



# **Análise de Perda de Carga e Velocidade de Fluidização de Leito Fluidizado por Meio de Fluidodinâmica Computacional**

Alessandra de Carvalho Reis

## **Projeto Final de Curso**

Orientadores

Prof. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.

Eng. Eduardo Rangel Braga, M.Sc.

Fevereiro de 2011

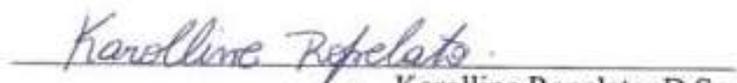
# ANÁLISE DE PERDA DE CARGA E VELOCIDADE DE FLUIDIZAÇÃO DE LEITO FLUIDIZADO POR MEIO DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

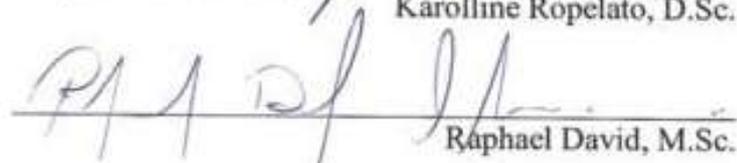
*Alessandra de Carvalho Reis*

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

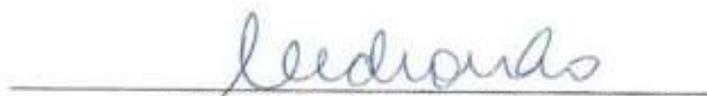
Aprovado por:

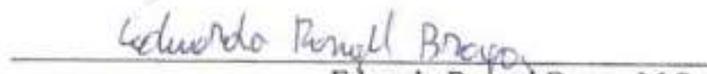
  
Prof. Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva, D.Sc.

  
Karolline Ropelato, D.Sc.

  
Raphael David, M.Sc.

Orientado por:

  
Prof. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.

  
Eduardo Rangel Braga, M.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Fevereiro de 2011

Reis, Alessandra de Carvalho.

Análise de perda de carga e velocidade de fluidização de leito fluidizado por meio de fluidodinâmica computacional / Alessandra de Carvalho Reis. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2011.

xiii, 37 p.; il.

(Projeto Final) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2011.

Orientadores: Prof. Ricardo de Andrade Medronho e Eng. Eduardo Rangel Braga.

1. Leito Fluidizado. 2. Escoamento Gás-Sólido. 3. Fluidodinâmica Computacional. 4. Projeto Final. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Prof. Ricardo de Andrade Medronho e Eng. Eduardo Rangel Braga. I. Análise de perda de carga e velocidade de fluidização de leito fluidizado por meio de fluidodinâmica computacional.

## **Agradecimentos**

AOS MEUS PAIS

- Pela imensa dedicação, pelos valiosos conselhos, e por todo investimento.

À ESCOLA DE QUÍMICA

- Pela formação acadêmica e pela oportunidade de conviver com excelentes profissionais.

AO PROFESSOR RICARDO DE ANDRADE MEDRONHO

- Pelo grande apoio, disponibilidade, e pela orientação fornecida.

AO EDUARDO RANGEL BRAGA

- Pela imensa paciência e pela constante prestatividade.

AO GRUPO ESSS

- Pela aprendizagem, pelos cursos, pelas instalações e pelo grande auxílio prestado no desenvolvimento deste projeto.

Resumo do Projeto Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

## **ANÁLISE DE PERDA DE CARGA E VELOCIDADE DE FLUIDIZAÇÃO DE LEITO FLUIDIZADO POR MEIO DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

Alessandra de Carvalho Reis

Fevereiro, 2011

Orientadores: Prof. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.

Eng. Eduardo Rangel Braga, M.Sc.

A fluidização é uma operação na qual, por meio de um gás ou líquido, partículas em suspensão comportam-se como em um estado pseudo-fluido, ou seja, o leito formado pela suspensão adquire um comportamento dinâmico análogo ao dos fluidos. Processos que envolvem leitos fluidizados proporcionam boa transferência de calor e massa e, por isso, têm grande aplicação industrial, como no craqueamento catalítico nas refinarias de petróleo, na secagem, etc.

O presente trabalho teve como principal foco a compreensão da fluidodinâmica de um escoamento gás-sólido (ar-areia) em um leito fluidizado bidimensional através de simulações numéricas com CFD (*Computational Fluid Dynamics*). O *software* empregado foi o ANSYS 12.1.

Após um teste de convergência de malha, estudou-se a influência da velocidade de entrada do ar e do tamanho das partículas de areia sobre a altura e na queda de pressão do leito.

Quanto aos resultados obtidos no presente trabalho, pode-se dizer que o teste de convergência de malha, embora não tenha sido muito conservador, forneceu uma malha capaz de capturar os comportamentos físicos esperados nas análises posteriores de velocidade e diâmetro. A técnica de CFD se mostrou uma ferramenta muito útil, permitindo a obtenção dos resultados de maneira eficaz.

# ÍNDICE

<b>Capítulo I – Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>I.1. – Objetivos .....</b>	<b>2</b>
<b>I.2. – Estrutura do Trabalho .....</b>	<b>2</b>
<b>Capítulo II – Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>4</b>
<b>II.1. – Escoamento Multifásicos .....</b>	<b>4</b>
I.1.1. – Classificação dos Escoamentos Multifásicos .....	4
I.1.2. – Abordagens para Escoamentos Multifásicos .....	6
I.1.3. – Teoria Cinética Granular .....	6
<b>II.2. – Escoamento em Meios Porosos .....</b>	<b>8</b>
II.2.1. – Equações Básicas .....	8
<b>II.3. – Teoria da Fluidização .....</b>	<b>9</b>
II.3.1. – Equações Básicas .....	9
II.3.2. – Queda de Pressão no Leito .....	10
II.3.3. – Velocidade Mínima de Fluidização .....	14
<b>II.4. – A Técnica de CFD .....</b>	<b>14</b>
<b>Capítulo III – Metodologia Numérica .....</b>	<b>17</b>
<b>III.1. – Geometria .....</b>	<b>17</b>
<b>III.2. – Malha .....</b>	<b>19</b>
<b>III.3. – Modelagem .....</b>	<b>22</b>
III.3.1. – Parâmetros Gerais .....	22
III.3.1. – Parâmetros Avaliados .....	24
III.3.1. – Resumo dos Casos Simulados .....	25
<b>Capítulo IV – Resultados e Discussões .....</b>	<b>26</b>
<b>IV.1. – Teste de Convergência de Malha .....</b>	<b>26</b>
<b>IV.2. – Análises de Velocidade e de Diâmetro .....</b>	<b>29</b>
IV.2.1. – Análise de Velocidade .....	29
IV.2.1. – Análise do Diâmetro .....	31
<b>Capítulo V – Conclusões e Recomendações .....</b>	<b>34</b>
<b>V.1. – Principais Conclusões .....</b>	<b>34</b>
<b>V.2. – Sugestões para Trabalhos Futuros .....</b>	<b>34</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>36</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II.1 - Comportamento aleatório dos gases em função da pressão .....	7
Figura II.2: Representação da direção do escoamento .....	10
Figura II.3: Perfil da queda de pressão em leito fluidizado [4] .....	12
Figura II.4: Perfil da queda de pressão em função da composição do leito [5] .....	13
Figura II.5: Perfil da queda de pressão em função da altura inicial de sólidos [6] .....	13
Figura III.1: Configuração geométrica 3D do leito .....	18
Figura III.2: Configuração geométrica 2D do leito .....	19
Figura III.3: Detalhes das malhas .....	21
Figura III.4: Regiões de contorno .....	23
Figura III.5: Condição inicial .....	24
Figura IV.1: Linhas verticais para o teste de malha .....	26
Figura IV.2: Respostas da pressão para o instante de 1,2 s .....	27
Figura IV.3: Respostas da fração volumétrica da fase 2 (areia) para o instante de 1,2 s .....	28
Figura IV.4: Linhas verticais para as análises de velocidade e diâmetro .....	29
Figura IV.5: Altura do leito em função da variação da velocidade .....	30
Figura IV.6: Queda de pressão do leito em função da variação da velocidade .....	30
Figura IV.7: Ilustração da fração volumétrica de ar para a análise da velocidade .....	31
Figura IV.8: Altura do leito em função da variação do diâmetro .....	32
Figura IV.9: Queda de pressão do leito em função da variação do diâmetro .....	32
Figura IV.10: Ilustração da fração volumétrica de ar para a análise do diâmetro .....	33

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela III.1: Dimensões do leito .....	17
Tabela III.2: Configuração das malhas 2D para o teste .....	20
Tabela III.3: Dados constantes nas simulações .....	22
Tabela III.4: Resumo dos casos .....	25

# Capítulo 1

## Introdução

A fluidização é uma operação na qual, por meio de um gás ou líquido, partículas em suspensão comportam-se como em um estado pseudo-fluido, ou seja, o leito formado pela suspensão adquire um comportamento dinâmico análogo ao dos fluidos. Processos que envolvem leitos fluidizados proporcionam boa transferência de calor e massa e, por isso, têm grande aplicação industrial, como no craqueamento catalítico nas refinarias de petróleo, na secagem, etc. [1]

Embora a técnica de leito fluidizado tenha sido introduzida comercialmente em 1926 (para a gaseificação de lignita), a verdadeira adoção dos leitos fluidizados está associada com o craqueamento catalítico do gasóleo em gasolina, primeiramente exercida em 1942 na refinaria de Baton Rouge (Exxon). Antes, o craqueamento era realizado em reatores de leito fixo [2]. Desde então, leitos fluidizados têm sido utilizados em muitas outras áreas, onde sólidos precisam ser manipulados.

Êxitos e fracassos colaboraram com a pesquisa científica de modo que houvesse em tempos atuais muito sobre o assunto relatado na literatura, porém infelizmente existem ainda confusões e contradições acerca de diversos aspectos da teoria que envolve a fluidização. Incontáveis correlações são recomendadas, no entanto poucas de maneira a unificar essa teoria. A maioria dos experimentos é realizada em escala laboratorial, o que, mesmo com boa ciência dos comportamentos diferenciados entre leitos de tamanhos distintos, interfere na extrapolação para a escala comercial (industrial), que pode levar ao insucesso dos projetos [1].

## **I.1 – Objetivos**

O presente trabalho teve como principal foco a compreensão da fluidodinâmica de um escoamento gás-sólido em um leito fluidizado bidimensional através da técnica de CFD (*Computational Fluid Dynamics*). O projeto estudado tratou de um escoamento multifásico, onde o gás é o ar e o sólido, a areia.

