações experimentais são de primeira ordem. Quando um sistema tiver um forte componente não linear, um planejamento fatorial com mais níveis, avaliados em cada fator, se faz necessário (BOX *et al.*, 1978).

Uma desvantagem em utilizar o planejamento fatorial convencional para obter equações preditivas de segunda ordem é a quantidade excessiva de experimentos que devem ser realizados. Em planejamentos do tipo 3^K (3 níveis), para um estudo com 5 variáveis independentes, seriam necessários 243 experimentos. Dependendo do tipo de estudo, a realização deste número de ensaios seria inviável. Com a necessidade de contornar esse problema, foi desenvolvido (BOX; WILSON, 1951) um método alternativo que fornece uma resposta equivalente a estes experimentos, porém com uma quantidade de experimentos menor. Esse método é denominado de planejamento composto central (PCC).

O planejamento composto central nada mais é do que um planejamento fatorial de primeira ordem aumentado de pontos adicionais que permitem a estimação de parâmetros de segunda ordem. A quantidade de experimentos a ser realizado num planejamento do tipo composto central com ‘K’ variáveis é calculada a partir do planejamento fatorial a dois níveis (2^K), acrescido dos ensaios ou réplicas nos níveis centrais (n_2) e dos ensaios nos níveis extremos ($2K$). A Equação (38) mostra a codificação dos fatores que serão organizados em uma matriz de planejamento:

$$x = \frac{\zeta_i - \zeta_0}{(\zeta_1 - \zeta_{-1})/2} \quad (38)$$

Sendo ‘x’ o valor da variável codificada, ‘ ζ_i ’ o valor original ou não codificado, ‘ ζ_0 ’ representa o valor original no nível central, ‘ ζ_1 ’ é o valor original referente ao nível 1 e ‘ ζ_{-1} ’ o valor original referente ao nível -1.

Os pontos adicionais do planejamento composto central são escolhidos pelo pesquisador. Esses pontos são os valores extremos de cada variável. Essa escolha deve ser feita de forma a deixar a matriz de variância e covariância diagonal (PCC ortogonal), o que elimina as correlações entre os parâmetros (MYERS, 1976).

A Tabela 2.8-1 apresenta a distribuição de 18 experimentos, envolvendo as variáveis independentes codificadas x_1 , x_2 e x_3 , com quatro réplicas no centro. A variável resposta é ‘ y_i ’ e ‘ $+\alpha$ ’ e ‘ $-\alpha$ ’, são respectivamente o nível superior e inferior de cada variável.

Pelo método dos mínimos quadrados, pode-se estimar os parâmetros ‘ β_{ij} ’ da Equação (39). A análise de variância da regressão é feita com base no quadrado do coeficiente de correlação múltipla ‘ R^2 ’, em testes de hipótese usando as distribuições ‘F’ de Fisher e t-Student.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ij} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j>1}^k \beta_{ij} X_i X_j \quad (39)$$

O quadrado do coeficiente de correlação múltipla avalia a porcentagem de variabilidade dos dados explicada pela equação.

Tabela 2.8-1: Matriz do planejamento composto central.

Experimento	x_1	x_2	x_3	y_i
1	-1	-1	-1	y_1
2	1	-1	-1	y_2
3	-1	1	-1	y_3
4	1	1	-1	y_4
5	-1	-1	1	y_5
6	1	-1	1	y_6
7	-1	1	1	y_7
8	1	1	1	y_8
9	0	0	0	y_9
10	0	0	0	y_{10}
11	0	0	0	y_{11}
12	0	0	0	y_{12}
13	$-\alpha$	0	0	y_{13}
14	$+\alpha$	0	0	y_{14}
15	0	$-\alpha$	0	y_{15}
16	0	$+\alpha$	0	y_{16}
17	0	0	$-\alpha$	y_{17}
18	0	0	$+\alpha$	y_{18}

O valor da distribuição *t-Student* é importante para o cálculo da significância dos parâmetros e é definido como a relação entre o valor do parâmetro estimado e o seu desvio padrão. O valor de ‘F’ (Fisher) é determinado pela razão entre o quadrado médio da equação ajustada (QME) e o quadrado médio do resíduo (QMR), como mostra a Equação (40). Quanto maior o valor de ‘F’, melhor será o ajuste do modelo em questão.

$$F = \frac{QME}{QMR} \quad (40)$$

O quadrado médio da equação ‘QME’ e o quadrado médio do resíduo ‘QMR’, são dados pelas Equações (41) e (42) respectivamente.

$$QME = \frac{\text{Soma dos quadrados dos valores preditos}}{\text{Número de graus de liberdade da equação}} \quad (41)$$

$$QMR = \frac{\text{Soma dos quadrados do resíduo}}{\text{Número de graus de liberdade do resíduo}} \quad (42)$$

O número de graus de liberdade da equação é igual ao número de parâmetros da equação reduzido de um e o número de graus de liberdade do resíduo é obtido pela diferença entre o número total de experimentos e o número de parâmetros existentes na equação ajustada.

O valor estatístico de ‘F’ é tabelado de acordo com o nível de significância e os graus de liberdade do resíduo e da equação. Mais detalhes sobre esta metodologia e valores tabelados de ‘F’ podem ser encontrados na literatura específica como BOX *et al.* (1978) e MYERS (1976).

2.9 Análise Canônica

Supondo que dentro da região experimental, uma determinada resposta (perda de carga, por exemplo) seja relacionada como uma função das variáveis independentes estudadas (carga de sólidos, frequência e amplitude de vibração) da seguinte forma:

$$\hat{y} = b_0 + \underline{x}'\underline{b} + \underline{x}'B\underline{x} \quad (43)$$

Sendo ‘x’, ‘b’, e ‘B’ definidos pelas matrizes:

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix}, \quad \underline{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12}/2 & \cdots & b_{1k}/2 \\ b_{21}/2 & b_{22} & \cdots & b_{2k}/2 \\ \cdots & & \cdots & \cdots \\ & & \cdots & b_{k-1,k}/2 \\ & & & b_{kk} \end{bmatrix}$$

Figura 2.9.1: Matrizes da análise canônica, Equação (43)

O ponto de máxima resposta, se existir, é dado por um conjunto de condições ($x_1, x_2, \dots, x_k$) que tornam as derivadas parciais $\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1}, \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_k}$ iguais a zero. Diferenciando a Equação (43) em relação ao vetor 'x' e igualando-a a zero, tem-se o ponto estacionário:

$$\underline{x}_0 = -\frac{1}{2} B^{-1} \underline{b} \quad (44)$$

O ponto estacionário ' $\underline{x}_0$ ' (Equação 44) pode representar um ponto de máxima ou de mínima resposta, ou ainda um ponto de sela (*saddle point*) da superfície ajustada. Para se determinar a natureza do ponto estacionário, deve-se realizar uma translação da superfície ajustada da origem o ($x_1 = 0, x_2 = 0, \dots, x_k = 0$) até o ponto estacionário ' $\underline{x}_0$ '. A superfície de resposta é então, expressa por novas variáveis, ' $w_1, w_2, \dots, w_k$,' cujos eixos correspondem aos eixos principais do sistema de contornos (Figura 2.8-2). A função em termos dessas novas variáveis é chamada de forma canônica da superfície ajustada e pode ser representada pela Equação (45):

$$\hat{y} = \hat{y}_0 + \lambda_1 w_1^2 + \lambda_2 w_2^2 + \dots + \lambda_k w_k^2 \quad (45)$$

Na qual $\hat{y}$ é a resposta estimada no ponto estacionário, ou seja, $\hat{y}_0 = b_0 + \underline{x}_0' \underline{b} + \underline{x}_0' B \underline{x}_0$; e λ_i são as raízes características da matriz 'B'. A redução da superfície de resposta ajustada para a forma canônica é chamada de análise canônica.

Devido à translação de eixos da origem até o ponto estacionário ' $\underline{x}_0$ ', a Equação (43) é reescrita em termos de um novo vetor ' $\underline{z}_0$ ', tal que ' $\underline{z}_0 = \underline{x} - \underline{x}_0$ ':

$$\hat{y} = b_0 + \underline{x}_0 \underline{b} + \underline{x}_0' B \underline{x}_0 + \underline{z}_0 \underline{b} + \underline{z}_0' B \underline{x}_0 + \underline{x}_0' B \underline{z}_0 + \underline{z}_0' B \underline{z}_0 \quad (46)$$

Considerando que $\underline{z}_0' B \underline{x}_0 = \underline{x}_0' B \underline{z}_0$ e que os três primeiros termos representam a resposta avaliada no ponto estacionário ' $\hat{y}_0$ ', a Equação (46) pode escrita como:

$$\hat{y} = \hat{y}_0 + \underline{z}_0' (\underline{b} + 2B \underline{x}_0) + \underline{z}_0' B \underline{z}_0 \quad (47)$$

$$\hat{y} = \hat{y}_0 + \underline{z}' \underline{B} \underline{z}$$

A Equação (47) representa a superfície de resposta ajustada, após a translação para a nova origem. Ante ao exposto, existe uma transformação ortogonal ' $\underline{z} = \underline{M} \underline{w}$ ' tal que:

$$\underline{z}' \underline{B} \underline{z} = \underline{w}' \underline{M}' \underline{B} \underline{M} \underline{w} = \hat{y}_0 + \lambda_1 w_1^2 + \lambda_2 w_2^2 + \dots + \lambda_k w_k^2 \quad (48)$$

Sendo ' $\underline{M}$ ' uma matriz $k \times k$ ortogonal ($\underline{M}' \underline{M} = \underline{I}_k$) e $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$ são as raízes características da matriz ' $\underline{B}$ ' e ' $\underline{I}_k$ ' é a matriz identidade. A determinação da matriz ' $\underline{M}$ ' é importante pois a transformação ' $\underline{w} = \underline{M}' \underline{z}$ ' permite relacionar as variáveis ' $\underline{Z}_i$ ' (consequentemente ' x_i ', pois $\underline{z} = \underline{x} - \underline{x}_0$) com as variáveis canônicas ' w_i '. A matriz ' $\underline{M}$ ' é a matriz dos autovetores normalizados associados às raízes características ' λ_i '.

A Figura 3.9-2 representa um exemplo dos contornos da superfície ajustada no caso de duas variáveis independentes.

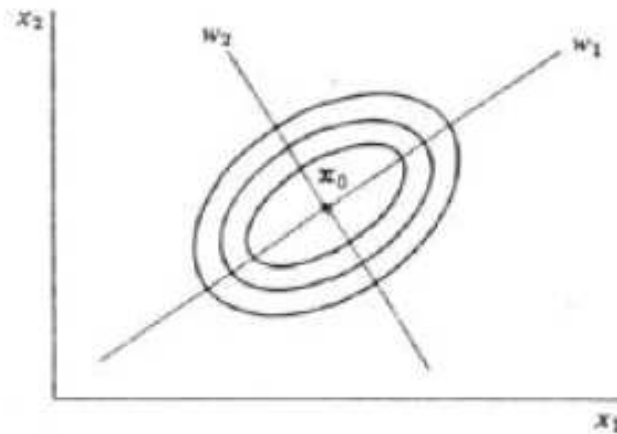


Figura 2.9-2: Forma canônica para uma superfície de resposta em duas variáveis.

A natureza do ponto estacionário é determinada pela análise das raízes características. Se $\lambda_i < 0$, um deslocamento a partir do ponto estacionário em qualquer direção implicará em um decréscimo na resposta ' $\hat{y}$ ', veja Equação (45). Neste caso, ' $\underline{x}_0$ ' é um ponto de máximo. Caso $\lambda_i > 0$, um deslocamento a partir do ponto estacionário em qualquer direção implicará em um acréscimo na resposta ' $\hat{y}$ ' qual m ponto de mínimo.

Neste caso, ' $\underline{X}_0$ ' é um ponto de mínimo. Se as raízes características possuírem sinais diferentes, então ' $\underline{X}_0$ ' é um ponto de sela.

Neste trabalho, propõe-se a análise canônica utilizando uma rotina implementada no software Maple Release 9.5. A determinação dos parâmetros de regressão do modelo (Equação 41) e os respectivos níveis de significância serão implementados utilizando-se o software Statistica na versão 5.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

As partículas usadas neste trabalho foram esferas de vidro escolhidas por serem materiais inertes e muito utilizadas na literatura. As densidades das partículas foram determinadas por picnometria. A densidade encontrada foi de $2,5 \text{ g/cm}^3$ para as esferas de vidro. O diâmetro médio das partículas foi obtido pelo método de peneiramento. O diâmetro médio de Sauter encontrado para as partículas foi de $3,89 \times 10^{-4} \text{ m}$, encontrando-se no grupo B de GELDART (1973).

3.2 Equipamento

O equipamento utilizado foi um leito horizontal de aço carbono formado por uma seção retangular de 0,9 m de comprimento, 0,34 m de largura e 0,77 m de altura. O leito era sustentado por um sistema de quatro molas conectado a um suporte de 0,74 m de altura, conforme Figura 3.2-1.

A alimentação de ar foi feita por duas entradas independentes na região plena do leito. Como a alimentação do ar foi feita de baixo pra cima na região de pleno do leito, fez-se necessário a introdução de uma curva de 90° conectada em cada entrada. Assim o ar foi direcionado para a parede do leito melhorando a distribuição do ar antes de atingir a placa distribuidora de ar. A placa distribuidora de ar consistiu de uma placa de inox de $2 \times 10^{-3} \text{ m}$ de espessura, com furos de $3 \times 10^{-3} \text{ m}$ de diâmetro a qual foi revestida com uma tela para impedir a passagem do material pelos furos. Estes furos resultaram numa área aberta de aproximadamente 18% da placa. Conforme mostrado na Figura 3.2-2, a seguir:



Figura 3.2-1: Esquema do leito vibro-fluidizado.



Figura 3.2-2: Placa distribuidora utilizada nos testes.

O ar foi fornecido ao sistema por de dois compressores radiais da marca IBRAM 7,5 cv. Os valores de velocidade e temperatura do ar foram obtidos através de um

termoanemômetro, introduzido na tubulação, da marca *TSI Incorporated* modelo 8384-M. A coleta dos dados de velocidade foi feita nas duas tubulações simultaneamente, ajustando os valores de maneira que as velocidades ficassem iguais ou mais próximas possíveis uma das outras. A queda de pressão no leito foi coletada por dois transdutores diferenciais *Coler-Parmer* modelo 68071-14 com sinal de saída de 4-20mA e faixa de 0-25 inH₂O, conectados ao longo do leito, conforme mostrado na Figura 3.2-3.

O bloco conector (SCB-68) fez a conexão entre os sinais emitidos pelo transdutor e a placa de aquisição de dados PCI 6220 da *National Instruments* (16 entradas analógicas). Os sinais digitais foram processados e analisados num microcomputador com o auxílio do *software LabVIEW® for Windows 8*, conforme mostrado na Figura 3.2-4. A frequência de coleta do sinal de pressão no leito foi ajustada através desse *software*.



Figura 3.2-3: Dois pontos de tomada de pressão ao longo do leito.

