



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

**ANTONIO PHILIPPI ALVES MOREIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM REATOR DE LEITO FLUIDIZADO**  
**APLICADO À COMBUSTÃO DE GÁS NATURAL**

**FORTALEZA**

**2014**

ANTONIO PHILIPPI ALVES MOREIRA

DESENVOLVIMENTO DE UM REATOR DE LEITO FLUIDIZADO  
APLICADO À COMBUSTÃO DE GÁS NATURAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Processos, equipamentos e sistemas para energias renováveis.

Orientador: Prof. Dr. William Magalhães Barcellos.

FORTALEZA

2014

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)

---

M836d Moreira, Antonio Philipi Alves.  
Desenvolvimento de um reator de leito fluidizado aplicado à combustão de gás natural / Antonio Philipi Alves Moreira. – 2015.  
106 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2015.  
Orientação: Prof. Dr. William Magalhães Barcellos.

1. Reator de leito fluidizado.. 2. Combustão do Gás natural.. 3. Emissões NOX. I. Título.

CDD 620.1

---

ANTONIO PHILIPPI ALVES MOREIRA

DESENVOLVIMENTO DE UM REATOR DE LEITO FLUIDIZADO  
APLICADO À COMBUSTÃO DE GÁS NATURAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Processos, equipamentos e sistemas para energias renováveis.

Aprovada em 27/08/2014

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

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

A Deus.

A minha mãe e a minha esposa.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por toda a serenidade e habilidades adquiridas no período de formação e conclusão do trabalho.

Ao Professor Doutor William Magalhães Barcellos pela excelente orientação.

À FUNCAP, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica pelo empenho em dar condições para conclusão deste trabalho.

Ao estudante de engenharia Diego Feitosa, pelo apoio durante os testes.

À minha mãe e a minha esposa pela motivação e palavras de apoio em momentos precisos e por suas orações.

*“A glória desta última casa será maior do que a da primeira, diz o SENHOR dos Exércitos, e neste lugar darei a paz, diz o SENHOR dos Exércitos.”*

*(Ageu 2:9)*

## RESUMO

A queima de gás natural em caldeiras convencionais normalmente gera elevados índices de emissão de NOX, o que tem despertado o interesse de pesquisadores para novas formas de combustão. Neste contexto, a Combustão em Meios Porosos tem despontado como uma alternativa promissora, face aos resultados experimentais quanto à emissão de NOX, obtidos em ambiente de laboratório. Como um processo de desdobramento dessa tecnologia, em termos de aplicação, a Combustão em Leito Fluidizado (CLF) se apresenta como vantajosa pelo fato do meio poroso se movimentar por ação dos gases, o que propicia sua aplicação em projeto de sistemas dedicados às energias renováveis, a exemplo da biomassa. Este trabalho tem, então, o propósito de investigar os parâmetros da fluidização do leito poroso e da CLF, aplicando-os ao desenvolvimento de um reator de leito fluidizado (RLF), em escala laboratorial, a partir do uso do gás natural como combustível. Neste sentido, foi estudado o comportamento fluidodinâmico do leito, constituído de partículas de sílica, inicialmente através de em bancada de pesquisa para um posterior estudo em condições reais de operação. O RLF foi desenvolvido a partir da elaboração dos projetos básico e construtivo, utilizando os fundamentos da tecnologia e das investigações em laboratório. Os fenômenos presentes no processo foram analisados experimentalmente, com base nas equações clássicas que caracterizam o comportamento fluidodinâmico do leito, considerando os fatores de influência, tais como: rugosidade da superfície interna do reator; temperatura de operação, regime de escoamento, dentre outros. O trabalho experimental realçou a importância do controle do RLF, quanto à ignição da mistura ar-combustível no leito fluidizado, apontando a influência da temperatura na fluidização, o que justificou utilização de estratégias de engenharia para lidar com o processo de ignição.

**Palavras-chave:** Reator de leito fluidizado. Combustão do Gás natural. Emissões NO<sub>x</sub>.

## ABSTRACT

The burning of natural gas in conventional boilers typically generates high indices of NO<sub>x</sub> emission, which has aroused the interest of researchers for new forms of combustion. In this context, Combustion in Porous Media has emerged as a promising alternative, compared to the experimental results regarding the NO<sub>x</sub> emissions, obtained in a laboratory environment. As a developmental process of this technology, in terms of practical application, Fluidized Bed Combustion (FBC) is presented as advantageous due to the fact of the porous to move itself by action of gases, which leads to its application to system projects dedicated to renewable energies, such as biomass. Then, this work has the purpose of investigating parameters of the porous bed fluidization and of FBC, applying them to the development of a fluidized bed reactor (FBR) in laboratory scale, since the use of natural gas as fuel. In this regard, the bed fluid-dynamic behavior was studied, constituted of silica particles, initially through a research setup in order for a later study on actual operating conditions. FBR was developed based on the preparation of the basic and constructive designs, utilizing the fundamentals of technology and laboratory investigations. The present phenomena in the process were experimentally analyzed, based on classical equations that characterize the fluid-dynamic behavior of the bed, considering the influence factors such as: roughness of the inner surface of the reactor; operation temperature, flow regime, among others. The experimental work highlighted the importance of controlling FBR, concerning the fuel-air mixture ignition in the fluidized bed, pointing out the influence of temperature on the fluidization, which justified the use of engineering strategies to deal with the ignition process.

**Keywords:** Fluidized bed reactor. Combustion of natural gas. NO<sub>x</sub> emissions.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gráfico de $\Delta P \times U$ .....	17
Figura 2 – Etapas da Fluidização.....	18
Figura 3 – Classificação de Geldart para a fluidização de partículas com ar sob condições ambiente.....	19
Figura 4 – Diagrama esquemático da bancada de pesquisa de leito fluidizado.....	32
Figura 5 – Perfil característico da fluidização gasosa - incremento e decremento.....	33
Figura 6 – Efeito da variação da altura do leito na fluidização (Incremento) .....	35
Figura 7 – Efeito da variação da altura do leito na fluidização (Decremento) .....	35
Figura 8 – Queda de pressão no leito durante a fluidização – Incremento .....	36
Figura 9 – Queda de pressão no leito durante a fluidização – Decremento. ....	37
Figura 10 – Efeito da variação do diâmetro do leito na fluidização. ....	37
Figura 11 – Comparação entre as medições do sensor e o manômetro de coluna de água. ....	39
Figura 12 – Figura esquemática dos principais componentes do RLF em estudo.....	40
Figura 13 – Desenho do adaptador para leitura de pressão e temperatura .....	41
Figura 14 – Fluxograma do sistema de operação do RLF.....	43
Figura 15 – Perfil característico da fluidização gasosa da areia de sílica - incremento e decremento. ....	56
Figura 16 – Microscopia 45-50 MESH – Ampliado 45x.....	57
Figura 17 – Efeito da variação da altura do leito na fluidização (Incremento) .....	60
Figura 18 – Efeito da variação da altura do leito na fluidização – decremento.....	61
Figura 19 – Queda de pressão lateral no leito durante a fluidização – incremento. ....	62
Figura 20 – Queda de pressão lateral no leito durante a fluidização – decremento.....	62
Figura 21 – Efeito da variação do diâmetro do leito na fluidização. ....	63
Figura 22 – Variação da cota do leito na fluidização no reator (incremento). ....	65
Figura 23 – Variação da cota do leito na fluidização no reator (decremento)´ .....	65
Figura 24 – Efeito do exaustor ligado na fluidização – incremento .....	66
Figura 25 – Perfil de pressão para todos os diâmetros – incremento.....	67
Figura 26 – Comparativo entre o tubo de 53 e 44 mm para a cota de 175 mm.....	68
Figura 27 – Comparativo da inclinação entre os diâmetros para 0,175 m. ....	70
Figura 28 – Temperatura nos pontos laterais em função do tempo .....	72
Figura 29 – Valores de incremento obtidos para as temperaturas. ....	78
Figura 30 – Inclinação dos perfis de curvas para cada temperatura. ....	79
Figura 31 – Inclinação da vazão de mínima de fluidização com a temperatura. ....	79
Figura 32 – Versão final do plenum do reator.....	86
Figura 33 – Imagem do suporte da tela em alumínio usinada. ....	87
Figura 34 – Imagem do suporte da tela.....	87
Figura 35 – Flange de adaptação inferior.....	88
Figura 36 – Desenho do flange inferior para adaptação .....	89
Figura 37 – Montagem parte 1 .....	94
Figura 38 – Montagem parte 2 .....	94
Figura 39 – Montagem parte 3 .....	95
Figura 40 – Montagem parte 4 .....	95
Figura 41 – Montagem parte 5 .....	96
Figura 42 – Montagem parte 6 .....	96
Figura 43 – Montagem parte 7 .....	97
Figura 44 – Bancada de rotâmetros utilizados para medir vazão de ar e gás separadamente. ..	98
Figura 45 – Lança-chamas introduzido para aquecer o leito.....	98
Figura 46 – Cilindro de gás natural utilizado nos testes de combustão. ....	99

Figura 47 – Variador de tensão elétrica 0 – 240 V – VARIVOLT.....	99
Figura 48 – Compressor utilizado nos testes de combustão e fluidodinâmicos. ....	100
Figura 49 – Balança utilizada na pesagem da areia. ....	100
Figura 50 – Termômetro digital utilizado. ....	101
Figura 51 – Tubulação de escape do gás com saída com tubo de cobre para o analisador.....	101
Figura 52 – Simulações de aquecimento do reator com resistência. ....	106
Figura 53 – Reator aquecido com resistência desligada (a) e ligada (b), temperatura na superfície interna do reator a aproximadamente 1100°C. ....	106

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de K1 e K2 obtidos por diferentes pesquisadores.....	48
Tabela 2 – Composição do gás natural veicular utilizado.....	49
Tabela 3 – Valores de K1 e K2. ....	59
Tabela 4 – Com 5% de combustível em relação ao ar. ....	71
Tabela 5 – Vazão de ar igual a 26 ft <sup>3</sup> /h. ....	71
Tabela 6 – Gradiente de temperatura no leito durante ensaio. ....	74
Tabela 7 – Dados experimentais de combustão com a variação na granulometria da partícula. ....	75
Tabela 8 – Valores de incremento obtidos para as temperaturas. ....	77

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	13
2	OBJETIVOS .....	15
3	FUNDAMENTAÇÃO DA PESQUISA .....	16
3.1	Princípio da fluidização das partículas sólidas .....	16
3.2	Combustão em Leito Fluidizado .....	20
3.3	Bibliografia-Suporte da Pesquisa .....	24
3.3.1	<i>Souza (1978): Um dos pioneiros no estudo sobre LF no Brasil.</i> .....	24
3.3.2	<i>Andrade (2007): Estudo da gaseificação da biomassa em RLF.</i> .....	25
3.3.3	<i>Salema (2008): Relação combustíveis-emissões em CLF.</i> .....	26
3.3.4	<i>Pilawska et al. (2001): Estudo de emissões de NOx em RLF.</i> .....	27
3.3.5	<i>Saintrain (2012): Estudo analítico sobre a fluidodinâmica no LF.</i> .....	29
4	METODOLOGIA .....	31
4.1	Estudo experimental do estado de fluidização gasosa da sílica .....	31
4.1.1	<i>Bancada de Pesquisa de Leito Fluidizado</i> .....	31
4.1.2	<i>Ensaio Paramétricos de Processos de Fluidização</i> .....	33
4.1.3	<i>Instrumentos de medição e controle</i> .....	38
4.2	Desenvolvimento do reator de leito fluidizado .....	40
4.2.1	<i>Projeto do RLF</i> .....	40
4.2.2	<i>Montagem do RLF</i> .....	42
4.2.3	<i>Operação do RLF</i> .....	42
4.3	Análise teórica do processo .....	44
4.3.1	<i>Equações de Governo da Fluidização</i> .....	45
4.3.2	<i>Aspectos Termodinâmicos</i> .....	48
4.3.3	<i>Eficiência da Caldeira</i> .....	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	54
5.1	Reestruturação da bancada de pesquisa .....	54
5.2	Ensaio na bancada de pesquisa. ....	55
5.3	Estudos para determinação dos parâmetros de projeto do RLF .....	63
5.3.1	<i>Análise dos dados obtidos com os ensaios aplicados ao RLF</i> .....	64
5.3.2	<i>Determinação das especificações de projeto.</i> .....	68
5.4	<i>“Startup” da RLF</i> .....	70

5.5	<b>Influência da temperatura na fluidodinâmica.....</b>	<b>75</b>
6	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>81</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>82</b>
	<b>APÊNDICE A – DETALHAMENTO DA CONSTRUÇÃO DOS COMPONENTES DO REATOR.....</b>	<b>84</b>
	<b>APÊNDICE B – DETALHES DE MONTAGEM DO RLF.....</b>	<b>91</b>
	<b>ANEXO A: FOTOS DA MONTAGEM DO RLF.....</b>	<b>94</b>
	<b>ANEXO B: EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS TESTES FLUIDODINÂMICOS COM E SEM COMBUSTÃO.....</b>	<b>98</b>
	<b>ANEXO C: INSTRUMENTAÇÃO PARA TESTE DE DESEMPENHO.....</b>	<b>102</b>
	<b>ANEXO D: TABELA TERMODINÂMICA PARA OBTENÇÃO DO PODER CALORÍFICO DO GNV UTILIZADO.....</b>	<b>105</b>
	<b>ANEXO E: IMAGENS RELEVANTES A CERCA DOS TESTES DE COMBUSTÃO.....</b>	<b>106</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento das máquinas térmicas e o domínio da eletricidade, houve significativas mudanças no *modus operandi* da sociedade. Como consequência, iniciou-se um ciclo vicioso de demanda versus produção de bens e serviços que resultou em uma corrida por soluções energéticas, em termos de suprimento de combustíveis potencialmente eficientes para atendimento às necessidades emergentes.

Neste contexto, o advento da descoberta do petróleo e de sua capacidade calorífica induziu o homem ao uso dos combustíveis fósseis, de forma cada vez mais intensa, gerando instabilidade política internacional a partir do início do século XX (com a descoberta das grandes reservas), o que culminou em conflitos e guerras pelo mundo, dos anos 60 e 70 até os dias de hoje. Na atualidade, o atendimento a essas demandas por energia tem sido repensado, por conta do passivo ambiental resultante da utilização dos combustíveis fósseis, o que tem motivado a procura por tecnologias de combustão mais eficazes em termos de emissão de poluentes, bem como, por tecnologias capazes de operar com combustíveis de fontes renováveis.

Assim, a combustão tem estado sob foco, especialmente quanto à emissão de produtos da queima dos combustíveis fósseis em sistemas térmicos de combustão convencionais, tais como: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e enxofre (SO<sub>x</sub>), cinzas, material particulado (MP), dentre outros. Cónsul *et al.* (2004) afirma que as emissões de NO<sub>x</sub> no mundo são de 10 milhões de toneladas por ano, provenientes de fontes naturais e 40 milhões de toneladas por ano de fontes antropogênicas, oriundas principalmente de processos de combustão, a exemplo das emissões automotivas.

As consequências dessas emissões no meio ambiente e na saúde humana são inúmeras, por exemplo, NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub> em contato com o vapor de água presente nas nuvens geram ácido nítrico e sulfúrico que precipitam formando as chuvas ácidas. Por essa razão, tem havido interesse em se desenvolver reatores e equipamentos capazes de emitir menores índices de emissão de poluentes para a atmosfera. Alinhada com esse objetivo, uma grande ênfase tem sido dada ao desenvolvimento de sistemas de pós-tratamento dos produtos de combustão, como por exemplo, dispositivos sequestradores de carbono, catalisadores, filtros de combustível, dentre outros, entretanto, esses equipamentos são demasiadamente onerosos numa instalação térmica.

Diante dessa questão difícil de ser equacionada, em termos de assegurar as sustentabilidades econômica e ambiental de uma instalação térmica, novas tecnologias têm sido pesquisadas para desenvolver reatores/caldeiras tão eficientes quanto os convencionais e capazes de produzirem menores índices desses gases poluentes. Como exemplo dos resultados desse esforço, a tecnologia da Combustão em Leito Fluidizado (CLF) surgiu, nos últimos anos, como uma opção eficaz para atender esse objetivo, que basicamente é a tecnologia da Combustão de Filtração, em que o meio poroso é móvel. A Combustão de Filtração, também conhecida como combustão em meios porosos, permite a operação em um nível ultrabaixo de razão de equivalência, propiciando baixíssimas emissões de CO e NO<sub>x</sub>, com índices impossíveis de serem obtidos em queimadores convencionais (SILVA, 2012).

Com o propósito de desenvolver um novo sistema térmico, menos poluente e de baixo custo de fabricação e manutenção, a partir da aplicação desses fundamentos, foi iniciado a construção de um Reator de Leito Fluidizado (RLF) no Laboratório de Combustão e Energias Renováveis da Universidade Federal do Ceará (UFC). Esse desenvolvimento tem sido possível devido à composição de esforços de alguns pesquisadores desse laboratório numa mesma direção. Esses pesquisadores têm contribuído com estudos técnico-científicos complementares, a fim de se chegar à obtenção de parâmetros de projeto apropriados à construção de um protótipo condizente com a proposta do trabalho.

Neste contexto, alguns parâmetros fundamentais de projeto puderam ser obtidos através de estudos prévios de desenvolvimento da caldeira, em que um enfoque foi dado ao estudo dos fenômenos fluidodinâmicos dentro do leito fluidizado. Esse desenvolvimento, então, foi precedido de um estudo fluidodinâmico do leito, separadamente, em que foi utilizada uma bancada de pesquisa constituída de tubos de acrílico com diferentes diâmetros, a fim de verificar a influência dos efeitos de parede sobre o comportamento do leito, bem como, chegar à melhor relação comprimento-diâmetro do reator, de forma a minimizar as instabilidades de processo. A partir desses estudos, foi decidido iniciar o estudo experimental da combustão em leito fluidizado a partir de um reator de 53 mm de diâmetro e 545 mm de altura, como um protótipo preliminar, em escala de laboratório, para entender os fenômenos do processo e adquirir experiência para projetar um reator definitivo.

## 2 OBJETIVOS

Este trabalho teve por objetivo principal iniciar o desenvolvimento de uma caldeira de leito poroso de partículas de sílica para operar como um reator de leito fluidizado borbulhante, a partir da queima de gás natural, preliminarmente, visando sua aplicação posterior em combustão de biomassa sólida.

Dentre os objetivos específicos, cabe destacar aqueles que contribuirão significativamente para compreensão dos fenômenos do processo, quais sejam:

- Construção de um protótipo de caldeira de leito fluidizado, em escala laboratorial, para operar com gás natural, com a finalidade de estudo dos comportamentos fluidodinâmicos com e sem combustão;
- Construção e/ou adaptação de instrumentos para permitir o monitoramento e controle da caldeira de leito fluidizado;
- Análise dos parâmetros operacionais que influenciam o comportamento fluidodinâmico do leito fluidizado;
- Análise comparativa entre os dados experimentais obtidos via bancada de pesquisa e os dados experimentais da caldeira de leito fluidizado;
- Análise comparativa de dados, tabelas e gráficos obtidos experimentalmente na caldeira de leito fluidizado com a de leito fixo.
- Proposta de projeto construtivo para aplicar ao desenvolvimento da caldeira de leito fluidizado destinada à combustão de biomassa sólida.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO DA PESQUISA

#### 3.1 Princípio da fluidização das partículas sólidas

A fluidização é um processo pelo qual um leito constituído de partículas sólidas é transformado, através do escoamento de um fluido, em um meio de comportamento semelhante ao de um líquido. Esse processo pode ser conseguido através da suspensão dessas partículas pela força de empuxo gerada com a ação de um gás (ou líquido), que escoam através do leito.

Segundo Geldart (1973), os regimes de fluidização de um leito podem ser classificados em: i) Leito Fixo e Leito Expandido; ii) Leito Fluidizado Incipiente; iii) Leito Fluidizado Borbulhante; iv) Leito Fluidizado Turbulento; v) Leito Fluidizado Disperso (regime de transporte); e vi) Leitos Fluidizados Circulantes.

A velocidade de mínima fluidização, de acordo com a teoria das duas fases, é a velocidade 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).

Para a determinação da velocidade mínima de fluidização é utilizado o “método da queda de pressão” para o qual é usado um manômetro em “U”. As quedas de pressão são medidas abaixo do distribuidor e as velocidades do gás são medidas através de um rotâmetro acoplado à linha do fluido. Neste método a queda de pressão corresponde a uma 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 decremento diminuindo lentamente a velocidade do gás e medindo a queda de pressão correspondente (SOUZA, 1978).

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).

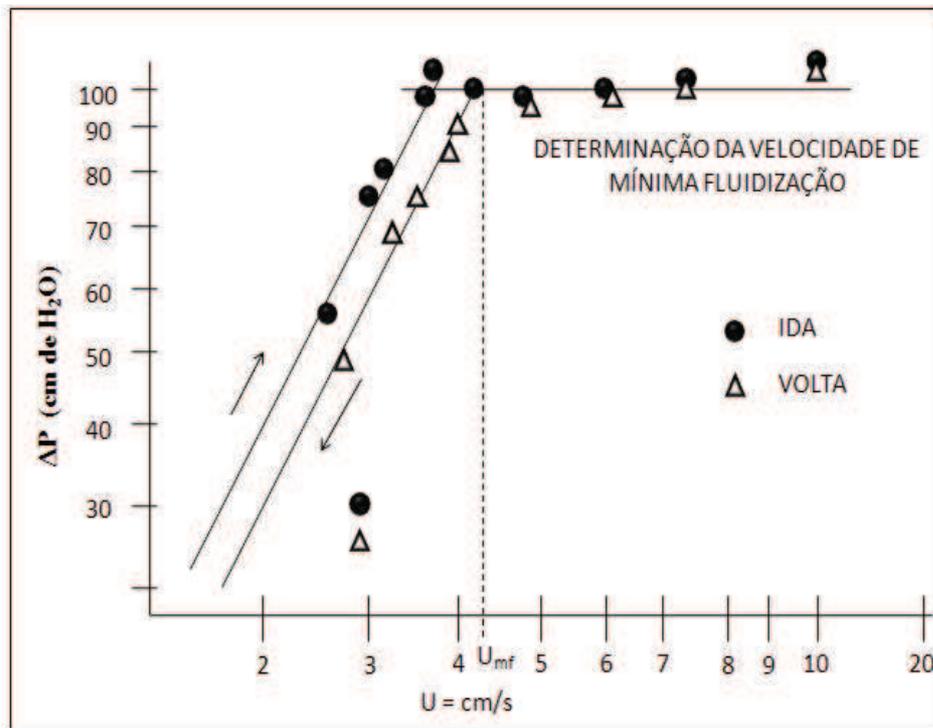
Como o distribuidor é uma placa porosa, e, portanto, um leito fixo, também contribui para a queda de pressão do leito. Deste modo para ter somente a queda de pressão

devido às partículas do leito é necessário subtrair os valores da queda de pressão devido ao distribuidor, ou utilizar de alguma estratégia de medição para realizar uma leitura ao nível da superfície superior da placa.