Primeiramente foi realizado um teste de convergência de malha, para o qual foram utilizadas quatro malhas. Definida a malha do trabalho, a pesquisa seguiu com o fim de avaliar a influência de dois parâmetros importantes ao escoamento: a velocidade de entrada do ar e o tamanho da partícula de areia. A influência desses parâmetros foi analisada nos resultados referentes à altura e à queda de pressão do leito. Para essa análise, foram necessários nove casos, nos quais todos foram iguais em termos de malha e modelagem, alterando-se entre eles apenas os parâmetros mencionados anteriormente.

Assim, ao longo do trabalho foram simulados treze casos onde, em todos eles, foi adotada a abordagem Euler-Euler e aplicada a Teoria Cinética Granular. Para tal, o *software* utilizado foi o ANSYS FLUENT 12.1.

## **I.2 – Estrutura do Trabalho**

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, contando com a presente introdução, que descreve a motivação para o trabalho, seus objetivos, bem como apresenta uma breve síntese de seus capítulos.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica a respeito de escoamentos multifásicos e suas características, de escoamentos em meios porosos, da teoria de fluidização e de CFD e suas etapas de solução.

No Capítulo 3 é descrita a metodologia numérica do trabalho: modelo geométrico, características das malhas, condições de contorno iniciais e a modelagem utilizada.

O Capítulo 4 apresenta os resultados e discussões referentes ao teste de convergência de malha, bem como os resultados obtidos através da análise da influência

da velocidade de entrada do ar e do diâmetro de partícula na altura e queda de pressão do leito.

Finalmente, o Capítulo 5 exhibe as conclusões obtidas com esse trabalho, bem como uma breve listagem de idéias e sugestões para trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

Neste capítulo apresenta a teoria envolvida no presente trabalho, sendo assim, ele trata de escoamentos multifásicos e suas características, de escoamentos em meios porosos, da teoria de fluidização e de CFD e suas etapas de solução.

### II.1 – Escoamento Multifásico

O escoamento multifásico consiste no escoamento de uma mistura contendo duas ou mais fases. Diversos processos industriais dependem desse tipo de escoamento.

O escoamento multifásico possui as seguintes particularidades:

- A mistura entre as fases ocorre em nível macroscópico;
- Cada fase possui seu campo de velocidades e é considerada a transferência de quantidade de movimento entre as fases [3].

#### II.1.1 – Classificação dos Escoamentos Multifásicos

A classificação do escoamento multifásico pode ser dividida em:

##### Escoamento disperso-contínuo

A fase pode ser considerada como sendo dispersa quando essa ocupa regiões desconectadas no espaço. Exemplos desse tipo de fase são gotas, bolhas e partículas sólidas. Entre as várias formas desse escoamento destacam-se as seguintes:

- Escoamento gás-líquido: alguns exemplos para esse tipo de aplicação podem ser considerados como o movimento de bolhas em líquidos e gotículas em uma corrente de vapor. Outro exemplo muito importante na indústria é o caso da atomização, onde pequenas gotas são geradas para processos de combustão. A correta representação do diâmetro da fase dispersa influenciará no comportamento fluidodinâmico assim como na transferência de massa e calor.
- Escoamento gás-sólido: em sua forma mais usual, são representados por uma fase gás com a presença de partículas sólidas. Nessa categoria de escoamento estão os leitos fluidizados e equipamentos para o controle de poluição como, por exemplo, ciclones e precipitadores eletrostáticos. Além dessas aplicações outros exemplos podem ser ressaltados, tais com, escoamento de partículas em dutos inclinados e *risers*.
- Escoamento líquido-sólido: usualmente, a fase sólida é arrastada pela fase líquida, são conhecidos como escoamentos do tipo *slurry*. Nos escoamentos do tipo *slurry* estão presentes várias aplicações como, por exemplo, o transporte de carvão e minérios.

### Escoamento contínuo-contínuo

O escoamento do tipo contínuo-contínuo considera duas ou mais fases sendo que essas fases ocupam porções bem definidas do espaço. A transferência de massa, calor e quantidade de movimento ocorre através da interface entre as fases.

Sendo assim, este trabalho trata de um escoamento multifásico do tipo disperso-contínuo e mais especificamente gás-sólido, onde o gás é o ar e o sólido, areia [3].

## **II.1.2 – Abordagens para Escoamentos Multifásicos**

Para a representação matemática do escoamento multifásico são empregados basicamente dois tipos de abordagens: a Euler-Lagrange (E-L) e a Euler-Euler (E-E). Na abordagem E-L as fases interagem entre si por meio de forças de interação, como as de arraste. A fase contínua é modelada por equações clássicas de conservação baseadas na mecânica do contínuo, e a fase dispersa, como entidades individuais, tratadas pela mecânica clássica do corpo sólido, especificamente pela aplicação da 2ª Lei de Newton. Para a abordagem E-E, todas as fases são modeladas por equações clássicas de conservação, possuindo propriedades distintas na mesma localização do espaço-tempo, interagindo entre si e induzindo à interpenetrabilidade das fases. Este trabalho utilizará a abordagem Euler-Euler em sua modelagem computacional, bem como a Teoria Cinética Granular, que é fundamental para a solução do problema em questão [3].

## **II.1.3 – Teoria Cinética Granular**

A Teoria Cinética dos Escoamentos Granulares é uma analogia a Teoria Cinética dos Gases. A base da Teoria Cinética dos Gases parte do princípio que as partículas de um gás estão em constante movimento rápido e aleatório. Todas as colisões são elásticas, isto é, não há perda de energia cinética (conservação da energia cinética). A pressão de um gás é o resultado das colisões entre as partículas do gás e as paredes do recipiente. Num gás, a energia cinética de cada uma das partículas não é igual. No entanto, a energia cinética média das partículas de qualquer gás é sempre a mesma para um dado valor de temperatura.

A Figura II.1 representa o comportamento aleatório dos gases em função da pressão. No primeiro momento, o cilindro vertical está fechado por um pistão no topo. No segundo momento, coloca-se um peso sobre o pistão. Em ambos os casos, o peso total do pistão é suportado pela pressão dentro do cilindro. Esse comportamento foi descrito por Daniel Bernoulli, em 1738 para descrever o que ocorria dentro do cilindro

com partículas muito pequenas se movimentado freneticamente, de modo que quando essas partículas batiam no pistão elas o sustentam com repetidos impactos.

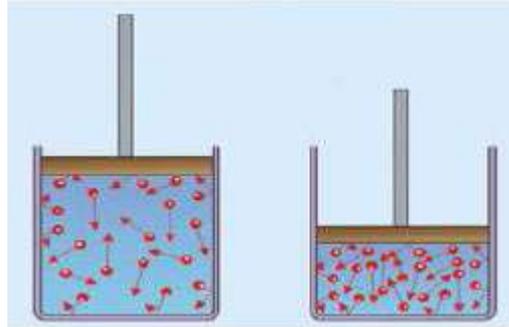


Figura II.1: Comportamento aleatório dos gases em função da pressão.

Esse mesmo comportamento observado entre as moléculas de gases pode ser observado na natureza para partículas sólidas. No choque de diversas entidades na natureza observamos fenômenos únicos, os quais representam um grande desafio para completa compreensão de seu comportamento. Para a Teoria Cinética Granular as interações entre as fases são de natureza partícula-partícula e gás-partícula. Leitões fluidizados, *risers*, regeneradores são exemplos de casos industriais os quais podem ser modelados por essa teoria.

Na Teoria Cinética a suspensão de partículas sólidas está limitada ao máximo empacotamento das partículas, ou seja, quando partículas esféricas ficam o mais próximas entre si. Vale destacar que mesmo nessa condição de empacotamento máximo, existem regiões para a passagem do fluido.

Ao modelar a energia cinética turbulenta da fase particulada através da Teoria Cinética Granular é possível contabilizar os efeitos gerados pelas colisões partícula-partícula. A partir de equações que são funções da flutuação da velocidade e da fração volumétrica da fase dispersa, diversas propriedades inerentes ao escoamento de fluidos são calculadas para a fase sólida, tais como:

- Viscosidade;
- Pressão (semelhante a uma equação de estado);
- Temperatura granular [3].

## II.2 – Escoamento em Meios Porosos

Uma forma de escoamento multifásico é o escoamento em meios porosos, que podem ser aplicados na hidráulica subterrânea, na exploração de petróleo, em reatores de leito fixo, colunas recheadas, leitos fluidizados, etc.

### II.2.1 – Equações Básicas

A seguir estão descritas as Equações da Continuidade (II.1) e da Quantidade de Movimento (II.2), ambas referentes ao fluido.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u}) = 0 \quad (\text{II.1})$$

$$\rho \left[ \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\text{grad } \bar{u})\bar{u} \right] = -\text{grad } P + \text{div} \bar{\tau} + \rho \bar{g} \quad (\text{II.2})$$

onde  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $\bar{u}$  seu vetor velocidade,  $P$  a pressão do fluido,  $\bar{g}$  a gravidade e  $\bar{\tau}$  é um tensor que faz referência à força viscosa.

Pela Teoria das Misturas, as equações descritas anteriormente foram adaptadas e se tornam respectivamente as equações (II.3) e (II.4).

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho)}{\partial t} + \text{div}(\varepsilon \rho \bar{u}) = 0 \quad (\text{II.3})$$

$$\varepsilon \rho \left[ \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\text{grad } \bar{u})\bar{u} \right] = -\text{grad } P + \text{div} \bar{\tau} - \bar{m} + \rho \bar{g} \quad (\text{II.4})$$

onde  $\varepsilon$  é a porosidade, isto é se refere à fração volumétrica do fluido e  $\bar{m}$  é a força que o líquido exerce sobre a matriz sólida.

Definindo o vetor  $\bar{q} = \varepsilon \bar{u}$ , sendo  $\|\bar{q}\| = \frac{Q}{A}$  (onde  $Q$  é a vazão volumétrica de fluido), as Equações da Continuidade e de Quantidade de Movimento são reescritas da seguinte forma:

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho)}{\partial t} + \text{div}(\rho\bar{q}) = 0 \quad (\text{II.5})$$

$$\rho \left\{ \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\bar{q}}{\varepsilon} \right) + \left[ \text{grad} \left( \frac{\bar{q}}{\varepsilon} \right) \right] \bar{q} \right\} = -\text{grad } P + \text{div} \bar{\tau} - \bar{m} + \rho \bar{g} \quad (\text{II.6})$$

Em meio poroso,  $\text{div} \bar{\tau}$  é desprezível para fluidos newtonianos (gases e líquidos de baixa densidade, por exemplo), uma vez que a força que o fluido exerce sobre a matriz sólida ( $\bar{m}$ ) é muito maior que a força viscosa.