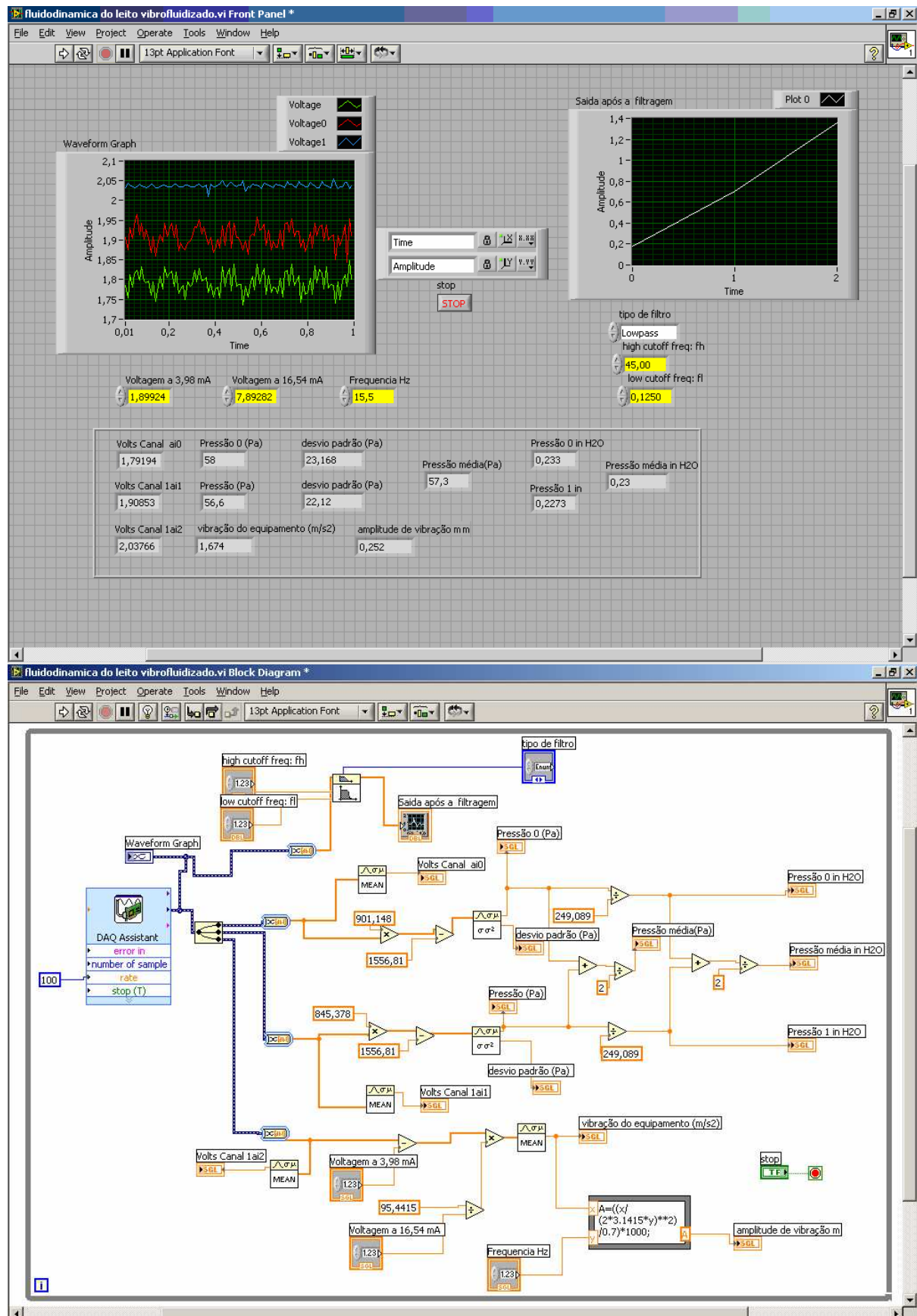


Figura 3.2-4: Esquema de aquisição de dados no software LabView 8.

As vibrações foram impostas ao sistema pelo motovibrador *Vimot* modelo M-03-4. O motovibrador é basicamente constituído por um motor trifásico assíncrono e por massas inerciais (contrapesos) reguláveis em sua excentricidade, através do posicionamento relativo entre si (ajuste da amplitude), conforme mostrado na Figura 3.2-5.



Figura 3.2-5: Esquema do motovibrador.

A amplitude de vibração foi monitorada por um acelerômetro piezelétrico da marca PCB *Piezolectric* modelo 646 B00, mostrado na Figura 3.2-6, o qual enviou o sinal (4 a 20mA) ao microcomputador através da placa de aquisição de dados. A grandeza do sinal é dada em aceleração numa faixa de 0 a 10 g_{rms} . A frequência de vibração foi ajustada por um inversor de frequência da marca *WEG* modelo *CFW 08*, Figura 3.2-7 .



Figura 3.2-6: Acelerômetro piezoelétrico.



Figura 3.2-7: Inversor de frequência.

Um esquema da unidade pode ser vista na Figura 3.2-8.



Figura 3.2-8: Unidade experimental.

4.1 Métodos

Antes de iniciar os ensaios de fluidodinâmica do leito foram necessárias algumas mudanças na estrutura do equipamento e na configuração final da unidade.

A Figura 3.3-1 ilustra algumas das modificações que foram feitas.



Figura 3.3-1: Esquema do leito antes de algumas modificações.

Conforme mostrado na figura anterior foram necessárias mudanças na base de sustentação do leito para que o mesmo adquirisse maior estabilidade. Também foram instalados visores ao longo do leito para que fosse possível visualizar o comportamento das partículas durante os ensaios.

Antes de chegar à configuração mostrada na Figura 3.2-7 foram testadas outras configurações, porém sem sucesso. Conforme mostrado na Figura 3.3-2, a seguir.

As duas primeiras configurações continham muitos acessórios nas tubulações de ar, ou seja, maior perda de carga, reduzindo assim a eficiência (vazão) dos sopradores não sendo possível atingir a vazão de ar necessária para fluidizar as partículas no leito.

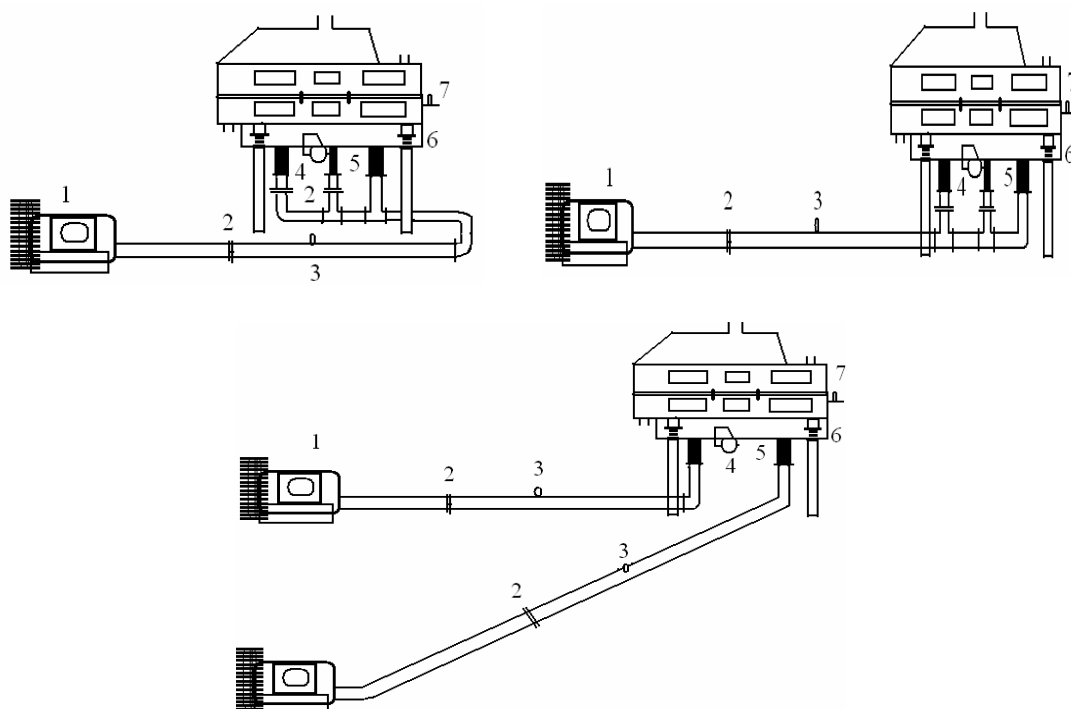


Figura 3.3-2: Configurações testadas para instalação do leito. (1) compressor, (2) válvula, (3) tomada de velocidade do ar, (4) motovibrador, (5) mangueiras de conexão, (6) molas helicoidais, (7) acelerômetro.

Também foram testadas duas placas distribuidoras de ar. A primeira placa distribuidora de ar consistia de uma placa de aço de 2×10^{-3} m de espessura, com furos retangulares de 5×10^{-3} m de comprimento e 2×10^{-3} m de largura conforme mostrado na Figura 3.3-3. Estes furos resultaram numa área aberta de aproximadamente 11%.



Figura 3.3-3: Primeira placa distribuidora testada no leito.

Porém esta placa aumentou consideravelmente a perda de carga no leito, o que também trazia maior dificuldade de se atingir a vazão necessária para fluidizar as partículas no leito.

Após a obtenção da configuração final de montagem do leito iniciaram-se os testes. Porém antes de serem definidas as condições de operação (amplitude, frequência e carga de material) foram realizados testes preliminares para avaliar a estabilidade do leito, ou seja, em quais condições o leito apresentava um bom comportamento vibracional.

Apesar de outras variáveis como diâmetro e densidade da partícula, por exemplo, influenciarem na dinâmica do leito, optou-se por analisar apenas as variáveis relacionadas ao leito (carga de partículas, amplitude e frequência de vibração). Isto devido às dificuldades na montagem do leito e o pouco tempo disponível para uma análise mais completa das variáveis relacionadas à partícula e ao leito.

A Tabela 3.3-1 apresenta as combinações de amplitude e frequência de vibração testadas para avaliar o sistema de vibração, no qual utilizou-se 6kg de partículas de vidro no leito.

Tabela 3.3-1: Combinações de frequência e de amplitude para teste de estabilidade.

Teste	Amplitude (mm)	Frequência (Hz)	Adimensional de vibração (Γ)
1	0,396	20	0,637
2	0,242	25	0,609
3	0,193	30	0,699
4	0,171	35	0,843
5	0,466	20	0,750
6	0,291	25	0,732
7	0,244	30	0,884
8	0,221	35	1,089
9	0,527	20	0,848
10	0,354	25	0,890
11	0,292	30	1,058
12	0,271	35	1,336
13	0,588	20	0,946
14	0,386	25	0,971
15	0,328	30	1,188
16	0,310	35	1,528

Conforme apresentado na Seção 3.2 o ajuste da amplitude foi feito pela alteração dos contrapesos do motovibrador. Este ajuste pode ser feito utilizando uma escala presente no motovibrador que varia de 0 a 100%.

A principal forma de estudar a fluidodinâmica de leitos vibro-fluidizados é pela utilização da curva característica, a qual fornece a relação entre a queda de pressão e a velocidade do ar no leito. Esta curva foi obtida depois de estabelecida as condições de vibração e carga de partículas no leito. Depois de estabelecido o regime de vibro-fluidização, os valores de queda de pressão no leito foram registrados simultaneamente com a velocidade decrescente do ar conforme descrito pela metodologia clássica apresentada por BRATU; JINESCU (1971). Esta metodologia foi adotada para fins de comparação com trabalhos de diversos autores. Para cada curva construída foram feitas réplicas para testar a reprodutividade dos dados experimentais obtidos.

A calibração dos transdutores foi feita utilizando um micromanômetro digital *Alnor AXB530*. O acelerômetro fornece sinais de aceleração do equipamento que através da Equação (21) que relaciona a amplitude e a frequência de vibração com a aceleração do equipamento foi possível encontrar os valores de amplitude de vibração no *software LabView*.

O sistema de aquisição de dados (*LabView*) empregado na coleta de queda de pressão no leito, também forneceu os valores de desvio padrão da queda de pressão. Cada valor de queda de pressão foi obtido pela média de 100 pontos coletados num intervalo de 1 segundo.

Velocidade mínima de vibro-fluidização e velocidade mínima de mistura

A velocidade mínima de vibro-fluidização (u_{vmf}) foi obtida pela intersecção de duas retas sobre a curva característica de queda de pressão em relação à velocidade do ar no leito conforme descrito no item 2.5.2.

A velocidade mínima de mistura (u_{mm}) poderia ser obtida com a visualização do comportamento das partículas, observando os visores instalados ao longo do leito, durante a diminuição da velocidade do ar. Porém alguns fatores prejudicaram a

visualização do comportamento das partículas. Uma das dificuldades encontradas foi a visualização ao longo de toda a extensão do leito não ficando precisa na condição na qual as partículas iniciaram a movimentação no leito.

Análise estatística dos parâmetros vibracionais e carga de material na fluidodinâmica do leito vibro-fluidizado

Com o objetivo de analisar a influência dos parâmetros vibracionais (frequência e amplitude de vibração) e carga de partículas (variáveis independentes), sobre a queda de pressão e a velocidade na condição de mínima vibro-fluidização (variáveis dependentes), utilizou-se a técnica de planejamento composto central (PCC), conforme mostrado na Tabela 3.3-2. Esta técnica permite correlacionar e quantificar os efeitos individuais, interações entre as variáveis e os termos quadráticos (não lineares) de cada variável e obter superfícies de respostas.

Os níveis de cada fator foram escolhidos de acordo com as limitações práticas do equipamento que foram determinadas por testes preliminares.

Tabela 3.3-2: Planejamento composto central com quatro réplicas no centro.

Teste	x_1	x_2	x_3
1	1	1	1
2	-1	1	1
3	1	-1	1
4	-1	-1	1
5	1	1	-1
6	-1	-1	-1
7	1	1	-1
8	-1	-1	-1
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	$-\alpha$	0	0
14	α	0	0
15	0	$-\alpha$	0
16	0	α	0
17	0	0	$-\alpha$
18	0	0	α

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados serão apresentados em quatro partes. A primeira etapa mostra os resultados do teste de estabilidade do leito no qual foram definidos os limites operacionais. A segunda analisa a reprodutibilidade dos dados através das curvas características para leito fluidizado (sem vibração) e leito vibro-fluidizado. A terceira apresenta a análise fluidodinâmica para leitos vibro-fluidizados através das curvas características de queda de pressão e desvio padrão em relação à velocidade superficial do gás, obtidas do planejamento composto central. A quarta etapa exibe um tratamento estatístico dos resultados obtidos de queda de pressão e velocidade na mínima vibro-fluidização, encontrados pelo método gráfico apresentado na Seção 2.5.2.

4.1 Testes de estabilidade do leito

Conforme foi relatado na Seção 3.3 fez-se necessário um teste de estabilidade no leito antes de iniciarmos os experimentos, conforme mostrado na Tabela 4.1-1. Os testes foram realizados com uma carga de partículas de 6kg e 0,43m/s de ar no leito. Através deste teste foram definidos os limites operacionais.

Tabela 4.1-1: Resultado dos testes preliminares de estabilidade.

Teste	Amplitude (mm)	Frequência (Hz)	Adimensional de vibração (Γ)	Comportamento
1	0,396	20	0,637	Leito estável, pouca agitação das partículas.
2	0,242	25	0,609	Leito estável
3	0,193	30	0,699	Leito estável
4	0,171	35	0,843	Deslocamento do material
5	0,466	20	0,750	Instabilidade da base do leito
6	0,291	25	0,732	Instabilidade da base do leito

Continuação da Tabela 4.1-1: Resultado dos testes preliminares de estabilidade.

Teste	Amplitude (mm)	Frequência (Hz)	Adimensional de vibração (Γ)	Comportamento
7	0,244	30	0,884	Maior estabilidade do leito
8	0,221	35	1,089	Deslocamento do material
9	0,527	20	0,848	Instabilidade da base do leito
10	0,354	25	0,890	Instabilidade da base do leito
11	0,292	30	1,058	Maior estabilidade do leito
12	0,271	35	1,336	Deslocamento do material
13	0,588	20	0,946	Instabilidade da base do leito
14	0,386	25	0,971	Instabilidade da base do leito
15	0,328	30	1,188	Maior estabilidade do leito
16	0,310	35	1,528	Deslocamento do material

De acordo com o que foi apresentado nos teste de estabilidade, quando utilizado altas frequências de vibração o leito de partículas de vidro apresenta um comportamento instável com deslocamento do material para as extremidades do leito. Assim definiram-se alguns limites operacionais, mostrado na Tabela 4.1-2.

Tabela 4.1-2: Limites operacionais.

15Kg			5Kg		
Frequência (Hz)	Amplitude (mm)		Frequência (Hz)	Amplitude (mm)	
	Máxima	Mínima		Máxima	Mínima
10	0,3	-	-	-	-
12	0,4	-	-	-	-
13	0,81	0,078	13	0,91	0,072
14	1,2	0,067	14	1	0,0406
15	0,95	0,076	15	0,97	0,063
16	0,81	0,074	16	0,74	0,137
17	0,65	0,14	17	0,63	0,14
18	0,57	0,14	18	0,54	0,125
18,5	0,55	0,14	18,5	0,55	0,111
19	0,55	0,133	19	0,5	0,104
20	0,55	-	19,5	0,47	0,0895
-	-	-	20	0,45	0,08

Portanto com os testes preliminares de estabilidade do leito para partículas inertes de vidro foi possível determinar as condições de vibração nas quais o leito apresentou

maior estabilidade selecionando assim um intervalo de 13 a 16Hz para a frequência de vibração e limites de 0,137 a 0,74 mm (pico) para amplitude de vibração do leito.

