



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E DE PRODUÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**PATRICK VIEIRA SAINTRAIN**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA FLUIDIZAÇÃO GASOSA DE LEITO DE  
PARTÍCULAS DE SÍLICA E CASCA DE CASTANHA DE CAJU**

**FORTALEZA**

**2012**

PATRICK VIEIRA SAINTRAIN

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA FLUIDIZAÇÃO GASOSA DE LEITO DE  
PARTÍCULAS DE SÍLICA E CASCA DE CASTANHA DE CAJU**

Dissertação submetida à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, área de concentração: Energias Renováveis, da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. William Magalhães Barcellos

FORTALEZA

2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- S141e Saintrain, Patrick Vieira.  
ESTUDO EXPERIMENTAL DA FLUIDIZAÇÃO GASOSA DE LEITO DE PARTÍCULAS DE  
SÍLICA E CASCA DE CASTANHA DE CAJU / Patrick Vieira Saintrain. – 2012.  
157 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2012.  
Orientação: Prof. Dr. William Magalhaes Barcellos .
1. Leito fluidizado. 2. fluidização gasosa. 3. casca da castanha de caju. I. Título.

CDD 620.1

---

PATRICK VIEIRA SAINTRAIN

ESTUDO EXPERIMENTAL DA FLUIDIZAÇÃO GASOSA DE LEITO DE  
PARTÍCULAS DE SÍLICA E CASCA DE CASTANHA DE CAJU

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Aprovada em 28/08/2012

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. William Magalhães Barcellos (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. João Batista Furlan Duarte  
Universidade de Fortaleza (UNIFOR)

*“Criar o que não existe  
ainda deve ser a pretensão  
de todo sujeito que está vivo”  
Paulo Freire*

*Dedico este trabalho  
a minha mãe Maria Vieira  
e a minha tia Zeleida Vieira*

## AGRADECIMENTOS

Ao Criador por ter me dado serenidade e determinação para a realização deste trabalho;

Ao Prof. Dr. William Magalhães Barcellos, orientador deste trabalho, meus sinceros agradecimentos, pela paciência, dedicação, amizade e pela excelente orientação com a qual muito aprendi e evolui tecnicamente;

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica PPGEM da Universidade Federal do Ceará – UFC, todos os professores e funcionários e em especial aos Colegas do Mestrado em Engenharia Mecânica;

Ao Coordenador Francisco Nivaldo Freire; agradeço por todo o seu excelente trabalho realizado com muita amizade e dedicação a nós alunos e ao próprio Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

A CAPES, pela bolsa de estudo concedida que muito me incentivou a seguir em frente com as minhas pesquisas;

A toda minha família, e em especial aos meus pais *Christian Saintrain* e *Maria Vieira*, pelo estímulo para meu crescimento profissional e principalmente a tia *Zeleida Vieira* por sempre ter me dado incentivo e apoio;

A todos os meus amigos e amigas, principalmente os companheiros de Curso, em especial ao amigo Iramilson Maia, pela convivência e amizade desenvolvida durante estes anos;

Ao Grupo Chaves S/A e Oficina Polares, agradeço imensamente a todos os seus colaboradores pelo apoio fornecendo condições e material para o desenvolvimento da pesquisa.

A minha namorada, amiga e companheira de todas as horas, Claudia de Matos Costa, por seu carinho, atenção, compreensão e ajuda nas horas mais difíceis.

Ao Estagiário em Engenharia Mecânica João Diego, ao Bolsista de iniciação à Pesquisa Welkson Carneiro e a todos os integrantes do Laboratório de Combustão e Energias Renováveis – LACER.

## RESUMO

O aproveitamento da biomassa sólida (casca) decorrente do agroprocesso da castanha de caju ainda é algo por se resolver pela não disponibilidade de tecnologias apropriadas à geração de calor ou energia de forma ambientalmente sustentável. A prática da queima direta em caldeiras e fornos industriais tem resultado em emissões de poluentes, dentre eles: o material particulado, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, e outros. Por essa razão, um estudo experimental de fluidização gasosa de misturas binárias, constituídas de partículas de biomassa (casca da castanha) triturada e de um material poroso inerte (sílica), foi realizado para interpretar adequadamente os fenômenos fluidodinâmicos presentes no leito. O objetivo foi identificar os fatores de influência e parâmetros de projeto para desenvolvimento de queimadores de leito fluidizado de alta eficiência e baixa emissão. O aparato experimental empregado neste estudo consiste de uma bancada de pesquisa constituída de 3 tubos de acrílico de diferentes diâmetros, preenchidos com areia e partículas de casca de castanha, em razões de concentração médias de 2.9 e 3.9, respectivamente, com granulometrias especificadas segundo a classificação de Geldart. O comportamento fluidodinâmico do leito foi analisado, caracterizando os fenômenos presentes no processo através da medição de pressão em pontos uniformemente distribuídos ao longo de todo o leito. A influência dos principais parâmetros de operação: razão de equivalência, velocidade mínima de fluidização, velocidade de leito borbulhante e velocidade de difusão da biomassa, foram o objeto de estudo. Os resultados experimentais apontaram algumas relações de projeto entre o comprimento e área do leito na proporção aproximada de 65:1; e entre a velocidade mínima de difusão de biomassa e a velocidade de escoamento do ar nesta condição na proporção de 1:134, aproximadamente.

Palavras-chave: Leito fluidizado, fluidização gasosa, casca da castanha de caju.

## ABSTRACT

The use of solid biomass (shell) arising from the agriprocessing of cashew nut is still something to be solved due to the non-availability of appropriate technologies for heat or energy generation in environmentally sustainable manner. The practice of the direct burning on boilers and industrial furnaces has resulted in pollutant emissions, among them: particulate matter, carbon monoxide, nitrogen oxides, and others. Therefore, an experimental study of gaseous fluidization of binary mixtures, constituted of pellets of crushed biomass (cashew nut) and an inert porous material (silicon), was carried out to adequately interpret fluidynamic phenomena present in the bed. The goal was to identify the influence factors and design parameters for the development of high-efficiency low-emission fluidized bed burners. The experimental apparatus employed in this study consists of a research setup constituted of 3 acrylic tubes with different diameters, filled with sand and cashew nut particles, in averaged concentration ratios of 2.9 and 3.9, respectively, with granulometries specified according to the Geldart's standard. The fluidynamic performance of the bed was analyzed, featuring the phenomena present in the process through pressure measurement at points uniformly distributed along the entire bed. The influence of the main operation parameters: equivalence ratio; minimum fluidization velocity; bubbling bed velocity and biomass diffusion velocity; were the study object. The experimental results have pointed out some design relations between the length and the cross section of bed at the approximate ratio of 65:1; and between the minimum biomass diffusion velocity and the air flow rate in this condition at the ratio of 1: 134, approximately.

Keywords: fluidized bed, gaseous fluidization, cashew nut shell.

# Índice

Agradecimentos	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
ÍNDICE	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS	xv
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 – OBJETIVOS	4
2.1 – Objetivos Gerais	4
2.2 – Objetivos Específicos	4
CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
3.1 – Fluidização Gasosa	5
3.2 – Reatores de Gaseificação da Biomassa em Leito Fluidizado	8
3.3 – Propriedades Físico-Químicas da Casca da Castanha de Caju	10
CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA	12
4.1 – Citações Bibliográficas de Referência	12
4.1.1 – Souza, R	12
4.1.2 – Rezende, C. e Tannous, K.	12
4.1.3 – Salema, S. A.	13
4.1.4 – Andrade, R.V.	13
4.1.5 – Figueiredo, F.A.B.	14
4.1.6 – Análise Sobre os Autores e Estabelecimento de Metodologia	14
4.2 – Planejamento da Pesquisa	15
4.3 – Análise Teórica da Fluidodinâmica	19
4.3.1 – Determinação de Parâmetros de Operação Segundo Geldart (1986)	19
4.3.2 – Avaliação de Velocidades (Superficial Mínima e Terminal)	23
4.3.3 – Influência do Regime do Leito	24
4.3.4 – Influência da inserção de Biomassa	25
4.3.5 – Influência da Geometria do Leito	29
4.4 – Aparato Experimental	30
4.4.1 – Projeto e Construção da Bancada de Pesquisa	30
4.4.2 – Instrumentos de Monitoramento e Controle	33
CAPÍTULO 5 – OPERAÇÃO E TESTE	37
5.1 – Procedimento Experimental com Leito de Areia	37

5.2 –	Determinação de Parâmetros Fluidodinâmicos	38
5.3 –	Preparação do Material Constituinte do Leito	39
5.4 –	Modificações da Bancada de Pesquisa para Adequação de Instrumentos	44
5.5 –	Relatos de experimentos com areia	45
5.5.1 –	Experimentos com areia de praia bruta ( $\phi = 0,090$ m, $D_p = 546,61$ $\mu\text{m}$ )	45
5.5.2 –	Experimentos com areia de 45/50 mesh ( $\phi = 0,090$ m, $D_p = 321,02$ $\mu\text{m}$ )	49
5.5.3 –	Experimentos com areia de 170/200 mesh ( $\phi = 0,090$ m, $D_p = 72,43$ $\mu\text{m}$ )	50
5.5.4 –	Experimentos com areia de praia bruta ( $\phi = 0,044$ m, $D_p = 546,61$ $\mu\text{m}$ )	51
5.5.5 –	Experimentos com areia de 45/50 mesh ( $\phi = 0,044$ m, $D_p = 321,02$ $\mu\text{m}$ )	54
5.5.6 –	Experimentos com areia de 170/200 mesh ( $\phi = 0,044$ m, $D_p = 72,43$ $\mu\text{m}$ )	57
5.6 –	Preparação do Material Constituinte do Leito Binário (Areia e C.C.C.)	58
5.6.1 –	Relatos de Experimentos com Areia e Biomassa	60
5.6.1.1 –	Experimento com diâmetro $\phi = 0,090$ m, areia de praia, diâmetro médio $D_p$ 546,61 $\mu\text{m}$	60
CAPÍTULO 6 – ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÕES		68
6.1 –	Análise de Experimentos	68
6.2 –	Discussões dos Resultados dos Experimentos com a Teoria	92
CAPÍTULO 7 – ANTEPROJETO BÁSICO DO REATOR		100
CONCLUSÕES		104
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS		105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		106
ANEXOS		111
APÊNDICES		129

## Lista de Figuras

Figura 1 – Classificação de Geldart para a fluidização de partículas com ar sob condições ambiente (Adaptado de Geldart, 1986)	6
Figura 2 – Regimes de fluidização	7
Figura 3 – Gráfico de $\Delta P \times u$	8
Figura 4 – Caju	10
Figura 5 – Castanha de caju e o LCC	11
Figura 6 – Principais constituintes do LCC	11
Figura 7 – Projeto da bancada de pesquisa	32
Figura 8 – Projeto do plenum	33
Figura 9 – Detalhe do esquema de instalação dos sensores	35
Figura 10 – Esquema da bancada de pesquisa	36
Figura 11 – Microscopia 45-50 mesh – Ampliado 20x	42
Figura 12 – Microscopia 45-50 mesh – Ampliado 45x	42
Figura 13 – Microscopia 170/200 mesh – Ampliado 40x	43
Figura 14 – Microscopia 170/200 mesh – Ampliado 90x	43
Figura 15 – Comparação entre o sensor piezoresistivo e o manômetro “U”	44
Figura 16 – Gráfico de $\Delta P$ (mmH <sub>2</sub> O) versus $Q$ (m <sup>3</sup> /s) na ida e na volta do experimento com $\phi = 0,090$ m e areia $D_p = 546,61 \mu\text{m}$	68
Figura 17 – Gráfico de $\Delta P$ (mmH <sub>2</sub> O) versus $Q$ (m <sup>3</sup> /s) na ida e na volta do experimento com $\phi = 0,090$ m e areia $D_p = 321,02 \mu\text{m}$	69
Figura 18 – Gráfico de $\Delta P$ (mmH <sub>2</sub> O) versus $Q$ (m <sup>3</sup> /s) na ida e na volta do experimento com $\phi = 0,044$ m e areia $D_p = 546,601 \mu\text{m}$	70
Figura 19 – Gráfico de $\Delta P$ (mmH <sub>2</sub> O) versus $Q$ (m <sup>3</sup> /s) na ida e na volta do experimento com $\phi = 0,044$ m e areia $D_p = 321,02 \mu\text{m}$	71
Figura 20 – Gráfico de $\Delta P/L$ (mmH <sub>2</sub> O/mm) versus $u$ (cm/s) na ida e na volta do experimento com $\phi = 0,090$ m e areia $D_p = 546,61 \mu\text{m}$	72
Figura 21 – Gráfico de $\Delta P/L$ (mmH <sub>2</sub> O/mm) versus $u$ (cm/s) na ida e na volta do experimento com $\phi = 0,090$ m e areia $D_p = 321,02 \mu\text{m}$	73
Figura 22 – Gráfico de $\Delta P/L$ (mmH <sub>2</sub> O/mm) versus $u$ (cm/s) na ida e na volta do experimento com $\phi = 0,044$ m e areia $D_p = 546,61 \mu\text{m}$ .	74
Figura 23 – Gráfico de $\Delta P/L$ (mmH <sub>2</sub> O/mm) versus $u$ (cm/s) na ida e na volta do experimento com $\phi = 0,044$ m e areia $D_p = 321,02 \mu\text{m}$	74
Figura 24 – Gráfico de $\Delta P$ (mmH <sub>2</sub> O) versus $Q$ (m <sup>3</sup> /s) e Gráfico de $\Delta P/L$ (mmH <sub>2</sub> O/mm) versus $u$ (cm/s), nas cotas 0,275 m e 0,425 m na ida e na volta do experimento com $\phi = 0,090$ m e areia $D_p = 546,61 \mu\text{m}$	75
Figura 25 – Gráfico de $\Delta P$ (mmH <sub>2</sub> O) versus $Q$ (m <sup>3</sup> /s) e Gráfico de $\Delta P/L$ (mmH <sub>2</sub> O/mm) versus $u$ (cm/s), nas cotas 0,275 m e 0,425 m na ida e na volta do experimento com $\phi = 0,090$ m e areia $D_p = 321,02 \mu\text{m}$	76
Figura 26 – Gráfico de $\Delta P$ (mmH <sub>2</sub> O) versus $Q$ (m <sup>3</sup> /s) $\phi = 0,090$ m, cota 0,275 m e areia $D_p = 546,61 \mu\text{m}$	76
Figura 27 – Gráfico de $\Delta P$ (mmH <sub>2</sub> O) versus $Q$ (m <sup>3</sup> /s) $\phi = 0,090$ m, cota 0,425 m e areia $D_p = 546,61 \mu\text{m}$	77
Figura 28 – Gráfico de $\Delta P$ (mmH <sub>2</sub> O) versus $Q$ (m <sup>3</sup> /s) $\phi = 0,090$ m, cota 0,275 m e areia $D_p = 321,02 \mu\text{m}$	78
Figura 29 – Gráfico de $\Delta P$ (mmH <sub>2</sub> O) versus $Q$ (m <sup>3</sup> /s) $\phi = 0,090$ m, cota 0,425 m e areia $D_p$	78

= 321,02 $\mu\text{m}$	
Figura 30 – Gráfico de $\Delta P$ (mmH <sub>2</sub> O) versus Q(m <sup>3</sup> /s) $\phi = 0,044$ m, cota 0,075 m e areia Dp = 546,61 $\mu\text{m}$	79
Figura 31 – Gráfico de $\Delta P$ (mmH <sub>2</sub> O) versus Q(m <sup>3</sup> /s) $\phi = 0,044$ m, cota 0,175 m e areia Dp = 546,61 $\mu\text{m}$	80
Figura 32 – Gráfico de $\Delta P$ (mmH <sub>2</sub> O) versus Q(m <sup>3</sup> /s) $\phi = 0,044$ m, cota 0,075 m e areia Dp = 321,02 $\mu\text{m}$	81
Figura 33 – Gráfico de $\Delta P$ (mmH <sub>2</sub> O) versus Q(m <sup>3</sup> /s) $\phi = 0,044$ m, cota 0,175 m e areia Dp = 321,02 $\mu\text{m}$	81
Figura 34 – Gráfico de $\Delta P$ (mmH <sub>2</sub> O) versus Q(m <sup>3</sup> /s) $\phi = 0,044$ , cota 0,175 m	82
Figura 35 – Gráfico de $\Delta P$ (mmH <sub>2</sub> O) versus Q(m <sup>3</sup> /s) $\phi = 0,090$ m cota 0,425 m	83
Figura 36 – Gráfico de $\Delta P$ (mmH <sub>2</sub> O) versus Q(m <sup>3</sup> /s) areia Dp = 546,61 $\mu\text{m}$ , cota 0,175 m	84
Figura 37 – Gráfico de $\Delta P$ (mmH <sub>2</sub> O) versus Q(m <sup>3</sup> /s) areia Dp = 321,02 $\mu\text{m}$ , cota 0,175 m	85
Figura 38 – Perfis de distribuição de pressão em um leito fluidizado binário, constituído de areia e casca de castanha de caju (Composição de C.C.C. no leito de 124g) com diferentes granulometrias	86
Figura 39 – Perfis de expansão e acomodação do leito conforme o escoamento é acionado ou interrompido para ambos os casos, leito biomassa em diferentes granulometrias	86
Figura 40 – Perfis de distribuição de pressão por unidade de comprimento em um leito fluidizado binário, constituído de areia e casca de castanha de caju com diferentes granulometrias (Composição de C.C.C. no leito de 124g)	87
Figura 41 – Perfis de distribuição de pressão em um leito fluidizado binário, constituído de areia e casca de castanha de caju (Composição de C.C.C. no leito de 166g) com diferentes granulometrias	88
Figura 42 – Perfis de distribuição de pressão por unidade de comprimento em um leito fluidizado binário, constituído de areia e casca de castanha de caju com diferentes granulometrias (Composição de C.C.C. no leito de 166g)	89
Figura 43 – Perfis de distribuição de pressão do leito com e sem castanha caracterizando o efeito da inserção da biomassa	90
Figura 44 – Perfis de distribuição de pressão por unidade de comprimento do leito com e em castanha caracterizando o efeito da inserção da biomassa	91
Figura 45 – Comparação do fator de fricção versus u (m/s) nos experimentos de $\phi=0,044$ m e $\phi=0,090$ m cota 0,175 m	94
Figura 46 – Comparação do fator de fricção versus u (m/s) experimento $\phi=0,090$ m cota 0,425 m Areia 546,61 $\mu\text{m}$ e Areia 546,61 $\mu\text{m}$ com C.C.C. 20-45 Mesh (166g)	94
Figura 47 – Velocidade mínima de fluidização para o experimento com diâmetro 0,090 m com areia de granulometria 546,61 $\mu\text{m}$ na cota 0,425 m.	96
Figura 48 – Inversão de pressão observada no regime de fluidização borbulhante	97
Figura 49 – Ilustração dos três experimentos, com areia preenchendo até a cota crítica	99
Figura 50 – Foto do aparato experimental, com areia preenchendo até a cota crítica	99
Figura 51 – Desenho esquemático do gaseificador de leito fluidizado “Anteprojeto”	100
Figura 52 – Desenho esquemático do balanço de massa para o gaseificador de leito fluidizado	103
Figura 53 – Desenho esquemático do balanço de energia para o gaseificador de leito fluidizado	103
Figura 54 – Medidor de vazão tipo rotâmetro faixa de medição: 10 a 100 SCFH	111
Figura 55 – Medidor de vazão tipo rotâmetro faixa de medição: 0,5 a 5 SCFH	111
Figura 56 – Termômetro digital portátil com escala de temperatura de -50 a +1300	112

Fabricante: Equitherm, Modelo: DM6802B	
Figura 57 – Termopar tipo K	112
Figura 58 – Amplificador piezo com saída de sinal analógico de 4 ... 20 mA e 0 ... 10 V	113
Fabricante: Kistler Instruments.	
Figura 59 – Multímetro digital, Modelo: DT830B	113
Figura 60 – Compressor da marca Schulz, modelo CSL 10 BR/100 Bravo 140psi 2,0cv	114
Figura 61 – Conjunto de preparação de ar comprimido da marca Werk-Schott, série 221 Mini FR+L, faixa de pressão 0,2 - 10 bar	114
Figura 62 – Manômetro analógico (0-10 kgf/cm <sup>2</sup> ) Fabricante: Record	115
Figura 63 – Fonte de alimentação: 0 a 24 volts EMG 18131	118
Figura 64 – Vista frontal e lateral do Bancada de Pesquisa do experimento	118
Figura 65 – Vista de um cilindro individual	119
Figura 66 – Parte inferior do experimento	119
Figura 67 – Placa distribuidora	120
Figura 68 – Balança digital, Fabricante: Filizola, Modelo: BP15	120
Figura 69 – Estufa para secagem e esterilização. Fabricante:Olidef, modelo CZ	121
Figura 70 – Agitador de peneiras metálicas. Fabricante: Produtest	121
Figura 71 – Peneiras metálicas utilizadas. Fabricante: Granutest	122
Figura 72 – Moinho de bolas cerâmicas	122
Figura 73 – Areia e bolas antes da moagem	123
Figura 74 – Microscópio para Estudo da morfologia dos grãos de areia (Infinity Análise), Fabricante: Lumenera Corporation	123
Figura 75 – Formação de bolhas no experimento de diâmetro 0,090 m com areia de praia na cota 0,425 m	124
Figura 76 – Diferentes diâmetros de esferas equivalentes gerados a partir de uma partícula irregular (Rawle, 2002).	138
Figura 77 – Formas possíveis de partículas (German, 1994)	139

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Poder calorífico de amostras de biomassas	1
Tabela 2 – Planilha de Experimento por Faixa Granulométrica	17
Tabela 3 – Planilha de Experimento Integrada por Faixa Granulométrica	18
Tabela 4 – Tabela com valores de K1 e K2 obtidos por diferentes pesquisadores (Kunii, 1991)	22
Tabela 5 – Dados do Leito na condição de mínima fluidização para $\phi = 0,090$ m e $D_p = 546,61 \mu\text{m}$	26
Tabela 6 – Cálculo das Vazões de ar no Leito para as condições mínima de arraste e de regime borbulhante para $\phi = 0,090$ m e $D_p = 546,61 \mu\text{m}$	27
Tabela 7 – Cálculo de taxa de injeção de biomassa (C.C.C.) com base em valores experimentais de referência (Figueiredo, 2009 e Rezende e Tannous, 2009) para $\phi = 0,090$ m e $D_p = 546,61 \mu\text{m}$	28
Tabela 8 – Cálculo de difusão de biomassa (C.C.C.) no leito para as condições mínima de arraste e de regime borbulhante para $\phi = 0,090$ m e $D_p = 546,61 \mu\text{m}$	28
Tabela 9 – Análise comparativa de velocidades do escoamento do ar no Leito e a velocidade de difusão para as condições mínima de arraste e de regime borbulhante para $\phi = 0,090$ m e $D_p = 546,61 \mu\text{m}$	29
Tabela 10 – Composição granulométrica da Areia Bruta de Praia	40
Tabela 11 – Parâmetros fluidodinâmicos dos componentes do leito	60
Tabela 12 – Quedas de pressão máximas no experimento com diâmetro 0,044 m	90
Tabela 13 – Quedas de pressão máximas no experimento com diâmetro 0,090 m	91
Tabela 14 – Quedas de pressão máximas no experimento com diâmetro 0,090 m com C.C.C.	91
Tabela 15 – Valores obtidos pelas equações teóricas para o experimento com diâmetro 0,090 m com areia de granulometria 546,61 $\mu\text{m}$ na cota 0,425 m	94
Tabela 16 – Dados da cota crítica em cada experimento	98
Tabela 17 – Razões entre áreas, cotas críticas e vazões em cada experimento	98

## Lista de Símbolos

$A$	–	Área	[m <sup>2</sup> ]
$A_{pf}$	–	Fator pré-exponencial de Arrhenius	[s <sup>-1</sup> ]
$c_p$	–	Calor específico	[J/kg-K]
$D_{im}$	–	Coefficiente de difusão média da mistura	[m <sup>2</sup> /s]
$d_p$	–	Diâmetro principal da partícula ou diâmetro de corte	μm
$E_{act}$	–	Energia de ativação	[J/kg]
$g$	–	Aceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
$h_{reac}$	–	Entalpia de reação por unidade de massa	[J/kg]
$H$	–	Entalpia	[J/kg]
$L$	–	Comprimento do reator	[m]
$\dot{m}$	–	Vazão mássica	[kg/s]
$N$	–	Número	
$p$	–	Pressão	[Pa]
PCI	–	Poder calorífico inferior	[kJ/kg]
PM	–	Peso molecular	
Pr	–	Número de Prandtl	
$\dot{Q}$	–	Potência	[W]
Re	–	Número de Reynolds	
$Re_{mf}$	–	Número de Reynolds na condição de mínima fluidização;	
Ru	–	Constante universal do gás perfeito	[J/kmol-K]
T	–	Temperatura	[K]
$v_g$	–	Velocidade intersticial do gás	[m/s]
$v_{gf}$	–	Velocidade do escoamento dos gases	[m/s]
V	–	Velocidade de difusão	[m/s]
W	–	Taxa volumétrica de geração de produtos	[kg/m <sup>3</sup> -s]
$y_p$	–	Fração mássica de produtos	

### Letras gregas:

$\gamma$	–	Fração mássica	
$\varepsilon$	–	Porosidade	
$\rho$	–	Densidade	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_s$	–	Massa específica do sólido	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_F$	–	Massa específica do fluido	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\Phi$	–	Razão de equivalência	
$\mu_F$	–	Viscosidade absoluta do fluido	

### Sub-índices:

$0$	–	Entrada / ambiente	
CH <sub>4</sub>	–	Metano	
cw	–	Onda de combustão	
g	–	Gás	
H <sub>2</sub> O	–	Água	

máx	–	Máximo
mín	–	Mínimo
mist	–	Mistura ar-combustível
O <sub>2</sub>	–	Oxigênio
N <sub>2</sub>	–	Nitrogênio

**Abreviaturas:**

$\Delta P_t$	–	Queda de pressão medida no experimento	mmH <sub>2</sub> O
$\Delta P_d$	–	Queda de pressão relativa ao distribuidor	mmH <sub>2</sub> O
$\Delta P$	–	Variação de Pressão	mmH <sub>2</sub> O
ACC	–	Amêndoa de Castanha de Caju	
CF	–	Combustão de Filtração	
CLF	–	Combustão em Leito Fluidizado	
CBD	–	Combustível derivados da biomassa	
D <sub>p</sub>	–	Diâmetro médio de partícula	μm
EA	–	Excesso de Ar	
FAO	–	Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação	
LFB	–	Leito Fluidizado Borbulhante	
LFC	–	Leito Fluidizado Circulante	
LFT	–	Leito Fluidizado de Regime Turbulento	
LSPA	–	Levantamento Sistemático da Produção Agrícola	
MP	–	Material Particulado	
RSU	–	Resíduos Sólidos Urbanos	
U <sub>G</sub>	–	Velocidade Superficial do Ar de Fluidização	cm/s
U	–	Velocidade superficial de gás	cm/s
U <sub>fa</sub>	–	Velocidade aparente de fluidização	cm/s
U <sub>fc</sub>	–	Velocidade completa de fluidização	cm/s
U <sub>fi</sub>	–	Velocidade inicial de fluidização	cm/s
U <sub>mf</sub>	–	Velocidade de mínima fluidização	cm/s
U <sub>s</sub>	–	Velocidade de segregação	cm/s
U <sub>t</sub>	–	Velocidade terminal	cm/s
ε <sub>leito</sub>	–	Porosidade do leito	
ε <sub>fa</sub>	–	Porosidade aparente de fluidização	
ε <sub>mf</sub>	–	Porosidade de mínima fluidização	
ρ <sub>p</sub>	–	Densidade absoluta da Partícula	kg/m <sup>3</sup>
χ	–	Razão mássica casca/areia	%

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

A “Economia do Caju” assume papel importante no cenário industrial do Estado do Ceará, onde o beneficiamento da castanha (fruto) e da polpa (pseudo-fruto), incluindo a exportação de amêndoas e outros produtos alimentícios, corresponde aproximadamente a 15% da economia estadual e a mais de 80% de todo o capital movimentado nessa atividade, em âmbito nacional. Embora esse agronegócio represente uma atividade intensa e demandante de bens e serviços, o que é positivo economicamente para todo o Nordeste, a quantidade expressiva de resíduos sólidos (casca da castanha) e líquidos (líquido contido no mesocarpo esponjoso da própria casca da castanha - LCC) descartada de forma inadvertida tem resultado num vetor de impacto ambiental considerável na região. A composição química desses resíduos agroindustriais é relativamente complexa e agressiva a outros tipos de materiais orgânicos, em que o despejo na natureza, em grande monta e de forma descontrolada, polui rios, lagos e lençóis freáticos. Mesmo a tentativa das indústrias em fazer a queima direta das cascas em caldeiras e fornos também não tem sido bem sucedida, tanto pela questão das emissões de poluentes para atmosfera como pelo processo corrosivo/abrasivo dos depósitos de material orgânico carbonizado sobre paredes e dutos internos dos equipamentos. Entretanto, a casca da castanha de caju tem sido considerada uma boa opção de biomassa para as indústrias, enquanto combustível, pela sua alta disponibilidade e pelo seu alto poder calorífico em relação a outras biomassas, razão pela qual, essa prática tem se sido continuada há mais de 10 anos no Brasil. A análise do poder calorífico da casca da castanha de caju apresenta excelentes valores quando comparado a outras biomassas (Tabela 1), mostrando ser de extrema importância o aproveitamento desta energia. (Figueiredo et al., 2007).

**Tabela 1. Poder calorífico de amostras de biomassas.**

Fonte: Demirbas, 1997; Demirbas, 2006

<b>AMOSTRAS</b>	<b>PODER CALORÍFICO [MJ/kg]</b>
<b>Borra de café</b>	<b>6,6</b>
<b>Caroço de açaí</b>	<b>17,5</b>
<b>Caroço de azeitona</b>	<b>19</b>
<b>Carvão mineral</b>	<b>27</b>
<b>Casca de árvore</b>	<b>20,5</b>

<b>Casca da castanha de caju</b>	<b>22,45</b>
<b>Casca semente girassol</b>	<b>18</b>
<b>Fibras de palmito</b>	<b>15,9</b>
<b>Lenha (eucalipto)</b>	<b>11,7 – 12,5</b>
<b>Palha de amendoim</b>	<b>16,3</b>
<b>Palha de arroz</b>	<b>15,9</b>
<b>Palha de café</b>	<b>11,7 – 13</b>
<b>Palha de trigo</b>	<b>17</b>
<b>Resíduos agrícolas</b>	<b>15,9</b>
<b>Resíduos de juta</b>	<b>15,9</b>
<b>Sabugo de milho</b>	<b>17</b>
<b>Sisal</b>	<b>14,2</b>
<b>Xisto</b>	<b>6,1</b>

Isso tem sido constatado por alguns pesquisadores do Laboratório de Combustão em Energias Renováveis (LACER) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará (UFC), que têm visitado algumas empresas do Estado do Ceará que utilizam a casca de castanha há alguns anos em caldeiras de vapor híbridas (como exemplo, Santana Têxtil, Tebasa, Vicunha, dentre outras). Têm sido observados problemas operacionais nesse tipo de caldeira industrial, por vezes, com avarias irreversíveis nos equipamentos, por incrustações de LCC sedimentadas nas paredes da câmara de combustão e em tubos de água/vapor. Em verdade, pouco se sabe a respeito das emissões de gases poluentes dos queimadores convencionais queimando a casca da castanha, face à não disponibilidade de uma literatura pertinente. Entretanto, verifica-se uma forte tendência à produção de material particulado e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) (Cabral, 2010).

Com ciência sobre a importância desse substrato para economia local e sobre as dificuldades em se lidar com sua queima em reatores convencionais, está sendo proposto um projeto de aproveitamento sustentável dessa biomassa (cascas), através da gaseificação em reator de leito fluidizado, visando à produção de gás de síntese e extração de energia da reação através de trocadores de calor inseridos no leito. A gaseificação da biomassa surge, então, como uma alternativa sustentável econômica e ambientalmente para o aproveitamento racional desse material residual. De acordo com Figueiredo et al. (2009), a gaseificação da casca da castanha se apresenta como viável principalmente pelo seu poder calorífico, em relação a outras biomassas, cerca de 22,45 MJ/kg (PCS). Entretanto, pouco se sabe sobre as tecnologias que podem ser aplicadas à casca da castanha, no tocante aos tipos de gaseificadores e aos problemas operacionais associados, principalmente pela presença do LCC.

Neste contexto, esse projeto pode ser caracterizado como uma inovação tecnológica pelo fato de utilizar a tecnologia do “Leito Fluidizado” aplicada a uma biomassa sólida, até então pouco estudada. A pesquisa é eminentemente experimental e a investigação dos fenômenos fluidodinâmicos presentes é foco principal de estudo, por ser um campo de pesquisa pouco difundido, especialmente por se tratar de uma biomassa de estrutura molecular complexa, com boa parte dela em base fenólica, especialmente devido ao LCC.

Através de uma pesquisa bibliográfica preliminar, percebeu-se a dificuldade em encontrar informação consistente a respeito de reatores convencionais queimando a casca da castanha e muito menos sobre leito fluidizado operando com essa biomassa. E, ainda, constatou-se a existência de pouquíssimos estudos consolidados a respeito do comportamento fluidodinâmico de um leito com uma mistura binária, composta de areia e casca de castanha triturada (Rezende e Tannous, 2009). Por essa razão, decidiu-se investigar precisamente os aspectos fluidodinâmicos do leito de areia com castanha para ter um conhecimento mais aprofundado a respeito, não só pela exiguidade de tempo, mas também pelo fato de ser prudente identificar com precisão os parâmetros e fenômenos de processo antes de partir para o desenvolvimento de um reator, que muito provavelmente será realizado por outro pesquisador, na elaboração de uma dissertação de mestrado direcionada a essa questão.

Com base nisso, visualizou-se como fundamental a construção de uma bancada de pesquisa específica para o estudo experimental da fluidodinâmica de um leito de areia fluidizado com adição de casca de castanha. Nesse estudo em bancada de pesquisa é possível simular as condições extremas de operação e investigar a dinâmica das partículas (casca triturada) em meio ao leito de areia fluidizado. Apesar de o estudo ter um caráter experimental, cabe um estudo analítico paralelo para determinação do balanço das reações e entendimento do processo.

É importante ressaltar o pioneirismo deste projeto de pesquisa na Universidade Federal do Ceará, em que se estuda o leito fluidizado com uma biomassa que apresenta algumas dificuldades de tratamento pelas suas características físico-químicas. Esta pesquisa abre um leque de opções para futuros trabalhos acadêmicos a serem desenvolvidos no LACER relacionados ao tema.

## **CAPÍTULO 2 – OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos Gerais**

O objetivo principal deste projeto é desenvolver uma alternativa sustentável para a questão das grandes reservas de biomassa sólida (cascas), provenientes da agroindústria de beneficiamento da castanha de caju, aplicando a tecnologia de gaseificação em reator de leito fluidizado, visando a produção de gás de síntese e calor para aplicação em sistemas térmicos industriais.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- a) Construir uma bancada de pesquisa para estudo dos fenômenos fluidodinâmicos em leito fluidizado binário, constituído de sílica e partículas de casca de castanha de caju;
- b) Determinar os parâmetros de projeto que permitam o desenvolvimento de um reator de leito fluidizado específico para operar com essa biomassa;
- c) Conhecer os fenômenos de processo e, com isso, amplificar as possibilidades de tratamento de outros tipos de biomassa.

# CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

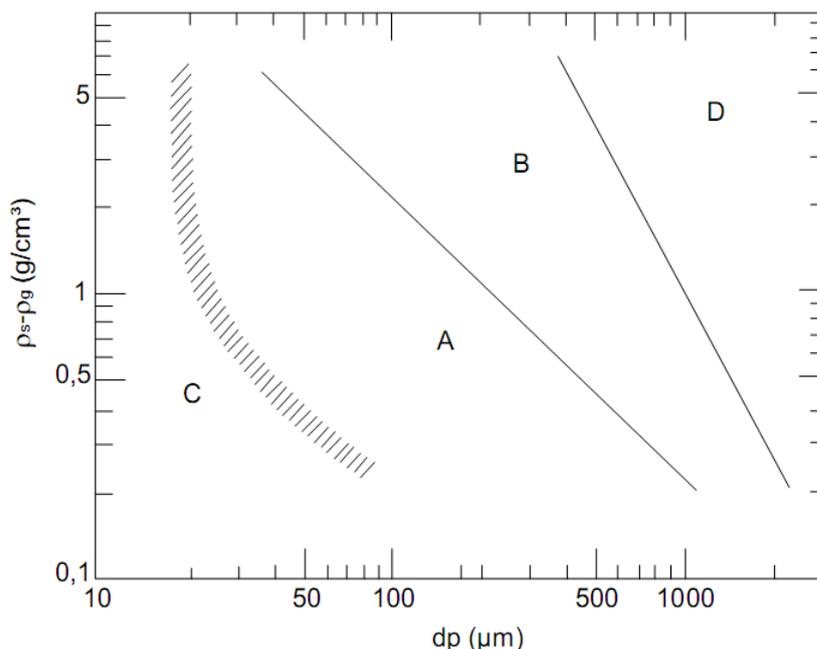
## 3.1 Fluidização Gasosa

A fluidização é a operação pela qual partículas sólidas, que estão armazenadas em um recipiente (na maioria dos casos, cilíndrico) formando um leito, são movimentadas pelo escoamento de um gás (ou líquido), que as transporta e mantém em suspensão, simulando um efeito semelhante a condição de estado líquido. Os regimes de fluidização são estabelecidos no leito em função das características do escoamento, das propriedades do leito e das propriedades do fluido. As etapas do processo de fluidização de um leito podem ser discriminadas e classificadas como: Leito Fixo e Leito Expandido, Leito Fluidizado Incipiente, Leito Fluidizado Particulado, Leito Fluidizado Agregativo, Leito Fluidizado Turbulento, Leito Fluidizado Disperso, Leitões Fluidizados Circulantes e Leito de Jorro (Kunii e Levenspiel, 1991).

Conceituando leito fluidizado segundo a visão de Geldart (1986), define-se como aquele formado por um conjunto de partículas sustentado por um distribuidor e por onde um gás passa em sentido ascendente. Verifica-se, então, a importância do tamanho da partícula no processo de fluidização, que determina a característica do escoamento e os regimes de velocidades a serem implementados no leito. Geldart (1986) estudou a fluidização de diferentes tipos e tamanhos de partículas, classificando-as em quatro grupos descritos a seguir, que são apresentados na Figura 1:

- **Grupo A:** designadas como aeradas. O material desse grupo tem pequeno diâmetro de partícula e baixa densidade ( $\leq 1,4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ). Esse tipo de sólido fluidiza facilmente, suave, a baixa velocidade do gás e poucas bolhas a alta velocidade;
- **Grupo B:** Desse grupo o material tem diâmetro da partícula entre 40  $\mu\text{m}$  e 500  $\mu\text{m}$  e densidade entre  $1,4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  e  $4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ . Esse tipo de sólido fluidiza bem, com vigorosa ação de borbulhamento;
- **Grupo C:** Para esse grupo a fluidização normal é extremamente difícil devido às forças de ação entre as partículas serem maiores que as resultantes da ação do gás;
- **Grupo D:** constituído de partículas muito densas, portanto de difícil fluidização.

**Figura 1 – Classificação de Geldart para a fluidização de partículas com ar sob condições ambiente.**



**FONTE: (Adaptado de GELDART, 1986).**

Estabelecido o tamanho da partícula a ser utilizada para compor o leito a ser fluidizado, busca-se então, identificar a velocidade de mínima fluidização de um determinado leito, que é o principal parâmetro de operação e através do qual pode ser iniciada a interpretação do processo de fluidização. De acordo com a teoria das duas fases (Davidson e Harrison, 1963), a velocidade mínima de fluidização é aquela em que o sistema passa de leito fixo a fluidizado e, neste ponto, qualquer acréscimo na velocidade do gás provocará a formação de bolhas no sistema fluidizado (Souza, 1978).

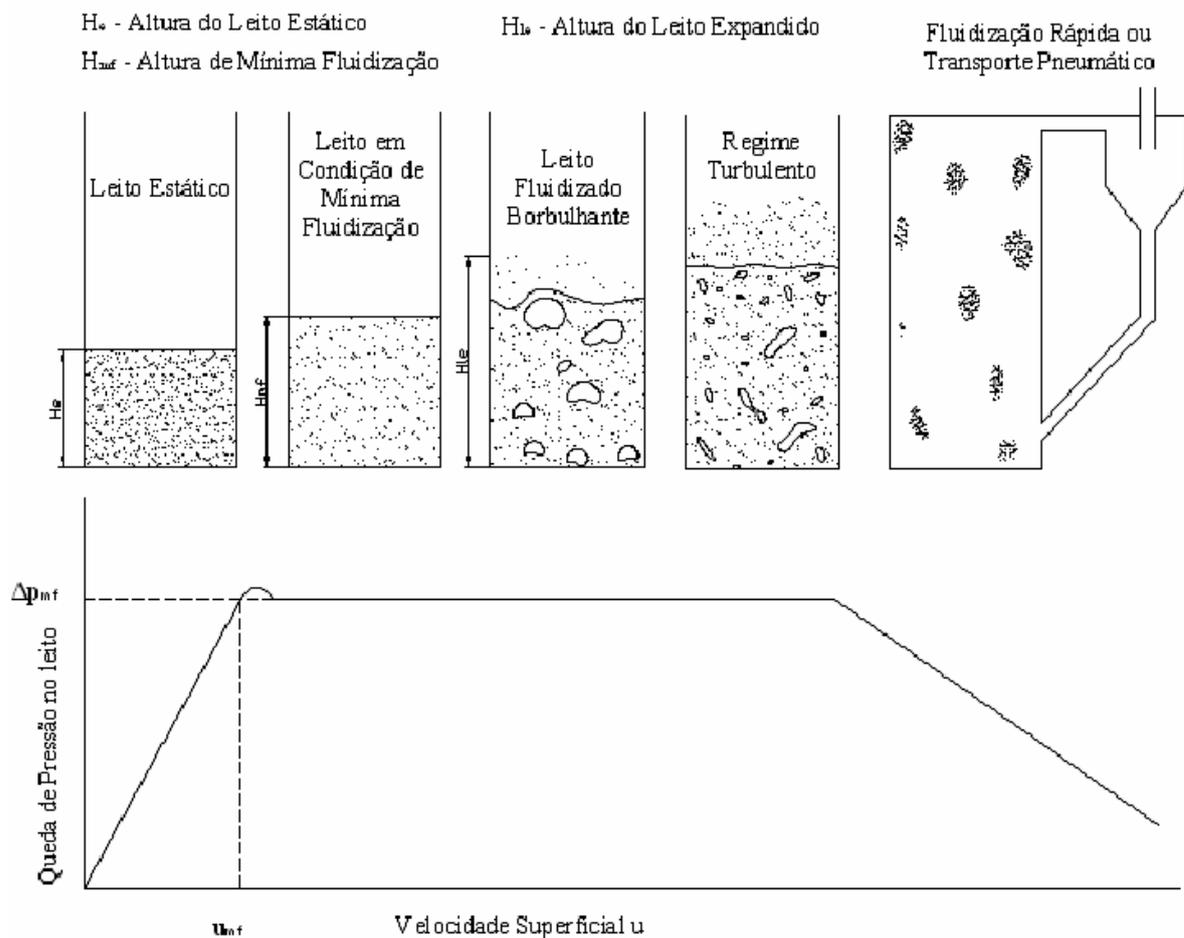
Além da velocidade mínima de fluidização, a velocidade superficial e a velocidade terminal são outros parâmetros que devem ser avaliados para o bom funcionamento do reator de leito fluidizado (Andrade, 2007). O entendimento desses parâmetros é fundamental para lidar com os fenômenos da fluidização, os quais são apresentados esquematicamente na Figura 2, que mostra o processo de fluidização em velocidade mínima, bem como podem ser visualizados os outros regimes de fluidização.

Experimentalmente essa velocidade pode ser obtida através da leitura da pressão antes e depois do leito, sendo que a velocidade de mínima fluidização é obtida quando as pressões praticamente se igualam (Andrade, 2007). Para a determinação da velocidade incipiente de fluidização é utilizado o “método da queda de pressão” para o qual é usado um manômetro em "U", e as quedas de pressão são medidas abaixo do distribuidor, as

velocidades do gás são medidas através de um rotâmetro acoplado à linha do fluido. Neste método a queda de pressão corresponde a cada velocidade determinada. Inicialmente aumenta-se lentamente a velocidade do ar e simultaneamente mede-se a queda de pressão correspondente, procedendo deste modo até que um aumento na velocidade do gás não altere a queda de pressão. Em seguida faz-se a volta no perfil de queda de pressão, ou seja, executa-se a operação de diminuir lentamente a velocidade do gás, medindo a queda de pressão correspondente. (Souza, 1978).

Como o distribuidor é uma placa porosa, e, portanto um leito fixo, também contribui para a queda de pressão do leito. Deste modo para se ter somente a queda de pressão devido às partículas do leito é necessário subtrair os valores da queda de pressão devido ao distribuidor. Para determinar as quedas de pressão correspondentes ao distribuidor, procede-se da mesma forma com o leito vazio.

**Figura 2: Regimes de Fluidização**

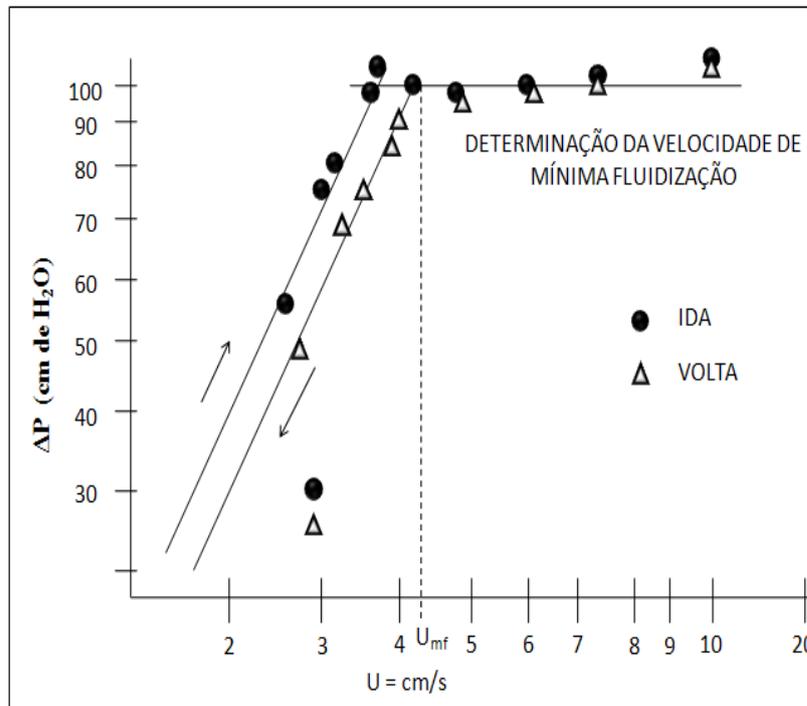


FONTE: (Andrade, 2007).

A Figura 3 apresenta num gráfico log-log, a queda de pressão correspondente a cada velocidade do gás. O valor da velocidade incipiente de fluidização  $U_{mf}$  é obtida através da projeção vertical da interseção das duas retas sobre o eixo das velocidades. Segundo

Davidson & Harrison (1963), o melhor valor de  $U_{mf}$  é obtido quando se relaciona a queda de pressão com o decréscimo da velocidade, justificando que nestas condições o sistema apresenta mais estabilidade.

Figura 3 – Gráfico de  $\Delta P \times u$ .



FONTE: (SOUZA, 1978).

### 3.2 Reatores de Gaseificação da Biomassa em Leito Fluidizado

O leito fluidizado foi desenvolvido antes da Segunda Guerra Mundial para sistemas de gaseificação de grande porte a partir do carvão mineral. Posteriormente, a tecnologia foi adotada pelas indústrias petroquímicas para a secagem e para o craqueamento catalítico de hidrocarbonetos pesados. Uma característica fundamental desses equipamentos é a sua elevada produtividade associada a altas taxas de transferência de calor. Por sua maior complexidade e custo, quanto comparados aos demais gaseificadores, são empregados em instalações de grande porte, pois requerem maiores investimentos (Ribeiro, 2007).

A gaseificação em leito fluidizado possibilita a utilização de combustível sólido com baixa granulometria inserida no leito com diferentes poderes caloríficos. Essa tecnologia permite uma queima mais eficiente do combustível devido à distribuição mais homogênea da

temperatura no leito do reator. Diferente dos equipamentos de leito fixo, o leito fluidizado não é de operação trivial, demandando um maior tempo para entrar em regime permanente durante o processo de partida, bem como exige uma melhor qualificação do operador (Andrade, 2007).

Segundo Gomez (1996), os reatores de leito fluidizado são diferenciados em:

**i) Reatores de 1ª geração:**

Reatores de leito fluidizado borbulhante, em que as partículas sólidas elutriadas (arrastadas pelo fluido de gás) do leito não recirculam novamente e tem baixa conversão de carbono e menor eficiência, tendo maiores as perdas de carbono não queimados como fuligem no gás de saída ou no alcatrão produzido. As partículas são mantidas em suspensão num leito de material inerte (areia, alumina, dolomita etc) fluidizado pelo agente de gaseificação (ar, oxigênio, ar enriquecido com oxigênio etc). Neste tipo de reator o combustível é alimentado diretamente na zona do leito, existindo variantes que alimentam o combustível a determinada distância acima do leito ou pelo topo do reator. Trabalha-se com velocidade superficial do gás numa faixa de valores para os quais não é possível, teoricamente, atingir o transporte pneumático das partículas do leito.

