



**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE ONDAS ACÚSTICAS
EM LEITOS FLUIDIZADOS**

ALEXANDRE CAIRES RODRIGUES

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE ONDAS ACÚSTICAS EM
LEITOS FLUIDIZADOS**

POR,

ALEXANDRE CAIRES RODRIGUES

ORIENTADOR: CARLOS ALBERTO GURGEL VERAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Banca Examinadora

Prof. Dr. Carlos Alberto Gurgel Veras (Orientador)

Prof. Dr. Armando Caldeira Pires

Prof^a. Dra. Grace Ferreira Ghesti

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE ONDAS ACÚSTICAS EM
LEITOS FLUIDIZADOS**

ALEXANDRE CAIRES RODRIGUES

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE
BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

APROVADA POR:

Prof. Carlos Alberto Gurgel Veras, Dr. (ENM-UnB)

(Orientador)

Prof. Armando de Azevedo Caldeira Pires, Dr. (ENM-UnB)

(Examinador Interno)

Profa. Grace Ferreira Guesti, Dra. (IQ-UnB)

(Examinador Externo)

DATA: BRASÍLIA-DF, 07 DE AGOSTO DE 2014.

FICHA CATALOGRÁFICA

RODRIGUES, ALEXANDRE CAIRES

Estudo da Influência de Ondas Acústicas em Leitos Fluidizados. 80 p.
(ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2014)

Dissertação – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Introdução	2. Fluidização	3. Escoamento Pulsante
4. Bancada Experimental	5. Resultados	6. Conclusões
I. ENM/FT/UnB	II. Título (série)	

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CAIRES, A. R. (2014). Estudo da Influência de Ondas Acústicas em Leitos Fluidizados. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM.DM-221 A/2014, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 80 P.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Alexandre Caires Rodrigues

TÍTULO: Estudo da Influência de Campos Acústicos em Leitos Fluidizados

GRAU: Mestre ANO: 2014

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação e empresta-las somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Alexandre Caires Rodrigues.

Dedicatória

Mais uma vez e sempre, dedico a meus amados pais Delson e Zilma, e irmãos Leticia, Luciene e Fábio, pelo amor incondicional e a Leticia Maria, flor que perfuma meu caminho.

Alexandre Caires Rodrigues

Agradecimentos

Ao meu caro professor Gurgel, pelos preciosos ensinamentos e, sobretudo, pelo exemplo de ética; ao professor Jorge, novamente, pelo grande auxílio acadêmico; Sérgio Leite, com suas incansáveis correções; David e à equipe do Gaslin: Pavesi, Branco e Stanlen.

A todos, meus mais profundos e sinceros agradecimentos.

Alexandre Caires Rodrigues

“Se você quer descobrir os segredos do Universo, pense em termos de energia, frequência e vibração”.

Nikola Tesla

RESUMO

Este trabalho avalia a influência de ondas acústicas sobre o carregamento de partículas em leitos fluidizados. Esse tipo de leito é utilizado em diferentes setores industriais tais como a indústria petroquímica, farmacêutica, alimentícia, gaseificação, etc. A ação de ondas acústicas no leito fluidizado pode alterar parâmetros tais como as taxas de transferência de calor, de transporte de massa e de mistura do leito. A influência sobre o carregamento de partículas será estudado mais a fundo.

Foi construída uma bancada laboratorial composta por um reator de fluidização, sistema de aquisição de dados e um sistema de captura de partículas expelidas, onde foram experimentados leitos de vermiculita com e sem a atuação de ondas acústicas, com a finalidade de constatar a influência dessas ondas no carregamento das partículas. Foi conduzido também um estudo numérico dos principais parâmetros acústicos e de fluidização sobre o comportamento das partículas. Tanto os experimentos quanto os estudos numéricos indicaram a influência dos campos acústicos no carregamento de partículas em leitos fluidizados.

ABSTRACT

This study evaluates the influence of acoustic waves on the carrying of particles in fluidized beds. This sort of bed is used in different industries, such as petrochemical, pharmaceutical, food industrie, gasification, etc. The action of acoustic waves in fluidized beds can change parameters such as the rates of heat transfer, mass transport and mixing of the particles in bed. The influence on the entrainment of particles will be studied further.

A laboratory bench reactor was constructed. This sistem was composed by a fluidization system, a data acqulition system and a expelled particle capturing system. Vermiculite beds were tested with and without the action of sound waves, in order to observe the influence of these waves. A numerical study of the mais acoustic parameters was also conducted. Both experiments and numerical studies have indicated the influence of the acoustic fields in the entrainment of particles in fluidized beds.

Sumário

1. Introdução	14
1.1. Objetivo do trabalho	14
1.2. Histórico	15
1.3. Aplicações de leitos fluidizados	16
2. Fluidização	19
2.1. Definição, mecanismos de fluidização e características.....	19
2.2. Regimes de fluidização.....	20
2.3. Classificação de Geldart	21
2.3.1. Tendência de agregação das partículas	23
2.4. Caracterização do leito fixo.....	24
2.5. Velocidade mínima de borbulhamento (U_{mb}).....	26
2.6. Força de arrasto do fluido (F_D).....	27
2.7. Arraste de partículas no leito.....	27
2.8. Sólidos ejetados para o freeboard.....	28
3. Escoamentos pulsantes	30
3.1. Aplicações de escoamentos pulsantes e formas de obtenção	30
3.2. Ondas sonoras.....	31
3.3. Sistemas vibratórios.....	32
3.4. Movimento harmônico simples	33
3.5. Velocidade do som	33
3.6. Equações de onda para deslocamento e pressão acústica.....	34
3.7. Princípio da superposição.....	36
3.8. Análise de Fourier	37

3.9.	Interferência de ondas.....	38
3.10.	Padrões de ondas estacionárias em tubos	39
3.11.	Amplitude da Pressão Acústica em Ondas Estacionárias.....	41
3.11.1.	Efeito da Amplitude Acústica (I_{pa}) na Distribuição Radial de Partículas	43
3.12.	Posição da Fonte de Excitação Acústica no Tubo.....	44
3.13.	Comportamento de partículas em escoamentos pulsantes.....	45
4.	Bancada experimental e metodologia	48
4.1.	Dimensionamento do sistema de fluidização	49
4.2.	Ventilador	49
4.3.	Placa de orifício	49
4.4.	Fluidizador.....	51
4.5.	Separador de partículas tangencial – ciclone.....	55
4.6.	Inversor de frequência	56
4.7.	Módulo amplificador de sinal.....	57
4.8.	Instrumentação	57
4.9.	Sistema supervisorio.....	57
4.10.	Leito.....	58
4.11.	Metodologia experimental.....	59
5.	Resultados experimentais e discussão	61
5.1.	Influência do diâmetro da partícula no seu deslocamento.....	65
5.2.	Influência da frequência acústica no deslocamento da partícula.....	66
5.3.	Tempo de residência da partícula ($z=8$ m)	68
5.4.	Cenário 1: $f = 127$ Hz	70
5.5.	Cenário 2: $f = 43,27$ Hz	73
5.6.	Cenário 3: $f = 0$ hz	75

6. Conclusões.....	77
7. Bibliografia.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Comparação entre a combustão convencional e a combustão pulsantes. Fonte: (LOPES, 2006).	30
Tabela 5.1 - Ensaio de fluidização sem excitação acústica	61
Tabela 5.2 -Ensaio de fluidização com excitação acústica. Frequência: 127,00 Hz.	62
Tabela 5.3 - Frequências de ressonância e posições dos nós e antinós de deslocamento. ..	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Reator do sistema de gaseificação de leito fluidizado circulante. GASLIN. . .	17
Figura 1.2 – GASLIN. Planta de gaseificação em leito fluidizado circulante localizada em Linhares – ES.....	18
Figura 2.1 - Tipos básicos de leito fluidizado. Fonte: (KUNII & LEVENSPIEL, 1991). . .	19
Figura 2.2 – Similaridades do leito fluidizado com um líquido: (a) corpos com massa específica menor que a do leito flutuam; (b) as partículas podem escoar por furos na parede dos vasos; (c) as partículas circulam por um cilindro mergulhado no leito.	20
Figura 2.3 - Representação esquemática dos leitos fluidizados em diferentes regimes. Fonte: (KUNII & LEVENSPIEL, 1991).	21
Figura 2.4 – Classificação dos grupos de partículas de Geldart. Fonte: (GELDART, 1973).	23
Figura 2.5 – Perda de carga no leito em função da velocidade do escoamento. Fonte: (BARBOSA, 1994).	26
Figura 2.6 – Densidade de sólidos em um leito onde há arraste. Fonte: (KUNII & LEVENSPIEL, 1991).	28
Figura 2.7 – Mecanismos de ejeção de partículas para o freeboard. (a) bolhas com pressão maior que a do leito; (b) bolhas com velocidades maiores que a do leito; (c) coalescência de bolhas. Fonte: (KUNII & LEVENSPIEL, 1991).	29
Figura 3.1 – Representação esquemática de um pistão oscilatório.	31
Figura 3.2 - Tubo excitado acusticamente.....	31
Figura 3.3 - Representação esquemática das ondas (a) transversais e (b) longitudinais. Fonte: (IF, s.d.).	32
Figura 3.4 - Esquema idealizado de um sistema vibratório.....	32
Figura 3.5 – Princípio da Superposição de Ondas. Fonte: (FERREIRA, 2003).	37
Figura 3.6 – Ondas construtivas (a) e destrutivas (b). Fonte: (FERREIRA, 2003).	39
Figura 3.7 – Harmônicos em tubos sonoros.	40
Figura 3.8 – Posições das partículas de carvão em função do tempo: (a) escoamento pulsante; (b) escoamento não pulsante. Fonte: (CARVALHO Jr, 1995).	46
Figura 4.1 – Representação esquemática do sistema de fluidização.	48

Figura 4.2 - Placa de orifício.	50
Figura 4.3 – Tela de cálculo da vazão mássica da placa de orifício.	51
Figura 4.4 - Principais partes do reator do sistema de fluidização.	51
Figura 4.5 – Plenum.	52
Figura 4.6 – Difusor com 5 bobble caps de $\phi \frac{1}{2}$ ".	53
Figura 4.7 – Passagem do ar por um bobble cap.	53
Figura 4.8 – Difusores.	54
Figura 4.9 – Módulo do alto falante.	54
Figura 4.10 - Representação esquemática de um separador ciclônico	55
Figura 4.11 – Ciclone ligado ao fluidizador.	56
Figura 4.12 - Tela de comando do sistema supervisorio.	58
Figura 4.13 - Vermiculita utilizada no leito.	59
Figura 4.14 – Configurações estudadas. As setas representam as posições dos transdutores de pressão. Fonte: (FLUGEL, 2006).	
Figura 5.1 - Ondas estacionárias no terceiro harmônico no tubo de 4 m.	64

LISTA DE SÍMBOLOS

a: velocidade do som no fluido

s: posição de um ponto de elemento de ar

s_m : amplitude

x: posição do ponto oscilatório

x_p : posição de uma partícula

X: amplitude do movimento ao longo do eixo das abscissas

t: tempo

ΔP : perda de carga ou gradiente de pressão

P_e : pressão efetiva

P_{ref} : pressão de referência

p: pressão instantânea

p_0 : pressão do fluido em equilíbrio

β : nível do som em decibéis

ρ^0 : massa específica do leito fluidizado

ρ_p : massa específica da partícula

ρ_g : massa específica do gás

ω : frequência angular [rad/s]

ϕ : esfericidade

ε : porosidade ou caminho livre entre partículas

ε_{mf} : caminho livre médio entre partículas

μ : viscosidade dinâmica do gás

\bar{d}_p : diâmetro médio da partícula

d_v : diâmetro volumétrico da partícula

d_s : diâmetro superficial da partícula

F_D : força de arrasto do fluido

g : aceleração da gravidade

h : profundidade de um ponto no leito a partir da superfície

I : intensidade de uma onda sonora

I_{pa} : nível de pressão acústica

L : altura do leito

L_i : dissipação energética de uma onda

T : período da oscilação

t : tempo

P : pressão

Re : número de Reynolds

Re_{mf} : número de Reynolds do meio fluidizado

S : área da superfície de uma partícula

U : velocidade do escoamento

U_m : velocidade média do escoamento

U_{max} : velocidade máxima do escoamento

U_p : velocidade da partícula

$U_{p,0}$: velocidade inicial da partícula

V : volume

U_{mf} : velocidade mínima de fluidização

U_{mb} : velocidade mínima de borbulhamento

1. INTRODUÇÃO

A fluidização é um processo no qual um leito de partículas se comporta como um líquido quando percorrido por um fluido ascendente. Neste estado, o leito adquire propriedades similares às de um líquido tais como deformação, escoamento e massa específica. A fluidização possibilita, dentre outras coisas, maior mistura de sólidos e o aumento das taxas de transferência de calor e de transporte de massa.

Os leitos fluidizados são aplicados em vários processos industriais tais como:

- Craqueamento catalítico para o refino de petróleo;
- Obtenção de gás combustível pela gaseificação de carbonáceos;
- Secagem de insumos;
- Separação e classificação de partículas de diferentes massas específicas; e
- Processos de preparação de alimentos.

Os leitos fluidizados apresentam diferentes regimes dependendo da velocidade do gás fluidizante, do diâmetro do reator, das características das partículas, da temperatura, etc. Os regimes com características mais expressivas são: fluidização mínima, leito expandido homogêneo, leito borbulhante e leito turbulento. O trabalho pioneiro de Morse (1955) mostrou que a qualidade da fluidização em partículas finas coesivas é melhorada com o uso de campos acústicos pulsantes. Nestes leitos, chamados de leitos fluidizados pulsantes (LFP), a taxa de transferência de calor e massa é maior e a formação de aglomerados de partículas (indesejáveis) é menor (NISHIMURA *et al.*, 2002). Cada um destes regimes representa objeto de grande interesse em diferentes e numerosos processos industriais.

Uma característica importante da fluidização de partículas é o carregamento, que consiste no arraste de partículas para fora do reator. Este fenômeno é buscado no transporte pneumático (regime de fluidização). Entretanto, nos demais regimes, o carregamento pode influenciar negativamente a eficiência do processo pois diminui a concentração de partículas reagentes no interior do reator. Acredita-se que determinados campos acústicos podem influenciar o comportamento de leitos fluidizados, interferindo no carregamento das partículas (intensificando ou diminuindo).

1.1. OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo desse estudo é constatar e investigar a influência de campos acústicos no carregamento de partículas em leitos fluidizados, buscando um regime de operação que diminua a perda de partículas do sistema (reator).

Para este estudo, foi projetada e construída uma bancada experimental composta por um reator (leito) modular transparente, módulo de geração de campos acústicos, um separador inercial de sólidos (tipo ciclone) e um medidor de vazão tipo placa de orifício. Também faz parte do aparato, um ventilador para induzir o escoamento, instrumentação, incluindo captura de imagens, balança digital, medidores de pressão acústica (microfones) e sistema de aquisição e tratamento de dados.

Este trabalho consiste das seguintes etapas:

- Projetar e construir uma bancada experimental para investigações sobre leitos fluidizados com e sem campos acústicos (pulsantes);
- Ensaaiar com leito de vermiculita em diferentes condições de fluidização e com aplicação de campos acústicos;
- Observar a influência (ou a não influência) da excitação acústica na quantidade de sólidos carregados (arrastados) pelo escoamento e retidos no ciclone;
- Obter um regime de fluidização onde o carregamento de partículas seja o menor possível para a mesma vazão do fluido. Com isto, obtém-se um regime onde as taxas de mistura, transferência de calor e de massa são maiores e o carregamento de partículas, menor.

1.2. HISTÓRICO

Os primeiros estudos sobre a fluidização e suas aplicações remontam do início do Século XX. Uma das primeiras plantas industriais que utilizou leito fluidizado foi um gaseificador de carvão desenvolvido por Fritz Winkler em 1922. Durante a Segunda Guerra Mundial, em 1939, surgiu a necessidade de produzir grande quantidade de gasolina para a aviação. Engenheiros da *Standard Oil* iniciaram um grande esforço de desenvolvimento tecnológico que criaria, em 1942, a primeira unidade comercial para craqueamento catalítico, denominada *Up Flow System* (Fluxo Ascendente), operando em regime hoje conhecido como de fluidização rápida (PACHECO, 1992).

Apesar de já existirem várias unidades em operação em 1943, o equipamento apresentava ainda alguns problemas operacionais. Até então muito pouco se sabia sobre os mecanismos de fluidização e a literatura sobre o assunto é praticamente inexistente.

Os principais estudos sobre o comportamento fluidodinâmico de leitos fluidizados iniciaram em meados dos anos 1970:

- LOTHAR REH, (1971): Desenvolveu um diagrama geral dos regimes de fluidização;
- DEREK GELDART (1973): Estudou a natureza da fluidização de partículas. Ele classificou a fluidização de partículas em quatro grupos;

- YERUSHALMI *et al.* (1976): Caracterizaram a transição entre os diversos regimes de fluidização;
- YOUCHOU e KWAWUK (1980): Propuseram um modelo matemático para a dinâmica do leito fluidizado;
- BIERL *et al.* (1984): Constataram forte variação radial no fluxo de sólidos em escoamento;
- WEINSTEIN (1984): Encontrou evidências de um núcleo diluído e alta concentração de sólidos na proximidade da parede;
- WANG *et al.* (2000): Estudou os mecanismos de transferência de energia em um leito fluidizado vibrante;
- HERRERA *et al.* (2002): Estudou as características de ondas acústicas estacionárias em leitos fluidizados circulantes;
- NISHIMURA *et al.* (2002): Descreveu as características da transferência de calor em leitos fluidizados pulsantes em relação às características das bolhas formadas;
- WEI (2009): Estudou técnicas para intensificar processos em reatores de leitos fluidizados;
- CAO *et al.* (2010): Estudou numericamente e experimentalmente o comportamento de leitos fluidizados sob a ação de ondas acústicas;
- BIZHAEM & TABRIZI (2013): Conduziram estudo experimental sobre as características hidrodinâmicas de um leito fluidizado pulsante;
- GUTIERREZ *et al.* (2014): Simulou e fez estudo experimental sobre o movimento de objetos não reativos em leitos fluidizados;

1.3. APLICAÇÕES DE LEITOS FLUIDIZADOS

Nos leitos fluidizados, em virtude de suas características fluidodinâmicas, tipicamente se tem elevadas taxas de transferência de calor e massa, criando uma distribuição uniforme de temperatura num relativamente curto tempo de processo.

Uma importante aplicação do leito fluidizado é no tratamento de recobrimento superficial. Devido ao alto nível de circulação das partículas, as reações e o contato partícula/partícula e partícula/fluido ocorrem de maneira uniforme, melhorando assim, a qualidade do processo. A aplicação mais comum do recobrimento superficial é o tratamento de metais (KUNII & LEVENSPIEL, 1991).

Um exemplo deste tipo de processo é o recobrimento polimérico de objetos de metal. Neste processo, um leito de finas partículas de polímeros é fluidizado por um gás inerte a temperatura inferior à de fusão das partículas. Ao se submergir um objeto metálico com temperatura superior à de fusão das partículas, uma camada de polímeros se depositará em sua superfície. Com um rigoroso controle de temperatura do leito e do

objeto, da vazão do gás fluidizante, da quantidade de partículas e tempo de residência do objeto no leito, é possível obter-se uma camada uniforme com a espessura desejada. Desta forma, objetos com formas de difícil acesso, são revestidos de maneira uniforme (KUNII & LEVENSPIEL, 1991).

A indústria farmacêutica utiliza os leitos fluidizados para impermeabilização, onde as cápsulas de medicamentos são fluidizadas em um leito, entrando em contato com substâncias impermeabilizantes. Na indústria agrícola, sementes são tratadas com camadas protetoras e fertilizantes são recobertos de fungicidas e inseticidas.

Outro campo de aplicação dos leitos fluidizados é na gaseificação, onde um leito de partículas de material carbonáceo é transformado em gás combustível - CO e H₂, dentre outros. A utilização deste tipo de leito possibilita a construção de reatores em escala industrial (Figura 1.1). No Brasil, a primeira planta de gaseificação com leito fluidizado circulante em escala industrial, o GASLIN (Figura 1.2), fica na cidade de Linhares, Estado do Espírito Santo.



Figura 1.1 – Reator do sistema de gaseificação de leito fluidizado circulante. GASLIN.



Figura 1.2 – GASLIN. Planta de gaseificação em leito fluidizado circulante localizada em Linhares – ES.

2. FLUIDIZAÇÃO

2.1. DEFINIÇÃO, MECANISMOS DE FLUIDIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS

A fluidização é um processo no qual um leito de partículas sólidas se comporta como um líquido quando é percorrido por um fluido. Este estado é obtido quando o escoamento ascendente de um gás (ou líquido) através do leito exerce força suficiente ao equilíbrio com o peso das partículas. Neste estado, o leito adquire propriedades similares às de um líquido tais como deformação, escoamento, massa específica, separação por densidades, etc.

Quando um fluido ascende em um leito de partículas sólidas a uma velocidade insuficiente (para a fluidização), o gás percorre os espaços livres (poros) entre as partículas sem que o leito seja perturbado: é o chamado leito fixo. Neste regime, as partículas sustentam o peso umas das outras e não há movimento relativo. Com o aumento da velocidade do escoamento, surge um espaço entre as partículas e o leito se expande sendo chamado leito fluidizado. Neste estado, as partículas são suspensas pela força de arrasto do fluido e assumem o comportamento de um fluido. Se a velocidade do escoamento exceder a velocidade de fluidização, começa a ocorrer o transporte pneumático das partículas. A Figura 2.1 apresenta os estados básicos de fluidização.

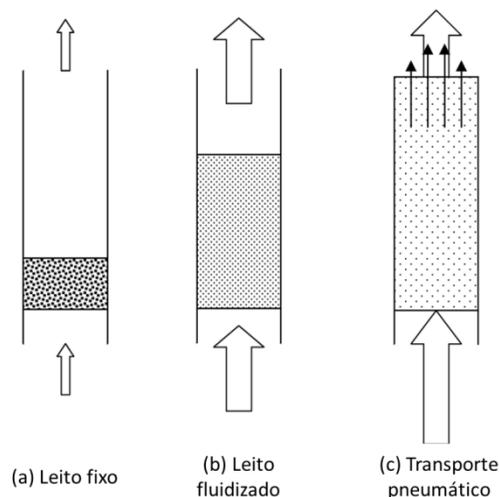


Figura 2.1 - Tipos básicos de leito fluidizado. Fonte: (KUNII & LEVENSPIEL, 1991).

Existem ainda, estados intermediários de fluidização tais como fluidização borbulhante, *slugging* (axial e plano), fluidização turbulenta e fluidização em fase leve com transporte pneumático. Estes estados serão definidos no item 2.2.