Após a definição dos limites operacionais foi definido o planejamento de experimentos para racionalizar os esforços na condução dos ensaios e avaliar a influência das variáveis. As condições deste planejamento estão apresentadas na Tabela 4.1-3.

Tabela 4.1-3: Planejamento composto central com quatro réplicas no centro.

Teste	Amplitude (mm)	Frequência (Hz)	Adimensional de vibração - Γ	Massa (kg)
1	0,650	15,50	0,628	14
2	0,250	15,50	0,242	14
3	0,650	13,70	0,491	14
4	0,250	13,70	0,189	14
5	0,650	15,50	0,628	7
6	0,250	15,50	0,242	7
7	0,650	13,70	0,491	7
8	0,250	13,70	0,189	7
9	0,450	14,60	0,386	10,5
10	0,450	14,60	0,386	10,5
11	0,450	14,60	0,386	10,5
12	0,450	14,60	0,386	10,5
13	0,167	14,60	0,143	10,5
14	0,733	14,60	0,629	10,5
15	0,450	13,33	0,322	10,5
16	0,450	15,87	0,456	10,5
17	0,450	14,60	0,386	5,6
18	0,450	14,60	0,386	15,4

A Equação (39) da Seção 2.7 mostra a codificação das variáveis que foram organizadas na matriz de planejamento acima, segundo os valores da Tabela 4.1-4 para $x_i=1$; -1 ; $-1,414$; $1,414$ e 0 .

Tabela: 4.1-4: Adimensionalização das variáveis

Variável	Equação da variável codificada
Amplitude	$x_1 = \frac{\text{Amplitude} - 0,45\text{mm}}{(0,65\text{mm} - 0,25\text{mm}) / 2}$
Frequência	$x_2 = \frac{\text{Frequência} - 14,6\text{Hz}}{(15,5\text{Hz} - 13,7\text{Hz}) / 2}$
Massa	$x_3 = \frac{\text{Massa} - 10,5\text{Kg}}{(14\text{Kg} - 7\text{Kg}) / 2}$

Um resumo das condições experimentais utilizadas está descrito na Tabela 4.1-5 a seguir:

Tabela 4.1-5: Resumo das condições utilizadas no trabalho.

Parâmetro	Valores
d_p (m)	$3,89 \times 10^{-4}$
Γ	0,143 a 0,628
m (Kg)	5,6 a 15,4
A (mm)	0,167 a 0,733
f (Hz)	13,33 a 15,87

4.2 Reprodutibilidade dos dados

A reprodutibilidade das curvas características de queda de pressão e de desvio padrão foram feitas para leito fluidizado (sem vibração) utilizando partículas de vidro de $3,89 \times 10^{-4}$ m de diâmetro e 10,5kg de massa. Também foram feitas réplicas para leito vibro-fluidizado utilizando a mesma partícula e mesma carga, porém com 14,6Hz de frequência e 0,45mm de amplitude.

A Figura 4.2-1 exibe a curva característica de leito fluidizado com regiões bem definidas, tanto para leito fixo como para o leito fluidizado. Foi obtida uma boa reprodutibilidade dos dados, dentro da faixa de erro experimental. Para as curvas de desvio padrão obteve uma melhor reprodutibilidade dos dados tanto na região de leito fixo quanto na região de plena fluidização, mostrando o bom comportamento do leito sem vibração.

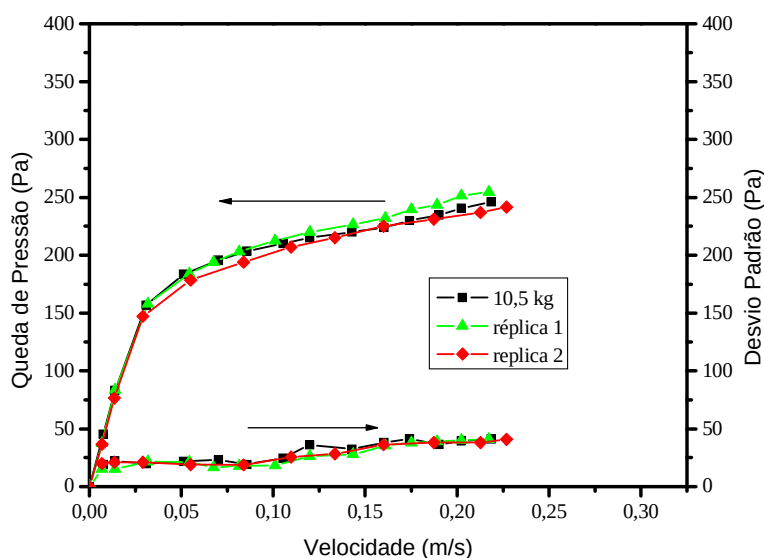


Figura 4.2-1: Réplicas para leito fluidizado.

Também foi obtida uma boa reprodutibilidade dos dados para leito vibro-fluidizado conforme mostrado na Figura 4.2-2, no qual tanto a queda de pressão quanto o desvio padrão apresentaram uma adequada reprodutibilidade. Estas condições de vibração foram definidas pelo planejamento composto central no qual temos quatro pontos centrais com mesma condição de vibração, definidas como testes 9, 10, 11 e 12.

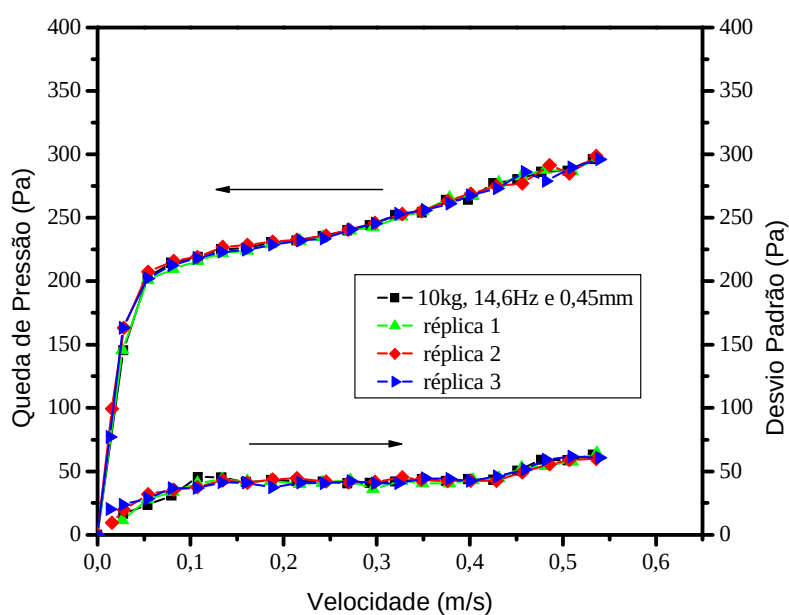


Figura 4.2-2: Quatro pontos centrais do planejamento Composto Central.

Nota-se nas figuras apresentadas, para o leito utilizado, não ser imediata a associação da curva de desvio padrão com o início da fluidização. A reprodutibilidade dos dados torna clara a qualidade do equipamento sob estas condições de vibração.

4.3 Análise Fluidodinâmica dos leitos Vibro-fluidizados

Conforme definido no planejamento de experimentos trabalhou-se com cinco níveis de frequência de vibração, amplitude de vibração e massa de partículas. Foi feito inicialmente uma análise para mesma massa de partículas e variando ora a amplitude ora a frequência.

A Figura 4.3-1 exibe a curva característica de queda de pressão e de desvio padrão em relação a velocidade superficial do gás para leito com 14kg de partículas.

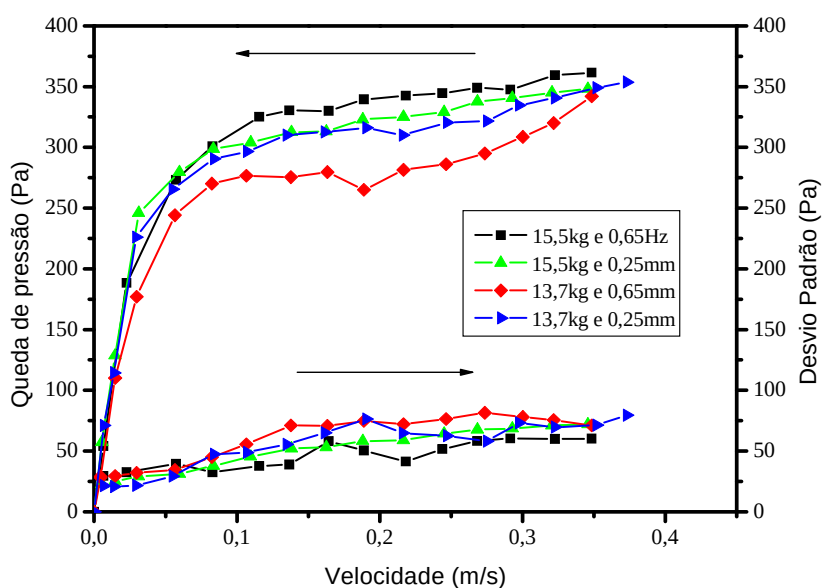


Figura 4.3-1: Curva característica para leito com massa de 14kg.

Nesta etapa foram analisadas as curvas características dando ênfase a influência dos parâmetros de vibração na queda de pressão e a velocidade mínima de vibro-fluidização.

Nos testes 1 e 3, para os maiores níveis de amplitude (0,65mm), tem-se uma suavização da curva na região de transição de leito fixo para leito fluidizado. Têm-se também os menores níveis de queda de pressão na região de leito fixo isso devido a maior agitação das partículas facilitando a passagem do ar.

Na Figura 4.3-1, para carga de 14kg, nota-se que para o nível mais baixo de amplitude de vibração (testes 2 e 4) uma variação da frequência de vibração não gerou um efeito muito perceptível na queda de pressão, tanto na região de leito fixo quanto fluidizado. Porém para o nível mais alto de amplitude (0,65mm) e mais baixo de frequência de vibração (13,7Hz), os níveis de queda de pressão foram inferiores às demais condições apresentadas nesta figura.

Com a análise da influência dos parâmetros vibracionais (amplitude e frequência) na velocidade mínima de vibro-fluidização nota-se que para uma frequência fixa de 15,5Hz (testes 1 e 2) ou 13,7Hz (testes 3 e 4), a variação na amplitude de vibração praticamente não influenciou a velocidade mínima de vibro-fluidização. Já para um aumento da frequência de vibração, para uma mesma amplitude, percebe-se uma redução na velocidade mínima de vibro-fluidização (comparação dos testes 1 e 3 ou 2 e 4). Estes resultados podem ser melhor observados nas Figuras A1, A2, A3, A4 no Apêndice A.

Por meio da Figura 4.3-1 também é possível analisar o comportamento do desvio padrão da queda de pressão. Observa-se nesta figura que para a região de leito fixo o desvio padrão manteve-se praticamente inalterado em relação a vibração imposta. Já na região de leito fluidizado houve um pequeno aumento nos valores de desvio padrão quando se utilizou uma amplitude de vibração maior e baixa frequência (teste 3) comparada com os demais testes. Obteve-se valores mais baixos de desvio padrão quando foi utilizado valor maior de amplitude e frequência de vibração (teste 1). Já quando se utilizou baixos valores de amplitude de vibração e variou a frequência de vibração, obteve-se valores intermediários de desvio padrão (testes 2 e 4) também comparado com os demais testes da Figura 4.2-1.

A Figura 4.3-2 mostra as curvas características de queda de pressão e de desvio padrão para leito com carga (massa) de 7kg de esfera de vidro.

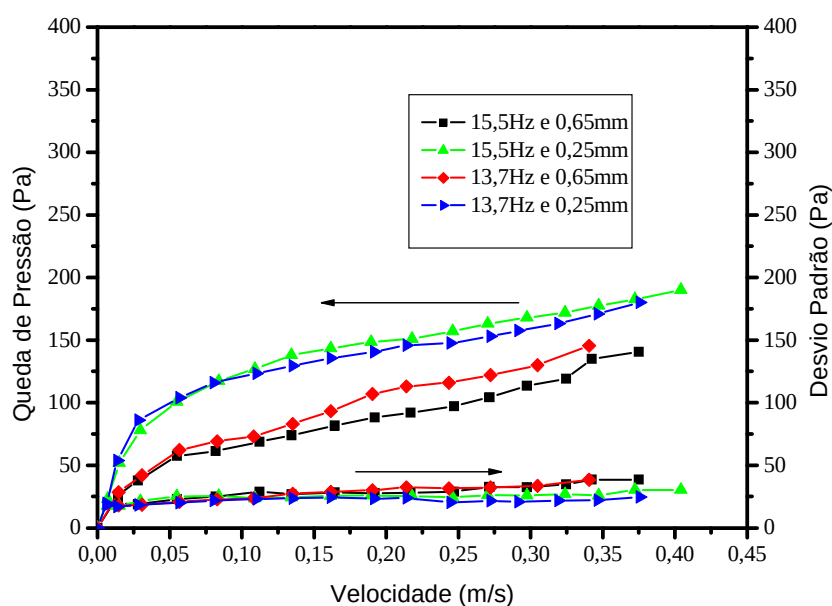


Figura 4.3-2: Curva característica para leito com massa de 7Kg de esfera.

Percebe-se por meio da Figura 4.3-2 para carga de 7kg que nos testes 5 e 7 as curvas de queda de pressão no leito são muito semelhantes as curvas apresentadas por STRUMILLO; PAKOWSKI (1980) para leitos vibro-fluidizados (a curva 'd' da Figura 2.5-5). Nestas condições torna-se difícil a definição da condição de mínima fluidização, ficando a critério da sensibilidade de avaliação do pesquisador.

A Figura 4.3-2 mostra que para um leito mais raso (menor carga) a variação na frequência mantendo a amplitude de vibração constante quase não influenciou na queda de pressão do leito na região de leito fixo (testes 5 e 7 e testes 6 e 8). Entretanto um aumento da amplitude de vibração mantendo a frequência de vibração fixa resultou numa redução da queda de pressão (testes 5 e 6 ou teste 7 e 8). Este comportamento também foi observado por DALEFFE (2005).

Para a velocidade mínima de vibro-fluidização o efeito da frequência e da amplitude de vibração pouco influenciou o valor dessa variável, percebendo uma pequena redução quando se utilizou o nível mais elevado de frequência de vibração (testes 5 e 6).

Também percebe-se um aumento do desvio padrão da queda de pressão com o aumento da amplitude de vibração. Os maiores valores de desvio padrão foram obtidos nos testes 5 e 7 que foram realizados no maior nível de amplitude (0,65mm). Estes

maiores valores de desvio padrão ocorreram provavelmente devido a maior movimentação e intensidade de colisão das partículas com a placa distribuidora de ar enquanto se aumenta a velocidade do ar incrementando as oscilações da queda de pressão. Os valores de desvio padrão foram praticamente constantes com a frequência para baixas amplitudes (testes 6 e 8).

A Figura 4.3-3 ilustra o efeito da amplitude de vibração no leito vibro-fluidizado para frequência de 14,6Hz e massa de 10,5kg.

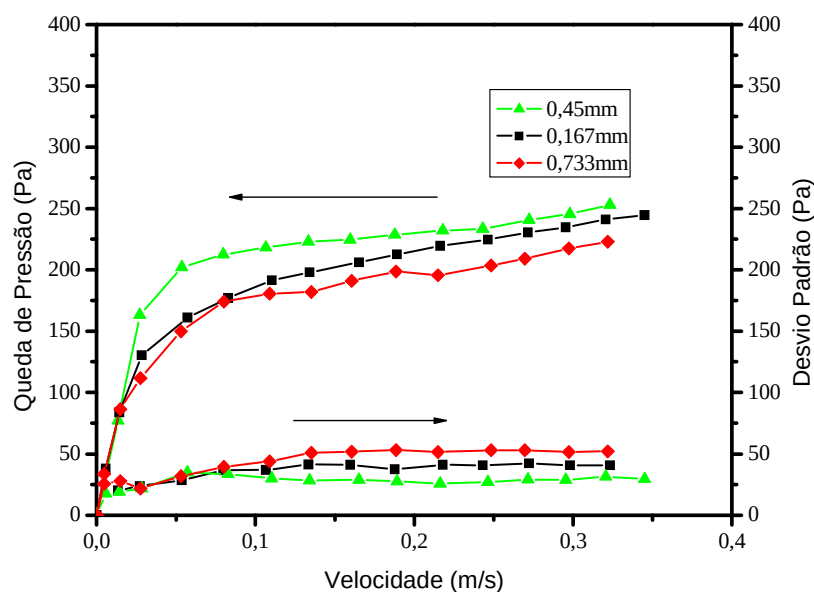


Figura 4.3-3: Efeito da amplitude no comportamento do leito.