## II.3 – Teoria da Fluidização

Conforme já citado previamente, a fluidização é uma importante operação e permite que partículas tenham comportamento dinâmico análogo ao dos fluidos [1]. Como o presente trabalho visa compreender a fluidodinâmica de um escoamento gás-sólido em um leito fluidizado é necessário que se tenha um entendimento da teoria que envolve a fluidização.

### II.3.1 – Equações Básicas

A seguir estão descritas as Equações do Movimento tanto para o fluido (gás) (II.7), quanto para o sólido (partículas) (II.8).

$$\rho \left\{ \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\bar{q}}{\varepsilon} \right) + \left[ \text{grad} \left( \frac{\bar{q}}{\varepsilon} \right) \right] \bar{q} \right\} = -\text{grad } P + \text{div} \bar{\tau} - \bar{m} + \rho \bar{g} \quad (\text{II.7})$$

$$(1 - \varepsilon) \rho_s \left\{ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + [\text{grad } \bar{v}] \bar{v} \right\} = \text{div} \bar{\tau}_s + \bar{m} + (1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho) \bar{g} \quad (\text{II.8})$$

onde  $\rho_s$  é a massa específica do sólido,  $\bar{v}$  seu vetor velocidade e  $\bar{\tau}_s$  é um tensor da fase sólida que faz referência à força viscosa.

Conforme já mencionado,  $\text{div } \bar{\tau}$  é desprezível para fluidos newtonianos (gases e líquidos de baixa densidade, por exemplo), uma vez que a força que o fluido exerce sobre a matriz sólida ( $\bar{m}$ ) é muito maior que a força viscosa. Essa aproximação, também pode ser feita na equação (II.8), já que na fluidização gás-sólido, as partículas se comportam como fluidos. Dessa forma,  $\text{div } \bar{\tau}_s$  também pode ser desprezado. Considerando o escoamento uniforme, isto é,  $q$  e  $v$  constantes, as Equações do Movimento acima citadas ficam simplificadas da seguinte maneira:

$$0 = -\text{grad } P - \bar{m} + \rho \bar{g} \quad (\text{II.9})$$

$$0 = \bar{m} + (1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho)\bar{g} \quad (\text{II.10})$$

### II.3.2 – Queda de Pressão no Leito

A queda de pressão no leito pode ser calculada tendo como base as equações simplificadas (II.9) e (II.10) e considerando o escoamento unidirecional (direção  $z$ ) conforme indica a Figura II.2. Sendo assim, as equações citadas podem ser reescritas da seguinte maneira:

$$m = -\frac{dP}{dz} - \rho g \quad (\text{II.11})$$

$$m = (1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho)g \quad (\text{II.12})$$

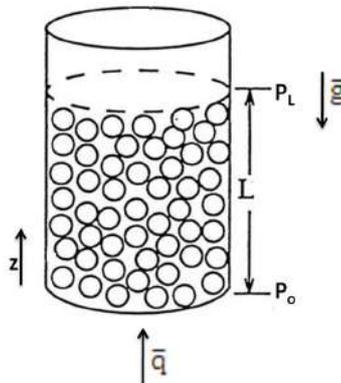


Figura II.2: Representação da direção do escoamento.

Igualando as equações (II.11) e (II.12) e rearranjando os termos, surge a equação (II.13):

$$-\frac{dP}{dz} = [(1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho) + \rho]g \quad (\text{II.13})$$

Integrando em ambos os lados da equação (II.13), tem-se:

$$-\int_{P_0}^{P_L} dP = [(1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho)g + \rho g] \int_0^L dz \quad (\text{II.14})$$

Resolvendo a integral e rearranjando a equação gerada, tem-se:

$$\frac{\Delta P}{L} = [(1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho) + \rho]g \quad (\text{II.15})$$

Onde  $\Delta P = P_0 - P_L$

Multiplicando e dividindo o lado esquerdo da equação (II.15) pela área transversal do leito (A), tem-se:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{(1-\varepsilon)(\rho_s-\rho)gA+\rho gA}{A} \quad (\text{II.16})$$

Rearranjando a equação (II.16), tem-se:

$$\Delta P = \frac{(1-\varepsilon)\rho_s gAL + \varepsilon \rho gAL}{A} \quad (\text{II.17})$$

Ao observar a equação (II.17) nota-se que a expressão  $(1 - \varepsilon)\rho_s gAL$  refere-se ao peso de sólidos no leito, enquanto que a expressão  $\varepsilon \rho gAL$ , ao peso do fluido no leito. Assim, conclui-se que a queda de pressão no leito equivale ao peso do leito sobre a área.

No presente trabalho, o fluido em questão é o ar, sendo o sólido a areia. Como a densidade da areia é muito maior que do ar, a expressão referente ao peso do ar pode ser desprezada, sendo assim, a queda de pressão oferecida pelo leito se torna proporcional a apenas o peso dos sólidos como mostra a equação (II.18):

$$\Delta P = \frac{(1-\varepsilon)\rho_s g A L}{A} \quad (\text{II.18})$$

Ao analisar a equação (II.18), nota-se que um aumento da vazão de entrada do ar (velocidade de entrada do ar) não altera a queda de pressão oferecida pelo leito. Isso se deve ao fato desse aumento de vazão acarretar no aumento de altura do leito, aumentando assim o valor de  $L$ , porém como a massa de sólidos é constante, a porosidade do leito aumenta de maneira a compensar o aumento da altura. Raciocínio análogo seria para o caso de uma diminuição da vazão de ar.

Esse fenômeno de manter a queda de pressão constante independente do valor da velocidade do ar só ocorre na faixa de fluidização (Figura II.3), uma vez que algumas simplificações que foram feitas consideraram esse regime. A faixa de fluidização começa com a velocidade de entrada do ar superior a velocidade mínima de fluidização.

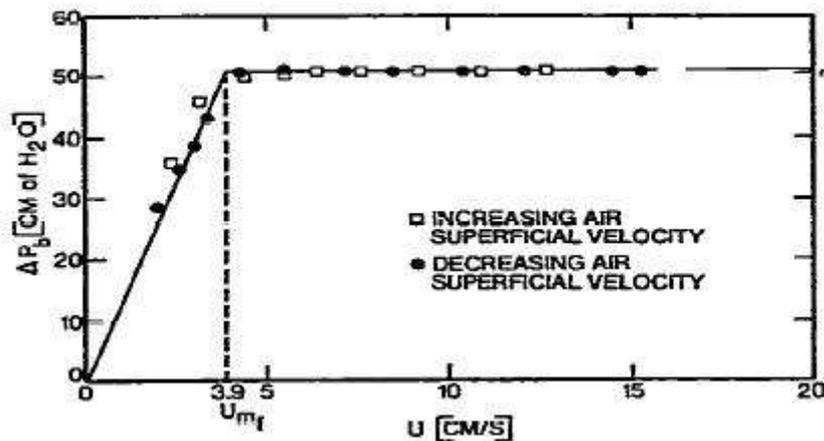


Figura II.3: Perfil da queda de pressão em leito fluidizado [4].

JENA et al. [5] desenvolveram um trabalho cujo foco principal era avaliar a influência da composição da mistura a ser fluidizada no perfil da queda de pressão do leito. As misturas estudadas eram ternárias, onde cada uma das três fases era composta de um tamanho de partícula de areia. No resultado presente no referente artigo, também é possível observar o comportamento constante da pressão mencionado anteriormente (Figura II.4).

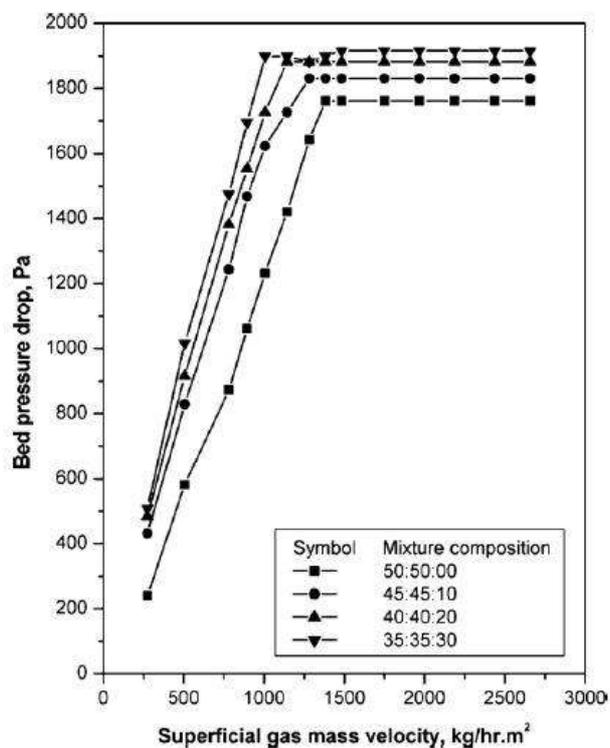


Figura II.4: Perfil da queda de pressão em função da composição do leito [5].

ZHAO et al. [6] realizaram experimentos e simulações numéricas a fim de compreender o comportamento de leitos gás-sólido e também conseguiram capturar o comportamento constante da pressão, porém em função da altura inicial de sólidos ( $H_s$ ) (Figura II.5).

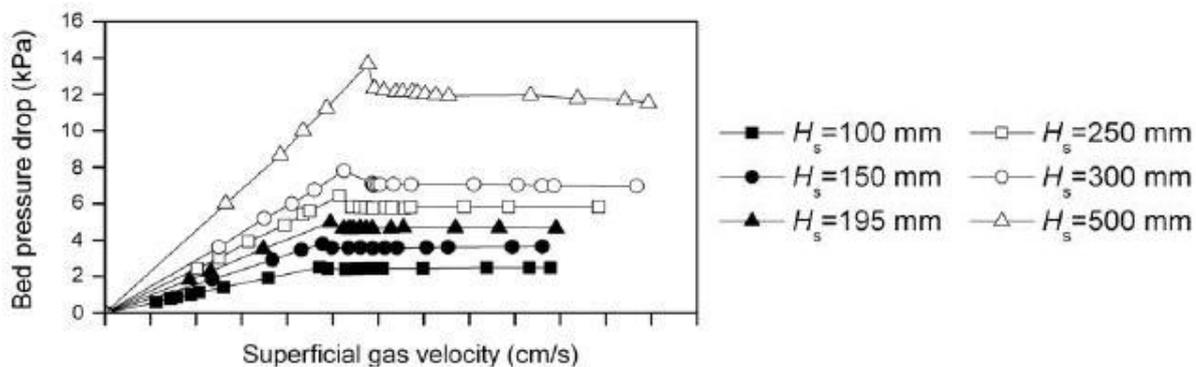


Figura II.5: Perfil da queda de pressão em função da altura inicial de sólidos [6].