**ii) Reatores de 2ª geração:**

Reatores de leito fluidizado circulante onde as partículas elutriadas recirculam novamente, o sistema opera em regime de leito fluidizado rápido com elevadas taxas de recirculação do material do leito. Apresenta-se como um regime intermediário entre o leito borbulhante e o regime de transporte pneumático, devido à circulação, o tempo de residência das partículas de combustível no leito é maior, sendo maior a conversão de carbono (>95% para algumas instalações), por isso, a eficiência do gaseificado é maior, além de garantir sistemas de maiores capacidades específicas (kg/m<sup>3</sup>h).

Bridgwater e Evans (1993) e Paisley et al. (1997) citam as principais vantagens dos reatores de gaseificação com leito fluidizado borbulhante em relação aos demais reatores de leito fluidizado:

- Propicia gases como produto da reação com características uniformes;
- Exibem um perfil de distribuição de temperatura praticamente uniforme em todo o reator;
- É capaz de aceitar uma ampla variedade de tamanhos de partículas de combustível, incluindo aquelas bastante diminutas;
- Fornece elevadas taxas de transferência de calor entre o material inerte, combustível e gás;
- Resulta em alta conversão do combustível, com baixos teores de alcatrão e carbono não-convertido.

### 3.3 Propriedades Físico-Químicas da Casca da Castanha de Caju

O *Anacardium occidentale* L., Anacardiaceae, conhecido popularmente como cajueiro, é uma planta nativa do Brasil e característica dos campos e das regiões costeiras do Norte e Nordeste. Foi introduzida na África e Índia, pelos portugueses no século XVI e hoje está disseminada por todas as regiões tropicais do globo (Pio Corrêa, 1926).

Como pode ser observado na Figura 4, da árvore pode ser obtido um conjunto de produtos, dentre os quais o principal é a castanha de caju. Desta se extrai a amêndoa da castanha de caju, utilizada como alimento humano em formas variadas. O pedúnculo ou pseudofruto, ainda pouco aproveitado, pode ser consumido in natura ou ser utilizado para a fabricação de doces e também para a extração de polpas para sucos e outras bebidas, com o bagaço resultante podendo ser utilizado para ração animal, mediante processamento adequado. Da casca da castanha do caju, por sua vez, é extraído o líquido da casca da castanha de caju (LCC), com aplicações nobres em indústrias químicas como, por exemplo, na fabricação de tintas, lubrificantes e cosméticos. (Análise da indústria da castanha do caju).

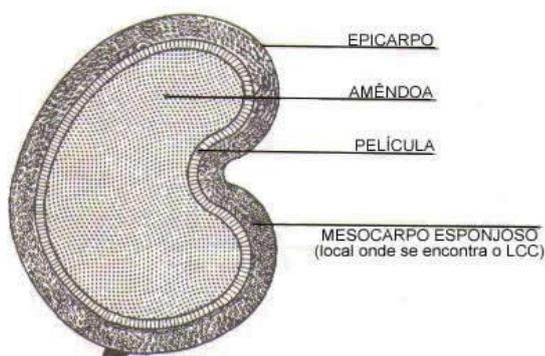
Figura 4 – Caju.



A castanha, verdadeiro fruto do cajueiro, é constituída basicamente de três partes: a casca, a película e a amêndoa. A amêndoa da castanha de caju é rica em fibras, proteínas, minerais (magnésio, ferro, potássio, selênio, cobre e zinco), vitaminas A, D, K, PP e principalmente a E, carboidratos, cálcio, fósforo, sódio e vários tipos de aminoácidos. Um destes aminoácidos é a arginina que, no metabolismo, transforma-se em óxido nítrico e este, por vez, alarga as artérias e diminui a pressão sanguínea. Desta forma a castanha do caju contribui no combate às doenças cardíacas. Além disso, a casca de castanha de caju apresenta um poder calorífico significativo, em comparação com as outras biomassas, da ordem de 22,45 MJ/kg (Coelho, 2002).

Como pode ser observada na Figura 5, a castanha possui uma casca dupla contendo uma toxina: o uruxiol (também encontrada na hera venenosa), um alergênico que irrita a pele. Por isso a castanha deve ter sua casca removida somente por quem conhece este processo, jamais domesticamente. Rica em proteínas e lipídios, seu óleo, o LCC, contém cerca de 70% de monoinsaturados, ou seja, um óleo leve, energético, muito parecido com o azeite de oliva que contém 76%. Sua composição média é de 26,4% de carboidratos, 47,2% de gordura e 19,6% de proteínas, além de fósforo, ferro e cálcio (Mazzetto et al., 2009).

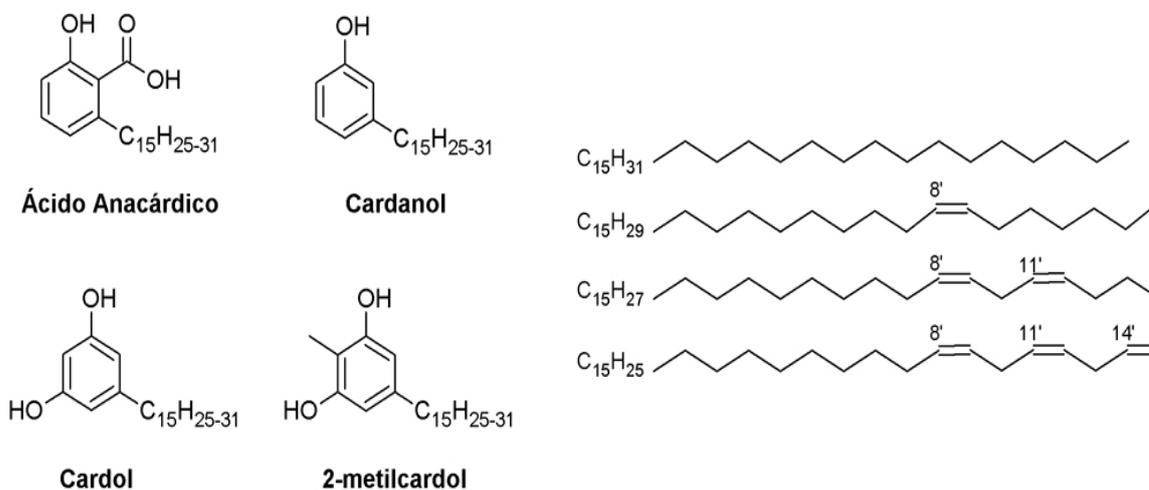
**Figura 5 – Castanha de caju e o LCC.**



**FONTE: (Mazzetto et al., 2009)**

O LCC representa aproximadamente 25% do peso da castanha. Este líquido é uma das fontes mais ricas de lipídeos fenólicos não-isoprenóides de origem natural, cuja composição química principal pode ser vista na Figura 6 (Mazzetto et al., 2009):

**Figura 6 – Principais constituintes do LCC.**



**FONTE: (Mazzetto et al., 2009)**

## CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA

### 4.1 Citações Bibliográficas de Referência

#### 4.1.1 Souza, R.

Souza (1978) estudou a distribuição da concentração volumétrica de bolhas e da porosidade em um leito fluidizado, utilizando dois métodos: emissão (partículas foram marcadas com elemento radioativo emissor de radiação gama) e atenuação (utilizou-se feixe de radiação monoenergético). Seu principal objetivo foi o de mostrar a aplicação do método da emissão na distribuição da concentração volumétrica de bolhas e da porosidade no leito fluidizado. Foi utilizado, como experimento, um tubo de acrílico de 82 mm de diâmetro interno, com 1500 mm de altura, acoplado à base do leito encontrava-se o distribuidor (placa porosa), com a finalidade de distribuir uniformemente o gás por toda a seção do leito e com isso a fluidização mais uniforme. Utilizou uma massa de 5.500 g de areia com densidade de 2,66 g/cm<sup>3</sup> como material para o leito. Esta areia apresentou uma faixa de granulometria entre 0,420 mm a 0,125 mm tendo um diâmetro médio de ( $d_m = 0,230\text{mm}$ ), atingindo uma cota máxima do leito de 890 mm com o fluxo de ar. O leito fluidizado utilizado pelo autor não se comportou da maneira prevista pela teoria das duas fases e provavelmente a porosidade da fase particulada não permaneceu constante para as velocidades do fluido acima de velocidade mínima de fluidização.

#### 4.1.2 Rezende, C. e Tannous, K.

Rezende e Tannous (2009) estudaram o comportamento fluidodinâmico de misturas binárias formado por biomassa (casca de arroz) e material inerte (areia) classificados como D e B segundo a classificação de Geldart. Neste trabalho foi utilizado um leito cilíndrico em acrílico, de 0,092 m de diâmetro interno. A fração mássica de biomassa na mistura foi variada de 2,5% a 10%. As velocidades específicas foram caracterizadas através dos diferentes estados fluidodinâmicos (mistura-segregação): velocidade inicial de fluidização ( $U_{fi}$ ), velocidade aparente de fluidização ( $U_{fa}$ ), velocidade de segregação ( $U_s$ ) e velocidade completa de fluidização ( $U_{fc}$ ). A velocidade aparente de fluidização foi comparada com correlações da literatura para partículas homogêneas, bem como correlações para misturas binárias.

### **4.1.3 Salema, S. A.**

Salema (2008) procurou avaliar a ocorrência de sinergias entre combustíveis, durante a co-combustão de carvão e combustíveis derivados de biomassa (CDB) em leito fluidizado, com potenciais impactos nas emissões atmosféricas de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, Dioxinas e Furanos e Material Particulado (MP) (granulometria e quantidade total emitida). Foram feitos cinco ensaios em um reator de leito fluidizado borbulhante. Os ensaios realizados incluíram, para além da combustão de pellets de palha; farinhas de carne e osso; lamas residuais urbanas; bagaço de azeitona; pellets de madeira, a sua co-combustão em misturas com percentagens mássicas de biomassa de 5%, 15% e 25%. Foram identificadas algumas situações em que as emissões dos poluentes em estudo diminuíram durante a co-combustão. Os seguintes mecanismos aparentaram as seguintes tendências: o aumento da eficiência na conversão de carbono e a conseqüente diminuição da presença deste elemento nas cinzas acumuladas nos ciclones (CO); a conjugação de mecanismos de redução associados aos dois combustíveis em causa (NO<sub>x</sub>); a presença de elementos alcalinos, cloro e a sua disponibilidade nos combustíveis (SO<sub>2</sub>); a produção de menores quantidades de material não queimado e o aumento dos diâmetros médios das cinzas (MP); a relação entre o Cl presente nos combustíveis e a presença de S sob a forma de SO<sub>2</sub> no reator, a quantidade e granulometria do MP emitido e a natureza dos combustíveis utilizados. Os resultados obtidos demonstraram que, embora a ocorrência de sinergias neste domínio seja fortemente dependente da especificidade das características físico-químicas dos combustíveis utilizados e da adequação dos parâmetros operacionais da mistura, a co-combustão de determinados tipos de biomassa e carvão em leito fluidizado pode constituir, por si só, um mecanismo válido na diminuição dos índices de emissão dos poluentes em estudo. O autor adotou um reator de seção quadrada com lado medindo 0,300 m, com altura de 0,500 m. Como material do leito utilizou areia de sílica com os seguintes diâmetros: d<sub>50</sub> = 330 μm; d<sub>90</sub> = 480 μm; d<sub>10</sub> = 220 μm.

### **4.1.4 Andrade, R. V.**

A tese de doutorado de Andrade (2007) teve como objetivo o estudo comparativo da gaseificação de biomassa em Bancada de Pesquisas de reatores em leito fixo e leito fluidizado, para desenvolver e aprimorar a tecnologia, promovendo melhorias nos seus projetos, bem como estudar a aplicação, do gás produzido, em motores de combustão interna e realizar a verificação da viabilidade econômica, da utilização desse gás, para geração de eletricidade em

pequena escala. Apresentou um estudo de formas inovadoras, do tratamento do gás, no que se refere à conversão do alcatrão através da avaliação de gaseificadores de duplo estágio de gaseificação e reatores de reforma catalítica. Foi utilizado um leito fluidizado com diâmetro interno de 0,407 m, com altura de 2,660 m, 0,500 m de altura de óxido de alumínio como inerte constituinte do leito. O autor recomenda tentar operação com leitos com alturas superiores a 0,500 m, de forma a verificar a possibilidade do aumento da eficiência do processo.

#### **4.1.5 Figueiredo, F.A.B.**

Figueiredo (2009) verificou que os processos de gaseificação e pirólise sofrem grande influência do tipo de biomassa que está sendo utilizada, propiciando variações na distribuição dos produtos (alcatrão, cinzas, água, gás). No processo de gaseificação é obtido, principalmente, um gás combustível que pode variar seu poder calorífico de acordo com as temperaturas e agentes gaseificantes utilizados. A biomassa utilizada em sua pesquisa foi a casca de castanha de caju. Através da conversão térmica da biomassa nos processos de gaseificação e pirólise foi quantificada a produção de resíduo carbonoso, alcatrão, água e gás variando a taxa de aquecimento, a temperatura final e o agente gaseificante (vapor de água, ar sintético ou nitrogênio). Foi verificado que a utilização de vapor de água (1,21 g/min) propicia a geração de um gás de síntese com grande quantidade de hidrogênio (0,99 g) e dióxido de carbono (12,06 g) e para a produção de gás combustível a pirólise com nitrogênio sem a presença de vapor apresenta um gás combustível com poder calorífico mais alto (13056 kJ/m<sup>3</sup>).

#### **4.1.6 Análise Sobre os Autores**

Analisando o que foi estudado pelos autores acima citados, pôde-se organizar a metodologia para realização da presente Dissertação de Mestrado, apesar de não terem sido investigados os aspectos específicos que caracterizam essa pesquisa. A não cobertura desses aspectos por esses autores referidos confirmam o caráter inovador deste trabalho.

Dentre esses estudos citados, o trabalho de autoria de Carolina M. de Rezende e Kátia Tannous (Rezende e Tannous, 2009) foi escolhido como uma das principais referências para nortear o desenvolvimento desta pesquisa, embora essas autoras tenham feito estudo fluidodinâmico usando duas granulometrias de biomassa, e tenha variado as concentrações. Em seu estudo não foi analisada a influencia da variação da granulometria do material

constituente do leito (areia de sílica) e nem a influência da variação da massa de areia e do diâmetro do leito sobre o processo de fluidização.

Outro trabalho que foi também tomado como referência foi o de autoria de Souza (Souza, 1978). Seu estudo pôde servir como referência para estabelecimento do procedimento experimental e forma construtiva da bancada de pesquisa. Também, tem-se valores experimentais para comparar com os obtidos neste trabalho.

Os trabalhos dos autores Salema e Andrade, assim como os demais, serviram como fonte de embasamento teórico para este trabalho e para realização de um anteprojeto de um reator de gaseificação, a partir dos parâmetros a serem definidos com essa pesquisa.

## **4.2 - Planejamento da Pesquisa**

O planejamento da pesquisa foi direcionado ao estudo dos fenômenos fluidodinâmicos em leito de areia de sílica fluidizado com escoamento de ar. A primeira etapa da pesquisa se destinou a observar a influência da granulometria da areia de sílica sobre os fenômenos fluidodinâmicos no leito, o que inclui: o processo de expansão do leito, a variação de pressão ao longo comprimento do leito, a velocidade mínima de fluidização, o processo de formação de bolhas ao longo do leito, a característica do movimento do leito, dentre outros. Na estruturação da metodologia de pesquisa, foram planejados experimentos a serem realizados com dois diâmetros diferentes, para identificar a influência da parede sobre o escoamento no leito, além dos parâmetros de operação mencionados. Em um segundo momento, o estudo foi dedicado a analisar a influência da biomassa (C.C.C.) na fluidodinâmica do leito, a qual foi adicionada em concentrações específicas para manter uma razão de equivalência adequada à combustão de partículas sólidas em leito fluidizado. As concentrações de biomassa foram calculadas a partir de razão de equivalência utilizadas em queimadores convencionais, segundo estudo de um dos autores utilizados como referência, Figueiredo et al., (2009) e utilizando os resultados experimentais obtidos nos estudos do leito homogêneo de areia, em termos de vazões de ar apropriados às condições de mínima fluidização e as de regime borbulhante.

A pesquisa de fato se inicia depois de concluída a montagem do aparato experimental, além da obtenção de uma areia de sílica homogênea, livre de matéria orgânica e demais resíduos. Para isso, ela foi submetida a processos de lavagem, secagem/desumidificação, classificação (moagem, peneiramento) e finalmente armazenagem em três faixas distintas de granulometria. Quanto à casca da castanha de caju, a qual foi

conseguida com uma empresa cearense (exportadora) de beneficiamento de castanha de caju, passou pelos processos de trituração, peneiramento e armazenagem, para manter duas faixas de granulometria.

A classificação da areia pela granulometria foi feita seguindo algumas etapas fundamentais de planejamento. Primeiramente, foi dada uma atenção especial à obtenção da areia, que no caso a ideia foi utilizar algo natural das praias da região, acompanhada de uma análise seletiva quanto a concentração de impurezas (resíduos orgânicos, dentre outros). Seguindo nesse processo de classificação, foi planejada a preparação da areia para manter uma uniformidade média em termos de diâmetro de partícula que caracterizasse as granulometrias-padrão escolhidas para estudo, em função dos objetivos traçados para o estudo. Essa caracterização de granulometrias contou com os trabalhos de moagem e peneiração controlada para manter as partículas dentro de faixas desejadas, tomando o devido cuidado com a questão da umidade contida nas amostras.

Para a manipulação da areia nas tarefas de preenchimento do leito foi previsto o uso de recipientes de condicionamento da areia tratada e pré-classificada para manter um padrão de controle de qualidade na pesquisa. Inclusive, o planejamento prevê análise microscópica de amostras dessas areias classificadas, para verificação das propriedades físicas, como esfericidade, arredondamento, dentre outras.

Objetivamente, foi previsto realizar a pesquisa em três faixas de granulometrias de interesse, quais sejam: i) areia de praia "bruta" sem qualquer tratamento mecânico da partícula, equivalente ao diâmetro médio da partícula de 546,611  $\mu\text{m}$ ; ii) 45-50 mesh, equivalente ao diâmetro médio da partícula de 321,023  $\mu\text{m}$ , a qual é a faixa que tem sido mais empregada nas pesquisas com leito fluidizado, inclusive com adição de biomassa; e iii) 170-200 mesh, que é uma granulometria correspondente ao pó, equivalente ao diâmetro médio da partícula de 72,432  $\mu\text{m}$  que segundo a investigação bibliográfica não se descobriu qualquer trabalho com partículas nessa dimensão. Com esse planejamento, acredita-se que está sendo coberta uma grande variedade de possibilidades de condições, variando os diâmetros das partículas, o comprimento e o diâmetro da coluna do leito e o tamanho da partícula de biomassa.

Neste contexto, o planejamento de experimento adotado contemplou a preparação da casca de castanha de caju (C.C.C.) com trituração industrial e peneiramento para duas faixas de granulometrias: 14-20 e 20-45 mesh (norma ASTM). O objetivo principal é ver o melhor desempenho no processo de arraste da biomassa pelo escoamento de ar dentro do

leito, o que caracteriza a velocidade de difusão. Esse dado é de grande importância para compatibilizar a taxa de queima com o suprimento de biomassa ao reator (gaseificador).

Em todos os experimentos foram registrados em planilhas apropriadas, em Tabelas elaboradas especificamente para coleta dos dados em cada experimento. A massa registrada para cada cota é usada no cálculo teórico da queda de pressão, que é confrontado com o valor obtido experimentalmente. Mostra-se abaixo a Tabela 2, utilizada como documento padrão para coleta de dados, que foi preenchida para se obter a curva fluidodinâmica, em função da cota e diâmetro. A quantidade de informações a serem coletadas aumenta conforme se aumenta a cota de areia em estudo, em função do maior número de sensores ao longo do leito, o que determina a quantidade de dados para cada vazão.

Para demonstrar a quantidade de informações a serem coletadas, a Tabela 3 conjuga, de forma integrada, todos os dados coletados dos manômetros em "U" em cada ponto ao longo da coluna (cotas) e na base, como também os dados de um sensor piezoresistivo neste mesmo local. Assim, pode-se obter os perfis fluidodinâmicos para todas as cotas de estudo, o que gera um enorme volume de dados experimentais, em função das cotas e dos diâmetros estudados.

Durante os testes, com o auxílio de um computador, foram registrados todos os dados e observações de cada teste. Uma vez que finalizados os testes na bancada de pesquisa, foi redigido um relatório sobre tudo o que foi observado durante os experimentos. Em sequência, os dados obtidos foram trabalhados gerando gráficos, para melhor análise das informações desta pesquisa. Após a análise dos gráficos, foram comparadas as informações obtidas experimentalmente com os valores esperados pelos cálculos teóricos.

**Tabela 2 – Planilha de Experimento por Faixa Granulométrica**

DIÂM.(mm)	GRANUL.(#/μm)	COTA(mm):	75	MASSA(g):	185	P <sub>0</sub> (bar):		DATA:	22/6/2012	HORA:	11:00	11:55		
44	20	546,61	T <sub>IN</sub> (°C):	24.0	T <sub>OUT</sub> (°C):	25.0	ΔT(°C):	1.0	A <sub>s</sub> (m <sup>2</sup> )	0.0064	DURAÇÃO:	00:55		
ROTÂMETRO	LEITO					MANÔMETRO "U"		LEITO			MANÔMETRO "U"		MANÔMETRO "U"	
	IDA					IDA (P <sub>0</sub> )		IDA			VOLTA (P <sub>0</sub> )		IDA	VOLTA
Q(SCFH):	Q(m <sup>3</sup> /s):	LEIT.(mm)	H(mm)	ΔH(mm)	ΔP(mmH <sub>2</sub> O)	ΔP(bar)	LEIT.(mm)	H(mm)	ΔH(mm)	ΔP(mmH <sub>2</sub> O)	ΔP(bar)	P1(mmH <sub>2</sub> O)	P1(mmH <sub>2</sub> O)	
0	0.00000	925	75	0	0	0.0000	921	79	4	0	0.0000	0	0	
10	0.00008	925	75	0	59	0.0058	921	79	4	42	0.0041	0	0	
15	0.00012	925	75	0	99	0.0097	921	79	4	59	0.0058	0	0	
20	0.00016	924	76	1	110	0.0108	920	80	5	80	0.0078	0	0	
25	0.00020	921	79	4	101	0.0099	920	80	5	96	0.0094	0	0	
30	0.00024	918	82	7	101	0.0099	919	81	6	100	0.0098	0	0	
35	0.00028	914	86	11	100	0.0098	912	88	13	100	0.0098	0	0	
40	0.00031	911	89	14	99	0.0097	910	90	15	101	0.0099	0	0	
45	0.00035	906	94	19	101	0.0099	905	95	20	102	0.0100	0	0	
50	0.00039	902	98	23	102	0.0100	900	100	25	103	0.0101	1	2	
55	0.00043	892	108	33	103	0.0101	892	108	33	103	0.0101	2	2	

Tabela 3 – Planilha de Experimento Integrada por Faixa Granulométrica

DIAM. EXPER.	GRANUL.( $\mu$ m)		COTA(mm): 425		MASSA(g): 4295		P <sub>0</sub> (bar): 0.9410		DATA: 11/6/2012		HORA 12:37:00 16:52:00 04:15																										
90	45	546,61	T <sub>in</sub> (°C): 24.0		T <sub>out</sub> (°C): 25.0		$\Delta T$ (°C): 1.0		A <sub>g</sub> (m <sup>2</sup> ): 0.0064																												
ROTÁMETRO	SENSOR KISTLER								ERRO	SENSOR KISTLER								ERRO	MANÔMETRO "U"																		
	IDA									VOLTA									MANÔMETRO "U" VOLTA					IDA					VOLTA								
Q(SCFH):	Q(m <sup>3</sup> /s):	P(bar)	$\Delta P$ (bar)	$\Delta P$ (mmca)	LEIT.(mm)	H(mm)	$\Delta H$ (mm)	$\Delta P$ (mmca)	$\Delta P$ (bar)	P(bar)	$\Delta P$ (bar)	$\Delta P$ (mmca)	LEIT.(mm)	H(mm)	$\Delta H$ (mm)	$\Delta P$ (mmca)	$\Delta P$ (bar)	P1(mmca)	P2(mmca)	P3(mmca)	P4(mmca)	P5(mmca)	P6(mmca)	P7(mmca)	P8(mmca)	P9(mmca)	P1(mmca)	P2(mmca)	P3(mmca)	P4(mmca)	P5(mmca)	P6(mmca)	P7(mmca)	P8(mmca)	P9(mmca)		
0	0.00000	0.9410	0.0000	0	575	425	0	0	0	0.0000	0.9410	0.000	0	546	454	29	0	0.0000	0.0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0.00008	0.9510	0.0100	102	575	425	0	103	0.01010	-0.00010	0.9500	0.009	92	546	454	29	91	0.0089	0.00008	99	74	68	54	42	25	6	0	0	54	29	37	24	22	16	3	0	0
15	0.00012	0.9560	0.0150	153	575	425	0	156	0.01530	-0.00030	0.9530	0.012	122	545	455	30	127	0.0125	-0.00045	155	125	114	92	70	38	9	0	76	44	56	37	34	24	5	0	0	
20	0.00016	0.9620	0.0210	214	575	425	0	216	0.02118	-0.00018	0.9570	0.016	163	545	455	30	163	0.0160	0.00002	193	154	142	113	87	50	12	0	0	112	63	82	52	47	32	6	0	0
25	0.00020	0.9695	0.0285	291	575	425	0	295	0.02893	-0.00043	0.9635	0.023	229	545	455	30	251	0.0246	-0.00211	235	188	174	140	105	60	14	0	0	133	74	98	62	58	38	8	0	0
30	0.00024	0.9760	0.0350	357	575	425	0	353	0.03462	0.00038	0.9645	0.024	240	545	455	30	258	0.0253	-0.00180	292	234	216	173	130	75	17	0	0	170	96	124	79	71	48	9	0	0
35	0.00028	0.9820	0.0410	418	575	425	0	407	0.03991	0.00109	0.9665	0.026	260	544	456	31	277	0.0272	-0.00166	349	278	259	208	155	90	20	0	0	191	108	139	88	81	53	10	0	0
40	0.00031	0.9885	0.0485	464	575	425	0	460	0.04511	0.00039	0.9740	0.033	337	544	456	31	328	0.0322	0.00083	425	336	315	251	186	105	21	0	0	218	124	158	103	93	62	12	0	0
45	0.00035	0.9925	0.0515	525	573	427	2	519	0.05090	0.00060	0.9800	0.039	398	544	456	31	370	0.0363	0.00272	458	359	333	262	190	102	22	0	0	291	137	175	113	103	70	13	0	0
50	0.00039	0.9970	0.0560	571	572	428	3	564	0.05531	0.00069	0.9830	0.042	428	544	456	31	412	0.0404	0.00160	475	371	340	264	191	102	22	0	0	274	157	197	127	115	78	15	0	0
55	0.00043	1.0025	0.0615	627	569	431	6	616	0.06041	0.00109	0.9855	0.045	454	543	457	32	444	0.0435	0.00096	494	386	351	266	188	108	26	0	0	307	178	233	143	130	87	16	0	0
60	0.00047	1.0050	0.0640	653	565	435	10	645	0.06325	0.00075	0.9915	0.051	515	543	457	32	493	0.0483	0.00215	493	372	330	243	170	98	25	0	0	333	194	243	157	140	95	17	0	0
65	0.00051	1.0085	0.0675	688	555	445	20	683	0.06698	0.00052	0.9930	0.052	530	543	457	32	520	0.0510	0.00101	440	336	312	235	167	101	29	0	0	349	204	251	163	146	97	18	0	0
70	0.00055	1.0125	0.0715	729	534	446	21	721	0.07071	0.00079	0.9980	0.057	581	542	458	33	562	0.0551	0.00189	485	362	336	252	180	108	30	0	0	355	205	285	164	144	98	19	0	0
75	0.00059	1.0045	0.0635	648	546	454	29	645	0.06325	0.00025	1.0000	0.059	602	541	459	34	590	0.0579	0.00114	477	347	331	250	185	116	34	0	0	401	233	289	187	165	112	21	1	0
80	0.00063	1.0080	0.0670	683	543	457	32	688	0.06747	-0.00047	1.0030	0.062	632	540	460	35	623	0.0611	0.00090	504	369	348	267	204	124	37	1	0	443	260	315	208	183	124	23	1	0
85	0.00067	1.0045	0.0635	648	534	466	41	642	0.06296	0.00054	1.0035	0.063	637	534	466	41	632	0.0620	0.00052	512	373	364	269	216	142	41	3	0	449	265	320	209	185	124	24	2	0
90	0.00071	1.0055	0.0645	658	525	475	50	654	0.06414	0.00036	1.0040	0.063	642	537	463	38	638	0.0626	0.00043	516	367	339	283	234	152	44	14	0	490	289	350	223	202	130	23	3	0
95	0.00075	1.0060	0.0650	663	518	482	57	667	0.06541	-0.00041	1.0045	0.064	648	536	464	39	640	0.0628	0.00074	520	365	363	287	235	155	40	21	0	497	290	397	227	200	137	26	4	0
100	0.00079	1.0055	0.0645	658	513	487	62	654	0.06414	0.00036	1.0045	0.064	648	535	465	40	642	0.0630	0.00054	523	366	354	286	238	160	40	16	0	506	295	354	231	208	142	28	5	0
105	0.00083	1.0055	0.0645	658	508	492	67	654	0.06414	0.00036	1.0045	0.064	648	523	477	52	645	0.0633	0.00025	523	373	363	294	247	161	42	35	0	516	310	381	249	220	153	30	10	0
110	0.00087	1.0050	0.0640	653	502	498	73	652	0.06394	0.00006	1.0050	0.064	653	509	491	66	648	0.0635	0.00045	530	375	368	286	249	166	51	40	0	525	319	390	255	227	164	35	25	0
115	0.00090	1.0055	0.0645	658	497	503	78	655	0.06423	0.00027	1.0050	0.064	653	502	498	73	652	0.0639	0.00006	530	376	367	306	256	165	47	46	0	529	324	396	261	232	168	38	38	0
120	0.00094	1.0050	0.0640	653	488	512	87	654	0.06414	-0.00014	1.0050	0.064	653	493	507	82	658	0.0645	-0.00053	535	380	372	305	256	180	55	50	1	537	329	401	266	240	171	41	44	0
125	0.00098	1.0060	0.0650	663	480	520	95	660	0.06472	0.00028	1.0050	0.064	653	478	522	97	664	0.0651	-0.00112	548	383	380	310	260	176	53	55	3	541	336	406	274	244	178	47	46	1
130	0.00102	1.0055	0.0645	658	472	528	103	662	0.06492	-0.00042	1.0055	0.065	658	460	540	115	667	0.0654	-0.00091	550	395	401	320	270	187	55	70	3	555	346	421	300	254	187	58	69	2
135	0.00106	1.0055	0.0645	658	465	535	110	660	0.06472	-0.00022	1.0055	0.065	658	455	545	120	672	0.0659	-0.00140	565	435	440	340	290	215	90	85	5	563	347	427	303	269	202	75	80	2
140	0.00110	1.0060	0.0650	663	455	545	120	671	0.06580	-0.00080	1.0060	0.065	663	448	552	127	676	0.0663	-0.00129	585	406	423	312	275	190	70	75	6	570	353	443	308	275	208	66	85	3
145	0.00114	1.0060	0.0650	663	442	558	133	663	0.06502	-0.00002	1.0060	0.065	663	440	560	135	678	0.0665	-0.00149	580	400	465	330	290	230	79	100	8	570	357	453	329	275	220	76	98	4
150	0.00118	1.0065	0.0655	668	430	570	145	675	0.06619	-0.00069	1.0065	0.066	668	430	570	145	680	0.0667	-0.00119	585	400	460	350	295	240	85	102	10	580	367	454	329	281	217	84	100	5
155	0.00122	1.0065	0.0655	668	425	575	150	678	0.06649	-0.00099	1.0065	0.066	668	425	575	150	681	0.0668	-0.00128	575	470	485	364	300	230	75	110	11	585	373	470	335	308	233	86	110	7
160	0.00126	1.0060	0.0650	663	410	590	165	675	0.06619	-0.00119	1.0070	0.066	673	410	590	165	687	0.0674	-0.00137	590	455	475	345	300	255	77	120	16	590	388	500	345	303	270	103	120	8
165	0.00130	1.0070	0.0660	673	405	595	170	691	0.06776	-0.00176	1.0070	0.066	673	405	595	170	690	0.0677	-0.00167	625	440	530	355	315	240	110	150	17	595	395	510	375	303	245	105	140	13
170	0.00134	1.0075	0.0665	678	400	600	175	697	0.06835	-0.00185	1.0070	0.066	673	395	605	180	690	0.0677	-0.00167	630	438	520	370	325	260	110	155	18	600	405	515	370	315	250	115	145	15
175	0.00138	1.0075	0.0665	678	395	605	180	697	0.06835	-0.00185	1.0075	0.067	678	388	612	187	697	0.0684	-0.00185	645	460	520	380	330	275	120	180	20	600	425	525	376	340	275	125	150	18
180	0.00142	1.0075	0.0665	678																																	

## 4.3 Análise Teórica da Fluidodinâmica

### 4.3.1 Determinação de Parâmetros de Operação Segundo Geldart

A perda de carga no leito fluidizado na cota 0,0 m (após o distribuidor ou placa de orifício), em cm de coluna de água, pode ser calculada, segundo Geldart (1986), por:

$$\Delta P = \frac{0,1M}{A} \quad (4.1)$$

Onde M é a massa do elemento que compõe o leito e A representa a área transversal do leito. Segundo Hetsroni (1982), a perda de carga no leito, nas condições de mínima fluidização, é dada por:

$$\frac{\Delta p_{mf}}{H_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_f)g \quad (4.2)$$

Onde:

$\varepsilon_{mf}$  - porosidade do material do leito nas condições de mínima fluidização;

$H_{mf}$  - Altura mínima do leito nas condições de mínima fluidização.

A porosidade nas condições de mínima fluidização é uma função da esfericidade da partícula do leito a qual foi relacionada por Wen e Yu como segue:

$$\varepsilon \approx (14\phi_s)^{-1/3} \quad (4.3)$$

$$\phi_s = \frac{\text{área de esfera a volume equivalente}}{\text{área real}} \quad (4.4)$$

Para a maioria dos sistemas  $0,40 < \varepsilon_{mf} < 0,55$

A porosidade de mínima fluidização também pode ser obtida pela seguinte relação empírica ( $50 < d_p < 500 \mu\text{m}$ ):

$$\varepsilon_{mf} = 1 - 0,356(\log d_p - 1) \quad (4.5)$$

A queda de pressão em um leito fixo (estacionário) de partículas não esféricas, mas de tamanhos iguais pode ser obtida pela equação de Ergun (1952):

$$\Delta P = 150 \frac{\mu H_{mf} u_{mf}}{d_p^2} \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} + 1,75 \frac{H_{mf} u_{mf}^2 \rho}{d_p^2} \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}} \quad (4.6)$$

Sendo  $Re_p$  o número de Reynolds da partícula, nas condições de mínima fluidização

$$Re_{pmf} = \frac{d_p u_{mf} \rho_f}{\mu} \quad (4.7)$$

Para regimes Laminares ( $Re_{pmf} < 10$ ):

$$\frac{\Delta P}{H_{mf}} = 150 \frac{\mu u_{mf}}{d_p^2} \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \quad (4.8)$$

E igualando à equação 4.2 tem-se uma equação para velocidade de mínima fluidização para partículas muito finas e  $Re_{pmf} < 20$ .

$$u_{mf} = \frac{g (\rho_s - \rho_f) d_p^2 \varepsilon_{mf}^3 \phi^2}{150 \mu (1 - \varepsilon_{mf})} \quad (4.9)$$

Para partículas muito grandes e valores de  $Re_{pmf} > 1000$ :

$$u_{mf} = \sqrt{\frac{d_p (\rho_s - \rho_f) g \varepsilon_{mf}^3}{1,75 \rho_f}} \quad (4.10)$$

Igualando as equações 4.2 e 4.6, tem-se:

$$150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi^2} \frac{d_p u_{mf} \rho_f}{\mu} + \frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi} \left( \frac{d_p u_{mf} \rho_f}{\mu} \right)^2 = \frac{d_p \rho_f (\rho_s - \rho_f) g}{\mu^2} \quad (4.11)$$

Sendo também,

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g}{\mu_f^2} \quad (4.12)$$

$$C_1 = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi^2} \quad (4.13)$$

$$C_2 = \frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi} \quad (4.14)$$

A equação 4.11 fica:

$$C_1 \text{Re}_{pmf} + C_2 (\text{Re}_{pmf})^2 = Ar \quad (4.15)$$

Resolvendo a Equação 4.15, tem-se que:

$$\text{Re}_{pmf} = \left( \left[ \frac{C_1}{2C_2} \right]^2 + \frac{1}{C_2} Ar \right)^{1/2} - \frac{C_1}{2C_2} \quad (4.16)$$

Se  $K_1 = \frac{C_1}{2C_2}$  e  $K_2 = \frac{1}{C_2}$  conduz a uma equação que pode estimar a velocidade de

mínima fluidização com boa aproximação quando não se dispõe do valor da porosidade.

$$\text{Re}_{pmf} = \left[ K_1^2 + K_2 Ar \right]^{1/2} - K_1 \quad (4.17)$$

Wen e Yu, Segundo Kunii (1991), foram os primeiros a notar que  $C_1$  e  $C_2$  permaneciam praticamente constantes para diferentes tipos de partículas para uma grande faixa de condições ( $\text{Re}_{pmf} = 0,001$  a 4000).

Para partículas finas Wen e Yu (1966) obtiveram como valor das constantes  $C_1 = 33,7$  e  $C_2 = 0,0408$ , Kunii (1991). Para partículas grossas Chitester (1984) recomenda os seguintes valores  $C_1 = 28,7$  e  $C_2 = 0,0494$ , Kunii (1991). Segundo Hetsroni (1982), os valores mais adequados para  $C_1$  e  $C_2$ , são 27,2 e 0,0408 respectivamente. A Tabela 4 apresenta valores de  $K_1$  e  $K_2$ , obtidos por diferentes pesquisadores.

**Tabela 4 – Tabela com valores de  $K_1$  e  $K_2$  obtidos por diferentes pesquisadores.**

Pesquisadores	$K_1$	$K_2$
	$C_2/2C_1$	$1/C_1$
Wen and Yu (1966)	33,7	0,0408
Richardson (1971)	25,7	0,0365
Saxena and Vogel (1977) Dolomita a alta temperatura e pressão	25,3	0,0571
Babu et al. (1978)	25,3	0,0651
Grace (1982)	27,2	0,0408
Chitester et al. (1984)	28,7	0,0494

**FONTE: (Kunii, 1991).**

Outro parâmetro importante para o dimensionamento de um reator de leito fluidizado é a velocidade terminal denotada por  $u_t$ , que é a velocidade a partir da qual as partículas que compõem o leito podem ser arrastadas.

$$u_t = \left[ \frac{4d_p (\rho_s - \rho_f) g}{3\rho_f C_D} \right]^{1/2} \quad (4.18)$$

Onde  $C_D$  (Coeficiente de arrasto), é dado por:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \left[ 1 + (8,1716e^{-4,0655\phi}) Re_p^{0,0964+0,5565\phi} \right] + \frac{73,69e^{-5,0748\phi} Re_p}{Re_p + 5,378e^{6,2122\phi}} \quad (4.19)$$

Se as partículas forem consideradas esféricas,  $\phi = 1$ :

$$C_D = \frac{24}{Re_p} + 3,3643 Re_p^{0,3471} + \frac{0,4607 Re_p}{Re_p + 2682,5} \quad (4.20)$$

### 4.3.2 - Avaliação de Velocidades (Superficial Mínima e Terminal)

A velocidade superficial do leito ( $u_0$ ) é definida como sendo a velocidade do fluido no experimento estando o mesmo vazio (Andrade, 2007).

Sabendo-se o diâmetro interno do experimento em metros e tendo-se o valor da vazão nas condições normais é possível calcular a velocidade superficial do leito ( $u_0$ ):

$$u_0 = \frac{Q_0}{A} = \frac{Q_0}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} \quad (4.21)$$

Durante os testes nos experimentos fluidodinâmicos pode ser observada a vazão em que ocorre o colapso do leito em m<sup>3</sup>/h. Pode-se então considerar que a velocidade de mínima fluidização ocorre para essa condição de vazão.

Seguindo o procedimento anteriormente descrito, obtêm-se o valor da vazão nas condições normais em m<sup>3</sup>/h, para a qual pode ser calculada a velocidade mínima de fluidização expressa em m/s. A partir desses valores será possível calcular o número de Reynolds para a condição de mínima fluidização:

$$Re_{mf} = \frac{d_p \cdot u_{mf} \cdot \rho_{ar}}{\mu_{ar}} \quad (4.22)$$

Com os valores da densidade do ar, viscosidade e diâmetro da partícula, respectivamente, o número de Reynolds pode ser calculado.

De posse desses dados é possível calcular valores para as constantes K1 e K2 da equação 4.17 para a condição de operação estudada (Andrade, 2007).

$$Re_{mf} = (K_1^2 + K_2 Ar)^{1/2} - K_1 \quad (4.23)$$

Pode-se também estimar a velocidade terminal ( $u_t$ ), onde foi considerado o Número de Reynolds de mínima fluidização, baseado em (Andrade, 2007).

$$u_t = \left[ \frac{4d_p (\rho_s - \rho_f) g}{3\rho_f C_D} \right]^{1/2} \quad (4.24)$$

Usando a equação 4.5 para o cálculo da porosidade de mínima fluidização (Andrade, 2007), calcula-se a velocidade mínima de fluidização pela equação 4.9, equação simplificada de Ergun (1952):

Calculando-se a velocidade de mínima fluidização pela equação 4.17 e utilizando as constantes de Wen e Yu (Andrade, 2007), tem-se:

$$\text{Re}_{mf} = \left( K_1^2 + K_2 Ar \right)^{1/2} - K_1 \quad (4.25)$$

Se o valor obtido, utilizando-se as constantes sugeridas por Wen e Yu, não apresentar uma boa aproximação ao resultado esperado, será aplicada a equação simplificada de Ergun (1952) (Equação 4.9).

### 4.3.3 Influência do Regime do Leito

É importante se certificar em qual dos estados de fluidização encontra-se o sistema para validar os cálculos, segundo a equação 4.26 (Wilhelm e Kwauk, 1948) em Kunii e Levenspiel (1979), através do número de Froude,

$$\text{Fr}_{mf} = \frac{u_{mf}^2}{d_p g} \quad (4.26)$$

Se  $\text{Fr}_{mf} < 0.13$  – fluidização uniforme

Se  $\text{Fr}_{mf} > 0.13$  – fluidização borbulhante;

O valor obtido de  $\text{Fr}_{mf}$  indica que a fluidização é borbulhante ou uniforme.

Romero e Johnson (1962) propõem a equação 4.27,

$$(Fr_{mf})(Re_{mf}) \left( \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right) \left( \frac{L_{mf}}{D_L} \right) \quad (4.27)$$

Se  $< 100$ , uniforme ou particulada

Se  $> 100$ , borbulhante ou agregativa

Romero e Johnson (1962) sugeriram quatro grupos adimensionais para caracterizar a qualidade da fluidização: o número de Froude ( $Fr_{mf}$ ) na condição de, o número de Reynolds na mínima fluidização ( $Re_{mf}$ ), o número de massa volumétrica,  $Mv = (\rho_s - \rho_f) / \rho_f$  e o comprimento equivalente do leito na mínima fluidização,  $L_{mf} / D$ .

#### 4.3.4 Influência da inserção de Biomassa

Para efeito de desenvolvimento de um reator de leito fluidizado para queima da casca de castanha de caju, foi necessário estimar as concentrações adequadas à combustão, de forma estável, tendo como base as vazões de ar fundamentais à condição de fluidização e arraste da biomassa dentro do leito. Como esta Dissertação de Mestrado tem como foco o desenvolvimento de um reator de gaseificação de baixo custo operacional, foi dada ênfase, nessa análise de influência da presença da C.C.C. no leito, ao fato de ser vantajosa economicamente (sem mencionar a praticidade) a possibilidade de utilizar a areia de praia bruta, ou seja, sem qualquer tratamento prévio de moagem e peneiramento, embora com a preocupação de retirar partículas de outra natureza.

Primeiramente, foi feito um levantamento bibliográfico de pesquisas correlatas na área, em que os autores tentaram obter experimentalmente alguns parâmetros de projeto e operação utilizando o mesmo tipo de biomassa e/ou biomassas semelhantes aplicadas ou não em leito fluidizado. Neste contexto, destacam-se os trabalhos realizados por Figueiredo (2009), que estudou a queima dessa biomassa em diferentes condições de razão de equivalência e de reagentes, experimentando processos de pirólise, gaseificação e combustão. Rezende e Tannous (2009), que estudaram a fluidodinâmica da casca de arroz em leitos de areia com granulometria na ordem de 358  $\mu\text{m}$ , aproximadamente, como foi comentado no início deste Capítulo.

Com base nos dados experimentais desses referidos autores, foi estabelecido um plano de estudo do leito fluidizado com adição da casca da castanha de caju, em que o objetivo principal foi conhecer os perfis de queda de pressão em função da concentração de

biomassa no leito, bem como fazer uma análise comparativa do processo no leito sem e com a inclusão da casca. Atenção foi dada a influência da castanha no perfil de coeficiente de atrito, considerando inclusive as variações de dimensões das partículas constituintes do leito e, também, quanto à dimensão da seção transversal do leito fluidizado.

Para efeito de demonstração da estimativa das concentrações ideais de C.C.C. no leito, foi escolhido o leito de diâmetro  $\phi = 0,090$  m, com uma altura de leito experimentada de 0,425 m, que foi um dos experimentos que inclui vários casos analisados de cotas inferiores, os quais foram bem caracterizados nessa Dissertação. A Tabela 5 apresenta os dados desse leito escolhido para estudo, onde contém os dados de cota e peso da massa constituinte do leito.

**Tabela 5 – Dados do Leito na condição de mínima fluidização para  $\phi = 0,090$  m e  $D_p = 546,61$   $\mu\text{m}$ .**

<b>DADOS OPERACIONAIS DO LEITO FLUIDIZADO</b>		
Hleito =	0,425	[m]
$V_{\text{min-fluid}}$ =	80	SCFH
Seção Transversal do Leito =	0,0063617	[m <sup>2</sup> ]
Volume do Leito =	0,0027037	[m <sup>3</sup> ]
Massa do Leito =	4,295	[kg]

Tomando como base os dados desse leito, foram estudadas as vazões de escoamento de ar no leito, a partir da velocidade correspondente à condição de mínima fluidização, que melhor apresentava uma força de arraste da partícula de C.C.C. ao longo do leito. A grande preocupação quanto a esse aspecto é a manutenção do processo de combustão de forma estável sem a ocorrência de apagamentos da chama, pela alimentação desordenada de combustível (C.C.C.), durante o processo. No Capítulo 5, são apresentados os experimentos que embasam essa análise e determinam a melhor condição de arraste da biomassa dentro do leito.

A partir desses experimentos, pôde-se perceber que a velocidade mínima de escoamento do ar dentro do leito, para permitir uma difusão da biomassa de forma relativamente homogênea e contínua, era da ordem de 20% além da velocidade mínima de fluidização. Entretanto, percebeu-se que o tempo de deslocamento dessa biomassa dentro do leito se apresentava extremamente lento, a ponto de poder comprometer a sustentabilidade da frente de chama. Por essa razão, decidiu-se por estudar uma velocidade de escoamento de ar superior, o suficiente para aumentar a velocidade de difusão da biomassa, mas que não compromettesse a estabilidade da reação. Como pode ser observado na Tabela 6, os valores de

escoamento de ar caracterizam acréscimos da ordem de 20 e 60% em relação à velocidade de mínima fluidização.

**Tabela 6 – Cálculo das Vazões de ar no Leito para as condições mínima de arraste e de regime borbulhante para  $\phi = 0,090$  m e  $D_p = 546,61$   $\mu\text{m}$ .**

<b>CÁLCULO DE VAZÃO DE AR NO LEITO</b>		<b>[SCFH]</b>	<b>[m<sup>3</sup>/s]</b>
$V_{\text{borb}} = V_{\text{mf}} + 20\% V_{\text{mf}}$	$V_{\text{az-Vol/ar}} =$	96	0.000755
$V_{\text{arrast}} = V_{\text{mf}} + 60\% V_{\text{mf}}$	$V_{\text{az-Vol/ar}} =$	128	0.001007
<b>Utilizando a Equação de Estado para Calcular a Vazão Massica</b>			
$v =$	$RT/p =$	0.861	[m <sup>3</sup> /kg]
$R =$	8,3145/PM		
$T =$	300		[K]
$p =$	100		[KPa]
$V_{\text{az-Mass/ar}} = V_{\text{az-Vol/v}} =$	0.000877011		[kg/s]
$V_{\text{az-Mass/ar}} = V_{\text{az-Vol/v}} =$	0.001169349		[kg/s]

A Tabela 7 apresenta o cálculo de taxa de injeção de casca de castanha, em que foi correlacionado cada condição de escoamento de ar com os valores experimentais de referência obtidos dos experimentos realizados por Figueiredo (2009) e Rezende e Tannous (2009) para  $\phi = 0,090$  m e  $D_p = 546,61$   $\mu\text{m}$ .