Neste gráfico percebe-se uma relação direta entre a amplitude de vibração e a queda de pressão no leito, já que quanto maior a amplitude de vibração menor a perda de carga. Entretanto para amplitude de 0,45mm obteve-se uma maior perda de carga quando comparada com a obtida na amplitude de 0,167mm, não sendo explicado pela literatura, podendo ser, portanto um efeito da estrutura do nosso sistema de vibração que apresenta certa dificuldade em manter uma vibração estável no nível de amplitude tão baixa (0,167mm). No entanto a variação na amplitude de vibração não influenciou significativamente na velocidade de mínima vibro-fluidização para as condições de massa (10,5kg) e frequência de vibração (14,6Hz) estabelecidas.

Na curva de desvio padrão nota-se a sobreposição das curvas na região de leito fixo e uma tendência em aumentar o desvio padrão da queda de pressão quando

aumentada a amplitude de vibração. Também podendo ser explicada pela movimentação mais desordenada das partículas aumentando a oscilação na medição da queda de pressão.

A Figura 4.3-4 exibe o efeito da frequência de vibração no leito de 10,5kg de partículas e amplitude de 0,45mm.

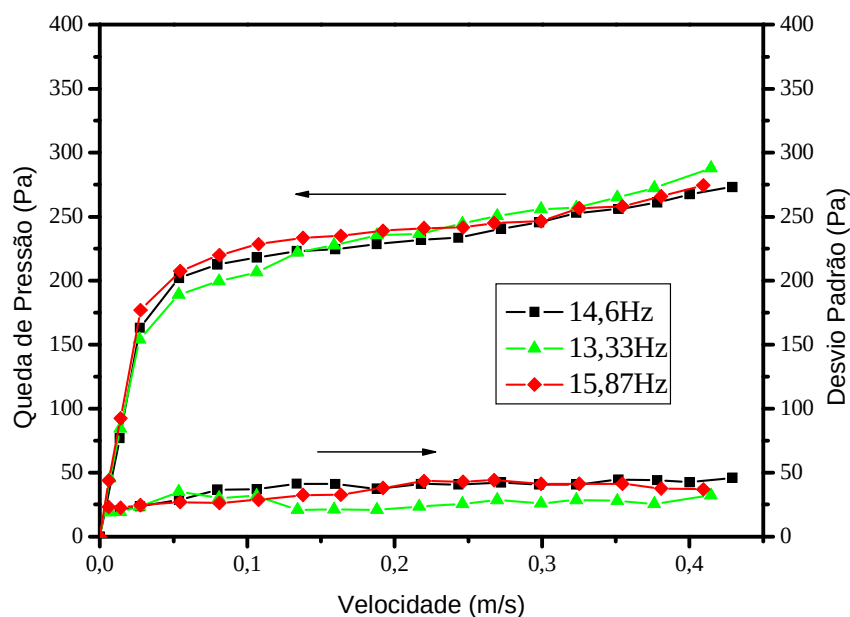


Figura 4.3-4: Efeito da frequência no comportamento do leito; teste 12: 14,6Hz; teste 15: 13,33Hz; teste16: 15,87Hz.

Observa-se na Figura 4.3-4 que a frequência pouco influenciou a queda de pressão do leito para as condições de 10,5Kg de carga e 0,45mm de amplitude para o leito utilizado. Já na velocidade mínima de vibro-fluidização houve uma pequena redução quando se aumentou a frequência de vibração.

Quando analisada as curvas de desvio padrão da queda de pressão, percebe-se que com uma frequência menor (13,33Hz) os níveis de desvio padrão da queda de pressão na região de leito fluidizado foram inferiores as demais condições.

A Figura 4.3-5 mostra o efeito da carga de partículas no comportamento fluidodinâmico do leito utilizando a amplitude de vibração de 0,45mm e frequência de vibração de 14,6Hz.

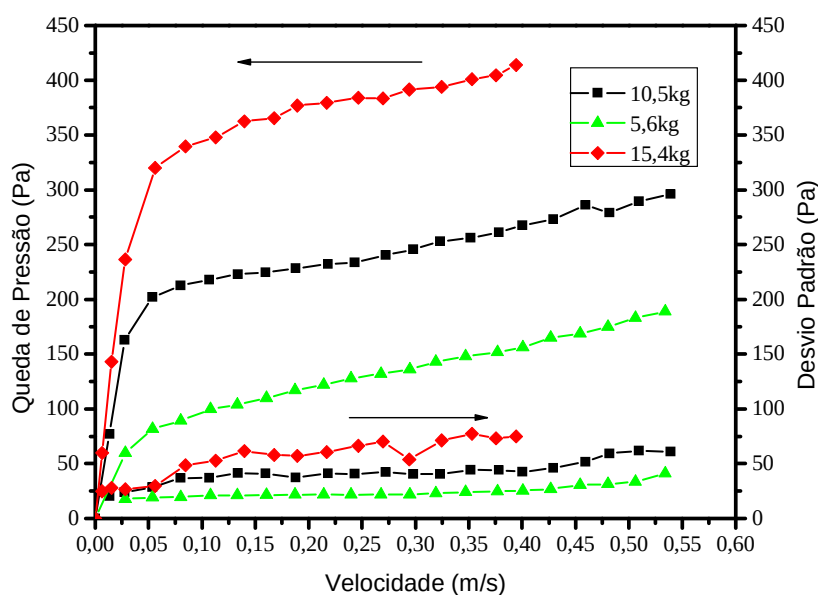


Figura 4.3-5: Efeito da massa no comportamento do leito. Amplitude de 0,45mm e frequência de 14,6Hz.

A Figura 4.3-5 ilustra o efeito da massa de sólidos na queda de pressão e na velocidade mínima de vibro-fluidização para valores de 0,45mm de amplitude e 14,6Hz de frequência de vibração. Percebe-se que quanto maior a massa de partículas maior a perda de carga no leito. Já para a velocidade mínima de vibro-fluidização este efeito foi menor, porém quanto maior a carga de partículas (massa) maior o valor dessa velocidade.

Para a curva de desvio padrão, observa-se que o aumento da massa de partículas no leito gerou um incremento do desvio padrão da queda de pressão na região de leito fluidizado. Para a região de leito fixo a massa de partículas no leito não influenciou nos valores de desvio padrão, apresentando resultados muito próximos.

A determinação das velocidades mínima de vibro-fluidização utilizando algumas correlações reportadas na literatura não apresentaram valores próximos aos encontrados experimentalmente (graficamente). Estes resultados provavelmente podem ser explicados pelo fato das correlações para o cálculo da velocidade mínima de vibro-fluidização terem sido encontradas para leitos com geometria bem diferente da utilizada no equipamento aqui estudado.

4.4 Análise Estatística

As condições experimentais seguiram um planejamento composto central como definido no Capítulo 3.

Através da análise estatística tornou-se possível quantificar o efeito de cada variável (amplitude, frequência e massa de partículas) e de suas interações na queda de pressão do leito e na velocidade mínima de vibro-fluidização. A Tabela 4.4-1 mostra as condições de operação utilizadas nos experimentos e suas respectivas respostas de queda de pressão no leito e velocidade de mínima vibro-fluidização

Tabela 4.4-1: Efeito das variáveis investigadas nas respostas de queda de pressão e velocidade do gás.

Testes	Amplitude (mm)		Frequência (Hz)		Massa (Kg)		ΔP_{mvf} (Pa)	u_{mvf} (m/s)
1	1	0,65	1	15,5	1	14	305,93	0,036
2	-1	0,25	1	15,5	1	14	296,52	0,035
3	1	0,65	-1	13,7	1	14	274,666	0,044
4	-1	0,25	-1	13,7	1	14	301,39	0,044
5	1	0,65	1	15,5	-1	7	50,67	0,031
6	-1	0,25	1	15,5	-1	7	120,72	0,028
7	1	0,65	-1	13,7	-1	7	53,56	0,037
8	-1	0,25	-1	13,7	-1	7	119,84	0,036
9	0	0,45	0	14,6	0	10,5	211,32	0,043
10	0	0,45	0	14,6	0	10,5	207,36	0,04
11	0	0,45	0	14,6	0	10,5	211,32	0,04
12	0	0,45	0	14,6	0	10,5	209,71	0,04
13	-1,414	0,167	0	14,6	0	10,5	182,54	0,037
14	1,414	0,733	0	14,6	0	10,5	164,88	0,037
15	0	0,45	-1,414	13,33	0	10,5	241,18	0,042
16	0	0,45	1,414	15,87	0	10,5	224,65	0,034
17	0	0,45	0	14,6	-1,414	5,6	84,83	0,037
18	0	0,45	0	14,6	1,414	15,4	346,636	0,0422

4.4-1 Efeito da Amplitude

Os efeitos da amplitude na queda de pressão e na velocidade mínima de vibrofluidização foram analisados comparando os testes 13 e 14 no qual se tem os níveis ‘ $-\alpha$ ’ e ‘ $+\alpha$ ’ para amplitude, correspondendo aos valores de 0,167mm e 0,733mm de amplitude. Para estes níveis de amplitude trabalhou-se com frequência de 14,6Hz e massa de 10,5Kg. Para estes valores obteve-se uma redução da queda de pressão quando aumentada a amplitude de vibração. Entretanto para a velocidade mínima de vibrofluidização não houve uma influência significativa, conforme mostra Figura 4.4-1.

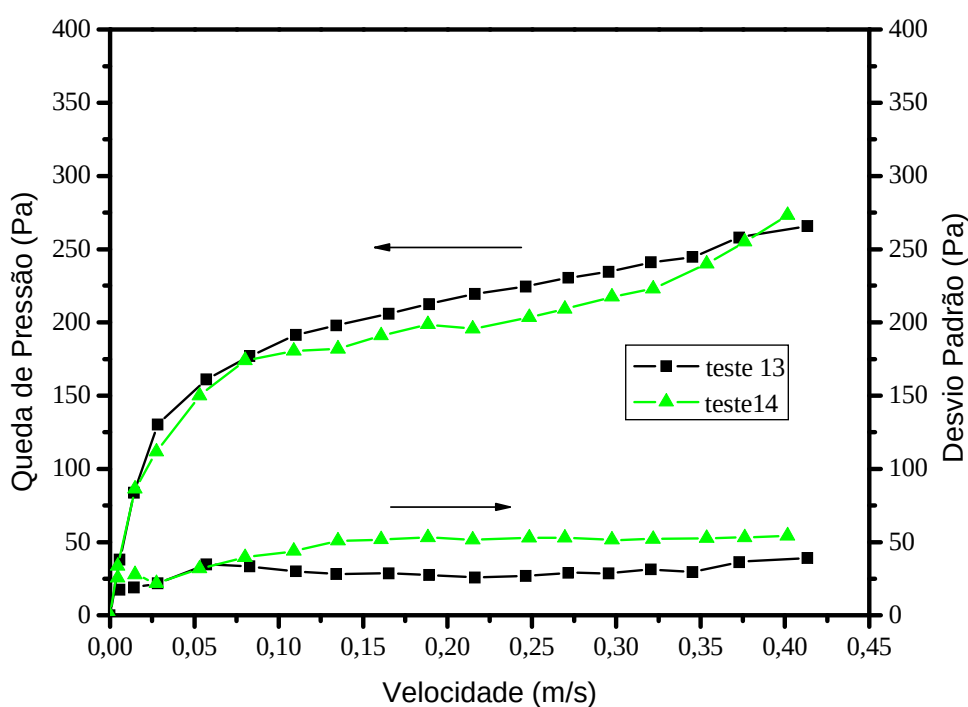


Figura 4.4-1: Efeito da amplitude no leito de 10,5 kg e 14,6 Hz de frequência.

4.4-2 Efeito da Frequência

Os efeitos da frequência na queda de pressão e na velocidade mínima de vibrofluidização foram analisados comparando os testes 15 e 16, para os níveis ‘ $-\alpha$ ’ e ‘ $+\alpha$ ’ para a frequência. Percebeu-se uma pequena redução no nível da queda de pressão na

região de plena fluidização quando se aumentou a frequência de vibração. Quanto a velocidade mínima de vibro-fluidização também se observou uma redução quando aumentada a frequência de 13,33Hz para 15,87Hz, conforme mostrado na Figura 4.4-2.

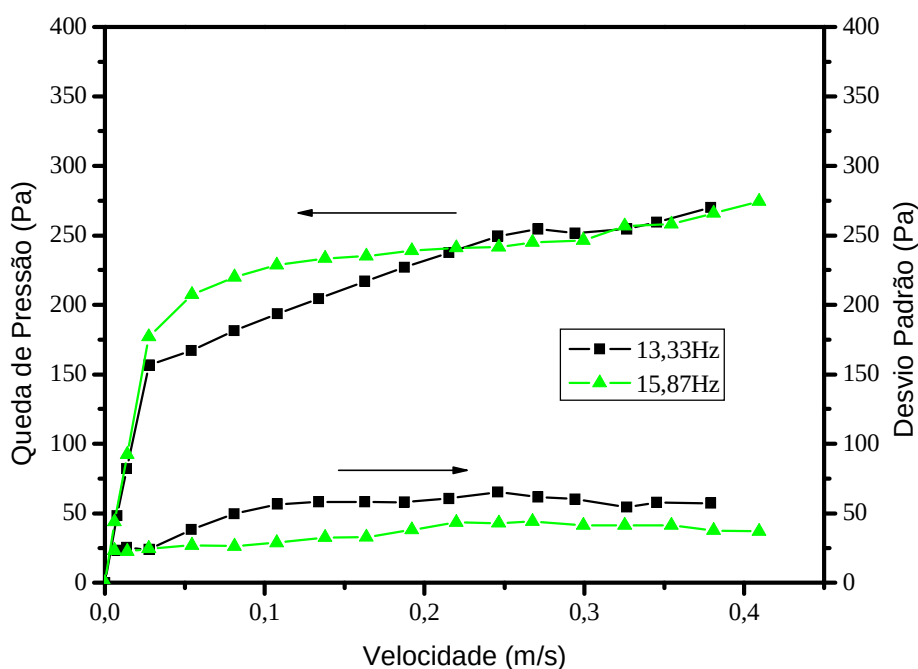


Figura 4.4-2: Efeito da frequência no leito de 10,5 kg e 0,45mm de amplitude.

4.4-3 Efeito da Carga de Partícula

O efeito da massa pôde ser observado analisando os testes 17 e 18, níveis ‘ $-\alpha$ ’ e ‘ $+\alpha$ ’ para a massa, no qual um aumento na massa de partículas no leito de 5,6kg para 15,4kg gerou um aumento no nível da perda de carga do leito de 84,83Pa para 346,6Pa e na velocidade mínima de vibro-fluidização de 0,037m/s para 0,042m/s. Estes valores foram obtidos graficamente conforme mostrado nas Figuras A17 e A18 do Apêndice A. As condições de frequência e amplitude de vibração foram 14,6 Hz e 0,45mm, respectivamente. Conforme mostrado na Figura 4.4-3

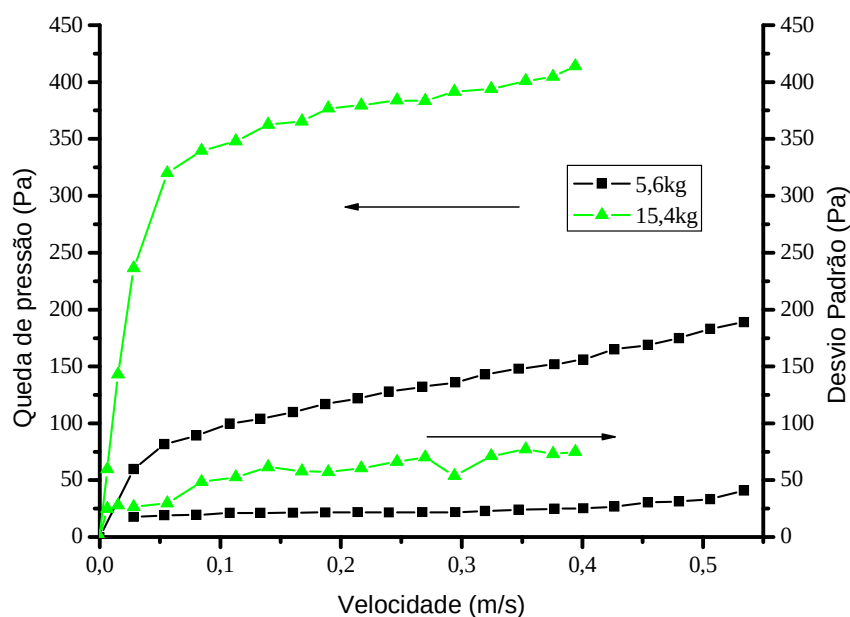


Figura 4.4-3: Efeito da massa no leito com frequência de 14,6Hz e amplitude de 0,45mm.