### II.3.3 – Velocidade Mínima de Fluidização

A velocidade mínima de fluidização é o limite inferior do valor da velocidade de entrada do fluido para que ocorra o fenômeno de fluidização. A determinação desse valor é fundamental para o projeto do leito. Na literatura, estão disponíveis diversas correlações que prevêm essa velocidade. GREWAL e SAXENA [4] reuniram grande parte dessas correlações. Neste trabalho, correlação de Pillai & Raja Rao [4], descrita na equação (II.19), foi escolhida para o cálculo da velocidade mínima de fluidização.

$$G_{mf} = 0,000701 \frac{\bar{d}_s^{-2} \rho(\rho_s - \rho)g}{\mu} \quad (\text{II.19})$$

onde  $d_s$  e  $\rho_s$  são respectivamente o diâmetro médio das partículas sólidas e a massa específica do sólido, enquanto que  $\rho$  e  $\mu$  a massa específica e a viscosidade do fluido. Sendo  $G_{mf}$  o fluxo mássico de gás, esse parâmetro tem uma relação direta com a velocidade mínima de fluidização ( $U_{mf}$ ):  $G_{mf} = \rho U_{mf}$ .

A escolha dessa correlação reside no fato dela ser válida para as fases envolvidas no trabalho (ar e areia), para uma grande faixa de diâmetros médios de partículas (58 a 1100  $\mu\text{m}$ ) e também para valores de número de Reynolds inferiores a 20.

### II.4 – A Técnica de CFD

A fluidodinâmica computacional (CFD) pode ser resumida como um conjunto das técnicas de simulação computacional utilizadas para prever os fenômenos físicos ou físico-químicos que ocorrem em escoamentos através da análise de sistemas envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e massa além de outros fenômenos mais específicos, como reações químicas, por exemplo, em um domínio pré-definido que represente o problema estudado.

Com isso, as técnicas de CFD têm aplicabilidade extremamente vasta, passando por diversas áreas, como indústria automobilística, indústrias químicas, petroquímicas e

muitas outras. O grande ganho da utilização de CFD é o nível de detalhamento da solução obtida quando em comparação com simuladores de processo. Enquanto que os simuladores de processo geralmente definem condições específicas como, por exemplo, a temperatura de uma corrente de vapor sem levar em conta a geometria do problema, a fluidodinâmica computacional define todo o perfil de temperatura da corrente através da solução das equações de fenômenos de transporte em um volume de controle definido, no caso uma representação tridimensional da tubulação.

A solução de um problema por CFD tem três etapas principais, o pré-processamento, a solução das equações governantes do problema de acordo com as definições feitas no pré-processamento e, por fim, a representação dos resultados no pós-processamento. Esse último inclui a construção de gráficos 2D, 3D, planos representativos, perfis de distribuição de alguma variável específica, entre outros.

O pré-processamento consiste na definição do problema a ser resolvido e estudado, isto envolve as seguintes etapas:

- Definição da geometria da região a ser estudada (o domínio computacional).
- Geração da malha, que consiste na divisão da geometria do problema em subdomínios menores.
- Seleção de fenômenos físico-químicos que devem ser modelados.
- Definição das propriedades do fluido, partículas e etc.
- Especificação das condições de contorno do problema.

Feitas essas definições, é possível iniciar o procedimento de solução do problema. Este procedimento consiste na aplicação de técnicas numéricas para resolver as equações governantes do problema, como equações de conservação de massa, energia e quantidade de movimento.

Uma vez obtida a solução do problema, o pós-processamento é utilizado como ferramenta para visualização desses resultados [7].

Atualmente, existe uma série de *softwares* desenvolvidos para todas as etapas da solução de um problema CFD, dentre eles os mais difundidos são o CFX e o FLUENT, desenvolvidos pela ANSYS. O CFX é dividido em três partes, CFX Pre, CFX Solver e CFD Post, destinados as etapas de pré-processamento, solução do problema e pós-processamento respectivamente. Já o FLUENT permite a realização das três etapas em uma única interface. É possível também utilizar o FLUENT apenas como ferramenta de pré-processamento e solução do problema, deixando a etapa de pós-processamento para outros softwares específicos para essa função.

Neste trabalho, para a solução do problema em questão, utilizou-se uma abordagem Euler-Euler, em que se aplicou a teoria cinética granular. Como essa teoria está mais bem desenvolvida no FLUENT, esse software foi o escolhido para as etapas de pré-processamento e solução, sendo utilizada sua versão 12.1. A etapa de pós-processamento foi deixada para o CFD Post 12.1 e para o Enight 9.1.

# Capítulo 3

## Metodologia Numérica

Este capítulo aborda toda a metodologia computacional utilizada, a começar pela descrição da geometria empregada, seguindo as características das malhas utilizadas no teste de convergência de malha e finalizando com a modelagem utilizada.

### III.1 – Geometria

Os dados geométricos do leito fluidizado avaliado neste trabalho tiveram como referência um leito instalado recentemente no Laboratório de Engenharia Química (LADEQ) na Escola de Química, UFRJ. Trata-se de uma estrutura em formato de paralelepípedo, de espessura muito pequena, sendo suas dimensões apresentadas na Tabela III.1.

Tabela III.1: Dimensões do leito

Altura (mm)	1000
Largura (mm)	700
Espessura (mm)	13

A Figura III.1 apresenta o desenho modelo referente ao leito em questão. Esse desenho foi confeccionado utilizando o módulo CAD desenvolvido pela ANSYS, o DesignModeler presente na plataforma integradora Workbench.

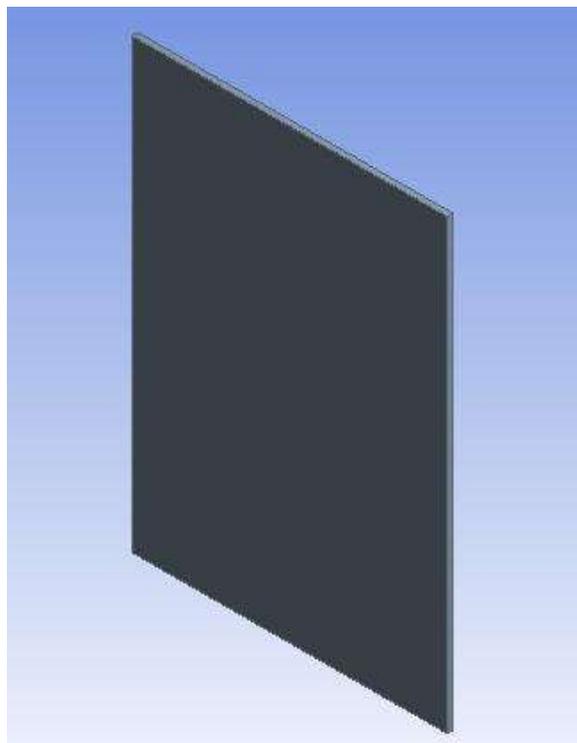


Figura III.1: Configuração geométrica 3D do leito.

Por motivos que serão discutidos ainda neste capítulo, as etapas referentes ao teste de convergência de malha e à modelagem foram realizadas a partir de simulações 2D, desprezando assim, a espessura do leito. Com isso, a geometria utilizada encontra-se representada na Figura III.2.

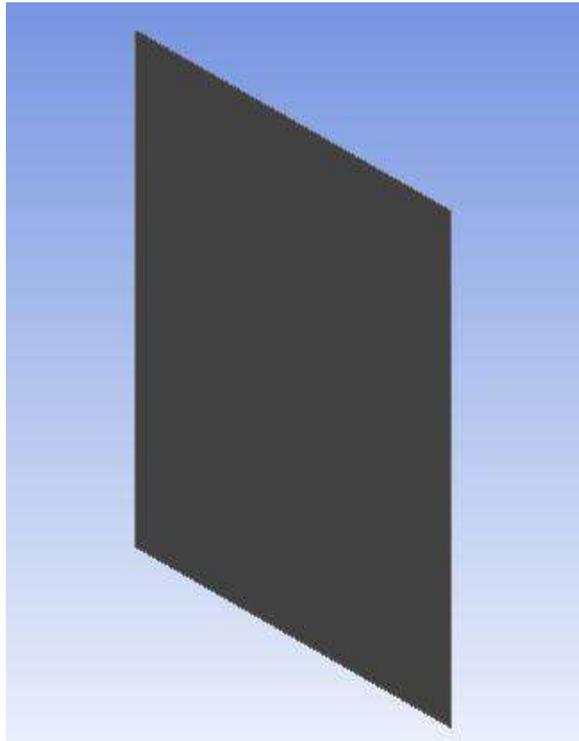


Figura III.2: Configuração geométrica 2D do leito.

### **III.2 – Malha**

Conforme citado anteriormente, a etapa seguinte à construção do modelo geométrico é a geração de uma malha, na qual as equações já descritas serão discretizadas através do método dos volumes finitos. Quanto maior o número de elementos presente na malha, mais precisos são os resultados obtidos pela simulação. Entretanto, com o aumento do número de elementos aumenta-se também o tempo computacional necessário para sua resolução, sendo necessários computadores mais potentes.

Com o objetivo de evitar o gasto de tempo desnecessário com uma malha superestimada ou obter um resultado computacional muito distante da realidade com uma malha sub-estimada, uma etapa fundamental durante o desenvolvimento de trabalhos em CFD é o teste de convergência de malha. Esse teste consiste em realizar várias simulações, todas com a mesma modelagem, porém aumentando o número de

elementos de uma para outra, a fim de encontrar a menor malha que apresente discrepância mínima de resposta em relação a sua subsequente.

Em função das características do leito em estudo, isto é, sua pequena espessura e seu caráter simétrico, as simulações realizadas para o teste de malha, bem como as simulações para a obtenção de resultados foram bidimensionais, desprezando assim sua espessura.

O teste de malha foi realizado utilizando o critério da ASME [8], onde se especifica que as malhas devem ser uniformes (elementos com tamanhos iguais) e que a razão entre o tamanho do elemento (neste caso, o lado do quadrilátero) de uma malha para a sua subsequente mais refinada (maior número de elementos) deve ser superior a 1,3. No presente trabalho, utilizou-se o valor aproximado de 1,4.