Ressalta-se o fato de que o autor Figueiredo (2009) recomenda uma mistura ultrapobre para queima da casca da castanha, em razão de equivalência da ordem de 28:1. Muito embora esse autor tenha trabalhado a combustão da C.C.C. em reatores convencionais, sem leito fluidizado, os dados de emissões foram de suma importância para determinar a mistura binária e, a partir daí, todos os cálculos e estudos experimentais do meio composto de CCC e areia foram realizados. A Tabela 7 mostra a determinação da taxa de alimentação de biomassa com base na razão de equivalência proposta por Figueiredo (2009).

Deve ser observado que os resultados apresentados nesta tabela, quanto a concentração coincidem com os valores de concentração praticados nos experimentos realizado por Rezende e Tannous (2009). Essa análise foi de grande valia para validar os experimentos realizados nesta Dissertação, fornecendo maiores garantias quanto a execução do anteprojeto do reator de gaseificação em desenvolvimento.

**Tabela 7 – Cálculo de taxa de injeção de biomassa (C.C.C.) com base em valores experimentais de referência (Figueiredo, 2009 e Rezende e Tannous, 2009) para  $\phi = 0,090$  m e  $D_p = 546,61$   $\mu$ m.**

Determinação da Taxa de Combustão e Concentração de CCC no Leito Baseado em Figueiredo								
Pesquisador	Vazão-Ar [kg/s]	Qt. CCC [kg]	Tempo-Comb.[s]	Vazão-CCC [kg/s]	(A/C)min	Razão-Taxas	Qt. CCC [kg]	[CCC]/[Areia] [%]
Figueiredo	0.000105833	0.015	4032	3.72024E-06	28.45	-	-	-
Patrick	0.000877011	-	-	3.08286E-05	-	8.287	0.124	2.8
Patrick	0.001169349	-	-	4.11048E-05	-	11.049	0.166	3.8

A Tabela 8 mostra o cálculo de difusão de casca de castanha de caju no leito para as condições mínimas de arraste e de regime borbulhante, os tempos de deslocamentos, 120 s e 90 s, utilizados foram encontrados a partir da inserção de uma pequena amostra desta biomassa no leito (na cota 0,150 m) e cronometrado o tempo em que as partículas alcançaram a superfície do leito.

**Tabela 8 – Cálculo de difusão de biomassa (C.C.C.) no leito para as condições mínima de arraste e de regime borbulhante para  $\phi = 0,090$  m e  $D_p = 546,61$   $\mu$ m.**

<b>DIFUSÃO DA BIOMASSA - ESCOAMENTO BORBULHANTE</b>			
Vaz-Vol/ar	Percurso-Leito =	0.275	[m]
96	Tempo-Desloc. =	120	[s]
	Vdif-ccc =	0.00229	[m/s]
<b>DIFUSÃO DA BIOMASSA - ESCOAMENTO DE ARRASTE</b>			
Vaz-Vol/ar	Percurso-Leito =	0.275	[m]
128	Tempo-Desloc. =	90	[s]
	Vdif-ccc =	0.00306	[m/s]

A Tabela 9 apresenta a relação entre a velocidade de escoamento do ar no leito e a velocidade de difusão da biomassa. É importante ressaltar que os valores encontrados para a velocidade de escoamento do ar dentro do leito que garantem uma boa condição de arraste da biomassa e são condizentes com os valores normalmente praticados em reatores constituídos de câmaras porosas de leito fixo, em que a faixa de operação para o regime de baixa velocidade de Filtração, segundo os princípios da Combustão em Meios Porosos, está inserido entre 0,25 a 1,0 m/s, segundo a classificação de Babkin (1993). Essa faixa de velocidade de escoamento da mistura ar-combustível tem sido largamente utilizada no Laboratório de Combustão em Energias Renováveis, em que tem sido comprovada grande estabilidade de reação nessa condição de escoamento para ampla faixa de razão de equivalência (Barcellos et al. (2011).

**Tabela 9 – Análise comparativa de velocidades do escoamento do ar no Leito e a velocidade de difusão para as condições mínima de arraste e de regime borbulhante para  $\phi = 0,090$  m e  $D_p = 546,61$   $\mu$ m.**

<b>CÁLCULO DA VELOCIDADE DO AR DENTRO DO LEITO FLUIDIZADO EM CADA CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO</b>					
<b>[SCFH]</b>	<b>[m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Área do Leito</b>	<b>Porosidade</b>	<b>Velocidade [m/s]</b>	<b>Vel.ar/Vel.ccc</b>
96	0.000755	0.00636	0.386	0.31	134.11
128	0.001007	0.00636	0.386	0.41	134.11

### 4.3.5 Influência da Geometria do Leito

Para o estudo da influência da geometria do leito é feita uma análise dimensional do escoamento no meio poroso com base no trabalho de Carneiro (1996).

Tomando-se como base a lei de *Darcy*, e considerando o escoamento unidirecional, isotérmico, e monofásico de líquidos newtonianos ou não-newtonianos independentes do tempo em meios porosos homogêneos.

$$v = \frac{k}{\mu} (\Delta p/l) \quad (4.28)$$

sendo  $k$  uma constante física que caracteriza o meio poroso, chamada de permeabilidade;  $v$  a velocidade média de filtração, referida à área total da seção transversal do maciço normal à direção do escoamento;  $\mu$  a viscosidade dinâmica do líquido,  $\Delta p/l$  o gradiente de pressão, incluída a consideração da ação da gravidade:

A dimensão de  $k$  é, portanto, a do quadrado de um comprimento

$$[k] = L^2$$

A aplicação desta lei pode ser generalizada para meios heterogêneos. Esse assunto é tratado em diversos trabalhos de G. Massarani (2002) e de G. Massarani com A. Silva Telles e C. Thirriot, publicados pela COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro.

A geometria interna do maciço pode assim ser definida pelo parâmetro  $k$ , determinado experimentalmente. O comprimento do maciço na direção do escoamento não é considerado, assim como no estudo do escoamento de líquidos em dutos fechados, o comprimento dos tubos não é considerado: o parâmetro gradiente de pressão  $\Delta p/l$  é a variável do problema, ao lado da velocidade  $v$ . A dimensão característica é portanto  $\sqrt{k}$ .

A permeabilidade  $k$  independe das propriedades do líquido, e geralmente admite-se que é somente função da geometria interna do meio poroso.

Costuma-se apresentar modelos teóricos baseados na porosidade  $\epsilon$  do maciço e na tortuosidade do percurso do líquido em seu interior. Assimilando o maciço poroso a expressão para o coeficiente  $k$ . O estudo desses modelos teóricos não é apresentado aqui, pois escapa ao domínio da análise dimensional.

Os referidos modelos teóricos aplicam-se ao caso de escoamento laminar. No estudo de escoamento a altas vazões, com ocorrência de turbulência, costuma-se adotar, além do fator de forma  $\epsilon$ , um número de Reynolds calculado com  $\sqrt{k}$  como dimensão representativa da geometria interna do maciço:

$$N_{Re.\sqrt{k}} = \frac{\sqrt{k}v\rho}{\mu} \quad (4.29)$$

Chega-se assim, com a marcha adotada anteriormente para o escoamento em dutos fechados, a uma expressão semelhante à do fator de fricção:

$$f_F = \frac{(\Delta p/l)\sqrt{k}}{2v\rho^2} = f(N_{Re.\sqrt{k},\epsilon}) \quad (4.30)$$

## 4.4 Aparato Experimental

### 4.4.1 Projeto e Construção da Bancada de Pesquisa

Os fenômenos fluidodinâmicos presentes ao processo de fluidização do leito de areia foram estudados experimentalmente em uma bancada de pesquisa, especialmente construída para esta Dissertação, que poderá ser usada futuramente como bancada de estudo de fluidização desta e de outras biomassas. Essa bancada foi desenvolvida a partir da necessidade de se obter a maior quantidade de parâmetros que auxiliem o desenvolvimento de um reator de gaseificação apropriado a biomassa de referência (casca da castanha de caju). Com base nos experimentos nessa bancada é possível estabelecer os controles dos fenômenos que podem ocorrer dentro de um reator, a partir do entendimento da movimentação das partículas e identificação dos parâmetros essenciais à determinação da eficiência do reator.

Neste contexto, devem ser identificados os parâmetros de importância para o desempenho do reator, tais como: diâmetro e altura ideais, velocidade mínima de fluidização, vazão, pressões, altura ideal de entrada de combustível, comparação entre materiais disponíveis para serem usados como leito fluidizado, dentre outros.

Para realização do estudo experimental do leito fluidizado foi desenvolvida uma bancada de pesquisa apropriada que permite o estudo do leito variando diâmetro e comprimento. A Figura 7 mostra parte dessa bancada, ou seja, uma estrutura metálica com os recipientes (material plástico transparente) cilíndricos constituintes dos leitos de estudo. O aparato experimental possui geometria semelhante ao que deverá ser empregado no anteprojeto do reator de gaseificação.

Inicialmente, a idéia foi de realizar experimentos com seus diâmetros seguindo uma razão de proporção de 0,050, 0,075 e 0,100 m (internamente), mas devido à dificuldade em se obter os cilindros, optou-se por importar tubos de acrílico de um fornecedor chinês, que apresentam diâmetros próximos aos esperados inicialmente. Foram adquiridos 03 (três) tubos de acrílico de espessura de parede de 0,005 m, com altura de 1,0 m, esses tubos estão diferenciados pelos seus diâmetros internos de 0,044 m, 0,069 m e 0,090 m, justificados pelo interesse em investigar a melhor relação L/D (comprimento/diâmetro). Ao longo da altura de cada um destes tubos foram instaladas réguas graduadas milimetricamente para se ler as cotas do leito com razoável precisão.

Para a parte inferior de cada tubo de acrílico foi fabricado e instalado um *plenum*, mostrado na Figura 8, que é a peça responsável em suportar o distribuidor com todo o leito sobre ele, fazendo o insuflamento do fluido de trabalho no leito. Esta peça foi confeccionada em nylon, com geometria interna cônica e modo a facilitar a distribuição do gás (fluido de trabalho) para a seção circular do tubo de acrílico, no caso, ar comprimido. Na sua extremidade inferior, foi colocada uma conexão para entrada de ar e esta peça também tem um rebaixo para receber a placa distribuidora de gás.

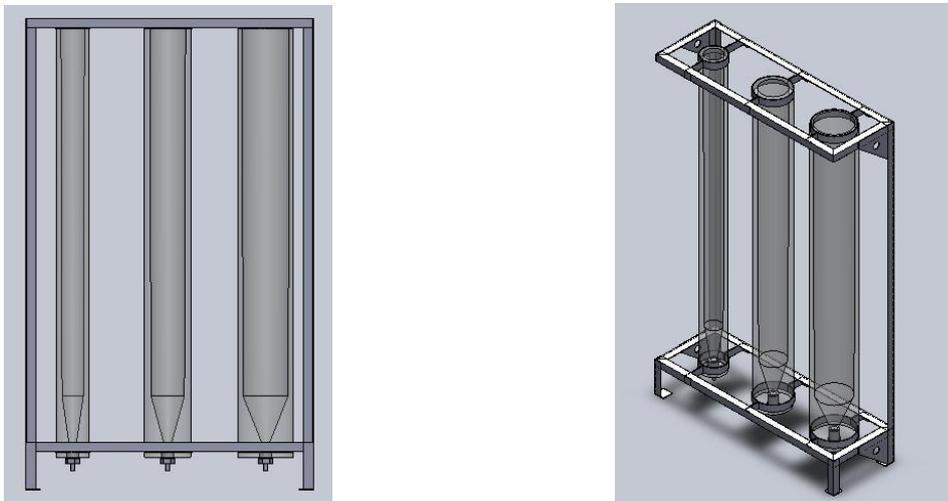
Entre o *plenum* e o tubo de acrílico, é fixada uma placa distribuidora constituída de um conjunto de telas metálicas de malha fina superpostas, constituindo discos (três) com essas telas em aço inox (opcionalmente, poderia ter sido uma placa de material sinterizado). Cada uma dessas telas possui malha reduzida (menor que 230 mesh), de tal forma que impeça que as partículas de areia constituintes do leito passem por ela. Esta placa distribuidora está localizada entre o tubo e o *plenum*, justamente na cota 0,0 m do leito.

Na parte superior de cada tubo de acrílico foram confeccionadas outras peças em nylon com intuito de conectar o tubo a uma tubulação para exaustão do ar e da areia/poeira que é arrastada com o escoamento, evitando risco para saúde dos pesquisadores. Esta

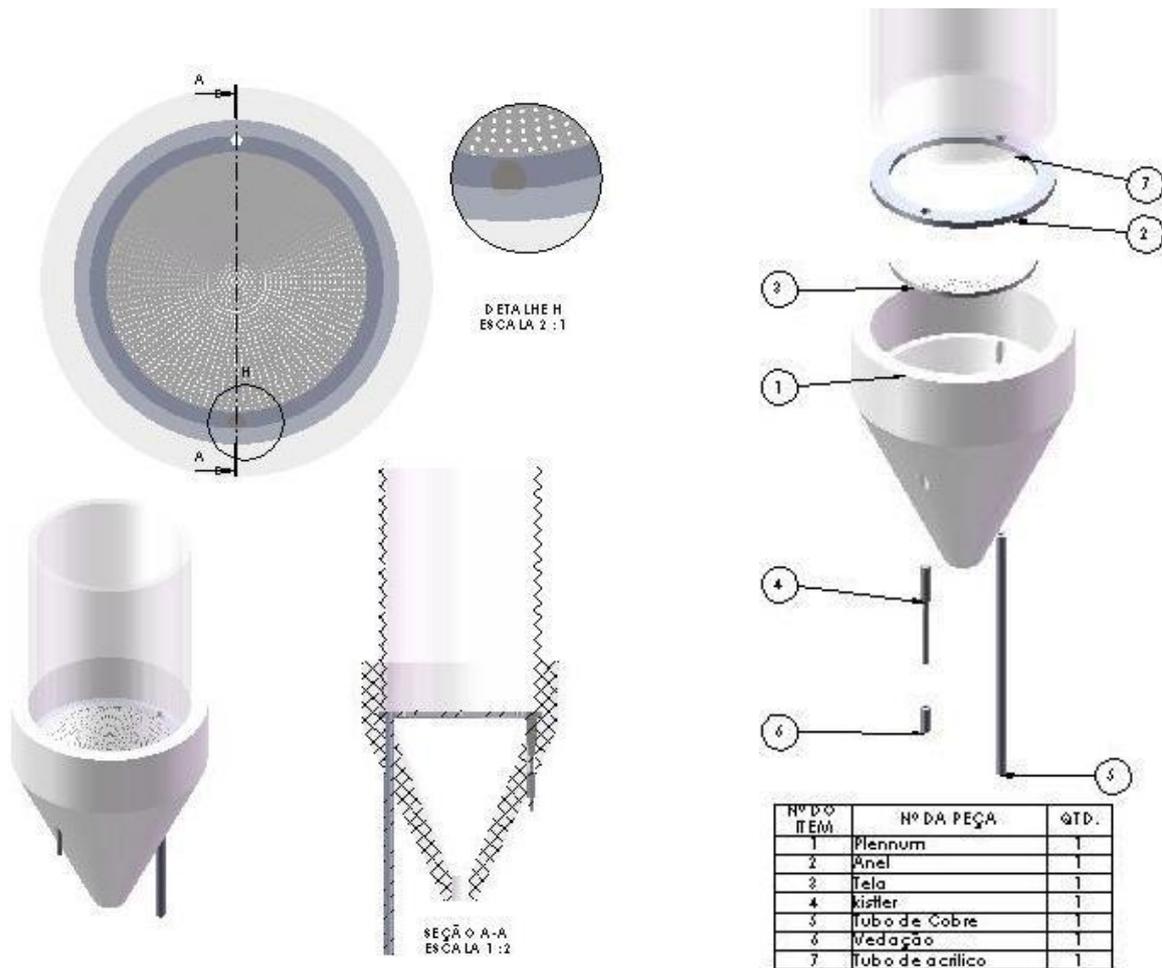
tubulação de policloreto de vinila - PVC através de conexões comerciais é direcionada a um reservatório metálico coletor de poeira e areia.

Todo este aparato foi fixado por uma estrutura metálica, que sustenta os três tubos de experimentos, mantendo o nivelamento dos mesmos. Também foi fabricada e instalada uma caixa-gaveta abaixo dos experimentos para aparar quaisquer grãos de areia ou C.C.C. que porventura caíssem em alguma operação, seja para tirar ou colocar material no leito, conectar ou desconectar algum sensor de teste/monitoramento.

**FIGURA 7 – Projeto da bancada de pesquisa.**



**FIGURA 8 – Projeto do Plenum.**



#### 4.4.2 Instrumentos de Monitoramento e Controle

Para a realização dos experimentos foi utilizado o compressor da marca *Schulz*, modelo CSL 10 BR/100 bravo, 140 psi, 2,0 cv, que possui um deslocamento teórico de 10 cfm e sua pressão de trabalho está na faixa de 100 - 140 psi.

Foi instalado na linha de ar comprimido um conjunto de preparação de ar comprimido (marca *Werk-Schott*, série 221 Mini FR+L), tendo como faixa de pressão 0,2 - 10 bar, composto por regulador de pressão, purgador, filtro e dosador de lubrificante (não foi usado qualquer lubrificante).

Para certificação da pressão da linha de ar comprimido foi instalado um manômetro analógico com faixa de operação de 0 a 10 kgf/cm<sup>2</sup> (marca *Record*). Foi solicitado ao LAMETRO - Laboratório de Metrologia da Universidade Federal do Ceará (UFC) o certificado de calibração desse instrumento (em anexo).

Dois medidores de vazão do tipo rotâmetro foram instalados na linha de alimentação, para regulagem da vazão do ar no escoamento dentro do leito, com aplicação de ar (e/ou gases combustíveis ou não) como parte do processo. Material constituinte do corpo em policarbonato, com anéis de vedação em neoprene e buna-N, e flutuador em aço inoxidável, com faixa de medição: 10 a 100 SCFH - Ar, classe de exatidão  $\pm 4\%$  fundo da escala, comprimento da escala 50 mm, temperatura máxima 54°C, pressão máxima 100 PSI (6,9 bar), conexão ao processo 1/8" NPT-F, botão de ajuste em ABS e válvula em aço-inox (SSV), construção – corpo do medidor, bezel e tubo em policarbonato transparente; Código RMA-8-SSV - Modelo Rate Master; fabricante Dwyer Inst. Inc., ISO 9001 - Procedência Americana.

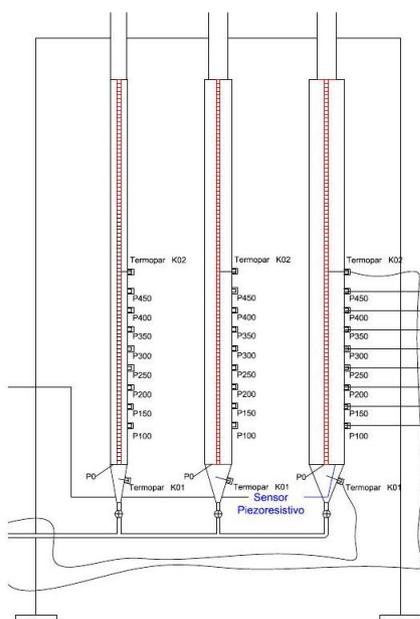
Para medir as temperaturas na entrada e na saída do leito, foi utilizado um termômetro digital portátil com escala de temperatura (-50 a +1300) com precisão de  $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$  (marca Equitherm DM6802B) com dois termopares do tipo K com haste de 200 mm.

Em cada um dos experimentos foram instaladas 08 (oito) tomadas para captação de pressão e ligadas a um painel constituído de 08 (oito) manômetros "U" (ver Figura 9 em anexo), distribuídas ao longo da altura do tubo de acrílico, distribuídos a cada 0,050 m a partir da cota 0,100 m (a partir da extremidade inferior do tubo). Foram conectados um manômetro "U" e um sensor piezoresistivo para a calibração das medidas da pressão na cota "zero" (0,0 m), no nível da placa distribuidora. Estas foram de grande utilidade para a coleta dos dados de pressão e realização da análise gráfica das curvas fluidodinâmicas dos experimentos. A finalidade foi comparar o comportamento do leito fluidizado, variando-se altura, pressão, velocidade de fluidização, granulometria e acrescentando biomassa ao leito.

Para medir a pressão foram confeccionados dez manômetros de coluna d'água com faixa de leitura de 0 a 1000 mm de H<sub>2</sub>O em "U", sendo dois deles montados na estrutura metálica de sustentação dos experimentos e os outros oito em um painel (madeira). O sensor amplificador piezoresistivo, também utilizado para medir a pressão e servir de referência para análise dos manômetros, tem saída de sinal analógico de 4- 20 mA e 0-10 V, de fabricante suíço (marca Kistler, modelo 4618A0). Este sensor é alimentado com corrente contínua por uma fonte de alimentação de 0-24 volts (modelo EMG 18131). Para leitura do valor da pressão, foi usado um multímetro digital modelo: DT830B.

Todas as medidas obtidas no manômetro em "U", instalado na base do tubo, puderam ser confrontadas com aquelas obtidas com o sensor piezoresistivo. Assim esse sensor pode servir como instrumento de calibração do manômetro em "U", fornecendo maior confiabilidade nos resultados obtidos.

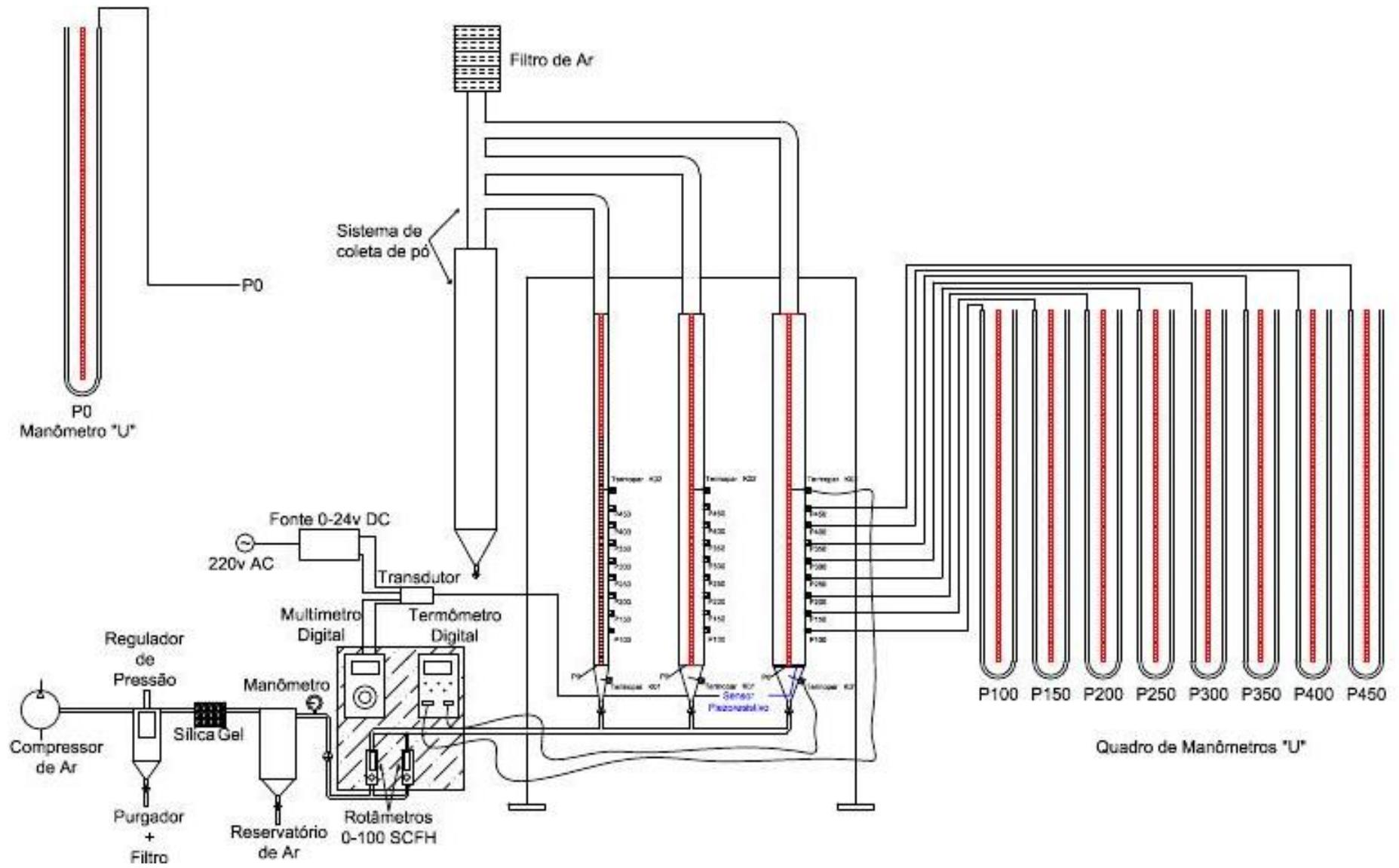
**FIGURA 9 – Detalhe do esquema de instalação dos sensores.**



Foi observado que em experimentos com o leito de areia em cotas superiores a 0,325 m, havia a necessidade de uma maior vazão e maior estabilidade no leito para permitir o registro de dados coletados. O fato de o compressor tender ao aquecimento, devido à operação prolongada na realização dos experimentos, resultava em flutuação da pressão da linha de ar que acarretava em erros de medição. Para prevenir de qualquer oscilação na pressão da linha interferindo nas medições, foi instalado antes dos rotâmetros, um pequeno reservatório de linha para amortecer qualquer variação da pressão.

Como o planejamento de experimentos contempla estudos com areia de baixíssima granulometria ( $D_m=72,43\mu\text{m}$ ), foi necessário prevenir a exaustão partículas de areia em suspensão no escoamento, o que pode representar risco para a saúde. Profissionais que lidam com sistemas que operam com partículas de sílica, têm risco de adquirir uma grave de doença pulmonar, que é uma forma de pneumoconiose causada pela inalação de finas partículas de sílica cristalina e caracterizada por inflamação e cicatrização em forma de lesões nodulares nos lóbulos superiores do pulmão (Ferreira, 2006). Por essa razão, na parte superior da tubulação de exaustão, foi colocado um filtro tipo "manga" (tecido de propriedade filtrante utilizado nas indústrias em geral). Foi constatado que, para areias com diâmetro de partícula muito pequeno, como ocorreu com os experimentos utilizando a areia de mais baixa granulometria ( $D_m =72,43\mu\text{m}$ ), ocorre frequentemente o entupimento das tomadas de pressão dos manômetros "U". Para solucionar este problema, foi colocado um elemento filtrante. A Figura 10 mostra o esquema da bancada de pesquisa após as modificações de projeto para otimização do aparato experimental, apresentando toda a instrumentação de operação e controle de processo.

Figura 10 – Esquema da bancada de pesquisa.



## CAPÍTULO 5 – OPERAÇÃO E TESTE

### 5.1 Procedimento Experimental com Leito de Areia

Os procedimentos operacionais do aparato experimental em cada teste são bastante simples, porém, devido à falta de um sistema informatizado de aquisição de dados, a operação se torna bastante demorada, repetitiva e cansativa. Chegou-se a casos de um experimento durar até 6 (seis) horas.

Como comentado anteriormente, foram estudados os fenômenos fluidodinâmicos do leito, utilizando areia de sílica nas granulometrias de 546,611  $\mu\text{m}$ , 321,023  $\mu\text{m}$  e 72,432  $\mu\text{m}$ , em experimentos de tubos com diâmetro interno 0,044m, 0,069m e 0,090m.

As cotas de coluna (altura) do leito estabelecidas para estudo foram 0,075 m, 0,125 m, 0,175 m, 0,225 m, 0,275 m, 0,325 m, 0,375 m, 0,425 m e 0,475 m. Em cada cota, variou-se a vazão do fluido (ar) e foram anotados os valores das quedas de pressões no sensor piezoresistivo (*kistler*). Além das medições de pressão com o sensor piezoresistivo, foram tomadas medidas com manômetros tipo “U” instalados na cota “zero” (no nível da placa de distribuição), como também as quedas de pressão nos manômetros “U” instalados na lateral da coluna. Foram também medidas as temperaturas na entrada (no *plenum*) e na saída do leito.

O procedimento experimental inicia-se levando um volume de areia na granulometria em estudo para a estufa durante 30 minutos a 200°C para remoção de umidade. Aguarda-se o resfriamento desta areia para ser pesada e ser colocada na bancada de pesquisa. Com o preenchimento do volume estipulado relativo a uma determinada cota em estudo, anota-se a massa de areia correspondente e compacta-se a areia batendo suavemente no experimento, anota-se a altura do leito; abre-se gradualmente a válvula do rotâmetro variando a vazão. Anota-se a vazão no rotâmetro, as quedas de pressão nos manômetros em “U”, pressão no sensor “*kistler*” e a altura do leito para cada vazão do rotâmetro, até atingir-se vazão de ar que fluidize plenamente o leito, evitando-se atingir uma vazão alta demais que arraste as partículas e mede-se a temperatura do ar na entrada e saída da coluna. Após atingir a posição máxima no rotâmetro que mantém o leito fluidizado, fecha-se gradualmente a válvula, anotando-se os mesmos dados para cada uma das posições do rotâmetro. Após o fechamento total da válvula do rotâmetro, anota-se a altura do leito. Faz-se isso para cada cota estabelecida.

## **TRATAMENTO DOS DADOS OBTIDOS**

Após o registro de todos os dados obtidos experimentalmente, são feitos os gráficos da queda de pressão ( $\Delta P$ ) versus a vazão do ar ( $Q$ ), queda de pressão ( $\Delta P$ ) versus velocidade superficial do ar ( $u$ ), comparando-se a leitura do sensor Kistler e manômetro “U”, verificando-se, nestes gráficos, o fenômeno da histerese.

Verifica-se, no leito fluidizado, a validade da equação  $\Delta P = \text{Peso de sólidos}/\text{Área}$ . Com base nos dados experimentais, estima-se a velocidade mínima de fluidização ( $q_{mf}$ ), a altura do leito ( $L_{mf}$ ) e a porosidade ( $\varepsilon_{mf}$ ) nas condições de fluidização mínima.

Estima-se a velocidade mínima de fluidização ( $U_{mf}$ ), apresentando na Tabela 12 (Capítulo 6) os resultados obtidos e a variação percentual destes, quando comparados com o valor experimental.

### **5.2 - Determinação de Parâmetros Fluidodinâmicos**

O estudo experimental dos fenômenos fluidodinâmicos do leito fluidizado foi realizado respeitando a relação  $L/D$  (comprimento/diâmetro) e a granulometria da areia utilizada por Souza (1978). A areia do leito foi classificada em três faixas de granulometria, areia bruta de praia com diâmetro médio de 546,611  $\mu\text{m}$ , areia 45/50 mesh com  $D_m=321,023 \mu\text{m}$ , e 170/200 mesh com  $D_m=72,432 \mu\text{m}$ , as duas últimas classificadas através de retenção por peneira. Essas faixas de granulometria foram escolhidas para permitir identificar a influência da densidade das partículas de areia sobre a fluidização do leito.

Foram colhidos valores de pressão ao longo das tomadas de pressão instaladas nas colunas, seguindo as cotas: inicialmente a 100 mm de altura, e 7 (sete) tomadas a cada 0,050 m, melhor visualizado na Figura 10.

A Sequência de medição iniciou-se na Bancada de Pesquisa com tubo de diâmetro menor, por se tratar de um volume menor de areia e, conseqüentemente, maior controle para inicialização dos testes. Foram medidos experimentalmente pressões ao longo da altura da Bancada de Pesquisa, as velocidades mínimas de fluidização, vazão de ar, queda de pressão na placa distribuidora e no leito de areia, porosidade do leito e gradiente de pressão do escoamento.

Assim, foram verificadas as influências e tendências da razão  $L/D$  (comprimento/diâmetro) e da granulometria do leito, a fim de definir a cota ideal de alimentação do combustível, casca de castanha de caju, e a influência da sua granulometria e densidade no escoamento.

### 5.3 Preparação do Material Constituinte do Leito

A classificação dos materiais pela granulometria foi feita de acordo com as seguintes etapas:

➤ **Obtenção da Areia de Sílica:**

A areia de sílica foi obtida de umas das praias do Ceará (Beberibe), embora pudesse ter sido conseguida em qualquer outra que não possuísse muitos resíduos de matéria orgânica.

➤ **Preparação e Limpeza da Areia (moagem, peneiramento e classificação):**

Para retirada do máximo de matéria orgânica e demais substâncias, a areia foi lavada, peneirada e separada por decantação em água, repetindo o procedimento inúmeras vezes, em vários recipientes. Após isso, a areia foi levada a uma estufa para secagem e esterilização (marca Olidef - modelo CZ), com temperatura média de 200°C, durante 30 minutos.

Certa quantidade de areia desumidificada foi separada em recipientes para ser submetida ao peneiramento, utilizando primeiramente peneiras com malha de 20 mesh ASTM, em que foi aplicado um mecanismo vibratório. Certificando-se da não existência de resíduos indesejáveis nessa areia trabalhada (como madeira ou vidro, por exemplo), uma amostra de 100 gramas desta areia foi separada para análise de granulometria, diâmetro, e microscopia de partícula em laboratório (análise microscópica apresentada em anexo). Foram separados os recipientes contendo 25 kg (cada) de areia classificada para realização dos experimentos.

Outra porção da areia desumidificada foi levada a um sistema de bandejas de peneiramento vibratório, como um banco de peneiras associadas em série, de forma decrescente em termos de granulometria. Essa porção de areia foi, então, classificada de acordo com as duas outras faixas de granulometria: i) tela de 45 mesh, seguida de outra de 50 mesh, para garantir uniformidade dentro dessa faixa; ii) tela de 170 mesh seguida de tela de 200 mesh.

Dever ser ressaltado que, como o peneiramento é subsequencial e progressivo, o percentual retido na faixa de 170-200 mesh é muito pequeno, sendo necessário um moinho de bolas cerâmicas, em escala de laboratório, para realizar a moagem da areia, a fim de alcançar esta faixa de granulometria desejada. Este processo é bastante demorado assim como peneirar todo o volume de areia, classificando-o nas faixas de granulometria para esta pesquisa.

A Tabela 10 mostra a composição granulométrica de areia de praia bruta. O percentual retido na malha 170 mesh é muito pequeno (percentual médio de 0,14) e malha 200 mesh é “zero”, justificando a necessidade de se moer a areia a fim de se obter quantidade suficiente deste material.

**Tabela 10 – Composição granulométrica da Areia Bruta de Praia.**

<b>Composição Granulométrica</b>			
<b>AREIA DE PRAIA - AMOSTRAS (100 g)</b>			
<b>Peneiras</b>	<b>1ª Amostra</b>	<b>2ª Amostra</b>	<b>% Retida</b>
	<b>% Retida</b>	<b>% Retida</b>	<b>Média</b>
# 20 Mesh ASTM	0.28	0.28	<b>0.28</b>
# 28 Mesh ASTM	9.04	7.86	<b>8.45</b>
# 45 Mesh ASTM	65.86	66.5	<b>66.18</b>
# 50 Mesh ASTM	9.55	11.14	<b>10.345</b>
# 80 Mesh ASTM	14.77	13.65	<b>14.21</b>
# 100 Mesh ASTM	0.36	0.4	<b>0.38</b>
# 170 Mesh ASTM	0.13	0.15	<b>0.14</b>
# 200 Mesh ASTM	0	0	<b>0</b>
# 250 Mesh ASTM	0	0	<b>0</b>
<b>Total</b>	<b>99.99</b>	<b>99.98</b>	<b>99.985</b>

Todo o material (areia) que foi peneirado e armazenado em recipientes, protegido contra a umidade, totalizou 18 kg aproximadamente, ou seja, 6 kg de cada faixa de granulometria adotada para estudo. Desse montante, uma amostra de 100 gramas de cada areia foi separada para análise de granulometria (controle de diâmetro) e microscopia de partícula em laboratório (análise em anexo). Após a obtenção da areia de sílica, lavagem e secagem, esta areia foi tratada para as condições estabelecidas para a pesquisa.

### **Determinação do diâmetro médio e curva granulométrica**

A determinação do diâmetro médio e distribuição granulométrica da areia foram realizadas no Laboratório de Combustíveis que utilizou o analisador de tamanho de partículas (0,02 A 2000 $\mu$ ) *MASTERSIZER 2000*. Os resultados das análises de amostra de cada granulometria de areia estão disponíveis nos Anexos.

### **Processo de peneiramento**

A separação da areia, em diversas frações é o objetivo do peneiramento. Para isso, utilizou-se uma série de peneiras metálicas do fabricante *Produtest* (Figura nos Anexos), com abertura de malhas 20, 45, 50, 170 e 200 mesh ASTM. Este processo divide-se em peneiramento grosso, partículas maiores que 0,71 mm (20 mesh) e peneiramento fino, partículas menores que 0,074 mm (200 mesh).

As peneiras são fabricadas de forma a poderem ser encaixadas umas nas outras de modo a formarem uma coluna de peneiração. Na parte superior desta coluna existe uma tampa para evitar perdas de material durante a peneiração, e na base encaixa-se um prato "cego", destinado a receber as partículas menores que atravessaram toda a coluna sem serem retidos em nenhuma das peneiras.

Efetuuou-se o peneiramento a seco. Neste processo, a coluna de peneiração é agitada por um aparelho vibratório, designado por "agitador de peneiras" (Figura em anexo), o qual imprime às peneiras movimentos de elevada frequência que viabilizam a peneiração das partículas. Entre um peneiramento e outro as peneiras foram limpas cuidadosamente, na finalidade de retirar das malhas quaisquer partículas que possam ficar presas e que poderiam contaminar a nova quantidade de areia a ser peneirada.

### **Controle de condicionamento**

Buscou-se evitar ao máximo a exposição das areias destinadas a esta pesquisa a umidade ou contaminação por poeiras ou outro tipo de material, bem como também proteger de pequenos insetos. Antes de iniciar cada teste, como parte do *setup* do experimento, a areia foi devidamente pesada e observada com minuciosidade a cota de cada massa de areia utilizada.

### **Análise de diâmetro médio e curva granulométrica**

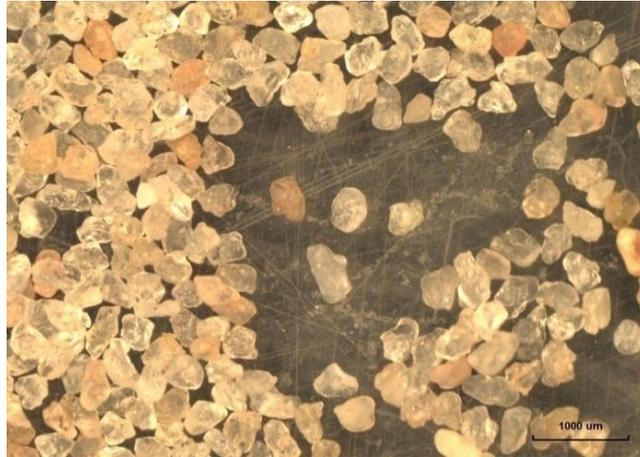
A análise de diâmetro médio das partículas e a curva granulométrica da areia foram realizadas no Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes da UFC.

### **Microscopia e Análise de Geometria da Areia de Sílica**

Através do *software* computacional *infinity analyse*, acoplado a um microscópio eletrônico cedido pelo Laboratório de Paleontologia do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará, foi realizada a análise microscópica de amostras da areia, verificando as características da geometria dos grãos. A partir desta análise de geometria dos grãos pôde-se determinar a esfericidade e grau de arredondamento das partículas.

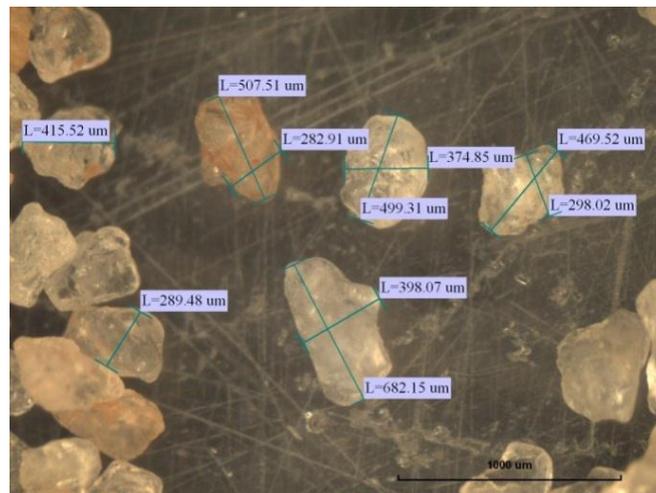
As Figuras de 11, 12, 13 e 14 mostram duas das faixas de granulometria da areia de sílica utilizadas nesta pesquisa (45-50 e 170-200 mesh).

**Figura 11 – Microscopia 45-50 mesh – Ampliado 20x.**



A Figura 11 mostra a imagem dos grãos de areia ampliado 20x que no processo de peneiramento passaram pela peneira de malha 45 mesh e ficaram retidas na peneira de 50 mesh.

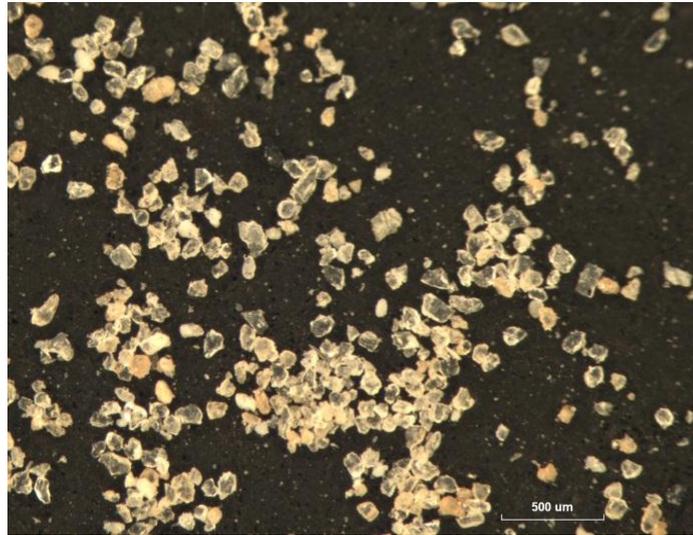
**Figura 12 – Microscopia 45-50 mesh – Ampliado 45x.**



A Figura 12 mostra a dimensão dos grãos em µm desta areia com uma ampliação de 45x.

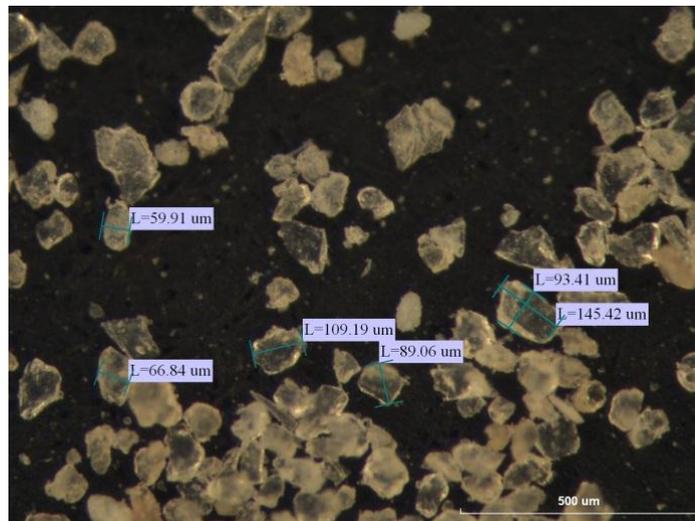
A forma de suas partículas segundo a classificação de German, 1994 é arredondada.

**Figura 13 – Microscopia 170/200 mesh – Ampliado 40x.**



A Figura 13 mostra a imagem dos grãos de areia ampliada 40x que no processo de peneiramento passaram pela peneira de malha 45 mesh e ficaram retidas na peneira de 50 mesh.

**Figura 14 – Microscopia 170/200 mesh – Ampliado 90x.**



A Figura 14 mostra a dimensão dos grãos em  $\mu\text{m}$  desta areia com uma ampliação de 90x.

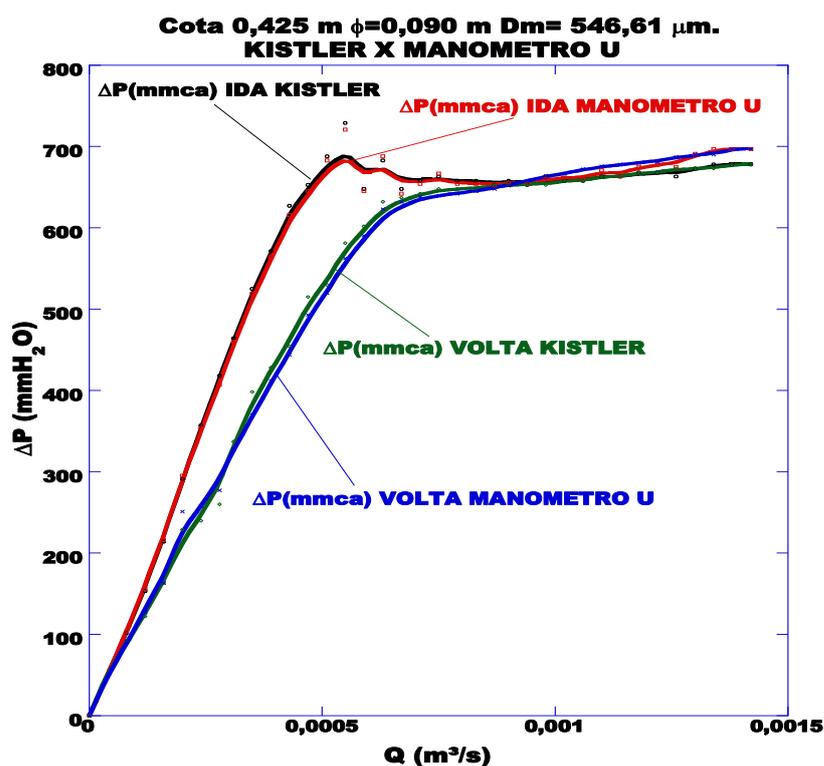
A forma de suas partículas segundo a classificação de German, 1994 é arredondada.

## 5.4 Modificações da Bancada de Pesquisa para Adequação de Instrumentos.

### Eficácia do manômetro “U” comparado ao sensor piezoresistivo.

Como foi comentado anteriormente, a calibração das medidas de pressão adquiridas nos manômetros “U” foi realizada utilizando o sensor piezoresistivo do fabricante *Kistler Instruments* como instrumento de referência, em que ambos os instrumentos foram instalados na cota “zero”, medindo paralelamente a queda de pressão na coluna do leito. Os valores obtidos nos dois sensores são muito próximos, com diferença bastante pequena. O resultado desta calibração do instrumento é demonstrado na Figura 15.

Figura 15 – Comparação entre o sensor piezoresistivo e o manômetro “U”.



### Filtro para bloqueio do fluxo de areia para os manômetros “U” e sensor piezoresistivo.

Nas situações em que se utilizou a areia mais fina ( $D_p 72,43 \mu\text{m}$ ) nos testes, foi percebido que os tubos dos sensores de pressão na lateral e na placa distribuidora se obstruíam pelo fato das partículas desta areia se empacotarem mais facilmente devido à pequena

dimensão, reduzindo os espaços vazios entre elas. Notou-se que várias vezes os sensores entupiam, o que dificultava bastante o registro correto das informações de pressão.

Similarmente, pelo mesmo motivo, no sensor piezoresistivo, foi percebido que os grãos de areia adentravam no sensor, travando o sensor e registrando valores incorretos e completamente diferentes dos registrados no manômetro, instalado paralelamente a este. Para extinguir estes problemas nos manômetros “U” e sensor piezoresistivo se fez necessário, respectivamente, instalar filtros com algodão e pedaço de papel de elemento de um filtro de ar automotivo. Com isso o problema foi sanado.

### **Adequação do *plenum* para instrumentação**

No início desta pesquisa foi prevista a captação do sinal de pressão, tanto do manômetro “U” quanto do sensor piezoresistivo em um ponto anterior à entrada do *plenum*. No decorrer do desenvolvimento da pesquisa foi percebido que a distância iria acarretar em um erro significativo, por este motivo, foi necessária a adequação do *plenum* tanto para instalação de um tubo de cobre para captação de pressão no manômetro “U” como do sensor piezoresistivo. Foi necessária também a instalação de uma tomada para encaixe do termopar na lateral do *plenum*.

## **5.5 RELATOS DE EXPERIMENTOS COM AREIA**

### **5.5.1 Experimentos com areia de praia bruta ( $\phi=0,090$ m, $D_p=546,61$ $\mu\text{m}$ )**

Ref.: Cotas 0,075m, 0,125m, 0,175m, 0,225m, 0,275m, 0,325m, 0,375m, 0,425m e 0,475m.

Neste ensaio, em todas as cotas testadas, a fluidização ocorreu de forma esperada de acordo com o que foi estudado nas bibliografias de referência, mas nas cotas 0,425 m e 0,475 m foram verificadas inversões nos valores nas pressões medidas na lateral da coluna do leito envolvendo os pontos de medição P(0,100 m), P(0,150 m) e P(0,200 m).

#### **Cota 0,075 m**

Neste teste, o objetivo foi o estudo fluidodinâmico da areia com  $D_p=546,61$   $\mu\text{m}$  como material inerte constituinte do leito fluidizado. E, para tal, o tubo de  $\phi=0,090$  m em estudo foi preenchido com 755 gramas de areia para preenchimento do leito até a cota 0,075m.

A temperatura registrada no termopar tipo K instalado no ponto de entrada do ar no leito foi de 24°C.