Souza (1978) sugere que, para determinar as quedas de pressão correspondentes ao distribuidor, proceda-se da mesma forma com o leito vazio. Assim, deve ser medidas a velocidade do gás “U”, a queda de pressão medida  $\Delta p_t$ , a queda de pressão correspondente ao distribuidor  $\Delta p_d$  e a queda de pressão correspondente às partículas do leito  $\Delta p_a$ .

A Figura 1 apresenta, num gráfico log-log, a queda de pressão correspondente a cada velocidade do gás. O valor da velocidade mínima de fluidização  $U_{mf}$  é obtido através da projeção vertical da interseção das duas retas sobre o eixo das velocidades. Segundo Davidson e 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 1 – Gráfico de  $\Delta P$  x U.



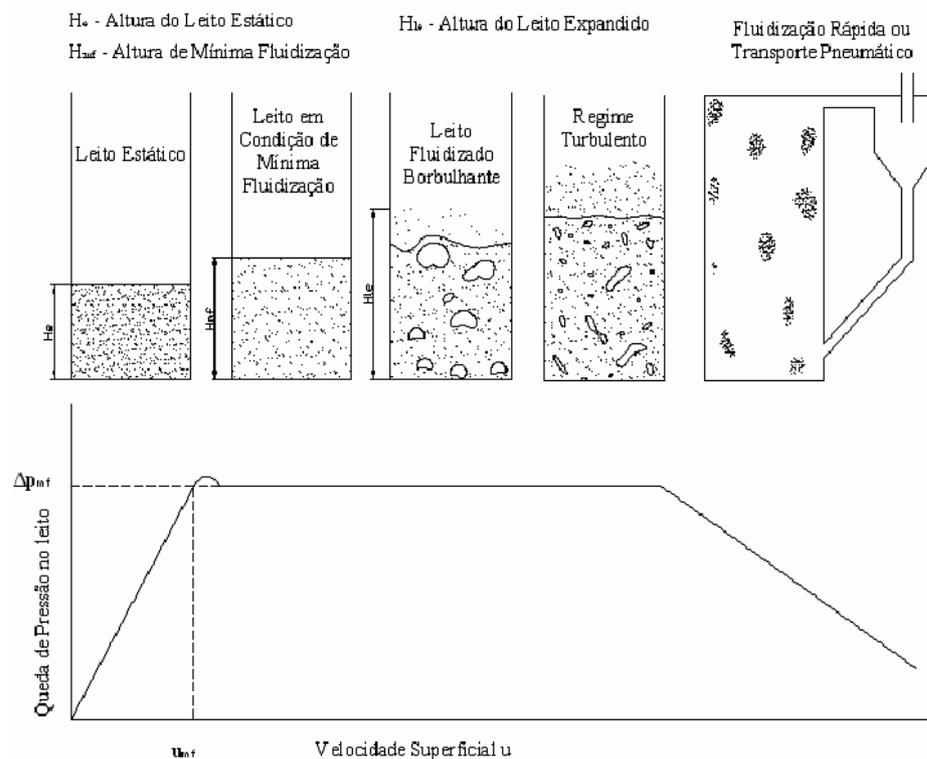
Fonte: Souza, 1978.

No estudo do leito fluidizado, uma das características mais importantes é a condição de mínima fluidização, pois sem saber os parâmetros que envolvem essa condição

não é possível um perfeito entendimento do fenômeno da fluidização, nem o dimensionamento de equipamentos que utilizem esse princípio.

O gráfico apresentado na Figura 2 representa esquematicamente esse processo, bem como podem ser visualizados as diferentes etapas de fluidização. Posteriormente à condição de mínima fluidização, existem, pelo menos, mais cinco regimes operacionais do leito fluidizado.

**Figura 2 – Etapas da Fluidização.**



Fonte: Andrade, 2007.

### ***Classificação das partículas segundo Geldart (1986)***

Geldart (1986) observou a fluidização de diferentes tipos e tamanhos de partículas, classificando-as em quatro grupos descritos a seguir, que são apresentados na Figura 3:

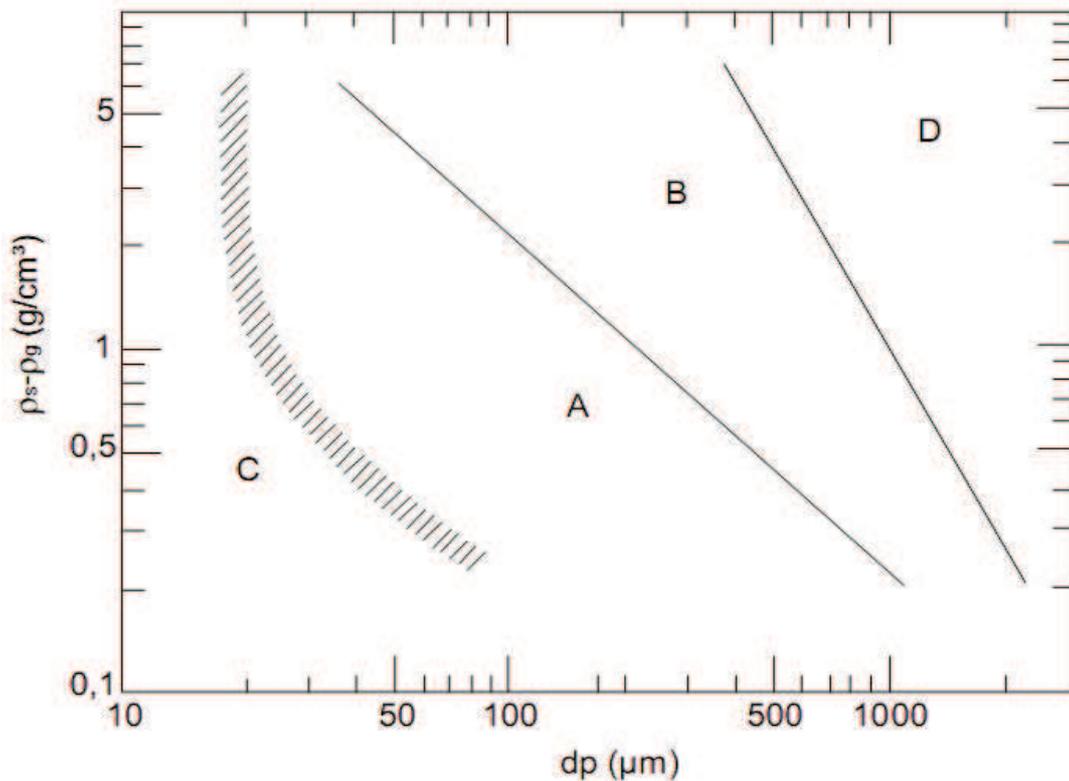
a) Grupo A: Designadas como aeradas. O material desse grupo tem pequeno diâmetro da partícula e baixa densidade ( $\leq 1,4\text{g/cm}^3$ ). Esse tipo de sólido fluidiza facilmente e suavemente, a baixa velocidade do gás e poucas bolhas a alta velocidade.

b) 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  $\text{g}/\text{cm}^3$  e 4  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Esse tipo de sólido fluidiza bem, com vigorosa ação de borbulhamento.

c) 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.

d) Grupo D: constituído de partículas muito densas, portanto de difícil fluidização.

Figura 3 – Classificação de Geldart para a fluidização de partículas com ar sob condições ambiente.



Fonte: Geldart, 1986.

### 3.2 Combustão em Leito Fluidizado

Introduzida inicialmente na década de 1920, 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 de 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 das partículas arrastadas para fora da câmara, 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 excesso de ar 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. 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 os seguintes componentes (LOPES, 2002):

a) Caixa de ar ou *plenum*: parte inferior do reator onde ocorre a sustentação inicial do leito e a introdução e distribuição do ar de fluidização ou ar primário;

b) Leito: coluna intermédia entre a caixa de ar e a coluna livre. Integra a mistura de material inerte, combustível e ar de combustão.

c) 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;

d) 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.

Por outro lado, grande parte dos processos de combustão são caracterizados por apresentar altos impactos ambientais, apesar do alto aproveitamento do potencial energético. Então, há a necessidade de utilizar novos combustíveis, aumentar a eficiência associada, reduzir custos e os níveis de emissão de poluentes, incentivando o desenvolvimento de novas tecnologias de combustão (SALEMA, 2008).

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).

Um detalhe pertinente em Salema (2008) é o pré-aquecimento do ar de entrada, fato este que contribui diretamente para o processo de “*startup*” do reator. Em sistemas de secagem usando o leito fluidizado o ar de entrada não necessita de um pré-aquecimento diferentemente da combustão por conta da velocidade do gás no leito que gera um resfriamento por entrar a temperatura ambiente.

### ***CLF: Vantagens e limitações***

Segundo Kunii (1991) e Grace *et al.* (1997), as vantagens da CLF está diretamente relacionada com as características de operação do sistema de leito fluidizado, dentre as quais destacam-se:

a) 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 excesso de ar menores do que aqueles que seriam necessários em outros sistemas de combustão;

b) 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;

c) A baixa temperatura de operação (800 – 900°C) permite:

➤ Operar a temperaturas abaixo das quais o nitrogênio e o oxigênio do ar de combustão reagem para formar óxidos de nitrogênio, diminuindo as suas emissões;

➤ Operar a temperaturas inferiores ao ponto de fusão das cinzas, mitigando questões operacionais relacionadas com a sua deposição e incrustação;

➤ Diminuir os requisitos técnicos associados ao material de construção do leito (redução de custos).

d) A alta flexibilidade, no que se refere ao combustível a utilizar, 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 agroflorestais (biomassas com PCI elevado, como a casca de castanha de caju, onde o acúmulo trata-se de uma problemática ambiental regional), os resíduos sólidos urbanos (RSU), as lamas provenientes de estações de tratamento, os plásticos, os pneus ou o carvão;

e) 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;

f) O elevado rendimento térmico, possibilitando uma maior compactação da instalação e equipamentos associados (permutadores, etc.);

g) O meio poroso pode ser constituído de partículas de sílica que é altamente acessível e com um baixo custo de obtenção.

h) Caso seja um reator de LFC, o leito de sílica pode ser removido e o sistema, além de realizar a queima com o combustível, pode ser considerado um processo de secagem e purificação da areia, que deve ser reaproveitada em outros projetos até mesmo na área de construção civil.

Apesar de evitáveis (ou minimizáveis), as principais limitações ou desvantagens associadas à utilização da tecnologia de leito fluidizado são:

a) Erosão das superfícies de suporte e de transferência de calor por abrasão, decorrente da presença e movimentação de grandes quantidades de sólidos ocasionando manutenções em curtos períodos;

b) Sensibilidade 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;

c) 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;

d) Dificuldades na modelação matemática de fluxos e de comportamento do leito.

### 3.3 Bibliografia-Suporte da Pesquisa

#### *3.3.1 Souza (1978): Um dos pioneiros no estudo sobre LF no Brasil.*

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 mono energético).

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.

Ainda no citado trabalho, 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 500 g de areia com densidade de  $2,66 \text{ g/cm}^3$  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.

#### COMENTÁRIO SOBRE ESSA PESQUISA:

Observa-se, por este trabalho, que o autor se restringiu a um diâmetro específico, justificado pelo seu interesse em caracterizar o processo de formação de bolhas, entretanto, essa pesquisa contribuiu para estabelecer etapas no processo de mudanças no regime do leito.

A partir desta pesquisa, foi adotado o método das duas fases para a determinação do ponto de mínima fluidização, que ficou evidenciado experimentalmente pela variação na pressão medida no manômetro em “U”.

### ***3.3.2 Andrade (2007): Estudo da gaseificação da biomassa em RLF.***

Andrade (2007) teve como objetivo o estudo comparativo da gaseificação de biomassa em protótipos 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.

O procedimento consistiu em utilizar um leito fluidizado com diâmetro interno de 407 mm, com altura de 2.660 mm, 500 mm de altura de óxido de alumínio como constituinte inerte do leito. O autor recomenda tentar operação com leitos com alturas superiores a 500 mm, de forma a verificar a possibilidade do aumento da eficiência do processo.

#### ***COMENTÁRIO SOBRE ESSA PESQUISA:***

A pesquisa de Andrade (2007) possui pontos positivos como a reutilização dos gases de produtos de motores de combustão interna, entretanto o leito utilizado é composto de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) que apesar de alta difusividade térmica o custo associado e a quantidade proposta na pesquisa sugerem uma alteração por um material com propriedades semelhantes, porém mais acessível tanto na natureza quanto economicamente.

O procedimento usado nesta pesquisa para medição do ponto de mínima fluidização que se baseia na leitura da pressão foi usado nos testes experimentais tanto na bancada quanto no reator.

Andrade (2007) ainda determina que quando há uma estabilidade na pressão medida o regime borbulhante foi atingido, de acordo com os outros autores, assim como, com os testes desenvolvidos nesta dissertação.

### ***3.3.3 Salema (2008): Relação combustíveis-emissões em CLF.***

Em Salema (2008) foi avaliado a ocorrência de sinergias entre combustíveis, durante a 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 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 diminuiram durante a combustão.

Os seguintes mecanismos aparentaram as seguintes tendências: o aumento da eficiência na conversão de carbono e a consequente diminuição da presença deste elemento nas cinzas acumuladas nos ciclones (CO); a conjugação de mecanismos 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 volantes (MP); a relação entre o cloro presente nos combustíveis e a presença de enxofre 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 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 300 mm, com altura de 5000 mm. Como material do leito utilizou areia de sílica com os seguintes diâmetros: D<sub>50</sub>=330µm; D<sub>90</sub>=480µm; D<sub>10</sub>=220µm.

COMENTÁRIO SOBRE ESSA PESQUISA:

O reator estudado por Salema (2008) tem seção quadrada, o que influencia diretamente na forma do escoamento, outro detalhe é a variação granulométrica estudada que se assemelha a Saintrain (2012) que também estudou as influências destas variações para grãos de tamanhos diferentes.

Esta pesquisa está direcionada à diversas formas de combustíveis usados para a combustão em meio poroso e confirmar a eficácia do LF como mecanismo redutor de emissão de poluentes.

### **3.3.4 Pilawska et al. (2001): Estudo de emissões de NOx em RLF.**

Pilawska *et al* (2001) estudou a formação do óxido nítrico(NO) em um leito fluidizado de partículas de sílica, mantendo a temperatura entre 800 K e 1000 K, além de variar quantidade de areia no leito.

Em seu artigo, é verificado que a formação do NO pode ser proveniente quatro mecanismos de formação durante o processo de combustão. A primeira deles seria uma reação de cadeia chamada de mecanismo de reação térmica de Zeldovich, baseada na formação do NO a partir do choque entre as moléculas de oxigênio e nitrogênio.



Sendo que a reação (3.2) ocorre a uma taxa de energia de ativação de 319kJ/mol, segundo Hayhurst e Hutchinson (1998). O segundo é o mecanismo de Fenimore, descrito abaixo:



Esse mecanismo consiste em formar NO com nitrogênio livre, devido à reação com hidrocarbonetos, unindo a oxigênio. O terceiro mecanismo é observado em misturas ricas pela formação de N<sub>2</sub>H de forma endotérmica com um intermediário.





Onde M é o terceiro corpo (uma molécula qualquer que apenas troca energia cinética). NH produzido ainda pode reagir com radicais OH e H dando nitrogênio livres e formar NO mais uma vez.

Segundo o autor, para temperaturas abaixo de 2000 K, por uma formação exotérmica com  $\text{N}_2\text{O}$ , é possível formar NO.



Malte e Pratt (1974) afirmam que a reação de formação de NO a partir dessas misturas de óxido nitroso possuem uma energia de ativação de 97 kJ/kmol.

Além do estudo de formação de  $\text{NO}_x$ , o autor gera uma relação entre o  $\text{NO}_x$  produzido pelos produtos da combustão e a razão  $U/U_{mf}$ . Entretanto  $U_{mf}$  é função de algumas variáveis como diâmetro da partícula, umidade no leito e temperatura.

#### COMENTÁRIO SOBRE ESSA PESQUISA:

Para comentar o trabalho realizado por Pilawska *et al.* (2001), foi necessário recorrer à bibliografia clássica a respeito de processos de combustão, tendo em vista que o autor tenta identificar os mecanismos de formação de óxidos de nitrogênio mais aplicáveis em processo de combustão de leito fluidizado à base de sílica enquanto material poroso constituinte do leito.

Então, analisando em detalhe o material produzido pelo autor a luz de conceitos descritos por Turns (2002), verifica-se que, embora ele cite as reações clássicas de Zeldovich, não é incluso a reação complementar, como extensão do mecanismo de Zeldovich, normalmente esperada.



Além disso, considerando-se que esse mecanismo de Zeldovich é aplicável para temperaturas elevadas ( $>1800\text{K}$ ) e que as temperaturas do reator desse autor ficam entre 800 e 1000 K, acredita-se que esse mecanismo não seja importante neste processo de formação de NO. Com relação ao mecanismo de Fenimore citado pelo autor, como sendo um dos geradores de NO, o autor também não considera a reação normalmente conjugada,



Da mesma forma, o autor menciona o mecanismo pela via do  $N_2O$  intermediário acrescentando a reação (3.9), reação esta não comumente encontrada em bibliografias de referências neste assunto (TURNS, 2002).

Em Pilawska *et al.* (2001) ainda é apresentado uma tabela comparativa entre valores de temperatura de operação e outros valores como: a variação da granulometria e velocidade de mínima fluidização. Apesar do reator desse autor tenha diâmetro de 122 mm, os fenômenos físicos mostrados em sua pesquisa estão em consonância com os fenômenos estudados ao decorrer desta dissertação.

### **3.3.5 Saintrain (2012): Estudo analítico sobre a fluidodinâmica no LF.**

Saintrain (2012) investigou o comportamento fluidodinâmico das partículas de sílica como leito em uma bancada de estudo em leito fluidizado com o objetivo de formar parâmetros para a construção de um reator para a combustão de biomassa sólida, para esta pesquisa a casca de castanha de caju.

Ainda em Saintrain (2012) foi estudada a influência da alteração da cota do leito que iniciou em 75 mm e depois aumentou de 50 em 50 mm, realizando testes em cada ponto de cota, assim como, também foi estudada a influência do diâmetro do tubo, no caso, foram estudados dois tubos, um de 90 mm e outro de 44 mm, para cada tubo foi variado a cota conforme acima citado. Além disso, foi estudada a variação da granulometria da areia, no qual foram verificados os fenômenos para 0,074 mm; 0,346 mm e 546 mm de diâmetro médio do grão.

Saintrain (2012) sugere o desenvolvimento de um protótipo teórico para a combustão da biomassa sólida, baseado em testes de velocidade de difusão da biomassa no leito, bem como, o comportamento fluidodinâmico da mistura binária por ele estudada.

COMENTÁRIO SOBRE ESSA PESQUISA:

Esta pesquisa foi fundamental para o desenvolvimento da dissertação por ser, inicialmente, precursora na linha de pesquisa em leito fluidizado na UFC. Os gráficos de perfil fluidodinâmicos obtidos por Saintrain (2012) foram condizentes com os encontrados em outros artigos e trabalhos científicos.

As curvas de influência de cotas e granulométricas foram importantes para a determinação da granulometria de estudo para esta dissertação, bem como a cota de trabalho no reator.

O estudo do processo de funcionamento de um reator em LF até o completo domínio desta tecnologia deveria ter sido o primeiro passo antes de sugerir o uso deste reator para a combustão da biomassa sólida.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Estudo experimental do estado de fluidização gasosa da sílica

A partir da necessidade de se adquirir um melhor entendimento dos fenômenos de fluidização e visando um maior controle e compreensão dos fenômenos que poderiam ocorrer dentro do reator de leito fluidizado, optou-se por um estudo preliminar sobre a fluidização gasosa da sílica (areia de praia) e sobre a influência de alguns parâmetros.

Neste sentido, foi dada uma grande ênfase ao estudo dos efeitos de parede sobre o comportamento do leito fluidizado, como também, à devida investigação sobre as variações de pressão ao longo do leito, associadas às variações de diâmetro da coluna.

#### *4.1.1 Bancada de Pesquisa de Leito Fluidizado*

Para realização do estudo fluidodinâmico do leito de fluidizado com partículas de sílica, utilizou-se uma bancada de pesquisa constituída de três tubos de acrílico com diâmetros de 0,044 m, 0,065 m e 0,090 m. Em cada tubo possui 1000 mm de comprimento e neles estão instaladas uma tela para sustentação do leito de areia e por onde o ar escoia após ser conduzido por um distribuidor de ar, aqui chamado de “plenum”.

Deve ser ressaltado, que o objetivo da bancada de pesquisa de leito fluidizado foi verificar alguns resultados relevantes, já estudados no laboratório e complementar com novas análises e ensaios, focando principalmente: influência da variação do diâmetro, variação de granulometria, perfil de pressão característico, perfil de queda de pressão ao longo do leito, influência da variação da massa inicial (cota inicial do leito fixo), e efeito de parede e da compactação inicial do leito fixo.

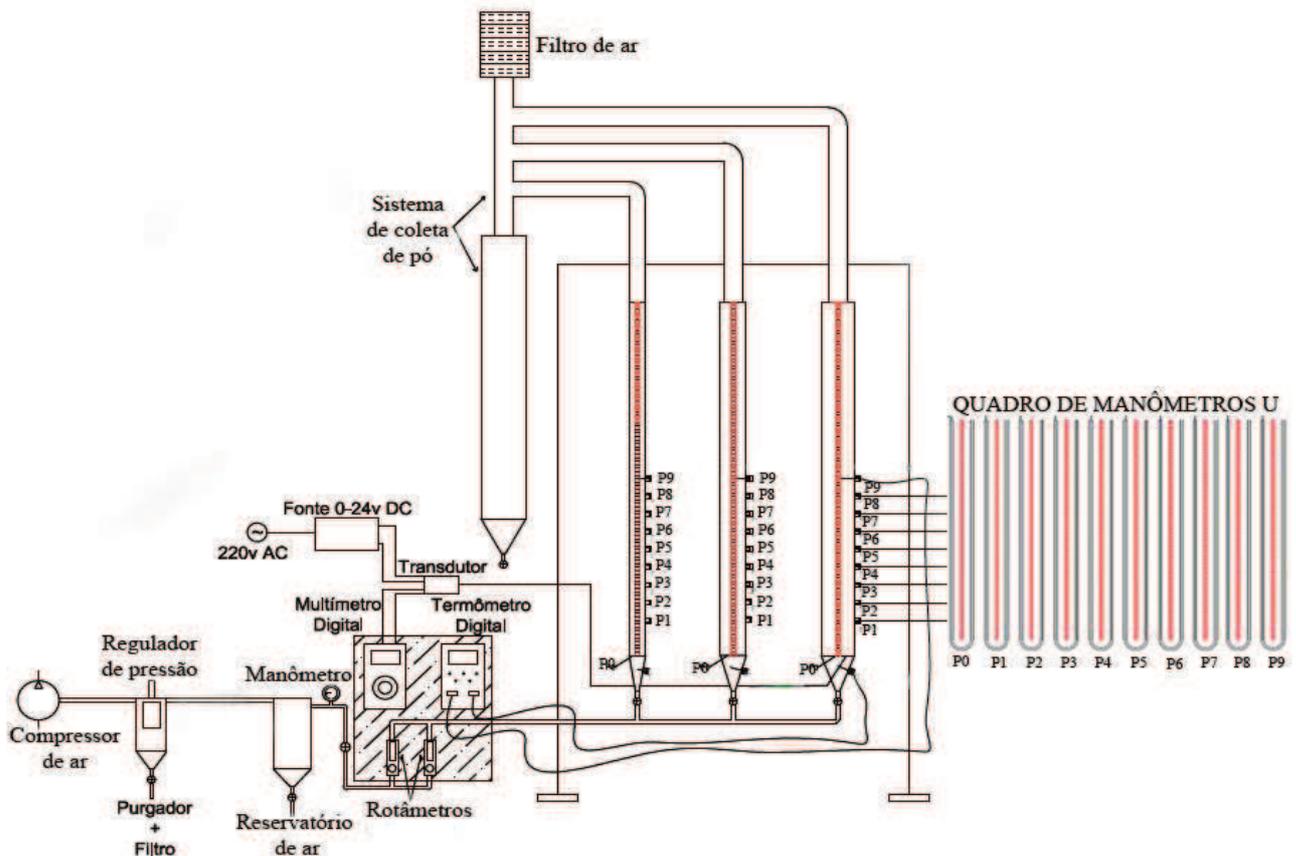
Neste contexto, buscou-se confirmar as informações obtidas por Saintrain (2012), determinando novos parâmetros fluidodinâmicos, tanto para regimes de operação com combustão como regime sem combustão, a fim de elaborar um plano de trabalho para projeto/criação do reator. Assim, foram estabelecidas algumas metas e propostas de

desenvolvimento científico, no que tange o estudo da combustão em meios porosos, relacionado-o ao processo em leito fluidizado.