4.5 Análise das superfícies de resposta

A abordagem estatística para o tratamento dos dados do planejamento de experimentos permitiu uma visão mais abrangente, quantificando não só os efeitos isolados de cada variável, mas também suas eventuais interações.

4.5-1 Queda de Pressão

Pela regressão não linear múltipla, pôde-se estimar os parâmetros das variáveis codificadas: x_1 (amplitude), x_2 (frequência) e x_3 (massa); e os valores de t de *Student* obtidos da análise de variância da regressão para cada parâmetro. Com os valores de t de *Student* foram realizados testes de hipóteses, sendo que as variáveis cujos parâmetros relacionados possuem nível de significância superior a 5 % são consideradas não relevantes e eliminadas da equação empírica. A significância do modelo foi avaliada utilizando o quadrado do coeficiente de correlação múltipla, bem como pela análise de

resíduos. A Tabela 4.5-1 apresenta os parâmetros significativos e os níveis de significância de cada variável codificada ajustada com um coeficiente quadrático de correlação de 0,98.

Tabela 4.5-1: Parâmetros da regressão múltipla para a pressão.

Variável	Parâmetro	Desvio Padrão	Significância
Constante	216,01	4,395935	0,00000
x_1	-14,88	7,613982	0,00179
x_1x_1	-23,38	9,325209	0,00024
x_3	100,33	7,613982	0,00000
x_1x_3	14,88	9,325178	0,00709

Com a eliminação dos parâmetros não significativos e suas respectivas variáveis, foi então encontrada a equação preditiva para a queda de pressão. A Equação (50) permite avaliar os efeitos de cada variável na resposta estudada, determinando assim a intensidade dessa influência.

$$\Delta P = 216,01 - 14,88x_1 - 23,38x_1x_1 + 100,33x_3 + 14,88x_1x_3 \quad (50)$$

Pela análise dos parâmetros, pôde-se observar que a massa (x_3) apresentou maior significância, seguida da amplitude (x_1) e que a frequência (x_2) não apresentou um efeito significativo na queda de pressão. Destaca-se ainda o sinal dos parâmetros; quando positivos apontam o caráter de proporcionalidade, isto é, incrementos na variável resultam no aumento na resposta (queda de pressão). Logicamente, o sinal negativo para o parâmetro está associado ao comportamento inversamente proporcional.

A Figura 4.5-1 reporta a interpretação visual dos resultados de superfície de resposta do planejamento, apresentando efeitos não só de suas variáveis, mas também suas interações.

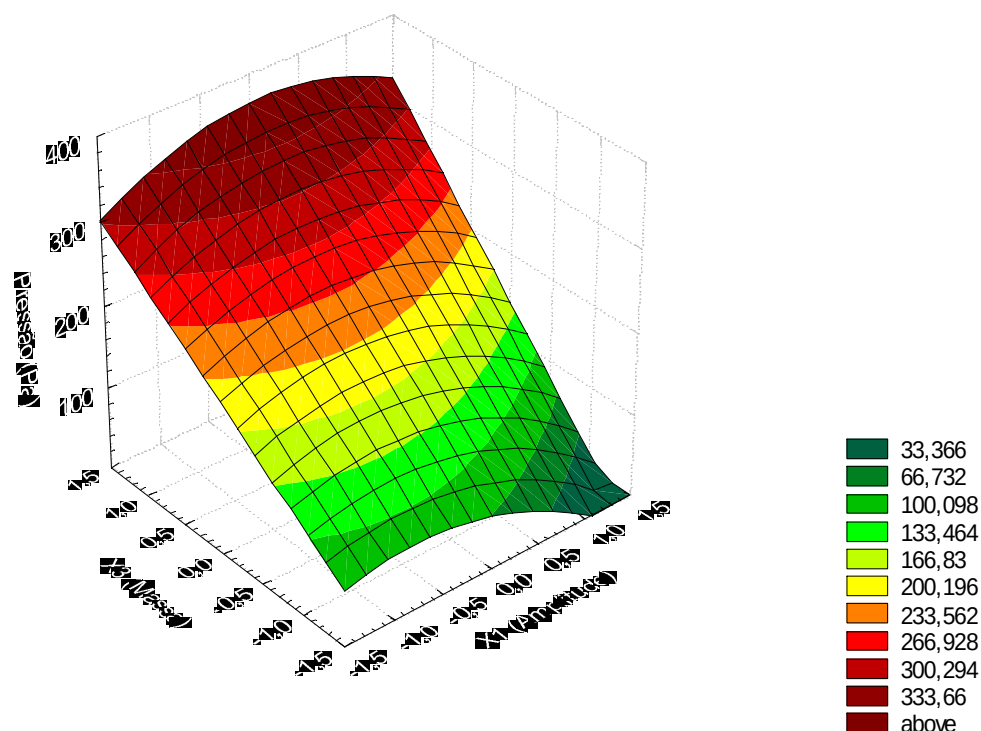


Figura 4.5-1: Superfície de resposta para a amplitude e massa.

Pôde se observar uma influência fortemente linear da massa na queda de pressão do leito para todos os níveis de amplitude, encontrando nível mais elevado para valores intermediários de amplitude. Já para a amplitude percebeu-se uma função quadrática com relação a pressão gerando valores mínimos de pressão quando utilizados valores maiores de amplitude.

4.5-2 Velocidade mínima de vibro-fluidização

De forma análoga, apresentaram-se os resultados obtidos por regressão múltipla para o planejamento tendo como resposta a velocidade mínima de vibro-fluidização. Os dados forneceram um coeficiente de correlação quadrática de 0,88. A Tabela 4.5-2 apresenta os valores dos parâmetros para as variáveis codificadas, os desvios padrão e os respectivos níveis de significância.

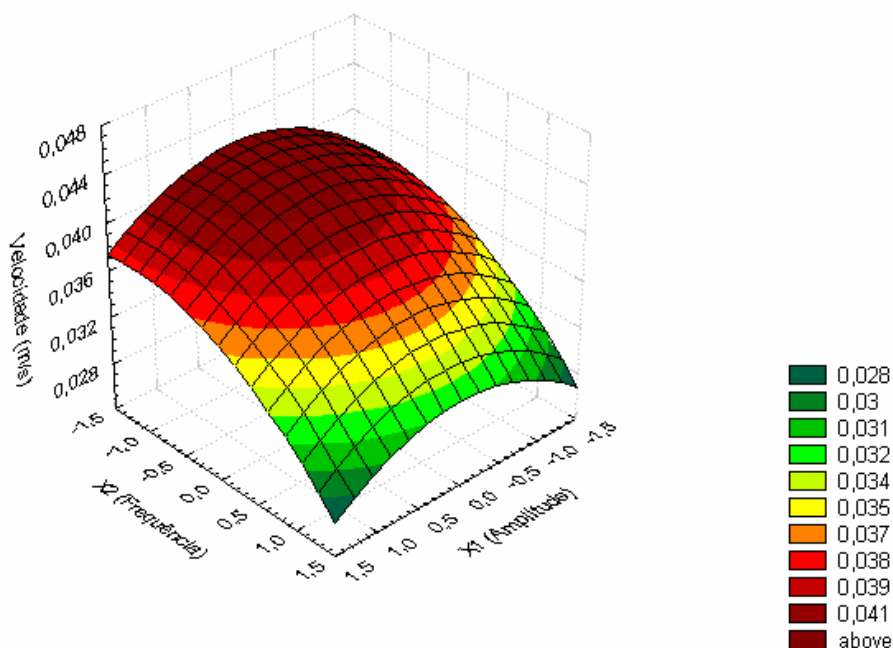
Tabela 4.5-2: Parâmetros da regressão múltipla para a velocidade.

Variável	Parâmetro	Desvio Padrão	Significância
Constante	0,04	0,00061	0,00000
x ₂	-0,0035	0,00105	0,00186
x ₃	0,0028	0,00086	0,00000
x ₁ x ₁	-0,002	0,00105	0,01154
x ₂ x ₂	-0,0015	0,00086	0,00002

Com a eliminação dos parâmetros não significativos e suas respectivas variáveis, foi então encontrada a equação preditiva para a velocidade mínima de vibro-fluidização. A Equação (51) permite avaliar os efeitos de cada variável codificada na resposta estudada, determinando assim a intensidade dessa influência.

$$u_{mvf} = 0,04 - 0,002x_1x_1 - 0,0035x_2 - 0,0015x_2x_2 + 0,0028x_3 \quad (51)$$

As Figuras 4.5-2, 4.5-3 e 4.5-4 reportam os resultados da superfície de resposta do planejamento, apresentando efeitos das variáveis na velocidade. Ressaltando a concordância em relação à ordem de grandeza e os sinais dos parâmetros estimados.

Figura 4.5-2: Superfície de resposta para amplitude e frequência ($x_3=0$)

Nota-se pelo gráfico acima que, para o nível mais baixo de frequência de vibração encontraram-se os maiores valores de velocidade sendo mais acentuado para níveis intermediários de amplitude, podendo ser explicado pelo efeito de compactação do leito, tende sido maior nas condições intermediárias de amplitude de vibração aumentando assim a velocidade mínima de vibro-fluidização.

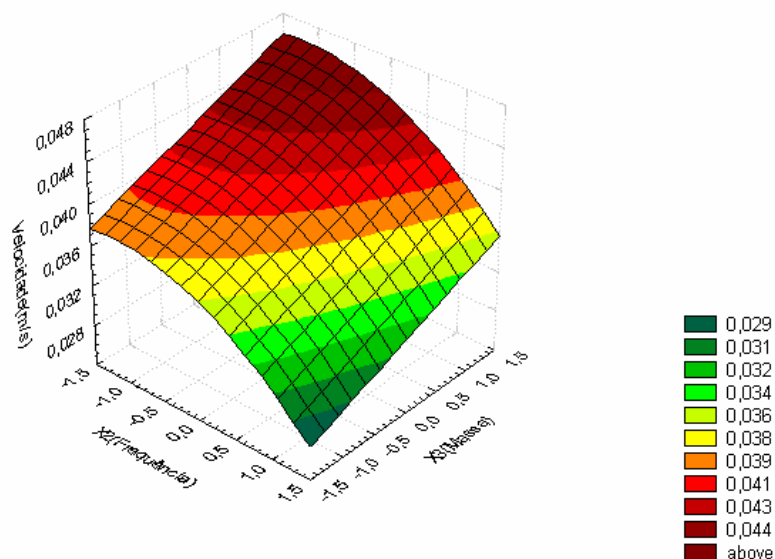


Figura 4.5-3: Superfície de resposta para frequência e massa ($x_1=0$).

Seguindo esta linha de raciocínio, verificou-se o efeito da massa nos diversos níveis de frequência, onde seu incremento acarretou num aumento na resposta da velocidade ao longo da superfície de resposta.

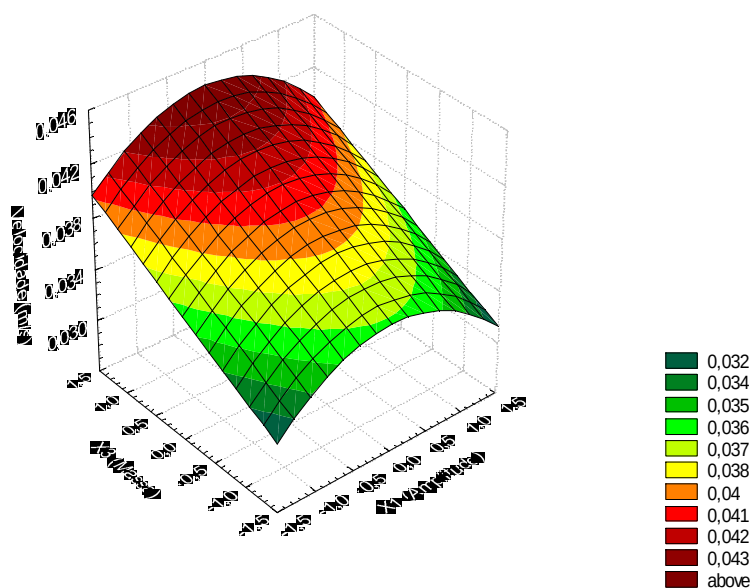


Figura 4.5-4: Superfície de resposta para amplitude e massa ($x_2=0$).

Na Figura 4.5-4 nota-se o efeito da massa na velocidade de mínima vibro-fluidização encontrando valores mais elevados para a velocidade na condição de maior massa e valores intermediários de amplitude.

4.5-3 Análise canônica

Com o objetivo de analisar as superfícies de resposta e determinar quantitativamente as melhores condições das variáveis independentes, foi feita uma análise canônica como mencionado no CAPÍTULO 3. Para implementação do algoritmo da análise canônica foi utilizado o *software* MAPLE® 9.

Para a queda de pressão, calculando as raízes características (λ) da matriz B (Figura 2.8-1), tem-se:

$$\underline{\lambda} = [-25,8 ; -0,75 ; 7,04] \quad (52)$$

Sendo assim, na forma canônica a superfície ajustada para a queda de pressão pode ser colocada conforme a Equação 53:

$$\hat{y} = \hat{y}_0 + \lambda_1 w_1^2 + \lambda_2 w_2^2 + \dots + \lambda_k w_k^2 = \hat{y}_0 - 25,8 w_1^2 - 0,75 w_2^2 + 7,04 w_3^2 \quad (53)$$

Os valores das raízes características mostram que não existe um mínimo global para a queda de pressão, pois duas das raízes características foram negativas. O ponto estacionário (x_0) pode ser dada pela Equação (45) (apresentada no CAPÍTULO 2), ou seja:

$$\underline{x}_0 = -\frac{1}{2} B^{-1} \underline{b} \quad (44)$$

Realizando os cálculos para a queda de pressão chega-se a:

$$\underline{x}_0 = \begin{bmatrix} 14,75 \\ -13,83 \\ 52,74 \end{bmatrix} \quad (54)$$

Analisando os resultados do ponto estacionário, nota-se que os valores encontrados para x_0 , encontram-se muito afastados da região experimental para as três

variáveis. Portanto para a queda de pressão não foi possível encontrar um ponto ótimo, pois a análise canônica não mostrou um mínimo global e o ponto estacionário está fora da região experimental. Para esta resposta a otimização deve ser feita, portanto, pela análise das superfícies ajustadas (Figuras 4.5-1). Neste sentido verificou-se que a queda de pressão é diminuída para um nível menor de massa associado a níveis maiores de amplitude, conforme mostrado nos testes 5 e 7. Nestes testes as condições foram de 7Kg de massa, amplitude de 0,65mm.

Seguindo o mesmo raciocínio e procedimento da análise canônica da queda de pressão fez-se a análise canônica para a velocidade mínima de vibro-fluidização.