Quando fluidizado, o leito de partículas passa a se comportar com uma série de características similares às dos líquidos:

- O nível entre dois leitos fluidizados similares comunicantes se equilibra com a pressão estática;
- Objetos com massa específica menor que a do leito fluidizado flutuam no topo do leito, ocorrendo segregação por densidade;
- As partículas podem escoar por um orifício no vaso assim como um líquido;
- Os leitos apresentam “pressões hidrostáticas” dadas por $\rho^0 gh$, onde ρ^0 é a massa específica do leito fluidizado, g é a aceleração da gravidade e h é a profundidade do ponto no leito a partir da superfície;
- Quando um cilindro é imerso em um leito (Figura 4, c), existe uma circulação intensa de partículas passando através do cilindro sem qualquer suprimento externo de energia (TEUNOU & PONCELET, 2002).

A Figura 2.2 representa algumas destas características:

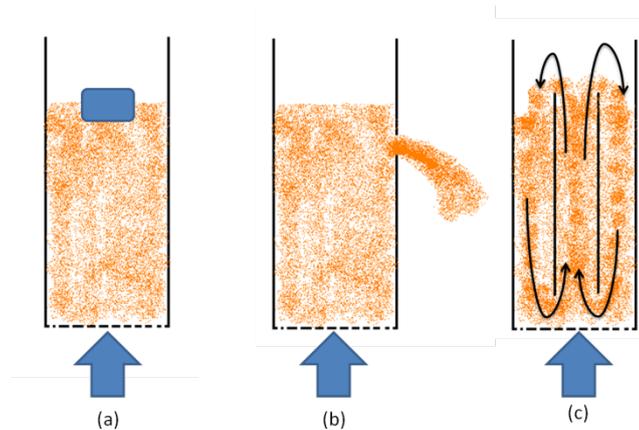


Figura 2.2 – Similaridades do leito fluidizado com um líquido: (a) corpos com massa específica menor que a do leito flutuam; (b) as partículas podem escoar por furos na parede dos vasos; (c) as partículas circulam por um cilindro mergulhado no leito.

Deve-se observar que, devido a forças coesivas entre determinados tipos de partículas e consequente formação de aglomerados, alguns leitos são de difícil fluidização. Este fenômeno, conhecido como coalescência, é um grande complicador na fluidização e também uma característica não similar às dos fluidos (KUNII & LEVENSPIEL, 1991).

2.2. REGIMES DE FLUIDIZAÇÃO

O leito comporta-se de diferentes maneiras para diferentes velocidades de fluido e tipos de partículas. Qualitativamente, podem-se distinguir os seguintes regimes, em ordem crescente de velocidade do gás:

- **Leito fixo:** quando o fluxo de gás passa pelo leito as partículas vibram sem que a distância relativa entre elas e a altura do leito mude. Não ocorre fluidização e o leito se comporta como uma coluna de partículas sólidas;
- **Fluidização mínima:** a velocidade do fluxo de gás é suficiente para que a força de arrasto exercida se iguale ao peso das partículas. Forma-se um espaçamento entre as partículas e o tamanho do leito aumenta levemente. A velocidade deste regime é chamada de velocidade mínima de fluidização, U_{mf} ;
- **Leito fluidizado borbulhante:** ocorre a formação de bolhas no leito fluidizado;
- **Slugging:** com o aumento da velocidade do fluido, as bolhas crescem em seu movimento ascendente e seus diâmetros chegam a se igualar ao do leito;
- **Leito turbulento:** a velocidade do escoamento do gás é alta o bastante para ultrapassar a velocidade terminal das partículas fazendo com que a superfície superior do leito desapareça e, além de bolhas, seja observado um movimento turbulento de partículas e gás (aglomerados e bolhas) de diferentes formas e tamanho;
- **Transporte pneumático de sólidos:** o leito torna-se diluído, ou disperso, e as partículas saem do leito onde se abrigavam.

A Figura 2.3 representa esquematicamente estes regimes:

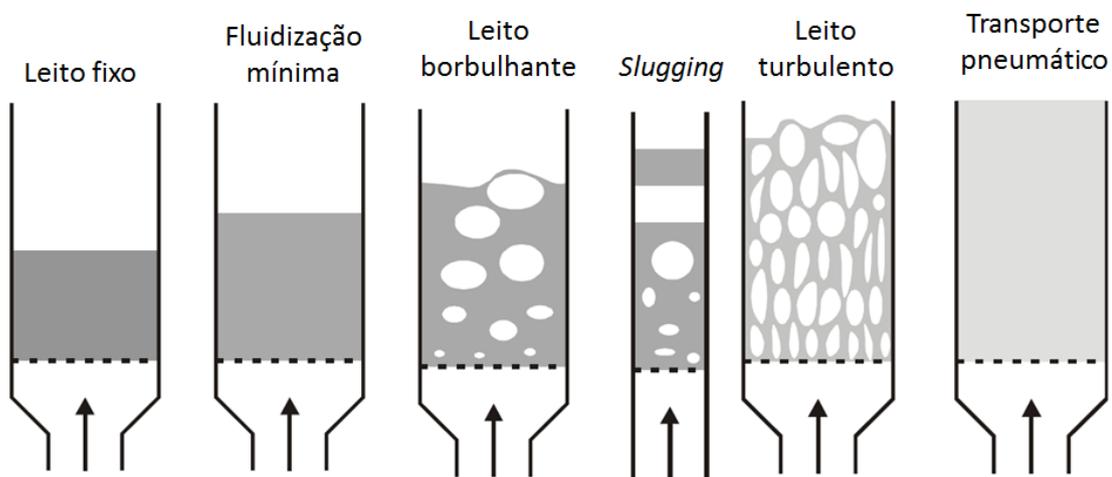


Figura 2.3 - Representação esquemática dos leitos fluidizados em diferentes regimes.

Fonte: (KUNII & LEVENSPIEL, 1991).

2.3. CLASSIFICAÇÃO DE GELDART

O comportamento de sistemas fluidizados depende das propriedades das partículas e do gás, como densidade e tamanho médio de partícula conhecidos (MARTINELLI,

2008). DEREK GELDART (1973) estudou a natureza da fluidização de partículas. Ele classificou a fluidização de partículas em quatro grupos:

- **Grupo A:** partículas pequenas ou com massa específica menor que $1,4 \text{ g/cm}^3$. Tais partículas fluidizam com facilidade a baixas velocidades de gás. Quando fluidizadas por ar em condições ambiente, resultam em um leito expandido não borbulhante iniciando à velocidade mínima (U_{mf}), sendo seguido de fluidização borbulhante com o aumento da velocidade do gás. Quando o escoamento de gás é interrompido, o leito colapsa vagarosamente. Neste último regime, as bolhas de gás elevam-se mais rapidamente que o fluxo de gás, percolando pela emulsão. Elas aparecem como brechas e coalescem frequentemente com a sua elevação através do leito; uma má circulação de sólidos ocorre mesmo quando apenas poucas bolhas estão presentes. Esta circulação é um pouco melhor em leitos de grande diâmetro, quando as bolhas crescem até o diâmetro do leito, estas se tornam *slugs* axiais, embora não seja muito comum este tipo de regime de fluidização. Os finos atuam como lubrificante tornando mais fácil a fluidização do leito (MARTINELLI, 2008). A alumina catalisadora¹ é um exemplo deste grupo de partículas;
- **Grupo B:** partículas de tamanho entre $40 \text{ }\mu\text{m}$ e $500 \text{ }\mu\text{m}$; densidade entre $1,4 \text{ g/cm}^3$ e 4 g/cm^3 . Para as partículas do grupo B, as primeiras bolhas surgem com a velocidade mínima de fluidização. Em altas velocidades de gás ocorre a formação de pequenas bolhas no distribuidor que crescem e coalescem conforme vão subindo pelo leito. O tamanho das bolhas aumenta de maneira aproximadamente linear com a distância acima do distribuidor e com o excesso de velocidade do gás (MARTINELLI, 2008). O borbulhamento vigoroso estimula a circulação violenta dos sólidos. A expansão do leito neste tipo de fluidização é pequena e ele colapsa rapidamente quando o suprimento de gás é interrompido (NITZ & GUARDANI, 2008). A areia é um exemplo deste grupo de partículas;
- **Grupo C:** partículas coesivas e muito finas, tipicamente menores que $30 \text{ }\mu\text{m}$ a $100 \text{ }\mu\text{m}$. Apresentam forças interparticulares maiores que a força de arrasto do fluxo de gás. O escoamento do gás pelo leito ocasiona a formação de canais preferenciais. Por apresentarem tais características, são partículas de difícil fluidização. Para este tipo de material, a introdução de agitação, seja por vibração ou pulsação da corrente gasosa é uma alternativa interessante para que se promova uma fluidização mais uniforme, sem o aparecimento de canais preferenciais que prejudiquem eventuais processos de transferência de

¹**Alumina catalisadora:** pó de alta atividade utilizado pela indústria petroquímica nos processos de craqueamento catalítico fluido (CCF) para obtenção de hidrocarbonetos leves a partir do petróleo.

calor e massa (NITZ & GUARDANI, 2008). O pó de dolomita² é um exemplo deste tipo de partículas;

- **Grupo D:** partículas grandes e/ou densas ($> 500 \mu\text{m}$). Leitos profundos destes sólidos são difíceis de fluidizar. Eles se comportam de maneira imprevisível, com grandes explosões de bolhas e canais preferenciais ou comportamento de jorro se a distribuição do gás for muito desigual. As bolhas coalescem rapidamente e crescem de tamanho, subindo mais lentamente que o fluxo de gás (MARTINELLI, 2008). O feijão é um exemplo deste grupo de partículas.

O gráfico da Figura 2.4 representa a classificação das partículas que relaciona o tamanho das partículas (\bar{d}_p) com a diferença das massas específicas entre as mesmas e o gás ($\rho_p - \rho_g$).

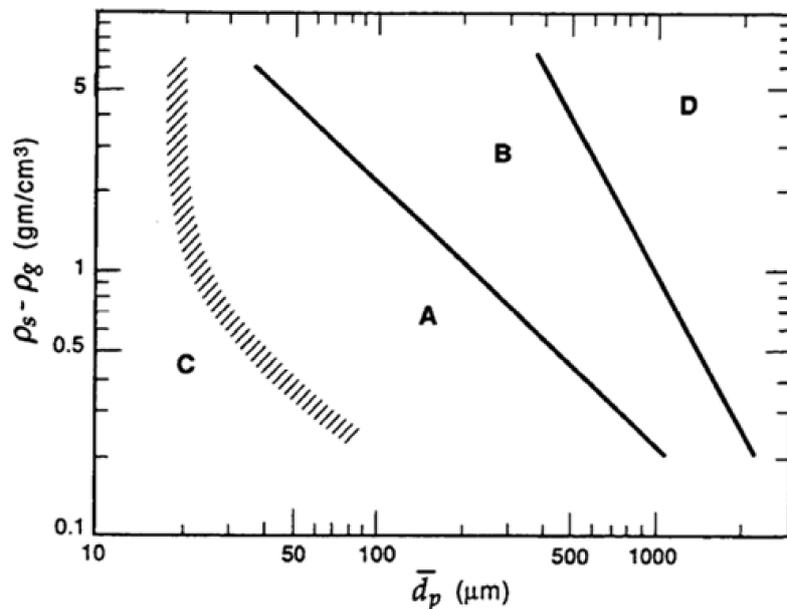


Figura 2.4 – Classificação dos grupos de partículas de Geldart. Fonte: (GELDART, 1973).

2.3.1. Tendência de agregação das partículas

Segundo WANG³ apud (CARDOSO, 2008), as partículas do Grupo C são as mais finas da classificação de Geldart. Por ser coesiva, a fluidização desse tipo de partícula é

²**Dolomita:** mineral de carbonato de cálcio e magnésio $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. É largamente utilizado na fabricação de materiais refratários e para o craqueamento de alcatrão.

³ WANG, Z.; KWAUK, M. e LI, H. (1997), Fluidization of Fine Particles. Chemical Engineering Science, vol. 53, p. 377.

difícil devido à formação de aglomerados. A origem da agregação das partículas está nas interações partícula-partícula e partícula-fluido. Existem forças atrativas e repulsivas entre as partículas. Forças atrativas surgem entre as partículas quando estas se encontram alinhadas paralelamente ao escoamento, enquanto que as forças repulsivas são criadas quando as partículas estão alinhadas perpendicularmente em relação à direção do escoamento.

A força atrativa entre as partículas e a ocorrência de colisões não elásticas faz com que exista uma tendência das partículas se unirem. Isto caracteriza a união das partículas, o que é diferente da aglomeração, onde essas são unidas por forças de superfície. As forças atrativas não acontecem somente entre partículas individuais, mas também entre partículas já unidas (GRACE, AVIDAN, & KNOWLTON, 1997).

Para melhorar a qualidade de fluidização deste grupo de partículas, alguns métodos são aplicados tais como a modificação das características do conjunto de partículas, misturando-as a outras com diferentes tamanhos ou formas. Uma segunda forma é a ação de forças externas, como campos magnéticos e vibração.

2.4. CARACTERIZAÇÃO DO LEITO FIXO

Em um leito fixo, as partículas formam uma estrutura porosa onde não há movimento relativo significativo. Quando um fluxo de gás passa pelo leito, ele cria uma força de arrasto sobre as partículas causando uma perda de carga (ΔP) no escoamento. A perda de carga pela altura do leito ($\Delta P/L$) é dada pela Equação de Ergun (GIBILARO, 2001):

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu U}{(\phi d_p)^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_g U^2}{\phi d_p}, \quad (2.1)$$

Na equação (1), temos:

ΔP : peso do leito por unidade de área da seção transversal;

L : altura do leito;

d_p : diâmetro da partícula;

ϕ : esfericidade da partícula; e

ε : caminho livre médio entre as partículas.

Ao se aumentar a velocidade do escoamento, a perda de carga aumentará até que se atinja uma velocidade crítica, conhecida como velocidade mínima de fluidização, onde a força de arrasto gerada pelo escoamento se iguala ao peso do leito.

WEN e YU (1966) desenvolveram uma expressão para a velocidade mínima de fluidização de um gama de tipos e tamanhos de partículas assumindo as seguintes aproximações obtidas experimentalmente:

$$\frac{1-\varepsilon_{mf}}{\phi^2 \varepsilon_{mf}^3} \cong 1, \text{ e} \quad (2.2)$$

$$\frac{1}{\phi \varepsilon_{mf}^3} \cong 14. \quad (2.3)$$

Aplicando as equações (2.2) e (2.3) na equação de Ergun (2.1), e referindo-se ao número de Reynolds da partícula, obtém-se:

$$Re_{mf} = \frac{d_p \cdot U_{mf} \cdot \rho_g}{\mu} = \sqrt{33,7^2 + 0,0408 \frac{d_p^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot g}{\mu^2}} - 33,7 \quad (2.4)$$

Leva (1959) obteve empiricamente a equação (2.5), muito aceita e usada:

$$U_{mf} = 7,90 \times 10^{-3} \bar{d}_p^{1,82} (\rho_s - \rho_f)^{0,94} \mu_f^{-0,88} \quad (2.5)$$

Esta equação é válida para $Re_{mf} \leq 10$. Para valores maiores de Re_{mf} se faz necessário um fator de correção (KUNII & LEVENSPIEL, 1991).

Na velocidade mínima de fluidização, a queda de pressão (perda de carga) no leito fluidizado é máxima. A Figura 2.5 representa este fenômeno.

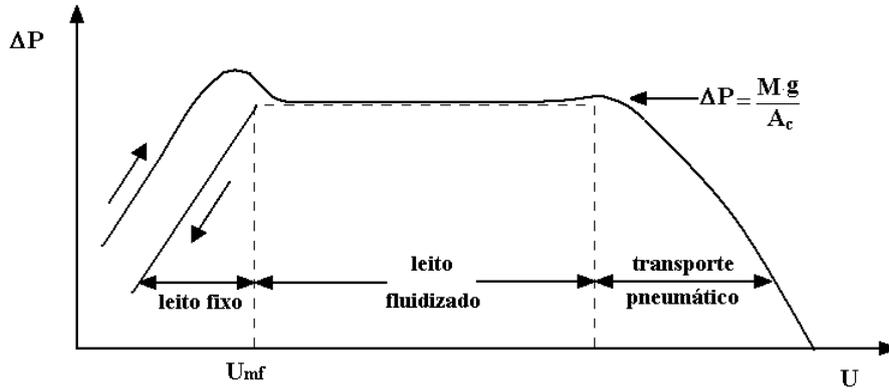


Figura 2.5 – Perda de carga no leito em função da velocidade do escoamento. Fonte: (BARBOSA, 1994).

Segundo BARBOSA (1994), quando o gás entra pela base da coluna, a queda de pressão aumenta progressivamente e o leito permanece fixo até a velocidade mínima de fluidização. Quando a velocidade mínima de fluidização é atingida, o leito se comporta como um fluido e a perda de carga é igual ao peso aparente do leito por unidade de área da seção transversal da coluna.

2.5. VELOCIDADE MÍNIMA DE BORBULHAMENTO (U_{MB})

Em um leito fluidizado à velocidade mínima de fluidização, o leito se comporta como um pseudolíquido. Para os Grupos B e D de partículas, um eventual aumento na velocidade do escoamento faz com que o excesso de gás flua na forma de bolhas. A suspensão de gás e sólidos que cercam a bolha é chamada de fase emulsiva (BASU, 2006).

Os leitos de partículas do Grupo A não começam a borbulhar logo que a velocidade superficial ultrapassa a velocidade mínima de fluidização. As bolhas começam a aparecer apenas quando um novo limite de velocidade é excedido: a velocidade mínima de borbulhamento:

$$U_{mb} = 2,07 \exp(0,716F) d_p \left[\frac{\rho_g^{0,06}}{\mu^{0,347}} \right]. \quad (2.6)$$

2.6. FORÇA DE ARRASTO DO FLUIDO (F_D)

Em um leito onde a velocidade do escoamento é igual à velocidade mínima de fluidização, a queda de pressão (perda de carga) através do leito é igual ao peso do próprio leito. Desta forma, a força de arrasto necessária à fluidização é:

$$F_D = \Delta P \cdot A = A \cdot L(1 - \varepsilon)(\rho_p - \rho_g)g, \quad (2.7)$$

Onde:

A: área da seção transversal; e

L: altura do leito.

2.7. ARRASTE DE PARTÍCULAS NO LEITO

Duas zonas distintas podem ser observadas em um leito no qual há arraste de sólidos. A zona inferior é denominada de fase densa borbulhante e apresenta uma superfície superior (ocasionalmente, de difícil identificação). Nesta zona, a densidade dos sólidos diminui com a altura do leito. A zona superior é chamada de fase diluída. A região do leito entre a superfície superior da fase densa e a saída da corrente de gás é denominada *freeboard*, e sua altura é chamada de altura do *freeboard* (H_f), (KUNII & LEVENSPIEL, 1991). A Figura 2.6 apresenta as fases diluída e densa.

Ocorrem dois tipos de transporte de partículas em um leito fluidizado: elutrição e o arraste (ou carregamento). A **elutrição** ocorre quando existe o efeito de classificação granulométrica dessas partículas, caracterizado pela seleção no arraste de sólidos do leito de forma que apenas as partículas de menor dimensão e densidade são arrastadas. O arraste acontece quando todas as partículas são levadas do leito. Não há classificação granulométrica.

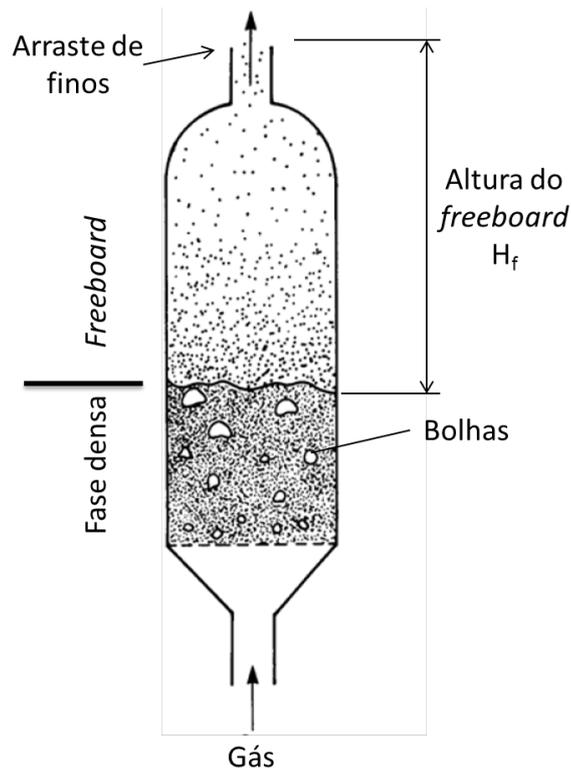


Figura 2.6 – Densidade de sólidos em um leito onde há arraste. Fonte: (KUNII & LEVENSPIEL, 1991).

Para velocidades maiores do gás de fluidização, a região densa desaparece e a densidade dos sólidos diminui com o aumento da altura do leito. Aumentando-se H_f (Figura 2.6), diminui-se o arraste de sólidos no leito (CARDOSO, 2008). A capacidade máxima de arraste em um leito é determinada pela **capacidade de saturação de arraste** (*saturation carrying capacity*), que representa o maior fluxo de sólidos que pode se direcionar para fora do leito. Essa capacidade depende das propriedades das partículas e das condições de fluxo do gás (KUNII & LEVENSPIEL, 1991).

2.8. SÓLIDOS EJETADOS PARA O FREEBOARD

Nos leitos borbulhantes e de fluidização turbulenta, a ejeção de sólidos para o *freeboard* é feita pela ação das bolhas. Existem três formas das bolhas ejetarem sólidos:

- A pressão das bolhas é maior que a da superfície do leito e ao explodirem arremessam os sólidos para fora do *freeboard*;
- As bolhas possuem velocidade maior que a do meio em que se encontram e carregam com elas partículas; e
- Duas ou mais bolhas colidem na superfície do leito ejetando, assim, os sólidos para o *freeboard*.

A Figura 2.7 representa estes mecanismos de ejeção de sólidos.