Em princípio, todo o trabalho de investigação sobre os parâmetros de operação e projeto do reator de leito fluidizado, foram consubstanciados a partir de um estudo fluidodinâmico em uma bancada de pesquisa, construída no LACER/UFC. Nela, é possível, além de visualizar os fenômenos fluidodinâmicos devido ao escoamento dos gases no leito, medir as variações de pressão e entender mais plenamente sobre o processo.

A Figura 4 mostra um diagrama esquemático dessa bancada de pesquisa de leito fluidizado utilizada na realização dos experimentos e estudos da fluidização gasosa do leito de partículas de sílica. P0, P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8 e P9 representam respectivamente as leituras de pressão manométricas do leito para as alturas de 0,0 m (pressão medida na altura da tela de sustentação do leito) e de 0,100 m a 0,500 m, variando-se de 0,050 m a partir de P1 (leitura de pressão lateral na altura de 0,100 m).

Figura 4 – Diagrama esquemático da bancada de pesquisa de leito fluidizado.



Fonte: Adaptado de Saintrain (2012).

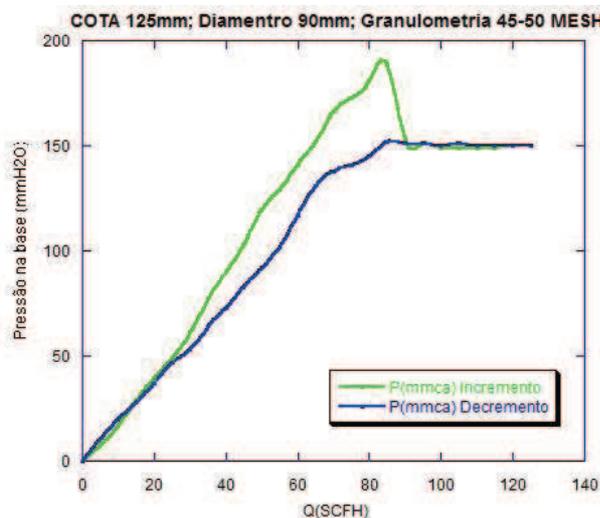
Através deste aparato experimental foi possível coletar dados da queda de pressão do leito fluidizado e variação da altura do leito fixo, bem como, investigar os regimes de: leito fixo, mínima fluidização, borbulhante e de transporte (no qual ocorre o arrasto brusco de partículas de areia em forma de pistões).

#### 4.1.2 Ensaio Paramétricos de Processos de Fluidização

Pela necessidade de se entender o comportamento fluidodinâmico a partir da bancada, realizou-se ensaios paramétricos baseado nos testes aplicados em Saintrain (2012) e seguindo padrões de medição de leitura e determinação de parâmetros relevantes, como a mínima fluidização, segundo Andrade (2007) e Salema (2008). Através dos dados coletados na bancada, foram gerados gráficos que auxiliaram na compreensão da influência de alguns parâmetros como a cota, granulometria e diâmetro do tubo.

A Figura 5 mostra o perfil de pressão característico da fluidização do leito versus vazão do ar, que fluidiza o leito de partículas de areia, encontrada na costa marítima do Ceará, mais especificamente nas praias de Beberibe. Essas medidas de pressão são realizadas por um sensor conectado na tela que sustenta o leito (base), através do qual é possível realizar as medidas das pressões em milímetros de coluna de água (mmH<sub>2</sub>O) em um manômetro “U” (SAINTRAIN, 2012).

Figura 5 – Perfil característico da fluidização gasosa - incremento e decremento.



Fonte: Adaptado de Saintrain, 2012.

A curva de pressão manométrica na base do leito, que é indicado no gráfico como “incremento”, representa o aumento da pressão na base do leito à medida que se aumenta a vazão de ar, que escoar pelo leito de partículas de areia. De forma análoga, o termo “decremento”, designa a curva de pressão, durante o decréscimo de vazão do ar.

No perfil de pressão na condição de incremento (acréscimo de vazão do ar), há uma curva que se aproxima de uma reta, que varia do ponto zero ao pico de pressão. Essa região representa o regime de leito fixo da fluidização. Nessa faixa, o leito de partículas de sílica está se expandindo, devido ao aumento na vazão de ar, sendo que a pressão na base cresce quase linearmente com o aumento de vazão.

Durante esse acréscimo, o leito se expande, isto é, tem sua porosidade aumentada pela passagem de ar entre os poros do leito. Após atingir o pico de pressão (ponto de máxima pressão no gráfico de incremento), qualquer acréscimo na velocidade do ar, causa um decréscimo de pressão e na superfície do leito começam a surgir pequenas bolhas. O leito passa a ter um comportamento semelhante ao de um fluido em ebulição e, por essa razão, este ponto é comumente chamado de mínima vazão de fluidização (SAINTRAIN, 2012).

Continuando o aumento da vazão do ar que fluidiza o leito, constata-se a formação de um perfil aproximadamente retilíneo, representado no gráfico como uma região onde a pressão varia pouco, enquanto há um acréscimo de vazão de ar. Nesta região, ocorrem bolhas maiores e mais frequentes. Esta representa o regime borbulhante.

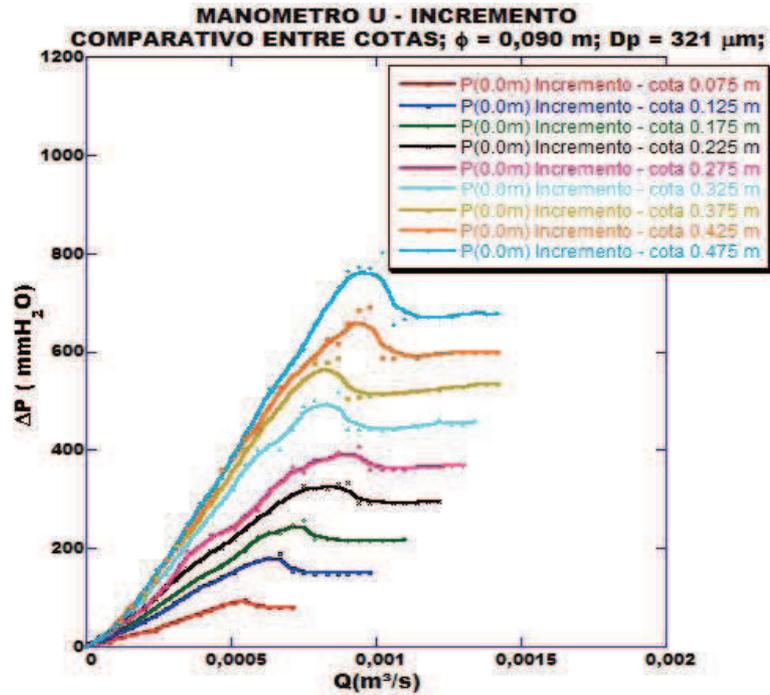
Após essa região de pressão aproximadamente constante (regime borbulhante), é observada, durante os testes, uma região no leito onde a pressão apresenta uma leve inclinação. Nesta condição, podem ser observadas maiores bolhas entre as partículas, ao longo do leito. As bolhas ficam grandes o suficiente para formar pistões de sílica, as quais impulsionam essa massa compacta do leito de forma desordenada. Com o acréscimo sucessivo de ar, outros fenômenos são observados, como o leito de transporte pneumático e, em seguida, o leito fluidizado circulante.

Através das Figuras 6 e 7, é possível perceber a influência da variação da cota inicial do leito fixo na fluidização. Por Saintrain (2012) foram realizados testes no tubo de acrílico de diâmetro interno de 0,090 m com areia de praia com diâmetro médio de partícula aproximada de 0,321 mm, gerando uma curva para a fluidização gasosa da areia de praia para diferentes alturas (0,075m a 0,475 m, aumentando de 0,050m a cada novo experimento).

Tendo como base que a quantidade de volume em massa é função da altura, as Figuras 6 e 7 demonstram, indiretamente, como o aumento da massa causa o aumento dos valores de pressão na base do leito, durante o incremento e o decremento, respectivamente.

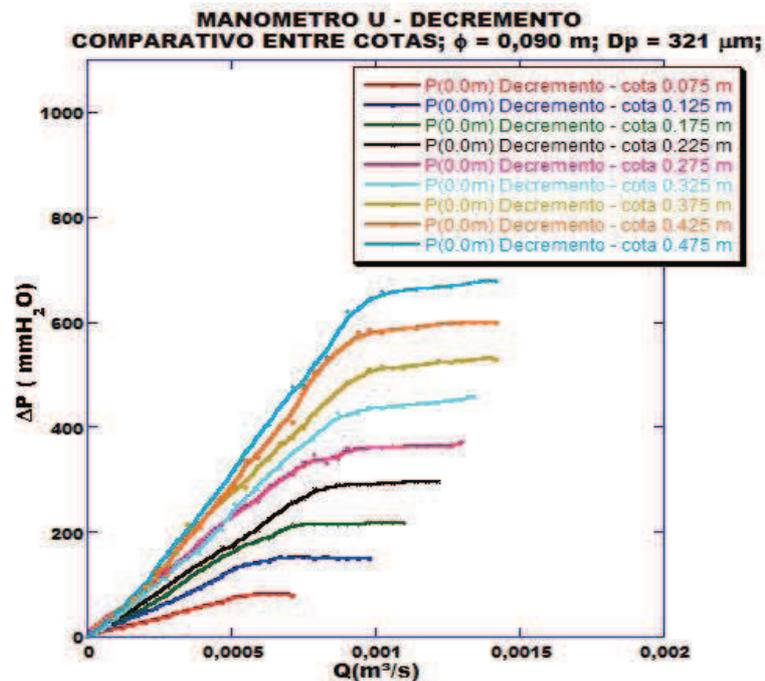
Apesar de semelhante à Figura 6, a Figura 7 mostra a queda de pressão ao longo do leito para a cota inicial de 0,475 mm, para o diâmetro interno do tubo de 0,090 e para a mesma granulometria estudada na Figura 6.

Figura 6 – Efeito da variação da altura do leito na fluidização (Incremento)



Fonte: Adaptado de Saintrain, 2012.

Figura 7 – Efeito da variação da altura do leito na fluidização (Decremento)

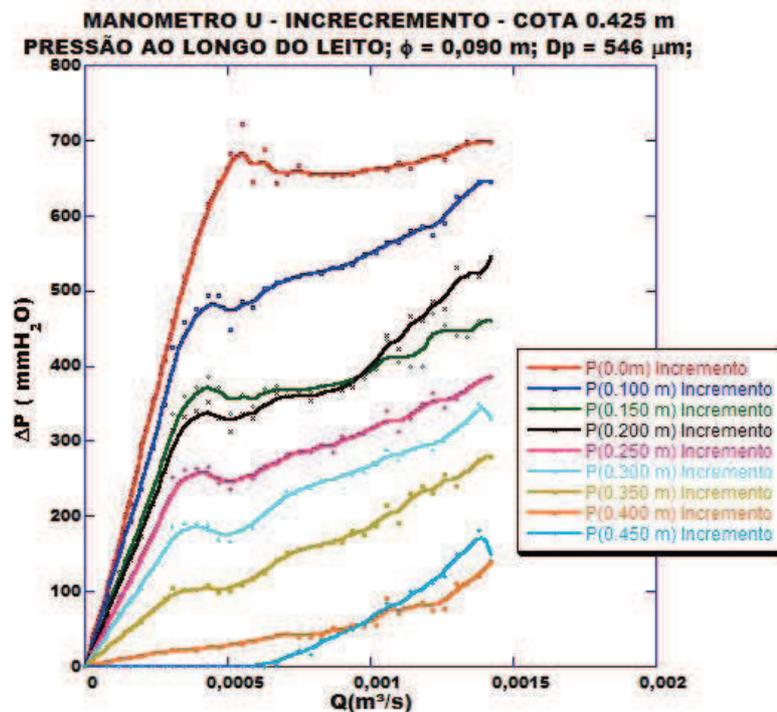


Fonte: Adaptado de Saintrain, 2012.

Tendo em vista a necessidade de observar a influência da variação da cota do leito durante o incremento e o decremento, como visto nas Figuras 6 e 7, elabora-se as Figuras 8 e 9 que mostram a queda de pressão ao longo do leito através dos valores de pressão coletados em diferentes pontos.

Os pontos de medição de leitura de pressão foram nas alturas: 0 m (na base ou tela) e os pontos laterais de 0,100 m a 0,500m aumentando de 0,050 m, isto é, cada ponto de pressão lateral está 0,050 m acima do anterior. Através desses pontos de medida de pressão na lateral do tubo, foi possível traçar o perfil da queda de pressão ao longo do leito, mapeando os valores de pressão desde a base até a superfície do leito. Com isso, pode-se observar que, após o ponto de mínima fluidização, as curvas aumentam de forma aproximadamente constante.

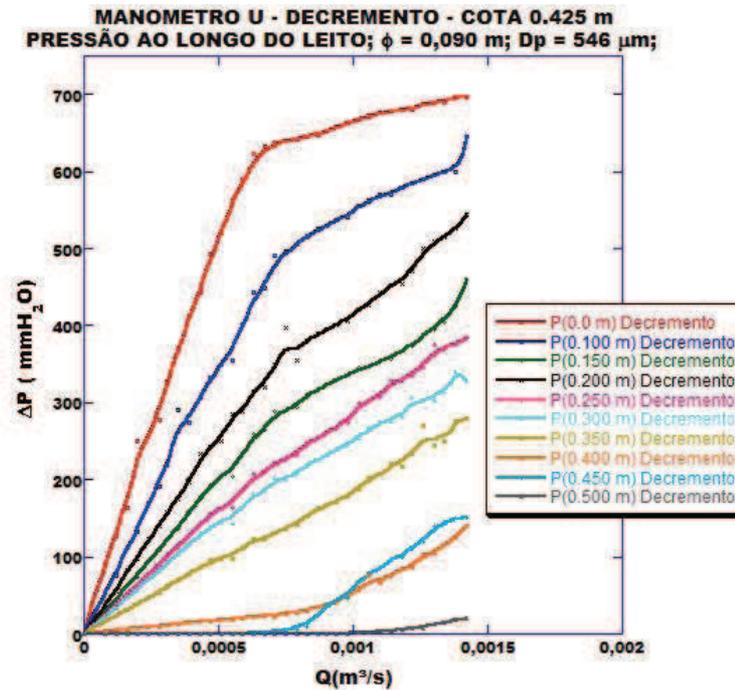
Figura 8 – Queda de pressão no leito durante a fluidização – Incremento



Fonte: Adaptado de Saintrain, 2012.

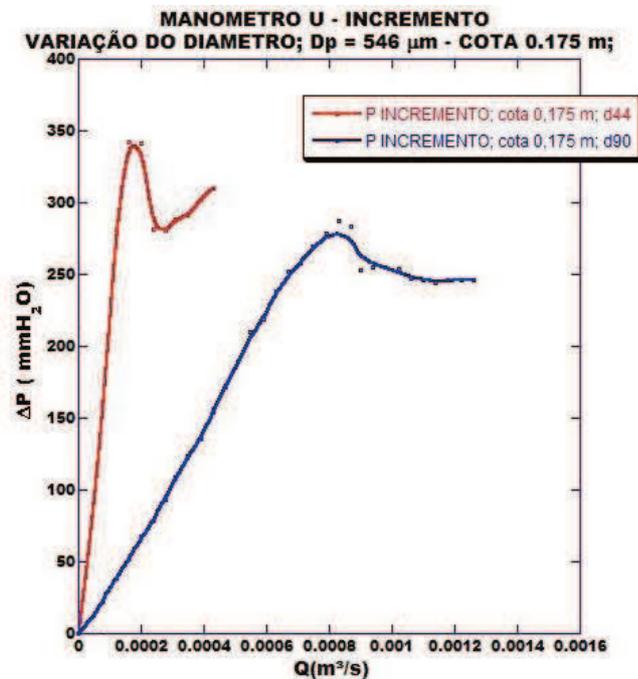
Também foram estudadas as influências nos tubos de 44 e 90 mm e, ao final, confrontados os dados obtidos pelos diâmetros. Ao fixar um valor de cota, estudou a influência da variação do diâmetro do tubo montando um gráfico, como mostrado na Figura 10.

Figura 9 – Queda de pressão no leito durante a fluidização – Decremento.



Fonte: Adaptado de Saintrain, 2012.

Figura 10 – Efeito da variação do diâmetro do leito na fluidização.



Fonte: Saintrain, 2012.

Os dois experimentos da Figura 10 foram realizados com areia de praia de diâmetro médio de partícula de 0,546 mm, para a cota de 175 mm. Mudou-se apenas o diâmetro entre os testes para compreensão de como a mudança de diâmetro altera os valores de pressão na base

do leito. Através da Figura 10, foi observado que diâmetros menores geram picos de pressão maiores.

No primeiro trecho retilíneo nas duas curvas, apresentam diferentes ângulos em relação ao eixo da vazão de ar que estão relacionados com o diâmetro do tubo de teste, que posteriormente, será o corpo do reator. Para confirmar estes valores, no capítulo 5 estão discutidos os testes com um tubo de 65 mm.

#### ***4.1.3 Instrumentos de medição e controle***

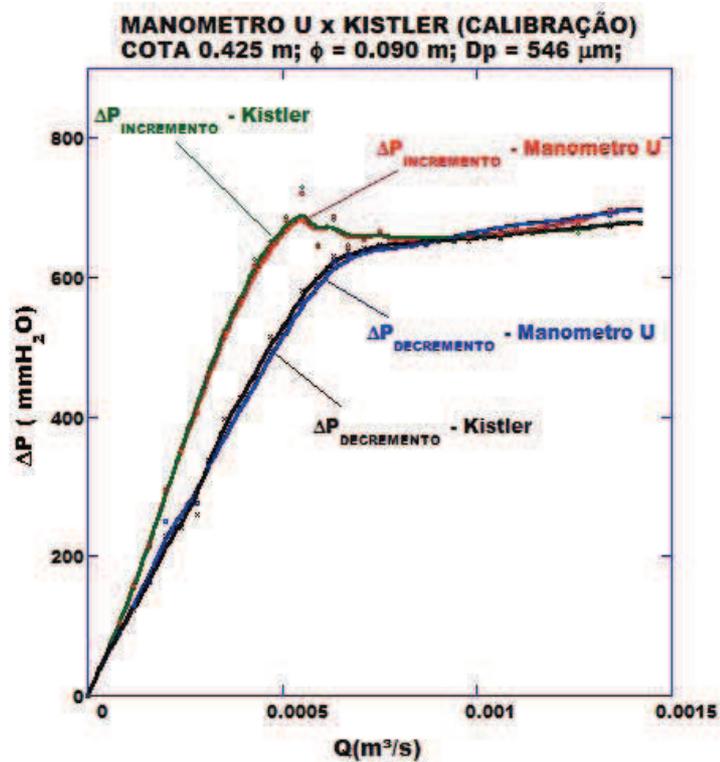
Com objetivo de interpretar adequadamente os fenômenos fluidodinâmicos estudados, a partir de dados e resultados dos experimentos realizados, foram utilizados instrumentos de medição e controle, escolhidos de acordo com a faixa de leitura, precisão e acurácia de medição. Neste sentido, foram aplicados ou desenvolvidos instrumentos específicos para realização de medições capazes de identificar valores/dados característicos que representam o processo. Como exemplo disso, é possível citar as medidas pressão e temperatura obtidas na lateral do leito poroso com instrumentos desenvolvidos no LACER, especialmente para este trabalho de pesquisa.

Esses instrumentos, voltados à medição das variações de pressão ao longo do leito, ofereceram a capacidade de identificar pequenas oscilações do escoamento, como também, efeitos de parede e influências do material constituinte do leito. Com base nos ensaios, pode ser observado que os valores de pressão são menores para tubos de menores diâmetros, portanto sendo suficiente para os estudos rotâmetros de vazão máxima igual a 50 ft<sup>3</sup>/h e que possuem leitura de 2 em 2 ft<sup>3</sup>/h. Também, foram usados termopares para medir altas temperaturas. Para os detalhes destes e outros instrumentos utilizados, vide Anexo C.

Para os sensores de pressão lateral e na base do leito, foram utilizados um sensor piezo-resistivo, do fabricante *Kistler*, e o manômetro em “U”, confeccionado no LACER. Esses sensores medem, na base do leito, a pressão exercida pela coluna de areia. Para este estudo, foi necessário obter os dados de pressão com a maior exatidão possível e o *Kistler* tem essa característica, devido às características físicas do instrumento. Entretanto não foi possível aplicar o sensor em todos os pontos, por causa de questões operacionais, para isso, foi introduzido o manômetro em “U” para medir outros pontos de pressão lateral (SAINTRAIN, 2012).

Para confirmar a viabilidade do manômetro em “U”, Saintrain (2012) calibrou o instrumento de controle de variação de pressão do leito (manômetro em “U”), através do uso do sensor piezo-resistivo (*Kistler*). Ele fica aplicado à base do leito em posições semelhantes no plenum, de forma a ter uma boa representatividade de leitura, o que permite a comparação entre os dados obtidos com os dois instrumentos, conforme mostra a Figura 11. Observa-se, por essa figura, que há razoável congruência entre os valores obtidos com o manômetro em “U” e os obtidos com o transdutor de pressão (*Kistler*), o que justifica o uso dos manômetros em “U” para medição de pressão lateral e na base do leito poroso, com certa confiabilidade.