Para a velocidade, calculando as raízes características (λ) da matriz B (Figura 2.8-1), tem-se:

$$\underline{\lambda} = [-0,208 ; -0,154 ; -0,871] \quad (55)$$

Na forma canônica a superfície ajustada para a velocidade pode ser colocada conforme a Equação 56:

$$\hat{y} = \hat{y}_0 + \lambda_1 w_1^2 + \lambda_2 w_2^2 + \dots + \lambda_k w_k^2 = \hat{y}_0 - 0,195 w_1^2 - 0,165 w_2^2 - 0,902 w_3^2 \quad (56)$$

Os valores das raízes características mostram que não existe um mínimo global para a velocidade e sim um máximo global, pois todas as raízes características foram negativas. O ponto estacionário (x_0) foi de:

$$\underline{x}_0 = \begin{bmatrix} 0,731 \\ -1,112 \\ 1,576 \end{bmatrix}$$

Analisando os resultados do ponto estacionário, nota-se que os valores encontrados para x_0 , encontram-se fora da região experimental para a variável x_3 , ou seja, para a carga de partículas. Para a velocidade mínima de vibro-fluidização tem-se um ponto de máximo (raízes características todas negativas) e não existe um ponto que minimize globalmente o consumo de ar na vibro-fluidização na região experimental utilizada. Para esta resposta a otimização também deve ser feita pela análise das superfícies ajustadas (Figuras 4.5-2, 4.5-3, 4.5-4). Neste sentido verificou-se que a

velocidade é diminuída para um nível menor de massa associado a níveis maiores de frequência e nas condições extremas de amplitude (+1, -1), conforme mostrado nos testes 5 e 6. Nestes testes as condições foram de 7Kg de massa, frequência de 15,5Hz e amplitudes de 0,65mm e 0,25mm.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

O leito utilizado neste trabalho apresenta uma configuração horizontal e retangular, com dimensões relativamente grandes, diferente dos estudados pela maioria dos pesquisadores, conforme relatos da literatura. Considerando os principais resultados experimentais obtidos, pode-se, nas condições operacionais utilizadas, concluir que:

- Quando utilizado altas frequências de vibração o leito de partículas de vidro apresenta um comportamento instável com deslocamento do material para as extremidades do leito.
- O leito de partículas apresenta uma boa estabilidade quando operado sem vibração ou com vibração na faixa de 13 a 16Hz de frequência e 0,137 a 0,74mm de amplitude, no qual o equipamento também se comporta de maneira estável.
- As curvas características de queda de pressão e de desvio padrão da queda de pressão em relação a velocidade do ar apresentaram uma boa reprodutividade tanto para o leito fluidizado (sem vibração) quanto para o leito vibro-fluidizado nas condições de vibração utilizadas nos experimentos.
- Pela técnica de planejamento composto central concluiu-se que a massa apresentou maior influencia na queda de pressão, seguida da amplitude e que a frequência não apresentou um efeito significativo na queda de pressão.
- Concluiu-se que há uma influência fortemente linear da massa na queda de pressão do leito para todos os níveis de amplitude, encontrando um nível mais elevado para valores menores de amplitude. Já para a amplitude percebeu-se uma função quadrática com relação a pressão gerando valores menores de pressão quando utilizados valores maiores de amplitude.

- Definiu-se pela superfície de resposta que, para o nível mais baixo de frequência de vibração encontraram-se os maiores valores de velocidade mínima de vibro-fluidização sendo mais acentuado para níveis intermediários de amplitude.
- O efeito da carga de partículas na velocidade de mínima vibro-fluidização é fortemente linear encontraram-se valores mais elevados para a velocidade na condição de maior carga e valores intermediários de amplitude.
- Pela análise canônica não foi possível encontrar uma região de ótima operação tanto para a queda de pressão quanto para a velocidade mínima de vibro-fluidização, dentro da região experimental.
- A análise da superfície de resposta confirmou as melhores condições de operação entre as condições testadas. Os testes 5 e 7 foram os que apresentaram menor perda de carga e os testes 5 e 6 foram os que apresentaram menor velocidade mínima de vibro-fluidização.
- Assim o teste 5 foi o que apresentou simultaneamente a melhor condição de perda de carga e velocidade mínima de vibro-fluidização.

5.2 Sugestões

Para a continuidade deste trabalho, sugere-se:

- Estudar as variáveis relativas à partícula utilizada no teste, analisando o efeito da densidade e do diâmetro das partículas.
- Adequar o sistema de vibração para que se possa trabalhar numa faixa maior de frequência e amplitude de vibração.
- Estudar os efeitos da vibração na segregação granulométrica.
- Efetuar o estudo da secagem, de um material real, no leito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRATU, E.; JINESCU, G. (1969), Revue de Chimie, Bucharest, Romania In: GUPTA, R.; MUJUMDAR, A. S (1980). Aerodynamics of a Vibrated Fluid Bed. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 58, 332-338.
- BRATU, E.; JINESCU, G. I. (1971), Effect of Vertical Vibrations on the Pressure Drop in a Fluidized layer. British Chemical Engineering, 16, 691-695.
- BRATU, E.; JINESCU, G. I. (1972), Heat Transfer in Vibrated Fluidized Layer. Revue Roumaine de Chimie, Bucharest, v.17, n 1-2, p.49-56.
- BROD, F. P. R. (1999), Construção e teste de um secador vibro-fluidizado, Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas, 200p.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W. (1974), Drying cereal grains. Westport, Connecticut: The AVI Publishing Company, 1974. 126 p.
- BOX, M. J.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S.(1978), Statistics for experimenters. An introduction to design, data analysis, and model building, John Wiley and Sons, New York.
- CARMAN, P. C. (1956), Flow of gases through porous media. New York, Academic Press.
- CAMARGO, C. F. S. (2003), Desenvolvimento de um Leito Vibrofluidizado e Estudos dos Coeficientes de Transferência de Calor de Corpos Suspensos, Universidade Federal de São Carlos.
- CAMARGO, C. F. C.; FREIRE, J. T. (2001), Fluidodinâmica de um Leito Vibro-fluidizado: Análises das Curvas Características Utilizando Curvas de desvio Padrão, CD-ROM, XXIX ENEMP.
- CARROL, P. J.; COLIJN, H. (1975), Vibrations in solids flow. Chemical Engineering Progress, New York, 71(2): 53-68.
- CHLENOV, V. A.; MIKHAILOV, N. V,(1965), Some Properties of Fluidized Bed under Vibration In: PAKOWSKI, Z. ;MUJUMDAR, A. S; STRUMILLO, C.(1984) Theory and Application of Vibrated Bed and Vibrated Fluid Beds for Drying Process, In: MUJUMDAR,A. S. Advances in Drying, Hemisphere Publishing Corporation, vol. 3, Washington,p.245-306.

- CRUZ, M. A. A.; PASSOS, M. L.; FERREIRA, W. R. (2004), Final drying of milk powder in vibrated-fluidized beds, Drying 2004, Proceedings of the 14th International Drying Symposium, São Paulo, Brazil, 22-25 August 2004, vol. B, pp.805-812.
- DALEFFE, R. V. (2002), Análise da Presença de Glicerol no Comportamento Fluidodinâmico de leitos Fluidizado e vibrofluidizado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- DALEFFE, R. V. (2005), Contribuições para a análise do comportamento Fluidodinâmico de um Leito Vibrofluidizado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- DALEFFE, R. V.; FREIRE, J. T. (2003), Analysis of the fluid-dynamic behavior of fluidized and vibrofluidized bed containing glycerol, Brazilian Journal of Chemical Engineering, vol. 21, 01, pp. 35-46.
- DALEFFE, R. V.; FREIRE, J. T. (2004), Efeito da distribuição de partículas sobre a fluidodinâmica de leitos fluidizados, vibrados e vibro-fluidizados, Anais ENEMP 2004 (CD-ROM).
- DAVIDSON, J. F.; CLIFT, R.; HARRISON, D. (1985), Fluidization, 2 ed Academic Press Inc, London, 733p.
- ERDÉSZ, K. (1990) Hydrodynamic Studies on Vibrated Fluidized Beds, Power Handling and Processing, vol. 2, 327-339.
- ERDÉSZ, K.; RINGER, D.; MUJUMDAR, A. S. (1986), Hydrodynamic Similarity of Conventional and Vibrated Fluidized Beds. In: Drying'86, Hemisphere Publishing Corporation, New York, pp. 169-176.
- ERDÉSZ, K.; RINGER, D.; MUJUMDAR, A. S. (1989), Transport process in vibro-fluidized beds. In: Transport in Fluidized Particle Systems, Amsterdam, Elsevier Science Publishers, pp. 317-357.
- ERDESZ, K.; ORMÓS, Z. (1984), Bed Expansion and Pressure Drop in Vibrofluidized Layers. In: Drying'84, Proceeding of 4th International Drying Symposium (IDS'84), Kyoto, Japan. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p.177-182.
- ERGUN, S. (1952), Flow through Packed Columns, Chemical Engineering Progress, 48 [2], p. 89.
- FINZER, J. R. D. (1984) Secagem de Fatia de Cebola em leito Vibro-fluidizado, UNICAMP-FEA, Campinas.134p.
- FINZER, J. R. D. (1989) Desenvolvimento de um Secador de leito vibro-Jorrado, UNICAMP-FEA, Campinas. 258p.

- FINZER, J. R. D.; KIECKBUSCH, T. G. (1992), Secagens em sistemas com vibração. In: Tópicos especiais em secagem, vol.1, 1992, São Carlos, São Paulo, 329p.
- FITO, P. J.; SANZ, F. J.; FLORS, A. (1977) Secado de Salvado de Arroz em Lecho Vibro-fluidizado III: Período de Velocidad de Secado Decreciente. Revista de Agroquímica e Tecnología de Alimentos, vol.2, 221-226.
- GARIM, M. M.; FREIRE, J. T. (1999) Uma Análise das Curvas Características de Leitos Fluidizados e Vibro-fluidizados Utilizando as Curvas de desvio Padrão das Medidas Realizadas. XXVI ENEMP, 253-259.
- GELDART, D.; HARNBY, N.; WONG, A. C. (1984), Fluidization of cohesive Powders, Powder Technology, 37, pp.25-37.
- GELDART, D. (1986) - Gas Fluidization Technology, Wiley Interscience.
- GELDART, D. (1973), Types of gas fluidization. Powder technology, Netherlands, Vol. 7, p.285-292.
- GUPTA, R (1979), Aerodynamic and Drying Characteristics of a Vibrated Fluidized Bed, McGill University, Canada.
- GUPTA, R.; MUJUMDAR, A. S. (1980 a) Aerodynamics and thermal characteristics of vibrated fluid beds - a review. In: Drying'80. New York. Hemisphere Publishing, 1980 - a. Vol1, p.141-1150.
- GUPTA, R.; MUJUMDAR, A. S. (1980 b), Aerodynamics of a vibrated fluid bed. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, vol. 58 (3), pp. 332-338.
- GUPTA, R.; MUJUMDAR, A. S. (1983) Recent Developments in Fluidized bed Drying. In: Mujumdar, A. S. Advances in Drying, McGill University, Montreal, Canadá, vol 2, cap.5. pp. 155-186.
- HOVMAND, S. (1987) Fluidized Bed Drying. In: Mujumdar, A. S. Handbook of Industrial Drying, Marcel Dekker Inc., New York, cap 6. pp. 165-225.
- HUNT, M. L.; HSIAU, S.S.; HONG, K. T. (1994), Particle Mixing and Volumetric Expansion in a Vibrated Granular Bed, Journal of Fluids Engineering, 116, 785-791.
- KEEY, R. B. (1972) Drying: principles and practice. Oxford: Pergamon Press, 358p.
- KOZHEVNIKOV, S. N.; VESIPENKO, Y. I.; RASKIN, Y. M. (1975) Mecanismos, Barcelona Editorial Gustavo Gili, 1126p.
- KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. (1991) Fluidization Engineering. 2ª ed. Washington: Butterworth-Heinemann, 491p.

- MARRING, E.; HOFFMANN, A. C.; JANSSEN, L. P. B. M.(1994), The Effect of Vibration on the Fluidization Behaviour of Some Cohesive Powders, Powder technology, 79,1-10.
- MAWATARI, Y.; TATEMOTO, Y.; NODA, K. (2002), Prediction of Minimum Fluidization Velocity for Vibrated Fluidized Bed, Powder technology, 131, 66-70.
- MORIS V. A. S. (2002), Fluidodinâmica e Secagem do Ácido Adípico em Leito Vibrofluidizado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- MUJUMDAR, A. S.; ERDÉSZ, K. (1988), Application of Vibration Techniques for Drying and Agglomeration on Food Processing. Drying Technology, 6 (2), p. 255-274.
- MUSHTAYEV, V. I.; KOROTKOV, B. M.; CHEVILENKO, V. A.; EFIMOV, M. G.; PLANOVSKI, A. N. (1973) Chemical and Petroleum Engineering, n.12, p. 1083-1085. In: ERDÉSZ, K. (1990). Hydrodynamic Studies on Vibrated Fluidized Beds. Powder Handling & Processing, Germany, v.2, n.4, p. 327-339.
- MYERS, R. H (1976) Response surface methodology. Academic Press, New York
- NONHEBEL, M. A. G. and MOSS, A. A. H. Drying of solids in the chemical industry, London, Butterworths, 1971. 301 p.
- NOVY, M. G.; KIECKBUSH, T. G. (1988) Secagem de Alimentos Líquidos em Leito Vibro-fluidizado Contendo Inertes, XV ENEMP.
- OLIVEIRA Jr, A. B.; FREIRE, J. T. (2004), Secagem de partículas de alumina e sílica-gel em leito fluidizado e vibro-fluidizado, Anais do XXXI ENEMP 2004 (CD-ROM).
- PAKOWSKI, Z.; MUJUMDAR, A. S.; STRUMILLO, C. (1984), Theory and application of vibrated beds and vibrated fluid bed for drying processes. In: Advances in Drying. Washington, Hemispheres Publishing, pp. 245-305.
- PASSOS, M. L.; CRUZ, M. A. A.; FERREIRA, W. R., (2004), Final Drying of Milk Powder in Vibrated-Fluidized Beds. Proceedings of the 14th International Drying Symposium, São Paulo.
- PEREIRA, F. A. R.; (2006), Escoamento Laminar de Líquidos Não-Newtonianos em Seções Anulares: Estudos De CFD e Abordagem Experimental. Uberlândia, Minas Gerais.
- READY, D.; BAKER, C.G. J. (1985), Drying In: Fluidization. Academic Press. London.
- RHODES, M. J. (1998), Introduction to Particle Technology, John Wiley & Sons, Chichester, England, 320 p.

- SILVA-MORIS; ROCHA S.C.S. (2003), Development of a vibrofluidized bed and fluid-dynamic study with dry and wet adipic acid, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 20, 04, pp. 423-434.
- STRUMILLO, C.; KUDRA, T. (1986) *Drying: Principle, Application and Design*. Gordon and Breach Science Publishers, London. 348p.
- STRUMILLO, C.; PAKOWSKI, Z (1980), Drying of granular products in vibrofluidized beds. In: *Drying 80*. vol. 1, New York, Hemisphere Publishing, pp. 211-226.
- SUZUKI, K.; HOSAKA, H.; YAMAZAKI, R.; JIMBO, G. (1980 A), Drying Characteristics of Particles in a Constant Drying Rate Period in Vibro-fluidized bed. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Tokyo, 13 (2), p. 117-122.
- SUZUKI, K.; FUJIGAMI, A.; YAMAZAKI, R.; JIMBO, G. (1980 B), Some Investigation of Falling Rate Period of Vibro-fluidized Bed Drying. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Tokyo, 13 (6), p. 493-495.
- THOMSON, W. T. (1972) *Theory of vibration with application*. 2.ed., new jersey, Prentice-Hall, 467p.
- XU, C.; CHENG, Y.; ZHU, J. (2005) Fluidization of Fine Particles in a Sound Field and Identification of Group C/A Particles Using Acoustic Waves. *Powder technology*, 161, 227-234.
- WEN, C. J.; YU, Y. H. (1966). A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity. *AIChE Journal* 12(3):610-612.