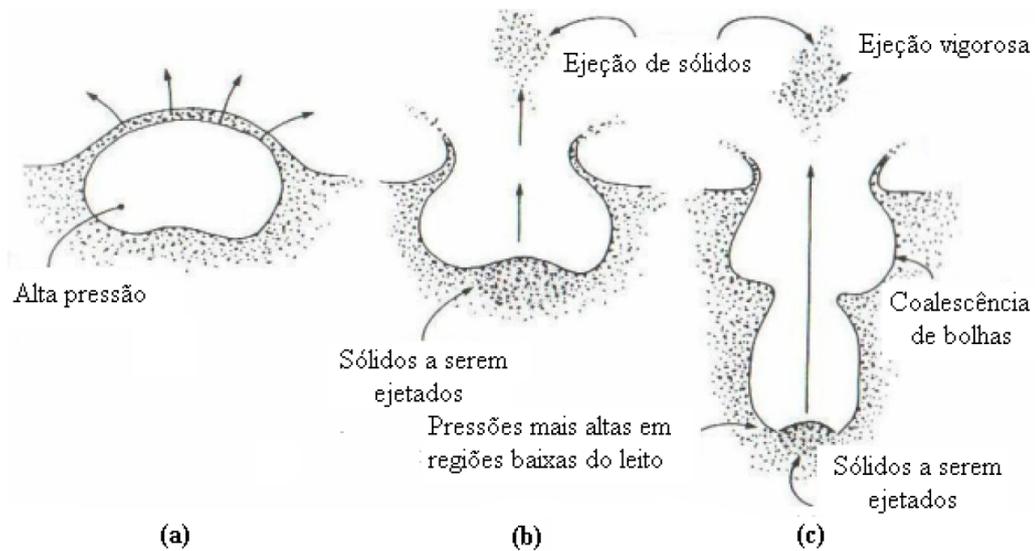


Figura 2.7 – Mecanismos de ejeção de partículas para o *freeboard*. (a) bolhas com pressão maior que a do leito; (b) bolhas com velocidades maiores que a do leito; (c) coalescência de bolhas. Fonte: (KUNII & LEVENSPIEL, 1991).

A força de arrasto atuante em uma partícula esférica é dada por:

$$F_D = \frac{1}{2} A_f C_D \rho_g V^2 \quad (2.8)$$

onde, A_f é a área frontal da esfera, dada por:

$$A_f = \frac{\pi D_p^2}{4} \quad (2.9)$$

D_p é o diâmetro da partícula e C_D , o coeficiente de arrasto:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0,15 Re^{0,687}), \quad Re < 800 \quad (2.10)$$

Re é o número de Reynolds.

3. ESCOAMENTOS PULSANTES

Os escoamentos pulsantes são aqueles nos quais o fluido (gás ou líquido) é percorrido por ondas mecânicas durante seu percurso pelo vaso (tubo, reator, leito, anteparo, válvula, etc.). Existem diferentes aplicações do escoamento pulsante.

3.1. APLICAÇÕES DE ESCOAMENTOS PULSANTES E FORMAS DE OBTENÇÃO

Uma das aplicações do escoamento pulsante é a combustão pulsante, que é uma reação de queima com geração de ondas acústicas estacionárias no modo de frequência de ressonância da câmara de combustão. Neste tipo de combustão, as reações ocorrem de forma mais eficiente e rápida. A Tabela 3.1 faz uma comparação entre as características da combustão convencional com as da combustão pulsante.

Tabela 3.1 - Comparação entre a combustão convencional e a combustão pulsantes. Fonte: (LOPES, 2006).

Característica	Combustão Convencional	Combustão Pulsante
Temperatura da chama	2000 a 2500 K	1500 a 2000 K
Potência	0,1 a 1,0 MW/m ³	10 a 50 MW/m ³
Eficiência da reação	80 a 96 %	90 a 99 %
Coef. Trans. Calor	50 a 100 W/m ² K	100 a 500 W/m ² K
Emissão de CO	0 a 2 %	0 a 1 %
Emissão de NOx	100 a 7000 mg/m ³	20 a 70 mg/m ³
Tempo de residência	1 a 10 s	0,01 a 0,5 s

Maiores informações sobre combustão pulsante podem ser obtidas no APÊNDICE A deste trabalho.

Escoamentos pulsantes podem também ser aplicados em leitos onde as partículas têm características coesivas, pertencentes ao Grupo C da classificação de Geldart. Nestes leitos, utiliza-se a vibração do escoamento para aumentar a qualidade dos processos envolvidos.

Uma das formas de se obter um escoamento pulsante é o uso de um pistão oscilante, conforme se pode observar na Figura 3.1:

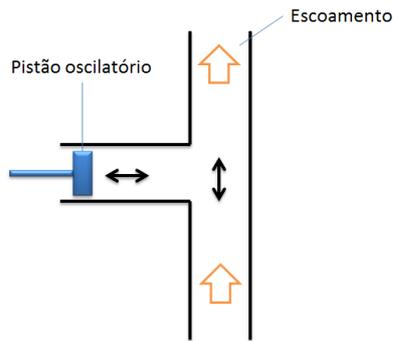


Figura 3.1 – Representação esquemática de um pistão oscilatório.

Neste trabalho, foram estudados escoamentos pulsantes excitados por ondas acústicas geradas por um alto falante, como se observa na Figura 3.2. Apesar de ser um mecanismo frágil para instalações industriais, suas facilidades construtivas e o baixo custo justificaram seu emprego.

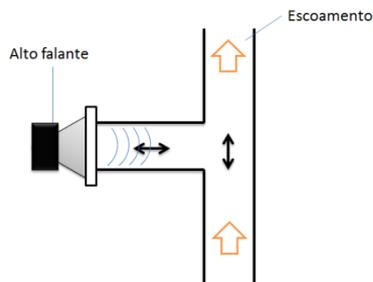


Figura 3.2 - Tubo excitado acusticamente.

As seções seguintes apresentam conceitos necessários ao estudo do assunto.

3.2. ONDAS SONORAS

Ondas sonoras são ondas mecânicas que podem se propagar através de gases, líquidos ou sólidos (WALKER, 1993). Os movimentos ondulatórios são chamados de **ondas transversais** quando o deslocamento dos elementos de massa é perpendicular à direção de propagação da onda. Quando o deslocamento destes elementos é paralelo à propagação da onda, os movimentos ondulatórios recebem o nome de **ondas longitudinais**. Nas ondas longitudinais surgem zonas de compressão e de rarefação do

meio conforme a onda se propaga. A Figura 3.3 representa as ondas longitudinais e transversais.

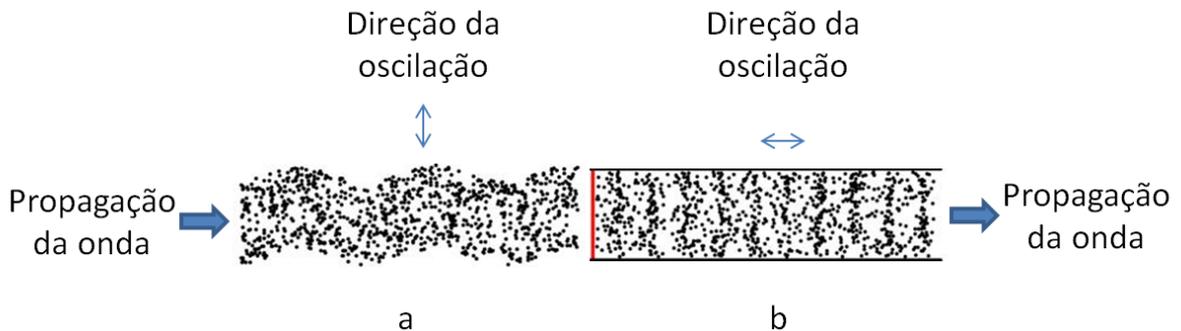


Figura 3.3 - Representação esquemática das ondas (a) transversais e (b) longitudinais.
Fonte: (IF).

Para transmitir ondas transversais, o meio deve se comportar de maneira elástica ao sofrer tensões de cisalhamento, originando uma força restauradora. Desta forma, os fluidos gasosos transmitem apenas ondas longitudinais (HALLIDAY, RESNICK, & WALKER, 2000).

3.3. SISTEMAS VIBRATÓRIOS

Os elementos que constituem um sistema vibratório são ilustrados na Figura 3.4. Seus elementos idealizados são massa (m), mola (k), amortecedor (c) e excitação (f).

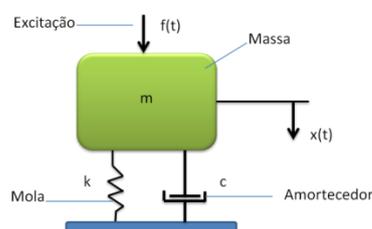


Figura 3.4 - Esquema idealizado de um sistema vibratório.

A massa, a mola e o amortecedor são suficientes para descrever o sistema físico vibratório. Energia pode ser armazenada na massa e na mola, e dissipada pelo amortecedor

na forma de calor. A entrada de energia no sistema se dá na forma de uma força de excitação (TSE, MORSE, & HINKLE, 1978).

Em um escoamento de gás, o elemento massa é o próprio meio, a mola é a elasticidade do gás (módulo de elasticidade volumétrico), o amortecedor é a viscosidade e a força de excitação é a pressão acústica. O modelo utilizado no presente trabalho foi o unidimensional com um grau de liberdade, onde apenas uma coordenada espacial é necessária para definir as configurações do sistema.

3.4. MOVIMENTO HARMÔNICO SIMPLES

Um movimento harmônico simples (MHS) é um movimento repetitivo, cíclico. Em um MHS, a onda é descrita por uma curva senoidal. A distância entre dois picos consecutivos na senoide é chamada de comprimento de onda (λ). A frequência (f) de uma onda é o número de ciclos na unidade de tempo considerada. O período (T) de uma onda é o tempo necessário para se completar um ciclo. A equação 3.1, conhecida como função harmônica, relaciona o movimento de um ponto oscilando em um eixo horizontal:

$$x(t) = X \cdot \cos \omega \cdot t, \quad (3.1)$$

onde, $x(t)$ é o deslocamento do ponto em função do tempo t ; X é a amplitude do movimento e ω é a frequência angular, dada por:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}, \quad (3.2)$$

3.5. VELOCIDADE DO SOM

A velocidade do som é a taxa de propagação de um pulso de pressão de intensidade infinitesimal através de um fluido em repouso. É uma propriedade termodinâmica do fluido (WHITE, 2002). A velocidade de qualquer onda mecânica, transversal ou longitudinal, depende das propriedades inerciais do meio (para armazenar energia cinética) e, também, das suas propriedades elásticas (para armazenar energia potencial) (WALKER, 1993). Quando o meio de propagação é o ar (ou outro gás), o componente inercial é a

massa específica (ρ) enquanto o componente elástico é o módulo de elasticidade volumétrico (B), dado por:

$$B = \frac{\Delta p}{\Delta V/V}, \quad (3.3)$$

Onde, $\Delta V/V$ é a variação volumétrica correspondente à variação de pressão Δp .

Assim, a velocidade do som é dada por:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}, \quad (3.4)$$

A **espessura de ondas de pressão em gases** é da ordem de 3×10^{-4} mm à pressão atmosférica. Se a variação da onda for muito pequena, a variação de pressão será pequena.

3.6. EQUAÇÕES DE ONDA PARA DESLOCAMENTO E PRESSÃO ACÚSTICA

A propagação de uma onda sonora pelo ar (ou outro gás) faz com que um elemento infinitesimal de ar oscile executando um MHS em torno de sua posição de equilíbrio. Por ser um movimento harmônico, pode-se reescrever a equação 3.1 da seguinte forma:

$$s = s_m \cdot \cos(kx - \omega \cdot t), \quad (3.6)$$

onde s_m é a **amplitude de deslocamento** do elemento de ar e k é o **número de onda angular**, dado por:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (3.7)$$

Em uma onda sonora (longitudinal), o comprimento de onda (λ) é definido como a distância, medida na direção da propagação da onda, após a qual o padrão de compressão e expansão, devido à onda, começa a se repetir (WALKER, 1993).

A mudança de pressão (Δp) do meio, a partir do equilíbrio, devido à onda sonora, é dada por:

$$\Delta p = \Delta p_m \text{ sen } (kx - \omega t), \quad (3.8)$$

onde a amplitude de pressão é:

$$\Delta p_m = (v\rho\omega)s_m, \quad (3.9)$$

A **intensidade** (I) de uma onda sonora é a taxa média de transferência de energia por unidade de área (W/m^2):

$$I = \frac{1}{2} \rho v \omega^2 s_m^2 \quad (3.10)$$

Deve-se destacar que a intensidade de uma onda sonora é diretamente proporcional aos quadrados de sua frequência e amplitude de onda.

O nível do som (β) em decibéis (dB) é dado por:

$$\beta = (10 \text{ dB}) \log \frac{I}{I_0} \quad (3.11)$$

onde I_0 ($= 10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$) é o nível de intensidade de referência usado para medir qualquer valor de intensidade. A cada fator de 10 aumentado da intensidade, 10 dB são acrescentados ao nível sonoro.

A amplitude acústica, também referida como o nível de pressão acústica (I_{pa}), também em decibéis (dB), é dado por:

$$I_{pa} = 20 \lg \frac{P_{rms}}{P_{Ref}} \quad (3.12)$$

Onde P_{ref} é um valor de referência ($= 2 \times 10^{-5}$ Pa) e P_{rms} é a pressão acústica efetiva, dada pelo valor quadrático médio⁴ (RMS) da amplitude de pressão ($p - p_0$):

$$P_{rms} = \frac{(p-p_0)}{\sqrt{2}} \quad (3.13)$$

3.7. PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO

A passagem de duas ondas, $y_1(x,t)$ e $y_2(x,t)$, por um meio (um tubo acústico, por exemplo) produz uma onda resultante. Este fenômeno é conhecido por princípio da superposição, o qual reza que a onda resultante devido à interação é a soma entre as ondas individuais:

$$y(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t) \quad (3.14)$$

onde $y(x,t)$ é o deslocamento do meio no momento em que as ondas se cruzam.

Segundo este princípio, quando diversos efeitos ocorrem simultaneamente, o efeito resultante é a soma algébrica dos efeitos individuais. A Figura 3.5 ilustra este fenômeno.

⁴ Valor quadrático médio, RMS ou Valor eficaz: é a raiz quadrada da média aritmética do quadrado dos valores. Mede a magnitude de uma quantidade variável. Para uma função senoidal, $y = a \text{ sen}(2\pi ft)$, tem-se o valor eficaz $y_{rms} = \frac{a}{\sqrt{2}}$.

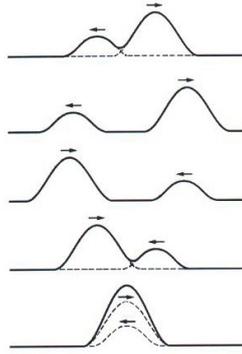


Figura 3.5 – Princípio da Superposição de Ondas. Fonte: (FERREIRA, 2003).

3.8. ANÁLISE DE FOURIER

Em 1822, Fourier⁵ apresentou em seu livro *Théorie analytique de La chaleur* (Teoria Analítica do Calor) um método matemático de análise de funções periódicas. Em seu teorema, Fourier postula que não importa a natureza da onda, esta pode ser reproduzida a partir da superposição de um número finito de curvas harmônicas simples.

Uma função contínua $f(t)$ com período T pode ser aproximada por uma soma de infinitas ondas senoidais e cossenoidais. A série de Fourier, como foi denominada, é expressa por:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2n\pi}{T}t\right) + b_n \sin\left(\frac{2n\pi}{T}t\right) \right], \quad (3.15)$$

onde os coeficientes são dados por:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt \quad (3.16)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos\left(\frac{2n\pi}{T}t\right) dt \quad (3.17)$$

⁵ Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768 – 1830): matemático e físico francês. Teve seu nome marcado na história devido a seus trabalhos nas áreas de transferência de calor (condução) e investigações sobre funções periódicas em séries trigonométricas convergentes - análise de Fourier.

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin\left(\frac{2n\pi}{T}t\right) dt \quad (3.18)$$

3.9. INTERFERÊNCIA DE ONDAS

Quando duas ondas senoidais de amplitude e comprimento de onda iguais se propagam por um mesmo meio, o deslocamento causado por cada onda é somado. Se as ondas (ou sinais) estiverem em fase, a onda resultante causará o dobro do deslocamento de cada uma das ondas. Caso estejam defasadas em π rad, o deslocamento será nulo. Caso a defasagem seja diferente de π rad, ocorre o batimento do sistema (muito usado em análise modal de vibrações). Este fenômeno de reforço e cancelamento é conhecido como **interferência de ondas**.

Considerando duas ondas dadas por:

$$y_1(x, t) = y_m \sin(kx - \omega t) \quad (3.19)$$

$$y_2(x, t) = y_m \sin(kx - \omega t + \phi) \quad (3.20)$$

As ondas y_1 e y_2 apresentam a mesma frequência angular ω , o mesmo número de onda angular k e a mesma amplitude y_m . A única diferença é o ângulo constante ϕ chamado de diferença de fase. Partindo do princípio de superposição de ondas, equação 3.14, e com algumas manipulações algébricas, têm-se a equação da onda resultante:

$$y(x, t) = \left(2y_m \cos\left(\frac{1}{2}\phi\right)\right) \sin\left(kx - \omega t + \frac{1}{2}\phi\right) \quad (3.21)$$

onde a onda resultante também é uma onda senoidal, diferindo das ondas originais apenas pela sua diferença de fase inicial, $1/2 \phi$ e amplitude $2y_m \cos(1/2 \phi)$.

Se $\phi=0$, as ondas estão totalmente em fase e a interferência é totalmente construtiva, se $\phi=\pi$ rad, as ondas estão exatamente em oposição de fase e a interferência é totalmente destrutiva. A Figura 3.6a representa uma onda y construtiva. Na Figura 3.6b, observa-se a representação de uma onda destrutiva.

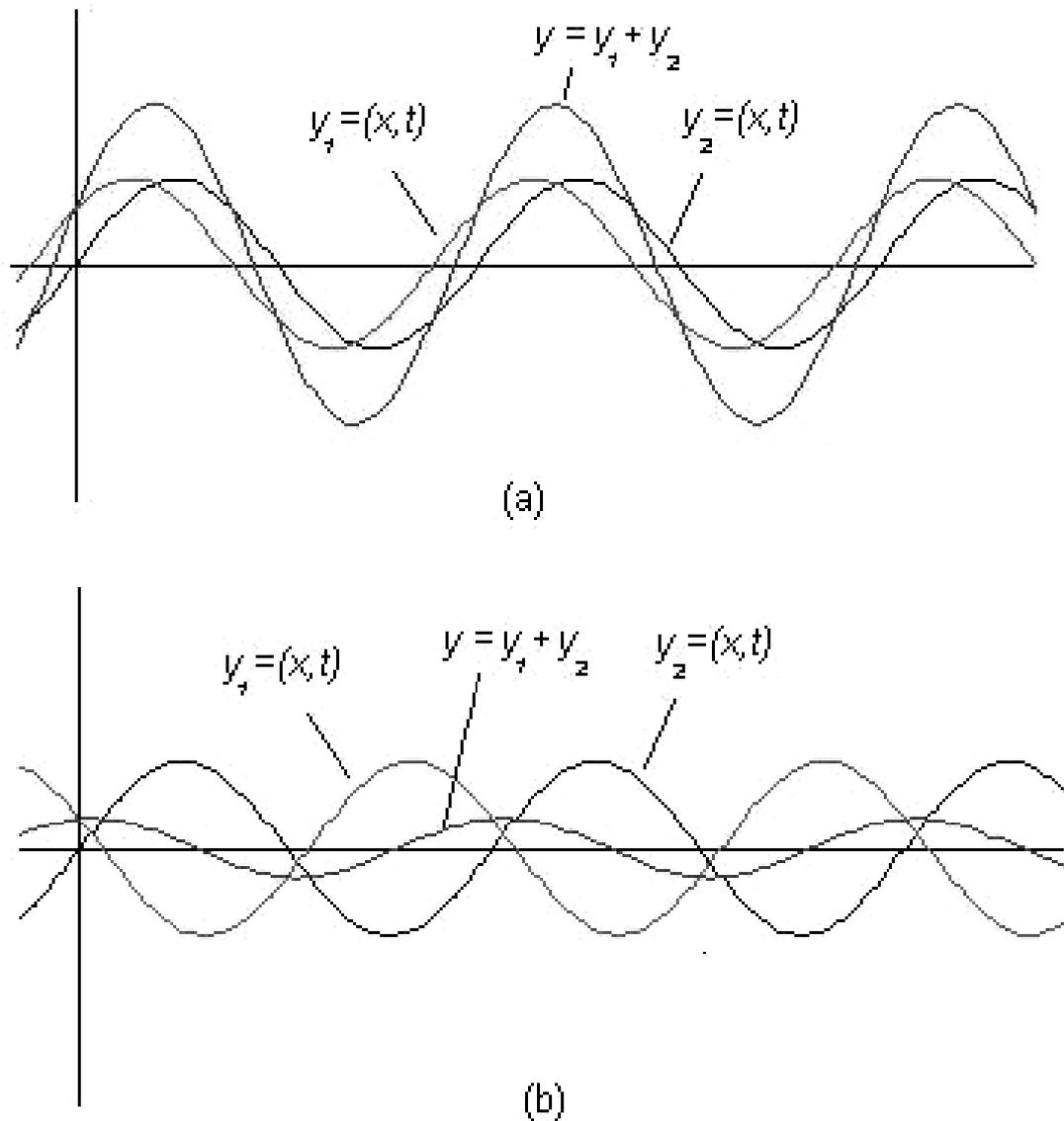


Figura 3.6 – Ondas construtivas (a) e destrutivas (b). Fonte: (FERREIRA, 2003).

3.10. PADRÕES DE ONDAS ESTACIONÁRIAS EM TUBOS

As ondas estacionárias apresentam pontos fixos de deslocamento zero (nós) e pontos fixos de máximo deslocamento (antinós ou ventres). São obtidas pela interferência de duas ondas senoidais de mesma frequência e amplitude se propagando em sentidos contrários. As ondas estacionárias ocorrem apenas em determinadas frequências, são as chamadas frequências de ressonância e o padrão de onda estacionária é chamado de modo de vibração ou harmônico. A Figura 16 representa estes padrões de vibração.

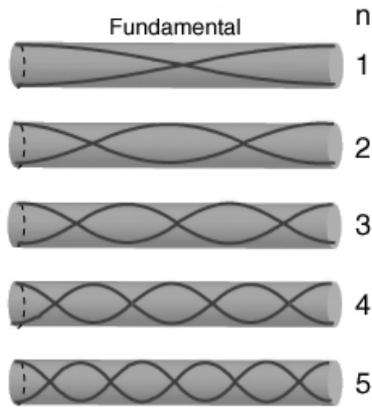


Figura 3.7 – Harmônicos em tubos sonoros.

Em um tubo é possível obter ondas sonoras estacionárias, ainda que este esteja aberto em suas extremidades, pois as ondas são refletidas. Se a relação entre o comprimento do tubo, o comprimento da onda e a frequência for apropriada, o sistema apresentará um modo de onda estacionária (ou um harmônico). As frequências de ressonância para um tubo de comprimento L , com ambas extremidades abertas são as correspondentes aos seguintes comprimentos de onda:

$$\lambda = \frac{2L}{n}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.12)$$

Assim, as frequências de ressonância em tubos com uma extremidade aberta são dadas por:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{nv}{2L}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.13)$$

As posições dos nós de deslocamento (amplitude nula) são dadas por:

$$x_{nó} = n \frac{\lambda}{2}, \text{ para } n = 1, 3, 5, \dots \quad (3.14)$$

Por sua vez, os antinós de deslocamento (amplitude máxima) são dados por:

$$x_{antinó} = \left(n + \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{\lambda}{2}, \text{ para } n = 1, 2, \dots \quad (3.15)$$

A condição de ressonância em um tubo pode ser criada por um alto-falante em uma de suas extremidades, gerando uma perturbação periódica longitudinal de amplitude B pequena, e frequência ω .