Para o presente trabalho, foram feitas quatro malhas 2D distintas, todas elas utilizando o programa *Meshing Tools*, também presente na plataforma integradora *Workbench*. As particularidades de cada uma dessas malhas estão descritas na Tabela III.2 e os detalhes dessas malhas são mostrados na Figura III.3.

Tabela III.2: Configuração das malhas 2D para o teste.

<b>Malha</b>	<b>Tipo de Elemento</b>	<b>Tamanho do Elemento (mm)</b>	<b>Número de Nós</b>	<b>Número de Elementos</b>
1	Quadriláteros	20	1836	1750
2	Quadriláteros	14	3723	3600
3	Quadriláteros	10	7171	7000
4	Quadriláteros	7	14544	14300

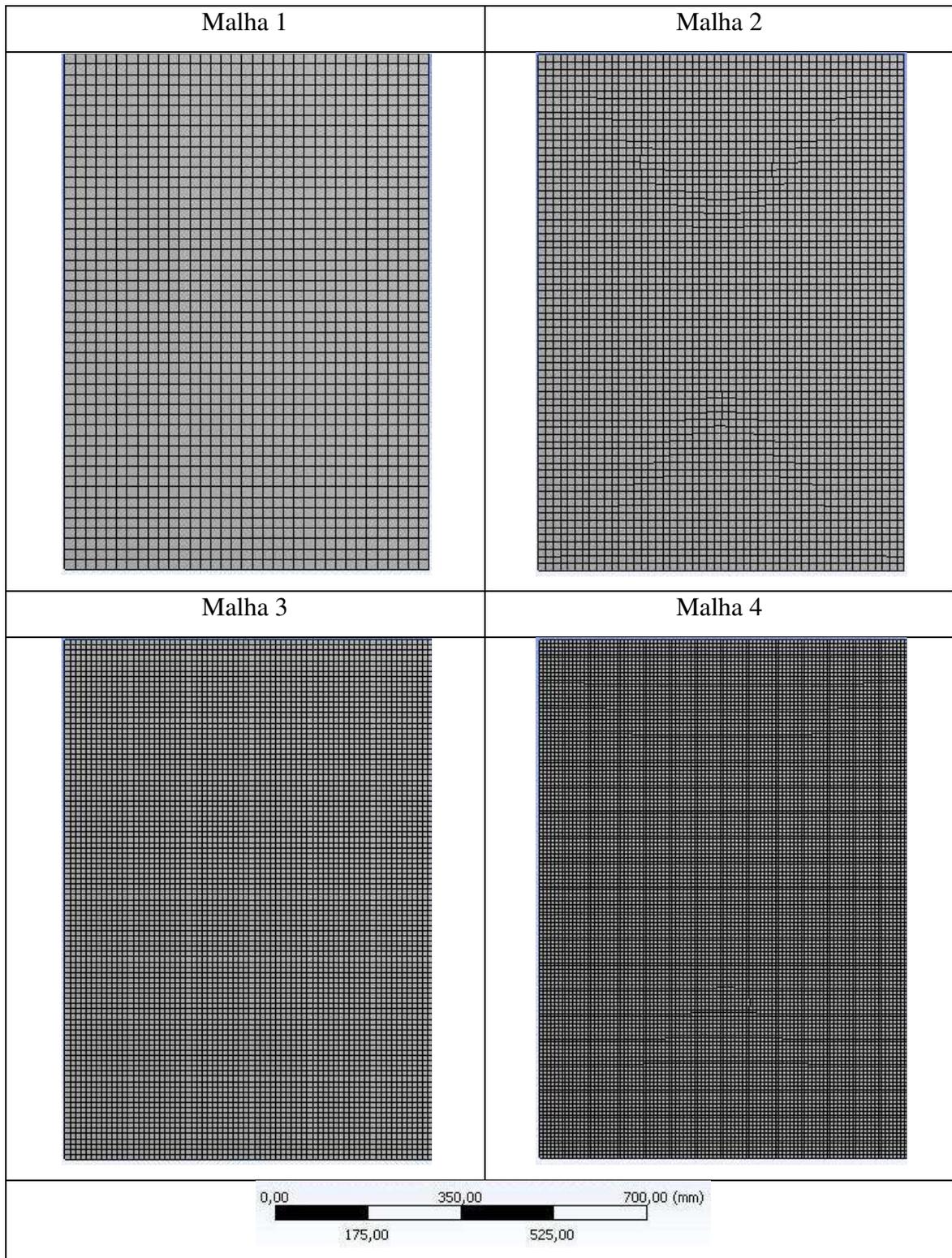


Figura III.3: Detalhes das malhas.

### III.3 – Modelagem

Este item descreve todas as características da modelagem utilizada. Primeiramente, são apresentados os parâmetros gerais da simulação, que foram mantidos constantes em todo o projeto. Em seguida, são mostrados os parâmetros que foram avaliados na modelagem e que, portanto, variaram ao longo do trabalho.

#### III.3.1 – Parâmetros Gerais

Para todas as simulações realizadas durante a execução do presente trabalho, alguns parâmetros não sofreram alteração, ou seja, não foram analisados. Dentre esses elementos se encontram as propriedades físicas das fases (ar e areia), algumas condições de contorno e as condições iniciais. Quanto à origem desses dados, alguns foram obtidos do artigo [4] e outros foram retirados da própria biblioteca do FLUENT. A Tabela III.3 mostra alguns desses dados e sua origem.

Tabela III.3: Dados constantes nas simulações.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Origem</b>
Massa específica da areia	2670 kg/m <sup>3</sup>	[4]
Massa específica do ar	1,225 kg/m <sup>3</sup>	FLUENT
Viscosidade da areia	Calculada pela Teoria Cinética Granular	FLUENT
Viscosidade do ar	1,7894 10 <sup>-5</sup> kg/m-s	FLUENT
Empacotamento máximo	0,63 (63%)	FLUENT
Constante de rugosidade de parede	0,5	FLUENT
Pressão operacional	1 atm	[4]

Todas essas simulações 2D foram realizadas em regime transiente, habilitando-se a força gravitacional na direção Y (-9,81 m/s<sup>2</sup>) e utilizando um modelo de turbulência k-ômega SST. Conforme já mencionado anteriormente, utilizou-se o Modelo Euleriano de duas fases e a Teoria Cinética Granular, em que a fase granular é a areia.

Como condições de contorno, ficaram definidas as regiões de entrada, saída e parede. A condição de entrada imposta foi a velocidade do ar. A condição de saída da mistura foi a pressão relativa de 0 atm. Como condição de parede, utilizou-se o formato padrão do FLUENT. Essas regiões estão indicadas na Figura III.4.

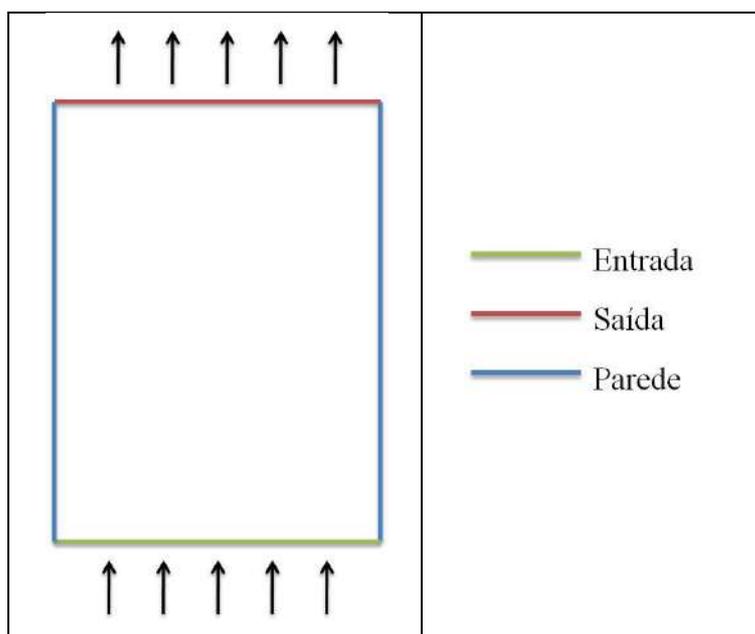


Figura III.4: Regiões de contorno.

Como condição inicial, foi marcada uma região com largura de 700 mm, ou seja, ocupando toda a largura do leito e de altura de 400 mm, como mostra a Figura III.5. Nessa região, foi imposta uma fração volumétrica de areia de 0,58 para todas as simulações, sugerida pela referência [4]. Isso implica em uma porosidade inicial do leito de 0,42. Outro parâmetro que será objeto de estudo será o diâmetro médio das partículas de areia. Considerando todas as partículas esféricas, é razoável considerar que a porosidade não muda com o tamanho da partícula, uma vez que com o aumento do diâmetro, aumentam-se proporcionalmente os espaços vazios entre essas partículas.

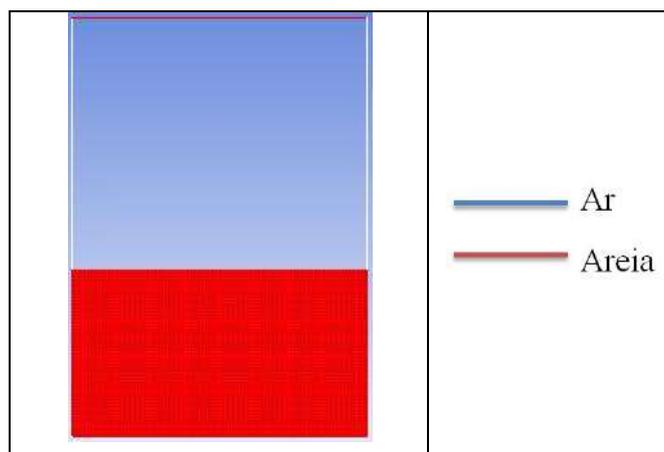


Figura III.5: Condição inicial.

Para todas as simulações utilizou-se uma discretização espacial na equação de *momentum* de 1ª ordem. Em relação ao passo de tempo, utilizou-se um valor de 0,0001 s e para o número máximo de interações por passo de tempo, o valor de 100. O número de passos de tempo rodados dependeu da análise: para o teste de malha, rodou-se 20.000 (2 s), enquanto que para as outras análises, 100.000 (10 s). A justificativa para o uso de um número menor de passos de tempo para a primeira análise se deve ao fato das maiores oscilações ocorrerem nesse intervalo de tempo (2 s).

As simulações foram realizadas em computadores com 2 processadores AMD Opteron Dual Core com velocidade de processamento de 2 GHz e 8 GB de memória RAM DDR2 de 800 MHz.