Figura 11 – Comparação entre as medições do sensor e o manômetro de coluna de água.



Fonte: Saintrain, 2012.

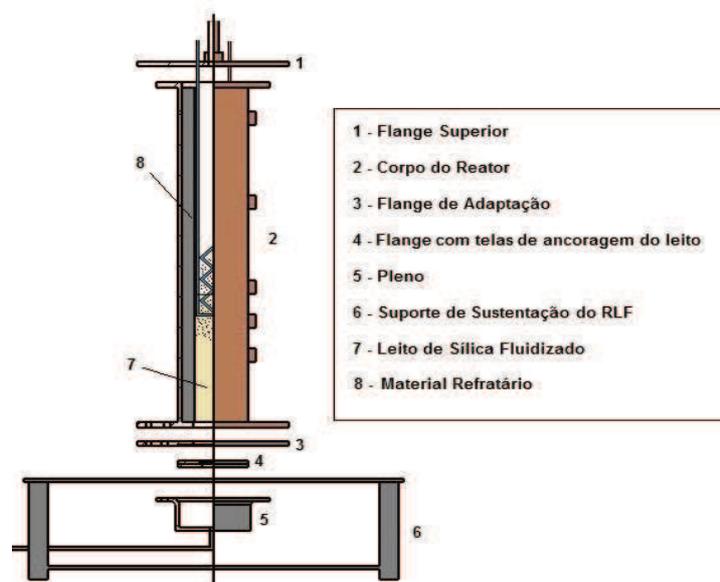
## 4.2 Desenvolvimento do reator de leito fluidizado

Após o estudo fluidodinâmico no tubo de acrílico de diâmetro interno de 0,065 m, foi planejada a realização dos mesmos experimentos com o reator projetado para ser utilizado nos testes de combustão. Através desse estudo, foi possível decidir qual a melhor cota trabalho a ser utilizada nos experimentos com combustão, com o objetivo de compreender a influência da rugosidade, uma vez que, as paredes internas do reator são de concreto refratário e, portanto, mais rugosas que a parede de acrílico.

### 4.2.1 Projeto do RLF

O processo construtivo do reator sofreu influência não só dos resultados obtidos com os testes fluidodinâmicos na bancada de pesquisa, mas também de outros projetos de reatores (LOPES, 2002). Assim, o reator foi construído a partir das partes fundamentais que compõem a grande maioria dos RLF, tais como: plenum, corpo do reator (leito e coluna livre) e dutos de escoamento dos produtos da combustão.

Figura 12 – Figura esquemática dos principais componentes do RLF em estudo

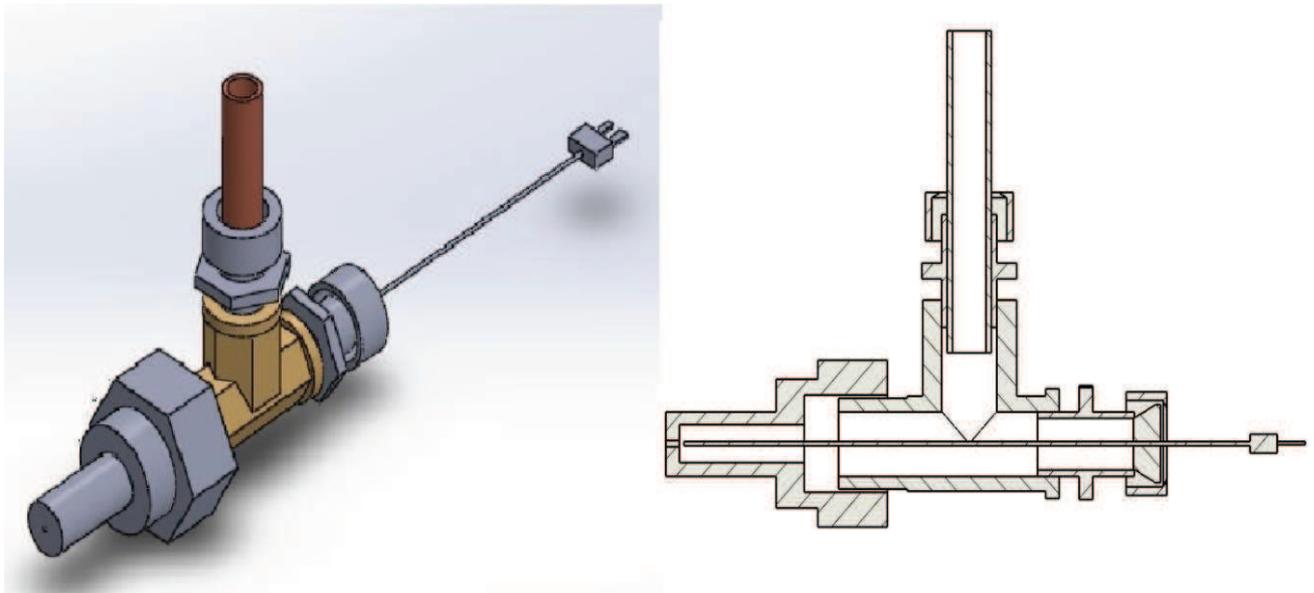


Fonte: Elaborado pelo autor

Tendo em vista as possíveis alterações de projeto, impostas pelos estudos e condições de testes, algumas peças foram desenvolvidas para fins específicos e outras peças foram adaptadas, passando por diversos processos de usinagem. Com isso, houve peças de funcionamento semelhantes, porém utilizadas de forma a estabilizar outras peças a ela conectadas. Para explicar esses casos, na Figura 12 é apresentado um desenho esquemático de corte parcial (longitudinal) para expor detalhes internos do reator. Um desses detalhes trata do revestimento interno que foi construído em contato com a carcaça do reator.

Com o objetivo de fixar o suporte da tela de sustentação do leite, foi necessário usinar o flange inferior do reator que estava unido com o refratário cerâmico, então, optou-se pelo desenvolvimento de um flange de adaptação para usiná-lo e realizar as fixações. No Apêndice A, está contido todo o detalhamento das peças que compõe o reator estudado, entretanto, para as conexões laterais foi desenvolvido um adaptador específico para realizar medições simultâneas de pressão e temperatura, como é visto na Figura 13. A conexão mostrada nessa figura, para enroscamento na lateral do reator, possui um furo na extremidade de menor diâmetro para impedir que muitos grãos de areia passem e ainda assim permitir, ao mesmo tempo, para que o ar escoe para o manômetro em “U” e que a ponta do termopar possa medir a temperatura com o auxílio de um termômetro digital. Essa peça foi fundamental para possibilitar medições simultâneas de pressão e temperatura.

Figura 13 – Desenho do adaptador para leitura de pressão e temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor.

Basicamente, essa conexão consiste em um adaptador, duas anilhas, um conector distribuidor em forma de “T”, um tubo de cobre e um termopar. Esse adaptador foi fabricado com partes em aço inox (para as peças em contato direto com a frente de chama) e outras em cobre e bronze para peças mais externas do reator. O tubo de cobre, utilizado para conectar os manômetros em “U”, foi cortado com dimensão suficiente para resfriar o ar, com o objetivo de não danificar os manômetros.

#### ***4.2.2 Montagem do RLF***

Com o intuito de realizar a montagem do sistema para obtenção dos dados referentes à CLF, decidiu-se iniciar pela parte inferior do reator estendendo ao resto do corpo do reator e, com isso, foram utilizadas as conexões existentes, os encaixes e averiguada a estanqueidade das mesmas. Os registros da montagem estão no Anexo A. Ainda para o RLF, foram feitas duas montagens: a primeira usando uma manta cerâmica, comumente usadas neste tipo de projeto, como isolamento térmico e outra usando uma pasta de silicone usada para fim automotivo resistente a temperaturas próximas a 320°C.

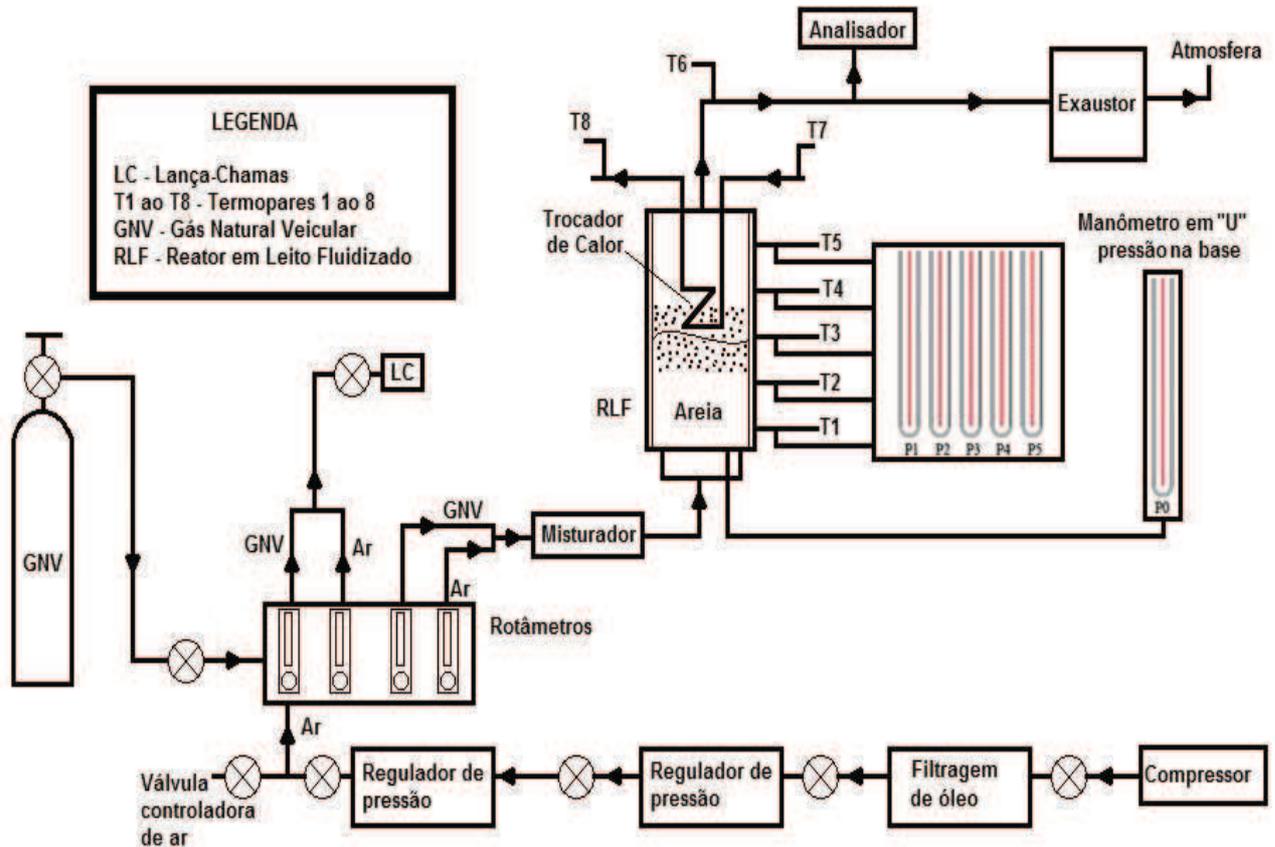
Na primeira montagem existiram alguns impedimentos (vide Apêndice B) que influenciaram nas medições, fato este que ao ser observado foi corrigido pelo processo de segunda montagem, obtendo assim valores realísticos. Com as correções obtidas no processo de segunda montagem no reator e com dados precisos nos processos de fluidização, foi iniciada a montagem do sistema de operação para o funcionamento do RLF ao introduzir a linha de GNV e ao verificar a estanqueidade da mesma. Algumas condições de testes forçaram uma remontagem de trechos do sistema, bem como o reator, principalmente após o início dos testes de combustão onde o calor é um fator relevante.

#### ***4.2.3 Operação do RLF***

No que se refere à pesquisa sobre CLF, poucos são os estudos que abordam o funcionamento, bem como o detalhamento do processo de startup do reator. Nos trabalhos de referência que abordam diretamente a CLF não são retratados detalhes de projeto, instalação e

operação. Este fato revela a necessidade do estudo de operação e a determinação objetiva de parâmetros que identifiquem o comportamento do LF com combustão. Com isso, o início do estudo de operação do RLF foi baseado em um fluxograma do sistema apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Fluxograma do sistema de operação do RLF



Fonte: Elaborado pelo autor.

As setas indicam o caminho percorrido pelo ar, combustível e a mistura ar/combustível, assim como os produtos gerados na combustão e a água. Ainda na Figura 16, existem três detalhes pertinentes para compreensão do funcionamento. O primeiro é o número excessivo de reguladores de pressão, fato este que se deu pelo compressor utilizado poluir com óleo a linha de ar, comprometendo a fluidização. O segundo trata da inclusão do lança-chamas para acelerar o processo de startup do reator. Um terceiro detalhe é o ar que sai do painel de rotômetros. O compressor no processo de início de enchimento, com um manômetro é perceptível o pulso de pressão, com isso, mantém um rotômetro aberto para evitar a religação do mesmo, apesar de ser economicamente inviável.

Entretanto, mesmo com todo o estudo realizado, muitos outros fatores influenciam diretamente na frente de chama de um RLF, dentre o mais importante, vale destacar a rugosidade, porosidade média, velocidade do gás e massa do leito. Mesmo com o domínio dos testes fluidodinâmicos, a pouca informação sobre CLF e a inclusão de diversos fatores fenomenológicos presentes no leito com combustão resultaram em absorção de muito tempo na pesquisa, mesmo considerando várias possibilidades de startup.

O processo de startup foi baseado em ligação com alimentação direta do reator e gás para formar energia e, também com a utilização do lança-chamas na parte superior do leito com a ideia de aquecer até a temperatura estipulada. Atingida essa temperatura, o reator foi mantido com ar e combustível sendo alimentado por baixo no leito, ou seja, no sentido ascendente do leito.

### **4.3 Análise teórica do processo**

Embora este trabalho tenha um cunho eminentemente experimental, foi realizada uma análise teórica com o objetivo de respaldar a interpretação dos fenômenos fluidodinâmicos. Neste sentido, foram adotados alguns modelos analíticos clássicos, a exemplo da equação de perda de carga de Geldart, normalmente aplicáveis a processos em leito fluidizado. Assim, a análise teórico-experimental do RLF consiste de duas partes: a fluidização das partículas de sílica sem combustão e o estudo termodinâmico do reator. Entretanto, deve ser ressaltado, que toda análise realizada no reator teve como base os estudos de parametrização na bancada de pesquisa.

Para a compreensão da fenomenologia da fluidização, foi necessário quantificar a pressão e velocidade mínima de fluidização e, a partir desses dados, foi possível determinar a faixa de operação do reator. Um detalhe importante quanto à operação do reator foi considerar, segundo Geldart (1973), o ponto de mínima fluidização como sendo o ponto posterior ao pico de pressão no gráfico “vazão *versus* pressão”.

Segundo o perfil característico de fluidização do leito (vide Figura 5), existe uma região aproximadamente retilínea chamada “curva darcyana” que corresponde à fase de expansão do leito. No final dessa fase, há um ponto crítico, onde as propriedades relativas à compactação do leito são alteradas e inicia-se, então, uma nova fase com a continuação de incrementos na vazão de ar atravessando o leito poroso, após isso fica caracterizado o regime borbulhante e, em

seguida, o regime de transporte, neste último caso ocorrendo em grande turbulência no leito poroso.

#### 4.3.1 Equações de Governo da Fluidização

As pesquisas sobre LF e sobre os fenômenos associados à combustão são reconhecidamente de grande interesse para a comunidade científica. Por essa razão, diversos valores teóricos têm sido determinados, com base nas equações clássicas, normalmente utilizadas para explicar o processo. Esses valores têm servido como diretrizes para fundamentar os testes experimentais. Exemplo disso é a perda de carga no leito fluidizado (em cm de coluna de água), a qual tem sido calculada segundo modelo de Geldart (1986), ou seja, através da seguinte equação:

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

Esta equação fornece valor de pressão aproximado ao valor de pressão de mínima fluidização encontrado experimentalmente, entretanto, esta equação não leva em consideração condições de porosidade média, viscosidade do leito, densidade do fluido usado, seja ele gás, ar ou uma mistura. Sendo assim, uma forma mais detalhada da pressão de mínima fluidização é apresentada por Hetsroni (1982), pela qual a perda de carga no leito, nas condições de mínima fluidização, pode ser determinada por:

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

Por outro lado, a porosidade nas condições de mínima fluidização é uma função da esfericidade da partícula do leito e, por isso, ela foi relacionada por Wen e Yu (1966) como segue:

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

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

Ainda segundo Wen e Yu (1966), para maioria dos sistemas,

$$0,40 < \varepsilon_{mf} < 0,55 \quad (4.5)$$

Para valores do número de Reynolds maiores que um a perda de carga do leito pode ser obtida pela equação classicamente usada para estudos em leito fluidizados, a equação de Ergun:

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

Para regimes Laminares ( $Re < 20$ ):

$$\frac{\Delta P_{mf}}{H_{mf}} = 150 \frac{(1-\varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\mu \cdot u_{mf}}{\phi^2 d_p^2} \quad (4.7)$$

E igualando com a equação 4.2 tem-se uma equação para velocidade de mínima fluidização para partículas de baixa granulometria.

$$u_{mf} = \frac{g(\rho_s - \rho_f) \varepsilon_{mf}^3 d_p^2 \phi^2}{150 \mu (1 - \varepsilon_{mf})} \quad (4.8)$$

Para partículas de maiores granulometrias e Número de Reynolds maiores que 1000:

$$u_{mf} = \sqrt{\frac{d_p \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot g \cdot \varepsilon_{mf}^3}{1,75 \cdot \rho_f}} \quad (4.9)$$

Igualando as equações 4.2 e 4.6 e realizando o rearranjo, tem-se:

$$150 \frac{(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi^2} \left( \frac{d_p \cdot \rho_f \cdot u_{mf}}{\mu} \right) + \frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3} \left( \frac{d_p \cdot \rho_f \cdot u_{mf}}{\mu} \right)^2 = \frac{d_p \cdot \rho_f \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot g}{\mu^2} \quad (4.10)$$

sendo,

$$Re_{mf} = \left( \frac{d_p \cdot \rho_f \cdot u_{mf}}{\mu} \right) \quad (4.11)$$

O número de Reynolds para mínima fluidização e,

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

O número de Arquimedes, e também.

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

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

Então, a equação 4.10, resume-se em,

$$C_1 Re_{mf} + C_2 (Re_{mf})^2 = Ar \quad (4.15)$$

Resolvendo a Equação 4.15, tem-se que:

$$Re_{mf} = \left( \left[ \frac{C_1}{2C_2} \right]^2 + \frac{1}{C_2} Ar \right)^{1/2} - \frac{C_1}{2C_2} \quad (4.16)$$

Se  $K_1 = \frac{C_1}{2C_2}$  e  $K_2 = \frac{1}{C_2}$ , a equação que pode estimar a velocidade de mínima fluidização com boa aproximação, quando não se dispõe do valor da porosidade, é,

$$Re_{mf} = (K_1^2 + K_2 Ar)^{1/2} - K_1 \quad (4.17)$$

Wen e Yu (1966), *apud* 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 ( $Re = 0,001$  a  $4000$ ). Em partículas de baixas granulometria, os autores supracitados obtiveram como valor das constantes  $C_1 = 33,7$  e  $C_2 = 0,0408$ . Em partículas de maior granulometria, Chitester (1984) recomenda os seguintes valores  $C_1 = 28,7$  e  $C_2 = 0,0494$ , (KUNII, 1991). Segundo Hetsroni (1982), os valores comumente aceitos para  $C_1$  e  $C_2$ , são  $27,2$  e  $0,0408$  respectivamente. A Tabela 1 apresenta valores de  $K_1$  e  $K_2$ , obtidos por diferentes pesquisadores.

Tabela 1 – Valores de K1 e K2 obtidos por diferentes pesquisadores.

Pesquisadores	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>
	$C_2/2C_1$	$1/C_1$
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.

Tendo por base todas as expressões acima citadas, encontram-se equações que determinam a mínima velocidade de fluidização, bem como a pressão de mínima fluidização. Entretanto, tais expressões foram usadas como base para aproximações das situações reais.

Para os tubos de acrílico com um baixo coeficiente de atrito na superfície interna do tubo, os valores de mínima fluidização se aproximam com clareza conforme gráficos plotados e apresentados no capítulo 5. Entretanto, ao adicionar rugosidade lateral o leito comporta-se como um tubo de diâmetro menor devido a camadas de areia que possuem um coeficiente de atrito menor que entre a areia e o refratário interno do reator.

#### ***4.3.2 Aspectos Termodinâmicos***

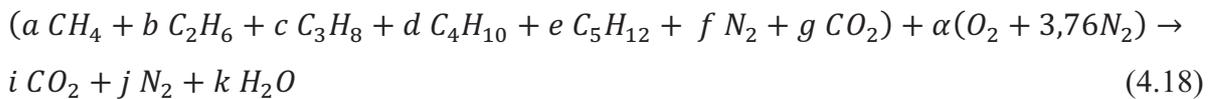
Para início dos testes com combustão, foi necessário realizar análises teóricas no sentido de obter máxima eficiência, ou seja, máxima extração de energia pelo trocador de calor inserido no meio poroso (leito fluidizado), a partir da liberação de calor da zona de reação. Para este estudo, foi necessário conhecer a composição do gás utilizado para a CLF que, neste caso, foi o gás natural veicular (GNV), cujo percentual dos hidrocarbonetos e moléculas não queimáveis estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição do gás natural veicular utilizado.

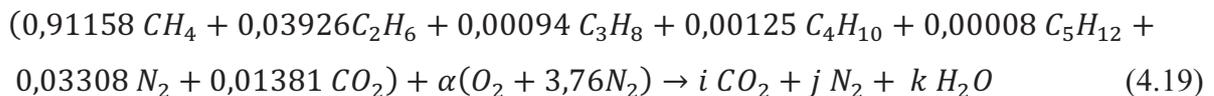
Gás natural veicular	Composição (%)
Metano [ $CH_4$ ]	91,158
Etano [ $C_2H_6$ ]	3,926
Propano [ $C_3H_8$ ]	0,094
Butano [ $C_4H_{10}$ ]	0,041
Isobutano [ $C_4H_{10}$ ]	0,084
Isopentano [ $C_5H_{12}$ ]	0,008
Dióxido de Carbono [ $CO_2$ ]	1,381
Nitrogênio [ $N_2$ ]	3,308

Fonte: Camelo, 2012.