O deslocamento de uma camada infinitesimal de gás, na direção x , a partir de sua posição de equilíbrio é dado por:

$$X(x, t) = [X_0 \cdot \text{sen } kx] \cdot \cos \omega t \quad (3.16)$$

Onde X_0 é a amplitude de oscilação do elemento infinitesimal na posição x , dado por:

$$X_0 = 2 \cdot x_m \quad (3.17)$$

Na qual x_m é a amplitude da onda geradora, no ponto x do tubo.

3.11. AMPLITUDE DA PRESSÃO ACÚSTICA EM ONDAS ESTACIONÁRIAS

Em termos de pressão, a equação da onda pode ser escrita como (REYNOLDS, 1981):

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3.18)$$

onde c é a velocidade do som no meio, t é o tempo e x é a coordenada axial da propagação da onda.

A equação (3.18) tem a seguinte solução (HERRERA, LEVY, & OCHS, 2002):

$$p(x, t) = A e^{-j(\omega t - kx)} \quad (3.19)$$

Assim como no trabalho desenvolvido por HERRERA *et al.* (2002), a presente investigação envolve a transmissão do som em um meio com duas fases dentro de um vaso cilíndrico com uma extremidade aberta e outra fechada. A fonte sonora localiza-se na extremidade aberta onde o meio é o ar. O leito comporta-se como a extremidade fechada que reflete a onda acústica de forma aditiva.

A pressão total pode ser expressa pela soma das pressões decorrentes das ondas incidentes e refletidas (REYNOLDS, 1981):

$$p(x, t) = \sqrt{(A + B)^2 \cos^2 \left(-kx + \frac{\theta}{2} \right) + (A - B)^2 \sin^2 \left(-kx + \frac{\theta}{2} \right)} \quad (3.21)$$

Quando a extremidade fechada é sólida, as ondas incidentes e as refletidas se sobrepõem, ou seja: $A = B$. Por consequência, as ondas incidentes e as refletidas estão em fase, $\theta = 0$.

Assim, a amplitude da onda estacionária pode ser escrita como:

$$|p(x, t)| = 2A \sqrt{\cos^2 kx} \quad (3.22)$$

Como nesse estudo a fonte acústica localiza-se na extremidade aberta, ou seja, $x = h$, e substituindo A por P_{fs} , tem-se:

$$|p(x, t)| = P_{fs} \sqrt{\frac{\cos^2 kx}{\cos^2 kh}} \quad (3.23)$$

onde P_{fs} é a amplitude da pressão acústica da fonte sonora, neste estudo, definida pelas características físicas do alto falante.

O valor de $p(x, t)$ torna-se cada vez maior, tendendo ao infinito, conforme $\cos(kh)$ se aproxima de 0. O que ocorre em:

$$kh = (2n - 1) \frac{\pi}{2}, \text{ para } n = 1, 2, \dots \quad (3.24)$$

O estado de ressonância é alcançado na condição $\cos(kh) = 0$. Devido às dissipações de energia inerentes ao modelo real, a pressão permanece finita. Em suma, a amplitude da pressão acústica (I_{pa}) depende dos seguintes parâmetros:

- Comprimento do tubo, h ;
- Número de onda, k ; e
- Amplitude de pressão da fonte sonora, P_{fs} .

O estado de ressonância tem importantes aplicações pois os altos níveis de pressão alcançados são úteis para uma melhor fluidização. Nesse estado, obtém-se o maior nível sonoro com a menor amplitude de pressão acústica da fonte (HERRERA, LEVY, & OCHS, 2002).

3.11.1. Efeito da Amplitude Acústica (I_{pa}) na Distribuição Radial de Partículas

Em seu estudo numérico e experimental sobre o comportamento das partículas em leitos fluidizados acústico, CAO et al. (2010) observou que a fração volumétrica (r/R), ou seja, a distribuição radial local de partículas dentro do vaso de pressão (cilíndrico), cresceu com o aumento do nível de Amplitude acústica (I_{pa}), como pode-se observar na figura 3.8:

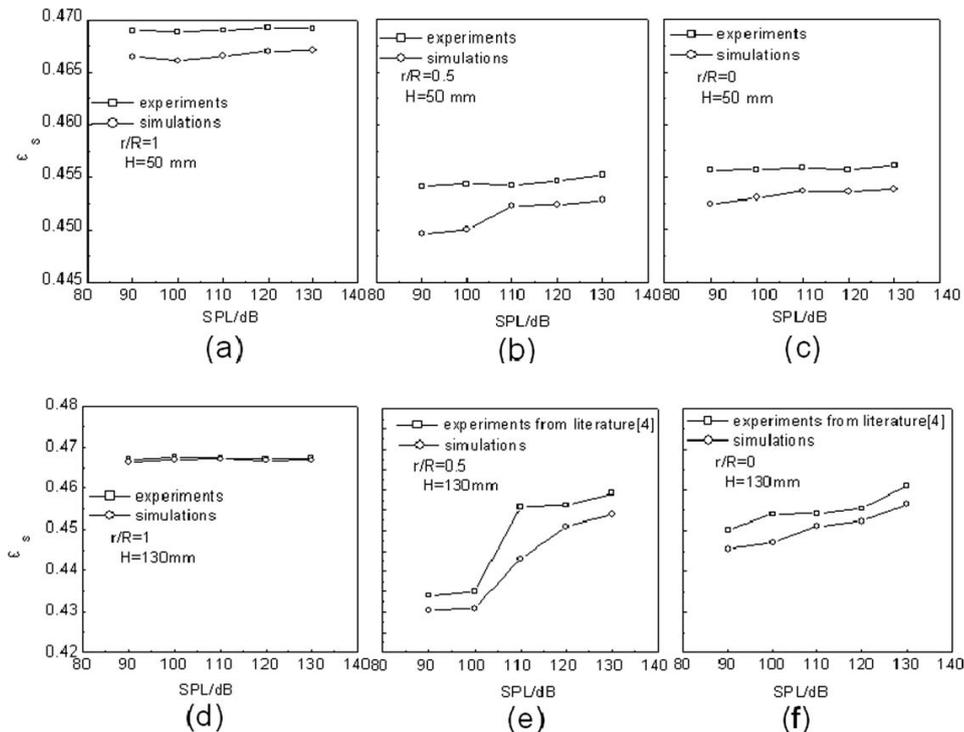


Figura 3.8 - Distribuição radial de partículas (r/R) pela variação na amplitude de pressão acústica em decibéis. (Velocidade do gás: 0,045 m/s, altura das medidas: 0,165 m, frequência da onda acústica: 100 Hz). Fonte: (CAO, DONG, & ZHAO, 2009).

Segundo CAO *et al.* (2010), a razão desse fenômeno se deve ao fato de que parte da energia sonora foi absorvida pelas partículas no leito fluidizado, diminuindo a intensidade das forças coesivas. Dessa forma, a qualidade da fluidização foi melhorada. A equação da energia do som é dada por:

$$E_{som} = \frac{1}{4} \pi d_a^2 k_a 10^{-12+I_{pa}} \left(\frac{f}{f_c}\right)^n e^{(I_{pa}-I_{pac})/I_{pac}} \quad (3.25)$$

Na equação (3.25) observa-se que, mantendo-se a frequência constante, a energia sonora cresce na medida em que aumenta-se a intensidade da amplitude da pressão acústica. Dessa forma, o aumento da amplitude implica no aumento da qualidade da fluidização.

3.12. POSIÇÃO DA FONTE DE EXCITAÇÃO ACÚSTICA NO TUBO

FLÜGEL (2006) estudou a influência da posição do atuador acústico em um queimador pulsante. Para tal, um tubo de 700 mm de comprimento e 3” de diâmetro foi usado (Fig. 3.8):

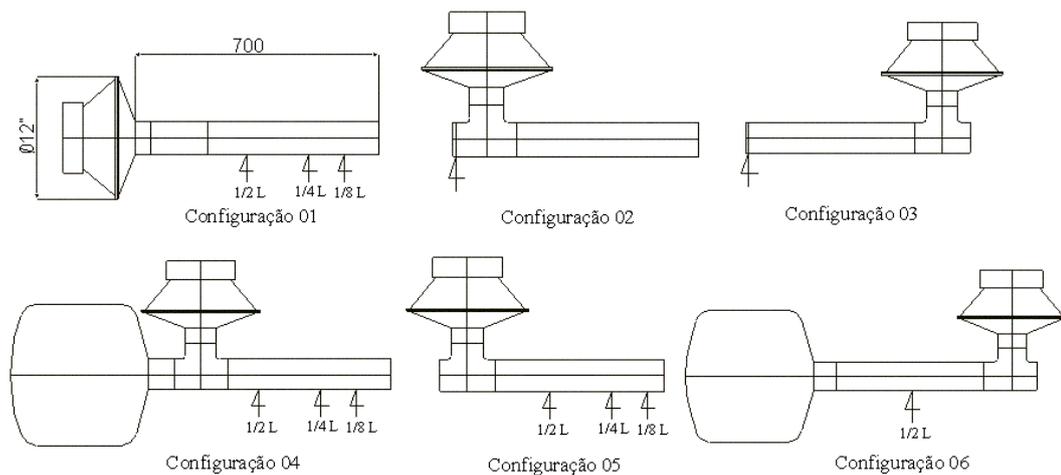


Figura 3.8 – Configurações estudadas. As setas representam as posições dos transdutores de pressão. Fonte: (FLÜGEL, 2006).

Em seu trabalho, FLÜGEL testou diferentes posições de transdutores de pressão em um tubo excitado acusticamente. As setas representam as posições dos transdutores de pressão. Com isso, ele buscou identificar a posição em que o sistema melhor se comporta. Ou seja, sintonizou o sistema.

A configuração 1, na Figura 3.8, representa um alto falante posicionado na base do duto. A configuração 2, apresenta um tubo com extremidade fechada e a excitação acústica nessa extremidade. A configuração 3, continua sendo um tubo fechado – aberto, porém, com excitação na extremidade aberta. Na configuração 4, uma câmara de desacoplamento é adicionada em uma das extremidades, ou seja, uma câmara com seção transversal de tal forma superior à seção do tubo para que essa extremidade também possa ser considerada aberta, ou seja, simulando um tubo aberto nas duas extremidades (tubo de $\frac{1}{2}$ onda). A configuração 5 é semelhante à configuração 4, exceto a câmara de desacoplamento. Por fim, na configuração 6 o alto falante foi posicionado na extremidade oposta à da câmara de desacoplamento.

Para o presente trabalho, adotou-se o posicionamento do atuador acústico na extremidade da saída do escoamento, assemelhando-se, dessa forma, da configuração 3 utilizada por FLÜGUEL (2006), na qual o tubo aberto – fechado recebe excitação no nó de pressão, ou seja, na extremidade aberta. Para essa configuração, os harmônicos são bem definidos.

3.13. COMPORTAMENTO DE PARTÍCULAS EM ESCOAMENTOS PULSANTES

Poucas são as investigações sobre as interações entre partículas e o escoamento pulsante. Pesquisas neste campo podem trazer importantes informações sobre os efeitos das oscilações em diversas áreas:

- Eficiência de combustão;
- Taxas de transferência de calor e massa;
- Trajetória e tempo de residência de partículas;
- Cinética química (importante nos estudos de formação de poluentes e tempos de reação);
- Comportamento da fluidização; e
- Segregação de partículas, dentre outros.

WANG (1985, apud CARVALHO, 1995, p. 2) estudou as trajetórias de partículas de carvão em um tubo de Rijke. Segundo ele, se a pressão acústica se mantiver em um nível suficientemente elevado, as partículas adquirem aceleração suficiente para deixar o combustor, mesmo em baixos níveis de velocidade de escoamento.

YAVUZKURT *et al.* (1989) investigaram os efeitos de um campo acústico na queima de uma partícula de carvão. Seus resultados mostraram uma queda no tempo de queima de 7,5 % a 160 dB e de 18,5 % a 168 dB. A 168 dB, o tempo de queima diminuiu 1,4 %, 1,8 % e 2,5 % para partículas de diâmetros respectivos de 50 μm , 100 μm e 150 μm .

Em 1995, CARVALHO JR. estudou teoricamente o comportamento de partículas sólidas em escoamentos pulsantes. Segundo seu estudo, o tempo de residência em escoamentos pulsantes e não pulsantes é função do diâmetro da partícula. A Figura 3.8 representa os resultados obtidos.

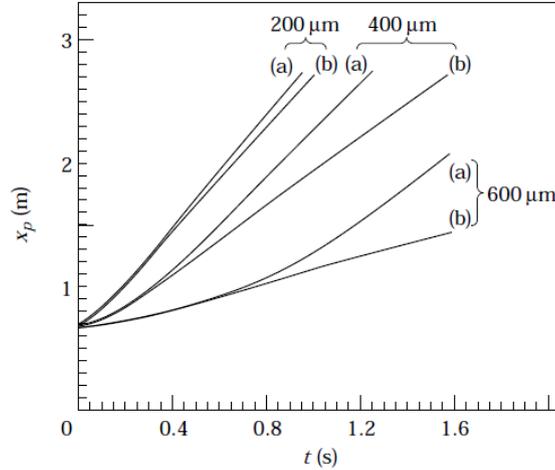


Figura 3.9 – Posições das partículas de carvão em função do tempo: (a) escoamento pulsante; (b) escoamento não pulsante. Fonte: (CARVALHO Jr, 1995).

Além deste comportamento, CARVALHO (1995) concluiu, em seu trabalho, que a velocidade da partícula possui comportamento senoidal em escoamentos pulsantes:

$$\frac{dU_p}{d\theta} = \frac{9\mu}{\pi f \rho_p d_p^2} \left[1 + 0,15 \left(\frac{\rho |U_m + U_{max} \sin \theta - U_p| d_p}{\mu} \right)^{0,687} \right] [(U_m + U_{max} \sin \theta) - U_p] - g, \quad (3.21)$$

onde a condição inicial é $\theta = 0$ e $U_p = U_{p,0}$.

Por fim, CARVALHO (1995), concluiu também que em escoamentos pulsantes, a fase (ω) entre as velocidades da partícula e do gás é zero para partículas de diâmetro menor que 5 μm . Para partículas com diâmetros entre 5 e 120 μm , $0 < \omega < \frac{1}{2} \pi$. Partículas com diâmetros maiores que 120 μm apresentam fase $\omega = \frac{1}{2} \pi$. O mesmo comportamento foi observado em partículas com diferentes massas específicas.

O perfil de velocidades do gás (v_g) é dado por:

$$v_g = v_{av} + v_m \cdot \text{sen}(2\pi ft) \quad (3.22)$$

onde v_{av} é a velocidade média do escoamento e v_m , a amplitude de velocidade.

Em 2002, Nishimura compararam as características de transferência de calor em um leito fluidizado com e sem pulsação. Observaram também, com o uso de uma câmera digital, a formação de bolhas nos leitos fluidizados. Constataram, em seu trabalho que o coeficiente de transferência de calor é aumentado quando a velocidade do meio fluidizante é superior à velocidade mínima de fluidização (NISHIMURA, DEGUCHI, & MAT, 2002).

Said et al estudaram a segregação de partículas em um leito binário (dois tipos diferentes de partículas). A pulsação foi introduzida por uma válvula solenóide na linha do ar de fluidização. Os resultados obtidos indicaram que o aumento da magnitude de pulsação influencia diretamente a taxa de segregação consideravelmente (FLÜGEL, 2006).

4. BANCADA EXPERIMENTAL E METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho, foi projetado e construído um sistema de fluidização composto por:

- **Fluidizador:** onde o leito de partículas é fluidizado pela passagem do fluido;
- **Ventilador:** induz o fluxo de ar no sistema;
- **Medidor de vazão tipo Placa de Orifício:** responsável por aferir a vazão do gás fluidizante;
- **Inversor de frequência (IF):** responsável pelo comando do ventilador;
- **Gerador de frequência (GF):** gera o sinal senoidal para o alto falante;
- **Instrumentação:** medidas de pressão (P) e temperatura (T) em pontos de interesse;
- **Sistema supervisorio:** responsável pelo controle do sistema de fluidização e pela aquisição de dados;
- **Separador de partículas tipo ciclone:** para capturar as partículas expelidas junto ao escoamento;
- **Balança digital:** medida da quantidade de partículas capturadas pelo ciclone em um determinado intervalo de tempo.

A Figura 4.1 é uma representação esquemática da bancada experimental.

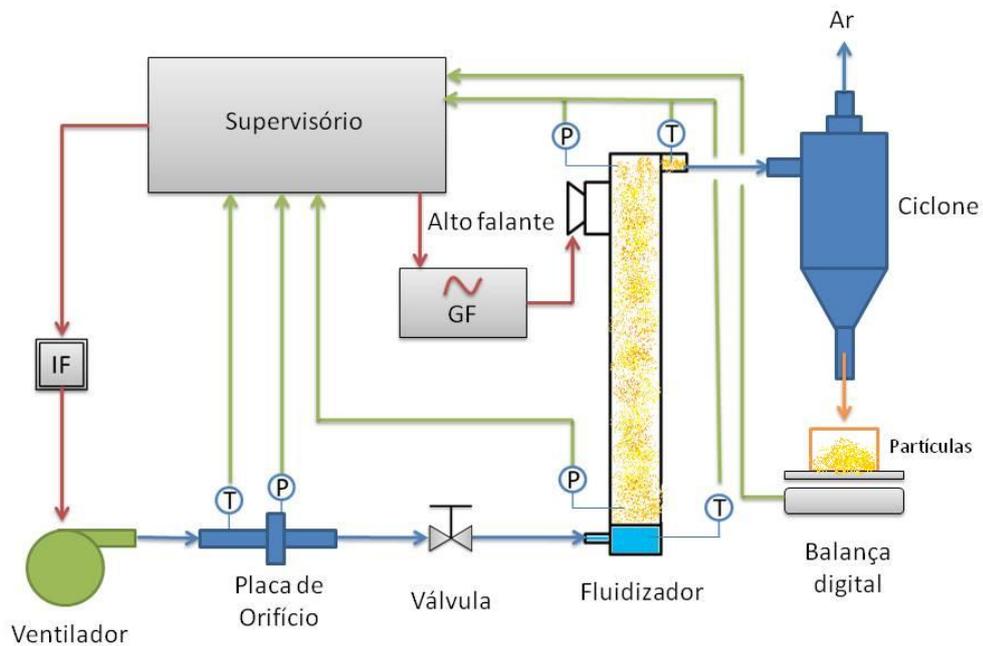


Figura 4.1 – Representação esquemática do sistema de fluidização.

O sistema foi projetado para proporcionar facilidades nas investigações sobre fluidização de leitos. O intuito foi criar uma bancada onde vários tipos de experimentos fossem possíveis, em diferentes regimes de fluidização e diferentes configurações paramétricas (vazões, tipos de partículas, intensidades e frequências de pulsações acústicas, comprimentos do fluidizador, etc.).

4.1. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE FLUIDIZAÇÃO

A fluidização ocorre dentro de um fluidizador que é, basicamente, um vaso contendo um leito de partículas podendo, eventualmente, ser chamado de reator.

O fluidizador foi dimensionado para, junto com o ventilador, operar com vazão de ar suficiente para a fluidização de diferentes tipos e tamanhos de leitos. Suas velocidades de escoamento no reator podem variar de 0 até 7 m/s. Com isto, a bancada pode operar em diferentes regimes de fluidização (borbulhamento, *slugging*, etc.) e até mesmo transporte pneumático (carreamento).

4.2. VENTILADOR

Responsável por gerar o escoamento no sistema (Figura 19), apresenta as seguintes características técnicas:

- Marca/modelo: Ventbras/CV751;
- Pressão de recalque: 29.420 Pa (3.000 mmH₂O);
- Vazão de fim de escala: 0,12 m³/s (426 m³/h);
- Potência do motor: 5,5 kW (7,5 cv).

O escoamento é transportado em uma tubulação de aço de 2” de diâmetro.

As curvas de desempenho fornecidas pelo fabricante do ventilador encontram-se no Anexo C.

4.3. PLACA DE ORIFÍCIO

A placa de orifício é um dispositivo para medida de vazão mássica de fluidos. Seu funcionamento se baseia na teoria da obstrução de Bernoulli (WHITE, 2002), que relaciona a vazão do fluido em uma linha com a variação de pressão gerada por uma obstrução ao escoamento.

Desta forma, a partir do conhecimento dos parâmetros temperatura do escoamento, tipo de fluido (ar, GLP, água, etc.), pressão da linha e pressão diferencial na garganta da placa (Figura 4.2); é possível computar a vazão mássica e volumétrica do escoamento.

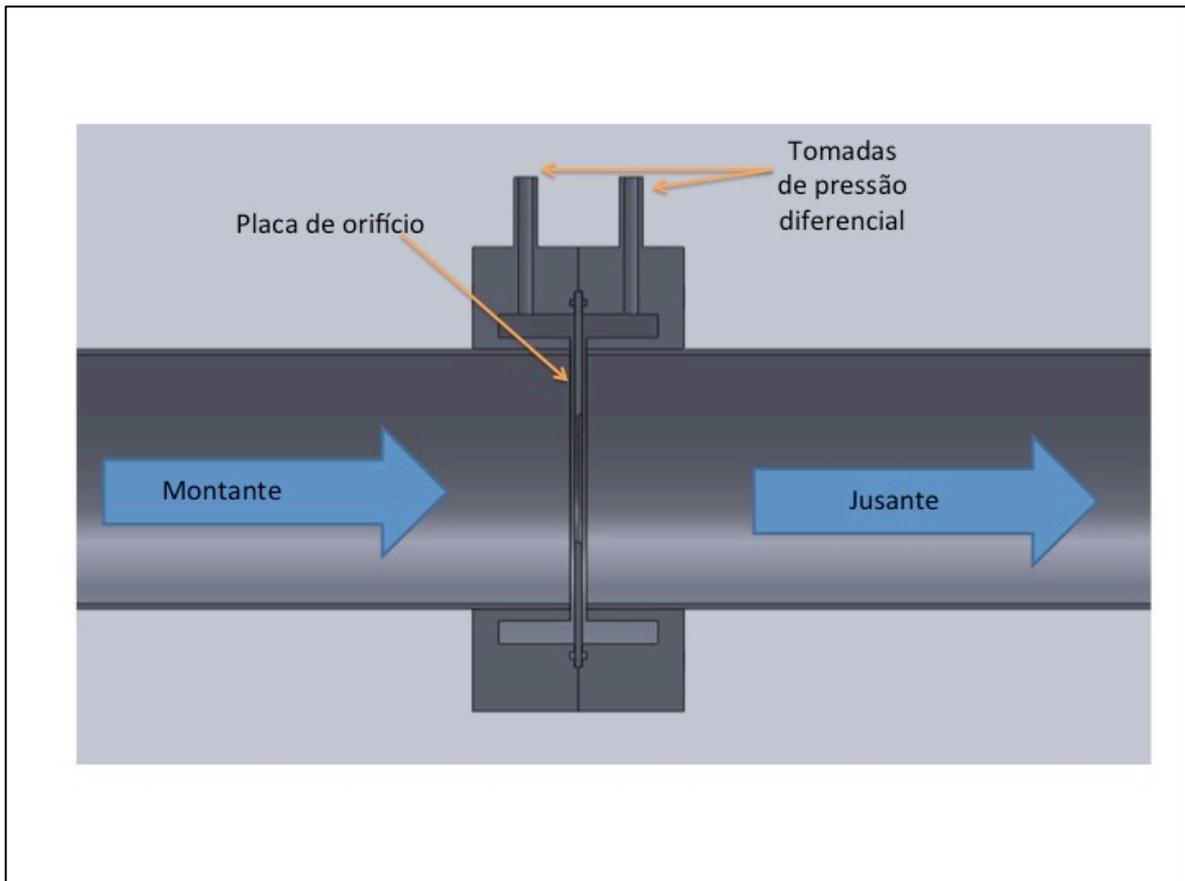


Figura 4.2 - Placa de orifício.