APÊNDICE A

**DETERMINAÇÃO GRÁFICA DA VELOCIDADE MÍNIMA DE
VIBRO-FLUIDIZAÇÃO PARA OS TESTES DE 1 A 18.**

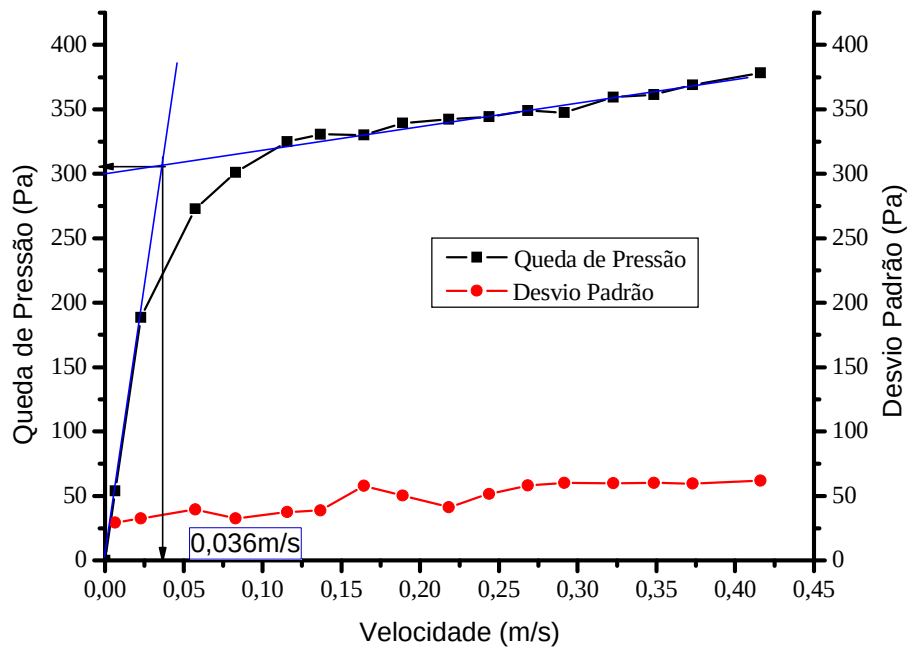


Figura A1: 15,5Hz, 0,65mm e 14Kg. Teste 1

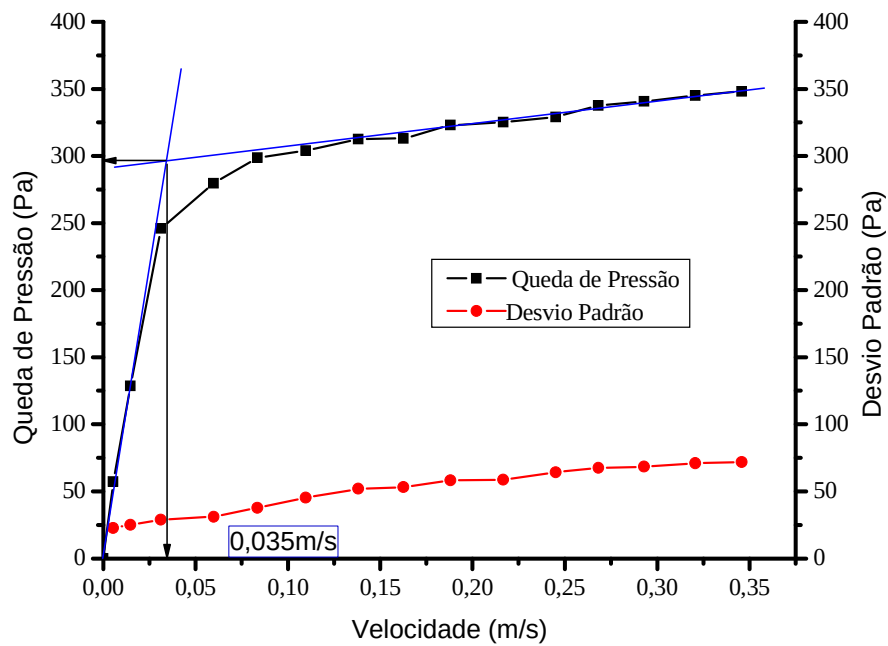


Figura A2: 15,5Hz, 0,25mm e 14Kg. Teste 2

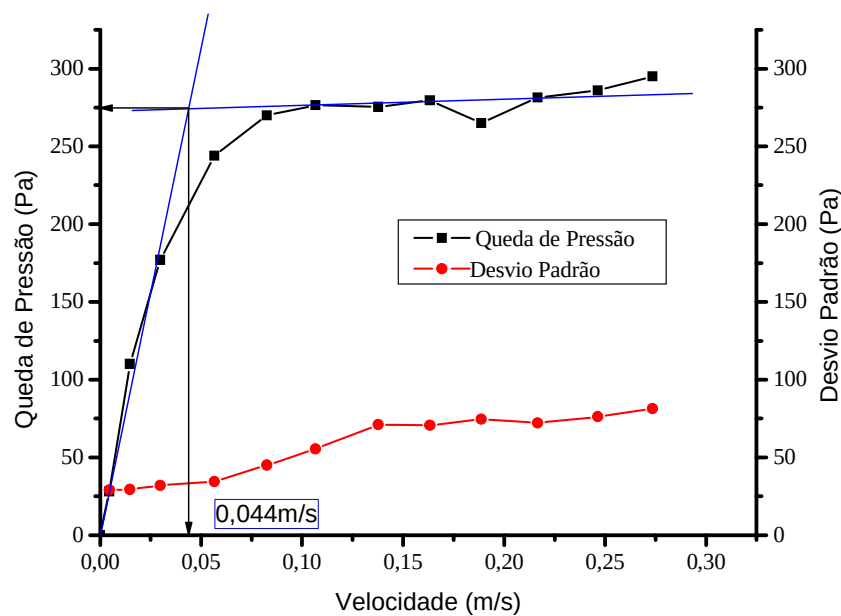


Figura A3: 13,7Hz, 0,65mm e14Kg. Teste 3

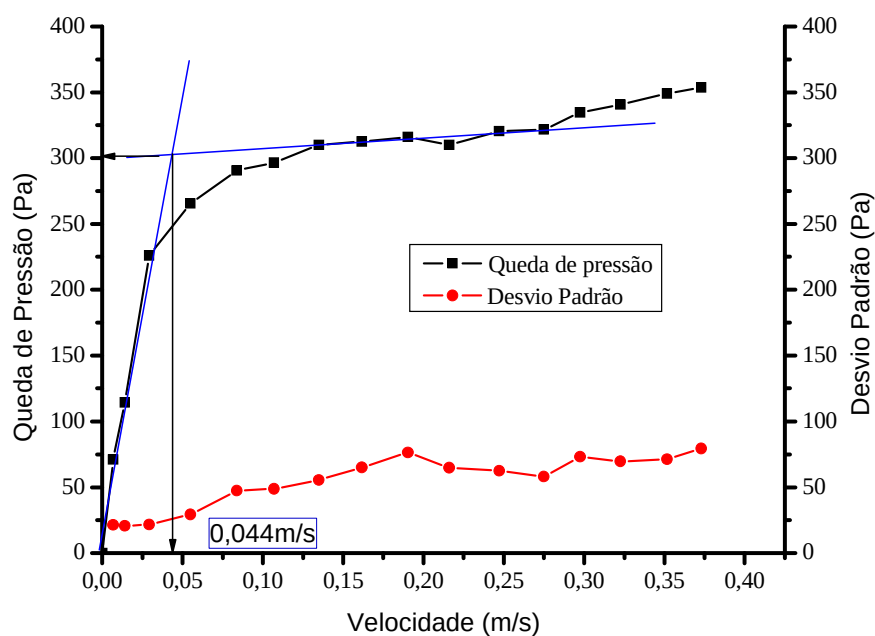


Figura A4: 13,7Hz, 0,25mm e14Kg. Teste 4

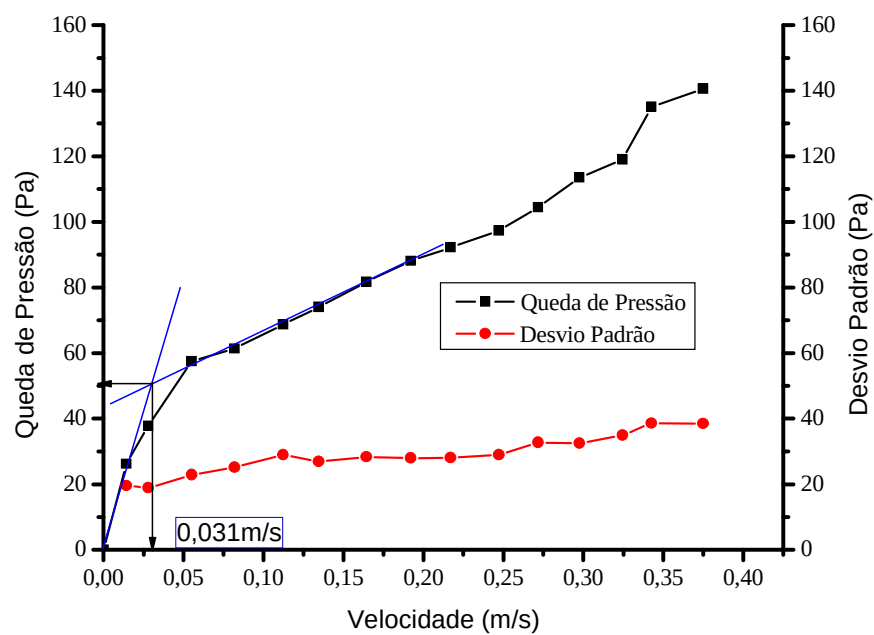


Figura A5: 15,5Hz, 0,65mm e 7Kg. Teste 5

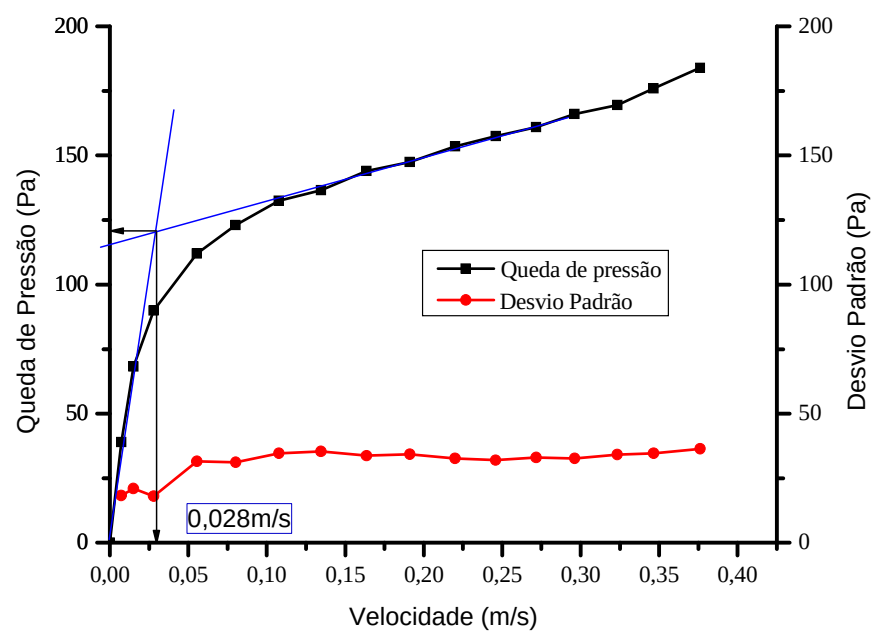


Figura A6: 15,5Hz, 0,25mm e 7Kg. Teste 6

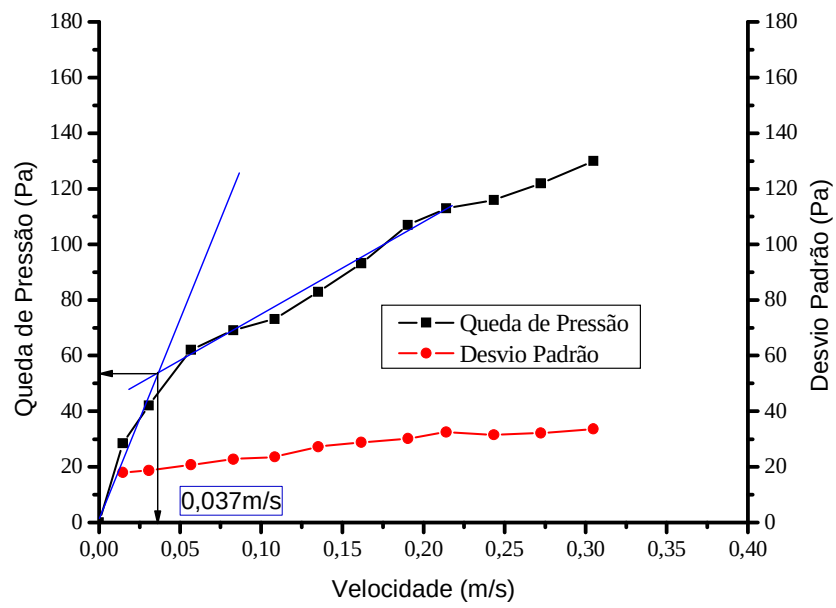


Figura A7: 13,7Hz, 0,65mm e 7Kg. Teste 7

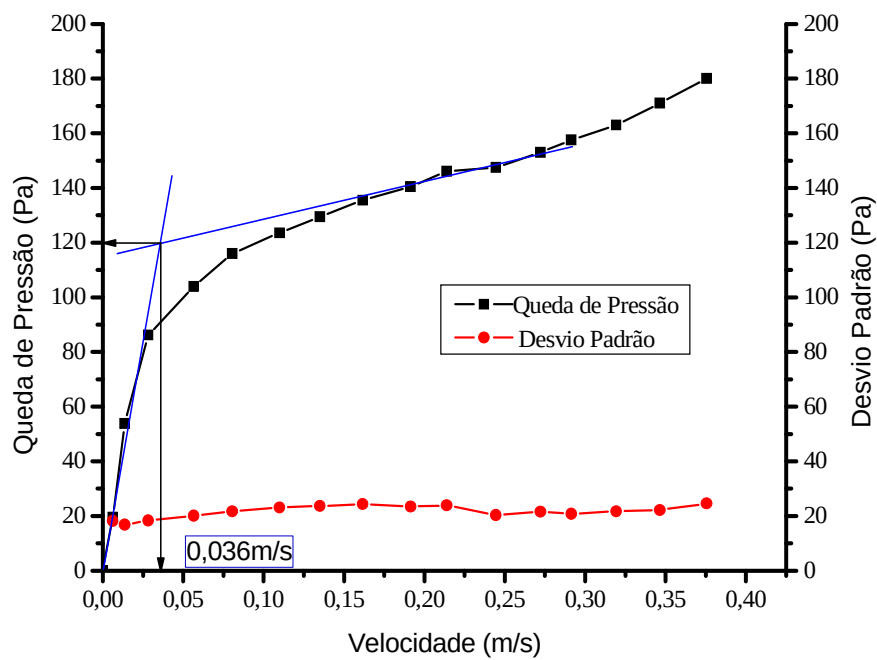


Figura A8: 13,7Hz, 0,25mm e 7Kg. Teste 8

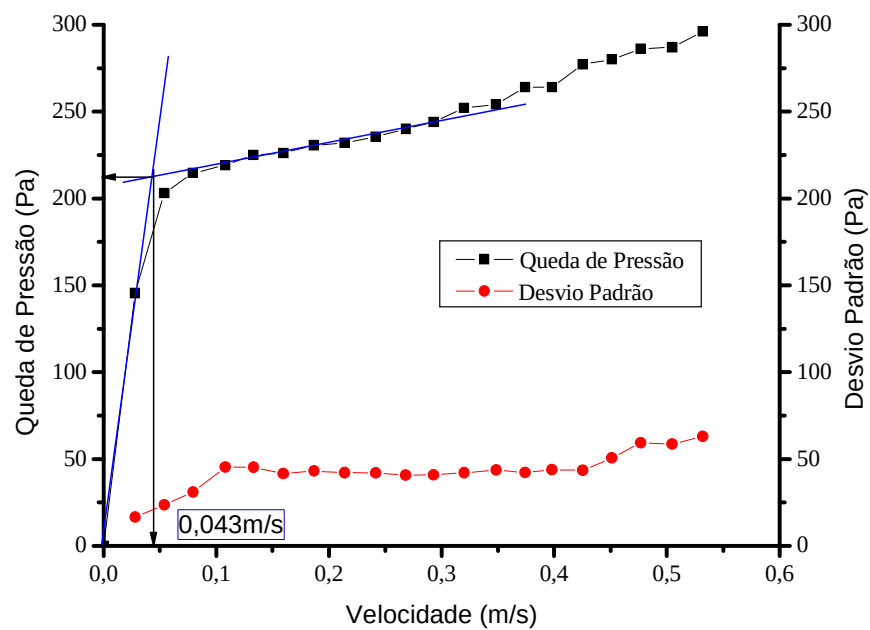