### III.3.2 – Parâmetros Avaliados

Os dois parâmetros avaliados no presente trabalho foram a velocidade de entrada do ar e o tamanho médio das partículas de areia. A base da escolha das velocidades simuladas foi a velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ). Conforme já citado, essa velocidade foi calculada através da correlação de Pillai & Raja Rao [4]. Após o cálculo, esse valor foi de 0,26 m/s. Para a análise da velocidade de entrada do ar, foram simulados seis casos, sendo as seguintes velocidades analisadas: 0,26, 0,29, 0,34, 0,39, 0,44 e 0,52 m/s, representando respectivamente  $U_{mf}$ ,  $1,1 U_{mf}$ ,  $1,3 U_{mf}$ ,  $1,5 U_{mf}$ ,  $1,7 U_{mf}$ , e  $2 U_{mf}$ . Já para a análise do tamanho médios das partículas de areia, a base da escolhas

desses diâmetros foram as referências [4] e [9], sendo os valores de diâmetros escolhidos 167, 260, 350, 451 e 504  $\mu\text{m}$ .

O procedimento utilizado nas análises foi o seguinte: para a Análise da Velocidade, avaliaram-se todas as velocidades citadas e fixou-se o diâmetro em 504  $\mu\text{m}$ , já para a Análise do Diâmetro, avaliaram-se os diâmetros mencionados e fixou-se a velocidade em 0,29 m/s.

### III.3.3 – Resumo dos Casos Simulados

A Tabela III.4 abaixo apresenta todos os casos rodados, especificando a(s) análise(s) em que ele pertence, bem como a velocidade de entrada do ar e os diâmetros de areia utilizados.

Tabela III.4: Resumo dos casos.

<b>Caso</b>	<b>Análise</b>	<b>Velocidade de Entrada do Ar (m/s)</b>	<b>Diâmetro Médio das Partículas de Areia (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
1	Teste de Malha	0,52	504
2	Teste de Malha	0,52	504
3	Teste de Malha	0,52	504
4	Teste de Malha / Análise de Velocidade	0,52	504
5	Análise de Velocidade	0,44	504
6	Análise de Velocidade	0,39	504
7	Análise de Velocidade	0,34	504
8	Análise de Velocidade / Análise do Diâmetro	0,29	504
9	Análise de Velocidade	0,26	504
10	Análise do Diâmetro	0,29	451
11	Análise do Diâmetro	0,29	350
12	Análise do Diâmetro	0,29	260
13	Análise do Diâmetro	0,29	167

# Capítulo 4

## Resultados e Discussões

Este capítulo destina-se à apresentação e discussão dos resultados obtidos no trabalho, iniciando pelas respostas obtidas no estudo de convergência de malha, seguindo com os resultados referentes às análises de velocidade de entrada do ar e de diâmetro das partículas de areia.

### IV.1 – Teste de Convergência de Malha

Para essa análise foram simulados quatro casos, onde de um caso para o outro, foi-se diminuindo o tamanho do elemento da malha, refinando-a. O objetivo dessa análise é encontrar a menor malha que apresente discrepância mínima de resposta em relação a sua subsequente mais refinada.

Este teste foi avaliado para duas variáveis: pressão absoluta e fração volumétrica de areia (Fase 2). Essas variáveis foram medidas ao longo de quatro retas verticais igualmente espaçadas ao longo da largura do leito, representadas pela Figura IV.1.

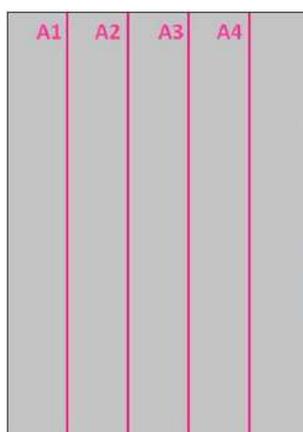


Figura IV.1: Linhas verticais para o teste de malha.

Importante ressaltar que as simulações referentes a esse teste só foram rodadas até o instante de 2 s, uma vez que é nesse intervalo que ocorrem as maiores oscilações da altura do leito.

A Figura IV.2 a seguir apresenta as respostas da pressão absoluta, em MPa, obtidas pelo teste de convergência de malha ao longo das linhas verticais (A1, A2, A3 e A4) no instante de 1,2 s.

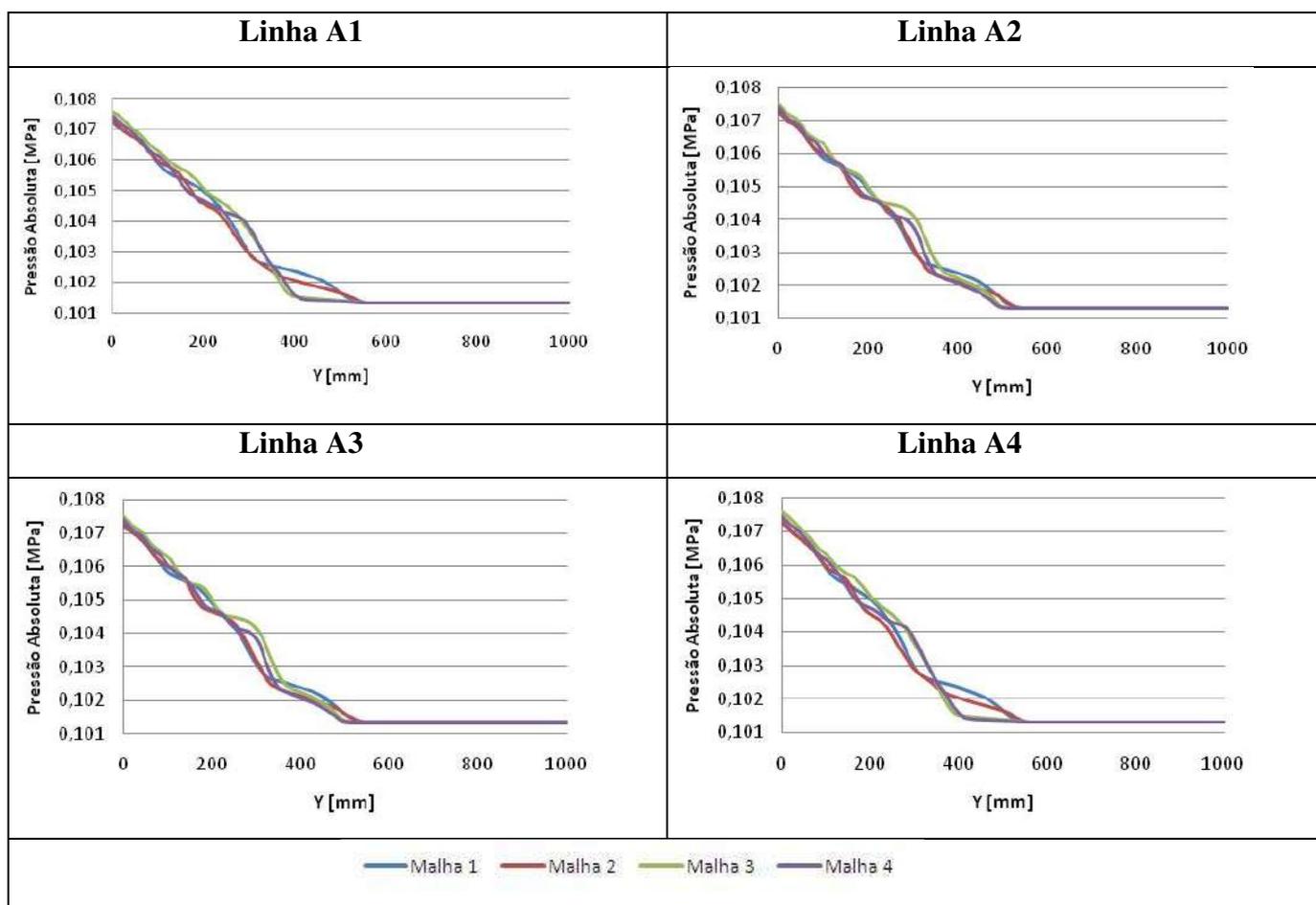


Figura IV.2: Respostas da pressão para o instante de 1,2 s.

A Figura IV.3 mostra as respostas da fração volumétrica da fase 2 (areia) ao longo das linhas verticais especificadas anteriormente no instante de 1,2 s.