Os desenhos técnicos da placa de orifício, junto com a memória de cálculo, encontram-se no Apêndice B.

O sinal obtido no transdutor de pressão e no termopar é transmitido ao sistema supervisor para o cálculo da vazão mássica. Na Figura 4.3, observa-se a tela de cômputo da vazão da placa de orifício.

CÁLCULOS DE VAZÃO DE AR OU GLP - PLACAS DE ORIFÍCIO - 25 mm <= D <= 1000 - NORMA ISO 5167*98										Última Revisão: 01/11/2006				
RESPOSTA?		DADOS			RESULTADOS PARA D= 50 mm		RESULTADOS PARA 25 mm<D<=50 mm							
O fluido é ar?		ΔP	P1	T1	d OK!	D OK!	SOMENTE PARA CORNER TAPS							
S ou N?	s	mmH2O	mmHg	oC	d/D OK!	RD OK!	CEB?	D muito alto		P2/P1 OK!				
Tomadas pressão comer taps?		d PLACA	D TUBO	P.ATM	P2/P1 OK!		0,16	C*E*B^2 OK!		d/D OK!				
S ou N?	s	mm	mm	mBar	Fluido	Tomada P	Qm	QvI		Rp				
		54,10	107,40	1013	AR	corner taps	138,167	400,29		88235				
NÃO ALTERE AS CELULAS ABAIXO DESTA LINHA														
CE	P1,abs	P2,abs	μ	P1,N	P,atm	PM	k							
INICIO	Pa	Pa	N s/m2	kg/m3	mBar	g/gmol	(Cp/Cv)							
0,6	106348	102390	1,856E-05	1,2426	1013	28,965	1,4							
$\beta = d/D$	E	sl	S1(m2)	S2(m2)	M2	L1	L2							
0,5037	1,0338	0,9906	9,0594E-03	2,2987E-03	0	0	0							
ITERACAO	C	QM	V1	ReD	A	Ccalc	C1	C2	C3	C4	C5			
1	0,6000	0,1365	12,1257	87171	0,1708	0,6074	0,6018	0,0055	0,0000	0,0000	0			
2	0,6074	0,1382	12,2743	88240	0,1691	0,6073	0,6018	0,0055	0,0000	0,0000	0			
3	0,6073	0,1382	12,2737	88235	0,1691	0,6073	0,6018	0,0055	0,0000	0,0000	0			
4	0,6073	0,1382	12,2737	88235	0,1691	0,6073	0,6018	0,0055	0,0000	0,0000	0			
5	0,6073	0,1382	12,2737	88235	0,1691	0,6073	0,6018	0,0055	0,0000	0,0000	0			
6	0,6073	0,1382	12,2737	88235	0,1691	0,6073	0,6018	0,0055	0,0000	0,0000	0			
7	0,6073	0,1382	12,2737	88235	0,1691	0,6073	0,6018	0,0055	0,0000	0,0000	0			
8	0,6073	0,1382	12,2737	88235	0,1691	0,6073	0,6018	0,0055	0,0000	0,0000	0			
9	0,6073	0,1382	12,2737	88235	0,1691	0,6073	0,6018	0,0055	0,0000	0,0000	0			
10	0,6073	0,1382	12,2737	88235	0,1691	0,6073	0,6018	0,0055	0,0000	0,0000	0			

Figura 4.3 – Tela de cálculo da vazão mássica da placa de orifício.

4.4. FLUIDIZADOR

O fluidizador (ou reator) é um vaso com seção transversal quadrada de 14 cm de lado no qual o leito de partículas é percorrido por um escoamento ascendente. A Figura 4.4 apresenta as principais partes do reator.

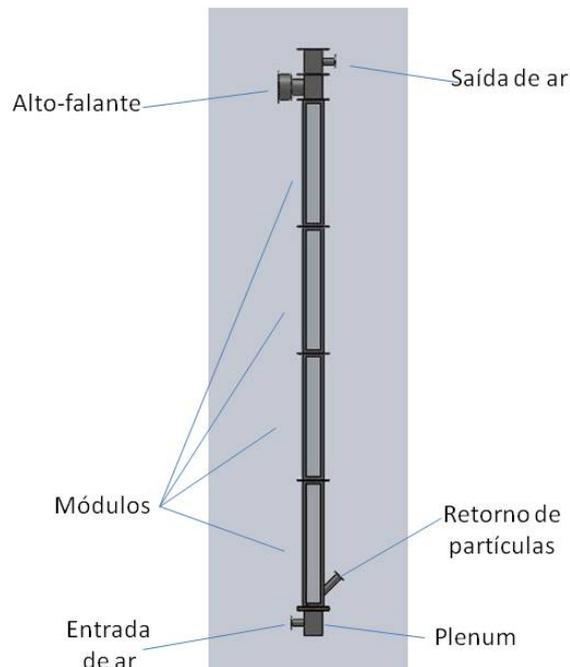


Figura 4.4 - Principais partes do reator do sistema de fluidização.

O reator é formado por uma câmara de equalização de pressão chamada de *plenum* (Figura 4.5) e pelo vaso propriamente dito, onde reside o leito.

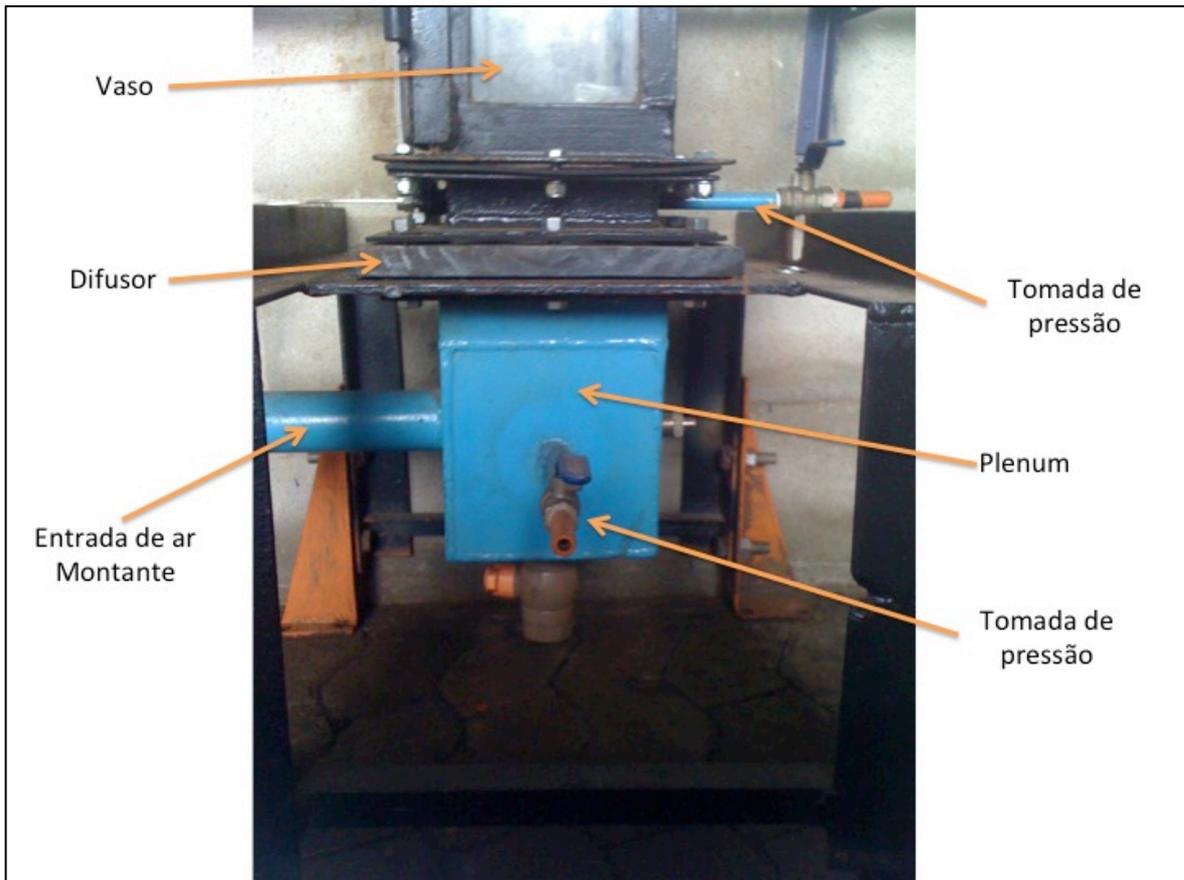


Figura 4.5 – Plenum.

Para inibir a formação de canais preferenciais no leito, o ar é injetado no reator por difusores com *bobble caps* (Figura 4.6). Ao passar pelos *bobble caps*, o escoamento cria um “colchão de ar” responsável por sustentar as partículas. A Figura 4.7 esquematiza a formação destes colchões.

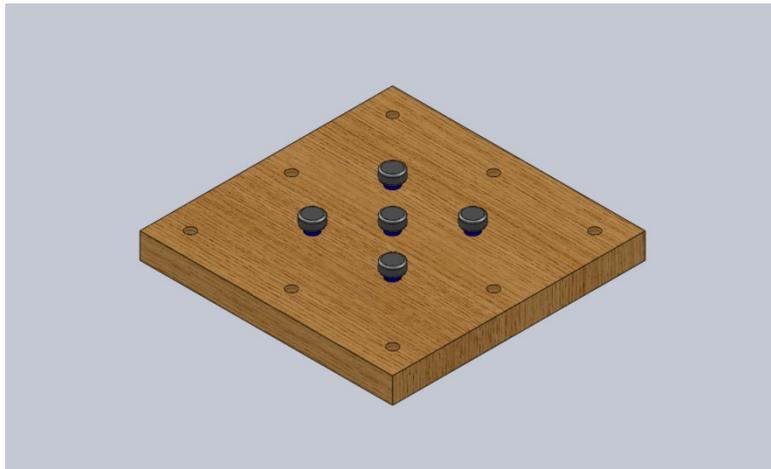


Figura 4.6 – Difusor com 5 *bobble caps* de ϕ 1/2”.

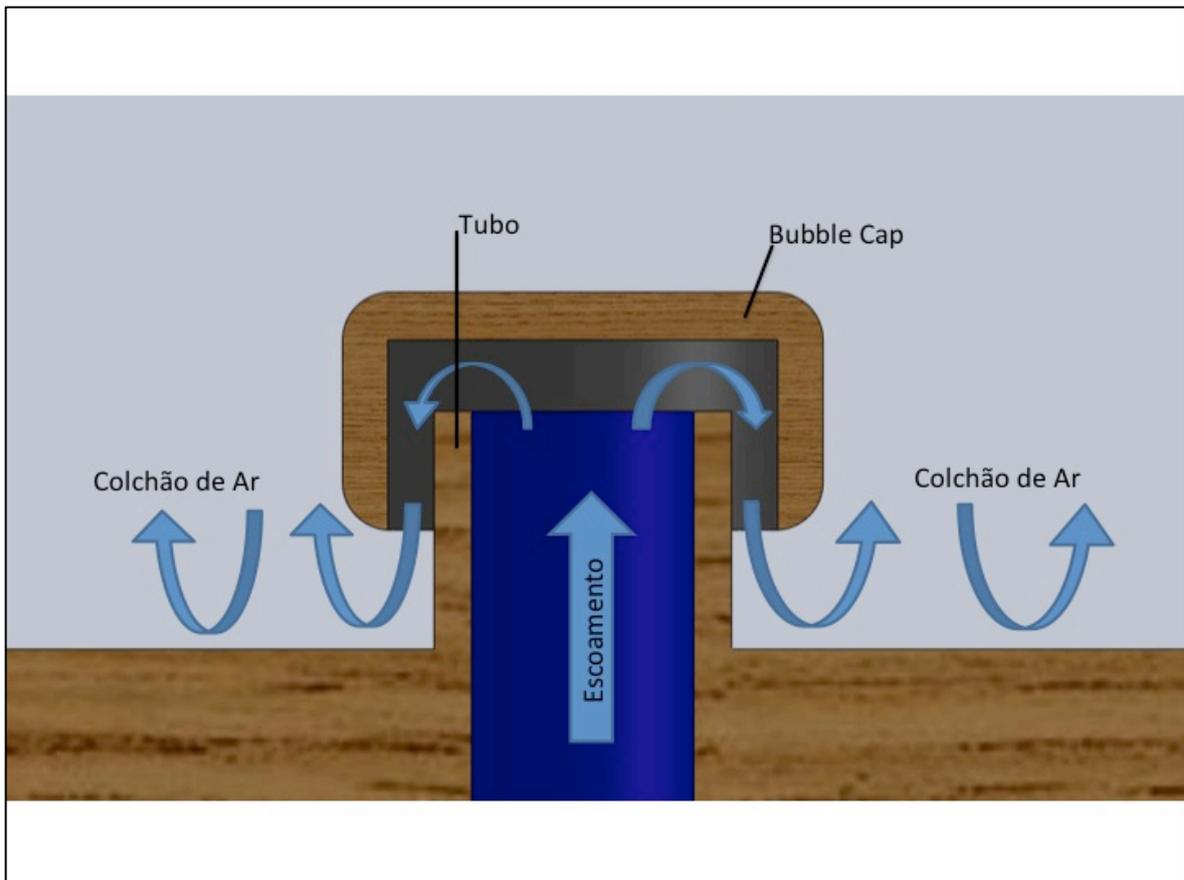


Figura 4.7 – Passagem do ar por um *bobble cap*.

Neste trabalho, foram testados dois tipos de distribuidores. Um com 5 e outro com 24 *bobble caps* de diâmetro ϕ 8 mm (Figura 4.8). Entretanto, apenas a configuração com 5 *bobble caps* funcionou efetivamente, sendo utilizada para os experimentos.



Figura 4.8 – Difusores.

Para que a bancada seja a mais versátil possível, projetou-se um reator modular, com módulos de 1 m cada e com paredes de vidro temperado para visualização do leito. Isto possibilita a variação do tamanho do reator e da localização da instrumentação. Desta forma, o módulo do alto falante (Figura 4.9), por exemplo, pode ser colocado a 1/4, 1/2, 3/4, na base ou no topo do comprimento (L) do reator. O reator montado com todos seus módulos tem 4,5 m de altura.

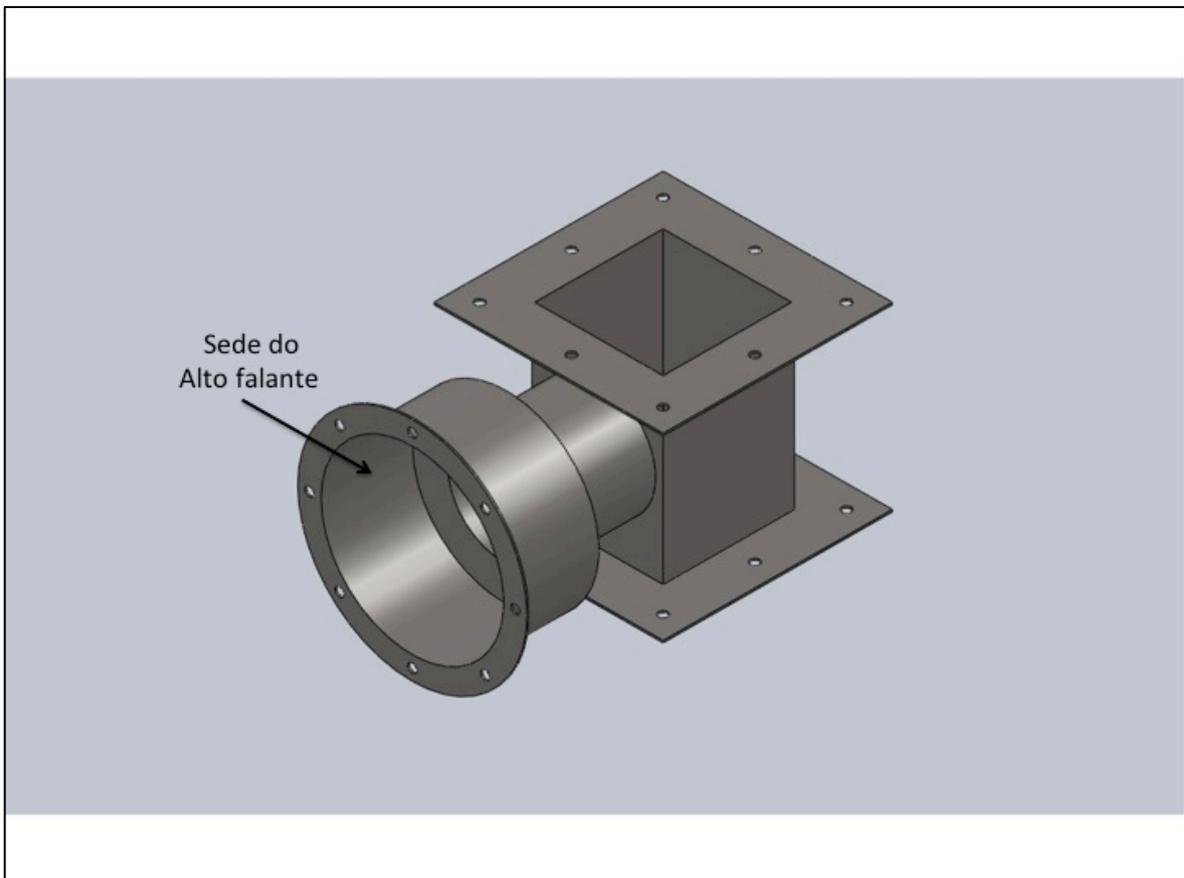


Figura 4.9 – Módulo do alto falante.

Os desenhos técnicos do reator do fluidizador encontram-se no Apêndice C deste trabalho.

4.5. SEPARADOR DE PARTÍCULAS TANGENCIAL – CICLONE

O ciclone é o separador de sólidos mais utilizado na indústria por sua simplicidade construtiva e sua eficiência. Nele, uma mistura de gases e sólidos entra tangencialmente em uma câmara cilíndrica ou cônica, saindo apenas a fase gasosa por uma tubulação superior e a fase sólida por uma tubulação na parte inferior (Figura 4.10).

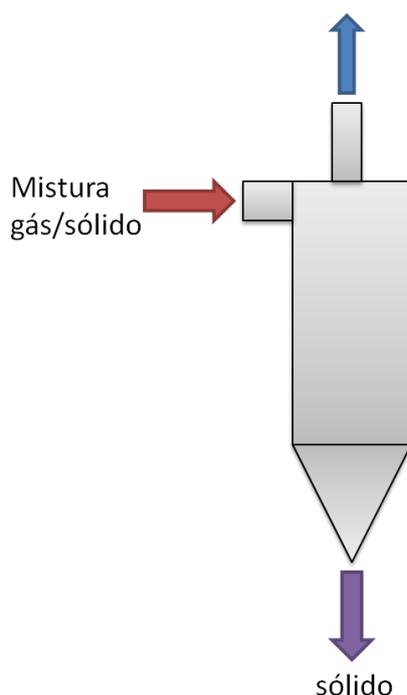


Figura 4.10 - Representação esquemática de um separador ciclônico

De maneira bastante simplista, pode-se dizer que o funcionamento do ciclone se inicia com a injeção de uma corrente gasosa contendo material particulado por uma entrada tangencial próxima ao topo do mesmo. Esta corrente adquire um escoamento em espiral descendente. A força de arrasto da fase gasosa conduz a partícula a uma trajetória em espiral na periferia, colidindo com a parede interna do equipamento. Os sólidos são assim levados a um movimento também em espiral descendente, junto à parede, sendo assim recolhidos na parte inferior do ciclone. Na região central do equipamento, o gás passa de uma espiral descendente a uma espiral ascendente, conhecida como *core*, saindo “limpo” pelo duto superior, também chamado tubo de saída do gás ou *draft tube* (CORRÊA, 2003). A Figura 4.11 mostra o ciclone já ligado ao fluidizador.



Fluidizador

Ciclone

Figura 4.11 – Ciclone ligado ao fluidizador.

Os desenhos técnicos com dimensões, geometrias e materiais utilizados na construção do ciclone encontram-se no Apêndice D deste trabalho.

4.6. INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Responsável pelo controle da velocidade do motor do ventilador através do ajuste da tensão e frequência trifásicas. É interligado via rede (modbus) ao sistema supervisorío possibilitando seu controle via computador.

Suas especificações técnicas são:

- Modelo: WEG CVW-09;
- Potência: 12 cv (8,8 kW);
- Tensão de saída: 220 – 230 V AC;
- Frequência: 0 – 170/204 Hz.

4.7. MÓDULO AMPLIFICADOR DE SINAL

É responsável por amplificar o sinal elétrico vindo do sistema de supervisão, fornecendo a potência elétrica necessária ao alto falante. É composto por dois canais de 180 W cada.

4.8. INSTRUMENTAÇÃO

Apesar de o experimento ser realizado a temperatura ambiente pouco variável, a bancada é instrumentada com termopares do tipo K.

Para as medidas de pressão, serão utilizados um manômetro de coluna d'água e um transdutor de pressão.

O modelo e as especificações do transdutor de pressão são:

- Modelo: Dwyer Series 668;
- Escala: 0 – 25” CA ou 0 – 635 mmH₂O (0 – 6,23 kPa);
- Precisão: ± 1% da escala de fundo;
- Tensão: 12 – 30 Vdc;
- Corrente de saída: 4 – 20 mA, 2 cabos.

As medidas de massa serão realizadas em uma balança digital com as seguintes especificações:

- Modelo: Toledo 9094C/4;
- Fundo de escala: 3 ou 6 kg (configurável);
- Precisão: 0,001 g.