O ensaio iniciou-se após a abertura da válvula e com o aumento gradativo da vazão do rotâmetro a pressão aumentou proporcionalmente ao acréscimo da vazão. Ao atingir a vazão de 0,00071 m<sup>3</sup>/s e pressão na coluna do leito na cota “zero” (no nível da placa distribuidora) de 102 mmH<sub>2</sub>O o leito começou a ser suspenso, ou seja, esta foi a vazão de ar necessária para superar o peso da areia contida no leito, ocorrendo assim o processo de expansão do leito.

Após isso a pressão começou a decrescer com o aumento da vazão, a altura do leito continua aumentando, e nota-se que na região mais próxima à superfície do leito as partículas de areia começaram a se mover lentamente em direções aleatórias e na região inferior do leito as partículas tendiam a ficar paradas.

Na vazão de 0,00079 m<sup>3</sup>/s e pressão de 85 mmH<sub>2</sub>O foi percebido que na superfície do leito, em que a expansão da areia foi de 0,003 m, começou-se a ter um comportamento semelhante a um fluido em ebulição, ou seja, na região próxima à superfície do leito, a areia ficava sendo jorrada lentamente e formava minúsculas bolhas. Na zona inferior do leito as partículas começaram a se movimentar para cima. A partir desta vazão, conforme se aumentou a vazão do ar, a pressão tendeu a permanecer constante, o leito continuou se expandindo e as bolhas aumentaram em quantidade e tamanho, apresentando o regime de leito fluidizado borbulhante.

Foi fornecida ao leito a vazão máxima de 0,00094 m<sup>3</sup>/s de ar, observando-se uma pressão de 83 mmH<sub>2</sub>O e altura de desagregação do leito de 0,005 m, ou seja, a altura do leito atingida foi 0,080 m. A partir deste momento, o leito borbulha com mais vigor tendendo a transportar as partículas para a extremidade superior do experimento (regime de transporte pneumático).

Como foi atingido o regime de borbulhamento, passou-se a decrescer a vazão do gás. Neste decréscimo da vazão de 0,00094 m<sup>3</sup>/s até 0,00087 m<sup>3</sup>/s, a pressão permaneceu constante em 83 mmH<sub>2</sub>O e a altura do leito decresceu lentamente de 0,080 m a 0,078 m.

Continuando a redução da vazão, a pressão começou a diminuir proporcionalmente à vazão, e a altura do leito permaneceu constante em 0,078 m até atingir a vazão 0 m<sup>3</sup>/s (fechamento da válvula do rotâmetro).

Nesta cota, por motivo de detalhe construtivo e, também devido ao leito apresentar pequena expansão na altura, não foram medidas as pressões na lateral do experimento. No decorrer dos 50 minutos de duração deste teste, foi verificada nos termômetros a variação de 1°C na temperatura. A temperatura na saída do leito foi de 25°C.

Os testes feitos nas cotas 0,125 m, 0,175 m, 0,225 m, 0,275 m, 0,325 m, 0,375 m, 0,425 m e 0,475 m, se comportaram de forma similar ao teste de 0,075 m, respeitando-se algumas diferenças, como por exemplo, um pico de pressão maior e uma expansão maior do leito para as cotas maiores e inversão de pressão na lateral da coluna nas cotas 0,425 m e 0,475 m.

Faz-se necessário explanar o teste na cota de 0,425 m para melhor conhecimento desta inversão, citada acima.

### **Cota 0,425m**

Neste teste, o objetivo foi o estudo fluidodinâmico da areia com  $D_p=546,61 \mu\text{m}$  como material inerte constituinte do leito fluidizado. E, para tal, o tubo de  $\phi=0,090 \text{ m}$  em estudo foi preenchido com 4.295 gramas de areia para preenchimento do leito até a cota 0,425 m. A temperatura registrada no termopar tipo K instalado na entrada do ar no leito foi de  $24^\circ\text{C}$ .

O ensaio iniciou-se após a abertura da válvula e o aumento gradativo da vazão do rotâmetro a pressão aumentou proporcionalmente ao acréscimo da vazão. Ao atingir a vazão de  $0,00035 \text{ m}^3/\text{s}$  e pressão de  $519 \text{ mmH}_2\text{O}$  na coluna do leito na cota “zero” (no nível da placa distribuidora), o leito começou a ser suspenso (aumento de  $0,002 \text{ m}$ ).

Observou-se que ao chegar à vazão de  $0,00055 \text{ m}^3/\text{s}$  atingiu-se a pressão máxima de  $721 \text{ mmH}_2\text{O}$ , ou seja, esta foi a vazão de ar necessária para superar o peso da areia contida no leito, neste ponto a variação da altura foi de  $0,021 \text{ m}$  correspondente a  $0,446 \text{ m}$  de altura do leito. Após isso, conforme foi acrescida a vazão, a pressão diminuiu com várias oscilações e notou-se que na região mais próxima à superfície do leito, as partículas de areia começaram a se mover lentamente em direções aleatórias e, na região inferior do leito, as partículas tenderam a ficar paradas. Este decréscimo de pressão ocorre até  $660 \text{ mmH}_2\text{O}$ , na vazão de  $0,00106 \text{ m}^3/\text{s}$ , o leito começa a ter um comportamento semelhante a um fluido em ebulição (na região próxima à superfície do leito a areia fica sendo jorrada lentamente e formando minúsculas bolhas). Na zona inferior do leito as partículas começaram a se movimentar para cima, sua cota atingiu  $0,535 \text{ m}$ .

No intervalo de vazão compreendido entre  $0,00106 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $0,00134 \text{ m}^3/\text{s}$  a pressão subiu com uma pequena oscilação atingindo  $697 \text{ mmH}_2\text{O}$ , o leito continuou se expandindo e as bolhas aumentaram muito em quantidade e tamanho, permanecendo em regime de leito fluidizado borbulhante. Foi observado que a areia constituinte do leito se movimentou mais vigorosamente, de forma a se misturar bem, e esta areia tendeu a circular no leito.

Posteriormente, a pressão permaneceu constante até a máxima vazão aplicada de 0,00142 m<sup>3</sup>/s, neste momento o leito está com altura de desagregação de 0,190 m (cota 0,615 m).

Deve ser ressaltado, que tanto as pressões observadas nos manômetros “U” como a altura do leito oscilaram muito, dificultando a leitura, devido às bolhas serem maiores e mais frequentes. Foi visto que as oscilações apareceram durante a formação das bolhas na parte inferior do leito até a chegada à superfície do leito. Com o aumento da vazão, o leito tendeu a transportar as partículas para a extremidade superior do experimento, e foi mais difícil colher precisamente a altura do leito e as pressões nos manômetros “U”. Para este teste de cota 0,475 m, foram medidas as pressões na lateral do experimento, nas alturas 0,100 m, 0,150 m, 0,200 m, 0,250 m, 0,300m, 0,350m, 0,400m, 0,450m e 0,500 m.

Nos manômetros “U” instalados nas cotas 0,100 m, 0,150 m, 0,200 m, 0,250 m, 0,300 m, 0,350 m, o comportamento das pressões foram bastante semelhantes, aumentando gradativamente da vazão 0 m<sup>3</sup>/s a 0,00118 m<sup>3</sup>/s. No intervalo de vazão de 0,00118 m<sup>3</sup>/s a 0,00122 m<sup>3</sup>/s, as pressões caíram, voltando a aumentar, porém com várias oscilações atingindo a vazão máxima aplicada (0,00142 m<sup>3</sup>/s).

Observou-se que nesta subida de pressão, a partir da vazão 0,00 m<sup>3</sup>/s a pressão no sensor instalado na cota 0,200 m subiu muito, ultrapassando a pressão medida no sensor de cota 0,150 m, a partir deste ponto a pressão em 0,200 m se manteve maior que em 0,150 m. ***Esta é a inversão de pressões observada neste teste.***

No manômetro “U” instalado na cota 0,400 m, a pressão aumentou gradativamente, no intervalo de vazão de 0 m<sup>3</sup>/s a 0,00110 m<sup>3</sup>/s. A partir deste ponto a pressão subiu com um incremento mais elevado atingindo a vazão máxima aplicada (0,00142 m<sup>3</sup>/s).

Nos manômetros “U” instalado nas cotas 0,450 m e 0,500 m, após alcançar a vazão de 0,00063 m<sup>3</sup>/s e 0,00094 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, observou-se uma pressão de 1 mmH<sub>2</sub>O. A partir desta vazão, a pressão subiu continuamente até atingir 150 mmH<sub>2</sub>O e 20 mmH<sub>2</sub>O, respectivamente, na vazão máxima aplicada.

Como foi atingido o regime de borbulhamento, passou-se a decrescer a vazão do gás. Neste decréscimo da vazão de 0,00142 m<sup>3</sup>/s até 0,00063 m<sup>3</sup>/s, a pressão decresceu lentamente de 697mmH<sub>2</sub>O para 623 mmH<sub>2</sub>O, a altura do leito diminuiu de 0,615 m para 0,460 m ( $\Delta H=0,155$  m).

Continuando a redução da vazão, no intervalo de 0,00059 m<sup>3</sup>/s até atingir a vazão 0 m<sup>3</sup>/s, a pressão caiu proporcionalmente à vazão de 590 mmH<sub>2</sub>O para 0 mmH<sub>2</sub>O. A altura do leito decresce até atingir a cota 0,454 m na vazão 0,00008 m<sup>3</sup>/s e permanece constante até a vazão 0 m<sup>3</sup>/s, ficando o leito expandido de 0,029 m.

No manômetro “U” instalado na lateral do tubo, nas cotas 0,100 m, 0,150 m, 0,200 m, 0,250 m, 0,300 m, 0,350 m e 0,400 m, durante este decréscimo, de 0,00142 m<sup>3</sup>/s até 0 m<sup>3</sup>/s, as suas pressões diminuem gradativamente com pequenas oscilações atingindo 0 mmH<sub>2</sub>O, cada um.

*Observa-se que nos manômetros “U” instalados nas cotas 0,150 m e 0,200 m, as pressões mantiveram-se invertidas, durante todo o decréscimo da vazão.* Pode ser visualizado na figura 27, página 77.

No manômetro “U” instalado na cota 0,450 m, durante este decréscimo, no intervalo de 0,00142 m<sup>3</sup>/s a 0,00059 m<sup>3</sup>/s, a pressão decresceu de 150 mmH<sub>2</sub>O para 1 mmH<sub>2</sub>O e a partir da vazão 0,00055 m<sup>3</sup>/s o instrumento deixou de captar sinal de pressão.

No manômetro “U” instalado na cota 0,450 m, durante este decréscimo, no intervalo de 0,00142 m<sup>3</sup>/s a 0,00098 m<sup>3</sup>/s, a pressão decresceu de 20 mmH<sub>2</sub>O para 1 mmH<sub>2</sub>O e a partir da vazão 0,00094 m<sup>3</sup>/s o instrumento deixou de captar sinal de pressão.

No decorrer dos 255 minutos de duração deste teste, foi verificada nos termômetros a variação de 1°C na temperatura. A temperatura na saída do leito foi 25°C.

### **5.5.2 Experimentos com areia de 45/50 mesh ( $\phi=0,090$ m, $D_p= 321,02$ $\mu$ m)**

Ref.: Cotas 0,075m, 0,125m, 0,175m, 0,225m, 0,275m, 0,325m, 0,375m, 0,425m e 0,475m.

Os testes para esse diâmetro de 0,090 m e areia 321,02  $\mu$ m foram bastante similares aos da areia de 546,61  $\mu$ m com o mesmo diâmetro.

#### **Cota 0,075m**

Neste teste o objetivo foi o estudo fluidodinâmico da areia com  $D_p$  321,02 $\mu$ m como material inerte constituinte do leito fluidizado. E, para tal, o tubo de  $\phi$  0,090 m em estudo foi preenchido com 715 gramas de areia para preenchimento do leito até a cota 0,075 m. A temperatura registrada no termopar tipo K instalado na entrada do ar no leito foi de 26°C.

O ensaio iniciou-se após a abertura da válvula e aumento gradativo da vazão do rotâmetro, a pressão aumentou proporcionalmente ao acréscimo da vazão. Na vazão 0,00035 m<sup>3</sup>/s e pressão 58 mmH<sub>2</sub>O o leito começou a se expandir (com um acréscimo de 0,001 m). Ao atingir a vazão de 0,00055 m<sup>3</sup>/s obteve-se o pico de pressão de 95 mmH<sub>2</sub>O, esta foi a vazão de ar necessária para superar o peso da areia contida no leito.

Após isso, a pressão começou a decrescer com o aumento da vazão, a altura do leito continuou aumentando, e notou-se que na região mais próxima à superfície do leito as partículas de areia começavam a se mover lentamente em direções aleatórias e na região inferior do leito as partículas tendiam a ficar paradas.

Na vazão  $0,00063 \text{ m}^3/\text{s}$  e pressão  $80 \text{ mmH}_2\text{O}$  foi percebido na superfície do leito que a areia expandida de  $0,004 \text{ m}$  começou a ter um comportamento semelhante a um fluido em ebulição (na região próxima à superfície do leito a areia ficou sendo jorrada lentamente e formando minúsculas bolhas). Na zona inferior do leito as partículas começaram a se movimentar para cima. A partir desta vazão, conforme se aumentou a vazão do ar a pressão tendeu a permanecer constante, o leito continuou se expandindo e as bolhas aumentaram em quantidade e tamanho, apresentando o regime de leito fluidizado borbulhante.

Foi fornecida ao leito a vazão máxima de  $0,00071 \text{ m}^3/\text{s}$  de ar, observando-se uma pressão de  $80 \text{ mmH}_2\text{O}$  e altura de desagregação do leito de  $0,006 \text{ m}$ , ou seja, a altura do leito atingida foi de  $0,081 \text{ m}$ . Com maiores vazões o leito borbulhara com mais vigor e tendia a transportar as partículas para a extremidade superior do experimento.

Como foi atingido o regime de borbulhamento, passou-se a decrescer a vazão do gás. Neste decréscimo da vazão de  $0,00071 \text{ m}^3/\text{s}$  até  $0,00067 \text{ m}^3/\text{s}$ , a pressão teve um leve aumento (de  $80 \text{ mmH}_2\text{O}$  para  $82 \text{ mmH}_2\text{O}$ ), e a altura do leito começou a diminuir (de  $0,081 \text{ m}$  para  $0,080 \text{ m}$ ). No intervalo da vazão de  $0,00063 \text{ m}^3/\text{s}$  à de  $0,00055 \text{ m}^3/\text{s}$  a pressão tendeu a permanecer constante variando entre  $81 \text{ mmH}_2\text{O}$  e  $79 \text{ mmH}_2\text{O}$  enquanto a altura do leito atingiu a cota  $0,078 \text{ m}$  e permaneceu constante.

Continuando a redução da vazão a pressão começou a diminuir proporcionalmente à mesma, em  $0,00039 \text{ m}^3/\text{s}$  a altura do leito decresceu para  $0,077 \text{ m}$  e permanece constante até atingir a vazão  $0 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Nesta cota, por motivo de detalhe construtivo e também de o leito apresentar pequena expansão na altura, não foram medidas as pressões na lateral do experimento.

No decorrer dos 40 minutos de duração deste teste, foi verificada nos termômetros a variação de  $1^\circ\text{C}$  na temperatura. A temperatura na saída do leito foi de  $27^\circ\text{C}$ .

Os testes feitos nas cotas  $0,125 \text{ m}$ ,  $0,175 \text{ m}$ ,  $0,225 \text{ m}$ ,  $0,275 \text{ m}$ ,  $0,325 \text{ m}$ ,  $0,375 \text{ m}$ ,  $0,425 \text{ m}$  e  $0,475 \text{ m}$ , se comportaram de forma similar ao teste de  $0,075 \text{ m}$ , respeitando-se algumas diferenças, como por exemplo, um pico de pressão maior e uma expansão maior do leito para as cotas maiores e inversão de pressão na lateral da coluna nas cotas  $0,425 \text{ m}$  e  $0,475 \text{ m}$ .

### **5.5.3 Experimentos com areia de 170/200 mesh ( $\phi=0,090$ m, $D_p= 72,43$ $\mu\text{m}$ )**

Ref.: Cotas 0,425m.

#### **Cota 0,425m**

Neste teste o objetivo foi o estudo fluidodinâmico da areia com  $D_p$  72,43  $\mu\text{m}$  como material inerte constituinte do leito fluidizado. E, para tal, o tubo de  $\phi$  0,090 m em estudo foi preenchido com 3.900 gramas de areia para preenchimento do leito até a cota 0,425m. A temperatura registrada no termopar tipo K instalado na entrada do ar no leito foi de 25°C.

Em todas as cotas não ocorreu o fenômeno de leito fluidizado borbulhante, por este motivo, apresentou-se a descrição somente do teste na cota 425 mm.

Foi constatado que a vazão de ar necessária para a suspensão do leito é muito menor que nas outras granulometrias de areia, tornando-se necessária a troca do rotâmetro de 0-100 SCFH para um de 0-5 SCFH, onde se pode medir a vazão do ar.

Na cota 425 mm com a massa de 3.900g de areia, também não foi possível identificar os fenômenos de fluidização borbulhante, pois as partículas por serem muito finas tenderam a compactar, com sua porosidade bastante reduzida. Ao injetar-se ar variando sua vazão gradativamente, a altura do leito aumentou lentamente, ocorrendo um fenômeno que não fora visto anteriormente nos experimentos nas outras duas granulometrias de areia.

Na vazão próxima à vazão de ar necessária à suspensão do leito, ocorreu a formação de pequenas trincas ou rachaduras no leito, seguida do surgimento de um pequeno empistonamento, e seu desaparecimento instantâneo. Em seguida, houve a formação de um canal preferencial de escoamento do gás, após a velocidade do gás ser suficiente para expandir todas as partículas de areia e na superfície do leito a areia ficou sendo jorrada para cima.

No decorrer dos 50 minutos de duração deste teste, foi verificada nos termômetros a variação de 1°C na temperatura. A temperatura na saída do leito foi 26°C.

### **5.5.4 Experimentos com areia de praia bruta ( $\phi=0,044$ m, $D_p= 546,61$ $\mu\text{m}$ )**

Neste ensaio a fluidização ocorreu de forma normal nas cotas: 75, 125, 175 mm, mas não se visualizou a velocidade mínima de fluidização plenamente em cotas superiores, e na medida em que se eleva a vazão, ocorreu uma tendência de empistonamento do leito.

Já na cota 225 mm ocorreu o empistonamento do leito em vazões muito baixas, na medida em que se aumentou a cota do leito em estudo, mais rápido foi o aparecimento do pistão de ar no leito. Este empistonamento tendeu a sobrepor o estado de leito fluidizado borbulhante, ou seja, na medida em que se aumentou a cota em estudo, mais rápido se formou o pistão, tendo a faixa de leito fluidizado borbulhante menor, e chegando a não existir leito fluidizado borbulhante a partir de 225 mm.

### **Cota 0,075m**

Neste teste o objetivo foi o estudo fluidodinâmico da areia com  $D_p$  546,61  $\mu\text{m}$  como material inerte constituinte do leito fluidizado. E, para tal, o tubo de  $\phi$  0,044 m em estudo foi preenchido com 185 gramas de areia para preenchimento do leito até a cota 0,075m. A temperatura registrada no termopar tipo K instalado na entrada do ar no leito foi de 24°C.

O ensaio iniciou-se após a abertura da válvula e aumento gradativo da vazão do rotâmetro a pressão aumentou proporcionalmente ao acréscimo da vazão. Ao atingir a vazão de 0,00016  $\text{m}^3/\text{s}$  e pressão na coluna do leito na cota “zero” (no nível da placa distribuidora) de 110  $\text{mmH}_2\text{O}$  o leito começou a ser suspenso, ou seja, esta foi a vazão de ar necessária para superar o peso da areia contida no leito (Neste momento o aumento na altura do leito foi de 0,001 m).

Observa-se, que nesta vazão ocorre a formação de algumas bolhas muito pequenas na superfície do leito e notou-se que na região inferior do leito as partículas tenderam a ficar paradas.

Na vazão subsequente (0,00020  $\text{m}^3/\text{s}$ ) a pressão caiu para 101  $\text{mmH}_2\text{O}$  e foi percebido na superfície do leito que a areia expandida de 0,004 m começou a apresentar bolhas maiores e mais frequentes, caracterizando o regime de leito fluidizado borbulhante (Na zona inferior do leito as partículas começaram a se movimentar para cima). A partir desta vazão conforme se aumentou a vazão do ar, a pressão tendeu a permanecer constante, o leito continuou se expandindo e as bolhas aumentaram em quantidade e tamanho.

Foi fornecida ao leito a vazão máxima de 0,00043  $\text{m}^3/\text{s}$  de ar, observando-se uma pressão de 103  $\text{mmH}_2\text{O}$  e altura de desagregação do leito de 0,033 m, ou seja, a altura do leito atingida foi 0,108 m. A partir deste momento o leito se movimentou com mais vigor tendendo a transportar as partículas para a extremidade superior do experimento (Tendendo ao transporte pneumático).

Para este teste de cota 0,075 m, foram medidas as pressões na lateral do experimento, na altura 0,100 m.

No manômetro “U” instalado na cota 0,100 m, após alcançar a vazão de 0,00039 m<sup>3</sup>/s, observou-se uma pressão de 1 mmH<sub>2</sub>O. Na vazão posterior e máxima aplicada, a pressão subiu para 2 mmH<sub>2</sub>O.

Como foi atingido um regime de movimentação grande do leito (tendendo ao transporte), mesmo para vazões pequenas, passou-se a decrescer a vazão do gás. Neste decréscimo da vazão de 0,00043 m<sup>3</sup>/s até 0,00039 m<sup>3</sup>/s, a pressão permaneceu constante em 103 mmH<sub>2</sub>O e a altura do leito decresceu de 0,108 m a 0,100 m.

No intervalo de decréscimo de vazão de 0,00035 m<sup>3</sup>/s até 0,00024 m<sup>3</sup>/s, a pressão diminuiu lentamente (102 mmH<sub>2</sub>O para 100 mmH<sub>2</sub>O), e a altura do leito diminuiu de 0,095 m para 0,081 m.

Continuando a redução da vazão, a pressão começou a diminuir proporcionalmente a vazão, e a altura do leito permaneceu constante em 0,012 m de 0,00012 m<sup>3</sup>/s até atingir a vazão 0 m<sup>3</sup>/s (fechamento da válvula do rotâmetro).

No manômetro “U” instalado na cota 0,100 m, durante o decréscimo da vazão, de 0,00043 m<sup>3</sup>/s até 0,00039 m<sup>3</sup>/s, a pressão se manteve em 2 mmH<sub>2</sub>O, após isso, a pressão caiu para 0 mmH<sub>2</sub>O ao atingir 0,00035 m<sup>3</sup>/s. Ou seja, a partir da vazão 0,00035 m<sup>3</sup>/s o instrumento deixou de captar sinal de pressão.

No decorrer dos 50 minutos de duração deste teste, foi verificada nos termômetros a variação de 1°C na temperatura. A temperatura na saída do leito foi de 25°C.

Os testes feitos nas cotas 0,125 m e 0,175 m se comportaram de forma similar ao teste de 0,075 m, respeitando-se algumas diferenças, como por exemplo, um pico de pressão maior e uma expansão maior do leito para as cotas maiores. Outra diferença é que o nesta cota de 0,075 m ocorreu apenas uma tendência de transportar as partículas nas maiores vazões aplicadas, enquanto que nos testes das cotas 0,125 m e 0,175 m houve o empistonamento.

Pode-se ainda salientar que em todos os testes para esse diâmetro e estas cotas que as vazões empregadas foram pequenas, pois o leito entrava em regime borbulhante rapidamente e tendia a empistonar ou transportar o leito com poucos incrementos de vazão. Notou-se que a para cotas maiores o leito tendia a começar empistonar em uma vazão menor.

Os testes para esse diâmetro de 0,044 m e areia 546,61 µm foram bastante similares aos da areia de 321,02 µm com o mesmo diâmetro.

### **Cota 0,225m**

Neste teste o objetivo foi o estudo fluidodinâmico da areia com D<sub>p</sub> 546,61µm como material inerte constituinte do leito fluidizado. E, para tal, o tubo de φ 0,044 m em

estudo foi preenchido com 545 gramas de areia para preenchimento do leito até a cota 0,225m.

O ensaio iniciou-se após a abertura da válvula e aumento gradativo da vazão do rotâmetro a pressão aumentou proporcionalmente ao acréscimo da vazão.

No intervalo de vazão 0 m<sup>3</sup>/s até 0,00016 m<sup>3</sup>/s de o leito permaneceu fixo, aumentando apenas 0,001m na vazão de 0,00020 m<sup>3</sup>/s onde se obteve a maior pressão que foi de 541 mmH<sub>2</sub>O.

Na vazão de 0,00024 m<sup>3</sup>/s ocorreu uma maior altura de desagregação de 0,032 m. Notou-se a formação de um pistão de ar que passa pelo leito da cota “zero” até a sua superfície. Após isso, acima da cota 0,100 m o leito permaneceu fixo sem movimentação das partículas de areia. Enquanto isso, abaixo da cota 0,100 m existiu a movimentação de areia no leito.

Após isso, na vazão seguinte de 0,00028 m<sup>3</sup>/s o leito começou a empistonar (os pistões se formaram abaixo da cota 0,100 m, aproximadamente em 0,050 m).

Foi observada uma grande variação nos manômetros, à medida que o pistão de ar subiu carregando a areia, as colunas de água nos manômetros subiram, e quando o pistão de ar se desfez na superfície do leito a areia caiu e as colunas de água nos manômetros “U” desceram.

Portanto, não ocorreu a fluidização a partir desta cota 0,225 m, o leito apenas se expandiu e quando a pressão conseguiu vencer o peso do leito já ocorreu o empistonamento, não sendo visível a observação do estado de mínima fluidização e nem o de regime borbulhante.

Após o pico de pressão de 541 mmH<sub>2</sub>O na vazão de 0,00020 m<sup>3</sup>/s, a pressão caiu para a vazão ulterior e retorna a aumentar para vazões ainda maiores. E diferente dos testes anteriores onde era observado a mínima fluidização ou bolhas no leito, logo após o pico de pressão, para esse teste de cota de 0,225 m ocorreu o empistonamento.

### **5.5.5 Experimentos com areia de 45/50 mesh ( $\phi=0,044$ m, $D_p= 321,02$ $\mu$ m)**

Ref.: Cotas 0,075m, 0,125m, 0,175m, 0,225m, 0,275m, 0,325m, 0,375m, 0,425m e 0,475m.

Neste ensaio a fluidização ocorreu de forma normal nas cotas: 75, 125, 175 mm, mas não se visualizou a velocidade mínima de fluidização plenamente, e na medida em que se elevou a vazão, ocorreu a tendência de empistonamento do leito.

Já na cota 225 mm ocorreu o empistonamento do leito em vazões muito baixas. Na medida em que se aumentou a cota do leito em estudo, mais rápido foi o aparecimento do pistão de ar no leito. Este empistonamento tendeu a sobrepor o estado de leito fluidizado borbulhante, ou seja, na medida em que se aumentou a cota em estudo, mais rápido se formou o pistão, tendo a faixa de leito fluidizado borbulhante menor, e chegando a não existir leito fluidizado borbulhante a partir de 225 mm.

### **Cota 0,075m**

Neste teste o objetivo foi o estudo fluidodinâmico da areia com  $D_p$  321,02  $\mu\text{m}$  como material inerte constituinte do leito fluidizado. E, para tal, o tubo de  $\phi$  0,044 m em estudo foi preenchido com 195 gramas de areia para preenchimento do leito até a cota 0,075m.

A temperatura registrada no termopar tipo K instalado na entrada do ar no leito é de 26°C.

O ensaio iniciou-se após a abertura da válvula e aumento gradativo da vazão do rotâmetro a pressão aumentou proporcionalmente ao acréscimo da vazão. Ao atingir a vazão de 0,00012  $\text{m}^3/\text{s}$  e pressão na coluna do leito na cota “zero” (no nível da placa distribuidora) de 130  $\text{mmH}_2\text{O}$  o leito começou a ser suspenso, ou seja, esta foi a vazão de ar necessária para superar o peso da areia contida no leito (Neste momento o aumento na altura do leito foi de 0,005 m). Observou-se que nesta vazão o leito ainda permaneceu fixo, sem alterações visíveis.

Na vazão subsequente (0,00016  $\text{m}^3/\text{s}$ ) a pressão caiu para 117  $\text{mmH}_2\text{O}$  e foi percebido na superfície do leito que a areia expandida de 0,010 m começou a apresentar bolhas muito pequenas em sua superfície, notou-se ainda que na região inferior do leito as partículas tendiam a ficar paradas.

Incrementando a vazão novamente (0,00020  $\text{m}^3/\text{s}$ ) a pressão caiu novamente para 112  $\text{mmH}_2\text{O}$ . Observou-se que o leito apresentou bolhas maiores e mais frequentes, caracterizando o regime de leito fluidizado borbulhante (Na zona inferior do leito as partículas começaram a se movimentar para cima). A partir desta vazão conforme se aumentou a vazão do ar, a pressão tendeu a permanecer constante (variando entre os valores 107  $\text{mmH}_2\text{O}$ , 109  $\text{mmH}_2\text{O}$  e 112  $\text{mmH}_2\text{O}$ ) o leito continuou se expandindo e as bolhas aumentaram em quantidade e tamanho.

Foi fornecida ao leito a vazão máxima de 0,00043  $\text{m}^3/\text{s}$  de ar, observando-se uma pressão de 112  $\text{mmH}_2\text{O}$  e altura de desagregação do leito de 0,048 m, ou seja, a altura do leito atingida foi 0,112 m. A partir deste momento o leito se movimentou com mais vigor tendendo

a transportar as partículas para a extremidade superior do experimento (Tendendo ao transporte pneumático).

Para este teste de cota 0,075 m, foram medidas as pressões na lateral do experimento, na altura 0,100 m.

No manômetro “U” instalado na cota 0,100 m, após alcançar a vazão de 0,00035 m<sup>3</sup>/s, observou-se uma pressão de 1 mmH<sub>2</sub>O. Após isso, a pressão continuou a aumentar gradativamente com incremento de vazão (chegando a 5 mmH<sub>2</sub>O na vazão máxima aplicada).

Como foi atingido um regime de movimentação grande do leito, onde novos incrementos de vazão fariam o leito se movimentar muito e tender a transportar as partículas de areia, passou-se a decrescer a vazão do gás.

No intervalo de decréscimo de vazão de 0,00043 m<sup>3</sup>/s até 0,00024 m<sup>3</sup>/s, a pressão diminuiu lentamente (112 mmH<sub>2</sub>O para 104 mmH<sub>2</sub>O), e a altura do leito diminuiu de 0,123 m para 0,094 m.

Continuando a redução da vazão, a pressão começou a diminuir proporcionalmente à vazão, e a altura do leito permaneceu constante em 0,011 m de 0,00008 m<sup>3</sup>/s até atingir a vazão 0 m<sup>3</sup>/s (fechamento da válvula do rotâmetro).

No manômetro “U” instalado na cota 0,100 m, durante o decréscimo da vazão, de 0,00043 m<sup>3</sup>/s até 0,00035 m<sup>3</sup>/s, a pressão diminuiu gradativamente de 5 mmH<sub>2</sub>O para 2 mmH<sub>2</sub>O. A partir da vazão 0,00031 m<sup>3</sup>/s o instrumento deixou de captar sinal de pressão.

No decorrer dos 51 minutos de duração deste teste, foi verificada nos termômetros a variação de 1°C na temperatura. A temperatura na saída do leito foi 27°C.

Os testes feitos nas cotas 0,125 m e 0,175 m se comportaram de forma similar ao teste de 0,075 m, respeitando-se algumas diferenças, como por exemplo, um pico de pressão maior e uma altura de desagregação maior do leito para as cotas maiores.

Uma observação interessante é que na cota de 0,125 m ocorreu a passagem de um pistão de ar espesso (espessura aproximada de 0,003 m) do início do leito (nível da placa distribuidora) ao fim do leito (sua superfície), notou-se que a após a passagem desse pistão de ar as partículas do leito tenderam a ficar paradas.

Já no teste de cota 0,175 m destacou-se que as pressões nas laterais nas cotas 0,100 m e 0,150 m tenderam a se igualar, assumindo valores muito próximos durante a volta.

Ressalta-se que em todos os testes para esse diâmetro, em todas as cotas estudadas, as vazões aplicadas foram muito menores em relação ao experimento de diâmetro 0,090 m, pelo fato do leito entrar em regime borbulhante rapidamente e tender a empistonar ou transportar o leito com poucos incrementos de vazão.

Notou-se neste experimento que para cotas maiores o leito tendeu a iniciar o empistonamento em uma vazão menor em relação à cota anterior.

### **Cota 0,225m**

Neste teste o objetivo foi o estudo fluidodinâmico da areia com  $D_p$  321,02  $\mu\text{m}$  como material inerte constituinte do leito fluidizado. E, para tal, o tubo de  $\phi$  0,044 m em estudo foi preenchido com 555 gramas de areia para preenchimento do leito até a cota 0,225m.

O ensaio iniciou-se após a abertura da válvula e aumento gradativo da vazão do rotâmetro a pressão aumenta proporcionalmente ao acréscimo da vazão.

No intervalo de vazão 0  $\text{m}^3/\text{s}$  até 0,00020  $\text{m}^3/\text{s}$  de o leito permaneceu fixo. Na vazão de 0,00024  $\text{m}^3/\text{s}$  começou a ocorrer a expansão visível do leito (expansão de 0,026 m).

Na vazão de 0,00028  $\text{m}^3/\text{s}$  ocorreu a formação de um pistão de ar que passou pelo leito e o expandiu, neste momento ocorreu uma separação do leito, acima da cota 0,100 m o leito ficou fixo sendo sustentado por um pistão de ar que o separou da sua parte inferior. Enquanto isso, abaixo da cota 0,100 m existia a movimentação de areia no leito.

Após isso, na vazão seguinte de 0,00031  $\text{m}^3/\text{s}$  o pistão de ar percorreu o leito e se desfez juntando novamente as partículas do leito e então o leito começou a empistonar (os pistões se formaram abaixo da cota 0,100 m, aproximadamente em 0,050 m).

Foi observada uma grande variação nos manômetros, à medida que o pistão de ar subiu carregando as partículas de areia, as colunas de água nos manômetros subiram, e quando o pistão de ar se desfez na superfície do leito a areia caiu e as colunas de água nos manômetros “U” baixaram.

Portanto, não ocorreu a fluidização a partir desta de cota 0,225 m, o leito apenas se expandiu e quando a pressão conseguiu vencer o peso do leito já ocorreu o empistonamento, não sendo visível a observação do estado de mínima fluidização e nem o de regime borbulhante.

Após o pico de pressão de 547  $\text{mmH}_2\text{O}$  na vazão de 0,00020  $\text{m}^3/\text{s}$ , a pressão caiu para vazões um pouco maiores e retornou a aumentar para vazões ainda maiores. E diferentemente dos testes anteriores onde era observado a mínima fluidização ou bolhas no leito, logo após o pico de pressão, para esse teste de cota de 0,225 m ocorreu o empistonamento.

### **5.5.6 Experimentos com areia de 170/200 mesh ( $\phi = 0,044$ m, $D_p = 72,43$ $\mu\text{m}$ )**

#### **Cota 0,175m**

Neste teste o objetivo foi o estudo fluidodinâmico da areia com  $D_p$  72,43  $\mu\text{m}$  como material inerte constituinte do leito fluidizado. E, para tal, o tubo de  $\phi$  0,044 m em estudo foi preenchido com 385 gramas de areia para preenchimento do leito até a cota 0,175m. A temperatura registrada no termopar tipo K instalado na entrada do ar no leito foi de 25°C.

Em todas as cotas não ocorreu o fenômeno de leito fluidizado borbulhante, por este motivo, apresenta-se a descrição somente do teste na cota 175 mm.

Foi constatado que a vazão de ar necessária para a suspensão do leito foi muito menor que nas outras granulometrias de areia, sendo necessária a troca do rotâmetro de 0-100 SCFH para um de 0-5 SCFH, onde se pode medir a vazão do ar.

Na cota 175 mm com a massa de 385 g de areia, também não foi possível identificar os fenômenos de fluidização borbulhante, pois as partículas por serem muito finas tenderam a compactar, com sua porosidade bastante reduzida. Ao injetar-se ar variando sua vazão gradativamente, a altura do leito aumentou lentamente, ocorrendo um fenômeno que não fora visto anteriormente nos experimentos nas outras duas granulometrias de areia.

Na vazão próxima à vazão de ar necessária a suspensão do leito, que foi de 0,0008  $\text{m}^3/\text{s}$ , ocorreu a formação de um pistão de ar que suspende o leito, e separa o leito em duas partes. Na parte acima do pistão de ar o leito permanece fixo e na parte inferior a areia era jorrada para cima.

Em seguida, o pistão de ar percorreu o leito, se desfazendo em sua superfície, com isso as duas partes do leito se uniram novamente e houve a acomodação do leito seguida da formação de um canal preferencial de escoamento do gás, após a velocidade do gás ser suficiente para suspender todas as partículas de areia e na superfície do leito a areia ficou sendo jorrada para cima.

No decorrer dos 10 minutos de duração deste teste, foi verificada nos termômetros a variação de 1°C na temperatura. A temperatura na saída do leito foi de 26°C.

## **5.6 Preparação do Material Constituinte do Leito Binário (Areia e C.C.C.) (trituração, peneiramento e classificação da biomassa)**

A casca de castanha de caju foi adquirida em uma empresa local que exerce a atividade de beneficiamento da castanha de caju. A preparação das cascas foi feita da seguinte forma: a casca de castanha de caju adquirida (casca grossa, resíduo do processo agroindustrial) foi introduzida em um triturador industrial de alimentos de 2 litros. 1/2 HP (modelo TR2 - Croydon), peneirada manualmente, usando telas de 14, 20 e 45 mesh (norma ASTM). Logo, as duas faixas de granulometria da C.C.C. utilizadas nos experimentos são: 14-20 e 20-45 mesh.

Não foi possível realizar ensaio de granulometria pelo fato de que o Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes da Universidade Federal do Ceará - UFC, ter tido vários problemas em seus equipamentos por conta do LCC contido na casca. O foco desta pesquisa foi construir as curvas fluidodinâmicas de cada experimento realizado, comparando uma com as outras e, também, para a casca de castanha adicionada à areia.

Durante os testes, com o auxílio de um computador, foram registrados todos os dados e observações de cada teste. Uma vez que finalizados os testes na bancada de pesquisa, foi redigido um relatório sobre tudo o que foi observado durante os experimentos. Em sequência, os dados obtidos foram trabalhados gerando gráficos, para melhor análise das informações desta pesquisa. Após a análise dos gráficos, foram comparadas as informações obtidas experimentalmente com os valores esperados pelos cálculos teóricos.

### **Peneiramento:**

Depois de trituração a casca foi peneirada manualmente através do uso de telas metálicas da marca Produtest que obedecem à norma ASTM de 14, 20 e 45 mesh. As duas faixas de granulometria da C.C.C. são: 14-20 mesh ASTM (1405  $\mu\text{m}$  - 850  $\mu\text{m}$ ) e 20-45 mesh ASTM. (850  $\mu\text{m}$  - 355  $\mu\text{m}$ ).

### **Controle de condicionamento:**

A casca de castanha de caju triturada e classificada foi armazenada em recipientes hermeticamente fechados, buscando-se evitar ao máximo a exposição deste material destinado aos testes desta pesquisa a umidade ou contaminação por poeiras ou outro tipo de material, bem como também proteger de pequenos insetos.

### **Peso e uniformidade do leito.**

Antes de utilizadas nos experimentos, as cascas de castanha de caju classificadas nas faixas granulométricas de 1405-850 ( $\mu\text{m}$ ) e 850-355 ( $\mu\text{m}$ ) foram pesadas na balança digital.

A Tabela 11 resume os parâmetros fluidodinâmicos dos dois materiais utilizados nesta pesquisa.

**Tabela 11 - Parâmetros fluidodinâmicos dos componentes do leito.**

Material	Diâmetro Médio	Densidade $\rho$	Porosidade $\epsilon$	Esfericidade $\Phi$	Categoria de Geldart (1986)
	( $\mu\text{m}$ )	( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	%		
Areia de Sílica	546,611	2.666	41.25	0.86	B
	321,023		38.33	0.86	B
	72,432		32.50	0.86	A
Casca de Castanha de Caju	1405-850	1.012	-	-	D
	850-355		-	-	B

### **5.6.1 Relatos de Experimentos com Areia e Biomassa**

A partir do que foi observado no teste do experimento com diâmetro 0,090 m , areia de praia, diâmetro médio  $D_p$  546,61  $\mu\text{m}$ , preenchido até a cota 0,425 m. Esta quantidade de areia no leito apresentou consideráveis informações, tais como altura de expansão do leito, inversão entre as pressões após a fluidização nas cotas 0,150m e 0,100m que levaram a estudar a influencia da inserção de C.C.C.

#### **5.6.1.1 Experimento com diâmetro $\phi = 0,090$ m, areia de praia, diâmetro médio $D_p$ 546,61 $\mu\text{m}$ .**

##### **Cota 0,425m**

##### **Concentração de C.C.C. com 124g e granulometria 14-20 mesh ASTM (1405 $\mu\text{m}$ - 850 $\mu\text{m}$ ).**

Neste teste, o objetivo foi o estudo fluidodinâmico da areia com  $D_p=546,61$   $\mu\text{m}$  como material inerte constituinte do leito fluidizado. E, para tal, o tubo de  $\phi=0,090$  m em estudo foi preenchido com 4.225 gramas de areia e C.C.C. (1405  $\mu\text{m}$  a 850  $\mu\text{m}$ ) misturadas

para preenchimento do leito até a cota 0,425m. A temperatura registrada no termopar tipo K instalado na entrada do ar no leito foi de 24°C.

O ensaio iniciou-se após a abertura da válvula e o aumento gradativo da vazão do rotâmetro a pressão aumentou proporcionalmente ao acréscimo da vazão. Ao atingir a vazão de 0,00039 m<sup>3</sup>/s e pressão de 679 mmH<sub>2</sub>O na coluna do leito na cota “zero” (no nível da placa distribuidora), o leito começou a ser suspenso (aumento de 0,001 m). Observou-se que ao chegar à vazão de 0,00047 m<sup>3</sup>/s atingiu-se a pressão máxima de 866 mmH<sub>2</sub>O, ou seja, esta foi a vazão de ar necessária para superar o peso da areia contida no leito, neste ponto a variação da altura foi de 0,003m correspondente a 0,428 m de altura do leito.

Após isso, a pressão decresceu com incrementos na vazão atingindo 630 mmH<sub>2</sub>O na vazão 0,00055 m<sup>3</sup>/s, o leito se ficou com altura de desagregação de 0,035 m. Nesse momento houve a formação de um pistão de ar (localizado próximo a cota 0,450 m) que suspende a parte de cima do leito com alta concentração de casca de castanha de caju (região próxima da superfície).

Em seguida a pressão voltou a crescer com o aumento na vazão, atingindo uma pressão de 697 mmH<sub>2</sub>O, na vazão 0,00063 m<sup>3</sup>/s. O leito se encontrava com altura de desagregação de 0,036 m, com altura correspondente de 0,461 m.

Após isso a pressão tendeu a diminuir com o incremento de vazão, com exceção de um aumento para 670 mmH<sub>2</sub>O, na vazão 0,00070 m<sup>3</sup>/s. O pistão de ar se desfez e o leito permanece fixo, apresentando apenas um canal preferencial onde se forma um pequeno leito fluidizado numa região pequena próxima a parede do tubo, enquanto o resto da superfície do leito permaneceu estática. Observou-se ainda que a maior parte da C.C.C. está na região próxima à superfície do leito, portanto não ocorreu a fluidização plena do leito.

Na vazão máxima aplicada que foi de 0,00083 m<sup>3</sup>/s, o leito apresentou uma pressão de 650 mmH<sub>2</sub>O. Neste momento o leito estava com altura de desagregação de 0,075 m.

Para este teste de cota 0,425 m, foram medidas as pressões na lateral do experimento, nas alturas 0,100 m, 0,150 m, 0,200 m, 0,250 m, 0,300m, 0,350m, 0,400m e 0,450m.

Nos manômetros “U” instalado nas cotas 0,100 m, 0,150 m, 0,200 m, 0,250 m, 0,300 m e 0,350 m as pressões aumentaram continuamente com o incremento de vazão, atingindo seus valores máximos na vazão 0,00083 m<sup>3</sup>/s. Após isso a pressão caiu com alguns incrementos de vazão e depois tendeu a crescer com algumas oscilações, até a vazão máxima.

No manômetro “U” instalado na cota 0,400 m, a pressão aumentou continuamente com o incremento de vazão, de 0 mmH<sub>2</sub>O a 212 mmH<sub>2</sub>O, no intervalo de vazão de 0 m<sup>3</sup>/s a

0,00043 m<sup>3</sup>/s, após isso a pressão decresceu e voltou a crescer, com várias oscilações, atingindo 242 mmH<sub>2</sub>O na vazão máxima.

No manômetro “U” instalado na cota 0,350 m, a pressão aumentou continuamente com o incremento de vazão, com exceção de um pequeno decréscimo. Foi atingida a pressão de 42 mmH<sub>2</sub>O na vazão máxima aplicada.

No manômetro “U” instalado nas cotas 0,450 m, após alcançar a vazão de 0,00055 m<sup>3</sup>/s, observou-se uma pressão de 1 mmH<sub>2</sub>O. A partir desta vazão, a pressão sobe continuamente até atingir 33 mmH<sub>2</sub>O na vazão máxima aplicada.

Após a vazão máxima aplicada, passou-se a decrescer a vazão do gás. Neste decréscimo da vazão de 0,00083 m<sup>3</sup>/s até 0,00071 m<sup>3</sup>/s, a pressão decresceu lentamente de 650mmH<sub>2</sub>O para 628 mmH<sub>2</sub>O, a altura do leito diminuiu de 0,500 m para 0,477 m ( $\Delta H=0,023$  m).

Continuando a redução da vazão a pressão subiu repentinamente, isto é, ocorreu um pequeno aumento, e no intervalo de 0,00067 m<sup>3</sup>/s até atingir a vazão 0 m<sup>3</sup>/s, a pressão caiu proporcionalmente à vazão de 530 mmH<sub>2</sub>O para 0 mmH<sub>2</sub>O. A altura do leito decresceu até atingir a cota 0,460 m na vazão 0,00031 m<sup>3</sup>/s e permaneceu constante até a vazão 0 m<sup>3</sup>/s, ficando o leito expandido de 0,035 m.

Nos manômetros “U” instalados nas laterais do tubo, nas cotas 0,100 m, 0,150 m, 0,200 m, 0,250 m, 0,300 m, 0,350 m e 0,400 m, durante este decréscimo, de 0,00083 m<sup>3</sup>/s até 0 m<sup>3</sup>/s, as suas pressões diminuíram gradativamente com pequenas oscilações atingindo 0 mmH<sub>2</sub>O, cada um.

No manômetro “U” instalado na cota 0,450 m, durante este decréscimo, no intervalo de 0,00083 m<sup>3</sup>/s 0,00039 m<sup>3</sup>/s, a pressão decresceu de 33 mmH<sub>2</sub>O para 2 mmH<sub>2</sub>O e a partir da vazão 0,00035 m<sup>3</sup>/s o instrumento deixou de captar sinal de pressão.

No decorrer dos 90 minutos de duração deste teste, foi verificada nos termômetros a variação de 1°C na temperatura. A temperatura na saída do leito foi 25°C.

### **Concentração de C.C.C. com 166g e granulometria 14-20 mesh ASTM (1405 $\mu$ m - 850 $\mu$ m).**

Neste teste, o objetivo foi o estudo fluidodinâmico da areia com  $D_p=546,61$   $\mu$ m como material inerte constituinte do leito fluidizado. E, para tal, o tubo de  $\phi=0,090$  m em estudo foi preenchido com 4.227 gramas de areia e C.C.C. (1405  $\mu$ m a 850  $\mu$ m) misturadas para preenchimento do leito até a cota 0,425m. A temperatura registrada no termopar tipo K instalado na entrada do ar no leito foi de 24°C.

O ensaio iniciou-se após a abertura da válvula e o aumento gradativo da vazão do rotâmetro, a pressão aumentou proporcionalmente ao acréscimo da vazão. Ao atingir a vazão de  $0,00039 \text{ m}^3/\text{s}$  e pressão de  $697 \text{ mmH}_2\text{O}$  na coluna do leito na cota “zero” (no nível da placa distribuidora), o leito começou a ser suspenso (aumento de  $0,001 \text{ m}$ ).

Observou-se que ao chegar à vazão de  $0,00043 \text{ m}^3/\text{s}$  atingiu-se a pressão máxima de  $803 \text{ mmH}_2\text{O}$ , ou seja, esta foi a vazão de ar necessária para superar o peso da areia contida no leito, neste ponto a variação da altura foi de  $0,005 \text{ m}$  correspondente a  $0,430 \text{ m}$  de altura do leito. Neste momento o ar formou pequenos canais por onde o ar escoou com mais facilidade.

Após isso, no incremento de vazão seguinte ( $0,00047 \text{ m}^3/\text{s}$ ) a pressão caiu para  $638 \text{ mmH}_2\text{O}$ , nesse momento o leito se encontrou com altura de desagregação de  $0,027 \text{ m}$ . Não foi observado a fluidização plenamente como nos experimentos anteriores com a ausência de C.C.C. , onde após o pico de pressão notavam-se as partículas constituintes do leito se moverem em sua superfície como um líquido em ebulição.

Na vazão  $0,00051 \text{ m}^3/\text{s}$  a pressão aumentou para  $645 \text{ mmH}_2\text{O}$ , observou-se a formação de pequenas bolsas de ar que suspenderam o leito segurando-o, foi percebido também que entre a cota  $0 \text{ m}$  e  $0,150 \text{ m}$  existiam várias fendas e canais.