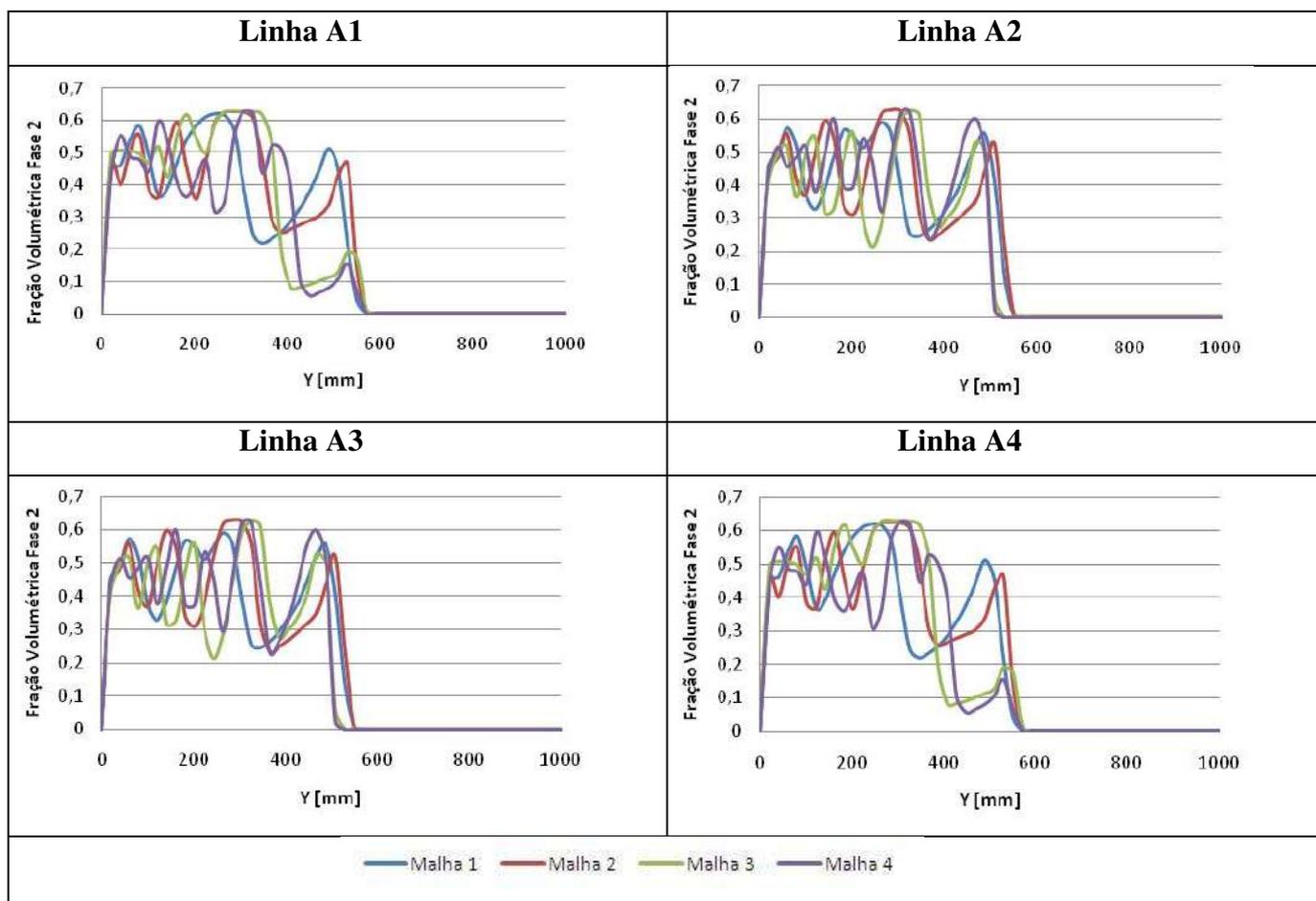


Figura IV.3: Respostas da fração volumétrica da fase 2 (areia) para o instante de 1,2 s.

Ao se analisar as Figura IV.2 e IV.3, pode-se observar que efetivamente não tem duas malhas com discrepância mínimas entre suas respostas, porém as Malhas 3 e 4 (as mais refinadas) apresentam perfis semelhantes. Justamente por não possuírem perfis iguais que se adotou a Malha 4 para continuar o projetos nas análises posteriores.

Sabe-se, porém, que o procedimento mais conservador seria a realização da Malha 5, mais refinada, e analisar se seu perfil coincidiria com o da Malha 4, justificando assim a escolha dessa última. Esse procedimento, embora mais correto, não foi realizado tendo em vista o tempo escasso para a realização do presente trabalho.

## IV.2 – Análises de Velocidade e de Diâmetro

### IV.2.1 – Análise de Velocidade

Para essa análise foram simulados seis casos, sendo um deles aproveitado do teste de convergência de malha. A presente análise foi avaliada para dois parâmetros importantes para a fluidização: a altura e a queda de pressão do leito. Esses parâmetros foram medidos ao longo de seis retas verticais igualmente espaçadas ao longo da largura do leito, representadas pela Figura IV.4.

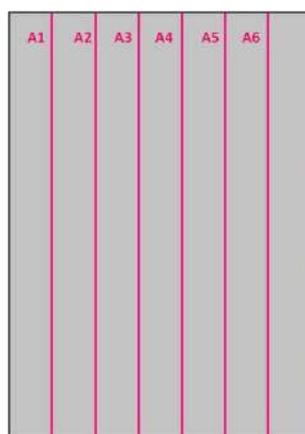


Figura IV.4: Linhas verticais para as análises de velocidade e diâmetro.

Importante mencionar que as simulações referentes a essas duas análises foram rodadas até o instante de 10 s, uma vez que para esse instante, o leito já se apresentava com o comportamento estável.

A Figura IV.5 representada a seguir, indica a resposta do parâmetro altura do leito em função da variação da velocidade de entrada do ar no instante de 10 s. A altura do leito em cada reta vertical foi obtida através do valor da coordenada Y em que a fração volumétrica tornava-se igual a zero. Os pontos no gráfico representam a média aritmética dos seis valores obtidos para cada caso.

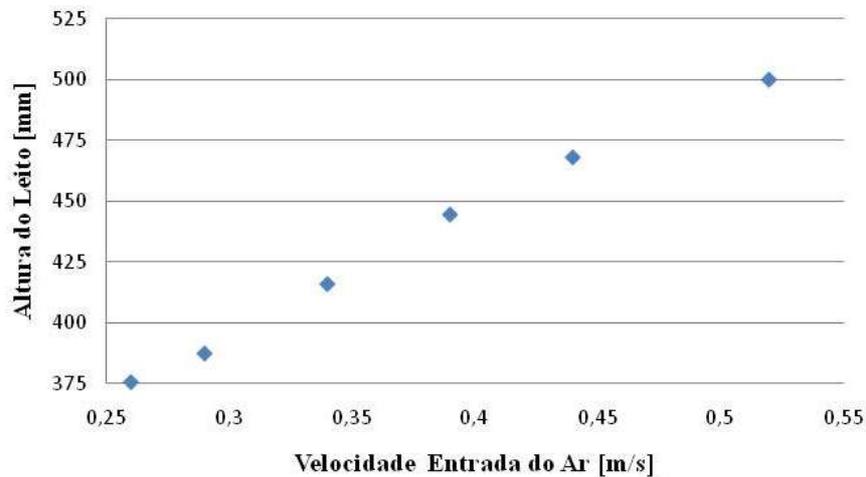


Figura IV.5: Altura do leito em função da variação da velocidade.

A resposta obtida pela Figura IV.5 é a esperada, uma vez que com o aumento da velocidade de entrada do ar, aumenta-se o arraste das partículas e conseqüentemente aumenta a altura final do leito.

A Figura IV.6 mostra a influência da velocidade na queda de pressão do leito para o instante de 10 s. A queda de pressão do leito em cada reta vertical foi obtida através da diferença entre o valor da pressão absoluta em sua coordenada  $Y = 0$  (pressão máxima) e o valor da pressão atmosférica (valor da pressão referente à coordenada relativa à altura do leito). Os pontos no gráfico representam a média aritmética dos seis valores obtidos para cada caso.

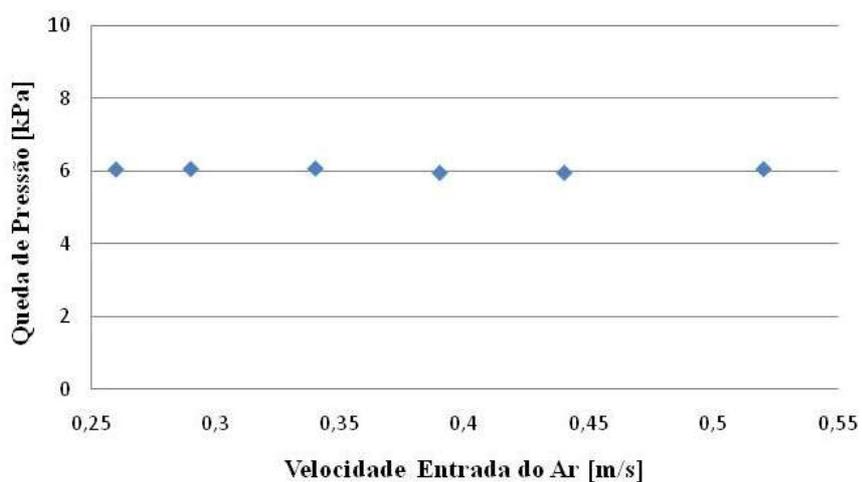


Figura IV.6: Queda de pressão do leito em função da variação da velocidade.

A Figura IV.6 representou bem o que já se havia demonstrado no Capítulo 2 em relação à queda de pressão no leito não se alterar com a variação da velocidade de entrada do ar. Lembrando que esse fenômeno se deve ao fato de que para um dado diâmetro de partícula de areia, um aumento de velocidade do ar acarreta no aumento de altura do leito, porém como a massa de sólidos é constante, a porosidade do leito aumenta de maneira a compensar o aumento da altura.

A próxima figura ilustra para o mesmo instante de 10 s a fração volumétrica da Fase 1 (ar), representada na legenda como VOF, de todos os casos rodados para a análise de velocidade. É possível notar o aumento da altura do leito com o aumento da velocidade de entrada do ar.

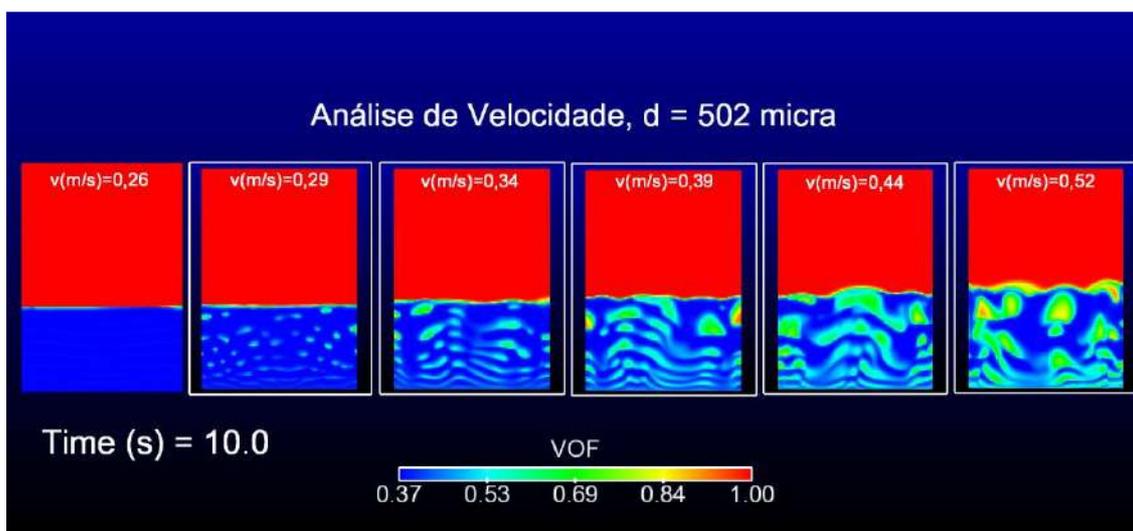


Figura IV.7: Ilustração da fração volumétrica de ar para a análise da velocidade.

#### IV.2.2 – Análise do Diâmetro

Conforme já citado previamente, para essa análise foram simulados cinco casos, sendo um deles aproveitado da análise de velocidade. A presente análise também foi avaliada para os parâmetros de altura e de queda de pressão do leito e esses também foram medidos das mesmas maneiras da análise anterior.

A Figura IV.8 a seguir, mostra a resposta do parâmetro altura do leito em função da variação do diâmetro da partícula de areia para o instante de 10 s. O comportamento apresentado na referente figura era o esperado, uma vez que para uma mesma velocidade de entrada do ar (0,29 m/s), com o aumento do diâmetro, o arraste das partículas diminui impactando assim numa menor altura final do leito.