4.9. SISTEMA SUPERVISÓRIO

É o sistema responsável pela interface entre a bancada e o usuário. Os comandos de velocidade do ventilador (rotação do motor) e frequência do sinal acústico são efetuados através dele. A Figura 4.12 mostra a tela do sistema.

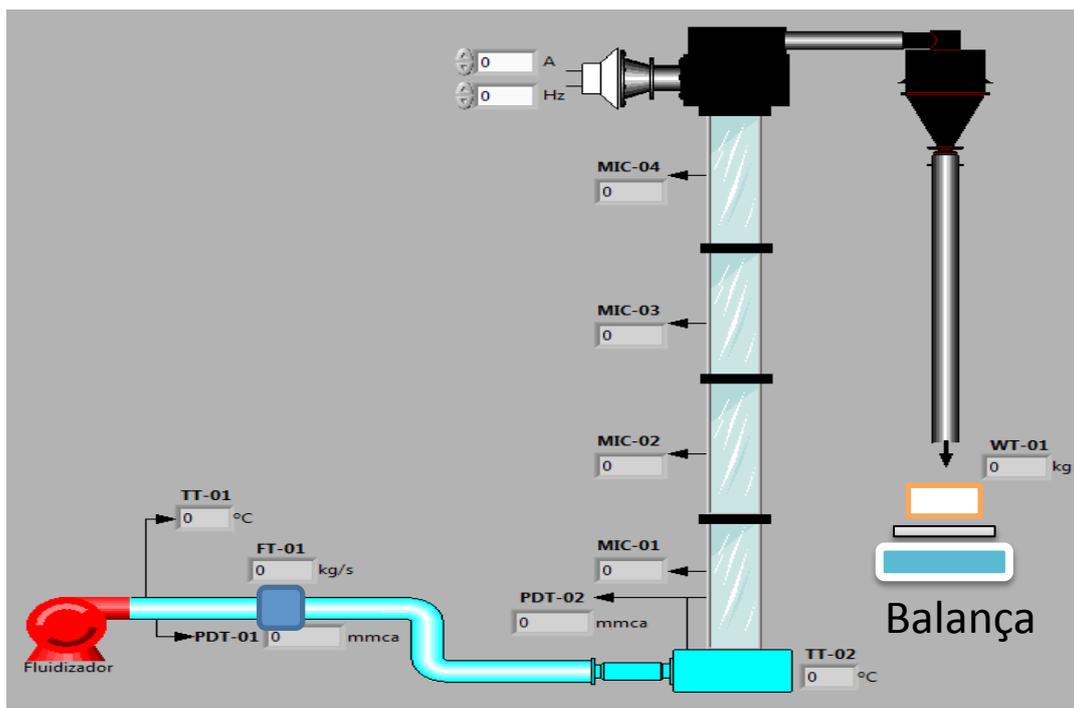


Figura 4.12 - Tela de comando do sistema supervisório.

No Anexo D encontra-se um texto com as especificações detalhadas do sistema.

4.10. LEITO

Para os ensaios deste trabalho, utilizou-se vermiculita obtida por peneiramento em malha de 0,3 mm, segundo dados do fabricante. Não foi possível determinar, com as condições laboratoriais existentes, a curva de distribuição granulométrica. Possivelmente, há diferentes tamanhos de partículas sendo que as de classe 0,3 mm prevalecem.

A vermiculita faz parte do grupo de minerais micáceos⁶, silicatos hidratados de composição variada, originados da alteração de micas. Esses minerais, quando aquecidos, perdem a água, intumescem e adquirem o aspecto de um verme; podem ser utilizados como refratários, e como material de construção para diversos fins especiais. Sua massa específica é de aproximadamente 151,2 kg/m³ e é classificada como do tipo B de Geldart (Figura 4.13).

⁶ Micáceos: Designação comum aos minerais do grupo das micas, silicatos de alumínio e de metais alcalinos aos quais frequentemente se associam magnésio e ferro; malacacheta.



Figura 4.13 - Vermiculita utilizada no leito.

4.11. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para os ensaios, foi aplicada a seguinte metodologia:

1. Mediu-se a massa de leito colocada no reator. O valor médio intentado foi de 1 kg;
2. Iniciou-se o escoamento com velocidade de fluidização. O sistema foi ajustado para que a vazão volumétrica do ar fosse de $0,066 \text{ m}^3/\text{s}$, resultando na velocidade de $2,86 \text{ m/s}$ dentro do reator;
3. Mediu-se a quantidade (massa) de sólidos ejetados pelo *freeboard* e capturados pelo separador de partículas (ciclone);

Dividindo-se a vazão volumétrica de ar pela área transversal do reator, obtêm-se a velocidade utilizada nos experimentos: $U = 2,86 \text{ m/s}$. A perda de carga, obtida a partir da equação 2.7, corresponde ao peso do leito utilizado para o experimento, ou seja: $\Delta P = 0,47 \text{ kPa}$.

Os experimentos foram repetidos primeiramente sem excitação acústica e, depois, com excitação acústica. Quando com excitação acústica, a frequência foi ajustada manualmente em $127,00 \text{ Hz}$. Esta frequência foi escolhida pois foi a que melhor apresentou resultados. Isto foi possível quando, ao se variar a frequência, o batimento das ondas tornou-se nulo. Tal procedimento é similar à afinação de instrumentos de sopro e de cordas (método dos harmônicos). Outras frequências foram testadas, entretanto, a

intensidade dos fenômenos não foi suficiente para caracterizar um harmônico (ausência de batimentos). Possivelmente, isto se deve ao fato de o reator não ser um tubo perfeito e a propagação da onda mecânica não ser unidimensional pois o diâmetro do tubo é proporcionalmente grande em relação ao seu comprimento. Além disto, existirem diversas interferências ambientais atuantes no momento dos experimentos tais como: motores, o ventilador do sistema e ruídos externos. Comportamento similar foi observado por FLÜGEL (2006) ao investigar experimentalmente a influência de campos acústicos na queima de *sprays*.

Em seu trabalho, Flügel testou diferentes posições de transdutores de pressão em um tubo excitado acusticamente. As setas representam as posições dos transdutores de pressão (Fig. 3.8). Com isso, Flügel buscou identificar a posição em que o sistema melhor se comporta. Ou seja, sintonizou o sistema.

Apesar de o aumento da amplitude (I_{pa}) ser favorável à qualidade da fluidização (CAO, DONG, & ZHAO, 2009), no presente trabalho esse valor será mantido constante diante as limitações físicas do sonofletor (alto falante), que depende do curso de seu elemento vibratório para variar a amplitude da onda sonora gerada.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

As Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam os dados obtidos nas séries de ensaios de fluidização sem excitação acústica e com excitação acústica, respectivamente.

Tabela 5.1 - Ensaio de fluidização sem excitação acústica

ENSAIO SEM EXCITAÇÃO ACÚSTICA							
Leito:		Vermiculita			DATA: 27 e 28/05/12		
Área do Reator (m ²):		0,023104					
Frequência (Hz):		---					
Tempo dos Ensaios:		10 min					
Ensaio	Dados de Entrada			Dados de Saída			
	Vazão Volumétrica Ar (m ³ /s)	Massa Inicial (kg)	Massa Carreada (kg)	Velocidade do Escoamento (m/s)	Percentual de Massa Carreada (%)	Taxa de Carreamento (kg/h)	
1	0,066	1,108	0,019	2,86	1,71	0,114	
2	0,067	1,110	0,020	2,90	1,80	0,12	
3	0,066	1,108	0,018	2,86	1,62	0,108	
4	0,058	1,109	0,017	2,51	1,53	0,102	
5	0,066	1,110	0,020	2,86	1,80	0,12	
6	0,069	1,110	0,022	2,99	1,98	0,132	
7	0,066	1,111	0,019	2,86	1,71	0,114	
8	0,066	1,112	0,020	2,86	1,80	0,12	
9	0,067	1,110	0,018	2,90	1,62	0,108	
10	0,064	1,110	0,016	2,77	1,44	0,096	
11	0,065	1,110	0,020	2,81	1,80	0,120	
12	0,066	1,110	0,019	2,86	1,71	0,114	
13	0,066	1,111	0,018	2,86	1,62	0,108	
14	0,066	1,108	0,019	2,86	1,71	0,114	
15	0,067	1,109	0,020	2,90	1,80	0,120	
16	0,067	1,108	0,021	2,90	1,90	0,126	
17	0,066	1,108	0,017	2,86	1,53	0,102	
18	0,066	1,110	0,013	2,86	1,17	0,078	
19	0,066	1,108	0,019	2,86	1,71	0,114	
20	0,087	1,109	0,024	3,77	2,16	0,144	
21	0,066	1,108	0,019	2,86	1,71	0,114	
	0,066	1,110	0,019	2,86	1,71	0,114	Média
	0,001	0,000	0,000	0,95	0,80	0,004	Desvio Padrão

A primeira série de experimentos, com 21 ensaios, foi realizada para obter um padrão de referência, onde o sistema funciona sem a ação do campo acústico. Cada experimento durou dez minutos e os parâmetros de operação - velocidade do ar e massa inicial de vermiculita; foram mantidos respectivamente em 2,86 m/s e 1,110 kg. Nestas condições, a massa carreada do leito foi de 0,019 kg, que representa 1,71 % do leito. A taxa de carreamento, massa carreada na unidade de tempo, foi de 0,114 kg/h.

Tabela 5.2 -Ensaio de fluidização com excitação acústica. Frequência: 127,00 Hz

ENSAIO COM EXCITAÇÃO ACÚSTICA							
Leito:		Vermiculita			DATA: 27 e 28/05/12		
Área do Reator (m ²):		0,023104					
Frequência (Hz):		127,00					
Tempo dos Ensaios:		10 min					
Ensaio	Dados de Entrada			Dados de Saída			
	Vazão Volumétrica Ar (m ³ /s)	Massa Inicial (kg)	Massa Carreada (kg)	Velocidade do Escoamento (m/s)	Percentual de Massa Carreada (%)	Taxa de Carreamento (kg/h)	
1	0,067	1,110	0,003	2,90	0,27	0,018	
2	0,066	1,108	0,005	2,86	0,45	0,03	
3	0,077	1,108	0,007	3,33	0,63	0,042	
4	0,058	1,109	0,002	2,51	0,18	0,012	
5	0,066	1,111	0,004	2,86	0,36	0,024	
6	0,064	1,123	0,003	2,77	0,27	0,018	
7	0,066	1,121	0,003	2,86	0,27	0,018	
8	0,068	1,112	0,004	2,94	0,36	0,024	
9	0,06	1,110	0,002	2,60	0,18	0,012	
10	0,063	1,110	0,022	2,73	1,98	0,132	
11	0,066	1,111	0,007	2,86	0,63	0,042	
12	0,066	1,000	0,012	2,86	1,20	0,072	
13	0,067	1,010	0,003	2,90	0,30	0,018	
14	0,07	1,122	0,010	3,03	0,89	0,060	
15	0,068	1,110	0,006	2,94	0,54	0,036	
16	0,067	1,100	0,004	2,90	0,36	0,024	
17	0,066	1,108	0,003	2,86	0,27	0,018	
18	0,066	0,980	0,013	2,86	1,33	0,078	
19	0,066	1,100	0,003	2,86	0,27	0,018	
20	0,087	0,998	0,011	3,77	1,10	0,066	
21	0,066	1,000	0,003	2,86	0,30	0,018	
	0,066	1,109	0,004	2,86	0,36	0,024	Média
	0,001	0,050	0,000	1,26	4,40	0,018	Desvio Padrão

Na segunda série de experimentos, outros 21 ensaios foram realizados sob as mesmas condições operacionais de velocidade do escoamento e massa inicial do leito. Entretanto, nesta série, houve o uso de campo acústico ($f = 127$ Hz). Nestas condições, observou-se que a massa carreada foi de 0,004 kg, representando 0,36 % do leito. A taxa de carreamento foi de 0,024 kg/h, evidenciando a influência da excitação acústica no carreamento. Até o momento da conclusão deste texto, não foram encontradas, referências reportando tal comportamento.

Para se interpretar os dados experimentais, far-se-á um estudo teórico do comportamento de uma partícula percorrendo o tubo (reator). Primeiramente, determina-se as frequências de ressonância a partir da equação (3.12), para o tubo de $L = 4$ m. A Tabela

5.3 mostra os valores dos 10 primeiros modos (harmônicos), bem como a posição dos nós e antinós da onda estacionária⁷:

Tabela 5.3 - Frequências de ressonância e posições dos nós e antinós de deslocamento.

n	f (Hz)	X_{nó} (m)	X_{antinó} (m)
1	43,27	2,00	4,00
2	86,53	1,00	2,00
3	129,80	0,67	1,33
4	173,10	0,50	1,00
5	216,30	0,40	0,80
6	259,60	0,33	0,67
7	302,90	0,29	0,57
8	346,10	0,25	0,50
9	389,40	0,22	0,44
10	432,70	0,20	0,40

No experimento, a frequência de 127,00 Hz permitiu a excitação do sistema. Desta forma, comparando com os resultados teóricos (Tab. 5.3) pode-se inferir que o sistema pode ser caracterizado como operando no terceiro harmônico, com afastamento da ordem de 2 % em relação ao valor teórico de 129,80 Hz. Para esta frequência, a posição do primeiro nó de deslocamento é $X_{nó} = 0,67$ m; e do primeiro antinó é $X_{antinó} = 1,33$ m. A Figura (5.1) representa a onda estacionária no terceiro harmônico:

⁷ Os códigos fonte usados para os cálculos deste trabalho encontram-se no APÊNDICE F – Códigos Fonte.

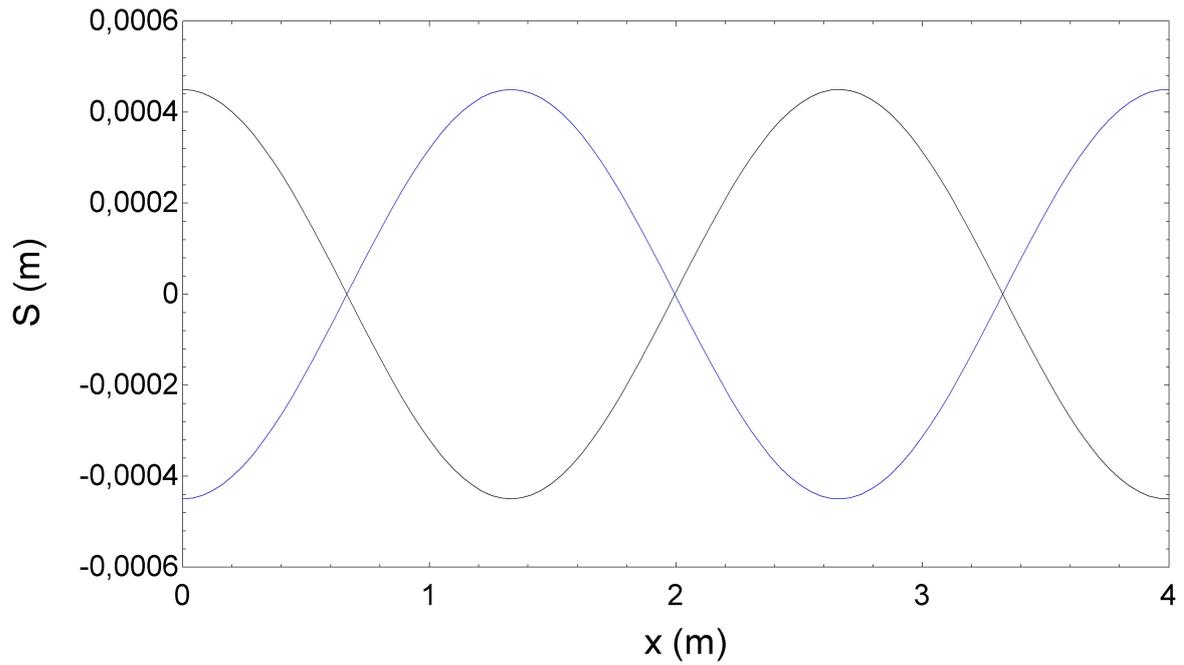


Figura 5.1 - Ondas estacionárias no terceiro harmônico no tubo de 4 m.

Desta forma, regiões com pressões máximas e mínimas são formadas ao longo do tubo: nós e antinós. A figura (5.2) representa esquematicamente este fenômeno:

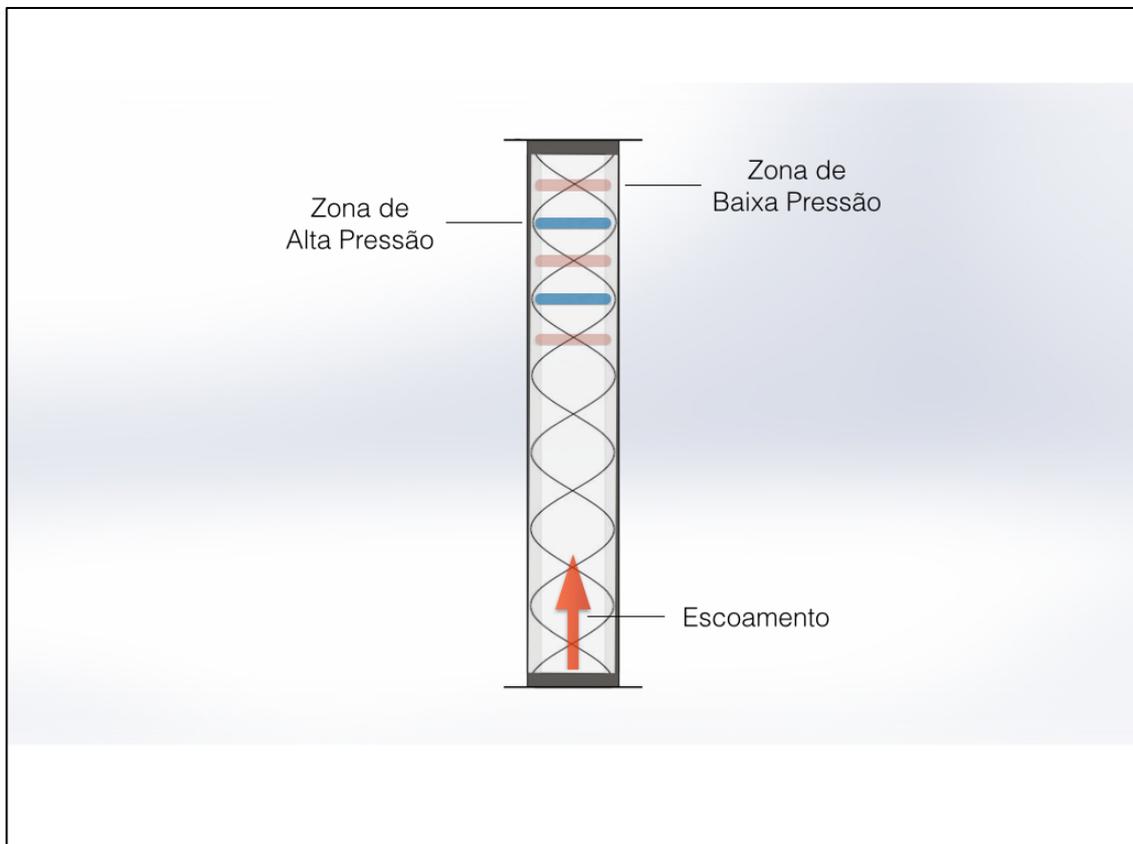


Figura 5.2 - Zonas de pressão no interior do fluidizador.

5.1. INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DA PARTÍCULA NO SEU DESLOCAMENTO

Com o auxílio de um *software*⁸, equacionou-se o balanço de forças atuantes em uma partícula (assumida como esférica) imersa em um escoamento pulsante com diferentes frequências acústicas atuantes (harmônicos). Foram considerados o peso, o arrasto aerodinâmico e a pulsação acústica. A partir do balanço de forças (força resultante = força de arraste – peso da partícula), foi possível descrever as acelerações atuantes na partícula e, por consequência, o perfil de velocidades e a trajetória da partícula em função do tempo. Considerou-se, para este estudo, apenas a dimensão do eixo longitudinal do reator, Z. As equações utilizadas, constantes no capítulo 2 e 3 deste trabalho, foram:

- Força de arrasto atuante em uma partícula esférica: Equação (2.8);
- Área frontal de uma esfera: Equação (2.9);
- Coeficiente de arrasto aerodinâmico: Equação (2.10); e
- Equação da onda para deslocamento: Equação (3.6).

A partir destas equações, foi possível conduzir o estudo teórico da influência do diâmetro da partícula sobre seu deslocamento no intervalo de tempo. Para isso, os cálculos foram feitos com dez diferentes tamanhos de partículas (consideradas esféricas) sujeitas à mesma frequência $f = 127$ Hz. Os demais parâmetros serão mantidos constantes:

- Temperatura do gás: 25 °C;
- Pressão: 101,32 kPa;
- Velocidade média do gás: 2,86 m/s;
- Massa específica da partícula: 151,2 kg/m³;

A tabela 5.4 apresenta os dados obtidos ao se relacionar o diâmetro da partícula (d_p) e sua posição (Z):

Tabela 5.4 – Posição da partícula para diferentes diâmetros.

d_p (mm)	Z (m)
0,30	0,16830
0,40	0,12080
0,50	0,11490
0,6	0,11110
0,70	0,10840
0,80	0,10620
0,90	0,10450

⁸ Neste estudo, utilizou-se o *software Engineering Equation Solver* (EES).

1,00	0,10
------	------

Os dados da tabela (5.4), quando plotados, tomam a forma do seguinte gráfico (Fig. 5.3):

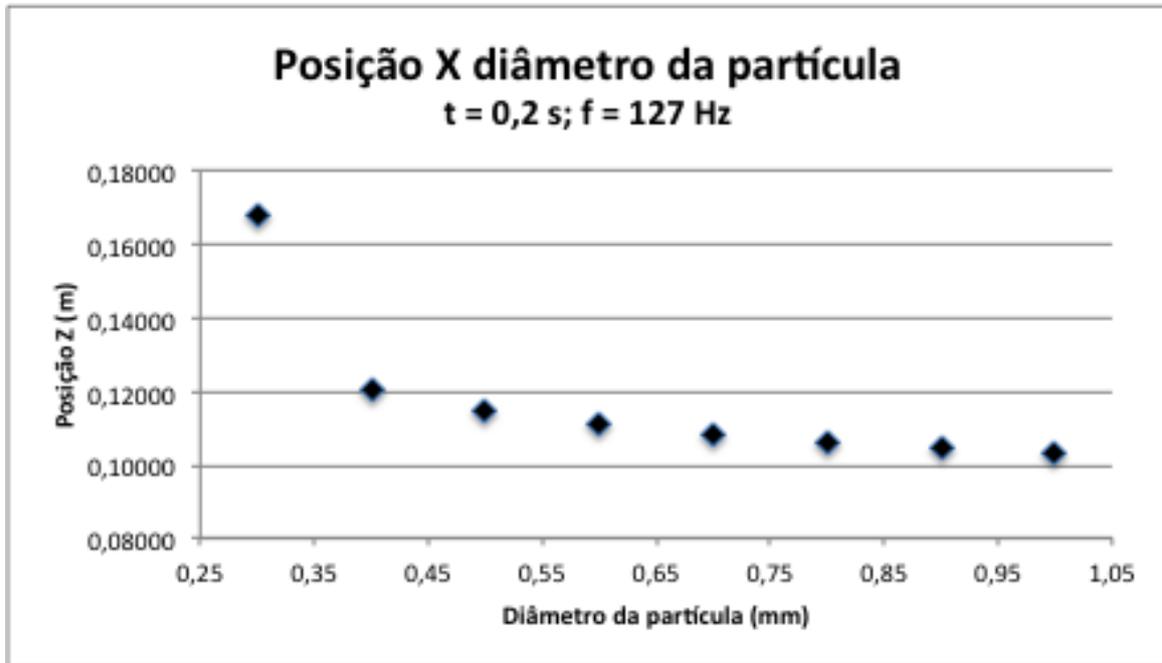


Figura 5.3 – Posição da partícula em função de seu diâmetro.