Com um novo incremento de vazão para  $0,00055 \text{ m}^3/\text{s}$  a pressão cresceu novamente e atingiu  $715 \text{ mmH}_2\text{O}$ , apresentou-se na cota  $0,150 \text{ m}$  a formação de um pistão integral que suspendeu e sustentou a parte superior do leito.

Na vazão subsequente que é de  $0,00059 \text{ m}^3/\text{s}$  a pressão decresceu um pouco atingindo  $705 \text{ mmH}_2\text{O}$ , o leito ficou com altura de desagregação de  $0,040 \text{ m}$  e o pistão de ar se desfez. No mesmo local onde havia o pistão de ar percebeu-se que o leito ficou semelhante a um fluido em ebulição e as partículas de C.C.C. foram carregadas para a superfície do leito.

No intervalo de vazão compreendido entre  $0,00063 \text{ m}^3/\text{s}$   $0,00071 \text{ m}^3/\text{s}$  a pressão que havia caído para  $616 \text{ mmH}_2\text{O}$  cresceu até  $645 \text{ mmH}_2\text{O}$ , o leito continuou se expandindo (a variação no leito aumentou de  $0,047 \text{ m}$  para  $0,060 \text{ m}$ ) e não se percebeu bolhas na superfície do leito. Na vazão ulterior de  $0,00075 \text{ m}^3/\text{s}$  a pressão voltou cair para  $629 \text{ mmH}_2\text{O}$ , nesse momento começaram a surgir as primeiras bolhas na superfície do leito.

No intervalo de vazão compreendido entre  $0,00079 \text{ m}^3/\text{s}$   $0,00087 \text{ m}^3/\text{s}$ , o leito continuou a se expandir, enquanto a pressão oscilou entre os valores  $637 \text{ mmH}_2\text{O}$  e  $629 \text{ mmH}_2\text{O}$ . Notou-se que as partículas estavam sendo carregadas para a superfície do leito que se encontrava em regime de leito fluidizado borbulhante, porém esse regime não foi pleno porque em alguns momentos o leito se acomodava.

Continuando a aumentar à vazão a pressão continuou a oscilar variando entre os valores máximo de  $650 \text{ mmH}_2\text{O}$  e mínimo de  $628 \text{ mmH}_2\text{O}$ . Na vazão subsequente que foi de

0,00098 m<sup>3</sup>/s, apesar do leito se encontrar em regime de leito fluidizado borbulhante, em alguns momentos formavam-se pistões. A maior parte das partículas de C.C.C. encontravam-se próximas à superfície do leito e com o borbulhamento muitas destas voltavam para a parte inferior do leito, ocorrendo uma circulação das mesmas no leito.

Como a granulometria e densidade da C.C.C. e da areia são diferentes ocorreu a formação de canais por onde o ar passou, causando resistência ao leito fluidizado borbulhante. Foi percebido ainda, que o leito tendeu a se acomodar tornando-se um fenômeno contrário ao borbulhamento, e em alguns momentos as bolhas formadas no interior conseguiam vencer essa acomodação do leito.

Com o tempo observou-se que o leito tendeu a se acomodar, sendo visualizada uma porosidade nesta mistura binária onde o ar conseguiu fluir da placa distribuidora ao topo do leito, deixando o leito estático (sem movimentar as partículas constituintes do leito). Foi observado que quanto maior a vazão menor é essa tendência do leito se acomodar, pois as bolhas ficavam maiores e mais frequentes. A vazão mínima para que não ocorresse essa acomodação foi a vazão máxima aplicada de 0,00114 m<sup>3</sup>/s com pressão correspondente de 646 mmH<sub>2</sub>O. Neste momento o leito estava com altura de desagregação de 0,120m.

Para este teste de cota 0,425 m, foram medidas as pressões na lateral do experimento, nas alturas 0,100 m, 0,150 m, 0,200 m, 0,250 m, 0,300m, 0,350m, 0,400m, 0,450m e 0,500 m.

Nos manômetros “U” instalados nas cotas 0,100 m e 0,200 m a pressão aumentou continuamente com o incremento de vazão, de 0 mmH<sub>2</sub>O a 580 mmH<sub>2</sub>O e de 0 mmH<sub>2</sub>O a 419 mmH<sub>2</sub>O, respectivamente, no intervalo de vazão de 0 m<sup>3</sup>/s a 0,00043 m<sup>3</sup>/s, após isso a pressão tendeu a decrescer com várias oscilações, atingindo 444 mmH<sub>2</sub>O e 347 mmH<sub>2</sub>O na vazão máxima.

Nos manômetros “U” instalado nas cotas 0,150 m e 0,250 m a pressão aumentou continuamente com o incremento de vazão, de 0 mmH<sub>2</sub>O a 437 mmH<sub>2</sub>O, e de 0 mmH<sub>2</sub>O a 288 mmH<sub>2</sub>O, respectivamente, no intervalo de vazão de 0 m<sup>3</sup>/s a 0,00039 m<sup>3</sup>/s, após isso a pressão tendeu a decrescer com várias oscilações, atingindo 332 mmH<sub>2</sub>O e 269 mmH<sub>2</sub>O na vazão máxima.

Observou-se nesta subida de pressão, que a partir da vazão 0,00043 m<sup>3</sup>/s a pressão no sensor instalado na cota 0,200 m subiu muito, ultrapassando a pressão medida no sensor de cota 0,150 m, a partir deste ponto a pressão em 0,200 m se manteve maior que em 0,150 m. ***Esta é a inversão de pressões observada neste teste.***

No manômetro “U” instalado na cota 0,300 m, a pressão aumentou continuamente com o incremento de vazão, de 0 mmH<sub>2</sub>O a 212 mmH<sub>2</sub>O , no intervalo de vazão de 0 m<sup>3</sup>/s a

0,00043 m<sup>3</sup>/s, após isso a pressão decresceu e voltou a crescer, com várias oscilações, atingindo 242 mmH<sub>2</sub>O na vazão máxima.

No manômetro “U” instalado na cota 0,350 m, a pressão aumentou continuamente com o incremento de vazão, de 0 mmH<sub>2</sub>O a 121 mmH<sub>2</sub>O, no intervalo de vazão de 0 m<sup>3</sup>/s a 0,00039 m<sup>3</sup>/s, após isso a pressão decresceu e voltou a crescer, com várias oscilações, atingindo 150 mmH<sub>2</sub>O na vazão máxima.

No manômetro “U” instalado na cota 0,400 m, a pressão aumentou gradativamente, com algumas oscilações, no intervalo de vazão de 0 m<sup>3</sup>/s a 0,00114 m<sup>3</sup>/s, e atingiu 90 mmH<sub>2</sub>O na vazão máxima aplicada.

Nos manômetros “U” instalados nas cotas 0,450 m e 0,500 m, após alcançar a vazão de 0,00059 m<sup>3</sup>/s e 0,00098 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, observou-se uma pressão de 6 mmH<sub>2</sub>O e 7 mmH<sub>2</sub>O, respectivamente. A partir desta vazão, a pressão subiu continuamente até atingir 76 mmH<sub>2</sub>O e 23 mmH<sub>2</sub>O, respectivamente, na vazão máxima aplicada.

Como foi atingido o regime de borbulhamento pleno, isto é sem a acomodação do leito, passou-se a decrescer a vazão do gás. Neste decréscimo da vazão de 0,00114 m<sup>3</sup>/s até 0,00083 m<sup>3</sup>/s, a pressão decresceu continuamente de 646 mmH<sub>2</sub>O para 556 mmH<sub>2</sub>O, a altura do leito diminuiu de 0,545 m para 0,503 m ( $\Delta H=0,042$  m).

Continuando a redução da vazão a pressão subiu repentinamente, isto é, ocorreu um pico, e no intervalo de 0,00099 m<sup>3</sup>/s até atingir a vazão 0 m<sup>3</sup>/s, a pressão caiu proporcionalmente à vazão de 576 mmH<sub>2</sub>O para 0 mmH<sub>2</sub>O. A altura do leito decresceu até atingir a cota 0,477 m na vazão 0,00016 m<sup>3</sup>/s e permaneceu constante até a vazão 0 m<sup>3</sup>/s, ficando o leito expandido de 0,052 m.

Nos manômetros “U” instalados nas laterais do tubo, nas cotas 0,100 m, 0,150 m, 0,200 m, 0,250 m, 0,300 m, 0,350 m, 0,400 m e 0,450 m, durante este decréscimo, de 0,00114 m<sup>3</sup>/s até 0 m<sup>3</sup>/s, as suas pressões diminuíram gradativamente com pequenas oscilações atingindo 0 mmH<sub>2</sub>O, cada um.

***Observa-se que nos manômetros “U” instalados nas cotas 0,150 m e 0,200 m, as pressões mantiveram-se invertidas, durante todo o decréscimo da vazão.***

No manômetro “U” instalado na cota 0,500 m, durante este decréscimo, no intervalo de 0,00114 m<sup>3</sup>/s a 0,00079 m<sup>3</sup>/s, a pressão decresceu de 23 mmH<sub>2</sub>O para 1 mmH<sub>2</sub>O e a partir da vazão 0,00075 m<sup>3</sup>/s o instrumento deixou de captar sinal de pressão.

No decorrer dos 218 minutos de duração deste teste, foi verificada nos termômetros a variação de 1°C na temperatura. A temperatura na saída do leito foi de 25°C.

**Concentração de C.C.C. com 124g e granulometria 20-45 mesh ASTM (850  $\mu$ m - 355  $\mu$ m).**

Neste teste, o objetivo foi o estudo fluidodinâmico da areia com  $D_p=546,61 \mu\text{m}$  como material inerte constituinte do leito fluidizado. E, para tal, o tubo de  $\phi=0,090 \text{ m}$  em estudo foi preenchido com 4.155 gramas de areia e C.C.C. ( $850 \mu\text{m}$  a  $355 \mu\text{m}$ ) misturadas para preenchimento do leito até a cota 0,425m. A temperatura registrada no termopar tipo K instalado na entrada do ar no leito é de  $24^\circ\text{C}$ . No intervalo de vazão de  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $0,00059 \text{ m}^3/\text{s}$  o leito permaneceu fixo, apresentando apenas a formação de algumas fendas e canais. O pico de pressão de  $927 \text{ mmH}_2\text{O}$  ocorreu na vazão  $0,00051 \text{ m}^3/\text{s}$  e foi seguida de um decréscimo e um aumento de pressão.

Ao atingir a vazão de  $0,00063 \text{ m}^3/\text{s}$  ocorreu uma queda brusca de pressão ( $685 \text{ mmH}_2\text{O}$ ), devido a formação de um pistão de ar (entre as cotas  $0,300 \text{ m}$  e  $0,350 \text{ m}$ ) que suspendeu e sustentou o leito ( $\Delta H = 0,060 \text{ m}$ ).

Na vazão ulterior,  $0,00067 \text{ m}^3/\text{s}$ , o pistão de ar se desfez e o leito permaneceu fixo, apresentando apenas fendas e canais preferenciais por onde o ar escoou sem movimentar o leito. ( $\Delta H = 0,054 \text{ m}$ ) Apresentou uma altura de desagregação menor do leito pois o pistão não está mais levantando a areia.

O leito permaneceu fixo até atingir a vazão de  $0,00094 \text{ m}^3/\text{s}$  onde começa a se formar bolhas e apresentar um regime de leito fluidizado borbulhante. Neste momento o leito estava com altura de desagregação de  $0,097 \text{ m}$  e a pressão na cota zero foi de  $630 \text{ mmH}_2\text{O}$ . A vazão máxima aplicada nesse teste foi de  $0,00102 \text{ m}^3/\text{s}$ , neste momento o leito borbulhou com mais vigor.

### **Concentração de C.C.C. com 166g e granulometria 20-45 mesh ASTM ( $850 \mu\text{m}$ - $355 \mu\text{m}$ ).**

Neste teste, o objetivo foi o estudo fluidodinâmico da areia com  $D_p=546,61 \mu\text{m}$  como material inerte constituinte do leito fluidizado. E, para tal, o tubo de  $\phi=0,090 \text{ m}$  em estudo foi preenchido com 4.107 gramas de areia e C.C.C. ( $850 \mu\text{m}$  a  $355 \mu\text{m}$ ) misturadas para preenchimento do leito até a cota 0,425m. A temperatura registrada no termopar tipo K instalado na entrada do ar no leito foi de  $24^\circ\text{C}$ .

Em relação ao teste com mesma granulometria de C.C.C. e uma concentração maior, este experimento apresentou mais resistência à formação de bolhas, e uma tendência maior a formar fendas e canais preferenciais.

Os testes feitos nas para uma granulometria menor de casca de castanha de caju se comportaram de forma similar aos com uma granulometria maior de C.C.C. Uma diferença importante é que para uma granulometria menor, a casca de castanha tendeu a se misturar

mais com areia no leito do que a ser carregada, enquanto que com uma granulometria maior a C.C.C. tendia a ser transportada para a superfície do leito com menor dificuldade.

Deve ser enfatizado ainda, que o leito borbulhou mais facilmente sem tender a se acomodar nos teste com granulometria menor de C.C.C.. Foi notório que em todos os testes feitos com a biomassa, que a C.C.C. ofereceu uma resistência ao leito fluidizado e não foi visualizado o regime de mínima fluidização.

# CAPÍTULO 6 – ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 6.1 - Análise de Experimentos

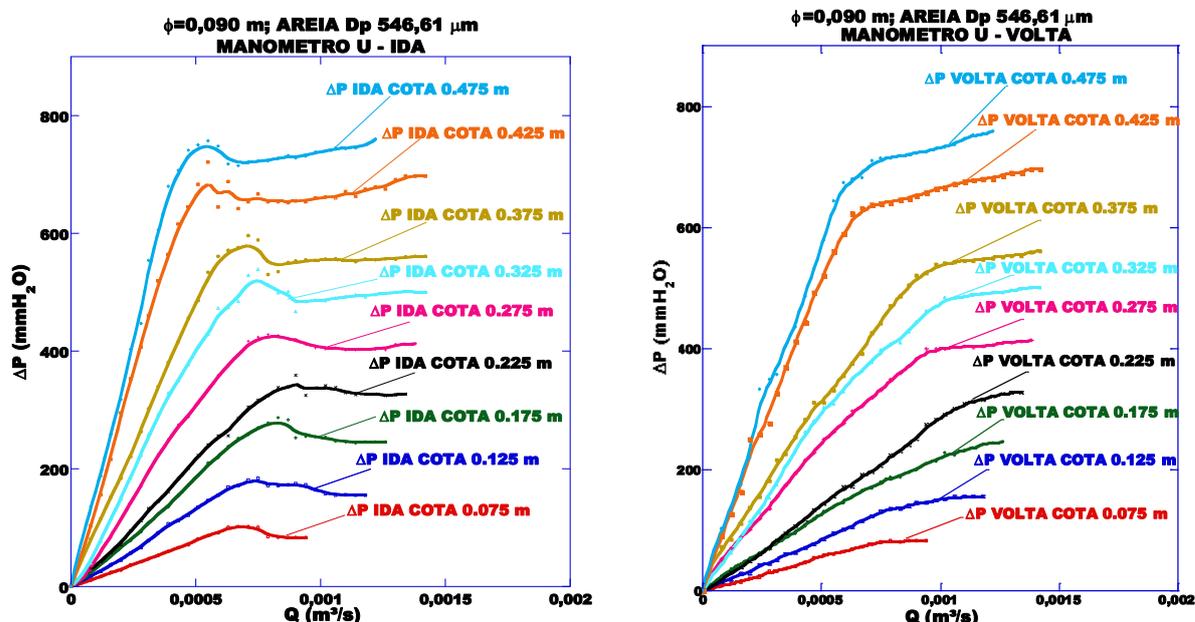
**Experimento com diâmetro  $\phi = 0,090$  m, areia de praia bruta, diâmetro médio  $D_p = 546,61 \mu\text{m}$ .**

Para uma melhor compreensão e análise dos relatos dos experimentos, os dados adquiridos foram organizados em gráficos e tabelas.

Em um primeiro momento, são demonstrados os resultados das curvas fluidodinâmicas dos testes realizados plotados em gráficos de “ $\Delta P$ ” (mmH<sub>2</sub>O) versus “ $Q$ ” (m<sup>3</sup>/s), seguidas dos gráficos de “ $\Delta P/L$ ” (mmH<sub>2</sub>O/mm) versus “ $u$ ” (cm/s). E, finalmente, resultados da expansão do leito plotados em gráficos de “ $\Delta H$ ” (mm) versus “ $Q$ ” (m<sup>3</sup>/s).

**Experimento com diâmetro  $\phi = 0,090$  m e areia  $D_p = 546,61 \mu\text{m}$ . (sensor instalado na cota 0,0 m ou Ponto P<sub>0</sub>).**

Figura 16 – Gráfico de  $\Delta P$  (mmH<sub>2</sub>O) versus  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) na ida e na volta do experimento com  $\phi = 0,090$  m e areia  $D_p = 546,61 \mu\text{m}$ .



A Figura 16 mostra a curva fluidodinâmica para os testes no experimento de diâmetro 0,090 m ( $\Delta P$  versus  $Q$ ), de cada cota preenchida com areia bruta ( $D_p = 546,61 \mu\text{m}$ ). O valor do  $\Delta P$  é medido no nível da placa distribuidora, isto é, na base do experimento (cota

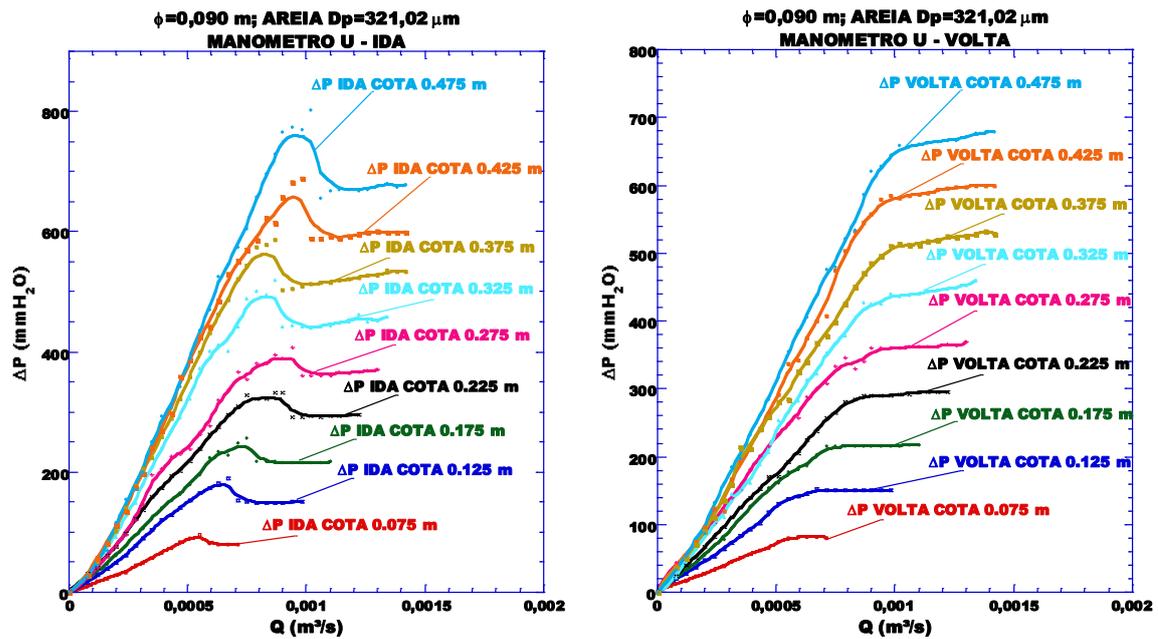
0,0 m). Em outras palavras, esta figura mostra a curva fluidodinâmica para cada cota (0,075 0,475 m), com o sensor de pressão instalado na base (cota 0,0 m).

Observa-se no gráfico de ida de  $\Delta P$  versus  $Q$  que as curvas fluidodinâmicas de cada cota são diferenciadas, pois com o incremento de massa para preenchimento de cada cota posterior, há uma tendência da queda de pressão no leito aumentar conforme se aumenta a massa. A vazão necessária para expandir o leito (vazão de ar em que a queda de pressão é máxima) aumenta conforme se aumenta a massa.

No gráfico da volta de  $\Delta P$  versus  $Q$  as curvas fluidodinâmicas, as quedas de pressões decrescem, obedecendo a uma sequência de maior cota para a menor.

**Experimento com diâmetro  $\phi = 0,090$  m e areia  $D_p = 321,02 \mu\text{m}$ . (sensor instalado na Cota 0,0 m ou Ponto  $P_0$ ).**

Figura 17 – Gráfico de  $\Delta P$  ( $\text{mmH}_2\text{O}$ ) versus  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) na ida e na volta do experimento com  $\phi = 0,090$  m e areia  $D_p = 321,02 \mu\text{m}$



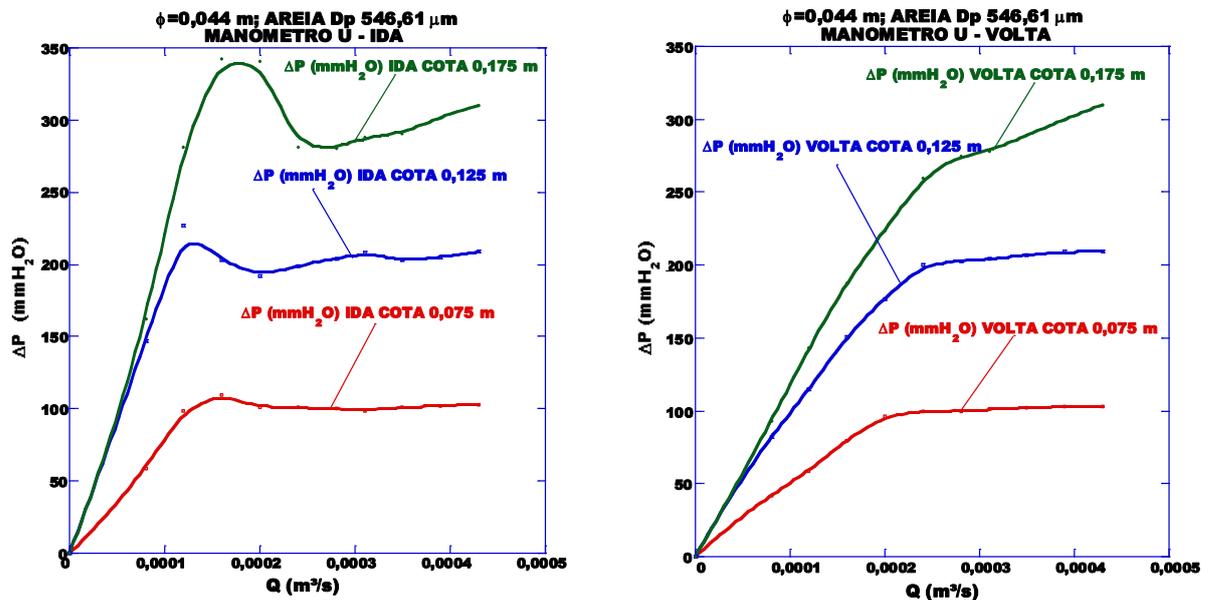
A Figura 17 mostra a curva fluidodinâmica para os testes no experimento de diâmetro 0,090 m ( $\Delta P$  versus  $Q$ ), de cada cota preenchida com areia de  $D_p = 321,02 \mu\text{m}$ .

Observa-se no gráfico de ida de  $\Delta P$  versus  $Q$  que as curvas fluidodinâmicas de cada cota são diferenciadas, pois com o incremento de massa para preenchimento de cada cota posterior, há uma tendência da queda de pressão no leito aumentar conforme se aumenta a massa de forma proporcional, apresentando um perfil de distribuição de pressão bem uniforme para cada cota de altura do leito.

Nos gráficos da volta de  $\Delta P$  versus  $Q$  as curvas fluidodinâmicas, assim como nos gráficos da ida, as quedas de pressão decrescem, obedecendo a uma sequência de maior cota para a menor, de forma comportada.

**Experimento com diâmetro  $\phi = 0,044$  m e areia bruta com  $D_p = 546,61$   $\mu\text{m}$ . (sensor instalado na Cota 0,0 m ou Ponto  $P_0$ ).**

Figura 18 – Gráfico de  $\Delta P$  ( $\text{mmH}_2\text{O}$ ) versus  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) na ida e na volta do experimento com  $\phi = 0,044$  m e areia  $D_p = 546,601$   $\mu\text{m}$ .



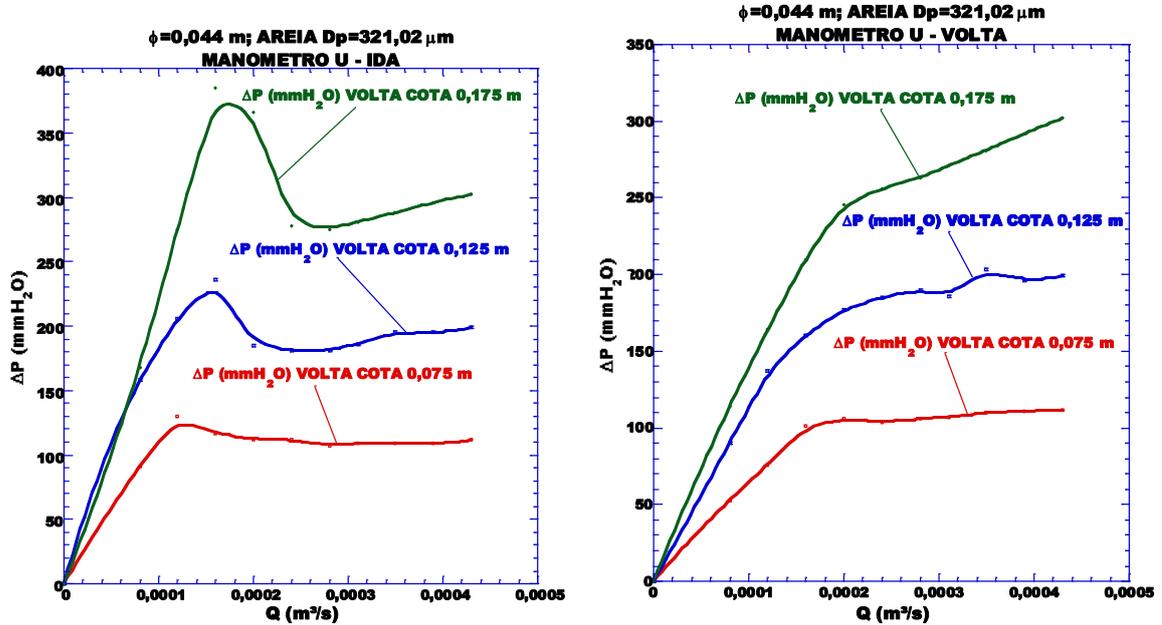
A Figura 18 mostra a curva fluidodinâmica para os testes no experimento de diâmetro 0,044 m ( $\Delta P$  versus  $Q$ ), de cada cota preenchida com areia bruta ( $D_p = 546,61$   $\mu\text{m}$ ).

Observa-se no gráfico de ida de  $\Delta P$  versus  $Q$  que as curvas fluidodinâmicas de cada cota são diferenciadas, pois com o incremento de massa para preenchimento de cada cota posterior, é observado que há uma tendência da queda de pressão no leito aumentar conforme se aumenta a massa.

Nos gráficos da volta de  $\Delta P$  versus  $Q$  das curvas fluidodinâmicas, as quedas de pressão decrescem, obedecendo a uma sequência de maior cota para a menor de forma proporcional.

**Experimento com diâmetro  $\phi = 0,044$  m e areia  $D_p = 321,02 \mu\text{m}$ . (sensor instalado na Cota 0,0 m ou Ponto  $P_0$ ).**

Figura 19 – Gráfico de  $\Delta P$  ( $\text{mmH}_2\text{O}$ ) versus  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) na ida e na volta do experimento com  $\phi = 0,044$  m e areia  $D_p = 321,02 \mu\text{m}$ .



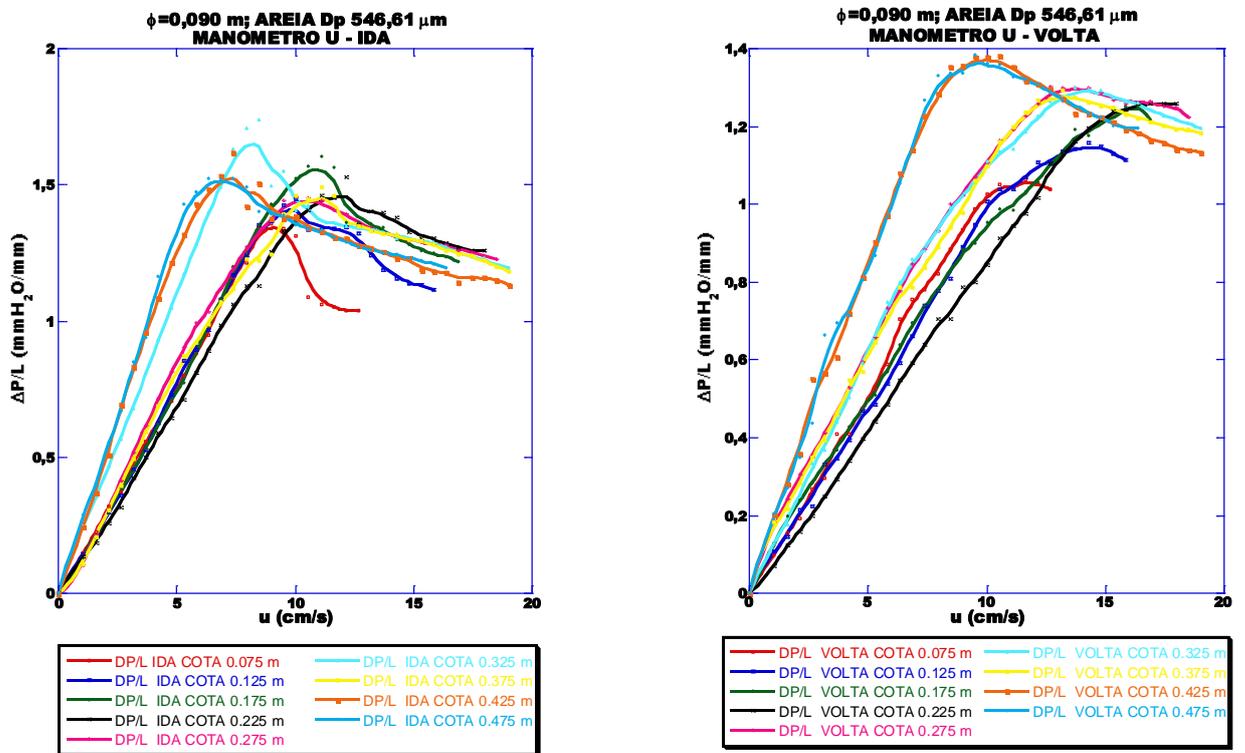
A Figura 19 mostra a curva fluidodinâmica para os testes no experimento de diâmetro 0,044 m ( $\Delta P$  versus  $Q$ ), de cada cota preenchida com areia de  $D_p = 321,02 \mu\text{m}$ .

Observa-se no gráfico de ida de  $\Delta P$  versus  $Q$  que as curvas fluidodinâmicas de cada cota são diferenciadas, pois com o incremento de massa para preenchimento de cada cota posterior, há uma tendência da queda de pressão no leito ser maior conforme se aumenta a massa conforme a vazão na máxima expansão diminui.

No gráfico da volta de  $\Delta P$  versus  $Q$  as curvas fluidodinâmicas, assim como nos gráficos relativos ao curso de subida, as quedas de pressões decrescem, obedecendo a uma sequência lógica de redução, da maior cota para a menor, assim como o gráfico da ida.

**Experimento com diâmetro  $\phi = 0,090$  m e areia  $D_p = 546,61 \mu\text{m}$ . (sensor instalado na Cota 0,0 m ou Ponto  $P_0$ ).**

Figura 20 – Gráfico de  $\Delta P/L$  ( $\text{mmH}_2\text{O}/\text{mm}$ ) versus  $u$  ( $\text{cm/s}$ ) na ida e na volta do experimento com  $\phi = 0,090$  m e areia  $D_p = 546,61 \mu\text{m}$ .



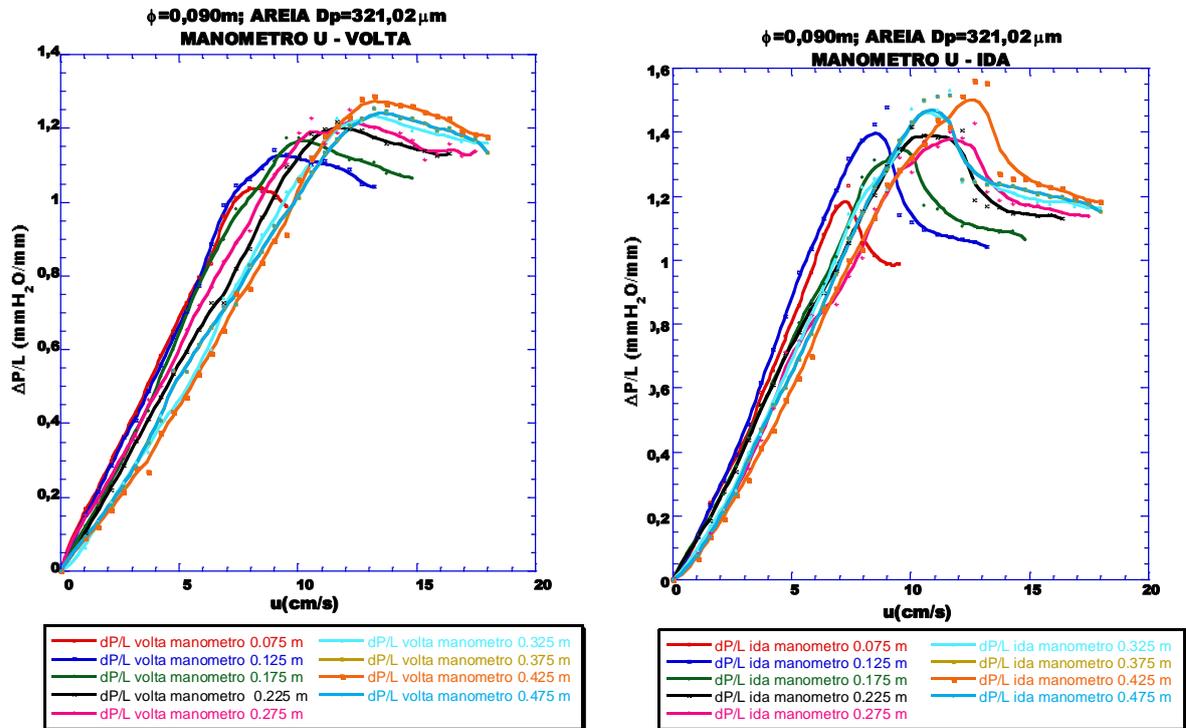
A Figura 20 mostra os gráficos de ida e volta da queda de pressão por unidade de comprimento versus velocidade do gás no leito.

Observa-se que o ocorrido na cota 0,325 m implica em uma queda de pressão por unidade de comprimento maior que nos demais testes.

Esses gráficos apontam a influência da altura do leito sobre a distribuição de pressão ao longo do leito, em que a divisão da variação de pressão sobre o comprimento do leito normaliza os perfis, permitindo assim uma comparação entre eles. Percebe-se, então, que a inclinação da reta que caracteriza a parte linear (fase de expansão do leito) do perfil de distribuição de pressão é maior quanto maior for a cota de altura do leito, porque o fluido (ar) enfrenta maior dificuldade em escoar no leito pelas perdas de carga do escoamento nos interstícios desse meio poroso.

**Experimento com diâmetro  $\phi = 0,090$  m e areia  $D_p = 321,02 \mu\text{m}$ . (sensor instalado na Cota 0,0 m ou Ponto  $P_0$ ).**

Figura 21 – Gráfico de  $\Delta P/L$  ( $\text{mmH}_2\text{O}/\text{mm}$ ) versus  $u$  (cm/s) na ida e na volta do experimento com  $\phi = 0,090$  m e areia  $D_p = 321,02 \mu\text{m}$ .



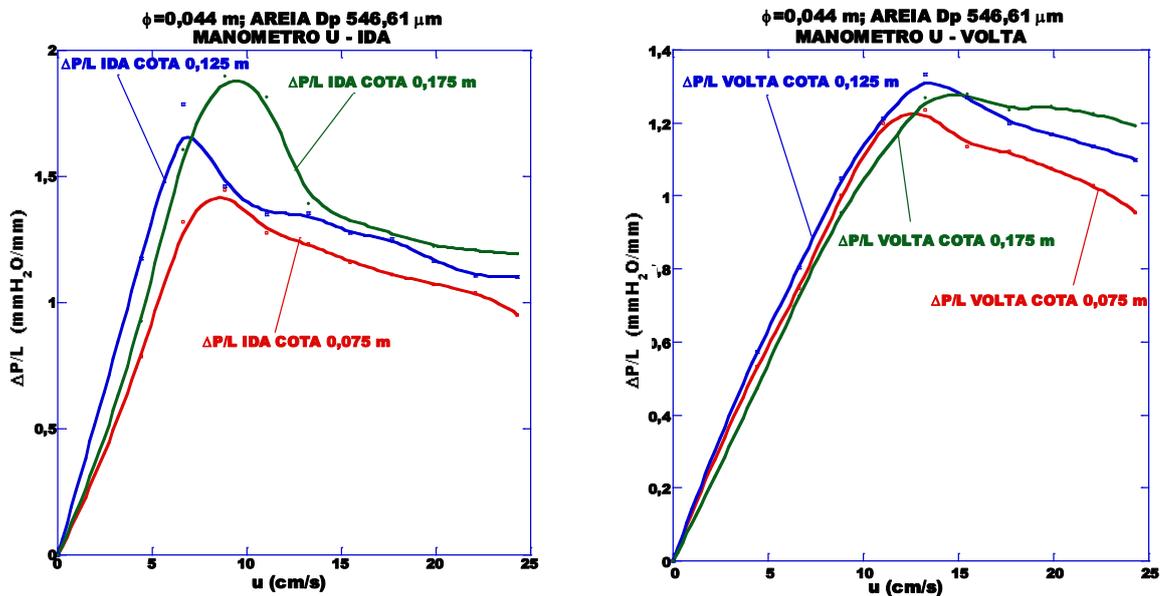
A Figura 21 mostra os gráficos de ida e volta da queda de pressão por unidade de comprimento versus velocidade do gás no leito.

Observa-se que o ocorrido na cota 0,425 m implica em uma queda de pressão por unidade de comprimento maior que nos demais testes.

Analisando os gráficos acima, verifica-se que a variação de pressão ao longo do leito (o que corresponde à fase linear do perfil) definida em função da cota não fica tão bem caracterizada. Isso pode ser possivelmente explicado pelo menor atrito que o fluido de trabalho enfrenta no escoamento entre os interstícios, onde esse meio poroso é mais homogêneo, como maior índice de esfericidade das partículas constituintes, devido ao trabalho mecânico de moagem da areia.

**Experimento com diâmetro  $\phi = 0,044$  m e areia  $D_p = 546,61 \mu\text{m}$ . (sensor instalado na Cota 0,0 m ou Ponto  $P_0$ ).**

Figura 22 – Gráfico de  $\Delta P/L$  ( $\text{mmH}_2\text{O}/\text{mm}$ ) versus  $u$  ( $\text{cm}/\text{s}$ ) na ida e na volta do experimento com  $\phi = 0,044$  m e areia  $D_p = 546,61 \mu\text{m}$ .



A Figura 22 mostra os gráficos de ida e volta da queda de pressão por unidade de comprimento versus velocidade do gás no leito.

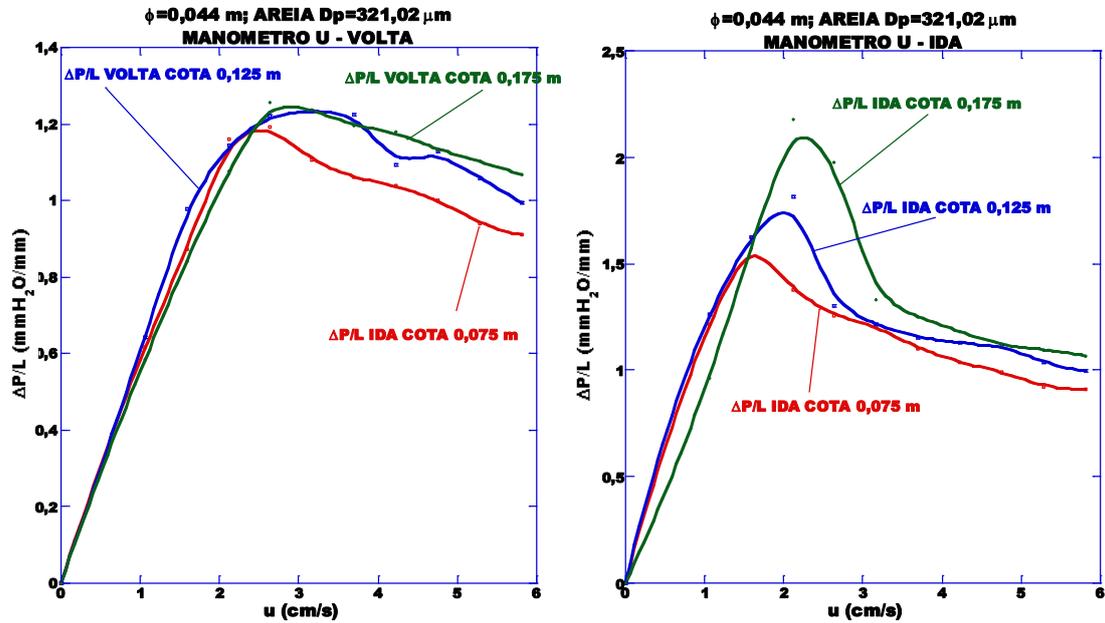
Observa-se que o ocorrido na cota 0,175 m implica em uma queda de pressão por unidade de comprimento maior que nos demais testes.

No gráfico da volta é observado que a queda de pressão por unidade de comprimento na volta da cota 0,125 m se sobrepõe ao da cota 0,175 m em certo momento.

Acredita-se que o efeito da parede sobre o escoamento fica mais pronunciado em diâmetros menores do leito, em que a variação de pressão, dividida pelo comprimento do leito, atinge valores maiores nos diâmetros menores. Na cota de altura do leito de 175 mm, percebem-se alterações nos perfis de distribuição de pressão, devido ao comportamento do escoamento do fluido de trabalho no leito ficar dificultado, causando uma tendência ao empistonamento do leito e ao desvio do ar por um circuito preferencial ao invés de expandir homogeneamente o leito.

**Experimento com diâmetro  $\phi = 0,044$  m e areia  $D_p = 321,02 \mu\text{m}$ . (sensor instalado na Cota 0,0 m ou Ponto  $P_0$ ).**

Figura 23 – Gráfico de  $\Delta P/L$  ( $\text{mmH}_2\text{O}/\text{mm}$ ) versus  $u$  (cm/s) na ida e na volta do experimento com  $\phi = 0,044$  m e areia  $D_p = 321,02 \mu\text{m}$ .



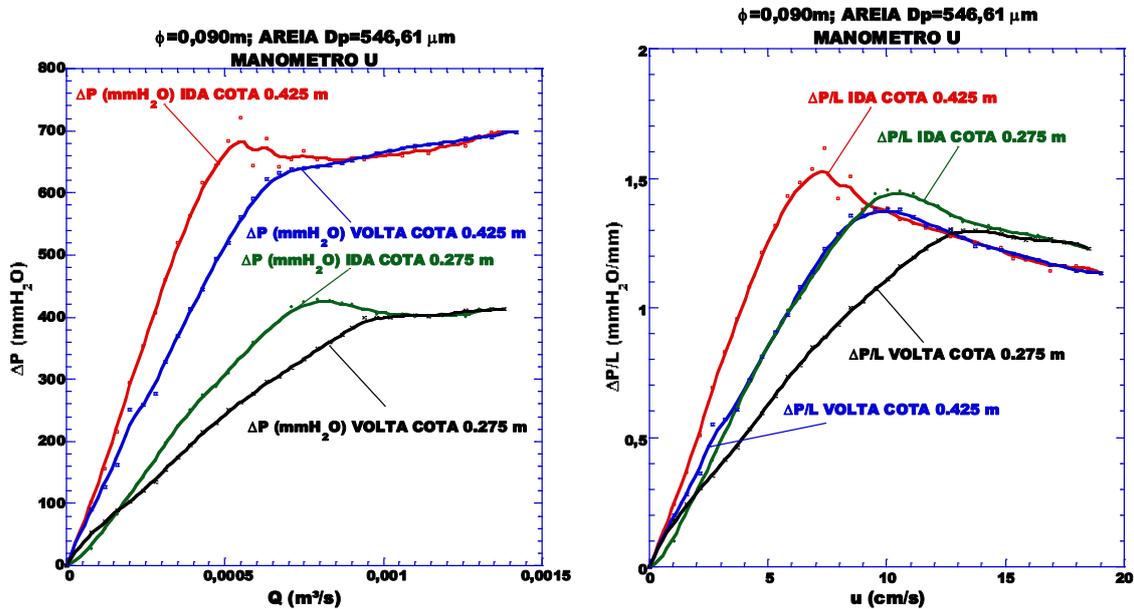
A Figura 23 mostra os gráficos de ida e volta da queda de pressão por unidade de comprimento versus velocidade do gás no leito.

Observa-se que o ocorrido na cota 0,175 m implica em uma queda de pressão por unidade de comprimento maior que nos demais testes.

No gráfico da volta pode ser visualizado que a queda de pressão por unidade de comprimento na volta da cota 0,125 m se comporta de forma similar ao da cota 0,175 m em vários pontos.

**Junção das cotas 0,275 m e 0,425 m no experimento de diâmetro  $\phi = 0,090$  m e areia  $D_p = 546,61 \mu\text{m}$ .**

Figura 24 – Gráfico de  $\Delta P$  (mmH<sub>2</sub>O) versus  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) e Gráfico de  $\Delta P/L$  (mmH<sub>2</sub>O/mm) versus  $u$  (cm/s), nas cotas 0,275 m e 0,425 m na ida e na volta do experimento com  $\phi = 0,090$  m e areia  $D_p = 546,61 \mu\text{m}$ .

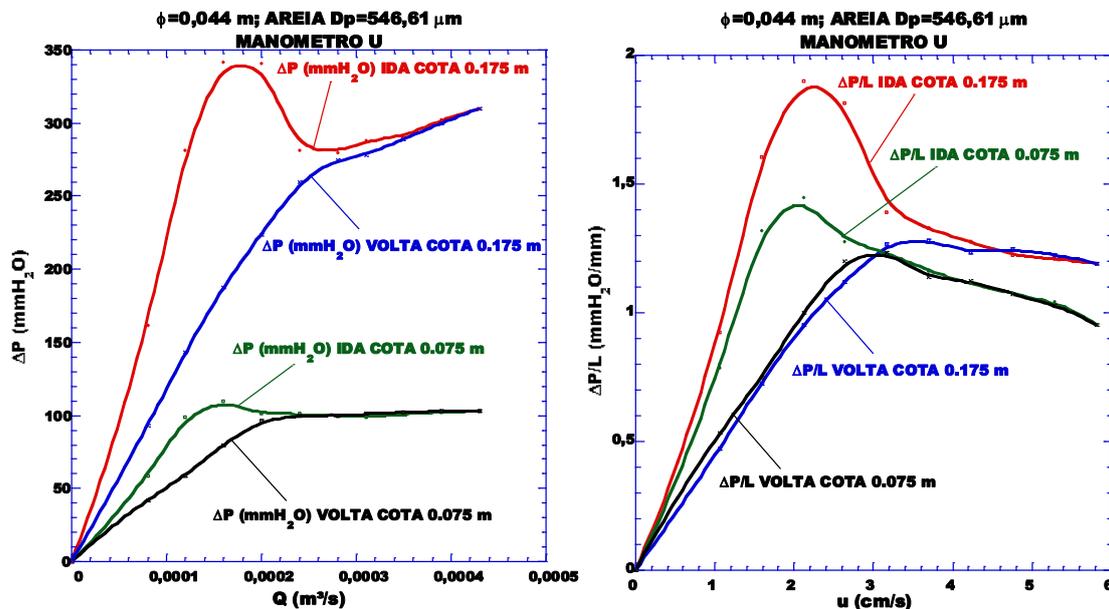


A Figura 24 mostra o gráfico de ida e volta da queda de pressão por unidade de comprimento versus velocidade do gás no leito para as cotas 0,425 m e 0,275 m.

À esquerda, a curva fluidodinâmica para os testes no experimento de diâmetro 0,090 m ( $\Delta P$  versus  $Q$ ), de duas cotas preenchidas com areia de  $D_p = 546,61 \mu\text{m}$ . Assim, pode-se observar como se comportam as curvas de ida e volta de cada teste de uma determinada cota em relação à outra.

**Junção das cotas 0,075 m e 0,175m no experimento de diâmetro  $\phi = 0,044$  m e areia  $D_p = 546,61$   $\mu\text{m}$ . (sensor instalado na Cota 0,0 m ou Ponto  $P_0$ ).**

Figura 25 – Gráfico de  $\Delta P$  ( $\text{mmH}_2\text{O}$ ) versus  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) e Gráfico de  $\Delta P/L$  ( $\text{mmH}_2\text{O}/\text{mm}$ ) versus  $u$  ( $\text{cm}/\text{s}$ ), nas cotas 0,275 m e 0,425 m na ida e na volta do experimento com  $\phi = 0,090$  m e areia  $D_p = 321,02$   $\mu\text{m}$ .