Esses percentuais foram, então, usados como coeficientes de cada espécie, que compõe o gás natural utilizado, para reagir com ar, em que considerando a combustão completa, tem-se:



Com isso, é possível determinar a quantidade de energia disponível máxima liberada da zona de reação. Assim, balanceando a Equação 4.18 de acordo com as porcentagens dos componentes do gás natural e com a Tabela 2, tem-se:



Ao balancear a reação acima, são determinados os valores dos coeficientes dos produtos:

$$i = 1,01213 \quad (4.20)$$

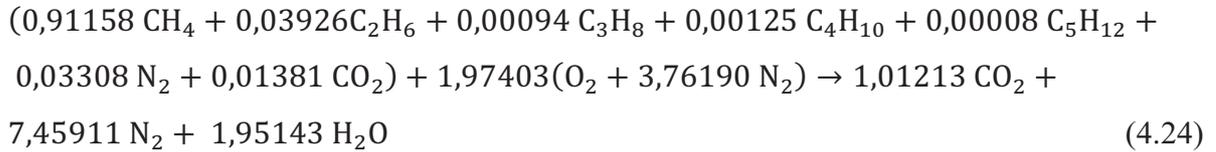
$$j = 7,45911 \quad (4.21)$$

$$k = 1,95143 \quad (4.22)$$

De posse desses valores, o valor do alfa foi determinado como sendo:

$$\alpha = 1,97403 \quad (4.23)$$

Então, a reação com seus coeficientes determinados apresenta a seguinte forma:



### 4.3.3 Eficiência da Caldeira

O termo “eficiência” quando aplicado à caldeiras/reactores refere-se, efetivamente, à extração de energia da zona de reação, através de trocadores de calor inseridos na câmara de combustão. A caldeira é apenas um dos elementos do ciclo termodinâmico Rankine, onde há produção de calor com a queima do combustível e transferência para o fluido de trabalho, que no caso é a água. Para contabilizar essa energia transferida para o fluido de trabalho, através do trocador de calor, aplica-se a Primeira Lei da Termodinâmica na sua forma geral, como mostra a Equação 4.25:

$$\dot{Q} + \dot{m}_e \left( h_e + \frac{v_e^2}{2} + g \cdot h_1 \right) = \frac{dU}{dt} \Big|_{Vc} + \dot{m}_s \left( h_s + \frac{v_s^2}{2} + g \cdot h_2 \right) + W \quad (4.25)$$

Entretanto, assumindo como hipóteses simplificadoras a operação em regime permanente e os efeitos de energia cinética e potencial como sendo desprezíveis, e logicamente eliminando da equação o termo trabalho, essa equação se resume a:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{extraído} = \dot{m}_{\text{água}} (h_s - h_e)_{\text{água}} \quad (4.26)$$

onde,

$\dot{Q}_{extraído}$  – Calor extraído da reação através dos trocadores de calor. [kW];

$\dot{m}_{\text{água}}$  – Vazão mássica de água que escoar nos trocadores de calor. [kg/s];

$(h_{e,s})_{\text{água}}$  – Entalpia de entrada ou saída da água nos trocadores de calor. [kJ/kg];

Por outro lado, para realizar uma análise termodinâmica considerando a superfície de controle envolvendo todo o corpo caldeira, devem ser contabilizados o calor gerado pela queima do combustível e as perdas gerais de energia, além daquela extraída da reação pelos trocadores de calor. Basicamente, essas perdas referem-se às que ocorrem por arraste nos gases de exaustão, endereçados à chaminé da caldeira, mais as perdas ocorridas através das paredes, envolvendo fenômenos de condução, radiação e convecção, em relação à vizinhança. Assim, a equação aplicável neste caso tem a seguinte forma:

$$\dot{Q}_{químico} = \dot{Q}_{extraído} + \dot{Q}_{convectivo} + \dot{Q}_{parede} \quad (4.27)$$

onde,

$\dot{Q}_{químico}$  – Energia liberada da reação, decorrente da queima do combustível. [kW];

$\dot{Q}_{parede}$  – Energia perdida pelas paredes por condução, convecção e radiação. [kW];

$\dot{Q}_{convectivo}$  – Energia perdida pelo arraste dos gases de exaustão para a chaminé. [kW];

A geração de calor dentro da caldeira, que aqui se convencionou chamá-la de “ $Q_{químico}$ ”, ocorre com a queima do combustível e pode ser determinada pela vazão mássica de combustível multiplicado pelo seu poder calorífico inferior (PCI), neste caso considerando que a temperatura é maior que a temperatura ambiente e a que a água sai em seu estado de vapor. Assim a geração de calor pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_{químico} = \dot{m}_{combustível} \cdot PCI_{combustível} \quad (4.28)$$

onde,

$\dot{Q}_{químico}$  – Energia liberada da reação, decorrente da queima do combustível. [kW];

$\dot{m}_{combustível}$  – Vazão mássica de combustível. [kg/s];

$PCI_{Combustível}$  – Poder calorífico inferior do combustível [kJ/kmol];

Porém, o PCI do combustível pode ser expresso pela soma dos produtos PCI de cada combustível por seu respectivo percentual, de acordo com a equação 4.29.

$$PCI_{Combustível} = a \cdot PCI_{CH_4} + b \cdot PCI_{C_2H_6} + c \cdot PCI_{C_3H_8} + d \cdot PCI_{C_4H_{10}} + e \cdot PCI_{C_5H_{12}} \quad (4.29)$$

Entretanto, a quantidade de calor gerada na queima do combustível dentro da caldeira calculada a partir da determinação da entalpia de combustão, também pode ser expressa pela seguinte equação.

$$\frac{\dot{Q}_{químico}}{\dot{n}_{combustível}} = \sum_P n_i \bar{h}_i - \sum_R n_i \bar{h}_i \quad (4.30)$$

onde,

$\dot{n}_{combustível}$  – Vazão molar do combustível. [kmol/s];

$n_i$  – Coeficiente das moléculas da reação.

$\bar{h}_i$  – Entalpia molar das moléculas da reação [kJ/kmol];

sendo que,

$$\bar{h}_i = \bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h} = \bar{h}_f^\circ + [\bar{h}(T, p) - \bar{h}(T_{ref}, p_{ref})] \quad (4.31)$$

onde,

$\bar{h}_f^\circ$  – Entalpia padrão de formação da molécula [kJ/kmol];

$\bar{h}(T_{ref}, p_{ref})$  – Entalpia de referênciapara a molécula [kJ/kmol];

$\bar{h}(T, p)$  – Entalpia da molécula em função da pressão e temperatura [kJ/kmol];

Assim, para calcular a entalpia da combustão, a partir diferença de entalpia absoluta entre produtos e reagentes, realiza-se o seguinte balanço de energia:

$$\begin{aligned} \bar{h}_{RP} = \sum_P n_i \bar{h}_i - \sum_R n_i \bar{h}_i = & \left[ i. (\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})_{CO_2} + j. (\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})_{N_2} + k. (\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})_{H_2O(g)} \right] - \left[ a. (\bar{h}_f^\circ + \right. \\ & \Delta\bar{h})_{CH_4} + b. (\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})_{C_2H_6} + c. (\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})_{C_3H_8} + d. (\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})_{C_4H_{10}} + e. (\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})_{C_5H_{12}} + f. (\bar{h}_f^\circ + \\ & \left. \Delta\bar{h})_{N_2} + g. (\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})_{CO_2} \right] \end{aligned} \quad (4.32)$$

Ao considerar que os reagentes e produtos saem à temperatura ambiente (27°C) os termos  $\Delta\bar{h}$  desaparecem, além da entalpia de formação da substância pura ser zero, logo o valor da entalpia de combustão em base molar por kmol de combustível ( $\bar{h}_{RP}$ ) é:

$$\bar{h}_{RP} = \left( i. \bar{h}_{f,CO_2}^\circ + k. \bar{h}_{f,H_2O(g)}^\circ \right) - \left( a. \bar{h}_{f,CH_4}^\circ + b. \bar{h}_{f,C_2H_6}^\circ + c. \bar{h}_{f,C_3H_8}^\circ + d. \bar{h}_{f,C_4H_{10}}^\circ + e. \bar{h}_{f,C_5H_{12}}^\circ + g. \bar{h}_{f,CO_2}^\circ \right) \quad (4.33)$$

No Anexo D está a tabela montada a partir dados obtidos de tabelas termodinâmicas comumente usadas (Moran e Shapiro, 2002). Com isso foi encontrado um valor para o PCI do gás com um erro de 0,06% em relação ao valor obtido pela somatória dos percentuais do PCI de cada componente do gás utilizado. Com o calor disponível por unidade de massa é possível determinar a eficiência de extração pela equação 4.34.

$$\eta_{extração} = \frac{\dot{Q}_{extração}}{\dot{Q}_{químico}} \quad (4.34)$$

Deve ser ressaltado que há teoricamente uma expectativa de maior eficiência do reator de leito fluidizado (RLF) pelo fato do leito de partículas de sílica funcionar com um meio poroso tem a vantagem de armazenar calor no seu interior. Com isso, deve ser favorecida a queima com misturas ultrapobres, como é normal em combustão em meios porosos. Basicamente, a combustão em leito fluidizado é semelhante à combustão em meios porosos, com a diferença que esse meio se movimenta. Entretanto, os testes experimentais têm a importância de quantificar isso e identificar a influência das propriedades desse meio poroso no processo.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.

### 5.1 Reestruturação da bancada de pesquisa

Para obtenção dos dados experimentais, a fim de traçar perfis de referências, decidiu-se corrigir erros existentes na bancada de pesquisa através de verificação de vazamentos, corrigir erros de paralaxe ao estabelecer um método de leitura de pressão lateral e na base, assim como, substituição de peças e conexões.

Além disso, deve ser ressaltado que, como metodologia de operação e teste do RLF, fora adotado, inicialmente, o critério de conhecer o comportamento do leito dentro do reator sem a interferência dos fenômenos termodinâmicos resultantes do processo de combustão. O objetivo desse procedimento foi averiguar, de forma análoga, os efeitos da parede refratária constituinte do reator sobre o escoamento dos gases e movimentação do leito em relação ao comportamento verificado nos tubos de acrílico da bancada de pesquisa. Considerando o tubo de acrílico como situação ideal, por seu coeficiente de atrito ser menor que o coeficiente do refratário que compõe a parte interna do reator.

Na fluidização do reator na condição “fria” (o leito à temperatura ambiente) foram verificadas oscilações na obtenção dos dados de pressão lateral e na base do leito. Essas oscilações geralmente ocorriam em decorrência do compressor ter um mecanismo automático de partida (acionamento) conforme a pressão do seu reservatório atingia um valor mínimo de regulagem. Atingido este valor, o motor do compressor eleva a pressão subitamente assim que ele é ligado.

Como correção, optou-se por construir um distribuidor de ar com válvulas do tipo agulha com conexão a um tubo contendo água para medição de pressão. Entretanto, foi sugerida outra solução, devido à faixa de pressão medida ser muito pequena em alguns pontos, além do fato do distribuidor gerar um amortecimento no valor final de pressão, que impunha a espera de um tempo maior para medir cada ponto.

Também, para a determinação de valores de pressão de ar mais precisos, houve a necessidade do amortecimento da onda de pressão na linha de suprimento para os instrumentos de controle de vazão (rotâmetros). Por isso, decidiu-se, resolver esta questão aplicando um “pulmão” (reservatório) de ar antes do rotâmetro, a fim de manter a pressão constante. Entretanto, para evitar a possibilidade de trabalhar com vaso de pressão, optou-

se por utilizar um dreno de ar controlado na linha de alimentação que chega ao rotâmetro principal, embora seja uma alternativa de laboratório economicamente inviável, do ponto de vista industrial.

Assegurar estanqueidade do sistema (reator, válvulas e redes) foi outro fator a ser trabalhado na pesquisa para garantir a estabilidade no processo de fluidização. Como exemplo disso: os pontos de medição pressão ao longo da carcaça do reator apresentavam vazamentos que comprometiam a leitura.

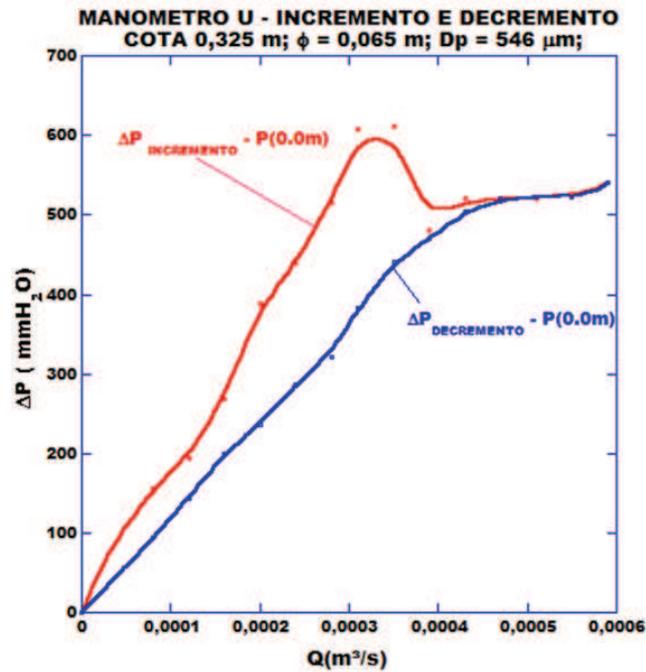
Para esses pontos, foram confeccionados adaptadores de um polímero de boa resistência mecânica e vedados com silicone. Entretanto, para garantir a estanqueidade durante o processo de combustão esses adaptadores, tiveram de ser fabricados em aço inox para suportar alta temperatura. Após as alterações e verificados todo o processo de montagem da bancada de pesquisa, foram iniciados os testes e comparados com a bibliografia de referência.

## **5.2 Ensaio na bancada de pesquisa.**

Os fenômenos fluidodinâmicos que ocorrem em um leito fluidizado, com e sem combustão foram estudados, a fim de obter a confirmação e melhor compreensão dos dados apresentados pelos autores de referência para aplicar esses valores ao reator durante a combustão. Esses dados foram obtidos através de uma bancada de testes, onde foi estudado um tubo de 65 mm de diâmetro e comparado a situações previstas por outros autores.

A Figura 15 mostra o perfil característico obtido pelo tubo de 65 mm que, por seu formato, se assemelha com a Figura 5. Ainda na Figura 15, pode ser visto as variações no regime do leito como a etapa de leito fixo, a faixa de mínima fluidização e a faixa de regime borbulhante.

Figura 15 – Perfil característico da fluidização gasosa da areia de sílica - incremento e decremento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme esperado, o teste no tubo de diâmetro 65 mm apresentou dados coerentes na pressão na base. Isso conclui que as etapas do processo de fluidização citadas no capítulo 4 desta dissertação foram confirmadas.

Sendo assim, foi possível, também confirmar valores de algumas expressões como a equação 4.1 que aborda a pressão no regime borbulhante, onde a massa ( $M_{areia}$ ) é função da densidade média da areia seca ( $\bar{\rho}_{areia} = 1,6 \text{ g/cm}^3$ ) e do volume ocupado, sendo igual a;

$$M_{areia} = \bar{\rho}_{areia} \cdot V_{areia} = \bar{\rho}_{areia} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot 0,25 \cdot H_{areia} \quad (5.1)$$

$$M_{areia} = 1,6 \cdot \pi \cdot (6,5)^2 \cdot 0,25 \cdot 32,5 \quad (5.2)$$

$$M_{areia} = 1725,51 \text{ g} \quad (5.3)$$

E, para a área de seção do tubo,

$$A_{tubo} = \pi \cdot D^2 \cdot 0,25 \quad (5.4)$$

$$A_{tubo} = 33,18 \text{ cm}^2 \quad (5.5)$$

Então, o valor teórico segundo Geldart (1986) para a queda de pressão vale;

$$\Delta P = \frac{0,1 \cdot g \cdot M_{\text{areia}}}{A_{\text{tubo}}} = \frac{1725,51}{33,18} \quad (5.6)$$

$$\Delta P = 52,00 \text{ gf/cm}^2 \quad (5.7)$$

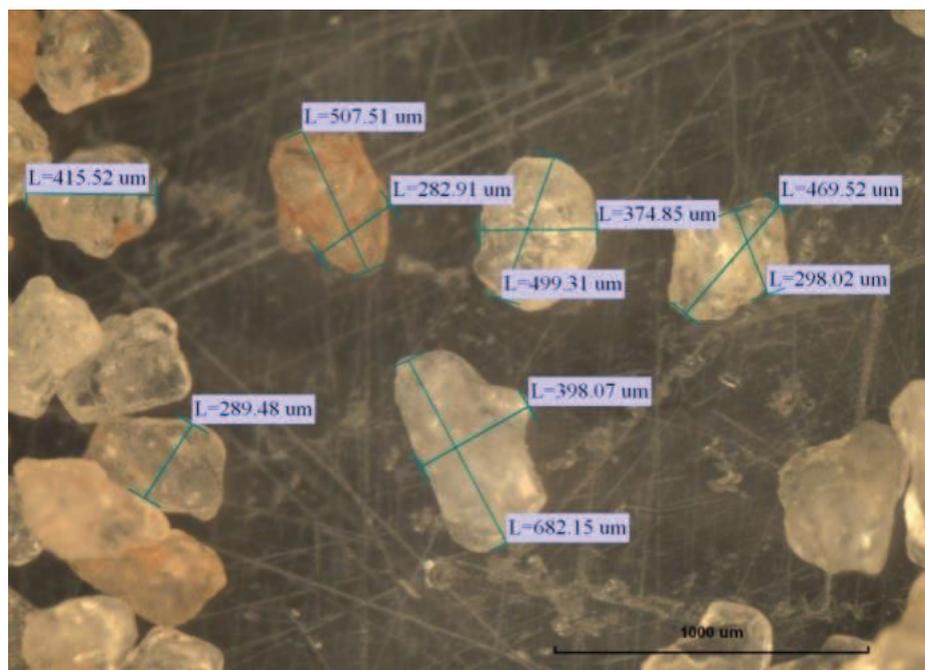
Assim, fazendo a conversão do valor de pressão, onde  $1,0 \text{ gf/cm}^2$  equivale a  $10 \text{ mmH}_2\text{O}$ ,

$$\Delta P = 520,04 \text{ mmH}_2\text{O} \quad (5.8)$$

Comparando ao valor obtido experimentalmente, observou-se que o valor encontrado foi de  $517,6 \text{ mmH}_2\text{O}$ , o que confere para essa situação um erro de  $0,4\%$ . Esse dado experimental foi conseguido a partir de uma média dos valores no regime borbulhante, ou seja, após o ponto de mínima fluidização.

Ainda com relação aos dados experimentais, foi necessário determinar alguns parâmetros como a esfericidade média das partículas, densidade do fluido entre outros. A esfericidade da partícula foi obtida a partir de uma média retirada de dados mostrados na Figura 16.

Figura 16 – Microscopia 45-50 MESH – Ampliado 45x.



Fonte: Saintrain (2012)

A Figura 16 foi obtida por uma análise granulométrica realizada no Laboratório de Paleontologia do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (SAINTRAIN, 2012).

Tendo em vista que os grãos, mostrados na Figura 16, tem um formato aproximado a uma esfera, foi possível determinar valor médio da esfericidade, segundo classificação de German (1994), e também, de acordo com a Equação 4.4,

$$\phi_s = \frac{\pi \cdot D_{teorico}^2}{\pi \cdot D_{real}^2} = \frac{D_{teorico}^2}{D_{real}^2} \quad (5.9)$$

Onde,  $D_{real}$  é o diâmetro de 0,321 mm, com base no que foi obtido experimentalmente, mostrado na Figura 16. Assim, com a média dos diâmetros de cada partícula, foi obtido que,

$$\overline{\phi_s} = 0,621 \quad (5.10)$$

Aplicando esse valor na Equação 4.3, tem-se que,

$$\varepsilon_{mf} \approx (14 \cdot 0,621)^{-1/3} \quad (5.11)$$

$$\varepsilon_{mf} \approx 0,486 \quad (5.12)$$

Esse valor está na faixa prevista por Wen e Yu (1966) para a maioria dos sistemas fluidodinâmicos (vide Equação 4.5). Com isso, foi possível determinar os valores de  $C_1$  e  $C_2$ .

$$C_1 = 150 \frac{(1-0,486)}{0,486^3 \cdot 0,621^2} = 1741,65 \quad (5.13)$$

$$C_2 = \frac{1,75}{0,486^3 \cdot 0,621} = 24,54 \quad (5.14)$$

E, através destes, foi possível determinar também os valores de  $K_1$  e  $K_2$  e compará-los com os valores da Tabela 1.

$$K_1 = \frac{C_1}{2C_2} = 35,44 \quad (5.15)$$

$$K_2 = \frac{1}{C_2} = 0,0407 \quad (5.16)$$

Ao relacionar os valores com os obtidos comumente aceitos, segundo Hetsroni (1982), é encontrado um erro de 30,3% para  $C_1$  e 0,2% para  $C_2$ .

Tabela 3 – Valores de  $K_1$  e  $K_2$ .

Pesquisadores	$K_1$	$K_2$
Wen e Yu (1966)	33,7	0,0408
Richardson (1971)	25,7	0,0365
Saxena e Vogel (1977)	25,3	0,0571
Babuet <i>al.</i> (1978)	25,3	0,0651
Grace (1982)	27,2	0,0408
Chitesteret <i>al.</i> (1984)	28,7	0,0494
Moreira (2014)	35,4	0,0407

Fonte: Adaptado de Kunii, 1991.

Ainda de posse destes valores, foi possível determinar o valor do número de Reynolds e Arquimedes. Logo, de acordo com a Equação 4.11 e 4.12, tem-se que,

$$Ar = \frac{0,000546 \cdot 1,161 \cdot (1,6 - 1,161) \cdot 9,81}{(18,346 \cdot 10^{-6})^2} = 4428,61 \quad (5.17)$$

$$Re_{mf} = \frac{0,000546 \cdot 1,161 \cdot 0,1154}{18,346 \cdot 10^{-6}} = 3,987 \quad (5.18)$$

Para estes cálculos, o valor utilizado para a velocidade de mínima fluidização foi obtido experimentalmente, baseado na Figura 15. Com isso,  $Re_{mf}$  é menor que 20, então, o valor teórico da velocidade de mínima fluidização foi encontrado a partir da equação 4.8,

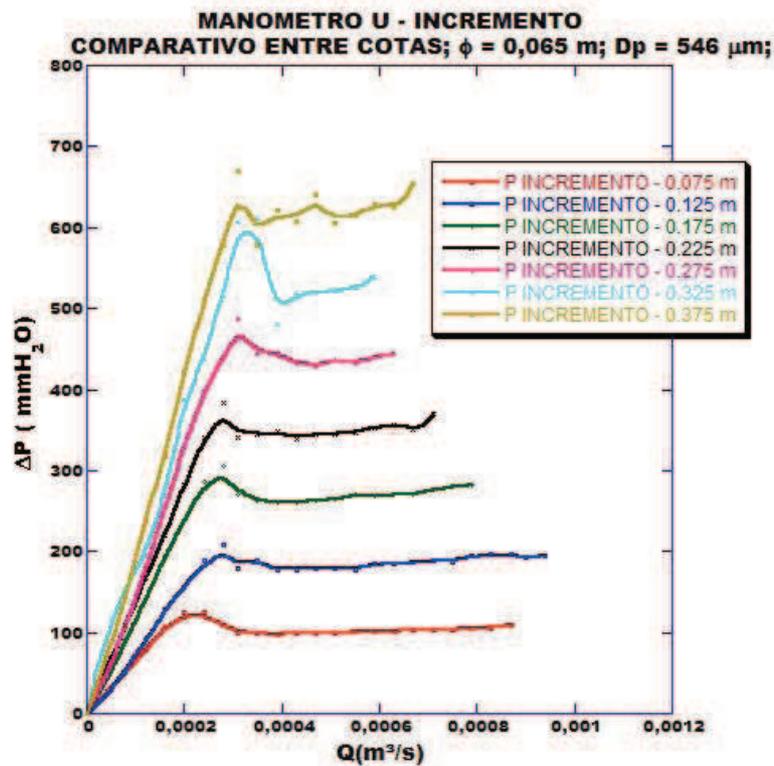
$$u_{mf} = \frac{9,81(1,6 - 1,161)0,486^3 0,000546^2 0,621^2}{150 \cdot 18,346 \cdot 10^{-6} (1 - 0,486)} = 4,0286 \cdot 10^{-5} \text{m/s} \quad (5.19)$$

Um valor muito pequeno em relação ao valor experimental encontrado, que foi o valor de 0,1145 m/s. Entretanto, a equação 4.8 não considera fatores que influenciam diretamente o escoamento, como a rugosidade da superfície interna e quantidade de massa que compõe o leito.