Infere-se que o aumento do diâmetro da partícula torna menor seu deslocamento. Comportamento similar foi observado por Veras e Carvalho (1995) quando estudando o comportamento de partículas de carvão em um escoamento pulsante, como foi observado na figura (3.8) do capítulo 3 do presente trabalho.

5.2. INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA ACÚSTICA NO DESLOCAMENTO DA PARTÍCULA

A seguir, analisa-se a influência da frequência acústica no deslocamento da partícula. Para isso, o mesmo procedimento da seção anterior foi realizado tomando-se, entretanto, o diâmetro de partícula constante $d = 0,3$ mm e variando-se a frequência. Repetindo-se os cálculos para cada harmônico, obteve-se a tabela seguinte:

Tabela 5.5 – Posição da partícula no instante $t = 0,2$ s para os 10 primeiros harmônicos.

f (Hz)	Z (m)
0	0,2907
43,27	0,2495
86,53	0,1683
129,8	0,1169
173,1	0,08903
216,3	0,07752
259,6	0,07453
302,9	0,08439
346,1	0,04096
389,4	0,06066
432,7	0,05428

Depreende-se, observando os resultados, que conforme a frequência aumenta, a posição da partícula no mesmo instante ($t = 0,2$ s) é menor. Ou seja, o deslocamento é menor e, por consequência, o tempo de residência da partícula no reator é maior. A imagem seguinte representa de forma gráfica os resultados da tabela (5.4):

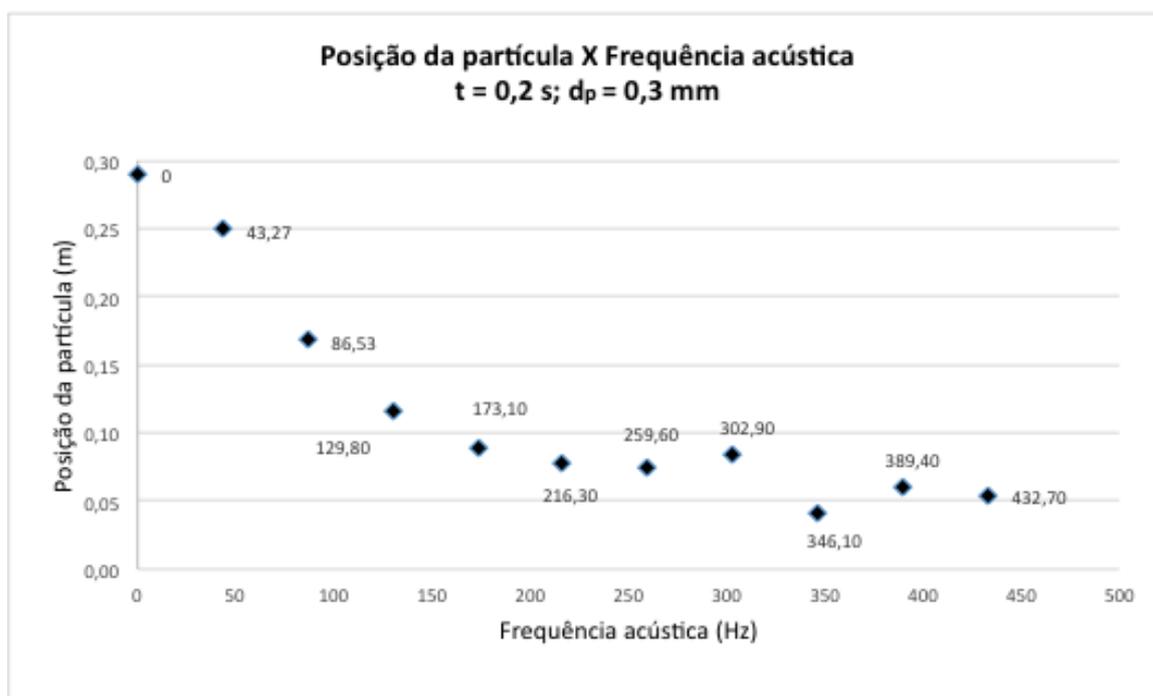


Figura 5.4 – Posição da partícula no instante $t = 0,2$ s nos 10 primeiros harmônicos do sistema.

5.3. TEMPO DE RESIDÊNCIA DA PARTÍCULA (Z=8 M)

A seguir, analisa-se a influência da frequência acústica no tempo de residência da partícula (t_{res}). Para isso, o mesmo procedimento da seção anterior foi realizado tomando-se, entretanto, o diâmetro de partícula constante $d = 0,3$ mm, o deslocamento $Z = 8$ m e variando-se a frequência. O deslocamento de 8 m foi escolhido por ser um tamanho usual de reatores na indústria. Repetindo-se os cálculos para cada harmônico, obteve-se a tabela seguinte:

Tabela 5.6 - Tempo de Residência X Frequência.

f (Hz)	Tres (s)
0	1,33
43,27	2,14
86,53	2,48
129,8	2,606
173,1	2,66
216,3	2,69
259,6	2,71
302,9	2,71
346,1	2,76
389,4	2,77
432,7	2,78

A partir da tabela 5.6, obteve-se o seguinte gráfico (Fig. 5.5):

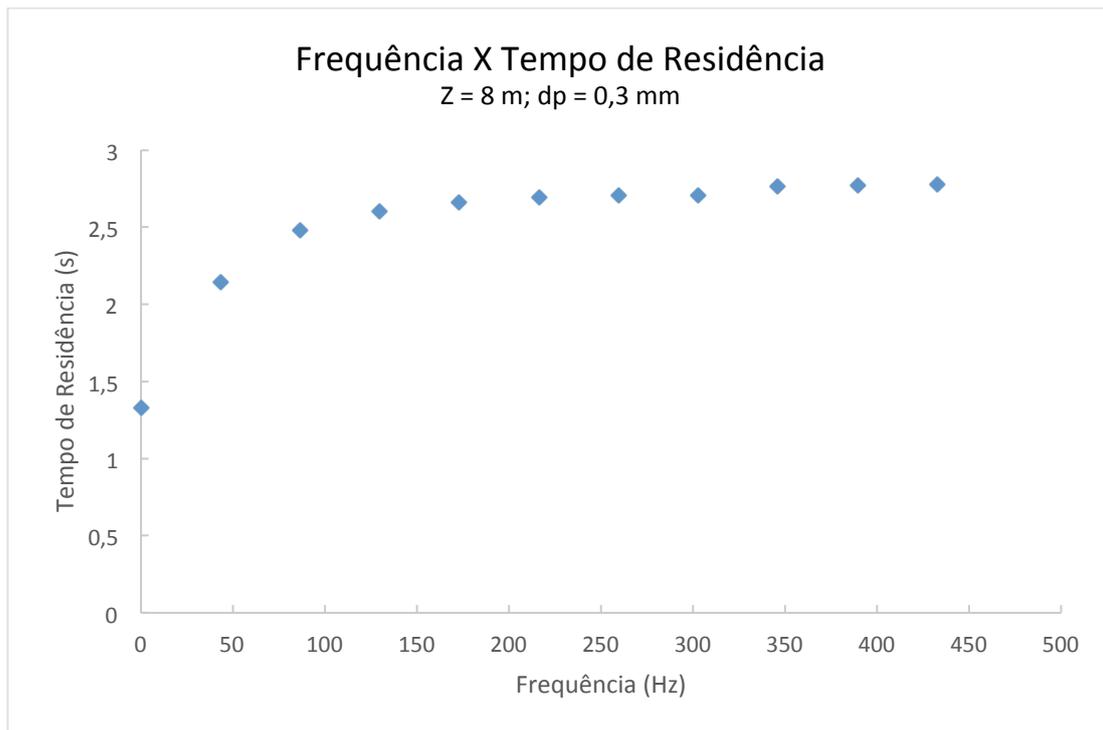


Figura 5.5 – Tempo de Residência da partícula para os 10 primeiros harmônicos.

A partir dos dados obtidos na tabela 5.6, obteve-se por regressão polinomial, a seguinte equação:

$$t_{res} = -3 \cdot 10^{-15} Z^6 + 5 \cdot 10^{-12} Z^5 - 4 \cdot 10^{-9} Z^4 + 10^{-6} Z^3 - 0,0002 Z^2 + 0,0273 Z + 1,33 \quad (5.1)$$

Observa-se que a partir do terceiro harmônico, a influência da variação da frequência sobre a partícula diminui.

A seguir, se conduzirá o estudo teórico de três cenários distintos, onde a frequência assume diferentes valores, afim de aprofundar os conhecimentos a respeito do fenômeno observado. Com o auxílio de um *software*⁹, equacionou-se o balanço de forças atuantes em uma partícula (assumida como esférica) imersa em um escoamento pulsante com diferentes frequências acústicas atuantes. Foram considerados o peso, o arrasto aerodinâmico e a pulsação acústica. A partir do balanço de forças, foi possível descrever as acelerações atuantes na partícula e, por consequência, o perfil de velocidades e a trajetória da partícula em função do tempo. Considera-se, para este estudo, apenas a dimensão do eixo longitudinal do reator, Z.

⁹ Neste estudo, utilizou-se o *software Engineering Equation Solver (EES)*.

Nos três cenários seguintes, realiza-se a análise de sensibilidade do sistema em relação à frequência. Busca-se assim, observar o efeito da variação deste parâmetro no comportamento da partícula.

5.4. CENÁRIO 1: $F = 127 \text{ HZ}$

Os parâmetros do primeiro cenário deste estudo são os seguintes:

- Frequência acústica: 127 Hz;
- Velocidade média do gás: 2,86 m/s;
- Massa específica da partícula: 151,2 kg/m³;
- Diâmetro da partícula: 0,0003 m (0,3 mm).

Aplicando-se o balanço de forças atuantes em uma partícula (considerada esférica) obtém-se o seguinte perfil de deslocamento (Fig. 5.6):

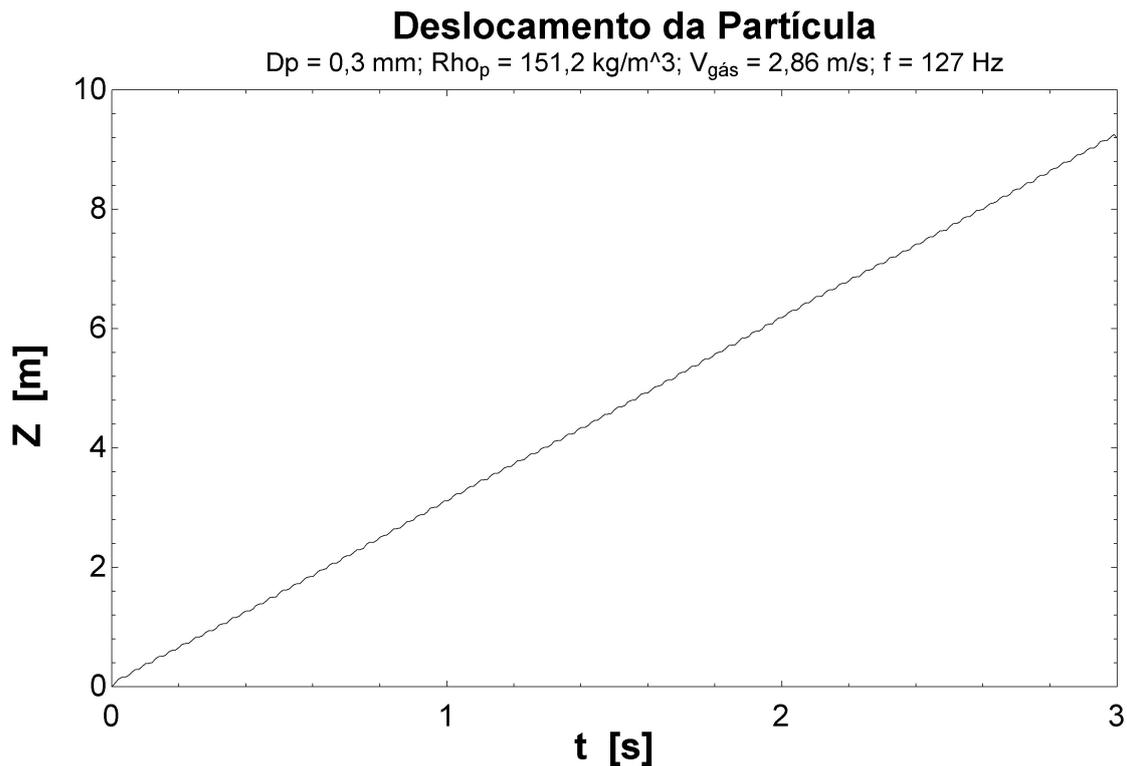


Figura 5.6 - Deslocamento da partícula sob ação da força de arrasto. $f = 127 \text{ Hz}$.

Observando-se este fenômeno mais de perto, em um intervalo de tempo 0,3 segundo; é possível ter uma visão mais clara do comportamento da partícula (Fig. 5.7). Cabe observar que em determinados instantes, a partícula inverte o sentido de seu deslocamento.

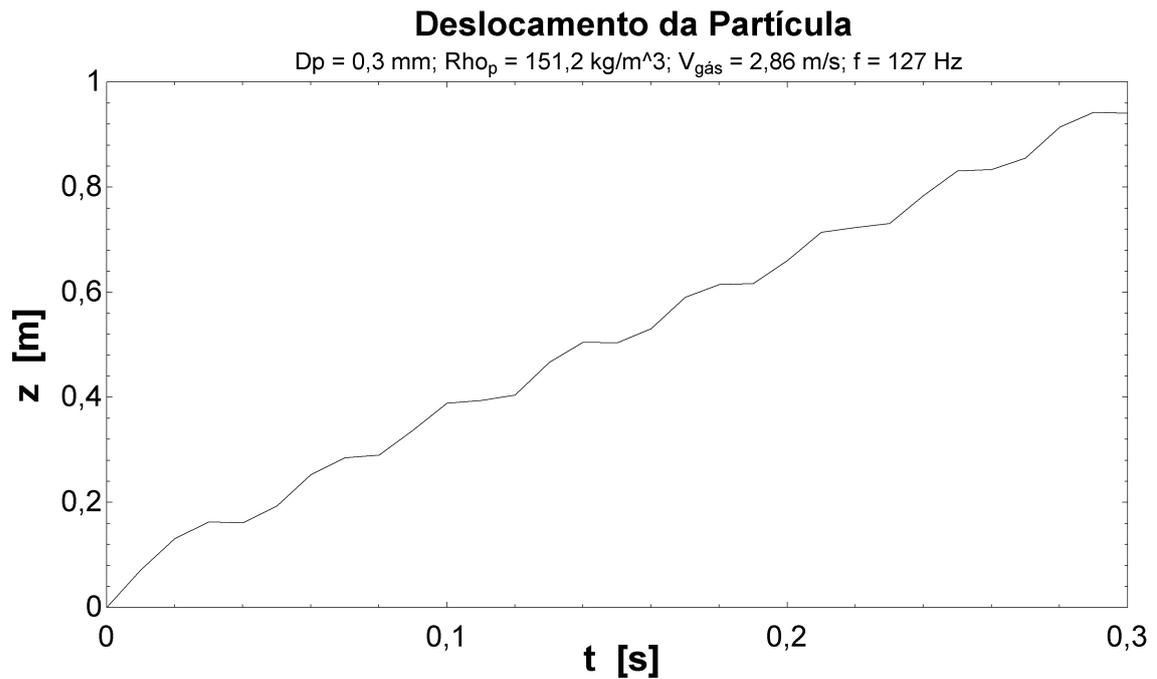


Figura 5.7 – Deslocamento da partícula sob ação da força de arrasto. Intervalo de tempo: 0,3 segundo. $f = 127 \text{ Hz}$.

Para se compreender melhor o fenômeno, é necessário investigar os perfis de velocidade e aceleração da partícula. Como resultado do balanço de forças atuantes na partícula, obteve-se o perfil de aceleração representado na figura 5.8, o qual comprova que a resultante do balanço de forças oscila, variando seu sentido quando em um escoamento pulsante. Como consequência do comportamento oscilante da aceleração da partícula, o perfil de velocidade também adquire a forma oscilante, como pode ser observado na figura 5.9. Cabe observar, que em determinados instantes, a velocidade da partícula se torna negativa.

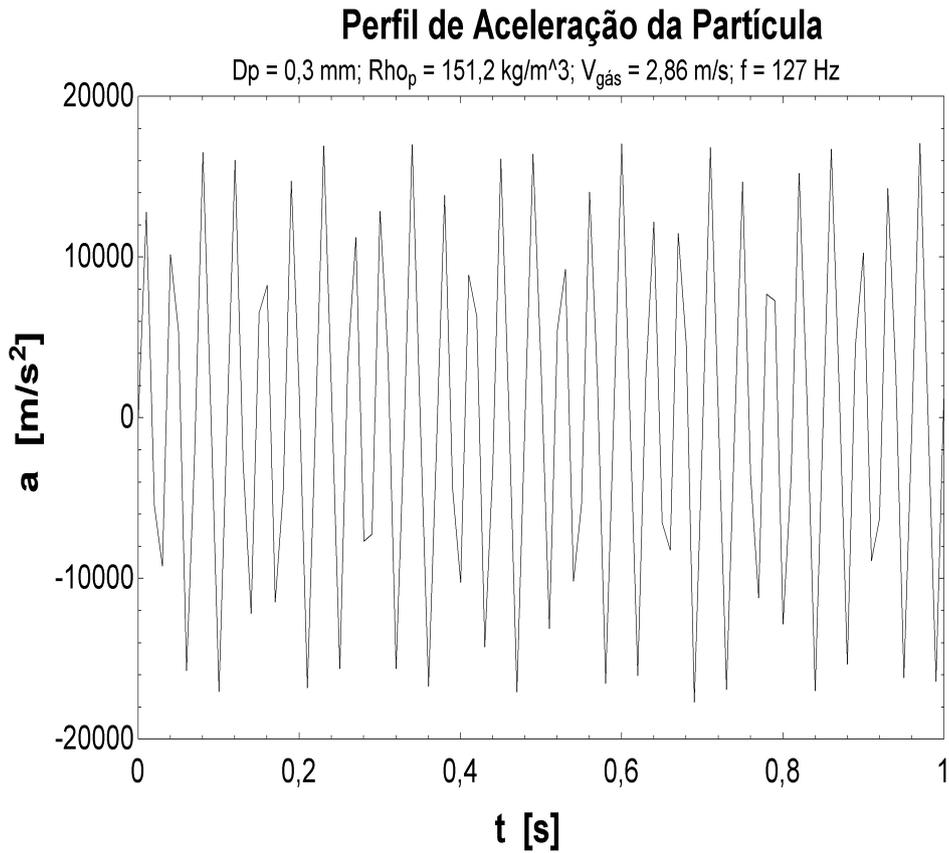


Figura 5.8 - Perfil de aceleração da partícula. $f = 127 \text{ Hz}$.

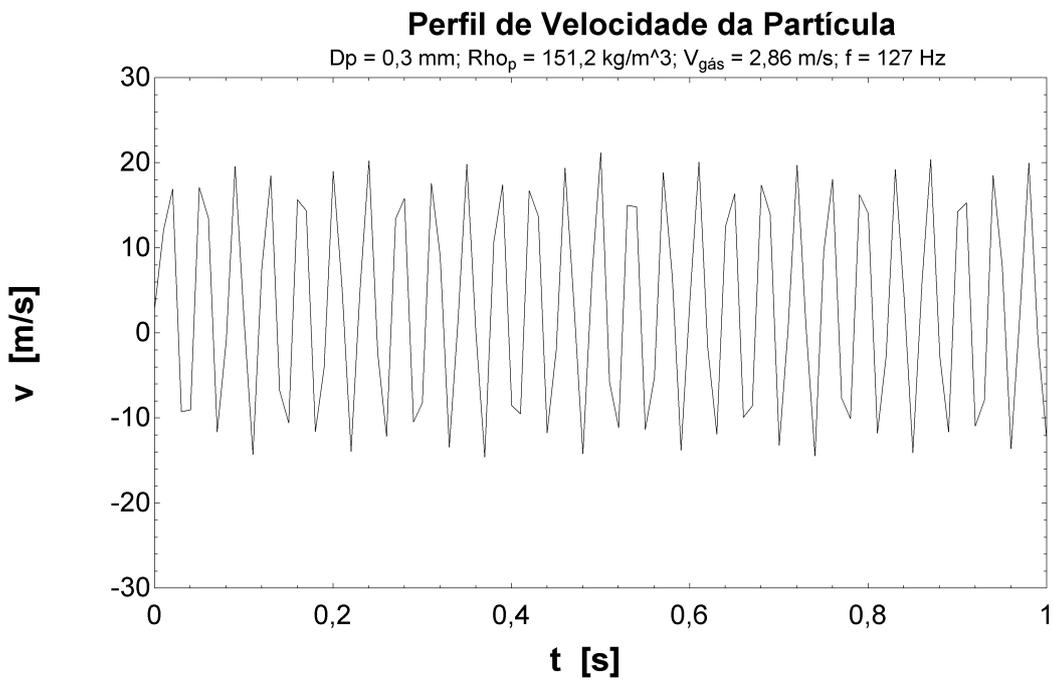


Figura 5.9 - Perfil de velocidade da partícula. $f = 127 \text{ Hz}$.