Na Figura 25, à direita, é mostrado o gráfico de ida e volta da queda de pressão por unidade de comprimento versus velocidade do gás no leito para duas cotas, e à esquerda ela mostra a curva fluidodinâmica para os testes no experimento de diâmetro 0,044 m ( $\Delta P$  versus  $Q$ ), de duas cotas preenchidas com areia de  $D_p = 546,61$   $\mu\text{m}$ . Assim, podemos observar como se comportam as curvas de ida e volta de cada teste em uma determinada cota.

**OBSERVAÇÃO:**

As figuras que serão apresentadas a seguir referem-se à medição das pressões ao longo do leito com a inserção de manômetros de pressão a cada 50 mm de distância a contar do primeiro ponto de medição, que fica a 100 mm da base do leito, ou seja, do ponto  $P_0$ .

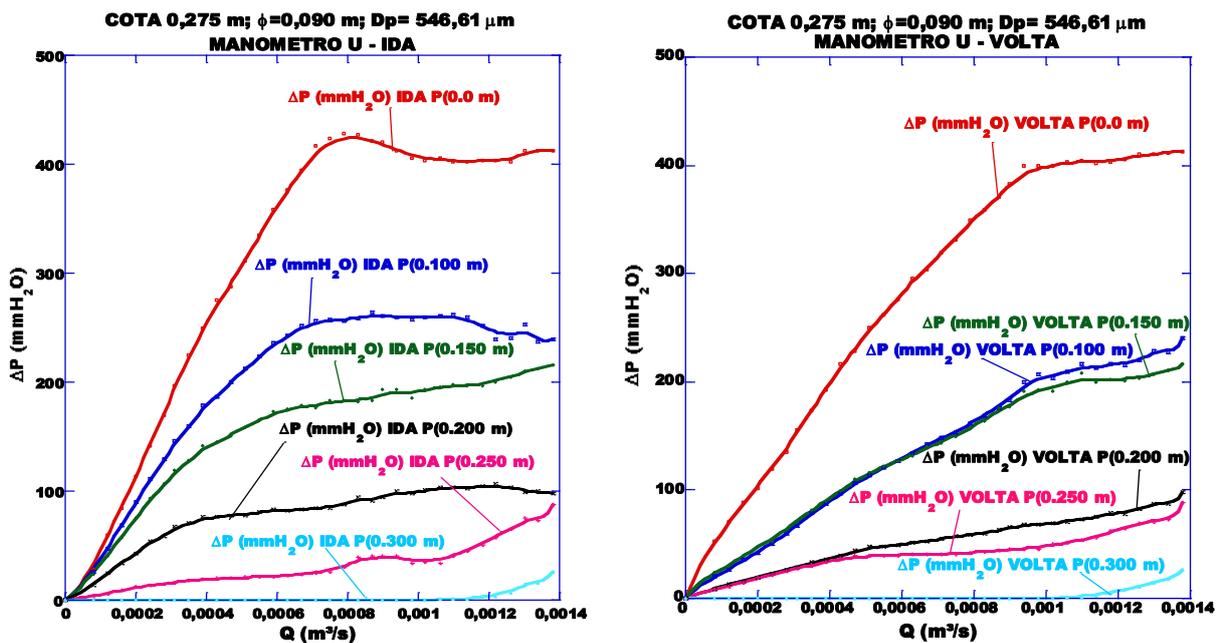
Diferentemente dos gráficos anteriores que comparavam a pressão na base pra cada cota estudada (cotas de 0.075 a 0,475 m), os gráficos seguintes investigam a variação da pressão ao longo do leito, com sensores instalados na base e nas laterais do tubo. (Sensores de pressão instalados nas alturas: 0 m; 0,100 m; 0,150 m; 0,200 m aumentando de 0,50 em 0,50 m até 0,500 m).

O objetivo dessa medição foi identificar as variações de pressão ao longo do leito e interpretar os fenômenos de escoamento dentro do leito, como também o processo de

transporte das partículas pelo fluido de trabalho (ar). Além disso, desejou-se identificar qual o melhor ponto para a instalação de um sistema de injeção de biomassa ao longo da parede do reator, por estar o foco do desenvolvimento deste estudo voltado para o anteprojeto do reator de gaseificação.

**Experimento com diâmetro  $\phi = 0,090$  m, cota 0,275 m e areia  $D_p = 546,61$   $\mu\text{m}$ .**

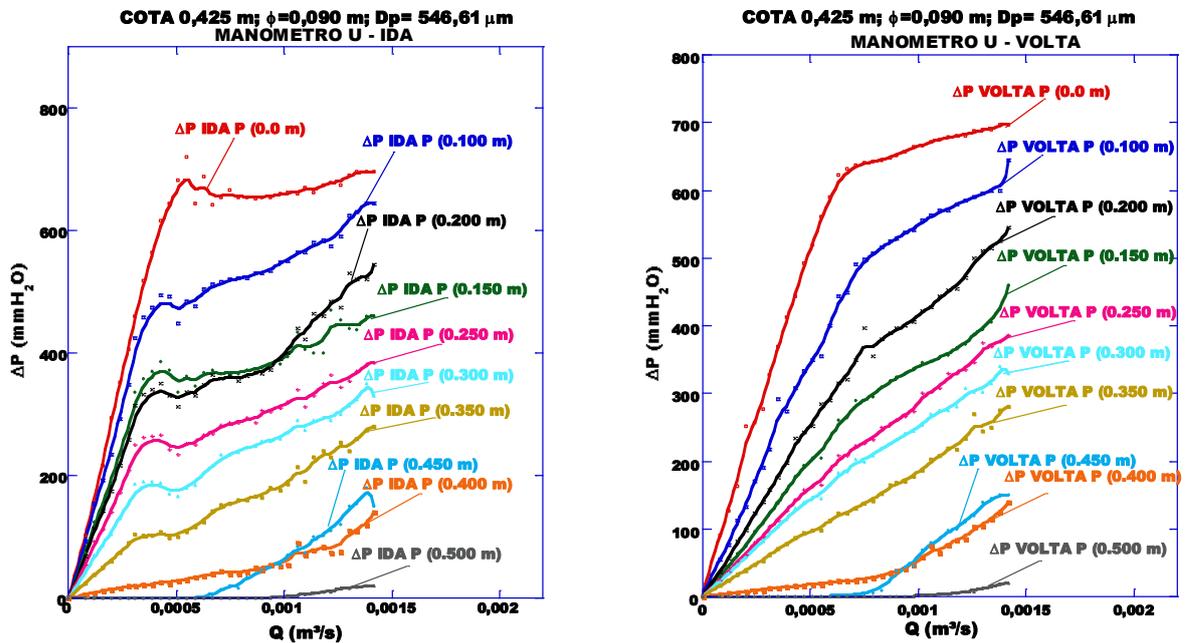
Figura 26 – Gráfico de  $\Delta P$  (mmH<sub>2</sub>O) versus  $Q$ (m<sup>3</sup>/s)  $\phi = 0,090$  m, cota 0,275 m e areia  $D_p = 546,61$   $\mu\text{m}$ .



A Figura 26 acima mostra os gráficos de ida e volta da queda de pressão versus vazão do gás no leito, onde são destacadas as quedas de pressão ao longo do leito no nível da placa distribuidora (cota zero) e nas alturas: 0,100 m, 0,150 m, 0,200 m, 0,250 m e 0,300 m. Nota-se durante a volta que as pressões nas cotas 0,100 m e 0,150 m tendem a se igualar a partir de certa vazão.

**Experimento com diâmetro  $\phi = 0,090$  m, cota 0,425 m e areia  $D_p = 546,61 \mu\text{m}$ .**

Figura 27 – Gráfico de  $\Delta P$  (mmH<sub>2</sub>O) versus  $Q$ (m<sup>3</sup>/s)  $\phi = 0,090$  m, cota 0,425 m e areia  $D_p = 546,61 \mu\text{m}$ .

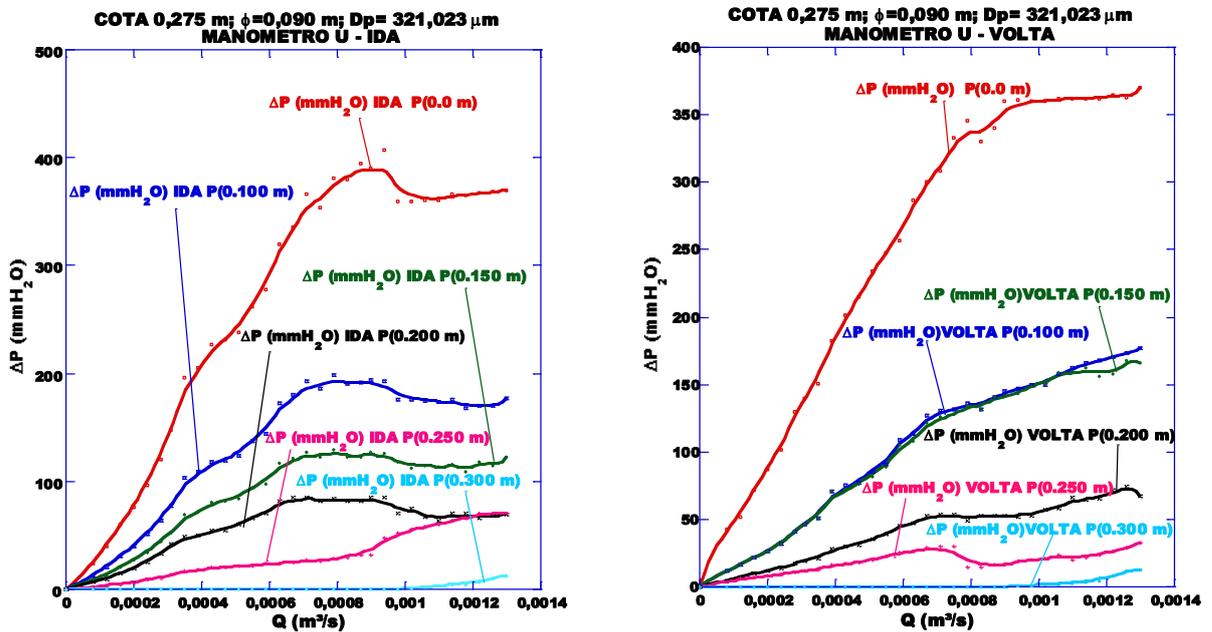


A Figura 27 mostra os gráficos de ida e volta da queda de pressão versus vazão do gás no leito, onde são destacadas as quedas de pressão ao longo do leito no nível da placa distribuidora (cota zero) e nas alturas: 0,100 m, 0,150 m, 0,200 m, 0,250 m, 0,300 m, 0,350 m, 0,400 m, 0,450 m e 0,500 m.

No gráfico da ida pode-se observar que em certa vazão ocorre uma inversão e a pressão lida na cota 0,200 m passa a ser maior que a lida na cota 0,150 m. Esta inversão se mantém durante toda a volta.

**Experimento com diâmetro  $\phi = 0,090$  m, cota 0,275 m e areia  $D_p = 321,02 \mu\text{m}$ .**

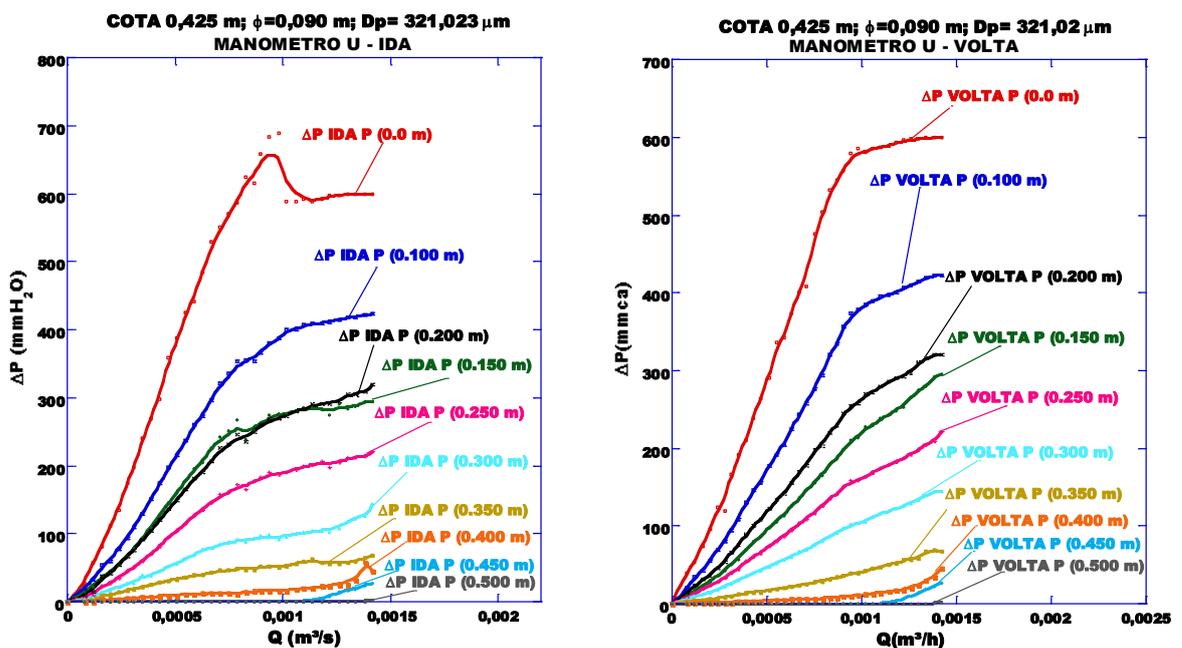
Figura 28 – Gráfico de  $\Delta P$  (mmH<sub>2</sub>O) versus  $Q$ (m<sup>3</sup>/s)  $\phi = 0,090$  m, cota 0,275 m e areia  $D_p = 321,02 \mu\text{m}$ .



A Figura 28 mostra os gráficos de ida e volta da queda de pressão versus vazão do gás no leito, onde são destacadas as quedas de pressão ao longo do leito no nível da placa distribuidora (cota zero) e nas alturas: 0,100 m, 0,150 m, 0,200 m, 0,250 m e 0,300 m.

**Experimento com diâmetro  $\phi = 0,090$  m, cota 0,425 m e areia  $D_p = 321,02 \mu\text{m}$ .**

Figura 29 – Gráfico de  $\Delta P$  (mmH<sub>2</sub>O) versus  $Q$ (m<sup>3</sup>/s)  $\phi = 0,090$  m, cota 0,425 m e areia  $D_p = 321,02 \mu\text{m}$ .

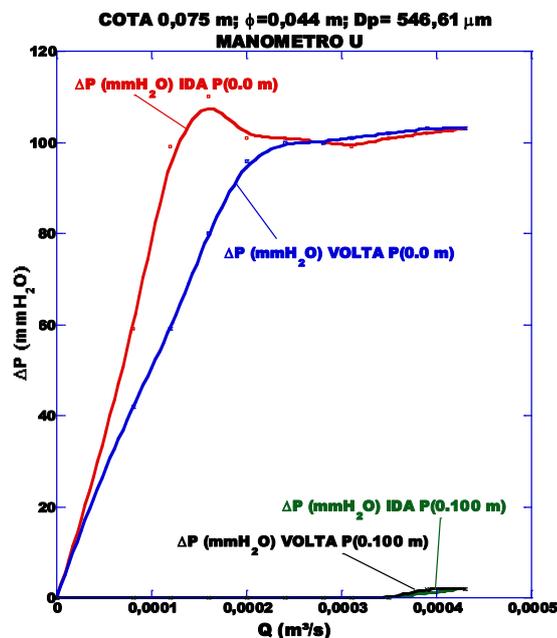


A Figura 29 mostra os gráficos de ida e volta da queda de pressão versus vazão do gás no leito, são destacadas as quedas de pressão ao longo do leito no nível da placa distribuidora (cota zero) e nas alturas: 0,100 m, 0,150 m, 0,200 m, 0,250 m, 0,300 m, 0,350 m, 0,400 m, 0,450 m e 0,500 m.

No gráfico da ida pode-se observar que em certa vazão ocorre uma inversão e a pressão lida na cota 0,200 m passa a ser maior que a lida na cota 0,150 m. Esta inversão se mantém durante toda a volta.

**Experimento com diâmetro  $\phi = 0,044$  m, cota 0,075 m e areia  $D_p = 546,61 \mu\text{m}$ .**

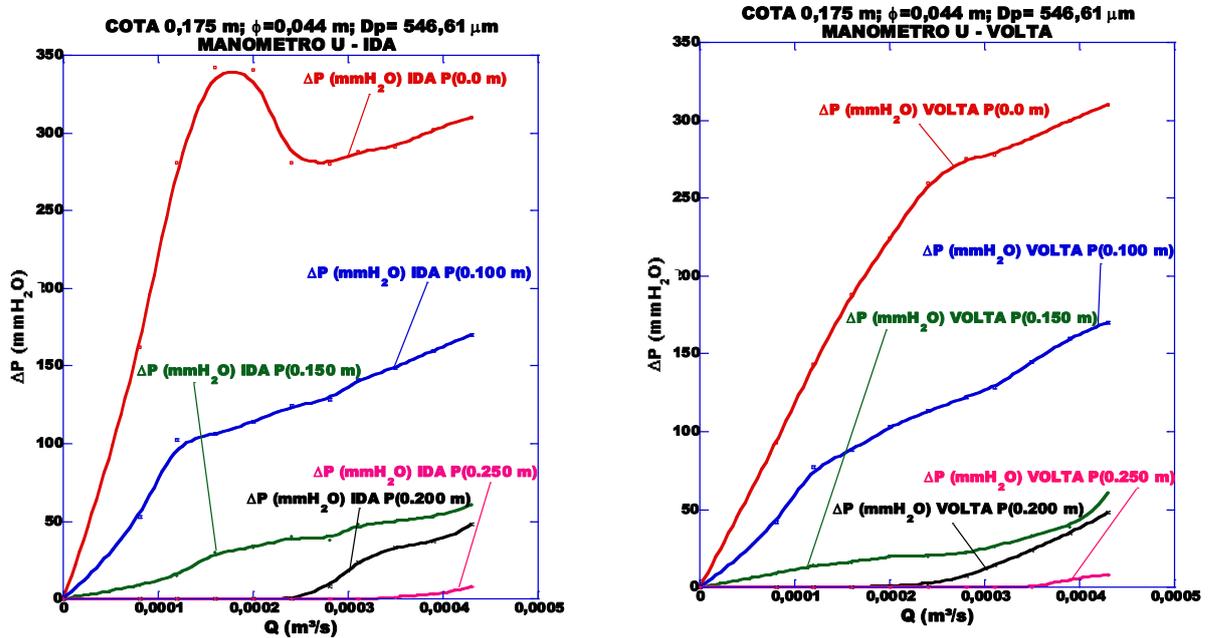
Figura 30 – Gráfico de  $\Delta P$  (mmH<sub>2</sub>O) versus  $Q$  (m<sup>3</sup>/s)  $\phi = 0,044$  m, cota 0,075 m e areia  $D_p = 546,61 \mu\text{m}$ .



A Figura 30 mostra o gráfico de ida e volta da queda de pressão versus vazão do gás no leito, são destacadas as quedas de pressão ao longo do leito no nível da placa distribuidora (cota zero) e na altura: 0,100 m.

**Experimento com diâmetro  $\phi = 0,044$  m, cota 0,175 m e areia  $D_p = 546,61 \mu\text{m}$ .**

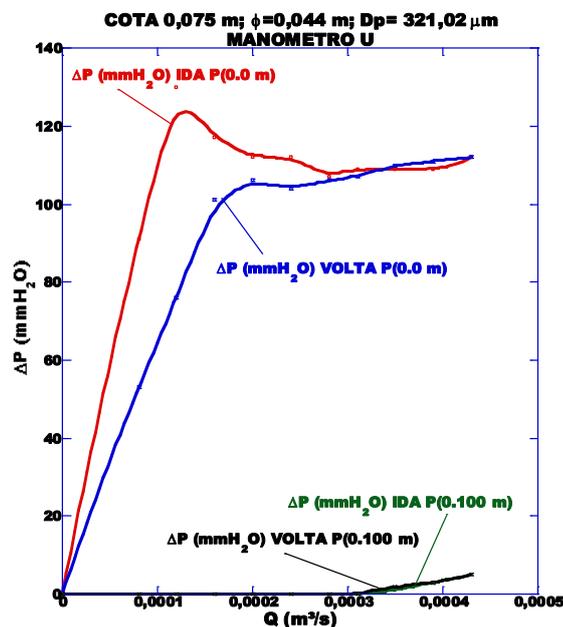
Figura 31 – Gráfico de  $\Delta P$  (mmH<sub>2</sub>O) versus  $Q$  (m<sup>3</sup>/s)  $\phi = 0,044$  m, cota 0,175 m e areia  $D_p = 546,61 \mu\text{m}$ .



A Figura 31 mostra os gráficos de ida e volta da queda de pressão versus vazão do gás no leito, são destacadas as quedas de pressão ao longo do leito no nível da placa distribuidora (cota zero) e nas alturas: 0,100 m, 0,150 m, 0,200 m e 0,250 m.

**Experimento com diâmetro  $\phi = 0,044$  m, cota 0,075 m e areia  $D_p = 321,02 \mu\text{m}$ .**

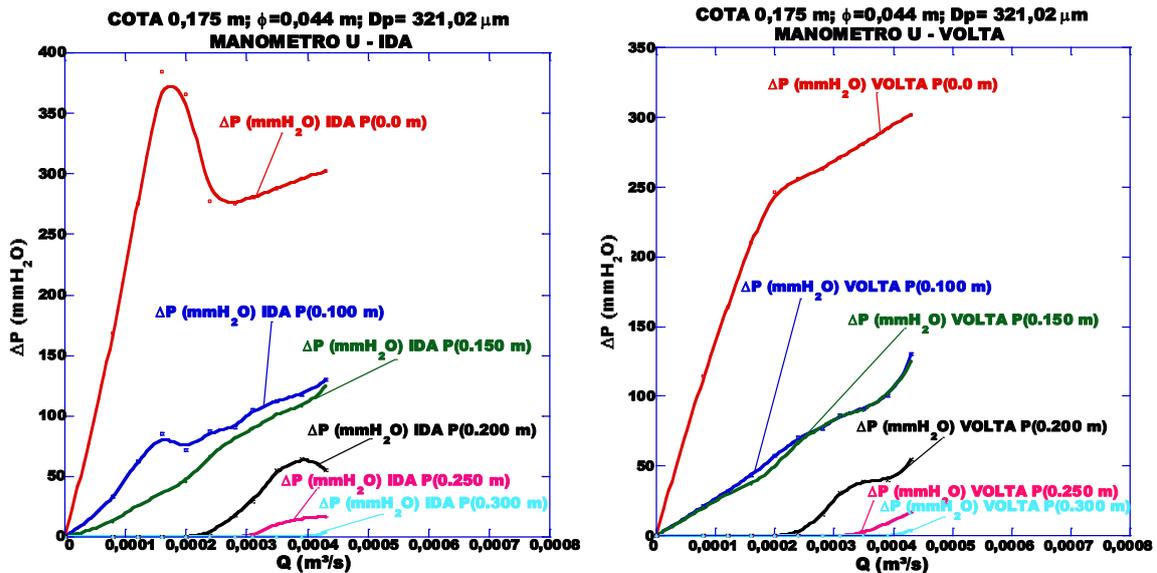
Figura 32 – Gráfico de  $\Delta P$  (mmH<sub>2</sub>O) versus  $Q$  (m<sup>3</sup>/s)  $\phi = 0,044$  m, cota 0,075 m e areia  $D_p = 321,02 \mu\text{m}$ .



A Figura 32 mostra o gráfico de ida e volta da queda de pressão versus vazão do gás no leito, são destacadas as quedas de pressão ao longo do leito no nível da placa distribuidora (cota zero) e na altura: 0,100 m.

**Experimento com diâmetro  $\phi = 0,044$  m, cota 0,175 m e areia  $D_p = 321,02 \mu\text{m}$ .**

Figura 33 – Gráfico de  $\Delta P$  (mmH<sub>2</sub>O) versus  $Q$ (m<sup>3</sup>/s)  $\phi = 0,044$  m, cota 0,175 m e areia  $D_p = 321,02 \mu\text{m}$ .



A Figura 33 mostra os gráficos de ida e volta da queda de pressão versus vazão do gás no leito, são destacadas as quedas de pressão ao longo do leito no nível da placa distribuidora (cota zero) e nas alturas: 0,100 m, 0,150 m, 0,200 m, 0,250 m, m e 300 m.

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS PROCESSOS**

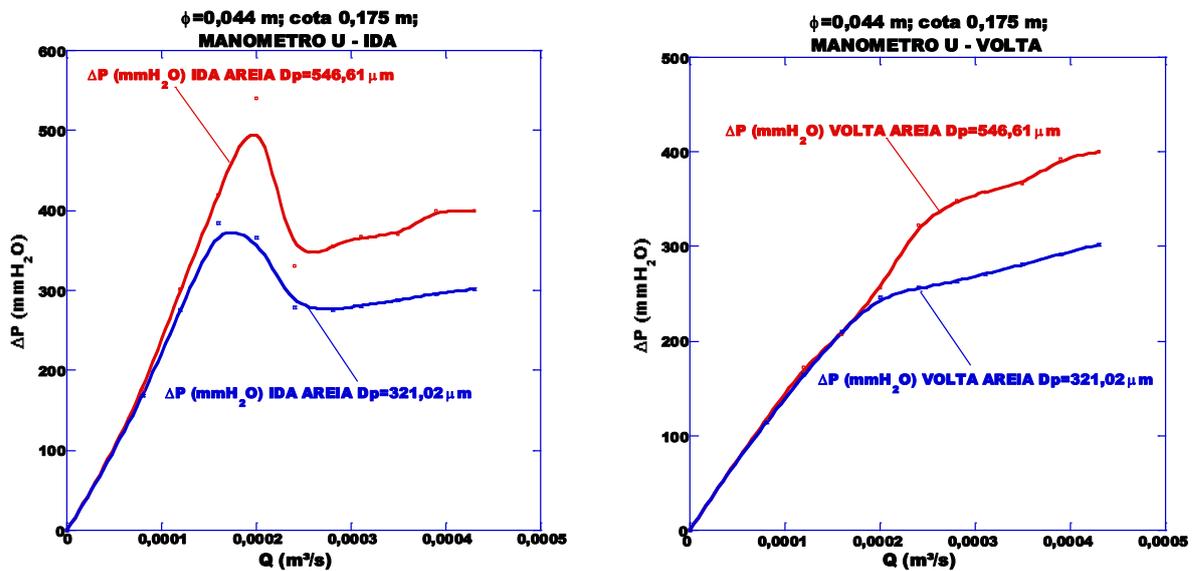
Esta parte do trabalho é direcionada a comparar os resultados obtidos, sendo dividida em duas etapas:

- i) Comparação dos fenômenos fluidodinâmicos entre as diferentes granulometrias em cada experimento;
- ii) Comparação dos fenômenos fluidodinâmicos entre os diferentes diâmetros dos experimentos.

**i) Comparativo com Base nas Diferenças de Granulometrias**

**Experimento com diâmetro  $\phi = 0,044$ , cota 0,175 m . (sensor instalado na Cota 0,0 m).**

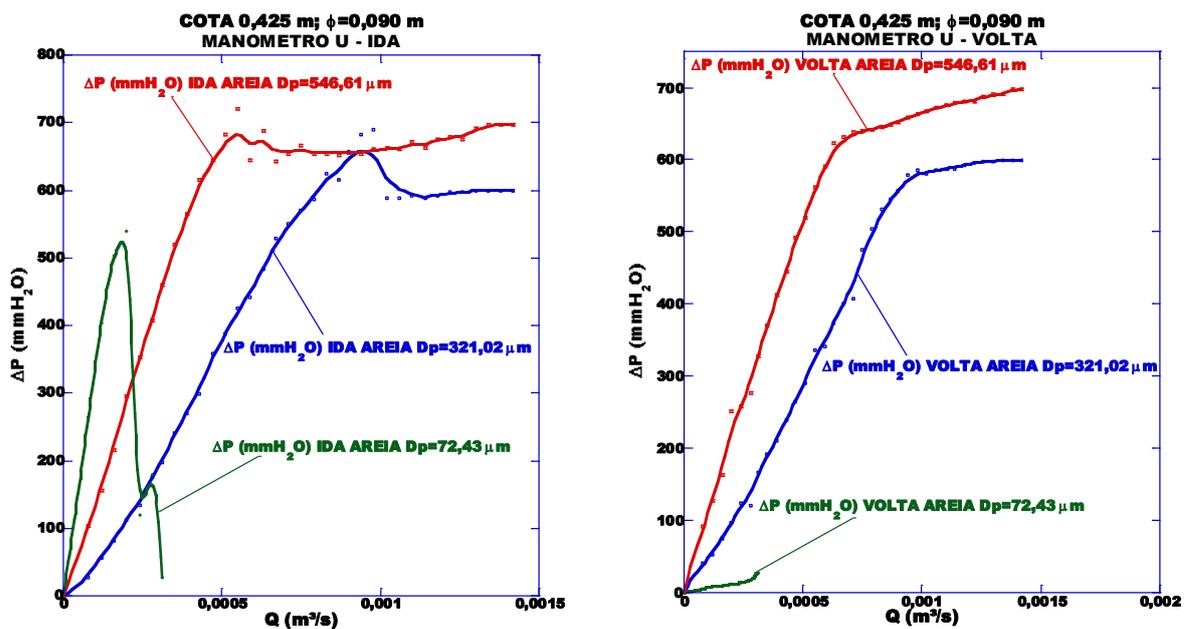
Figura 34 – Gráfico de  $\Delta P$  (mmH<sub>2</sub>O) versus Q(m<sup>3</sup>/s)  $\phi = 0,044$ , cota 0,175 m.



A Figura 34 ilustra o comparativo entre as granulometria de 546,61  $\mu$ m e 321,02  $\mu$ m, m com os gráficos de ida e volta da queda de pressão versus vazão do gás no leito. Pelos gráficos podemos observar que para uma maior granulometria ocorre uma maior queda de pressão em um tubo de mesmo diâmetro de 0,044 m.

**Experimento com diâmetro  $\phi = 0,090$  m cota 0,425 m. (sensor instalado na Cota 0,0 m).**

Figura 35 – Gráfico de  $\Delta P$  (mmH<sub>2</sub>O) versus Q(m<sup>3</sup>/s)  $\phi = 0,090$  m cota 0,425 m.



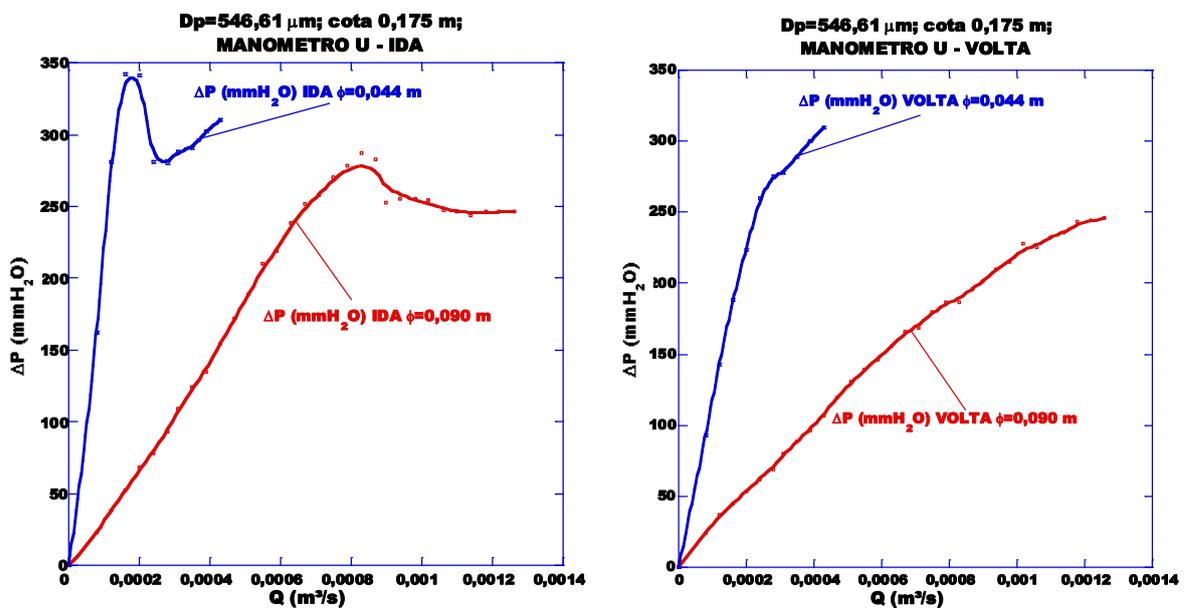
A Figura 35 ilustra o comparativo entre as granulometria de 546,61  $\mu\text{m}$ , 321,02  $\mu\text{m}$  e 72,43  $\mu\text{m}$  com os gráficos de ida e volta da queda de pressão versus vazão do gás no leito. Pelos gráficos podemos observar que para uma maior granulometria ocorre uma maior queda de pressão em um tubo de mesmo diâmetro de 0,044 m.

É importante destacar que a curva da areia de diâmetro médio de partícula de 72,43  $\mu\text{m}$  não retrata um leito fluidizado, ou seja, como as partículas de sílica são muito pequenas o fator de empacotamento é relativamente grande, causando uma grande perda de carga para o escoamento do fluido de trabalho nos interstícios do meio poroso, gerando com isso uma tendência ao “empistonamento”. Com isso, o ângulo de inclinação do perfil correspondente à fase de expansão do leito é maior, porque, de fato, não há um processo de expansão do leito e sim uma tendência à formação de uma bolsa de ar na base do leito que tende a aumentar a pressão até que ela seja suficiente para mover inteiramente a coluna de areia sobre essa bolsa.

## ii) Comparativo com Base nas Diferenças de Diâmetros dos tubos

### Areia $D_p = 546,61 \mu\text{m}$ , cota 0,175 m . (sensor instalado na Cota 0,0 m).

Figura 36 – Gráfico de  $\Delta P$  (mmH<sub>2</sub>O) versus  $Q$ (m<sup>3</sup>/s) areia  $D_p = 546,61 \mu\text{m}$ , cota 0,175 m.

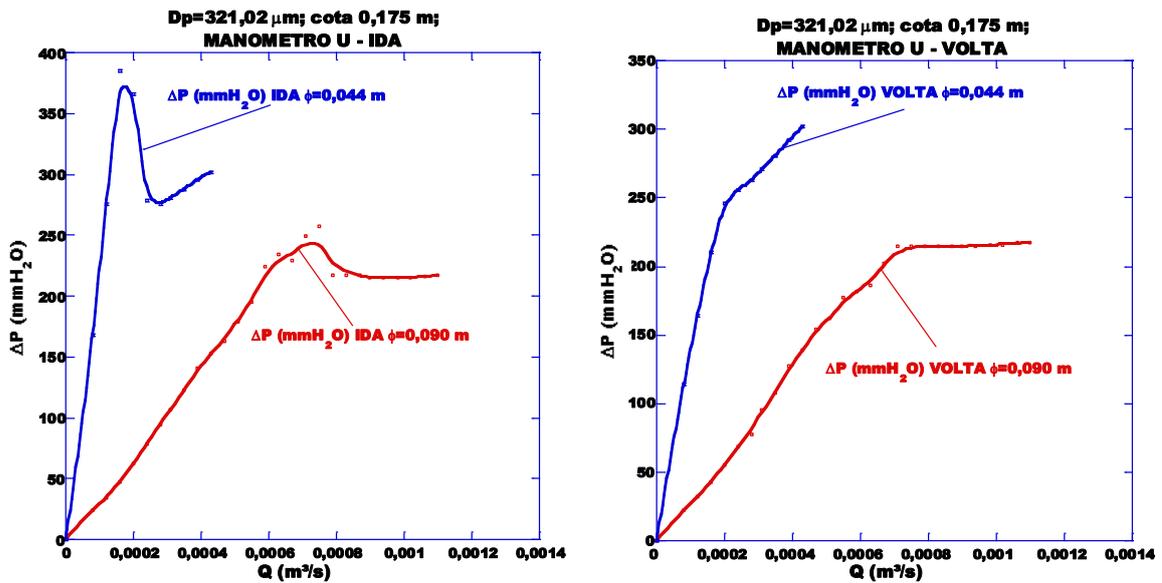


A Figura 36 ilustra o comparativo entre os diâmetros de 0,090 m e 0,044 m com os gráficos de ida e volta da queda de pressão versus vazão do gás no leito. Pelos gráficos podemos observar que para um tubo de maior diâmetro ocorre uma maior queda de pressão

para uma mesma areia constituinte do leito com granulometria 546,61  $\mu\text{m}$ . Também é observado que a fluidização ocorre em uma vazão menor para um tubo de diâmetro menor.

**Areia  $D_p = 321,02 \mu\text{m}$ , cota 0,175 m . (sensor instalado na Cota 0,0 m).**

Figura 37 – Gráfico de  $\Delta P$  (mmH<sub>2</sub>O) versus Q(m<sup>3</sup>/s) areia  $D_p = 321,02 \mu\text{m}$ , cota 0,175 m.



A Figura 37 ilustra o comparativo entre os diâmetros de 0,090 m e 0,044 m com os gráficos de ida e volta da queda de pressão versus vazão do gás no leito. Pelos gráficos, podemos observar que para um tubo de maior diâmetro ocorre uma maior queda de pressão para uma mesma areia constituinte do leito com granulometria 321,02  $\mu\text{m}$ . Também é observado que a fluidização ocorre em uma vazão menor para um tubo de diâmetro menor.

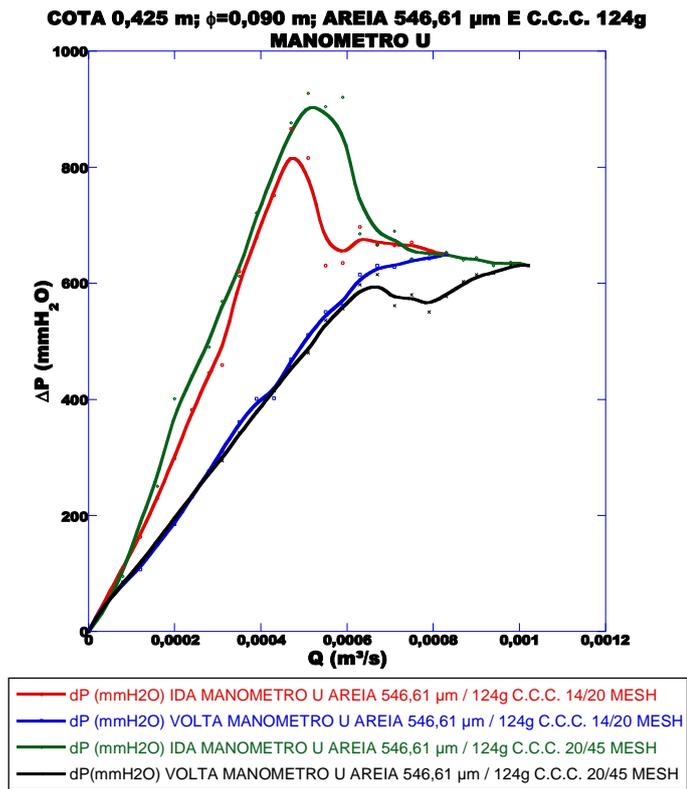
**ANÁLISE DE INFLUÊNCIA DA INSERÇÃO DE BIOMASSA NO LEITO**

A seguir estão apresentadas as figuras que mostram o efeito da presença da biomassa sobre os fenômenos fluidodinâmicos, em que é analisado o comportamento do leito com diferentes granulometrias de biomassa. Como tem sido observado pelos experimentos que a fluidodinâmica não é drasticamente alterada pela diferença de granulometria da sílica e, ainda, que o objetivo do projeto de pesquisa é conseguir parâmetros para desenvolver um reator de gaseificação de baixo custo operacional, decidiu-se por realizar todos os estudos de fluidização do leito utilizando a areia de praia bruta (apenas com um peneiramento simples para remoção de partículas indesejáveis, ou seja, madeira, folhagens e outros resíduos que não a areia).

Os testes com a C.C.C. foram realizados no experimento de diâmetro 0,090 m na cota 0,425 m. De acordo com o estudo feito de difusão da biomassa no leito (item do capítulo 5 deste trabalho).

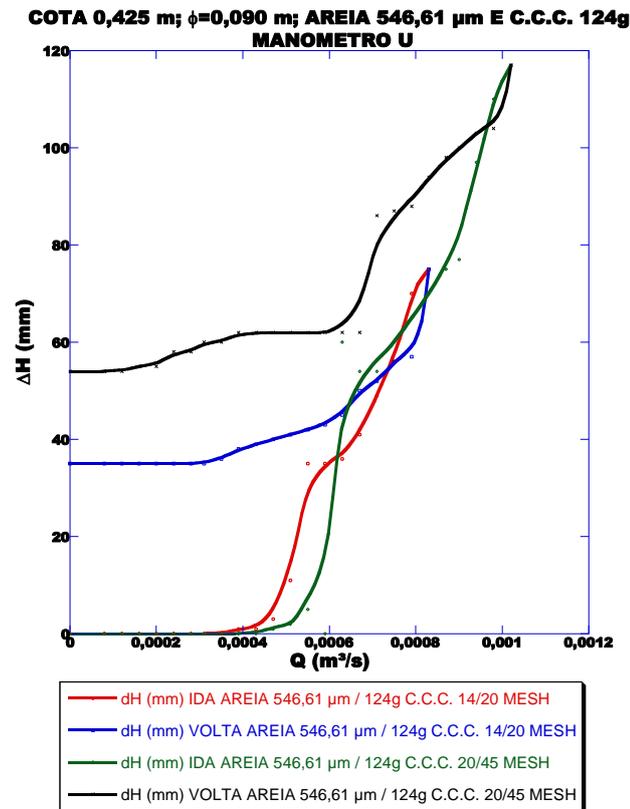
**Areia 546,61 µm com C.C.C. 124g**

**Figura 38 – Perfis de distribuição de pressão em um leito fluidizado binário, constituído de areia e casca de castanha de caju (Composição de C.C.C. no leito de 124g) com diferentes granulometrias.**



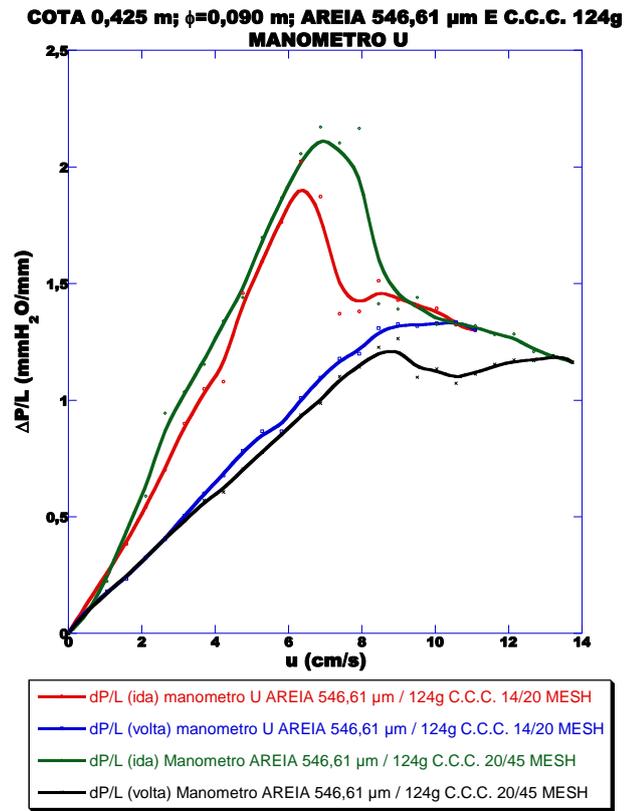
A Figura 38 apresenta perfis de variação de pressão dentro leito com a inserção de dois tipos de granulometrias de biomassa, mostrando que a inclinação da reta que corresponde à fase de expansão do leito é maior no leito com casca de castanha em granulometria menor (20/45 mesh). Isso pode ser explicado pelo fato do leito com partículas mais finas apresentar maiores perdas de carga no escoamento do fluido nos interstícios desse meio poroso. Com partículas de biomassa menores, os espaços vazios (porosidade) entre as partículas de sílicas são preenchidas com partículas de C.C.C., enquanto as partículas maiores dessa biomassa não conseguem penetrar plenamente nos interstícios do leito.

Figura 39 – Perfis de expansão e acomodação do leito conforme o escoamento é acionado ou interrompido para ambos os casos, leito biomassa em diferentes granulometrias



A Figura 39 apresenta perfis de expansão e acomodação do leito conforme o escoamento é acionado ou interrompido para ambos os casos, leito biomassa em diferentes granulometrias. Foi verificado que o leito binário composto por biomassa com granulometria menor, tem maior expansão do leito.

Figura 40 – Perfis de distribuição de pressão por unidade de comprimento em um leito fluidizado binário, constituído de areia e casca de castanha de caju com diferentes granulometrias (Composição de C.C.C. no leito de 124g)

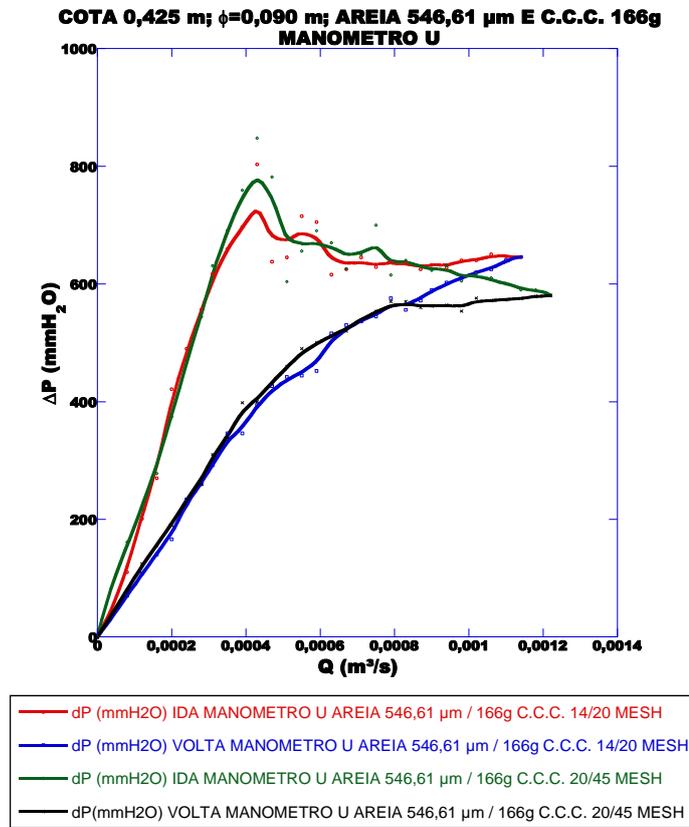


A Figura 40 mostra o gráfico de ida e volta da queda de pressão por unidade de comprimento versus velocidade do gás no leito.

Observa-se no leito que a inserção de C.C.C. com granulometria menor provoca uma queda de pressão por unidade de comprimento maior que quando inserida mesma quantidade desta biomassa com uma granulometria maior.

### Areia 546,61 $\mu\text{m}$ com C.C.C. 166g

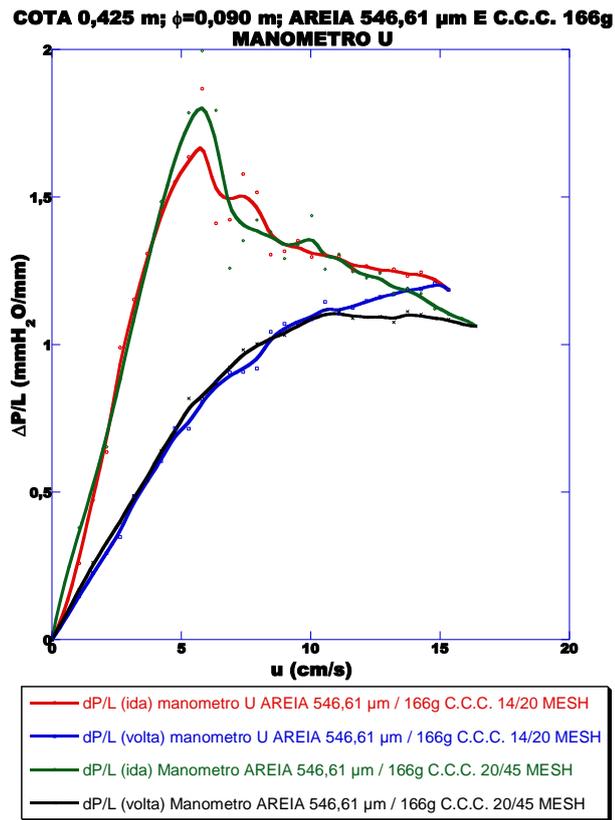
Figura 41 – Perfis de distribuição de pressão em um leito fluidizado binário, constituído de areia e casca de castanha de caju (Composição de C.C.C. no leito de 166g) com diferentes granulometrias.



A Figura 41 mostra o gráfico de ida e volta da queda de pressão versus velocidade do gás no leito para uma concentração de 166g de C.C.C. e variando a granulometria da biomassa.

Observa-se no leito que a inserção de C.C.C. com granulometria menor resulta em uma queda de pressão maior que quando inserida mesma quantidade desta biomassa com uma granulometria maior.