Portanto, por existirem fatores que dificultam o escoamento do fluido, há uma tendência que a velocidade seja maior que a velocidade teórica e diretamente proporcional à cota utilizada. Assim, para os estudos fluidodinâmicos sem combustão, ainda deve ser inserido, nas equações de referência, alguns parâmetros de testes, que alteram significativamente os dados de operação.

Ainda nestes ensaios foram geradas curvas de avaliação de comportamento da variação da cota do leito em função da vazão de ar, a fim de comparar as Figuras 6 e 7 com as Figuras 17 e 18.

Figura 17 – Efeito da variação da altura do leito na fluidização (Incremento)

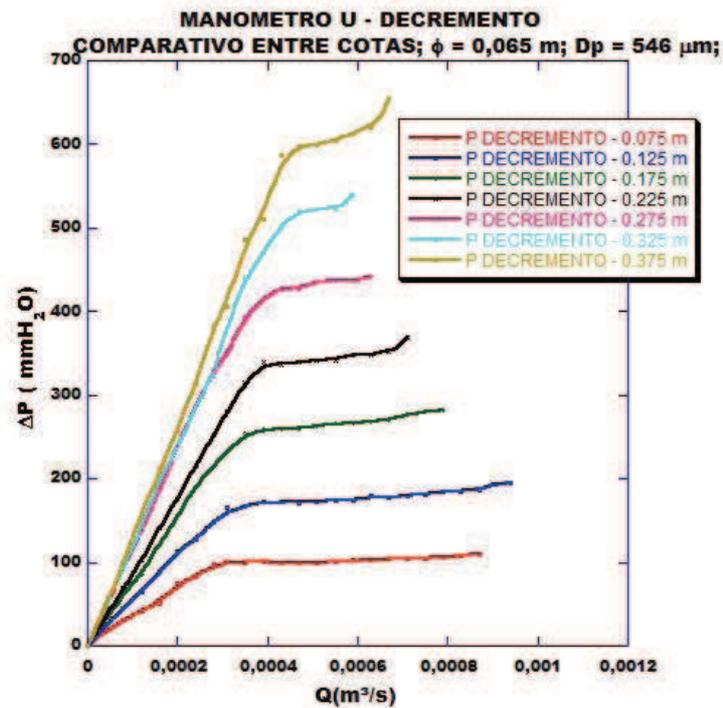


Fonte: Elaborado pelo autor.

Através das Figuras 17 e 18, é possível verificar a influência da variação da cota inicial do leito fixo na fluidização, com isso a dificuldade em determinar os regimes fluidodinâmicos operando em maiores cotas. Com base nisso, as regiões de maiores faixas de vazão são as mais indicadas para ser utilizadas no reator, por terem melhores condições de controle de vazão.

A faixa borbulhante (de pressão constante) em cada gráfico é reduzida à medida que é aumentado o valor da cota de estudo, isso influencia diretamente na combustão alterando o valor do excesso de ar (EA) gerando inconsistência na frente de chama.

Figura 18 – Efeito da variação da altura do leito na fluidização – decremento.

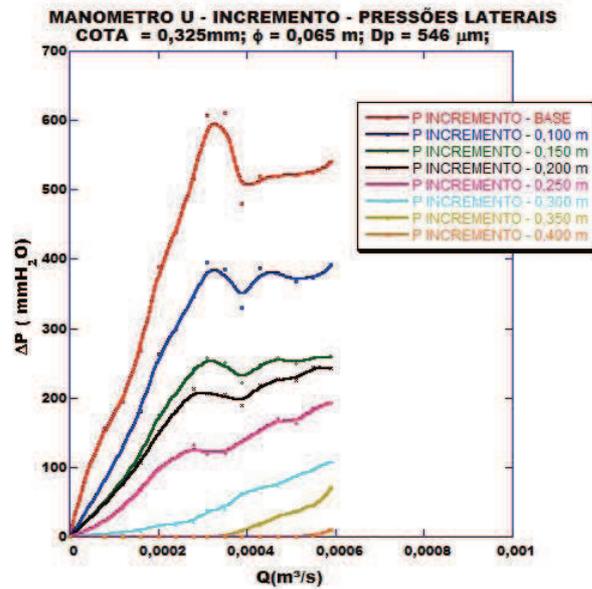


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os testes fluidodinâmicos de cotas onde ocorrem menores faixas de vazões, as diferenças entre os regimes são praticamente imperceptíveis com rotômetros de baixa sensibilidade, sendo, portanto, não aplicáveis ao reator.

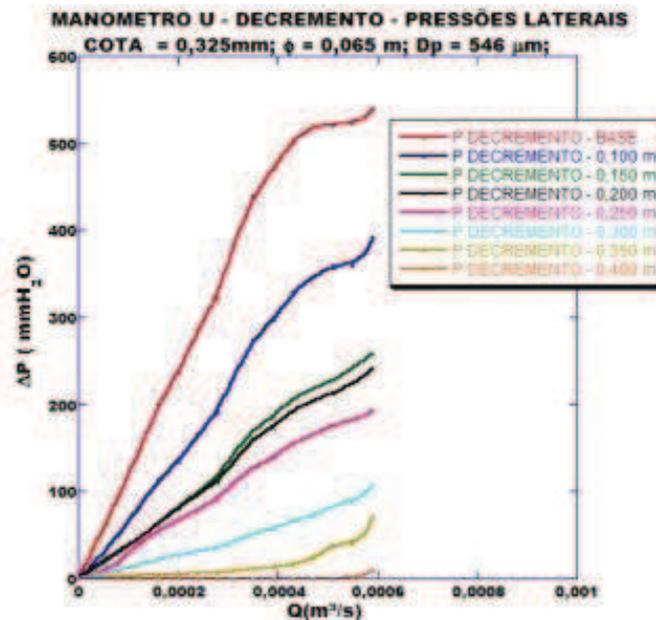
Outra influência comparada e confirmada, através dos testes fluidodinâmicos realizados, foi a pressão lateral no tubo. Nas Figuras 19 e 20, os perfis de curva são semelhantes ao perfil padrão, com diferenças em pontos mais elevados, que marcam pressão devido aos bolsões de ar que lançam areia para cima no regime de formações de pistões.

Figura 19 – Queda de pressão lateral no leito durante a fluidização – incremento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 – Queda de pressão lateral no leito durante a fluidização – decréscimo.

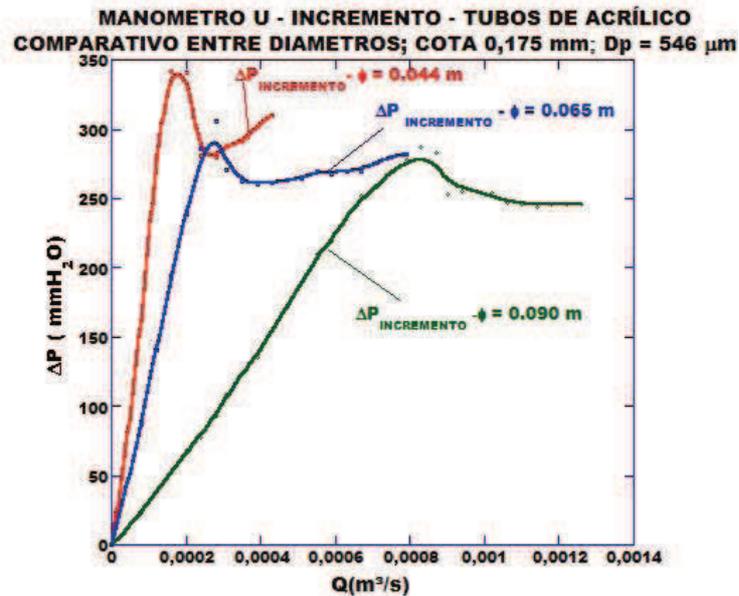


Fonte: Elaborado pelo autor.

Após todos os testes realizados com o tubo de 0,065 m, observando a influência da mudança de vários parâmetros, foi possível plotar um gráfico comparativo com o diâmetro estudado de 0,065 m e os diâmetros estudados por Saintrain (2012), os quais foram os tubos de 44 e 90 milímetros de diâmetro.

Este perfil é mostrado na Figura 21 e nela é possível observar a influência da variação do diâmetro interno do tubo na fluidização da areia de praia.

Figura 21 – Efeito da variação do diâmetro do leito na fluidização.



Os três experimentos foram realizados com areia de sílica de diâmetro médio de partícula de 0,546 mm, para a cota de coluna de 175 mm, em que foram aplicados diferentes diâmetros a fim de caracterizar a influência do efeito de parede sobre os valores de pressão, medidos na base do leito. Então, através desta Figura 21, verifica-se que com a redução do diâmetro do tubo há a tendência de aumento da variação de pressão em relação à variação da vazão do fluido, o que poderia ser conceituado com “taxa de fluidização”.

Pode-se concluir que o comportamento do leito no tubo de 65 mm foi condizente com o previsto pela literatura de referência e esses dados obtidos, juntos com os outros obtidos por Saintrain (2012), geraram parâmetros para o desenvolvimento do RLF.

### 5.3 Estudos para determinação dos parâmetros de projeto do RLF

No sentido de determinar os parâmetros de projeto e operação do RLF, optou-se por realizar ensaios sem combustão em tubo com diâmetro e revestimento interno especificados para projeto do reator, em complemento aos testes em bancada. Com base nas

observações realizadas quanto à variação da “taxa de fluidização”, foi especificado um diâmetro de projeto para desenvolvimento do reator, considerando os efeitos de rugosidade da superfície das paredes (refratário cerâmico), em relação ao tubo liso (acrílico). O objetivo foi, então, identificar uma forma de compensação das características da superfície das paredes do reator, no que diz respeito aos fenômenos fluidodinâmicos no reator.

### ***5.3.1 Análise dos dados obtidos com os ensaios aplicados ao RLF***

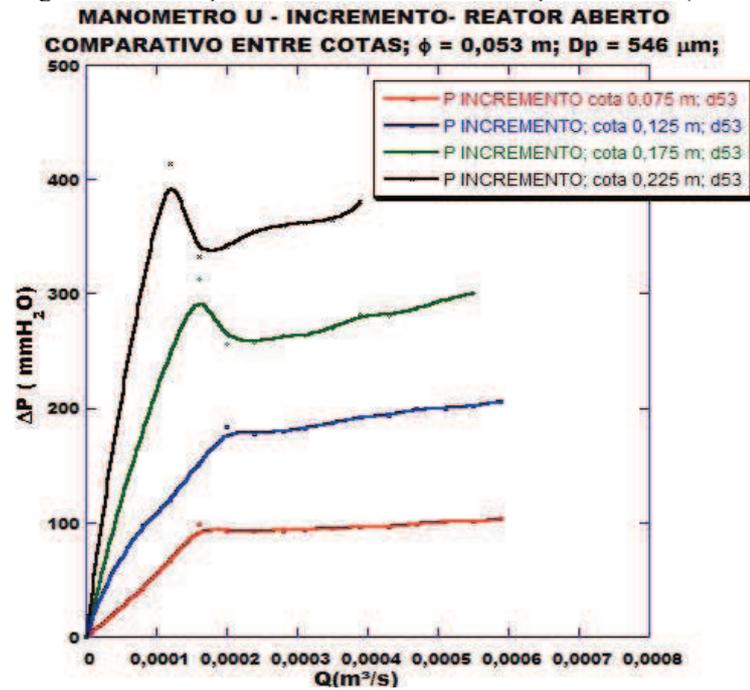
Para investigação dos efeitos de parede sobre os fenômenos fluidodinâmicos em uma situação real, foram realizados testes no tubo fabricado para ser um componente do RLF. Inicialmente, foram realizados testes sem combustão a fim de comparar os dados com os dados obtidos na bancada e averiguar os novos parâmetros presentes no leito. Assim, ficou caracterizado que realmente um dos parâmetros importantes para projeto e operação do RLF é a rugosidade da superfície das paredes da câmara de combustão, que têm contato direto com o leito.

Entretanto, foi necessário compreender o perfil da variação de pressão com relação à quantidade de areia introduzida no leito, conforme obtido com os tubos de acrílico. Assim, os testes obedeceram ao padrão outrora citado, aumentando de 0,050 m a partir de a 0,075 m (cota de base). Logo, para início dos testes, colocou-se uma massa de areia até preencher a cota de 0,075 m de areia no reator com diâmetro interno rugoso de aproximadamente 0,053 m. Repetiu-se o teste para as cotas de 0,125 m, até 0,225 m.

As Figuras 22 e 23 mostram o perfil de pressão na base (ponto de leitura de pressão na altura “0” m, localizado na tela de sustentação do leito), para a fluidização gasosa da areia dentro do reator, tanto na condição de operação realizando os incrementos como na de decrementos.

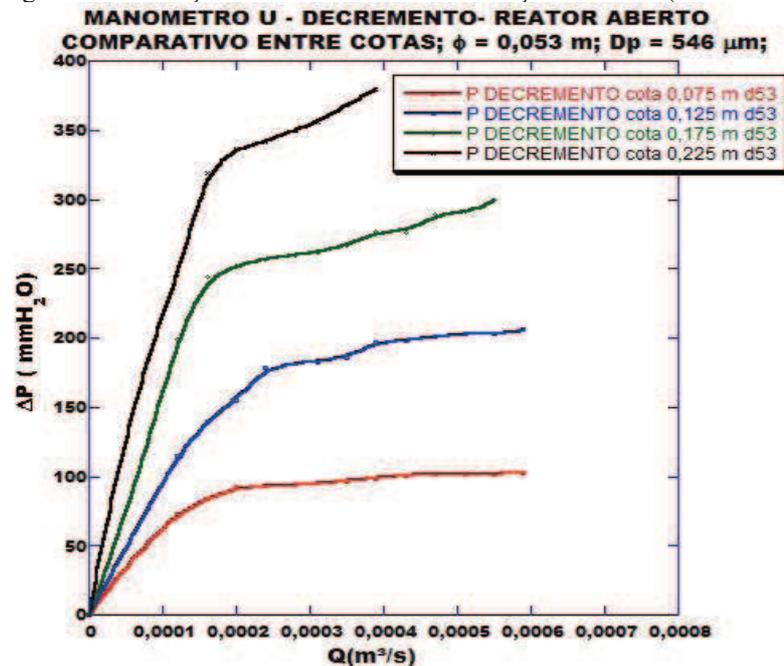
No teste de fluidização do leito no tubo do reator, a coluna foi preenchida com partículas de sílica até a cota de 0,225 m. Neste caso, ressalta-se o fato de que a região de regime borbulhante é muito estreito, então ao adicionar um incremento de vazão o regime de transporte fica rapidamente caracterizado, quando ocorre a formação de pistões de sílica. Portanto, pela elevada instabilidade nessa condição de operação, optou-se evitar esse regime.

Figura 22 – Variação da cota do leito na fluidização no reator (incremento).



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 23 – Variação da cota do leito na fluidização no reator (decremento)

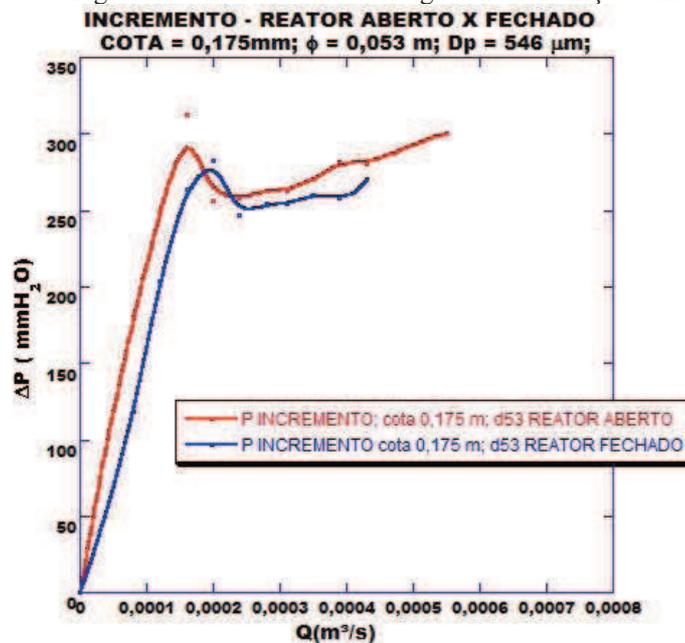


Fonte: Elaborado pelo autor.

Com isso, decidiu-se usar a cota de trabalho igual a 175 mm, por apresentar maior cota com valores mais estáveis. Entretanto, para o funcionamento do reator, o mesmo foi conectado a um exaustor que gera uma depressão acima da superfície do leito, que influencia nas medições de pressão na base do leito, conforme a Figura 24. Assim, visando

aproximar os testes de fluidização com o regime de funcionamento do reator, realizou-se outro teste com o exaustor de gases de combustão ligado e com o reator fechado.

Figura 24 – Efeito do exaustor ligado na fluidização – incremento

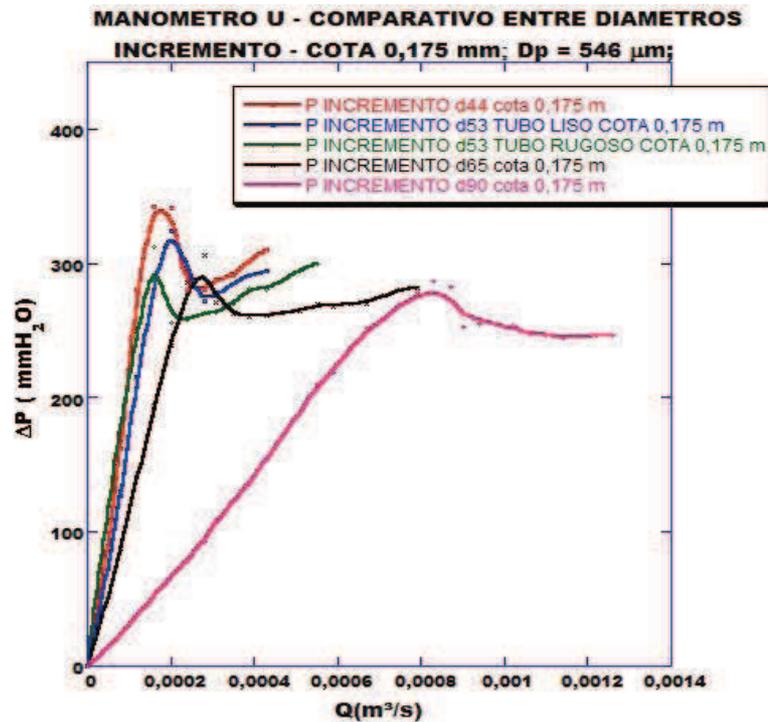


A Figura 24 mostra o gráfico do perfil de pressão medida na base para esta situação, neste gráfico existe um leve decréscimo dos valores de pressão para a situação com o reator fechado e exaustor ligado. Esta leve queda na pressão deve-se ao fato do exaustor puxar o ar dentro do reator, causando uma pressão negativa que diminuiu as colunas de água no manômetro “U”.

A influência do exaustor é, então, reduzir a pressão no ponto de mínima fluidização, bem como a pressão de operação do reator, o que pode variar a frente de chama alterando as propriedades da queima. Os pontos no regime borbulhante aparentam mais dispersos, entretanto mais estáveis e a pressão apresenta-se mais constante.

Observando a Figura 25, verifica-se que a maior taxa de fluidização, representada pela maior variação de pressão no leito com o escoamento, está relacionada com a rugosidade da superfície interna do reator, além do uso do exaustor. Através dessa figura, é possível observar que o perfil de distribuição de pressão ao longo do leito reproduz, com certa fidelidade, o processo de fluidização do leito e permite a comparação com os dados obtidos com tubos de acrílico, em relação aos diâmetros estudados (0,044 m, 0,065 m e 0,090 m).

Figura 25 – Perfil de pressão para todos os diâmetros – incremento.

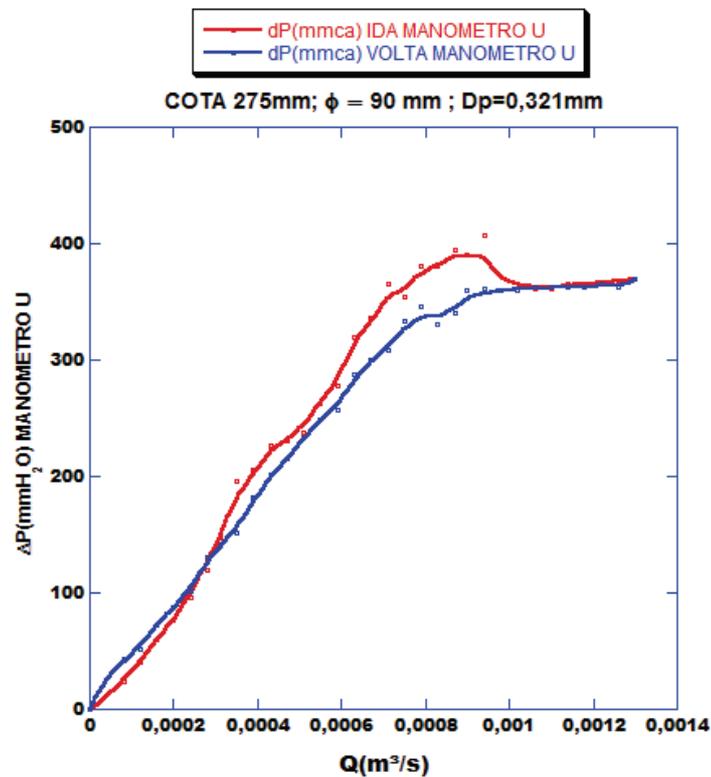


Fonte: Elaborado pelo autor.