5.5. CENÁRIO 2: $F = 43,27$ HZ

Neste cenário, a frequência acústica foi ajustada para 43,27 Hz; frequência do primeiro harmônico. Os demais parâmetros foram mantidos iguais. Assim, a trajetória da partícula assumiu a seguinte forma (Fig. 5.6):

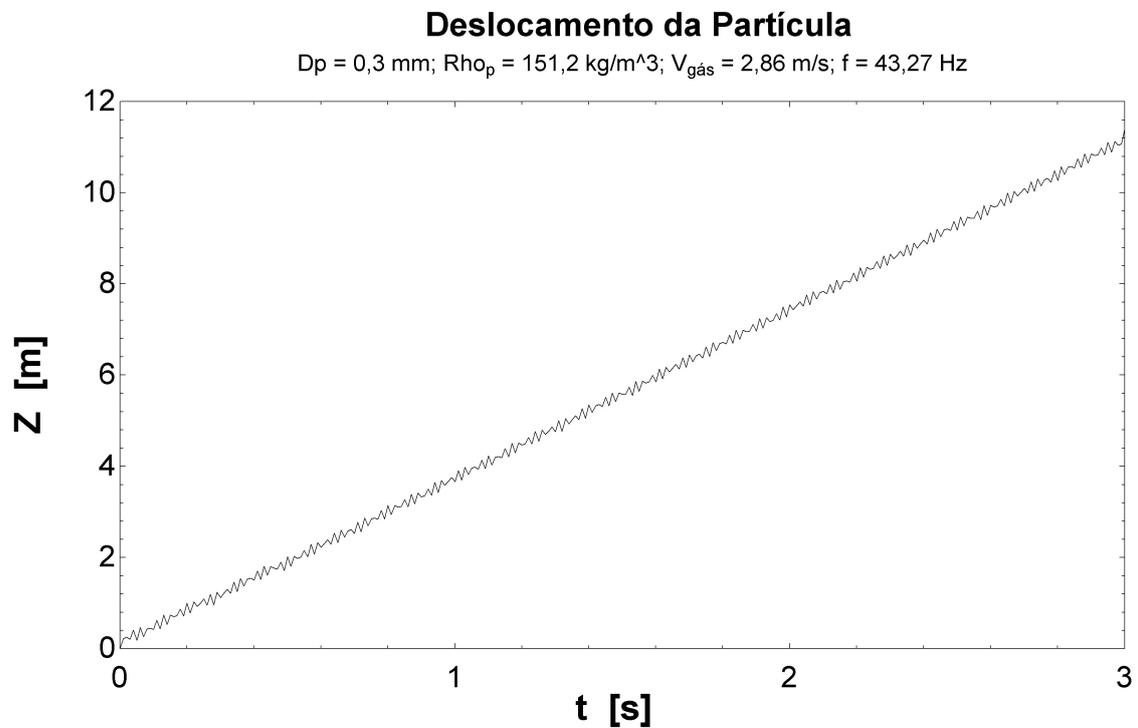


Figura 5.2 - Deslocamento da partícula. $f = 43,27$ Hz.

Observa-se que o padrão oscilatório, assim como na frequência de 127 Hz, também influencia a trajetória da partícula. Em um intervalo de tempo menor, é possível observar, de forma mais detalhada e “próxima”, a curva representante do deslocamento da partícula (Fig. 5.7).

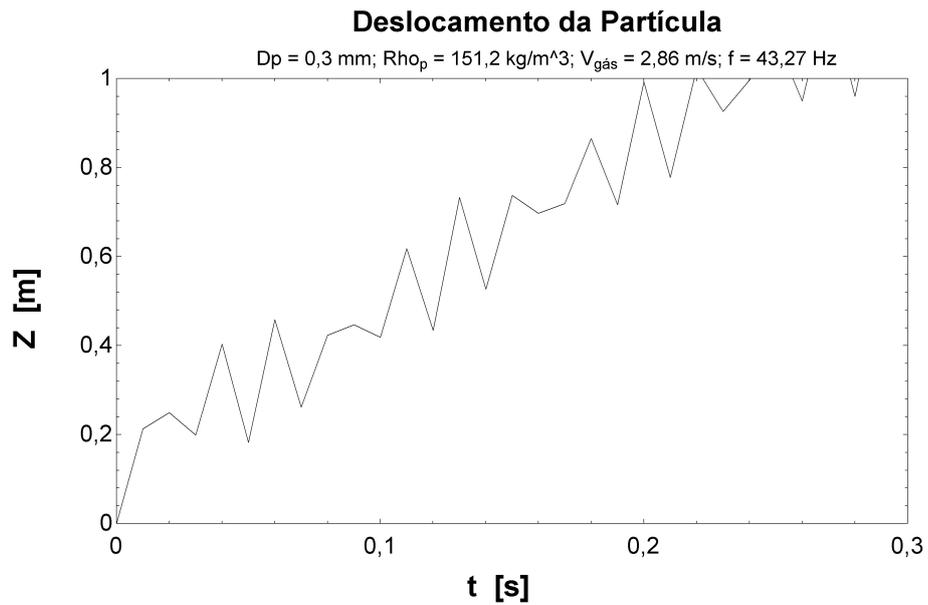


Figura 5.3 - Deslocamento da partícula sob ação da força de arrasto. Intervalo de tempo: 0,3 segundo. $f = 43,27 \text{ Hz}$.

A aceleração, vista na figura a seguir, assim como no cenário anterior (Fig. 5.8) é decorrente da variação na grandeza e no sentido da força resultante atuante na partícula. Como consequência, o perfil de velocidade segue o mesmo padrão oscilatório.

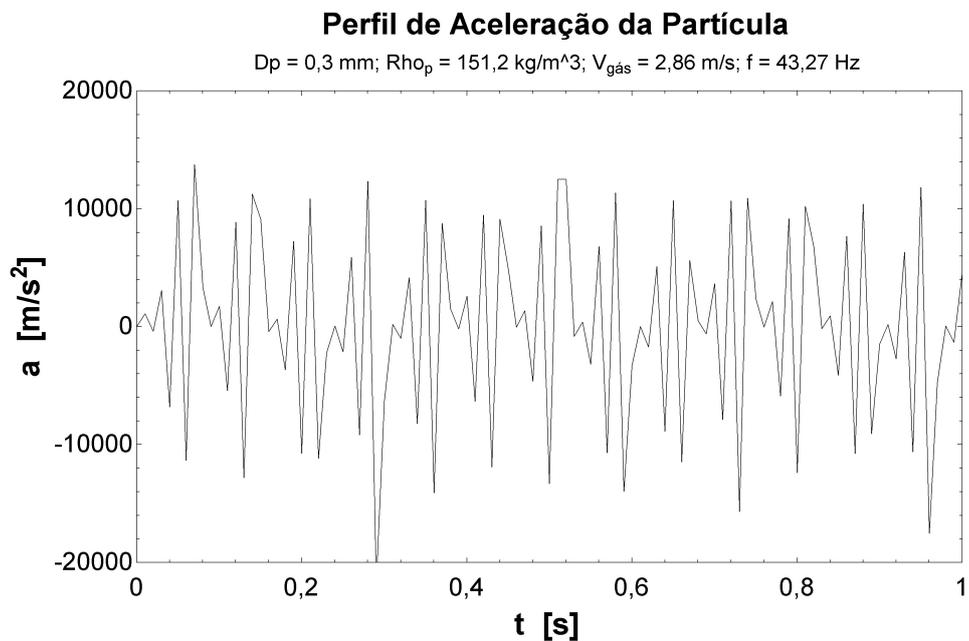


Figura 5.4 - Perfil de aceleração da partícula. $f = 43,27 \text{ Hz}$.

Em comparação com o perfil de velocidade observado para a frequência de 127 Hz (Fig. 5.5), o perfil de velocidade obtido para a frequência de 43,27 Hz apresenta número maior de ciclos oscilatórios (Fig. 5.9). Isto se deve à inércia da partícula, que é função de sua massa específica e volume. Este comportamento vai ao encontro do observado por VERAS (2002).

5.6. CENÁRIO 3: $F = 0$ HZ

Neste cenário não houve excitação acústica, ou seja, $f = 0$ Hz. Os demais parâmetros permanecem constantes.

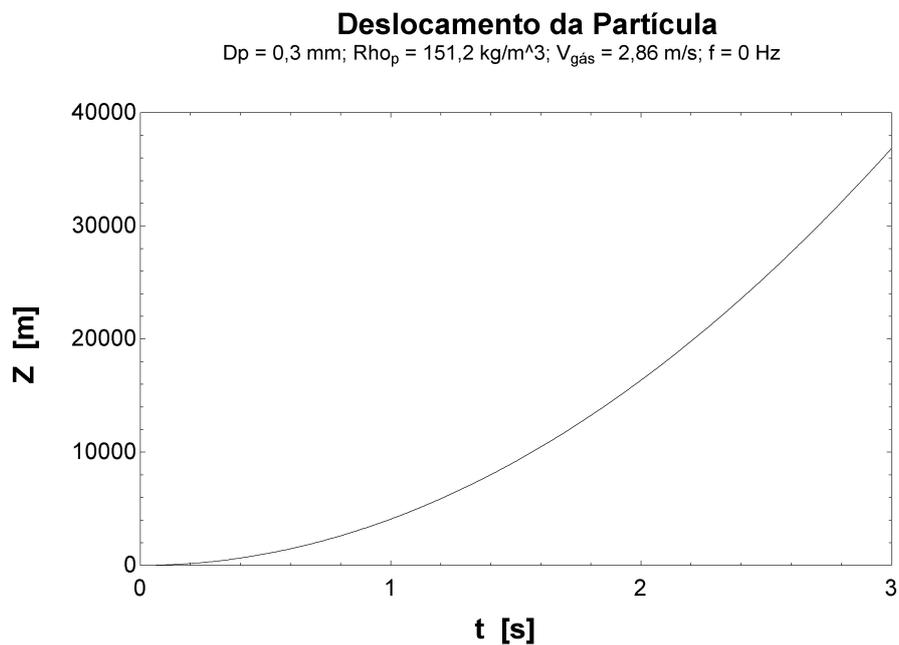


Figura 5.5 - Deslocamento da partícula. $f = 0$ Hz.

Nas condições do terceiro cenário, a partícula comporta-se como em um transporte pneumático normal, onde as principais forças atuantes são o peso da partícula e o arraste aerodinâmico. Nestas condições, o mesmo intervalo de tempo observado nas figuras 5.3 e 5.7 toma a seguinte forma (Fig. 5.11):

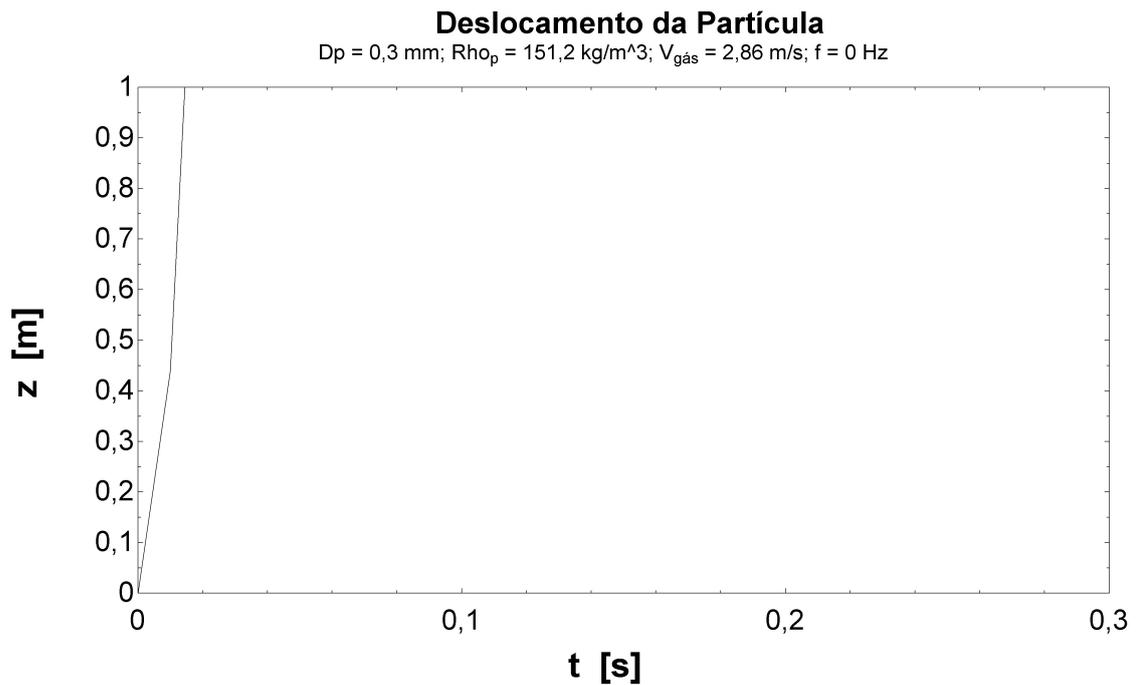


Figura 5.6 - Deslocamento da partícula sob ação da força de arrasto. Intervalo de tempo: 0,3 segundo. $f = 0 \text{ Hz}$.

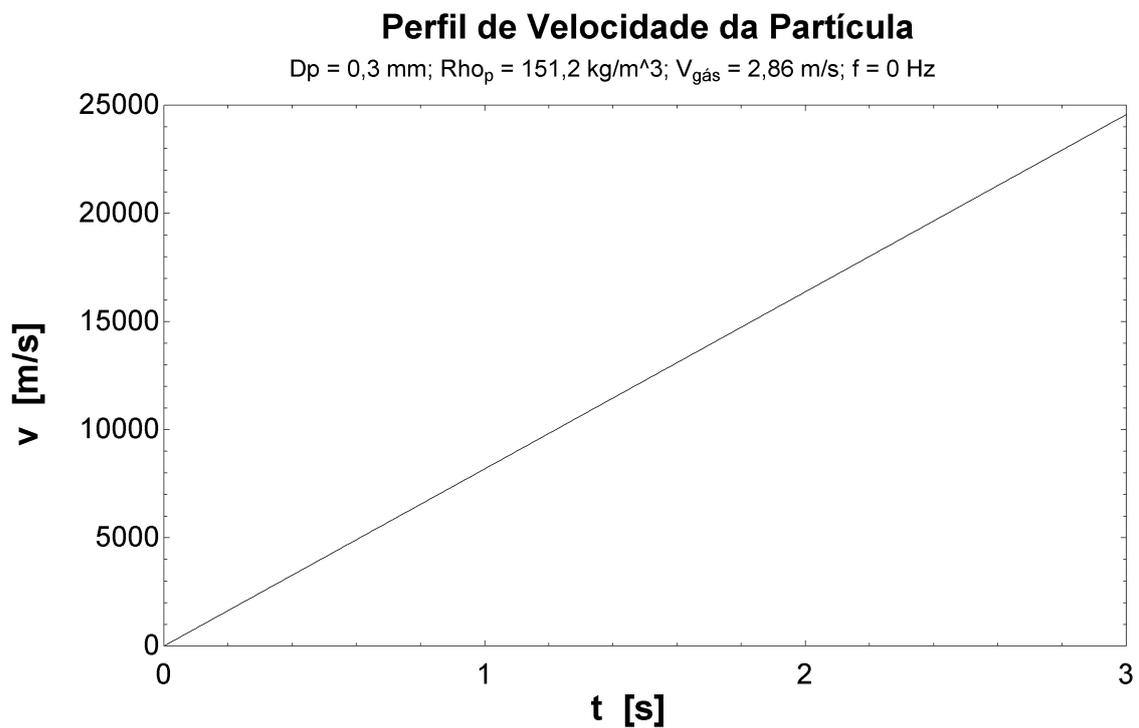


Figura 5.7 - Perfil de velocidade da partícula. $f = 0 \text{ Hz}$.

Como a resultante das forças atuantes é constante, a aceleração também o é. Por conseguinte, o perfil da velocidade é linear e crescente, como se observa na figura 5.12.

6. CONCLUSÕES

Os ensaios deste estudo foram todos conduzidos em uma planta industrial de gaseificação por leito fluidizado circulante. Diferente de um laboratório, nem sempre é possível controlar todas as variáveis em um ambiente industrial. Por outro lado, os experimentos aproximam-se com isto de um cenário de aplicação real.

Mesmo neste contexto, os resultados observados nas tabelas 5.1 e 5.2 evidenciam a influência de campos acústicos em leitos fluidizados. Nos experimentos realizados sem a influência acústica, observou-se o carreamento (ou perda) em um período de 10 minutos, de 1,71 % em massa do leito; enquanto para os experimentos com excitação acústica, esta perda foi de apenas 0,36 %. Por falta de equipamentos adequados, não foi possível especificar qual o perfil granulométrico das partículas carreadas, ficando como sugestão para trabalhos futuros.

Vale observar que, apesar de a variação na taxa de carreamento mudar relativamente pouco (de 0,114 kg/h para 0,024 kg/h), o tempo de operação em processos industriais é, comumente, maior que o dos ensaios deste estudo (apenas 10 minutos cada). Assim, as perdas de partículas por carreamento são representativas quando se trata de processos nos quais o leito tem partículas com alto valor agregado, tais como catalisadores químicos, por exemplo.

No decorrer do estudo, constatou-se também a influência da variação da frequência no deslocamento e tempo de residência. Quanto maior a frequência do harmônico, menor foi o deslocamento da partícula e, por consequência, maior o tempo de residência no reator. O tempo de residência é um parâmetro importante em diversos processos como, por exemplo, a gaseificação em leito fluidizado circulante. Observou-se também, que a influência da frequência acústica no tempo de residência cresce substancialmente até o terceiro harmônico, não sendo tão compensadores os gastos (equipamento) para aumentar a frequência.

O uso desta tecnologia é diverso podendo, se desenvolvida, ser empregada por exemplo no craqueamento catalítico, na gaseificação de carbonáceos, na secagem de insumos, na separação e classificação de partículas, no processo de preparação de alimentos, na malteação de cereais.

7. BIBLIOGRAFIA

BARBOSA, A. (1994). *Contribution a l'etude du transfert thermique dans des lits fluidises: determination du coefficient de transfert de chaleur entre un lit fluidise et de petits objets immerges - Tese de Doutorado*. Toulouse - França: UNP - ENSIGC.

BASU, P. (2006). *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*. Boca Raton: CRC, Taylor & Francis.

BIZHAEM, H., & TABRIZI, H. (2013). Experimental Study on Hydrodynamic Characteristics of Gas-solid Pulsed Fluidized Bed. *Powder Tecnology* .

CAO, C., DONG, S., & ZHAO, Y. (2009). Fluidization Behaviors in a Gas-Solid Acoustic Fluidized Bed. *Wiley InterScience* .

CARDOSO, C. (2008). *Arraste de partículas finas em um leito fluidizado e eficiência de coleta de um ciclone dipleg*. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química.

CARVALHO Jr, J. (1995). Behavior of solid particles in pulsating flows. *Journal of Sound and Vibration* , pp. 581 - 593.

CORRÊA, J. L. (2003). *Discussão de Parâmetros de Projeto de Secadores Ciclônicos*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Engenharia Mecânica, Campinas.

DUBEY, R. (july de 1997). The effect of acustics on an ethanol spray flame in a propane-fired pulse combustor. *Combustion and Flame* , pp. p. 25 - 38.

FERREIRA, M. C. (2003). *Dimensionamento e caracterização de um combustor do tipo tupo de Rijke*. Brasília: UnB.

FLÜGEL, A. D. (2006). *Investigação experimental da influência do campo acústico na queima de sprays - Dissertação de Mestrado*. ITA. São José dos Campos - SP: Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

GELDART, D. (1973). *Powder Tech*.

GIBILARO, L. G. (2001). *Fluidization-dynamics*. L'Aquila, Italy: Butterworth-Heinemann, Oxford.

GRACE, J., AVIDAN, A., & KNOWLTON, T. (1997). *Circulating Fluidized Beds*. Londres: Blackie Academic & Professional.

GUTIERREZ, L., VERDUGO, A., CRUZ, C., & RIVAS, U. (2014). Simutation and Experimental Study on the Motion of Non-reacting Objects in the Freeboard of a Fluidized Bed. *Powder Technology* .

HALLIDAY, D., RESNICK, R., & WALKER, J. (2000). Fundamentos de Física - Volume 2.

HERRERA, C. A., LEVY, E. K., & OCHS, J. (2002). Characteristics of Acoustic Standing Waves in Fluidized Beds. *AIChE Journal*, 48.

IF, D. (s.d.). Acesso em 20 de fev. de 2011, disponível em Davinci IF: http://davinci.if.ufrgs.br/wiki/index.php/Propriedades_e_Caracter%C3%ADsticas

KUNII, D., & LEVENSPIEL, O. (1991). *Fluidization engineering*. Boston.

LOPES, S. (2006). *Contribuição à modelagem, simulação, implantação e controle inteligente de sistemas de combustão - Tese de Doutorado*. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo.

MARTINELLI, L. (2008). *Construção e desenvolvimento de um secador de leito pulso-fluidizado para secagem de pastas e polpas*. São José do Rio Preto - SP.

MORSE, R. (1955). Sonic energy in granular solid fluidization. *Ind. Eng. Chemical*, 47, 1170 - 1175.

NISHIMURA, A., DEGUCHI, S., & MAT, H. (2002). Heat Transfer Characteristics in a Pulsating Fluidized Bed in Relation to Bubble Characteristics.

NITZ, M., & GUARDANI, R. (2008). *Fluidização Gás-Sólido - Fundamentos e Avanços*.

PACHECO, R. (1992). *Um estudo da fluidodinâmica do leito fluidizado rápido - Dissertação de Mestrado*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

REYNOLDS, D. (1981). *Engineering Principles of Acoustics*. (A. & Bacon, Ed.) Boston.

SAIDI, M., & TABRIZI, H. B. (2014). Pulsating flow effect on the segregation of binary particles in a gas–solid fluidized bed.

TEUNOU, E., & PONCELET, D. (2002). Batch and continuous fluid bed coating – review and state of the art. *Journal of Food Engineering* 53, 325 a 340.

TSE, F., MORSE, I., & HINKLE, R. (1978). *Mechanical Vibrations - Theory and Applications*. Massachusetts: Allyn and Bacon, Inc.

VERAS, C. G., Carvalho, J. A., & Ferreira, M. A. (2002). The Chemical Percolation Devolatilization Model Applied to the Devolatilization of Coal. *J. Braz. Chem. Soc.*, pp. 358-367.

WALKER, H. (1993). *Fundamentos de Física - Gravitação, Ondas e Termodinâmica* (Vol. 2). Rio de Janeiro: LTC Editora S.A.

WANG, T., JIN, Y., TSUTSUMI, A., WANG, Z., & CUI, Z. (2000). Energy Transfer Mechanism in a Vibrating Fluidized Bed. *Chemical Engineering Journal* .

WEI, Z. (2009). A Review of Techniques for the Process intensification of Fluidized Bed Reactors. *Chinese Journal of Chemical Engineering* , 17.

WEN, C., & YU, Y. (12 de 1966). A Generalized Method for Predicting the Minimum Fluidization Velocity. *American Institute of Chemical Engineering Journal* , pp. 610 - 612.

WHITE, F. (2002). *Mecânica dos Fluidos*. Rio de Janeiro: McGraw-Hill Companies.

YAVUZKURT, S. (1989). A model of the enhancement of coal combustion usisn high intensity acoustic combustion. *ASME National heat transfer conference*, (pp. 439 - 446). Philadelphia.

APÊNDICES