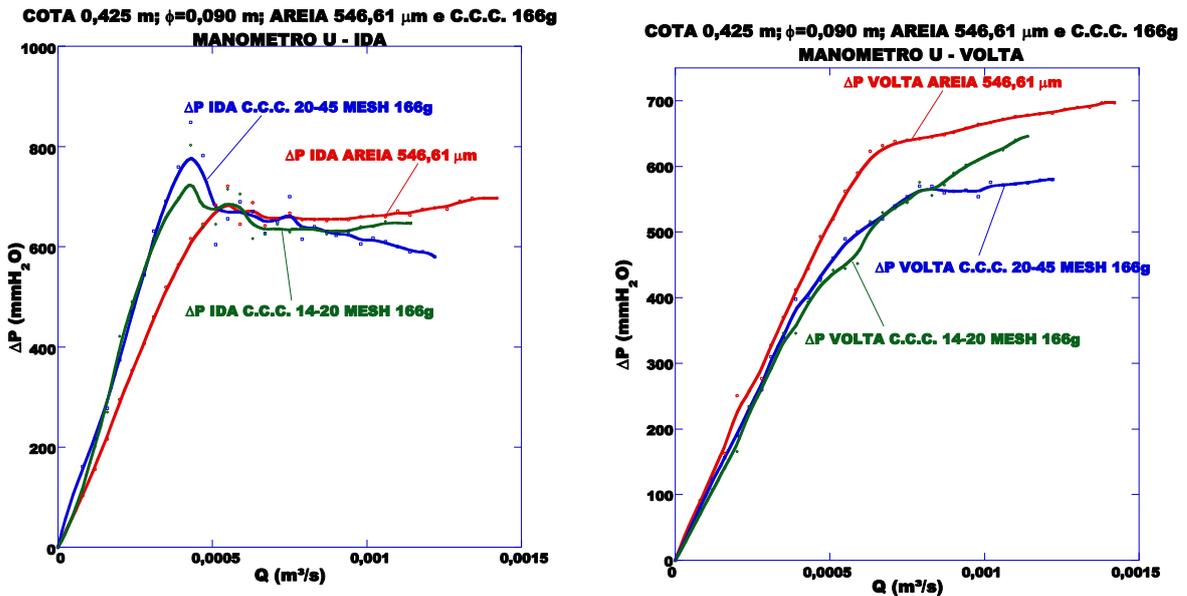
Figura 42 – Perfis de distribuição de pressão por unidade de comprimento em um leito fluidizado binário, constituído de areia e casca de castanha de caju com diferentes granulometrias (Composição de C.C.C. no leito de 166g)



A Figura 42 mostra o gráfico de ida e volta da queda de pressão por unidade de comprimento versus velocidade do gás no leito.

Observa-se no leito que a inserção de uma quantidade um pouco maior de C.C.C. com granulometria menor continua provocando uma queda de pressão por unidade de comprimento maior que quando inserida mesma quantidade desta biomassa com uma granulometria maior.

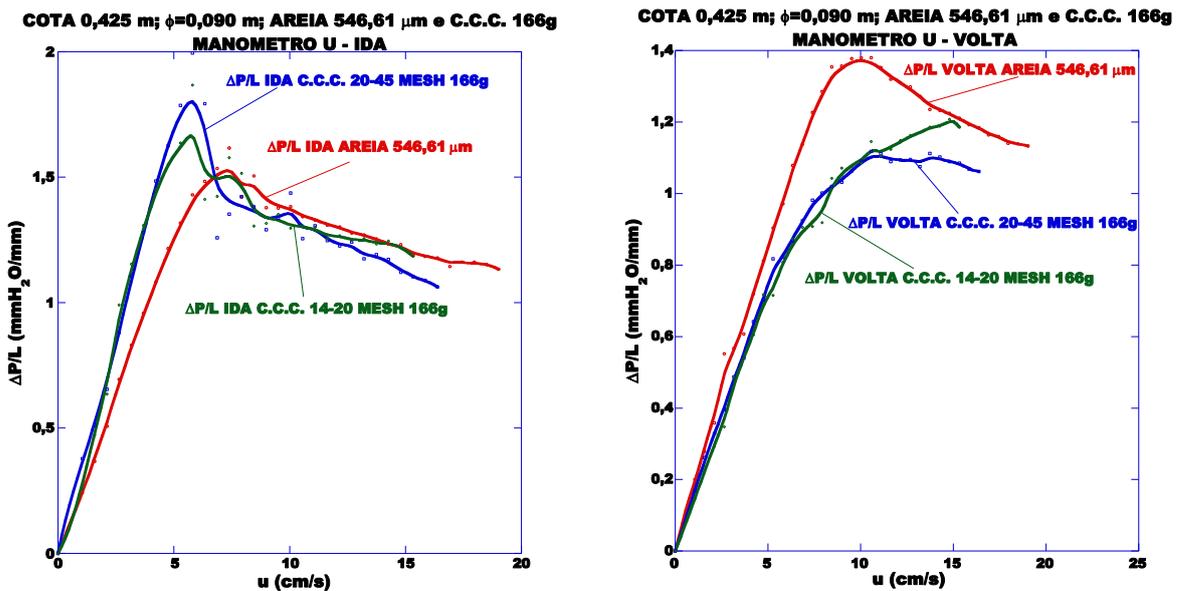
Figura 43 – Perfis de distribuição de pressão do leito com e sem castanha caracterizando o efeito da inserção da biomassa.



A Figura 43 mostra o gráfico de ida e volta da queda de pressão Versus velocidade do gás no leito.

É possível verificar graficamente o efeito da inserção da biomassa, e também é comparado com a curva de queda de pressão sem a biomassa.

Figura 44 – Perfis de distribuição de pressão por unidade de comprimento do leito com e sem castanha caracterizando o efeito da inserção da biomassa.



A Figura 44 mostra o gráfico de ida e volta da queda de pressão por unidade de comprimento versus velocidade do gás no leito.

É possível verificar graficamente o efeito da inserção da biomassa, e também é comparado com a curva de queda de pressão por unidade de comprimento sem a biomassa.

## 6.2 - Discussão dos Resultados dos Experimentos com a Teoria

### Verificação das quedas de pressão máximas teóricas e experimentais

Foi realizada a verificação das quedas de pressão máximas teóricas através da equação 6.1 e as mesmas foram comparadas com as quedas de pressão máximas experimentais. Foram calculados os erros percentuais em todos os testes realizados neste trabalho e feito um comentário a respeito de cada Tabela.

$$ERRO (\%) = \frac{(\Delta P_{Teórico} - \Delta P_{Experimental})}{\Delta P_{Teórico}} \times 100 \quad (6.1)$$

As Tabelas 12, 13 e 14 mostram, respectivamente, as quedas de pressão máximas nos experimentos com diâmetro 0,044 m, 0,090 m e 0,090 m com C.C.C.

A Tabela 12 mostra que, no experimento com diâmetro 0,044 m, conforme se aumenta a cota de areia o erro percentual aumenta.

É percebido que os valores experimentais das duas granulometrias em cada uma das cotas são bastante próximos, já os teóricos não são. O erro percentual tende a aumentar conforme aumenta a cota em estudo apresentando alguns valores elevados.

**Tabela 12 – Quedas de pressão máximas no experimento com diâmetro 0,044 m.**

EXPERIMENTO $\phi = 0.044$ m							
AREIA 321.02 $\mu$ m				AREIA 546.61 $\mu$ m			
COTA (m)	$\Delta P_{teo.}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{exp.}$ (mmH <sub>2</sub> O)	ERRO (%)	COTA (m)	$\Delta P_{teo.}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{exp.}$ (mmH <sub>2</sub> O)	ERRO (%)
0.075	128.29	130	1.33	0.075	121.71	110	-9.62
0.125	203.95	236	15.72	0.125	197.37	227	15.01
0.175	282.89	385	36.09	0.175	279.61	342	22.32

A Tabela 13 mostra que no experimento com diâmetro 0,090 m conforme se aumenta a cota de areia o erro percentual aumenta. Na areia com diâmetro médio de 72.43  $\mu$ m só foi realizado teste na cota 0,425 m.

É percebido que, em cada uma das cotas, tanto os valores experimentais quanto os teóricos das quedas de pressões máximas são diferentes, sendo visto que a areia de

granulometria maior apresenta valores mais elevados que as de granulometria menor. O erro percentual varia, mas sem apresentar valores elevados.

]

**Tabela 13 – Quedas de pressão máximas no experimento com diâmetro 0,090 m.**

EXPERIMENTO $\phi = 0,090$ m											
AREIA 72.43 $\mu\text{m}$				AREIA 321.02 $\mu\text{m}$				AREIA 546.61 $\mu\text{m}$			
COTA (m)	$\Delta P_{\text{teo.}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{\text{exp.}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	ERRO (%)	COTA (m)	$\Delta P_{\text{teo.}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{\text{exp.}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	ERRO (%)	COTA (m)	$\Delta P_{\text{teo.}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{\text{exp.}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	ERRO (%)
0.075	—	—	—	0.075	112.42	95	-15.50	0.075	118.71	102	-14.08
0.125	—	—	—	0.125	158.81	189	19.01	0.125	166.67	184	10.40
0.175	—	—	—	0.175	238.21	257	7.89	0.175	250.00	287	14.80
0.225	—	—	—	0.225	317.61	327	2.96	0.225	333.33	359	7.70
0.275	—	—	—	0.275	397.01	395	-0.51	0.275	416.67	428	2.72
0.325	—	—	—	0.325	476.42	412	-13.52	0.325	500.00	571	14.20
0.375	—	—	—	0.375	555.82	586	5.43	0.375	583.33	596	2.17
0.425	613.21	540	-11.94	0.425	635.22	624	-1.77	0.425	675.31	721	6.77
0.475	—	—	—	0.475	714.62	773	8.17	0.475	753.93	757	0.41

A Tabela 14 mostra que no experimento com diâmetro 0,090 m com C.C.C. o  $\Delta P_{\text{Teórico}}$  máximo diminui com o aumento da concentração de biomassa, pelo fato de que conforme se aumenta a concentração de biomassa na areia menor é o peso da mistura binária, consequentemente a queda de pressão máxima experimental diminui.

Porém foi verificado que a queda de pressão máxima experimental com C.C.C. é maior que do leito constituído somente por areia. Isso sugere que quando se insere uma concentração de C.C.C. no leito, a viscosidade da mistura binária aumenta, daí a queda de pressão máxima tende a aumentar para manter constante a velocidade do gás, obedecendo a lei de Darcy. Com isso, o erro percentual é bastante elevado quando se insere a biomassa no leito.

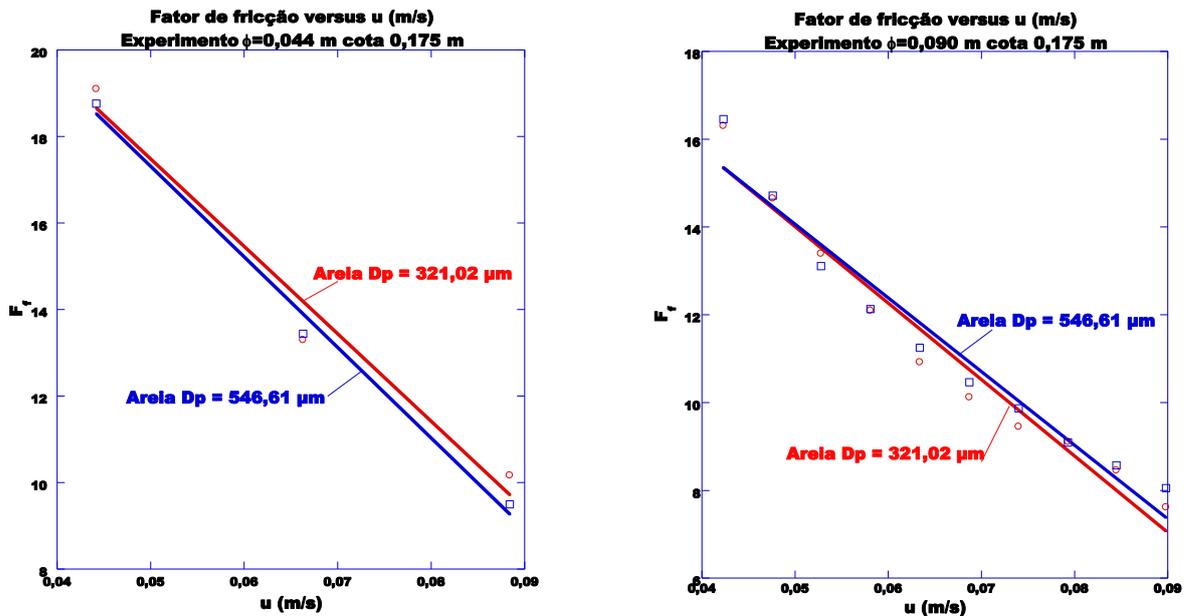
**Tabela 14 – Quedas de pressão máximas no experimento com diâmetro 0,090 m com C.C.C.**

EXPERIMENTO $\phi = 0,090$ m COM C.C.C.				
COMPONENTES DO LEITO	COTA (m)	$\Delta P_{\text{teo.}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{\text{exp.}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	ERRO (%)
AREIA 546.61 $\mu\text{m}$	0.425	675.31	721	6.77
124 g de C.C.C. 14/20 MESH	0.425	664.31	866	30.36
166 g de C.C.C. 14/20 MESH	0.425	664.62	803	20.82
124 g de C.C.C. 20/45 MESH	0.425	653.30	927	41.89
166 g de C.C.C. 20/45 MESH	0.425	645.75	848	31.32

## Análise sobre o fator de fricção

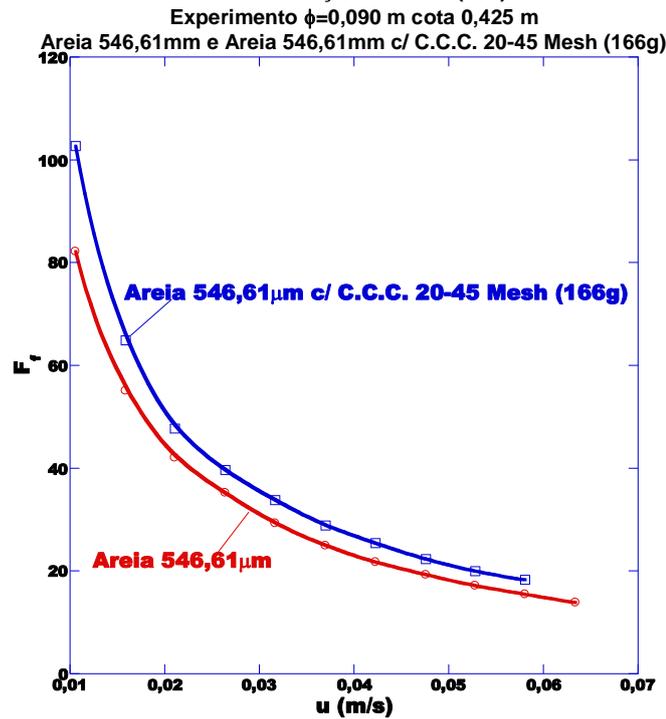
Comparação do fator de fricção entre os experimentos fixando o diâmetro e cota, variando a material e granulometria do leito.

Figura 45 – Comparação do fator de fricção versus  $u$  (m/s) nos experimentos de  $\phi=0,044$  m e  $\phi=0,090$  m cota 0,175 m.



A Figura 45 apresenta perfis de variação de fator de fricção dentro leito com a variação de dois tipos de granulometrias de areia, mostrando à esquerda que no experimento de diâmetro  $\phi=0,044$ m o coeficiente de fricção é maior para a areia de granulometria menor. Isso foi mostrado na tabela 12, onde o leito com areia de granulometria menor apresenta maiores perdas de carga no escoamento do fluido nos interstícios desse meio poroso. Já à direita no experimento de diâmetro  $\phi=0,090$  m ocorreu o contrário, o coeficiente de fricção é maior para a areia de granulometria maior. Isso foi mostrado na tabela 13, onde o leito com areia de granulometria maior apresenta maiores perdas de carga no escoamento do fluido nos interstícios desse meio poroso.

Figura 46 – Comparação do fator de fricção versus  $u$  (m/s) experimento  $\phi=0,090$  m cota 0,425 m Areia 546,61  $\mu$ m e Areia 546,61  $\mu$ m com C.C.C. 20-45 Mesh (166g).



A Figura 46 apresenta perfis de variação de fator de fricção com o leito preenchido até a cota 0,425 m no experimento de diâmetro 0,090 m, foi comparado o leito preenchido somente com areia de granulometria 546,61 $\mu$ m e leito composto de areia de granulometria 546,61 $\mu$ m com concentração de 166g de C.C.C. É mostrado que no experimento composto por areia e biomassa o coeficiente de fricção é maior que no experimento preenchido somente por areia. Isso foi mostrado na tabela 14, essa tabela complementa a explanação feita acerca da tabela 14.

### Verificação dos valores obtidos pelas equações teóricas com resultados experimentais

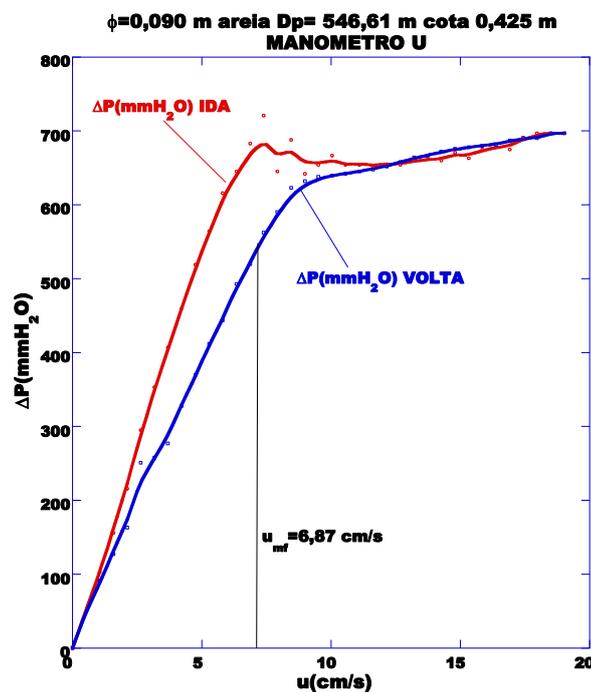
Foi realizada a verificação das equações teóricas citadas no Capítulo 4 e as mesmas foram comparadas com os resultados experimentais. Foram calculados a velocidade mínima de fluidização, velocidade terminal, número de Reynolds, número de Froude. Para o experimento de diâmetro 0,090 m com areia de granulometria 546,61 $\mu$ m na cota 0,425 m.

**Tabela 15 – Valores obtidos pelas equações teóricas para o experimento com diâmetro 0,090 m com areia de granulometria 546,61 $\mu$ m na cota 0,425 m.**

$u_{mf}$ (m/s)	$u_{mf}$ (cm/s)	Ar	$C_1$	$C_2$	$K_1$	$K_2$	$Re_{pmf}$	$C_D$	$u_t$ (m/s)	$Fr_{mf}$
0.0687	6.87	7787.43	1376.46	24.50	28.1	0.0408	5.18	10.59	0.92	0.0009

A Tabela 15 mostra os resultados teóricos obtidos, mostra também que os valores obtidos para  $k_1$  e  $k_2$  se aproximam muito dos valores obtidos por outros autores como mostrado na Tabela 4 (Capítulo 4).

**Figura 47 – Velocidade mínima de fluidização para o experimento com diâmetro 0,090 m com areia de granulometria 546,61  $\mu$ m na cota 0,425 m.**

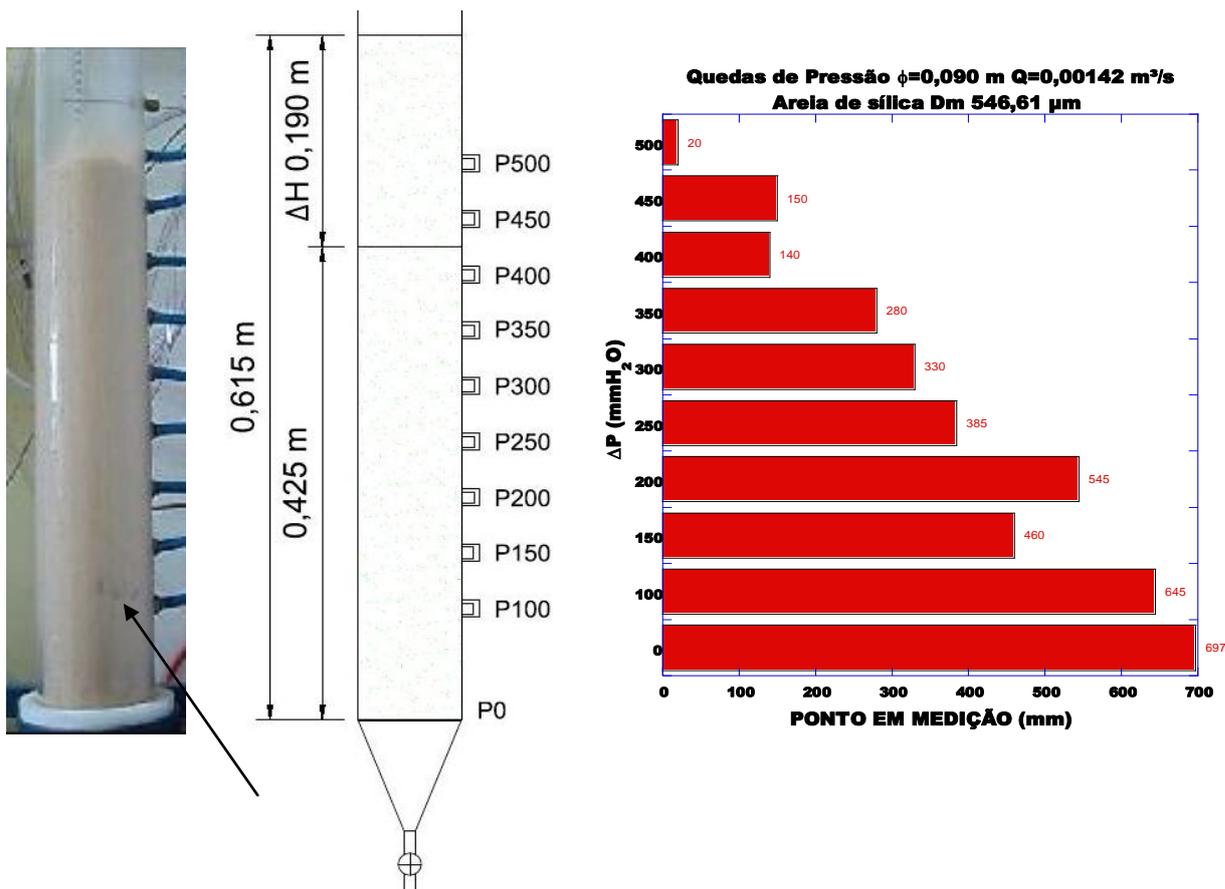


A Figura 47 mostra velocidade mínima de fluidização teórica obtida, seu valor se aproxima do que é mostrado graficamente nas teorias de referência conforme a Figura 3 mostrada no Capítulo 3.

### **Análise sobre a inversão de pressão observada no regime de fluidização borbulhante**

Como visto anteriormente, no experimento de diâmetro 0,090 m, a partir da cota 0,425 m, o leito sendo preenchido tanto com areia em quaisquer granulometrias, como com o leito em mistura binária (areia e C.C.C., também, em quaisquer granulometria), ocorre uma inversão de pressão na coluna do leito na cota 0,150 m. A Figura 45 demonstra a inversão de pressão.

**Figura 48 – inversão de pressão observada no regime de fluidização borbulhante**



No ponto de medição de pressão situado na cota 0,150 m foi registrado que a referida pressão se tornou inferior à pressão seguinte (cota 0,200 m), o que não era esperado e não poderia ser observado sem este aparato experimental com tubos de parede transparente.

Foi observado que em uma pequena distância abaixo do ponto P150 e um pouco acima de P100, surgem as bolhas, estas bolhas crescem à medida que percorrem o leito e, justamente na cota 0,150 m esta pressão se apresenta menor. Neste ponto é possível observar que na formação das bolhas as partículas constituintes do leito próximas à parede descem e as que estão no centro são arrastadas para cima verificando-se uma circulação do leito.

Esta cota é entendida como ideal a ser injetada a biomassa, pelo fato de que através deste fenômeno, na combustão ao longo do leito do reator, as partículas de biomassa iriam ser arrastadas oxidando-se com o gradiente de temperatura, e consumidas totalmente na superfície.

### **Avaliação da Cota Crítica de Empistonamento em cada Experimento com Areia Bruta de Praia**

Com a ocorrência de empistonamento sem uma prévia fluidização do leito no experimento de diâmetro 0,044 m na cota 0,225 m, antecedido da tendência de empistonamento no mesmo experimento na cota anterior (0,175 m) em vazões muito baixas. Estimulou a avaliar em cada um dos outros dois tubos de acrílico do aparato experimental a altura mínima em que ocorre empistonamento, sem apresentação do regime de leito fluidizado.

A Tabela 16 mostra os dados envolvidos para esta análise em cada diâmetro.

**Tabela 16 – Dados da cota critica em cada experimento.**

<b>DADOS DA COTA CRÍTICA EM CADA EXPERIMENTO</b>			
<b>EXPERIMENTO</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>DIÂMETRO INTERNO - Di (m)</b>	<b>0,044</b>	<b>0,069</b>	<b>0,090</b>
<b>ÁREA DA SEÇÃO - A (m<sup>2</sup>)</b>	<b>0,00152</b>	<b>0,00374</b>	<b>0,00636</b>
<b>COTA CRÍTICA DA COLUNA - Lc (m)</b>	<b>0.225</b>	<b>0.550</b>	<b>0.940</b>
<b>VAZÃO EM QUE OCORRE O EMPISTONAMENTO - Qc (SCFH)</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>105</b>
<b>MASSA DO LEITO DE AREIA DE SÍLICA - M (g)</b>	<b>545</b>	<b>2.930</b>	<b>9.415</b>

Foi observado que as razões entre as áreas tendem a serem proporcionais às razões entre as vazões críticas, às razões entre as cotas críticas e também às razões entre as massas. Ou seja,

$$\frac{A_2}{A_1} = f\left(\frac{Q_{C2}}{Q_{C1}}\right) \quad (6.2)$$

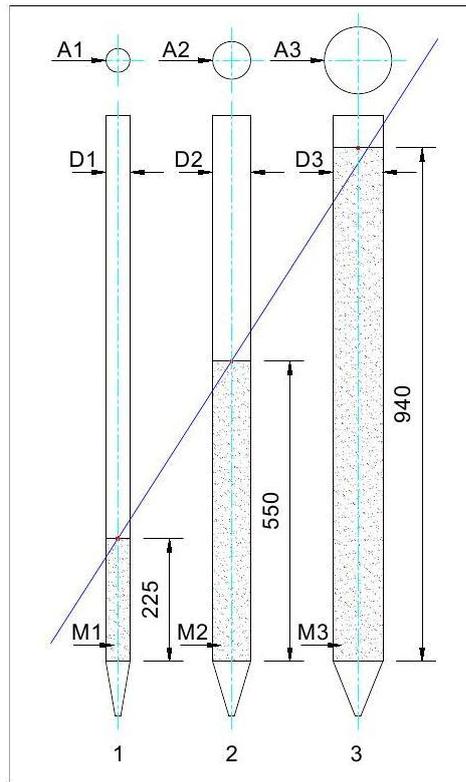
e

$$\frac{A_2}{A_1} = f\left(\frac{L_{C2}}{L_{C1}}\right) \quad (6.3)$$

**Tabela 17 – Razões entre áreas, cotas criticas e vazões em cada experimento.**

$A_2/A_1$	2.46	$L_{C2}/L_{C1}$	2.44	$Q_{C2}/Q_{C1}$	2.00
$A_3/A_2$	1.70	$L_{C3}/L_{C2}$	1.71	$Q_{C3}/Q_{C2}$	1.71
$A_3/A_1$	4.18	$L_{C3}/L_{C1}$	4.18	$Q_{C3}/Q_{C1}$	4.20

**Figura 49 – Ilustração dos três experimentos, com areia preenchendo até a cota crítica.**



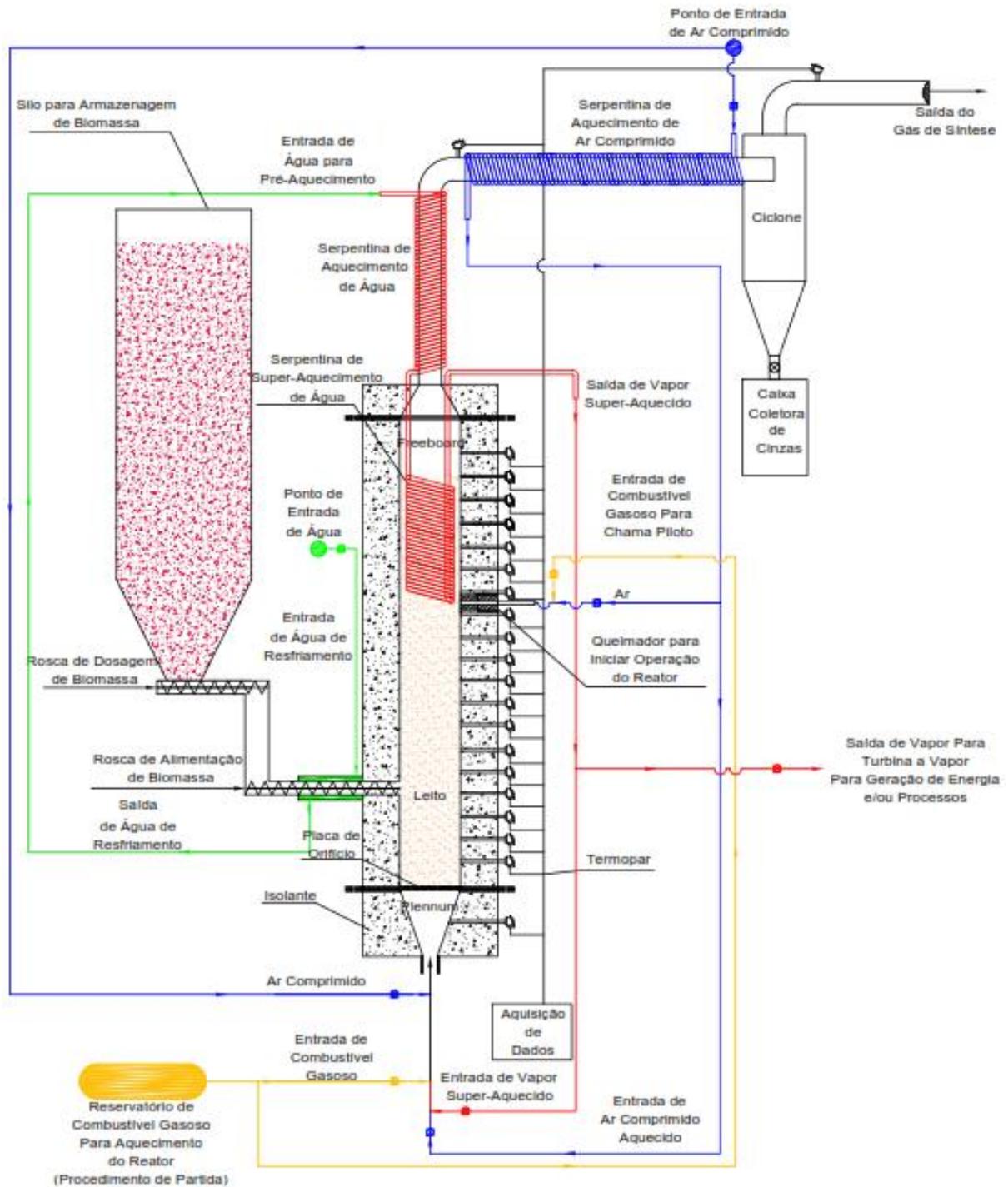
**Figura 50 – Foto do aparato experimental, com areia preenchendo até a cota crítica.**



# CAPÍTULO 7 – ANTEPROJETO BÁSICO DO REATOR

Através da revisão bibliográfica a respeito de combustão em leito fluidizado borbulhante, é idealizado um modelo preliminar (anteprojeto) de um reator de leito fluidizado a ser desenvolvido e analisado, mostrado na Figura 51.

Figura 51 – Desenho esquemático do gaseificador de leito fluidizado “Anteprojeto”.



Com os resultados obtidos nos estudos dos parâmetros fluidodinâmicos e comparações, têm-se a relação de diâmetro do reator, altura do leito, altura de alimentação e granulometria da biomassa.

De posse dos resultados e análise dos mesmos, para um reator de gaseificação de leito fluidizado borbulhante considerado como foco deste projeto de pesquisa, o qual se caracteriza como estudo inicial da fluidodinâmica quanto à influência da inserção de biomassa no leito. A priori, tomou-se como base o diâmetro do reator como sendo 0,090 m. Com a vazão mínima de fluidização e vazão no regime borbulhante é dimensionado o compressor ou soprador para injeção de ar.

Neste anteprojeto a cota de referência adotada para preenchimento do leito foi 0,425 m pelo fato de que a partir dessa vazão, ocorre uma inversão de pressão na coluna do leito na cota 0,150 m devido ao fato de naquela região ocorrer a formação de bolhas. Esta cota é entendida como ideal para ser o ponto de alimentação da biomassa, através de um transportador de fuso, habitualmente usado por outros autores.

Atinge-se no regime de fluidização borbulhante uma variação da altura do leito na ordem de 0,190 m. Nesta região compreendida por esta variação da altura ( $\Delta H$ ), será instalado uma serpentina confeccionada com material de alta resistência à abrasão, que funcionará como um trocador de calor. O motivo da instalação deste trocador de calor é que dependendo da finalidade, quer seja um gaseificador ou uma caldeira de leito fluidizado borbulhante, uma das aplicações visadas seria a geração de vapor. Em um gaseificador, segundo Figueiredo (2009), injetando-se vapor superaquecido ao leito, obtém-se maiores quantidades de  $H_2$ , enquanto em uma caldeira o objetivo do vapor produzido seria para realização de trabalho.

Peculiarmente, este reator poderá operar com qualquer tipo de biomassa sólida triturada, e no caso da casca de castanha de caju, contendo LCC e suas propriedades anteriormente citadas, apresentará a inovação de ser um reator auto-limpante. Esta característica é justificada pela abrasividade da areia de sílica em movimento devido às bolhas geradas no regime do leito, quando em contato com as paredes do trocador de calor e do reator, os quais farão a remoção de qualquer incrustação.

## **Balanco de Massa e Energia no Processo**

O modelo físico é o tradicional de dois fluidos. Em condições isotérmicas, com duas fases (gás e sólido), e sem reações químicas, as equações da conservação da massa e da quantidade de movimento são expressas conforme a seguir.

## Equação da Continuidade

$$\int_{\forall R} \frac{\delta}{\delta t} (\varepsilon \rho) d\forall + \int_{SR} \rho \varepsilon u \cdot m dS = 0 \quad (7.1)$$

## Equação do Movimento

$$\int_{\forall R} \varepsilon \rho u d\forall = \int_{SR} T m dS - \int_{\forall R} m^* d\forall + \int_{\forall R} \varepsilon \rho g d\forall \quad (7.2)$$

Onde,  $SR$  e  $\forall R$  são respectivamente a superfície e o volume da região R que encerra matriz porosa e fluido;

$\rho$  = densidade do fluido;

$\varepsilon$  = porosidade da matriz (fração volumétrica ocupada pelo fluido);

$u$  = velocidade intersticial do fluido;

$T$  = tensor tensão que atua na fase fluida;

$m^*$  = força exercida pelo fluido sobre a matriz porosa (por unidade de volume do sistema);

$g$  = intensidade do campo exterior.

A velocidade superficial do fluido  $q$ , utilizada amplamente em substituição à velocidade intersticial  $u$ , é medida desconsiderando a presença da matriz porosa. Confundindo os conceitos de porosidade volumétrica e superficial.

$$m^* = m - (1 - \varepsilon)\rho g \quad (7.3)$$

$m$  = força resistiva;

$$\text{empuxo} = (1 - \varepsilon)\rho g \quad (7.4)$$

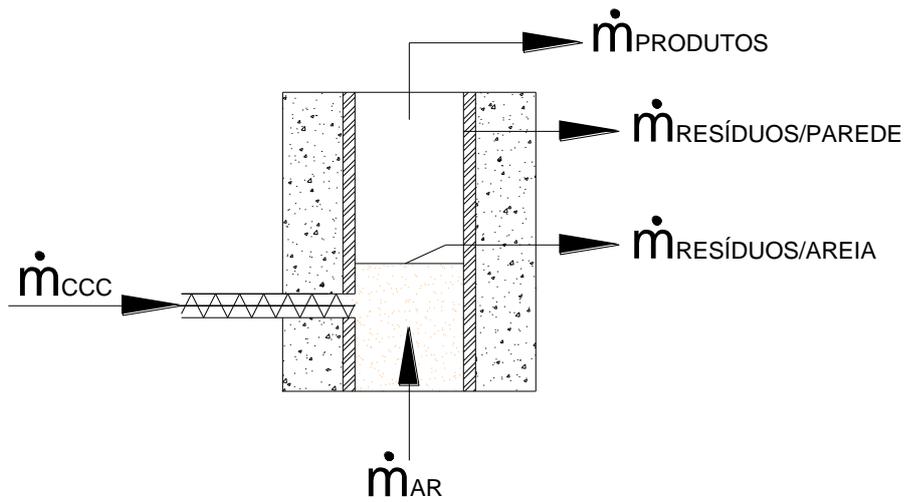
$$T = -pi + \tau \quad (7.5)$$

$p$  = pressão no ponto;

$\tau$  = tensão extra;

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s + \left. \frac{dm}{dt} \right|_{vc} \quad (7.6)$$

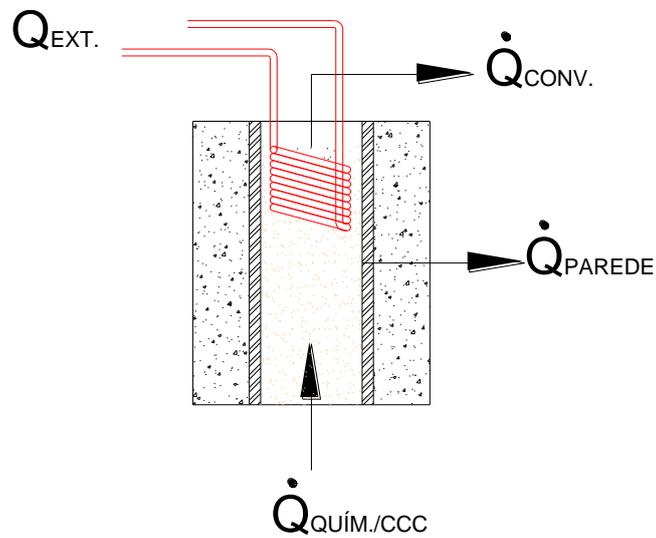
Figura 52 – Desenho esquemático do balanço de massa para o gaseificador de leito fluidizado.



$$\dot{m}_{ar} + \dot{m}_{CCC} = \dot{m}_{Prod.} + \dot{m}_{Resíduos} \quad (7.7)$$

$$\dot{Q}_{Quim/CCC} = \dot{Q}_{EXT.} + \dot{Q}_{PAREDE} + \dot{Q}_{CONV.} \quad (7.8)$$

Figura 53 – Desenho esquemático do balanço de energia para o gaseificador de leito fluidizado.



$$Q_{Quim/CCC} = \dot{m}_{CCC} \cdot PCI_{CCC} \quad (7.9)$$

$$\dot{Q}_{CONV.} = \sum \dot{m}_s \cdot h_s \quad (7.10)$$

$$\dot{Q}_{PAREDE} = \int_0^L q(x) dx \quad (7.11)$$

$$\dot{Q}_{EXT.} = \dot{m}_{H_2O} \cdot C_p \cdot (T_s - T_e) \quad (7.12)$$

## CONCLUSÕES

Com a realização desta Dissertação de Mestrado pode ser constatada a importância do estudo da fluidodinâmica do leito binário constituído de areia e casca da castanha de caju, para servir de base de projeto de um reator de gaseificação inovador. As contribuições foram identificadas, em termos de dimensionamento e especificações técnicas, como parâmetros de projeto, que influenciam diretamente no funcionamento e desempenho do reator.

O confronto entre valores analíticos e aqueles obtidos na experimentação mostrou certa proximidade e consistência de resultados, confirmando alguns parâmetros de projeto úteis ao desenvolvimento de um reator de gaseificação da biomassa, com referência ao leito fluidizado borbulhante, em escala industrial.

Tendo como base os resultados dos testes, pôde-se perceber pontos indicativos no reator que seriam mais adequados a alimentação do combustível (casca) com base nos valores de pressão ao longo do leito, confirmando a proposição de Andrade (2007), sobre a adequada alimentação de combustível que depende do regime de operação do gaseificador.

Os principais problemas encontrados, durante a realização dos testes, foram: a dificuldade em classificar a areia para o estudo; a obtenção dos valores de pressão e a altura do leito devido às limitações do experimento pela falta de um sistema de aquisição de dados e por ser um trabalho experimental extremamente trabalhoso.

Foi visto que o leito constituído de areia e C.C.C. com granulometrias maiores, as partículas desta biomassa tendem a subir para a superfície, devido ao fator de forma e à densidade da partícula. Os experimentos puderam elucidar as divergências entre o pensamento intuitivo natural e a realidade dos resultados obtidos, especialmente quanto à relação entre a vazão de ar no escoamento e a densidade média do leito, inclusive quando inclui a C.C.C., pois o que era de se esperar é ser mais fácil fluidizar esse leito binário, quando de fato acontece o contrário.

Foram apresentados gráficos das curvas fluidodinâmicas, comparações entre diâmetros de experimentos e altura do leito, assim como a influência da inserção de casca de castanha de caju. Como os experimentos foram realizados na temperatura de 25°C, acredita-se que a viscosidade do leito e conseqüentemente a sua fluidodinâmica deve mudar significativamente, principalmente pela influência da C.C.C. sobre a operação, quando em temperatura na faixa volta dos 700°C a 900°C.

## **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Sugere-se prioritariamente que seja empregado um sistema de aquisição de dados, para facilitar e agilizar a execução do trabalho, considerando ser exaustivo o trabalho experimental e, por essa razão, sujeito a falhas por fadiga.

Seria importante implementar uma investigação quanto a influência da temperatura do ar de entrada no leito, antes de consolidar o projeto do reator, o que exigiria modificações da bancada de pesquisa, com materiais resistentes a temperatura, como um tubo de quartzo, por exemplo.

Seria interessante também, um estudo numérico dos fenômenos presentes no processo através de um trabalho de simulação via software ANSYS-CFX.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABELHA P., GULYURTLU I., BOAVIDA D., SEABRA B. J., CABRITA I., LEAHY J., KELLEHER B., LEAHY M., “**Combustion of poultry litter in a fluidised bed combustor**”. Fuel, Vol. 82, 2003. pp. 687–692.
- ANÁLISE DA INDÚSTRIA DA CASTANHA DO CAJU, **Inserção das Micro e Pequenas Empresas no Mercado Internacional**. vol 1, novembro, 2006, Disponível em: <[http://pdf.usaid.gov/pdf\\_docs/PNADM250.pdf](http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNADM250.pdf)>. Acesso em: 03 de janeiro, 2011.
- ANDRADE, R. V., **Gaseificação de Biomassa: Uma Análise Teórica e Experimental**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2007. 205 p.
- BABKIN, V. S., **Filtration combustion of gases, present state of affairs and prospects**. Pure and Applied Chemistry 65, 1993. pp. 335-344.
- BARCELLOS, W. M.; SOUZA, L. C. E. O.; SVELIEVE, A. V. ; KENNEDY, L. A., **Ultra-low-emission steam boiler constituted of reciprocal flow porous burner**. Experimental thermal and Fluid Sciences, v 35, 2011. p. 570-580.
- BRIDGWATER, A.V.; EVANS, G.D., **An Assessment of Thermochemical Conversion Systems For Processing Biomass and Refuse**. Energy Technology Support Unit (ETSU) on behalf of the Department of Trade, ETSU B/T1/00207/REP, 1993.
- CABRAL, T. M., **Avaliação dos Constituintes e do Potencial Mutagênico do Material Particulado Oriundo do Beneficiamento Artesanal da Castanha do Caju**. Tese de Doutorado – Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.
- CAJUCULTURA, 2011. Disponível em: <<http://www.cajucultura.com>>. Acesso em: 03 de janeiro, 2011.

CARNEIRO, F. L., **Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos**. 2ª Ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 1996. 258 p.

CHITESTER, D. C.; KORNOSKY, R. M.; FAN, L.S.; DANKO, J. P. **Characteristics of fluidization at high pressure**. Chem.Eng.Sci, v. 39, p. 253-261,1984.

COELHO, S. T. ET. AL. **Panorama do Potencial de Biomassa no Brasil**. Agencia Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. São Paulo, 2002.

DAVIDSON, J.F.; Y. HARRISON, D., **Fluidised Particles**. Cambridge, University Press, 1963.

DEMIRBAS, A., **Fuel** 76, 1997. 431– 434.

ERGUN, S. (1952), “**Fluid flow through packed columns**”. Chemical Engineering Progress, vol. 48, nº 2, p.89-94.

FIGUEIREDO, FLÁVIO A. B., “**Pirólise e gaseificação de casca de castanha de caju: avaliação da produção de gás, líquidos e sólidos**”. Campinas, SP: [s.n.], 2009.

FIGUEIREDO, J.; SANTANA, H., “**Desafios para a cajucultura no Brasil: o comportamento da oferta e da demanda da castanha de caju**”. Revista Econômica do Nordeste, Fortaleza, v. 37, nº 4, out-dez, 2006.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária., **Sistemas de produção**. Embrapa, Agroindústria Tropical, 1 ISSN 1678-8702 janeiro de 2003.

FIGUEIREDO, F. A. B.; FIGUEIREDO, R. A.; SÁNCHEZ, C. G.; GONZALO, A.; SANCHEZ, E. M. S.; ARAUZO, J.; SÁNCHEZ, J. L. “**Pyrolysis and gasification of cashew nut (Anacardium Occidentale L.) shell: Liquid, solid and gas products**”. 19th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM), November 5-9, Brasília, DF, 2007.

FERREIRA, A.S.; MOREIRA, V. B.; RICARDO, H. M. V.; COUTINHO, R.; GABETTO, J. M.; MARCHIORI, E., **Fibrose maciça progressiva em trabalhadores expostos à**

**silica.** Achados na tomografia computadorizada de alta resolução. J Bras Pneumol, 2006. 32(6):523-8.

FOSSUM, M.; HUSTAD, J. E., **Biomass gasification for industrial production of tar and charcoal.** in: **Advances in Thermochemical Biomass Conversion.** Vol. 2. (ed: bridgwater, a. V.) Blackie Academic & Professional, Cambridge, UK, 1993, pp. 1242-1256.

GERDART, D., **Gas Fluidization Technology.** London: Wiley & Sons Ltd, 1986, 468 p.

GERMAN, R. M., **Powder Metallurgy Science.** 2° ed., Princeton, NJ: MPIF, 1994.

GERMAN, R. M., **A Measure of the Number of Particles in Agglomerates.** Int. J. Powder Metal, v. 32, n. 4, 1996. p. 365-373.

GÓMES, E. O., **Projeto, construção e Avaliação preliminar de um reator de leito fluidizado para gaseificação de bagaço de cana-de-açúcar.** Campinas, SP, 1996.

GRACE J.R.; AVIDAN A.A.; KNOWLTON T.M., **“Circulating Fluidized Beds”.** Blackie Academic & Professional, 1997.

HETSRONI, GAD., **Handbook of Multiphase Systems.** Estados Unidos: McGraw-Hill Book. Company, 1982.

IBGE, Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 03 de Janeiro, 2011.

KOORNNEEF J., JUNGINGER M., FAAIJ A., **“Development of fluidized bed combustion - An overview of trends, performance and cost”**, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 33, 2007. p. 19–55.

KUNII, D., LEVENSPIEL, O., **Fluidization Engineering,** John Wiley and Sons, New York, 1979.

KUNII, D., LEVENSPIEL, O., **Fluidization Engineering:** Second Edition. Boston: Butterworth-Heinemann, 1991. 491 p.

- LOPES H., “**Estudo do comportamento de metais pesados na combustão de lamas residuais urbanas em leito fluidizado**”, Dissertação apresentada para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia do Ambiente, pela Universidade Nova de Lisboa, faculdade de Ciências e Tecnologia, 2002.
- MAZZETTO, S. E.; LOMONACO, D.; MELE, G., “**Óleo da castanha de caju: oportunidades e desafios no contexto do desenvolvimento e sustentabilidade industrial**”, Quím. Nova, Vol.32, Nº.3, São Paulo, 2009, doi: 10.1590/S0100-40422009000300017.
- MASSARANI, G., **Fluidodinâmica em Sistemas Particulados**. Editora Edgard Blucher. Rio de Janeiro, 2002.
- PAISLEY, M. A.; Overend, R. P.; **Biomass Gasification for Power Generation**. National Renewable Energy Laboratory, 1997.
- PIO CORRÊA, M., “**Dicionário de plantas Úteis do Brasil**”. Rio de Janeiro: Imprensa Nacional, 1926.
- PORTAL SÃO FRANCISCO, Disponível em: <<http://www.portalsaofrancisco.com.br>>. Acesso em: 03 janeiro, 2011.
- RADOVANOVIC M., “**Fluidized Bed Combustion**”, Hemisphere Publishing Corporation, 1986.
- RAWLE, A., **Basic Principles of Particle Size Analysis**. Disponível em: <<http://www.malvem.co.uk>>. Acesso em 17 de maio, 2002.
- REZENDE, C. M. DE O.; TANNOUS, K., **Fluidodinâmica de Biomassa em Leito Fluidizado Gasoso**. VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. Uberlândia-Mg, 2009.
- RIBEIRO, R. S., **Investigação Experimental e Integração de um Sistema de Geração de Energia Elétrica por Gaseificação de Biomassa para Comunidades Isoladas**.

Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM. DM-112/07, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007. 92p.