Estes perfis de distribuição, apresentados na Figura 25, mostram que o tubo do reator (com revestimento interno de material refratário) apresenta uma taxa de fluidização (trecho do perfil retilíneo com inclinação) aproximada à que foi obtida ao tubo liso de acrílico de 0,044 m. A hipótese sobre o fenômeno observado, em questão, baseia-se em escoamentos viscosos que possuem camadas que geram tensões de cisalhamento umas sobre as outras próximas à superfície das paredes internas do tubo. No caso, a camada de areia mais externa em contato com a rugosidade da superfície gera uma força de atrito que impede o deslizamento, o que fica menos acentuado nos testes com tubos de acrílico.

A Figura 26 mostra separadamente a curva representante dos testes com tubo do reator e a curva obtida com os teste no tubo de acrílico (0,044m) .A partir da análise comparativa destes perfis apresentados nesta figura, concluiu-se que os dados e inferências relativas aos testes com o tubo de menor diâmetro, podem plenamente ser utilizadas para prever alguns fenômenos fluidodinâmicos, como instabilidade, formação de grande bolhas, tendência ao empistonamento (cilindros de areia), dentre outros.

Figura 26 – Comparativo entre o tubo de 53 e 44 mm para a cota de 175 mm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 26 confirma esta hipótese, tendo como base a inclinação da curva e o regime borbulhante que, graficamente, são curvas aparentemente paralelas. Existem diferenças quanto ao ponto de máxima pressão, mas as condições pelas quais foram atribuídas para a realização do teste no tubo de 0,044 m, a exemplo da forma com que o leito foi compactado antes do início dos testes, o que eleva naturalmente o pico de pressão.

### 5.3.2 Determinação das especificações de projeto.

Em acordo com os testes experimentais, os parâmetros de projeto construtivo do reator foram atribuídos de forma a correlacioná-los com os fenômenos fluidodinâmicos. Assim, para o funcionamento do RLF foi atribuído uma cota de operação igual a 175 mm, baseado em nas Figuras 21 e 22. Em primeiro lugar, a cota da coluna de areia deve apresentar grande quantidade de areia, pois ao reduzir a quantidade de areia é reduzido,

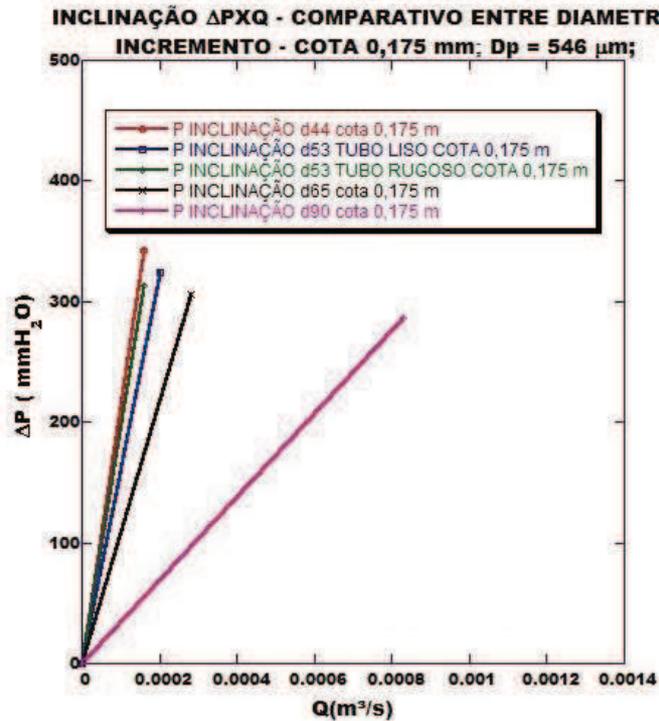
também, o ponto de mínima fluidização, complicando a leitura nos rotâmetros e manômetros em “U”.

Em segundo lugar, deve ser apresentada uma faixa maior para controle a fim de estabilizar os rotâmetros em vazões ideais para estudos específicos. Entretanto, as dimensões básicas do reator, como espessuras e algumas cotas de projeto, foram determinadas com a finalidade de manter segurança nos testes e, além disso, obter o menor custo de fabricação possível, devido aos recursos para a construção do reator. Deve ser ressaltado que esse reator tem a vantagem de ter um meio poroso inerte, que pode ser encontrado com facilidade na natureza e, dependendo da quantidade, sem custo. (fato este que facilitou o uso, em cada teste com combustão, de um meio não reaquecido).

Então, a concepção de projeto do RLF teve como premissa estabelecer dimensões para construção do reator que gerassem facilidade de montagem e desmontagem e permitissem modificações estruturais, principalmente por ser um reator, que utiliza tecnologia recente justificando algumas alterações e atualizações. Como exemplo disso, pode ser citado o fato de que para os estudos experimentais sobre a fluidodinâmica em bancada utilizando o tubo de acrílico de 0,092 m, cada teste gasta em torno de duas horas para ser concluído, ao passo que com um diâmetro menor, a facilidade em trocar a areia e reconectar as conexões o tempo reduz a metade. Além do que, o peso total do reator, incluído toda a carcaça, flanges, conexões metálicas e acessórios, fica significativamente minimizado com a redução do diâmetro, o que reduz riscos de acidentes na manipulação com montagens e desmontagem, com implicações nos custos finais de fabricação e operação.

Neste contexto, a minimização dos riscos de acidente torna-se um fator de grande importância, visto que alguns testes do reator com combustão, em que a superfície do leito está livre à pressão atmosférica (com o reator aberto), ocorrendo, em alguns momentos, jorros de areia (aquecida) para fora do reator, considerando que as temperaturas chegam a atingir valores superiores a 1.500 K. Por outro lado, a especificação do diâmetro do RLF com o valor menor que corresponde ao tubo de 0,044 m, teoricamente é uma condição desfavorável em termos de projeto do reator, em que os efeitos de parede são mais pronunciados. Objetivamente, um dos fatores que influenciou a decisão por optar por um diâmetro menor é que todos os problemas operacionais deverão ser minorados com o aumento dessa dimensão. Logo, como se deseja definir parâmetros de projeto, essa condição favorece a determinação de especificações mais realísticas, em termos da construção de um reator que vise uma melhor relação custo/benefício.

Figura 27 – Comparativo da inclinação entre os diâmetros para 0,175 m.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 27 tem o objetivo de demonstrar que os efeitos de parede na taxa de fluidização têm semelhança de valores, baseado na porção retilínea do perfil de distribuição de pressão que corresponde a fase em que o leito está sendo expandido até atingir o ponto de fluidização. Nesta figura, estão apresentados os perfis parcialmente, ou seja, apenas a secção com inclinação, em que demonstra que o perfil referente ao tubo (com revestimento de material refratário) do RLF com diâmetro 0,053 apresenta um ângulo de inclinação muito semelhante ao tubo de acrílico de 0,044 m.

#### 5.4 “Startup” da RLF

Para a ignição da mistura ar-combustível no interior do RLF, aplicou-se uma vela de ignição (automotiva) na câmara de combustão, instalada no flange superior que fecha o reator. Porém, necessitava-se de um bom isolamento que o flange superior não permitia, por não haver espaço suficiente para isso. Neste flange há um furo para exaustão, dois furos para conexão NPT 1/4 de polegada para o trocador de calor e, ainda, um furo para encaixe da vela automotiva. Mesmo assim, manteve-se a vela reforçando o isolamento e iniciado o reator com uma proporção de gás condizente com a vazão de ar, para entender como se daria a partida.

O reator iniciou, mas depois de um tempo, não havia alteração significativa no valor da temperatura no leito, mas no topo do flange superior a temperatura estava em 360°C. Isso levou a crer que a distância do ponto de ignição a superfície do leito era elevada e o trocador de calor que estava entre essas posições não permitia a descida da frente de chama em direção ao leito. Em algumas dessas tentativas acumulava um pouco de gás no tubo sanfonado da exaustão, ocorrendo um rompimento, impossibilitando o prosseguimento dos testes.

Logo após esse incidente e com uma conversa com representante da empresa ENGETÉRMICA (empresa de manutenção de caldeiras, sediada no Ceará, que tem apoiado essa pesquisa), observou-se que uma possibilidade era levar a ignição à superfície do leito através de um terminal metálico revestido com cerâmica, para ser um polo elétrico e a carcaça com o adaptador de medição de pressão e temperatura, para ser o outro polo.

Depois de montado esse sistema, foi notado que a centelha estava funcionando corretamente, no ponto de 400 mm acima da base do leito e 225 mm acima da superfície do leito, bem mais próximo e em um ponto localizado abaixo do trocador de calor.

A fim de conhecer como o reator iria iniciar o funcionamento, foi introduzido uma quantidade de ar, bem como nos testes, variando sua vazão de zero até o valor de mínima fluidização, ou seja, 26 ft<sup>3</sup>/h para o reator em estudo com 53 mm de diâmetro. Após isso, a partir de uma relação obtida em outros trabalhos com meio porosos, foi colocado gás natural veicular com uma proporção de 5% em relação ao ar de entrada. Obteve-se a Tabela 4.

Tabela 4 – Com 5% de combustível em relação ao ar.

Vazão de Ar(ft <sup>3</sup> /h)	Vazão de GNV (ft <sup>3</sup> /h)	Resultado observado
26	1,3	Necessário centelhar diversas vezes.
28	1,4	Necessário centelhar diversas vezes.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 4, foi observada a necessidade de variar essa proporção para encontrar um valor mais adequado. Para isso foi fixado o valor de 26 ft<sup>3</sup>/h (vazão de mínima fluidização para o reator aberto) e aumentado o valor da vazão de gás.

Tabela 5 – Vazão de ar igual a 26 ft<sup>3</sup>/h.

GNV (ft <sup>3</sup> /h)	Resultado observado
1,4	Necessita centelhar várias vezes e há inconstância na chama

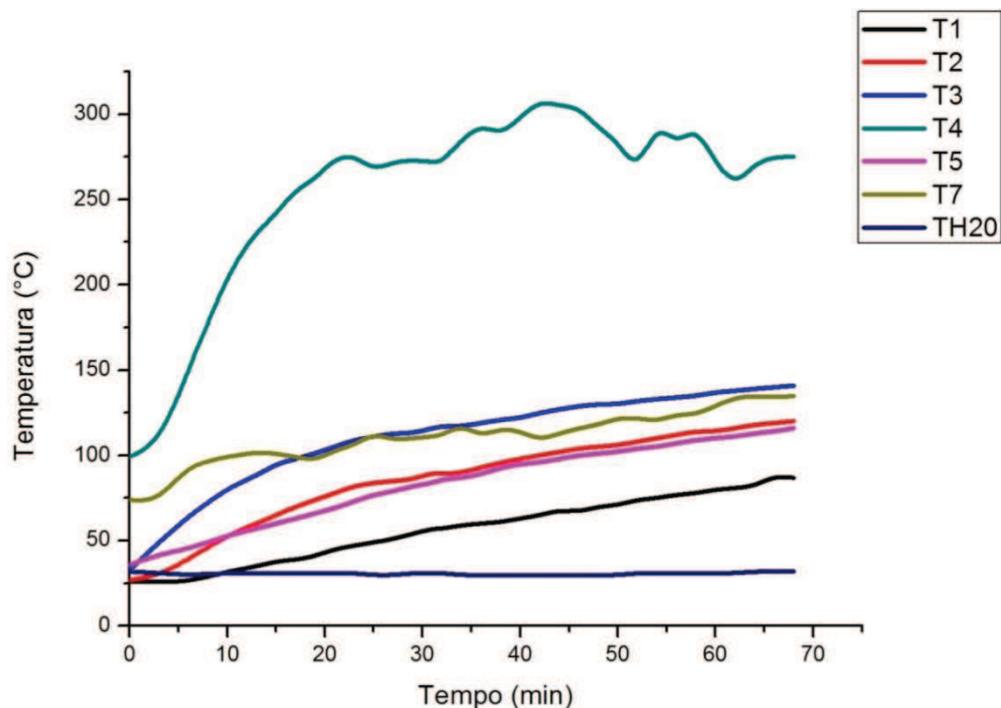
1,6	Necessita centelhar várias vezes e há inconstância na chama
1,7	Maiores tempos entre as centelhas e estabilidade na chama.
1,8	Maiores tempos entre as centelhas e estabilidade na chama.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da Tabela 5, o reator foi resfriado, trocado a areia (ou seja, peneirado uma quantia de 570 g de areia e recolocado no reator) e reiniciado os testes no dia seguinte com a vazão de 26 ft<sup>3</sup>/h e uma vazão de gás de 1,7 ft<sup>3</sup>/h. Refeito os testes, a temperatura no leito foi mantida e a chama permaneceu ativa durante 31 minutos, quando apagou devido a alguma variação na vazão de ar. Foi centelhado mais uma vez e permaneceu mais 37 minutos ativa, quando novamente apagou. Neste momento prosseguiu o teste com uma relação diferente, isto é, ar com 24 ft<sup>3</sup>/h e GNV 1,6 ft<sup>3</sup>/h.

A Figura 28 mostra o comportamento da temperatura durante todo o tempo de 68 minutos.

Figura 28 – Temperatura nos pontos laterais em função do tempo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 28, T1 é a temperatura mais próxima da tela de sustentação do leito, T2 a uma posição de 100 mm acima da tela de sustentação, T3 a 150 mm, T4 a 200 mm

(acima do leito cuja cota é 175 mm), T5 está a 400 mm, T7 é a temperatura dos produtos e TH2O é a temperatura da água de saída do trocador de calor.

Durante este experimento, observou-se que a temperatura T4 ao atingir a faixa que vai de 250°C a 300°C, iniciou um processo de ganho e perda de energia. Esse gráfico sugere, tendo em vista o crescimento nos outros pontos dentro do leito (T1, T2 e T3), que o calor absorvido pelo ponto T4 era menor que a quantidade de calor transferida aos pontos mais abaixo, adicionada pelo resfriamento do ar de entrada e perdas nas paredes do reator.

Adicionando a esses fatores, existe também o fato de que a areia é um bom reservatório térmico, mas tem baixa difusividade térmica ( $\alpha$ ). Fato este confirmado ao perceber que no mesmo leito de areia, a temperatura varia drasticamente, principalmente a altas temperaturas. Concluiu-se, portanto, que o leito de areia deveria ser pré-aquecida até uma temperatura que possibilitasse a manutenção da chama sem apagamentos.

Então, foi introduzida no leito uma resistência a fim de elevar a temperatura para frente de chama encontrar ambiente favorável para manter-se estável. Com o intuito de simular tal situação, apenas para teste, foi introduzida em um leito de partículas fora do reator uma resistência, depois de aquecido, colocou-se gás e ar em pequenas proporções.

Durante o processo de ignição com o reator a temperatura ambiente, a centelha elétrica foi trocada por ignição espontânea em alta temperatura, conforme testes realizados vistos em fotos no Anexo E. Entretanto, os termopares que medem a temperatura ao longo do leito estão localizados em pontos próximos a superfície interna do reator dificultando a medição da temperatura no centro. Mesmo assim, o reator foi aquecido com uma resistência elétrica de 1,6 m de comprimento, com a parte espiralizada imersa no leito de areia.

O flange inferior, composto por uma manta de fibra cerâmica, recebeu uma grande quantidade de calor gerando um odor desagradável, sendo necessário ser levada ao lado de fora do bloco onde se situa o laboratório para dispersão natural do odor, a temperatura no leito no ponto mais aquecido estava a 388 °C. A temperatura decresceu cerca 20° em 11 minutos, para levar o reator para fora e decresceu cerca 20° em outros 11 minutos para retornar ao laboratório. Dentro do laboratório, tornou-se a aquecer o reator até a temperatura de 1214°C na superfície interna. Neste momento supõe-se que no centro a temperatura fosse superior a 1300°C.

Foi aberta a chave de ar do compressor e fornecida uma vazão de ar até 26 ft<sup>3</sup>/h, em busca da fluidização do leito e assim introduzir o gás. Mas a pressão na base do leito marcava valores relativamente elevados para a vazão e, mesmo assim, o leito não fluidizava, enquanto a vazão era 30 ft<sup>3</sup>/h, a pressão em mmH<sub>2</sub>O, marcava 300 mmca.

Isso levou à hipótese da dilatação da areia, reduzindo a porosidade média e aumentando o grau de compactação da areia. Entretanto, devido às variações de temperatura no reator, vazamentos foram observados e a pressão vista no manômetro ficava comprometida. Esse vazamento estava no flange inferior, através do plenum.

Depois de realizado o conserto dos vazamentos no flange, conforme anteriormente citado, foi sugerido a possibilidade de aquecer a superfície do leito durante a fluidização para garantir a queima, ao menos na parte superior e à medida que a areia absorver o calor, introduzir um tubo de quartzo em uma profundidade do leito, como um lança-chamas aquecendo o interior do reator. Com isso, foram atingidos valores mais significativos e o que garantiu alguns dados precisos de comportamento fluidodinâmico e a temperatura.

Para essa tentativa de procedimento de “*startup*”, foi introduzida a resistência a uma profundidade de 50 mm, para facilitar a remoção até uma dada temperatura. Na lateral há um termopar (T4) localizado em um ponto acima do leito, 200 mm, e esse foi usado como referência.

Até T4 atingir cerca de 200 °C, a resistência transfere aproximadamente 4°C por minuto, então a taxa de transferência de calor reduz até atingir 1,5°C por minuto. Neste momento a temperatura aproxima-se a 400 °C. É importante observar que a medição da temperatura é feita na superfície interna do reator, e é esperado que no centro a temperatura estivesse com valor 20% maior.

Então, foi introduzido o lança-chamas que eleva a taxa para 15°C por minuto, entretanto, com o rápido aquecimento a taxa também reduz bruscamente e ao atingir 900°C, em T4, a taxa reduz para 7°C por minuto.

Ao atingir a temperatura de 1100°C, o leito foi submetido a uma vazão de ar pelo plenum até atingir o estado de fluidização, com isso o leito resfriou um pouco, mas tornou a aquecer. O gás, então, foi misturado com ar, mantendo uma proporção de 10%, buscando a autonomia da frente de chama no leito. Entretanto, a areia, possui uma difusividade térmica muito baixa e isso gera um gradiente de temperatura observado nos testes dificultando o “*startup*”.

Tabela 6 – Gradiente de temperatura no leito durante ensaio.

Temperatura	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5
T4	100°C	200°C	300°C	520°C	705°C

T3	53°C	119°C	170°C	278°C	392°C
T2	50°C	119°C	136°C	195°C	273°C

Fonte: Elaborado pelo autor

O lança-chamas foi usado nas medições 3, 4 e 5, observadas na Tabela 5. O termopar T4 varia 605°C posicionada sobre o leito na cota de 200 mm, enquanto T2 varia 233°C em posicionada em uma cota de 100 mm, ou seja, em uma variação de altura de 100 mm, há uma variação de temperatura de 372°C.

### 5.5 Influência da temperatura na fluidodinâmica

No setor de pesquisa em combustão em leito fluidizado, a influência da temperatura nas condições de “*startup*” e em regime permanente ainda precisa de detalhamento. As pesquisas científicas não abordam com clareza estas influências. Entretanto, a temperatura tem importância relevante para os estados de fluidização do leito, conseqüentemente, alterando a relação ar/combustível durante a chama.

Nos testes foram observados que para baixas vazões (um pouco menores que a fluidização para a temperatura de 27 °C) já ocorriam fenômenos inesperados como a alteração do regime do leito a vazão constante.

A Tabela 7 foi elaborada por Pilawska *et al* (2001) com valores de velocidades mínimas de fluidização em função da temperatura.

Tabela 7 – Dados experimentais de combustão com a variação na granulometria da partícula.

Temp./ °C	Temp./K	Size sand mm	$U_{mf}$ m/s	$(U/U_{mf})$	$D_{crit}$ mm	$\tau_{ig}/s$
730	1003	0.25–0.355	0.032	9.1	1.2	32
730	1003	0.50–0.60	0.13	2.2	20	32
830	1103	0.25–0.355	0.030	10.6	1.1	3.0
830	1103	0.50–0.60	0.12	2.7	17	3.0
930	1203	0.25–0.355	0.028	12.3	0.94	0.5
930	1203	0.50–0.60	0.10	3.4	12	0.5

Fonte: Pilawska *et al* (2001).

A Tabela 7 expõe valores expressivos quanto ao comportamento da areia com a temperatura. É observado, também, um decréscimo na velocidade de mínima fluidização com o aumento da temperatura.

Durante os testes de combustão, o reator foi testado sem o flange superior para analisar o comportamento do leito. Depois de aquecido, ou seja, a superfície do leito em temperaturas próximas a 1000°C, os valores de fluidização ocorre em momentos distintos, com o leito frio (em temperatura ambiente), a velocidade mínima de fluidização é 26 ft<sup>3</sup>/h em altas temperaturas esse valor decrescia em mais de 50% da  $U_{mf}$ .

Esse fenômeno foi observado na tentativa de fluidizar o leito para que o ar aumentasse a porosidade para difundir a temperatura no próprio leito. Mas, a vazão de ar de entrada, no que se refere a velocidade mínima de fluidização, reduziu bastante, com isso o reator foi resfriado e um estudo sobre a temperatura foi iniciado.

Após observar nos testes e confirmado por Pilawska *et al* (2001) que a variação da velocidade de mínima fluidização varia com a temperatura, o reator foi resfriado e aquecido gradativamente.

Alguns fatores foram pré-determinados no início dos testes:

- O aquecimento foi feito com resistência até a temperatura de 400°C, após isso, foi introduzido o lança-chamas.
- O termopar de referência foi o T4, localizado a 200 mm da base do leito.
- Todos os testes foram feito com leito expandido, ou seja, o leito foi fluidizado em temperatura ambiente, depois foi fechado o rotâmetro, e reaberto, dessa vez, realizando medições.
- Para os outros pontos de temperatura, o leito já estava fluidizado então, bastava realizar as medições.
- Durante a fluidização, o ar entra gradativamente suspendendo e resfriando o leito, por esse motivo, a resistência e o lança-chamas durante as medições permaneciam fechados.

Após iniciados os testes, foram levantados os dados de pressão na base. A primeira medida foi realizada em condições de temperatura ambiente, a segunda com temperatura de 60°C, a terceira com 100°C, a quarta e a quinta com 200 e 300°C, respectivamente. Entretanto, como havia um resfriamento devido o ar de entrada que estava à temperatura ambiente, os intervalos entre os testes aumentava conforme aumentava a temperatura. Então a próxima leitura de temperatura foi de 520°C, sexta medição, e 705°C, a sétima. Assim foi montada a Tabela 8, com valores de pressão na base do leito poroso.

Tabela 8 – Valores de incremento obtidos para as temperaturas.