Figura A9: 14,6Hz, 0,45mm e 10,5Kg. Teste 9

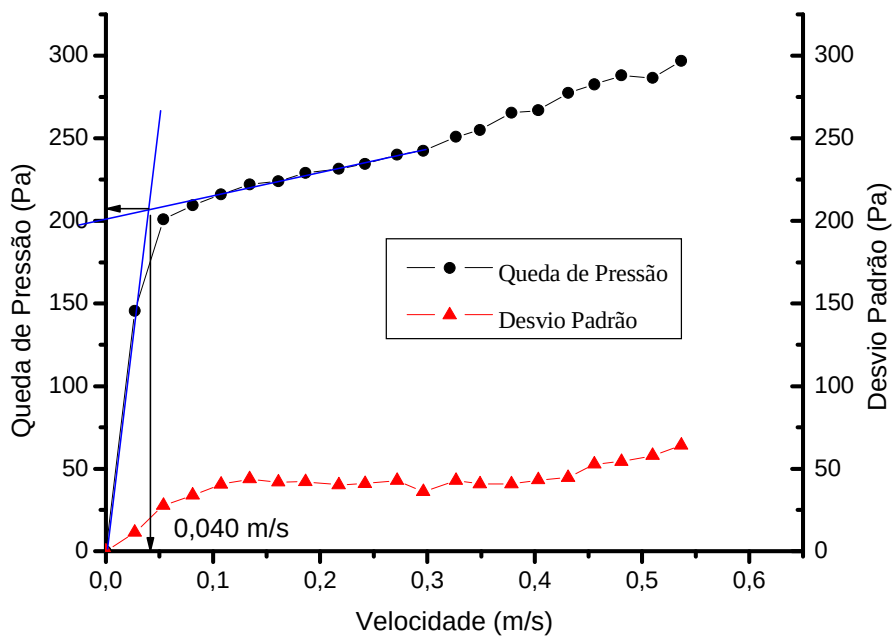


Figura A10: 14,6Hz, 0,45mm e 10,5Kg. Teste 9

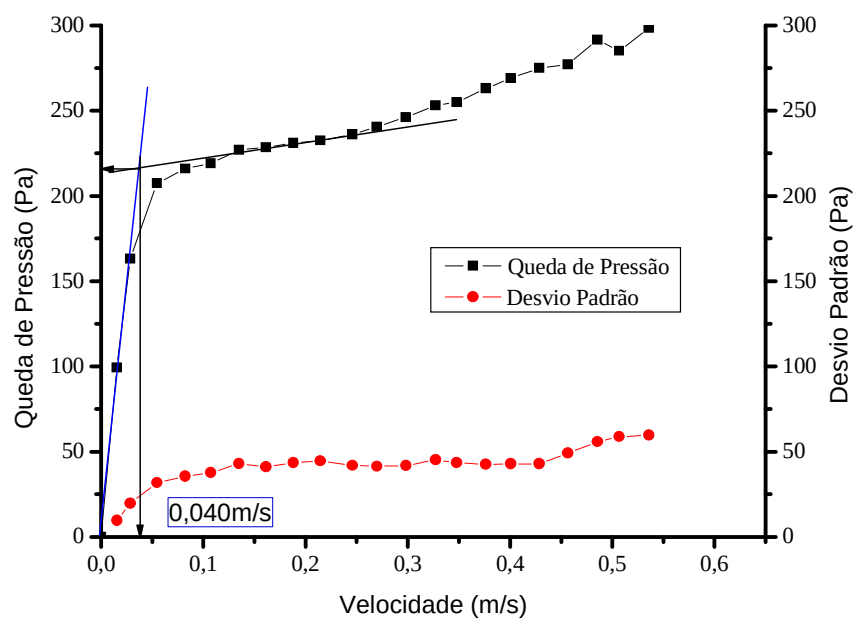


Figura A11: 14,6Hz, 0,45mm e 10,5Kg. Teste 11

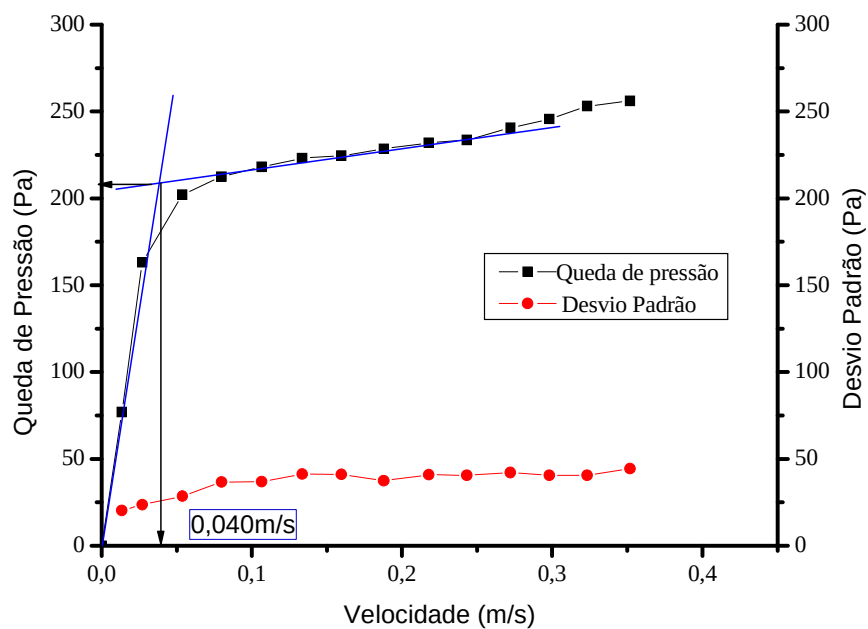


Figura A12: 14,6Hz, 0,45mm e 10,5Kg. Teste 12

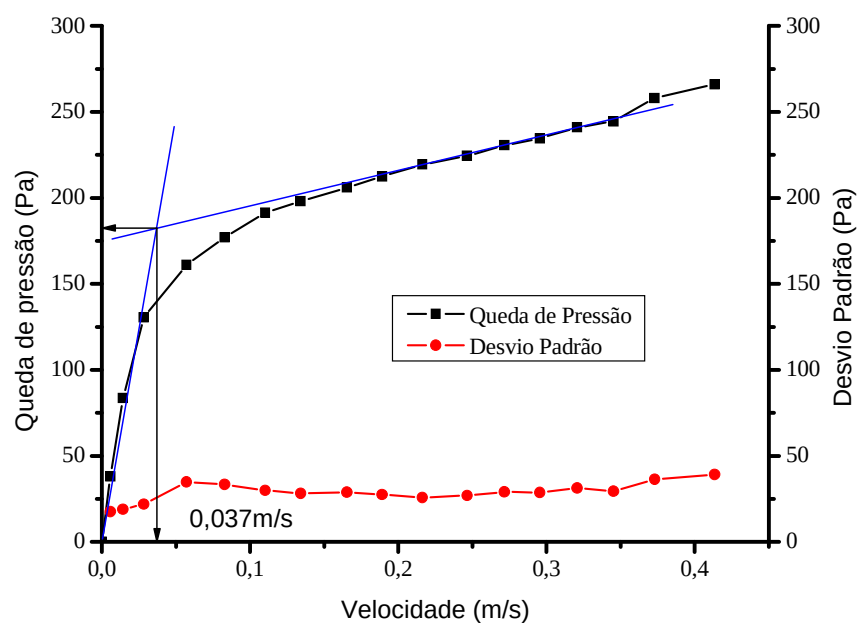


Figura A13: 14,6Hz, 0,167mm e 10,5Kg. Teste 13

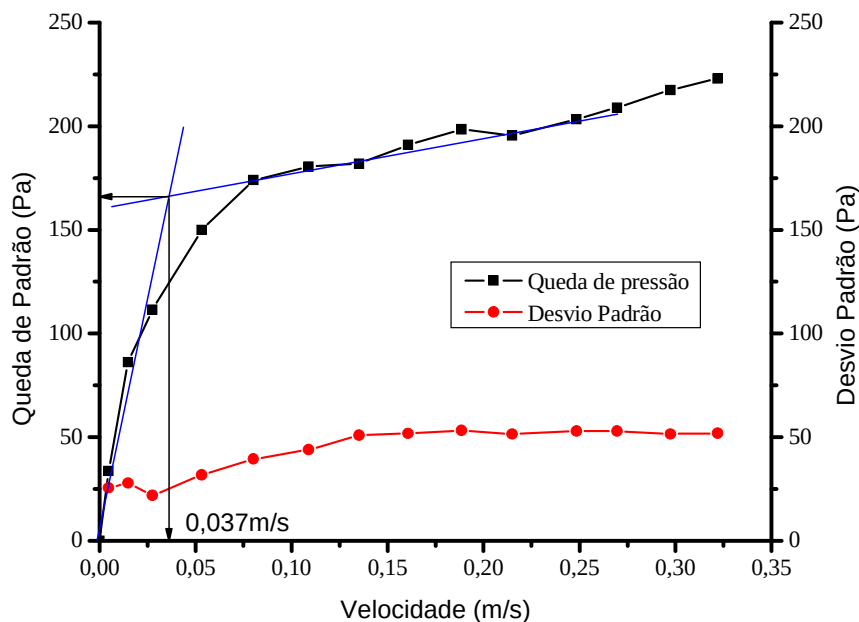


Figura A14: 14,6Hz, 0,733mm e 10,5Kg. Teste14

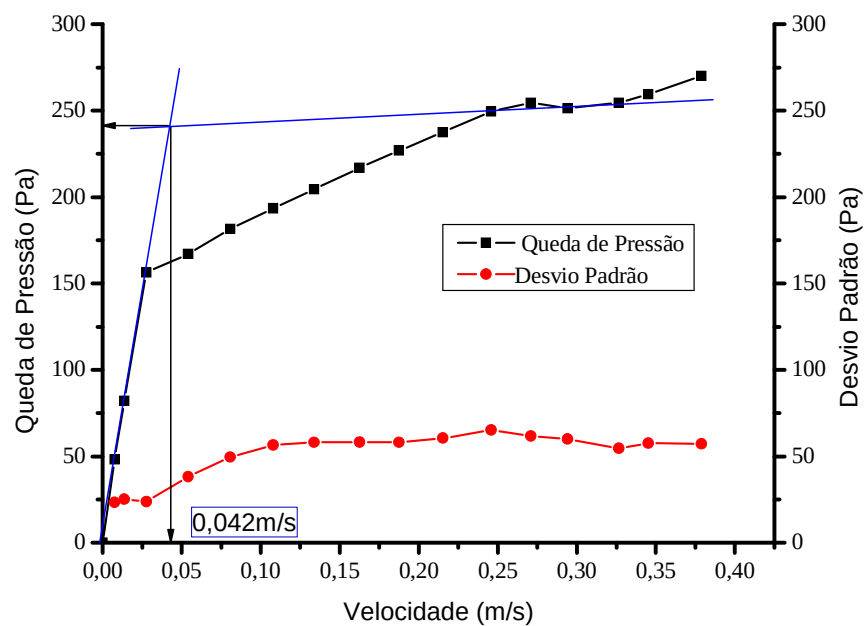


Figura A15: 13,33Hz, 0,45mm e 10,5Kg. Teste15

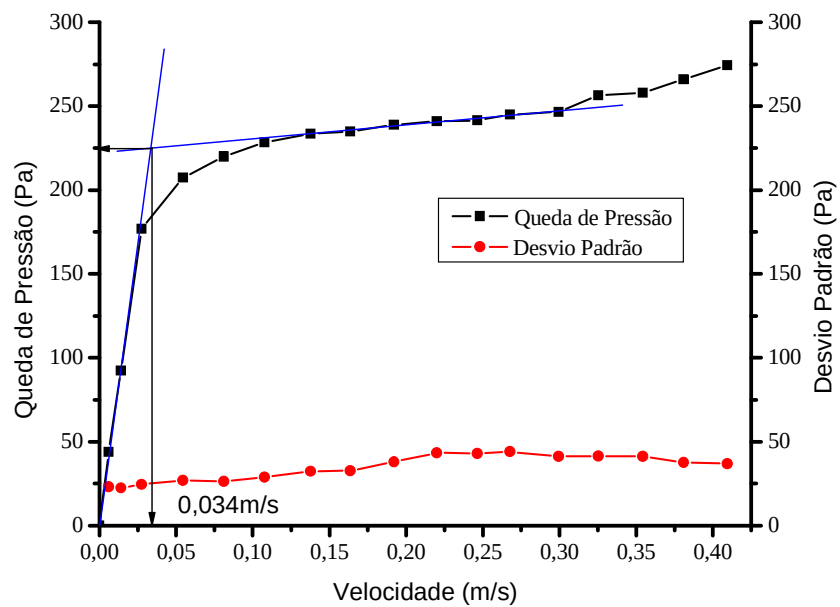


Figura A16: 15,87Hz, 0,45mm e 10,5Kg. Teste16

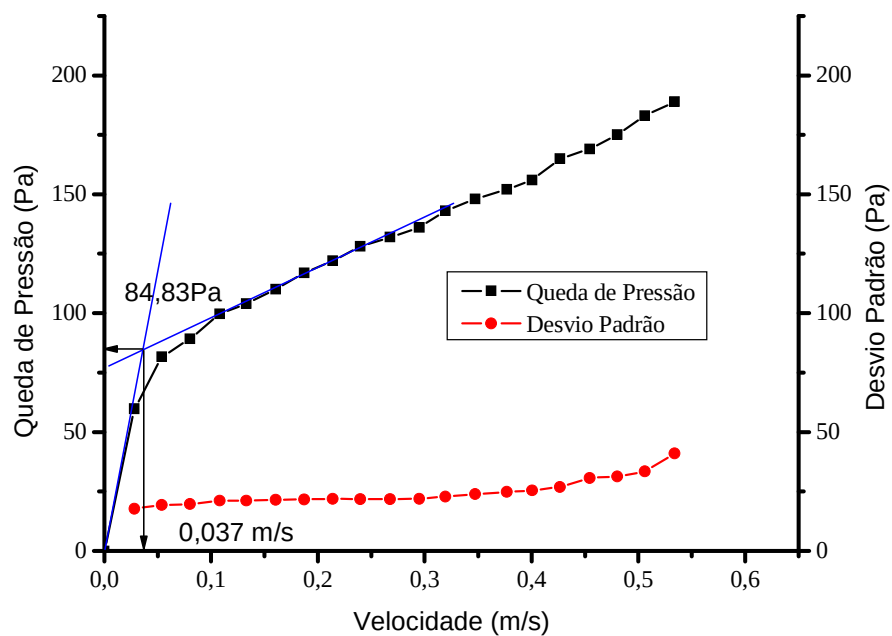


Figura A17: 14,6Hz, 0,45mm e 5,6Kg. Teste17

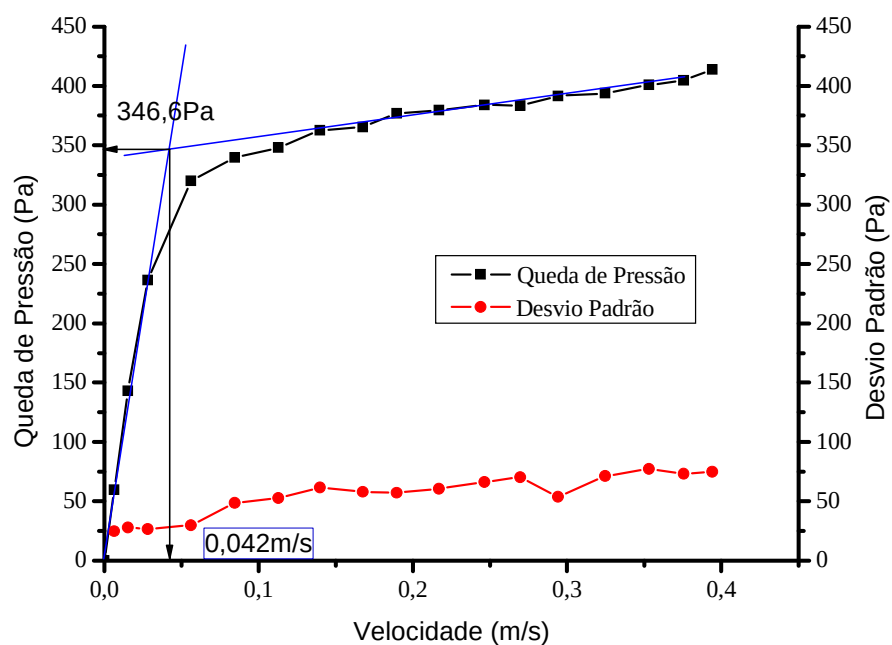


Figura A18: 14,6Hz, 0,45mm e 15,4Kg. Teste18