SALEMA, SOUSA A., **Co-Combustão de Biomassa e Carvão em Leito Fluidizado**, Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Faculdade de Tecnologia Nova Lisboa, Lisboa, 2008.

SAXENA S.C.; JOTSHI C.K., “**Fluidized-bed Incineration of Waste Materials**”. Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 20, 1994. p. 281-324.

SOUZA, R., **Estudo da concentração volumétrica das bolhas em um leito fluidizado**. Dissertação (Dissertação em Ciências) - Pós Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1978. 124p

**TECNOLOGIA DA FLUIDIZAÇÃO**: Disponível em: <<http://www.fluidizacao.com.br>>. Acesso em: 03 janeiro 2011.

TUNS, STEPHEN R., **An Introduction to Combustion**. International Editions, 2000.

WEN, C. Y.; YU, Y. W. **Mechanics of fluidization**. Chemical Engineering Progress Symposium Series, v. 62, p. 100-125, 1966.

YIN, L. X.; WU, C. Z.; ZHENG, S. P.; CHEN, Y., **Design and operation of a CFB Gasification and Power Generation System for Rice Husk**. Biomass & Bioenergy, V. 23, 2002. pp. 181-187.

## ANEXOS

### Anexo A – Fotos de Componentes

Figura 54 – Medidor de vazão tipo rotâmetro faixa de medição: 10 a 100 SCFH.

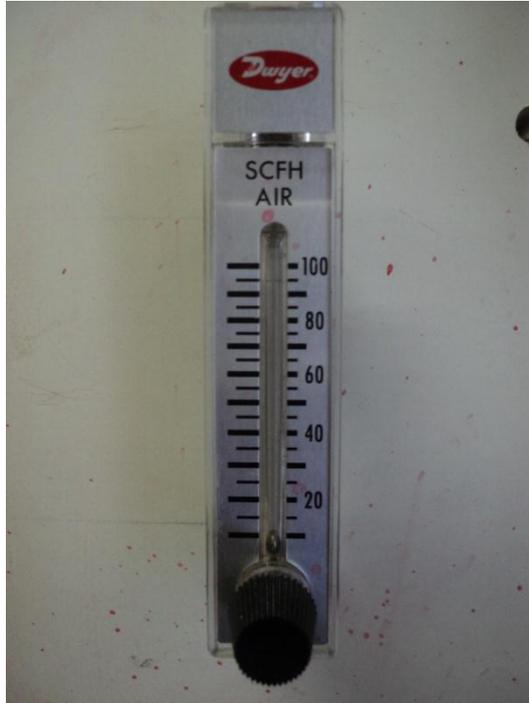


Figura 55 – Medidor de vazão tipo rotâmetro faixa de medição: 0,5 a 5 SCFH.



**Figura 56 – Termômetro digital portátil com escala de temperatura de -50 a +1300 Fabricante: Equitherm, Modelo: DM6802B.**



**Figura 57 – Termopar tipo k.**

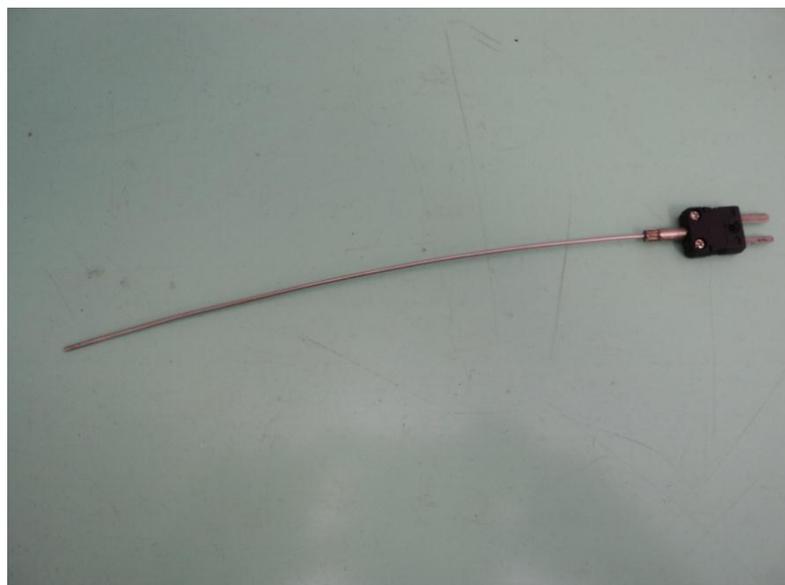


Figura 58 – Amplificador piezo com saída de sinal analógico de 4 ... 20 mA e 0 ... 10 V

Fabricante: *Kistler Instruments.*



Figura 59 – Multímetro digital, Modelo: DT830B.



**Figura 60 – Compressor da marca *Schulz*, modelo CSL 10 BR/100 Bravo 140psi 2,0cv.**



**Figura 61 – Conjunto de preparação de ar comprimido da marca *Werk-Schott*, série 221 Mini FR+L, faixa de pressão 0,2 - 10 bar.**



**Figura 62 – Manômetro analógico (0-10 kgf/cm<sup>2</sup>) Fabricante: Record.**





## Certificado de Calibração

Rede Brasileira de Calibração  
Laboratório de Pressão Acreditado pela Cgcre sob n° 261

Data da Calibração: 19/05/11

N° 16083

Data da Emissão: 19/05/11

Página 1/2

### 1. DADOS DO CLIENTE

Contratante: LABORATÓRIO DE COMBUSTÍVEIS E ENERGIA RENOVÁVEIS  
Campus do Pici - Amadeu Furtado - Fortaleza

Solicitante: O MESMO

C.S. N°: 171/11



### 2. MATERIAL CALIBRADO: Manômetro analógico

Fabricante: RECORD

Faixa nominal: (0 a 10) kgf/cm<sup>2</sup>

Valor de uma divisão: 0,2 kgf/cm<sup>2</sup>

Número de série do instrumento: NÃO CONSTA

Identificação do instrumento: MA-01

Classe de tolerância deste manômetro: B Norma: NBR 14105

2% do total da faixa nominal entre 25% e 75% da escala e 3% do total da faixa nominal para os demais pontos.

### 3. PADRÕES UTILIZADOS

- Manômetro Digital Padrão (0 a 20) bar RL 334

Rastreado à RBC pelo certificado n° 15198

Data de Calibração: 22/01/11

Próxima Calibração: 22/01/12

### 4. SÍNTESE DO PROCEDIMENTO INTERNO

Conforme o procedimento interno PTI. 003 Revisão 06, o manômetro foi montado na sua posição de utilização e comparado com um manômetro padrão. Foram realizados dois ciclos de medição nos sentidos crescente e decrescente das indicações.

Este certificado atende aos requisitos de acreditação da Cgcre, a qual atesta a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.

A incerteza expandida apresentada é baseada em uma incerteza padrão combinada, multiplicada por um fator de abrangência  $k=2$  fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%, adotada segundo publicação BA-4/02 - Especificação da Incerteza de Medição/janeiro de 1999.

Os resultados deste documento referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.  
O LAMETRO autoriza a reprodução deste documento desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo íntegro.  
Esta calibração não inclui o instrumento do controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica.

Campus Universitário do Pici, s/n°,  
Bloco 714 - CEP: 60.455-970  
Dep. de Eng. Mecânica e de Produção

Tel/Fax.: (85) 3217-1410/3366 - 9632 (R 231)  
www.lametro.ufc.br  
lametro.ufc@gmail.com

ASTEF  
CNPJ: 07.778.137/0001-10  
Insc. Est. Isento



## Certificado de Calibração

Rede Brasileira de Calibração  
 Laboratório de Pressão Acreditado pela Cgcre sob n° 261

Data da Calibração: 19/05/11

N° 16083

Data da Emissão: 19/05/11

Página 2/2

### 5. RESULTADOS

Pressão no Manômetro	Indicação no Manômetro Padrão			
	Primeiro ciclo		Segundo ciclo	
	Crescente	Decrescente	Crescente	Decrescente
MPa (kgf/cm <sup>2</sup> )	(kgf/cm <sup>2</sup> )	(kgf/cm <sup>2</sup> )	(kgf/cm <sup>2</sup> )	(kgf/cm <sup>2</sup> )
0,0 0,0	(0,00)	(0,00)	(0,00)	(0,00)
0,2 2,0	(1,95)	(1,94)	(1,96)	(1,94)
0,4 4,0	(4,03)	(3,95)	(4,03)	(3,95)
0,6 6,0	(6,06)	(5,98)	(6,07)	(5,98)
0,8 8,0	(8,08)	(8,05)	(8,08)	(8,06)
1,0 10,0	(10,10)	(10,10)	(10,10)	(10,10)

- INCERTEZA DE MEDIÇÃO MÁXIMA DOS RESULTADOS ( $U_{95\%}$ ):  $\pm 0,05$  kgf/cm<sup>2</sup>
- Repetitividade: 0,03 % da amplitude da faixa da escala expandida.
- Histerese: 0,88 % da amplitude da faixa da escala expandida.
- Erro fiducial: 1,04 % da amplitude da faixa da escala expandida.

### 6. OBSERVAÇÕES

- 6.1. 1 kgf/cm<sup>2</sup> = 0,098 066 5 MPa (MPa - Unidade do S.I.)
- 6.2. A periodicidade de calibração do instrumento deve ser estabelecida pelo usuário conforme plano de calibração.
- 6.3. Pressões no manômetro válidas para aceleração da gravidade local:  $g = 9,780\ 708\ 8\ m/s^2$ . Para valores da gravidade diferentes, multiplicar os resultados por  $g_1 / 9,780\ 708\ 8$ , onde  $g_1$  é o valor da gravidade no local de uso do instrumento.
- 6.4. Erro fiducial corresponde ao índice da classe de tolerância do instrumento.
- 6.5. Este certificado atende aos requisitos da norma ABNT NBR ISO/IEC 17025.
- 6.6.  $U_{95\%}$  = Incerteza expandida.
- 6.7. Temperatura ambiente: (20 ± 2) °C.
- 6.8. Umidade relativa do ar: (56 ± 20) %.

Francisco Roberto Alencar Sales  
 Gerente Técnico substituto

Os resultados deste documento referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer itens.  
 O LAMETRO orienta a reprodução deste documento desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral.  
 Esta calibração não inclui o instrumento do controle metroológico estabelecido na regulamentação metroológica.

Figura 63 – Fonte de alimentação: 0 a 24 volts EMG 18131.



Figura 64 – Vista frontal e lateral do Bancada de Pesquisa do experimento.



**Figura 65 – Vista de um cilindro individual.**



**Figura 66 – Parte inferior do experimento.**



**Figura 67 - Placa distribuidora.**



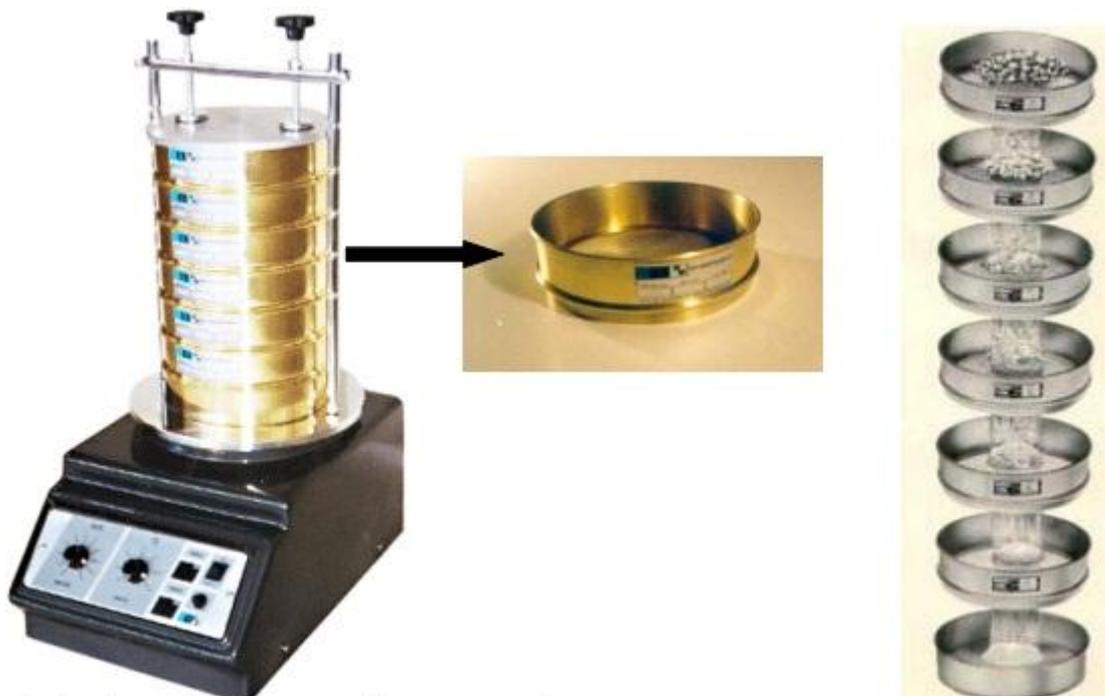
**Figura 68 – Balança digital, Fabricante: Filizola, Modelo: BP15.**



Figura 69 – Estufa para secagem e esterilização. Fabricante:Olidef, modelo CZ.



Figura 70 – Agitador de peneiras metálicas. Fabricante: *Produtest*.



**Figura 71 – Peneiras metálicas utilizadas. Fabricante: Granutest.**



**Figura 72 – Moinho de bolas cerâmicas.**



**Figura 73 – Areia e bolas antes da moagem.**



**Figura 74 – Microscópio para Estudo da morfologia dos grãos de areia (Infinity Análise), Fabricante: Lumenera Corporation.**



**Figura 75 – Formação de bolhas no experimento de diâmetro 0,090 m com areia de praia na cota 0,425 m.**

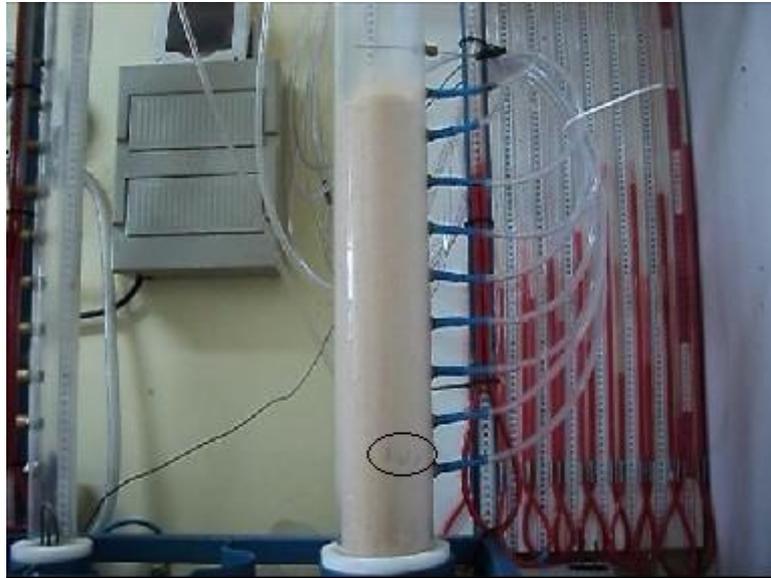




TABELA DE ABERTURAS CONFORME NORMA NBR NM-ISO 3310-1 : 1997



ABERTURA ( mm )	MALHA		Disponibilidade de venda	ABERTURA ( mm )	MALHA	
	ASTM	TYLER			ASTM	TYLER
125,000				1.700	12	10
112,000				1.600		
106,000	4.24"		15 " x 2"	1.400	14	12
100,000	4"			1.250		
90,000	3 1/2"		15 " x 5"	1.180	16	14
80,000				1.120		
75,000	3"		490 x 75 mm	1.000	18	16
71,000				0.900		
63,000	2 1/2"		490 x 110 mm	0.850	20	20
58,000				0.800		
53,000	2.12"		300 x 50 mm	0.710	25	24
50,000	2"			0.630		
45,000	1 3/4"		300 x 75 mm	0.600	30	28
40,000				0.560		
37,500	1 1/2"		12 " x 2"	0.500	35	32
35,500				0.450		
31,500	1 1/4"		12 " x 3"	0.425	40	35
28,000				0.400		
26,500	1.06"	1.050"	500 x 500 x 100 mm	0.355	45	42
25,000	1"			0.315		
22,400	7/8"	0.883"	300 x 300 x 100 mm	0.300	50	48
20,000				0.280		
19,000	3/4"	0.742"	660 x 460 x 65 mm	0.250	60	60
18,000				0.224		
16,000	5/8"	0.624"	Alpine - VACUO	0.212	70	65
14,000				0.200		
13,200	0.530"	0.525"	11 " x 1"	0.180	80	80
12,500	1/2"			0.160		
11,200	7/16"	0.441"	3 " x 1"	0.150	100	100
10,000				0.140		
9,500	3/8"	0.371"	3 " x 2"	0.125	120	115
9,000				0.112		
8,000	5/16"	2 1/2"	5 " x 1"	0.106	140	150
7,100				0.100		
6,700	0.265"	3	5 " x 2"	0.090	170	170
6,300	1/4"			0.080		
5,600	3 1/2"	3 1/2"	8 " x 1"	0.075	200	200
5,000				0.071		
4,750	4	4	8 " x 2"	0.063	230	250
4,500				0.056		
4,000	5	5		0.053	270	270
3,550				0.050		
3,350	6	6		0.045	325	325
3,150				0.040		
2,800	7	7		0.038	400	400
2,500				0.036		
2,360	8	8		0.032	450	450
2,240				0.025	500	500
2,000	10	9		0.020	635	635
1,800						

a bronzinox telas metálicas e sintéticas Ltda  
 www.abronzinox.com.br  
 vendas@abronzinox.com.br

Rua Manuel Figueiredo Landim, 108 - Santo Amaro  
 São Paulo - SP - Brasil - CEP: 04693-130  
 Tel.: (5511) 5633-2133 Fax.: (5511) 5633-2130



## Result Analysis Report

**Sample Name:**  
AREIA DA PRAIA - Average

**Sample Source & type:**

**Sample bulk lot ref:**

**SOP Name:**

**Measured by:**  
JANE

**Result Source:**  
Averaged

**Measured:**  
segunda-feira, 11 de junho de 2012 09:22:48

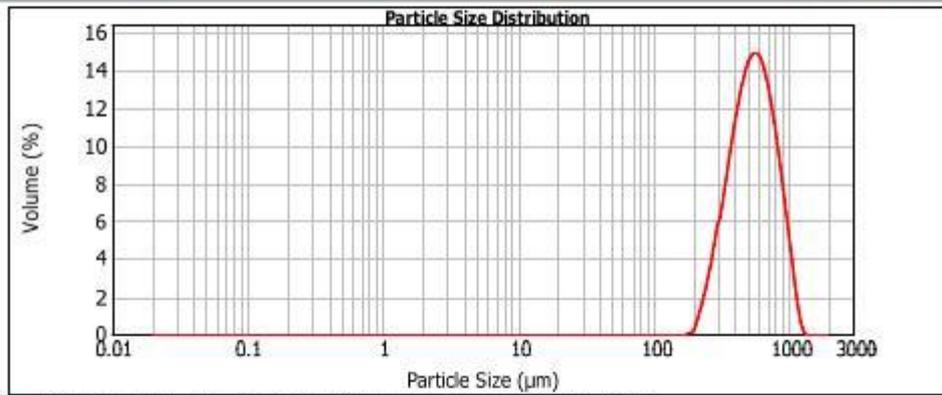
**Analysed:**  
segunda-feira, 11 de junho de 2012 09:22:50

<b>Particle Name:</b> Fraunhofer	<b>Accessory Name:</b> Hydro 2000MU (A)	<b>Analysis model:</b> General purpose	<b>Sensitivity:</b> Normal
<b>Particle RI:</b> 0.000	<b>Absorption:</b> 0	<b>Size range:</b> 0.020 to 2000.000 $\mu\text{m}$	<b>Obscuration:</b> 2.73 %
<b>Dispersant Name:</b> Water	<b>Dispersant RI:</b> 1.330	<b>Weighted Residual:</b> 6.601 %	<b>Result Emulation:</b> Off
<b>Concentration:</b> 0.1980 %Vol	<b>Span :</b> 1.010	<b>Uniformity:</b> 0.309	<b>Result units:</b> Volume
<b>Specific Surface Area:</b> 0.0119 $\text{m}^2/\text{g}$	<b>Surface Weighted Mean D[3,2]:</b> 503.626 $\mu\text{m}$	<b>Vol. Weighted Mean D[4,3]:</b> 577.785 $\mu\text{m}$	

**d(0.1):** 326.372  $\mu\text{m}$

**d(0.5):** 546.611  $\mu\text{m}$

**d(0.9):** 878.323  $\mu\text{m}$



AREIA DA PRAIA - Average, segunda-feira, 11 de junho de 2012 09:22:48

Size ( $\mu\text{m}$ )	Volume In %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Volume In %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Volume In %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Volume In %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Volume In %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.090	0.00	11.482	0.00	120.220	0.00	1256.925	0.01
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.00	13.183	0.00	136.038	0.00	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.136	0.00	1.440	0.00	15.136	0.00	158.489	0.00	1626.587	0.00
0.015	0.00	0.156	0.00	1.660	0.00	17.378	0.00	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.00	19.993	0.00	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.00	22.908	0.00	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.00	26.303	0.00	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.00	30.200	0.00	316.228	4.75	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.315	0.00	3.311	0.00	34.674	0.00	363.078	7.22	3801.694	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.00	39.811	0.00	416.869	9.71	4305.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.00	45.709	0.00	478.630	11.84	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.00	52.481	0.00	548.541	13.18	5794.369	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.00	60.256	0.00	630.957	13.41	6906.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	0.00	69.183	0.00	724.436	12.43	7995.775	0.00
0.069	0.00	0.724	0.00	7.586	0.00	79.433	0.00	831.764	10.39	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.00	8.710	0.00	91.201	0.00	954.963	7.51	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.00	10.000	0.00	104.713	0.00	1086.478	4.43		
0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.00	120.226	0.00	1256.925	1.36		

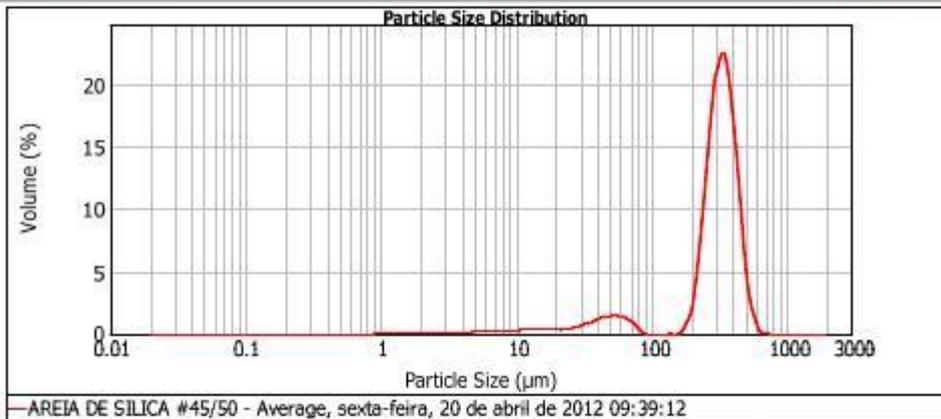
**Operator notes:** 2min US



### Result Analysis Report

<b>Sample Name:</b> AREIA DE SILICA #45/50 - Average	<b>SOP Name:</b>	<b>Measured:</b> sexta-feira, 20 de abril de 2012 09:39:12	
<b>Sample Source &amp; type:</b>	<b>Measured by:</b> jane	<b>Analysed:</b> sexta-feira, 20 de abril de 2012 09:39:13	
<b>Sample bulk lot ref:</b>	<b>Result Source:</b> Averaged		
<b>Particle Name:</b> Fraunhofer	<b>Accessory Name:</b> Hydro 2000MU (A)	<b>Analysis model:</b> General purpose	<b>Sensitivity:</b> Normal
<b>Particle RI:</b> 0.000	<b>Absorption:</b>	<b>Size range:</b> 0.020 to 2000.0... um	<b>Obscuration:</b> 3.44 %
<b>Dispersant Name:</b> Water	<b>Dispersant RI:</b> 1.330	<b>Weighted Residual:</b> 1.831 %	<b>Result Emulation:</b> Off
<b>Concentration:</b> 0.0410 %Vol	<b>Span :</b> 1.180	<b>Uniformity:</b> 0.282	<b>Result units:</b> Volume
<b>Specific Surface Area:</b> 0.073 m <sup>2</sup> /g	<b>Surface Weighted Mean D[3,2]:</b> 82.177 um	<b>Vol. Weighted Mean D[4,3]:</b> 306.064 um	

d(0.1): 61.183 um                      d(0.5): 321.023 um                      d(0.9): 440.111 um



AREIA DE SILICA #45/50 - Average, sexta-feira, 20 de abril de 2012 09:39:12

Size (µm)	Volume In %										
0.010	0.00	0.105	0.00	1.090	0.08	11.482	0.24	120.220	0.00	1256.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.09	13.183	0.24	138.038	0.00	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.440	0.09	15.136	0.26	158.489	0.00	1628.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.10	17.378	0.27	181.970	0.18	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.10	19.993	0.32	208.930	0.28	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.10	22.908	0.39	238.883	0.39	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.10	26.303	0.52	276.423	0.57	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.10	30.200	0.62	316.228	0.76	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.315	0.00	3.311	0.10	34.674	0.70	363.078	0.94	3801.694	0.00
0.035	0.00	0.360	0.00	3.802	0.10	39.811	0.82	416.869	1.28	4305.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.11	45.709	0.91	478.630	1.78	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.12	52.481	1.04	548.541	2.44	5794.389	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.14	60.256	1.17	626.567	3.31	6906.594	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	0.16	69.183	1.31	714.736	4.44	7985.775	0.00
0.069	0.00	0.724	0.00	7.586	0.18	79.433	1.46	811.764	5.88	8708.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.00	8.710	0.20	91.201	1.61	914.963	7.68	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.00	10.000	0.23	104.713	1.77	1036.478	9.98		
0.105	0.00	1.096	0.05	11.482	0.26	120.223	1.94	1256.925	12.80		

Operator notes: 2min\_us

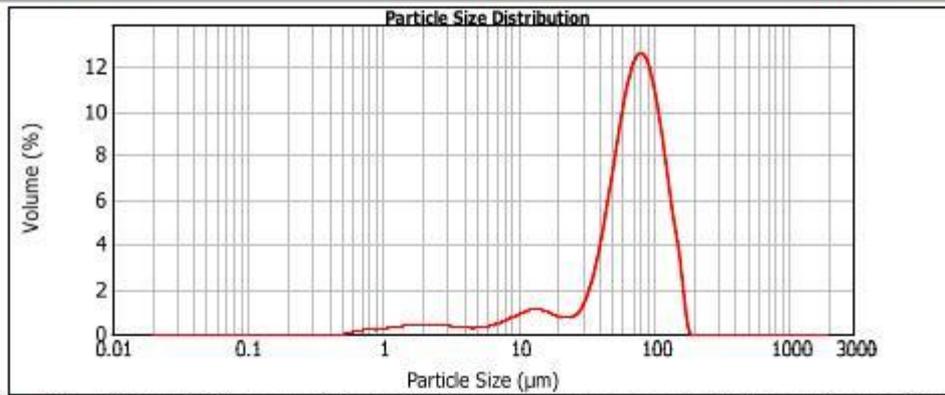


## Result Analysis Report

**Sample Name:** AREIA, CORTE: MENOR QUE 170  
**SOP Name:**  
**Measured:** segunda-feira, 11 de junho de 2012 09:10:57  
**Sample Source & type:**  
**Measured by:** JANE  
**Analysed:** segunda-feira, 11 de junho de 2012 09:10:58  
**Sample bulk lot ref:**  
**Result Source:** Averaged

<b>Particle Name:</b> Fraunhofer	<b>Accessory Name:</b> Hydro 2000MU (A)	<b>Analysis model:</b> General purpose	<b>Sensitivity:</b> Normal
<b>Particle RI:</b> 0.000	<b>Absorption:</b>	<b>Size range:</b> 0.020 to 2000.0... um	<b>Obscuration:</b> 3.21 %
<b>Dispersant Name:</b> Water	<b>Dispersant RI:</b> 1.330	<b>Weighted Residual:</b> 0.970 %	<b>Result Emulation:</b> Off
<b>Concentration:</b> 0.0105 %Vol	<b>Span :</b> 1.490	<b>Uniformity:</b> 0.423	<b>Result units:</b> Volume
<b>Specific Surface Area:</b> 0.265 m <sup>2</sup> /g	<b>Surface Weighted Mean D[3,2]:</b> 22.607 um	<b>Vol. Weighted Mean D[4,3]:</b> 73.881 um	

**d(0.1):** 17.157 um      **d(0.5):** 72.432 um      **d(0.9):** 125.082 um



AREIA, CORTE: MENOR QUE 170 MESH E MAIOR QUE 200 MESH - Average, segunda-feira, 11 de junho de 2012

Size (µm)	Volume In %										
0.010	0.00	0.105	0.00	1.090	0.27	11.482	0.94	120.220	0.34	1250.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.30	13.183	0.97	138.038	4.14	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.440	0.33	15.136	0.91	158.489	1.60	1628.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.35	17.378	0.79	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.36	19.993	0.67	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.35	22.908	0.67	238.883	0.00	2511.880	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.35	26.303	0.91	270.423	0.00	2884.032	0.00
0.025	0.00	0.275	0.00	2.884	0.35	30.200	0.91	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.315	0.00	3.311	0.32	34.674	1.56	363.078	0.00	3801.684	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.29	39.911	2.09	416.869	0.00	4305.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.25	46.709	6.28	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.045	0.00	0.479	0.00	5.012	0.27	52.481	8.32	548.541	0.00	5794.389	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.27	60.256	10.07	630.957	0.00	6906.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.06	6.607	0.32	69.183	11.15	724.436	0.00	7995.775	0.00
0.069	0.00	0.724	0.10	7.586	0.42	79.433	11.30	831.754	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.15	8.710	0.55	91.201	10.42	954.963	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.19	10.000	0.70	104.713	8.68	1086.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.23	11.482	0.84	120.226		1258.925	0.00		

Operator notes: 2min US

## **APÊNDICES**

**Apêndice A – Combustão em leito fluidizado**

**Apêndice B – Moagem em moinho de bolas**

**Apêndice C – Controle de granulometria**

**Apêndice D – Peneiramento**

**Apêndice E – Análise de formato da partícula**

**Apêndice F – Determinação experimental da porosidade da areia**

## Apêndice A – Combustão em leito fluidizado

As tecnologias de combustão de combustíveis sólidos, utilizadas em escala industrial, encontram-se genericamente distribuídas em três grandes grupos: combustão em leito fixo, combustão de combustíveis pulverizados e combustão em leito fluidizado (CLF).

Introduzida inicialmente na década de 1920 (em 1922 Winkler patenteou um sistema de leito fluidizado borbulhante (LFB) destinado à gaseificação de lenhite), com objetivos predominantemente associados à incineração de resíduos, a tecnologia de CLF ganhou especial ênfase, sob o ponto de vista de diversas aplicações industriais visando “uma energia limpa para o futuro” na década de 1970 (Koornneef et al., 2007).

Os sistemas de CLF baseiam-se na passagem ascendente de um fluido (gasoso) através de um leito de partículas sólidas inertes, a uma velocidade que promova a sua separação e sustentação. A velocidade mínima em que ocorre este fenômeno chama-se velocidade mínima de fluidização.

O tipo de partículas, a formação de fases distintas e a ordem de grandeza da velocidade a que o gás é introduzido em diferentes sistemas, confere aos respectivos regimes de fluidização características próprias. De um modo geral, estes regimes em leitos de partículas inertes são enquadráveis em quatro grupos, caracterizados por diferentes relações entre a velocidade superficial do ar de fluidização ( $U_g$ ) e a velocidade mínima de fluidização ( $U_{mf}$ ): leito fixo; leito fluidizado de regime borbulhante (LFB) -  $U_g/U_{mf} < 2$  segundo Saxena e Jotshi (1994); leito fluidizado de regime turbulento -  $U_g/U_{mf} > 2$  segundo Saxena e Jotshi (1994); leito fluidizado circulante (LFC). Este último encontra-se associado ao transporte pneumático do material particulado (MP) devido à presença de velocidades de gás elevadas, exigindo-se, desta forma, a recirculação do mesmo.

Na CLF utilizam-se habitualmente reatores de secção cilíndrica ou quadrada. A injeção de ar primário é feita através de uma placa distribuidora, que integra um número variável de injetores uniformemente distribuídos, localizada na parte inferior do reator. A introdução deste ar é feita com o intuito de se assegurarem as condições de fluidização adequadas e o fornecimento da maior parte do oxigênio necessário à combustão. O aumento do EA no reator poderá, ainda, ser conseguido com a introdução de ar adicional (ar secundário) em outros pontos do reator.

Os materiais utilizados habitualmente como leito são areia de sílica, dolomita ou mesmo as cinzas do próprio combustível (particularmente em sistemas LFC). Da fluidização

da mistura entre este material e o combustível (alimentado continuamente) resulta a suspensão de bolhas de gás e MP onde se processa a queima do segundo.

É ainda comum a estes sistemas a utilização de ciclones para a remoção do MP presente no gás de exaustão. Genericamente, consideram-se para os sistemas de CLF as seguintes áreas (Lopes, 2002):

- Caixa de ar: parte inferior do reator onde ocorre a sustentação inicial do leito e a introdução e distribuição do ar de fluidização ou ar primário;
- Leito: coluna intermédia entre a caixa de ar e a coluna livre. Integra a mistura de material inerte, combustível e ar de combustão.
- Coluna livre: parte intermédia da câmara de combustão. Zona de menor densidade de sólidos, onde ocorre a propagação da chama e onde, dependendo do sistema, se pode dar adição de ar secundário;
- Topo: local por onde os gases são escoados. Dependendo do tipo de sistema, pode integrar: Ciclones para remoção de MP e eventual sistema de recondução do mesmo ao leito, sistema recirculação dos gases para a caixa de ar, sistemas de recuperação de energia e câmaras secundárias.

### **Vantagens e Limitações da CLF**

Entre as características operatórias dos sistemas de leito fluidizado destacam-se as seguintes (Abelha, 2005; Radovanovic, 1986; Kuni e Levenspiel, 1990; Grace et al., 1997):

- O regime turbulento, e a consequente suspensão de bolhas de gás e MP, possibilitam elevados coeficientes de transferência de calor e de massa. A existência destas condições permite que a combustão completa do combustível ocorra a níveis de EA menores do que aqueles que seriam necessários em outros sistemas de combustão;
- Os elevados tempos de residência do MP no leito diminuem a percentagem de não queimados e asseguram o processamento de materiais de conversão térmica mais dificultada (menor reatividade, etc.);
- A alta flexibilidade no que se refere ao combustível a utilizar, o que permite a queima de materiais com diferentes características, possibilitando, por exemplo, a utilização de combustível não pulverizado e com elevados teores de umidade, com consequente diminuição dos custos que estariam associados à sua preparação prévia. Entre as possibilidades de queima em leito fluidizado encontram-se materiais como os resíduos agro-

florestais, os resíduos sólidos urbanos (RSU), as lamas provenientes de estações de tratamento, os plásticos, os pneus ou o carvão;

- A estabilidade das condições térmicas ao longo do tempo e do reator, devido à presença de grandes quantidades de material inerte, o que facilita o controle das condições operacionais da queima e das emissões associadas, sem necessidade de instalação de equipamentos adicionais;

- O elevado rendimento térmico (3 MW/m<sup>2</sup> de área do leito), possibilitando uma maior compactação da instalação e equipamentos associados (permutadores, etc.).

Apesar de evitáveis ou minimizáveis, as principais limitações ou desvantagens associadas à utilização da tecnologia de leito fluidizado são:

- Erosão das superfícies de suporte e de transferência de calor por abrasão, decorrente da presença e movimentação de grandes quantidades de sólidos;

- Sensibilidade (eventual “desfluidização” do sistema) à formação de depósitos e incrustações no sistema de distribuição de ar primário e a fenômenos de aglomeração do material do leito, decorrentes da utilização de combustíveis com cinzas de temperatura de fusão baixa;

- Necessidade de maior potência instalada, no que se refere aos ventiladores de ar, de modo a fazer face às quedas de pressão no leito e placa distribuidora de ar;

- Dificuldades na modelação matemática de fluxos e de comportamento do leito.

## Apêndice B – Moagem em moinho de bolas

A moagem é uma operação unitária de redução de tamanho, em que o tamanho médio das partículas sólidas é reduzido pela aplicação de forças de impacto, compressão, abrasão e atrito. As vantagens da redução de tamanho no processamento são:

- Aumento da relação superfície /volume, aumentando, com isso, a eficiência de operações posteriores, como extração, aquecimento, resfriamento, desidratação, etc.
- Uniformidade do tamanho das partículas do produto, auxiliando na homogeneização de produtos em pó ou na solubilização dos mesmos.

Sabe-se também que o tamanho das partículas exerce uma influência determinante nas propriedades e comportamento dos materiais ao longo do processo de fabricação, como por exemplo: no comportamento reológico, na conformação, na queima e nas características finais do produto.

A moagem pode ser considerada muito ineficaz do ponto de vista energético. Somente uma pequena parte da energia é empregada realmente para a ruptura ou fragmentação do sólido. A maior parte se dirige para a deformação desse sólido e a criação de novas linhas de sensibilidade que pode produzir a ruptura sucessiva dos fragmentos. O resto da energia se dissipa em forma de calor.

As características da matéria-prima que influencia o rendimento da moagem, podemos citar:

- Dureza do material
- Tendência a aglomerar-se
- Higroscopicidade
- Forma inicial e dimensão das partículas
- Estrutura homogênea ou heterogênea.

Conforme a finalidade, são usados diferentes tipos de moinhos, dentre eles destacam-se:

## Apêndice C – Controle de granulometria

A granulometria das matérias primas é fundamental na maior parte dos processos industriais, inclusive de materiais cerâmicos, e está diretamente relacionada com o comportamento dos materiais nas diferentes fases unitárias.

Existem diferentes técnicas para a determinação da distribuição granulométrica, com base em diversos princípios físicos, e que medem propriedades distintas relacionadas com o tamanho das partículas, sempre consideradas esféricas.

O controle de tamanho de partículas é um dos tópicos importantes no controle de processamento do material. A partir desse controle é que o material terá mais ou menos poros. Por exemplo, duas amostras podem apresentar o mesmo volume de poros, porém, com distribuições distintas de tamanhos de partículas, o que pode ser suficiente para modificar suas propriedades superficiais finais (ALVES et al., 2009)

A análise granulométrica consiste na determinação das dimensões das partículas que constituem as amostras no tratamento estatístico dessa informação. A determinação das faixas de tamanho das partículas é feita por meio de uma série de aberturas de peneiras que mantém entre si uma relação constante. É necessário fazer a determinação das dimensões das partículas individuais e estudar a sua distribuição, quer pelo peso de cada classe dimensional considerada, quer pelo seu volume, quer ainda pelo número de partículas integradas em cada classe.

A granulometria dos sedimentos muito grosseiros (cascalhos, seixos, balastros, etc.) é realizada medindo individualmente cada um dos elementos e contando-os. Contudo, para sedimentos menos grosseiros (cascalhos finos, areias), tal forma de mensuração não é prática, sendo nas areias muito difícil e extremamente morosa, e praticamente impossível nos siltes e argilas. Para estes sedimentos, a análise clássica recorre à separação mecânica em classes dimensionais e à determinação do seu peso.

As análises distribuem-se em proporções diferentes através das diferentes faixas granulométricas. Por isso é que os produtores de materiais de referência procurem sempre identificar faixas granulométricas adequadas para os seus produtos, eliminando as maiores e as menores partículas, de acordo com as necessidades específicas. Reduzir a faixa de distribuição de tamanhos de partículas implica em uma melhoria da homogeneidade do material particulado.

A partir dos estudos de Ingamells, sabe-se que a homogeneidade de um material sólido particulado é função do tamanho das amostras utilizadas na sua análise. Sabe-se

também que, quanto menor o número de partículas presentes nas amostras do material, menor será a sua homogeneidade, devido à característica probabilística da amostragem de sólidos. Por outro lado, se nas amostras estiverem presentes partículas extremamente pequenas, os processos de homogeneização tornam-se mais complexos e difíceis de ser implementados, devido a diversos fatores como a formação de aglomerados e efeitos de aderência de partículas pequenas sobre partículas maiores, entre outros.

Quando se estuda a distribuição das dimensões das partículas dos sedimentos utilizando escalas aritméticas, verifica-se que essa distribuição é, sistematicamente, assimétrica, isto é, a maior parte das partículas concentra-se nas dimensões menores. Com este tipo de representação, sedimentos bastante diferentes ficam com aspectos de alguma forma semelhantes, o que, não é o mais apropriado para o seu estudo e para a determinação das suas verdadeiras diferenças.

## Apêndice D – Peneiramento

A classificação e o peneiramento têm como objetivo comum, a separação de um material em duas ou mais frações, com partículas de tamanhos distintos, estando estas limitadas uma superior e outra inferiormente.

O peneiramento é um método de separação de partículas que leva em consideração apenas o tamanho. No peneiramento industrial, os sólidos são colocados sobre uma superfície com um determinado tamanho de abertura. As partículas menores, ou finas, passam através das aberturas da peneira; as partículas maiores não.

A necessidade de separar sólidos está associada a duas finalidades:

- 1 – dividir o sólido granular em frações homogêneas,
- 2 – obter frações com partículas de mesmo tamanho.

Os equipamentos utilizados no peneiramento podem ser divididos em três tipos:

- Grelhas - constituídas por barras metálicas dispostas paralelamente, mantendo um espaçamento regular entre si;
- Crivos - formados por chapas metálicas planas ou curvas, perfuradas por um sistema de furos de várias formas e dimensão determinada;
- Telas - constituídas por fios metálicos trançados geralmente em duas direções ortogonais, de forma a deixarem entre si "malhas" ou "aberturas" de dimensões determinadas, podendo estas serem quadradas ou retangulares.

Esses equipamentos podem ser classificados de acordo com o seu movimento, em duas categorias:

a) Fixas - a única força atuante é a força de gravidade e por isso esses equipamentos possuem superfície inclinada.

b) Móveis - grelhas rotativas, peneiras rotativas, peneiras reciprocativas e peneiras vibratórias.

A agitação também ajuda a prevenir o entupimento. Uma agitação muito vigorosa pode provocar a moagem do material, erosão excessiva das peneiras e baixa eficiência, além de agravar o problema do pó.

As peneiras podem operar a seco (sólidos com pouca umidade) ou a úmido. Materiais pouco úmidos ou muito aderentes devem ser peneirados via úmido para evitar o entupimento da peneira; a água lava continuamente a peneira evitando a deposição dos finos sobre os fios da peneira.

Os principais responsáveis pelas baixas eficiências e pelas dificuldades encontradas nesta operação estão relacionados abaixo:

1 – A coesão entre as partículas tende a reter fino no material grosso. A coesão aumenta com a umidade do material; quando a operação é feita com o sólido seco, este efeito é pouco importante.

2 – Durante o peneiramento, os fios das malhas afastam-se uns dos outros. Logo, umas aberturas ficam menores e outras aumentam, dificultando a previsão teórica da abertura da peneira para obter o diâmetro necessário.

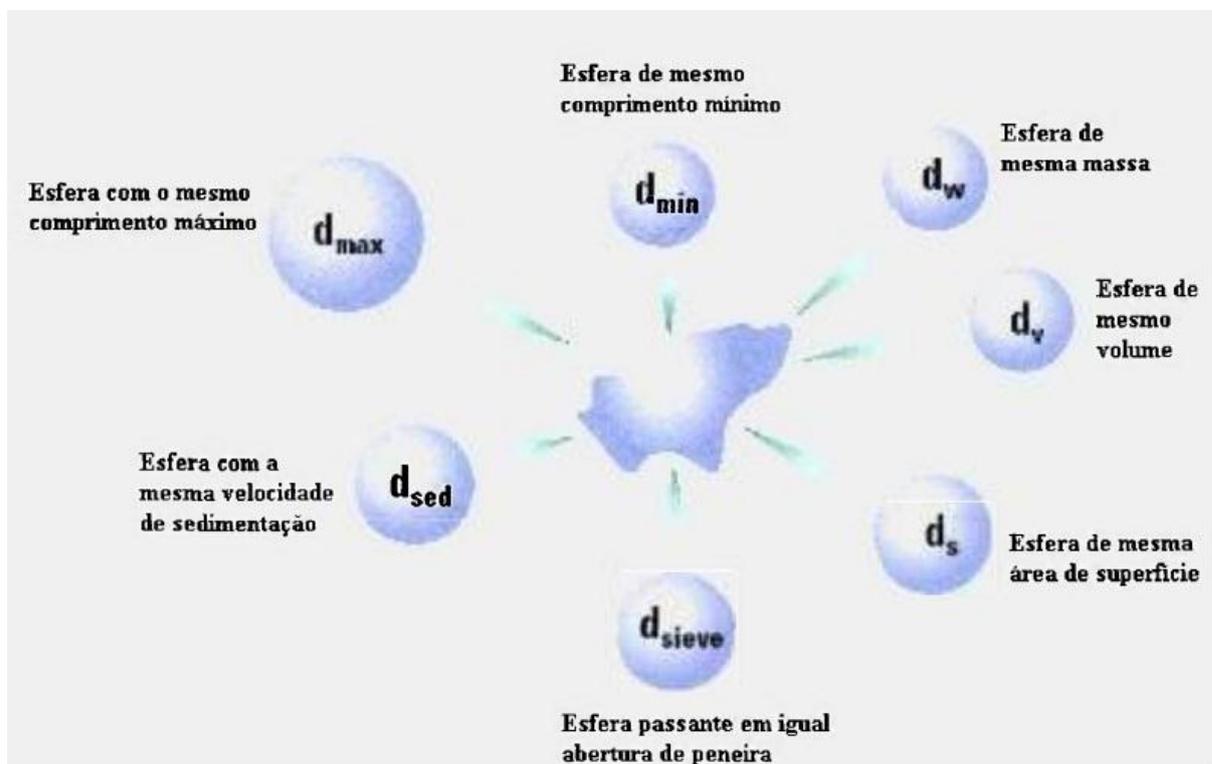
3 – A aderência das partículas à tela também é uma dificuldade que não pode ser antecipada teoricamente. Partículas mais finas que a abertura da peneira ficam retidas porque, à medida que a operação ocorre, as malhas das telas vão ficando menores, chegando até a entupir. Esta é uma das causas da presença de finos no material grosso. A aderência também depende da umidade do material, variando ainda com a forma e as características das partículas.

As técnicas de separação são baseadas nas diferenças físicas entre as partículas como tamanho, forma ou densidade. Em muitos processos os pós sólidos obtidos, raramente possuem um único tamanho, que estão distribuídos em torno de um tamanho médio.

## Apêndice E – Análise de formato da partícula

Na determinação da distribuição do tamanho de partícula é muito importante saber qual dimensão da partícula está sendo medida. Uma esfera pode ter o seu tamanho definido por um único valor: o diâmetro. Porém partículas com formatos irregulares necessitam de mais de uma medida para a quantificação do seu tamanho. Para expressar este valor em um único número, normalmente adota-se o valor de uma esfera equivalente. Dependendo do que é medido (maior ou menor comprimento, volume, massa, área projetada, velocidade de sedimentação, etc.) o diâmetro desta esfera equivalente apresenta valores diferentes. A Figura 73 ilustra alguns dos diferentes diâmetros médios equivalentes que podem ser gerados a partir de um grão de areia com forma irregular (Rawle, 2002) e a Figura 74 exemplifica algumas formas possíveis de partículas (Germán, 1994).

Figura 76 - Diferentes diâmetros de esferas equivalentes gerados a partir de uma partícula irregular (Rawle, 2002).



O diâmetro médio, porém, não pode ser apresentado como única informação referente ao tamanho do material particulado. Devem-se obter informações com respeito à distribuição granulométrica das partículas, pois materiais com diâmetros médios idênticos podem apresentar diferentes distribuições. Um pó, por exemplo, com distribuição de tamanho de partícula entre 0,1 e 200  $\mu\text{m}$  e outro com partículas entre 10 e 100  $\mu\text{m}$  podem ter o mesmo diâmetro médio, mas o comportamento destes pós no escoamento foram completamente diferentes. Os dados mais comumente usados são os gráficos de distribuição de frequência acumulada e incremental e os decis D10, D50 e D90 que correspondem, respectivamente, aos valores que 10%, 50% e 90% da distribuição das partículas apresentam diâmetros menores.

Figura 77 - Formas possíveis de partículas (German, 1994).



## Apêndice F – Determinação experimental da porosidade da areia

Para a determinação experimental da porosidade da areia usa-se a equação abaixo

$$\epsilon = \frac{\text{Volume de Vazios do Leito}}{\text{Volume Total do Leito}} \quad (\text{A.1})$$

Foram utilizados três recipientes com volumes idênticos de 400 ml, um para cada granulometria de areia. Cada um dos recipientes foi preenchido totalmente com areia, em seguida, foi colocada água por meio de gotejamento a fim de se medir o quanto de água era necessário para preencher os vazios.

Depois de adquirido o valor do volume de vazios, aplicou-se a equação A.1, os resultados de porosidade experimental são mostrados abaixo.

**i) Areia bruta de praia ( $D_p = 546,61 \mu\text{m}$ ):**

$$\epsilon = 41,25\%$$

**ii) Areia 45-50 Mesh ( $D_p = 321,02 \mu\text{m}$ ):**

$$\epsilon = 38,33\%$$

**iii) Areia 170-200 Mesh ( $D_p = 72,43 \mu\text{m}$ ):**

$$\epsilon = 32,5\%$$