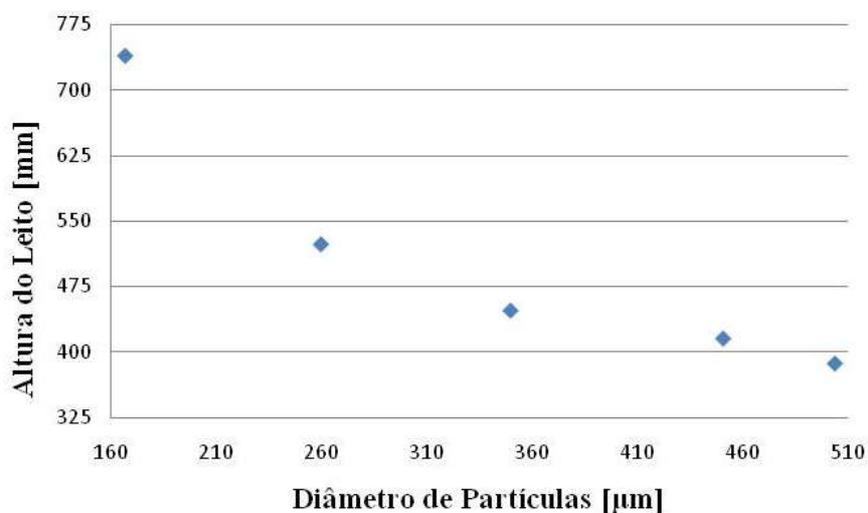


Figura IV.8: Altura do leito em função da variação do diâmetro.

A Figura IV.9 apresenta a influência do diâmetro da partícula na queda de pressão do leito para o instante de 10 s.

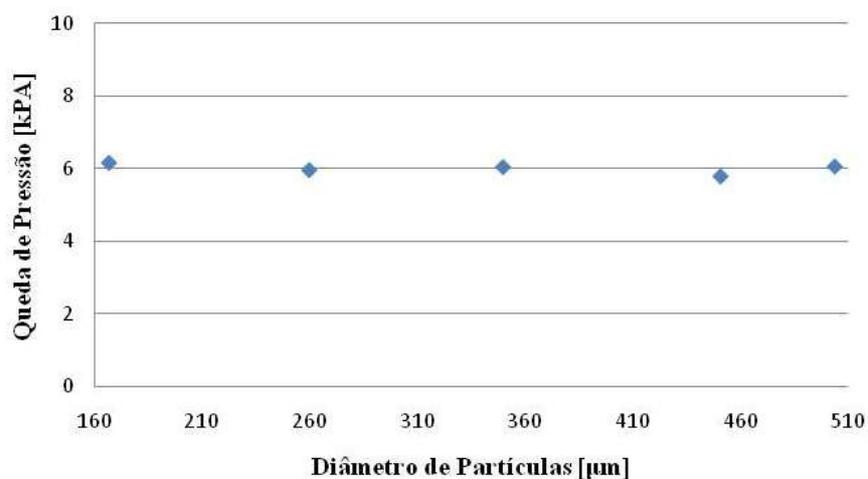


Figura IV.9: Queda de pressão do leito em função da variação do diâmetro.

A Figura IV.9 também representou o comportamento constante da queda de pressão do leito, porém agora em relação à variação do diâmetro da partícula de areia. Esse comportamento constante se deve ao fato de um aumento do diâmetro, mantendo constante a velocidade de entrada do ar, provocar a diminuição da altura do leito, mas como a massa de sólidos é constante, a porosidade final também diminui de forma a compensar a redução da altura.

A próxima figura ilustra para o mesmo instante de 10 s a fração volumétrica da Fase 1 (ar), representada na legenda como VOF, de todos os casos rodados para a análise do diâmetro. É possível notar o aumento da altura do leito com a diminuição do diâmetro.

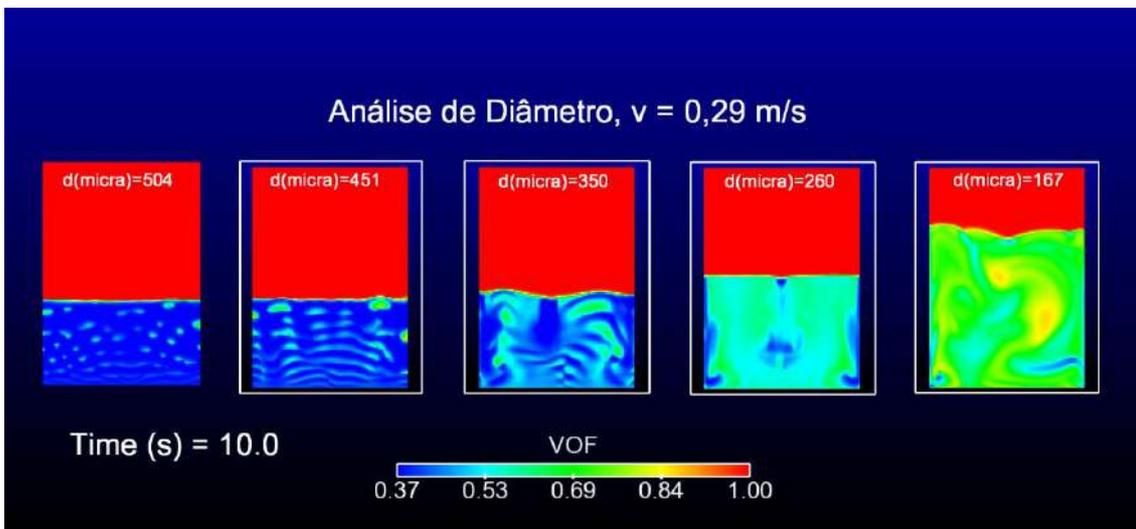


Figura IV.10: Ilustração da fração volumétrica de ar para a análise do diâmetro.

# Capítulo 5

## Conclusões e Recomendações

### V.1 – Principais Conclusões

O presente trabalho teve como principal foco a compreensão da fluidodinâmica de um leito fluidizado de ar e areia, através de análises da influência dos parâmetros velocidade de entrada do ar e diâmetro de partícula de areia, para tal fim, utilizou-se a técnica de CFD. É possível afirmar que o referente objetivo pôde ser cumprido.

Em relação ao teste de convergência de malha, embora o projeto não tenha sido conservador, pode-se obter uma malha capaz de capturar os comportamentos esperados nas análises posteriores.

Quanto à análise da velocidade, teve-se como resposta o esperado, ou seja, um aumento da velocidade de entrada do ar provoca um aumento da altura do leito. Em relação à análise do diâmetro, também se obteve o resultado esperado, isto é, um aumento no diâmetro da partícula de areia gera uma diminuição da altura do leito. Em relação à queda de pressão, entretanto, foi obtido o comportamento constante para ambas as análises.

Neste trabalho a técnica de CFD se mostrou uma ferramenta muito útil, permitindo a obtenção de todos os resultados mencionados de maneira eficaz.

### V.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros

Para possíveis trabalhos futuros que tenham como base o presente estudo, pode-se buscar seguir algumas das recomendações citadas a seguir:

- Realizar um teste de convergência de malha mais conservador, incluído em sua análise pelo menos mais uma malha, de modo a observar se seu

perfil iria coincidir com o apresentado pela Malha 4 apresentada no presente trabalho.

- Fazer simulações 3D e observar se as respostas obtidas seriam as mesmas das obtidas para as realizadas em 2D.
- Fazer mais simulações, porém utilizando velocidades inferiores à mínima de fluidização, a fim de capturar também o perfil relacionado ao leito fixo.
- Fazer um planejamento experimental com o objetivo de avaliar a influência dos parâmetros estudados.
- Comparar os resultados experimentais com os obtidos no presente trabalho, a fim de validar a modelagem utilizada.

## Referências Bibliográficas

[1] BASTOS, J.C. *Simulação do Escoamento Gás-Sólido em um Duto Cilíndrico Vertical em Leito Fluidizado Rápido Aplicando a Técnica CFD*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Química / Unicamp, Campinas, SP, Brasil, 2005.

[2] ROSA, L.M. *Aplicação de Técnicas de CFD para o Cálculo de Escoamento em Meio Reativo em Riser*. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Química / Unicamp, Campinas, SP, Brasil.

[3] ROPELATO, K. *Escoamentos Multifásicos: Fundamento e Modelagem Computacional*. Instituto ESSH de Pesquisa e Desenvolvimento / ESSH, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.

[4] GREWAL, N.S., SAXENA, S.C. "Comparison of Commonly Used Correlations for Minimum Fluidization Velocity of Small Solid Particles", *Powder Technology*, v.26, pp. 229-234, 1980.

[5] JENA, H.M., ROY, G.K., BISWAL, K.C. "Studies on pressure drop and minimum fluidization velocity of gas–solid fluidization of homogeneous well-mixed ternary mixtures in un-promoted and promoted square bed.", *Chemical Engineering Journal*, v.145, pp. 16-24, 2008.

[6] ZHAO, Y. et al. "Experimental and numerical simulation studies of the fluidization characteristics of a separating gas–solid fluidized bed", *Fuel Processing Technology*, v.91, pp. 1819-1825, 2010.

[7] VERSTEEG, H., MALALASEKRA, W., *An Introduction to Computational Fluid Dynamics : The Finite Volume Method Approach*, 1 ed, India, Prentice Hall, 1996.

[8] ASME, “Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications”, *Journal of Fluids Engineering*, v.130, Issue 7, Announcements, 2008.

[9] PERRY, R.H., GREEN, D.W., MOLONEY, J.O. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 7 ed, McGraw Hill, 1999.

[10] ROSA, L.M. *Simulação de Reações Químicas e Consumo de Calor em Risers*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Química / Unicamp, Campinas, SP, Brasil, 2002.

[11] GILBERTSON, M.A., EAMES, I. “The influence of particle size on the flow of fluidised powders”, *Powder Technology*, v.131, pp. 197-205, 2003.

[12] GOLDSCHMIDT, M.V. et al. “Digital image analysis measurements of bed expansion and segregation dynamics in dense gas-fluidised beds”, *Powder Technology*, v.138, pp. 135-159, 2003.

[13] GOLDSCHMIDT, M.V. et al. “Hydrodynamic modelling of dense gas-fluidised beds using the kinetic theory of granular flow: effect of coefficient of restitution on bed dynamics”, *Chemical Engineering Science*, v.56, pp. 571-578, 2001.