Pressão manométrica na base (mmH<sub>2</sub>O)

Q(ft <sup>3</sup> /h)	26°C	60°C	100°C	200°C	300°C	520°C	705°C
0	0	0	0	0	0	0	0
4	40	49	58	77	76	79	93
6	65	67	93	110	110	116	127
8	85	87	131	145	146	160	174
10	108	112	152	177	166	185	197
12	130	137	170	197	192	209	227
14	154	163	188	219	213	227	242
16	174	178	205	234	233	240	244
18	190	203	222	253	245	244	244
20	209	223	237	245	247	244	245
22	232	244	252	245	244	243	247
24	256	243	244	244	243	246	253
26	247	245	244	248	249	254	259
28	248	245	245	255	248	261	265
30	248	248	254	257	254	-	-
32	252	251	257	257	257	-	-
34	250	253	-	-	-	-	-
36	253	255	-	-	-	-	-
38	254	252	-	-	-	-	-
40	257	258	-	-	-	-	-

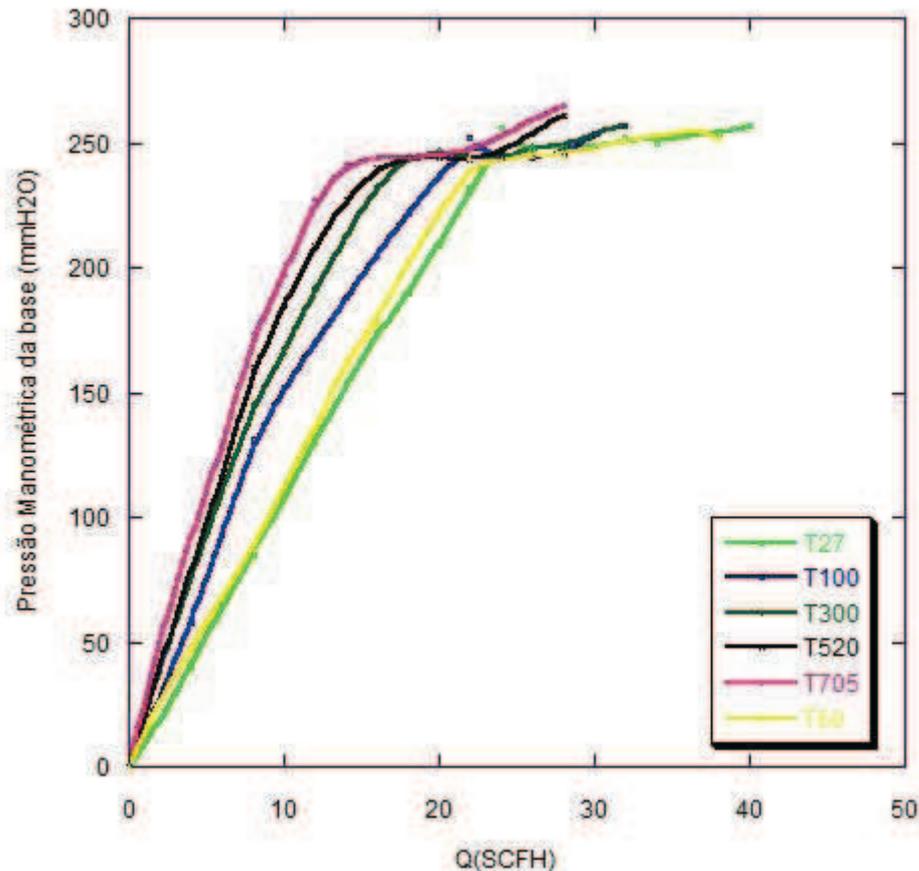
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela Tabela 8, para temperatura de 26 até 200°C a pressão atinge valores de aproximadamente 260 mmH<sub>2</sub>O em vazões que vão decrescendo, forçando uma redução na velocidade mínima de fluidização.

Outros pontos não foram considerados, pois, no momento da medição, entravam na faixa de imprecisão do rotâmetro e com isso, não foi obtida a estabilidade para a aquisição de dados.

Da Tabela 6, foram plotados gráficos para análise do perfil fluidodinâmico, e comparar com detalhes com os outros perfis já traçados.

Figura 29 – Valores de incremento obtidos para as temperaturas.

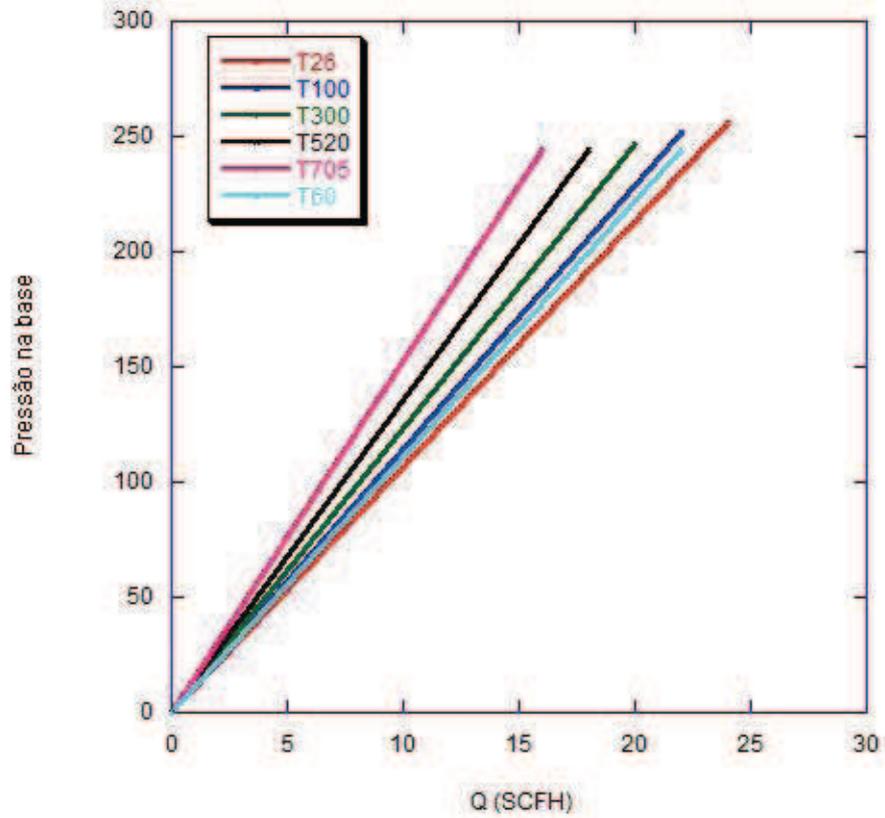


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 29 é observado que durante o regime de leito borbulhante há uma constância no valor da pressão, dentro de uma faixa que inicia em 245 até 255 mmH<sub>2</sub>O, aproximadamente. Entretanto, é observado que ponto de mínima fluidização para a temperatura de 27 °C é 26 SCFH (ft<sup>3</sup>/h), mas na temperatura de 705 °C essa vazão corresponde ao valor de regime de transporte, inapropriado para a combustão. No sentido de confirmar este fenômeno, na Figura 29, é mostrado um confronto entre os dados obtidos com a tabela obtida em Pilawska *et al* (2001).

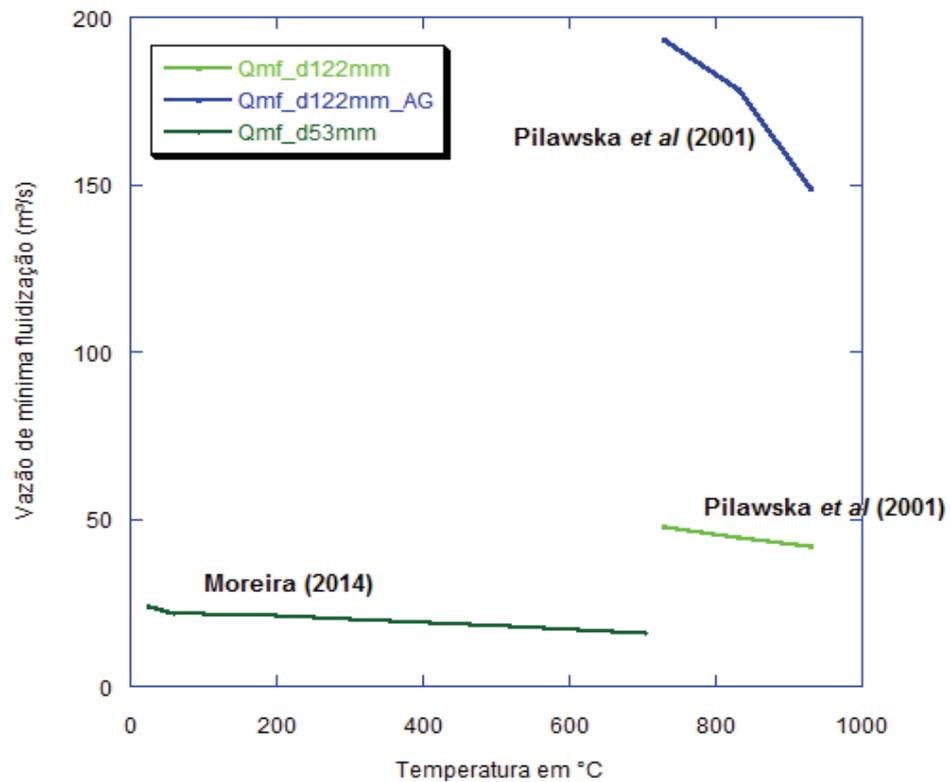
Este fato influencia diretamente na manutenção da frente de chama no leito, pois ao reduzir as etapas de fluidização, o regime de transporte pneumático aparece antes do previsto, levando assim a apagar a chama e até mesmo resfriar o leito. O reator opera na região de borbulhamento, devido pressão constante, e velocidade bem definida, mas com esta alteração, além de ter instrumentos que analisem com precisão estas mudanças, é necessário sensores térmicos para controlar estas vazões. A Figura 30 mostra como o valor de vazão mínima fluidização varia com a temperatura.

Figura 30 – Inclinação dos perfis de curvas para cada temperatura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 – Inclinação da vazão de mínima de fluidização com a temperatura.



Fonte: Elaborado pelo autor .

Pilawska *et al* (2001) apenas citou as velocidades de mínima fluidização obtidas, uma vez que o foco de seu trabalho era abordar a influência na formação de NO<sub>x</sub>, entretanto, essas medidas, reforçaram a redução da velocidade em função da temperatura.

A Figura 31 denota a inclinação das curvas. O autor citado usou dois tipos de granulometria em um reator de 122 mm de diâmetro, enquanto foi usado um reator com 53 mm observando o mesmo fenômeno. Com isso, é observado que existe esse fenômeno e que ainda é pouco conhecido, ou pouco difundido a solução para este processo de startup.

## 6 CONCLUSÃO

Com relação ao projeto conceutivo e construtivo do RLF, algumas peças foram desenvolvidas para uso específico, como o conjunto para medir pressão e temperatura e a anilha de teflon e a de alumínio. O projeto dessas peças dependeram diretamente do comportamento do leito e da temperatura de operação, o que ocasionou em alterações no material constituinte, por exemplo.

Tendo em vista os aspectos fluidodinâmicos sem combustão observados neste trabalho, entende-se que as equações de governo para o LF, de uma forma geral, caracterizam, de forma satisfatória, o seu comportamento. Entretanto, alguns efeitos que influenciam o regime do leito não estão presentes nestas equações, o que resulta em discrepância entre alguns valores teóricos em relação aos experimentais. Com isso, a rugosidade presente no RLF, mostrou alterações significativas nos regimes do leito, assim como, a presença de um exaustor no reator que gerou uma depressão.

Além dos fenômenos estudados sem a combustão, para o desenvolvimento de um RLF, foi necessário compreender o regime de início do funcionamento do reator e como a frente de chama se mantém dentro do reator. Para isso, várias tentativas foram executadas, entretanto o leito não se manteve aquecido o suficiente para a acomodação da frente de chama, fato este que leva a concluir que o ar de entrada deve estar pré-aquecido para distribuir uniformemente a temperatura ao longo do leito, pois a areia tem uma difusividade térmica muito baixa.

Por meio deste estudo e das experiências aqui demonstradas, o próximo passo deve ser a inclusão no leito de outro meio inerte como alumina, por ter alta difusividade térmica para, depois de aquecida, ser fluidizada junto com a areia a fim de uniformizar a temperatura. Outra solução seria desenvolver outros reatores com diâmetros maiores, observando as influências da temperatura, além de pré-aquecer o ar (a mistura) de entrada.

A partir de bons resultados com o gás natural, acredita-se que a inclusão da biomassa sólida como combustível em um RLF seja o próximo passo para produzir energia de forma sustentável e economicamente viável.

## REFERÊNCIAS

- 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.
- CAMELO, A. R. S. , **Combustão do biogás e do natural com elevadas concentrações de H<sub>2</sub>S e CO<sub>2</sub> em caldeira de queimador poroso**. 2012. 208 f. Dissertação (mestrado), Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará Fortaleza, 2012.
- 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.
- CÓNSUL, J. M. D. ; THIELE, D. ; VESESI, R. C. ; BAIBICHI, I. M. ; DALLAGO, R. M. Decomposição catalítica de óxidos de nitrogênio, **Química Nova**, v.27, n. 3, São Paulo, 2004.
- DAVIDSON, J. F. ; Y. HARRISON, D. Fluidised Particles. Cambridge, **University Press**, 1963.
- GELDART, D. **Gas Fluidization Technology**. London: Wiley & Sons Ltd, p.468, 1986.
- GERMAN, R. M., A Measure of the Number of Particles in Agglomerates. **Int. J. Powder Metal**, v. 32, n. 4, p. 365-373, 1996.
- GRACE J. R., AVIDAN A. A., KNOWLTON T. M., **Circulating Fluidized Beds**, Blackie Academic & Professional. 1997.
- HAYHURST, A. N., AND HUTCHINSON, E. M., **Combustion Flame**, p. 114 - 274. 1998.
- HETSRONI, G. **Handbook of multiphase systems**. Estados Unidos: McGraw-Hill Book Company, 1982.
- KOORNNEEF J., JUNGINGER M., FAAIJ A., Development of fluidized bed combustion— An overview of trends, performance and cost, **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 33, p. 19–55, 2007.
- KUNII, D., LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering: Second Edition**. Boston: Butterworth-Heinemann, 1991.

LOPES H., **Estudo do comportamento de metais pesados na combustão de lamas residuais urbanas em leito fluidizado**. 2002. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia do Ambiente) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2002.

MORAN, M. J., SHAPIRO, N., **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**, John Wiley & Sons, New York, v.4, 2000.

MALTE, P. C., AND PRATT, D. T., **Fifteenth Symposium (International) on Combustion**, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, p. 1061, 1974.

PILAWSKA M., BUTLER C. J., HAYHURST A. N., CHADEESINGH D. R., The Production of Nitric Oxide during the Combustion of Methane and Air in a Fluidized Bed, *Combustion and Flame* v.127, p.2181–2193. **Elsevier Science Inc**, 2001.

SAINTRAIN, P. V., **Estudo experimental da fluidização gasosa de leito de partículas de sílica e casca de castanha de caju**. 2012, 127 f. Dissertação (mestrado), Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

SALEMA, S. A. **Co-Combustão de Biomassa e Carvão em Leito Fluidizado**, 2008. 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**, v. 20, p. 281-324, 1994.

SILVA, I. M. F., **Produção de filmes finos de SnO<sub>2</sub> pelo método de Spray pirólise utilizando um forno à gás natural com combustão de filtração**, 2012, 177 f. Dissertação (mestrado), Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

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

TURNES, S. R., **An Introduction to Combustion**. International Editions, 2000.

WEN, C. Y., YU, Y. H., A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity, **AIChE Journal**, v.12, p.610,1966.

## **APÊNDICE A – DETALHAMENTO DA CONSTRUÇÃO DOS COMPONENTES DO REATOR.**

Para a sustentação do reator foi pensado em uma bancada de latão feita de uma chapa de 5 mm de espessura. Suas dimensões também foram obtidas pela necessidade de ter um espaço para anexar algum tipo de instrumentação, como alimentador de areia lateral, entretanto, havia uma possibilidade em usar um compartimento específico para o reator, denominado “capela”, como o mesmo não foi construído, a montagem e os testes foram feitos com o reator exposto.

A capela tinha como objetivo organizar o laboratório e sugar os produtos da combustão, lançando esses gases a um analisador para medição de teor de NOx. Esse fato não interferiu nas medições e aquisição dos dados, entretanto, a cota de 150 mm da mesa, foi medida em função da altura do reator dentro da capela. Essa medida dificultou a manutenção do reator, pois há pouco espaço para inserção de chaves e para visualização de anomalias como vazamentos.

Neste suporte, existem oito furos para parafusos de 6 mm de diâmetro com anéis de politetrafluoretileno para servir como isolamento térmico. O furo central tem o mesmo diâmetro da peça que é acoplada no inferior do reator denominada. A chapa tem 5 mm espessura para garantir boa fixação e resistência. Sua base interna foi usinada com metal de seção retangular, comumente chamado de “metalon”, de medidas de 30x30 mm e espessura de 2mm. Não existem partes parafusadas neste suporte e foram soldadas as partes de metalon com a chapa garantindo a resistência à compressão.

### **O corpo do Reator**

Para o desenvolvimento de um reator que funciona em um novo ramo de estudo, foi necessário aproveitar um corpo de reator disponível no laboratório, que estava em perfeito estado de conservação.

O ônus obtido para obtenção do material e concepção de outro corpo do reator, além do tempo disponível não era favorável e após uma análise metódica da superfície interna do

reator, averiguando rachaduras e imperfeições, foi aprovado para realização dos testes após algumas modificações.

Esse reator teve que ser usinado para reabertura de furo na parte inferior, pois haviam três furos anteriormente na parte inferior e centrados no centro do reator de forma que ao fazer o furo passante de 53 mm de diâmetro, os mesmos foram removidos. Também foram furados no flange inferior oito furos concêntricos e passantes de 8 mm mais externos e outros oito furos concêntricos e passantes mais internos de mesmo diâmetro, sendo para fixação e estabilização do reator no suporte e para fixação dos componentes inferiores, respectivamente.

Todas as espessuras das chapas tem 5 mm, exceto os flanges que possuem 8 mm. O material de isolamento térmico consiste em um tubo confeccionado com uma mistura cerâmica, ao longo dos testes, foram observadas sua eficiência como isolante elétrico. Além dos fatores acima citados, os furos laterais foram determinantes para a escolha de usar esse reator, pois estão localizados em pontos de estudo, convenientemente.

Entretanto, para os estudos fluidodinâmicos, foram levantadas novas curvas para ter base em determinar seus valores de trabalho, como cota, pressão e vazão de mínima fluidização.

### ***Dimensões do plenum e do suporte da tela de sustentação da areia.***

No reator, nele também houve a mistura do ar com gás natural para ignizar o sistema. Um detalhe importante é que é observado a presença de três furos de 10 mm de diâmetro, que foram escolhidos para entrada de ar, gás natural e instrumentação de medição de pressão na base do leito. No desenho percebe-se a um rebaixo de 5 mm para alojar a tela que sustentará a coluna de areia, garantindo o encaixe da peça no reator.

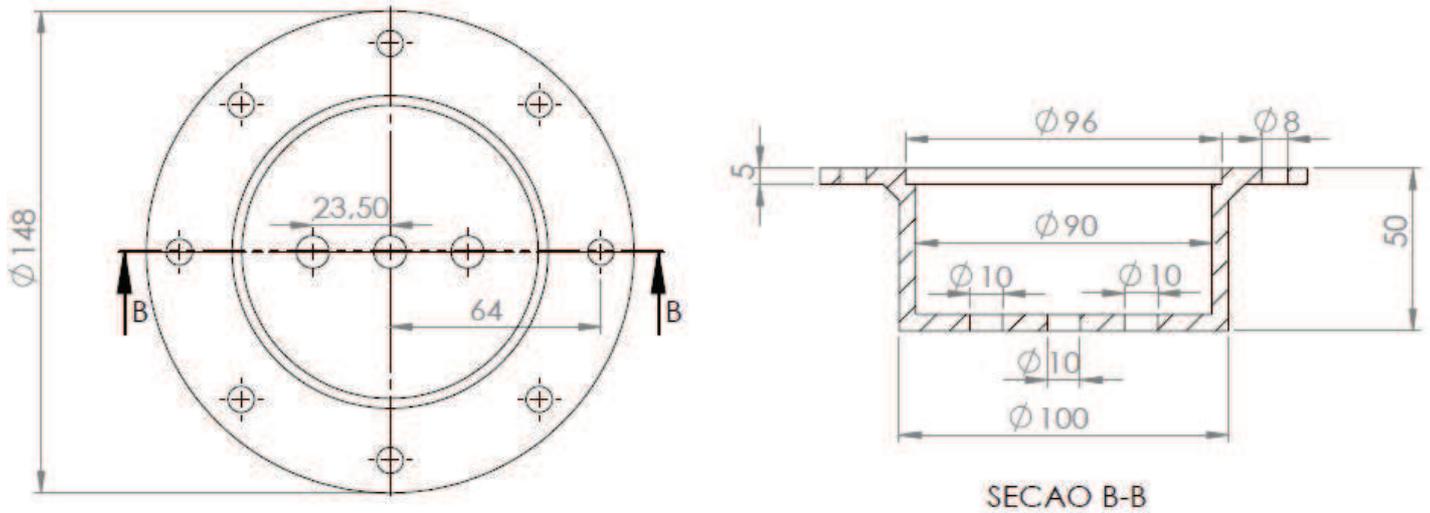
Na fabricação desta peça, a ideia inicial era em usar dois discos de 5 mm de diâmetro para soldá-los e usiná-los, pois a junção direta do flange com a parte mais inferior do plenum geraria pontos, mais precisamente um círculo que não garantiria a união das peças.

Mas após uma breve conversa com o soldador da empresa Polares, observou-se que não havia necessidade de outro disco com diâmetro menor e bastava um “cordão” de solda e estava garantida tanto a fixação das peças quanto a estanqueidade do plenum.

Ao decorrer dos testes, foi notada a necessidade de inserir mais furos ao flange do plenum, pois na região de contato entre os flanges havia vazamentos que foram sanados após essa intervenção, os parafusos são passantes e fixados com arruelas e porcas.

Com isso, a versão final do plenum tornou-se a Figura 32.

Figura 32 – Versão final do plenum do reator



Fonte: Elaborado pelo autor.

O suporte da tela de sustentação da areia foi confeccionado em alumínio, pois no momento não havia sido considerada a temperatura para o alumínio que funde em temperatura menor que  $800^{\circ}\text{C}$ , tendo em vista que o reator obteve temperaturas maiores que  $1200^{\circ}\text{C}$ .

São quatro furos para sustentação do suporte com chanfros de  $5$  mm de profundidade a  $45^{\circ}$ , feitos com a extremidade de uma broca de  $15$  mm de diâmetro. A importância deste chanfro está em pôr um parafuso de chave ALLEN para que após a fixação não aparecesse obstrução na superfície impedindo a vedação.

Outra ideia para ter essa fixação é a de impedir a queda da areia por gravidade após retirar o plenum, facilitando a manutenção.

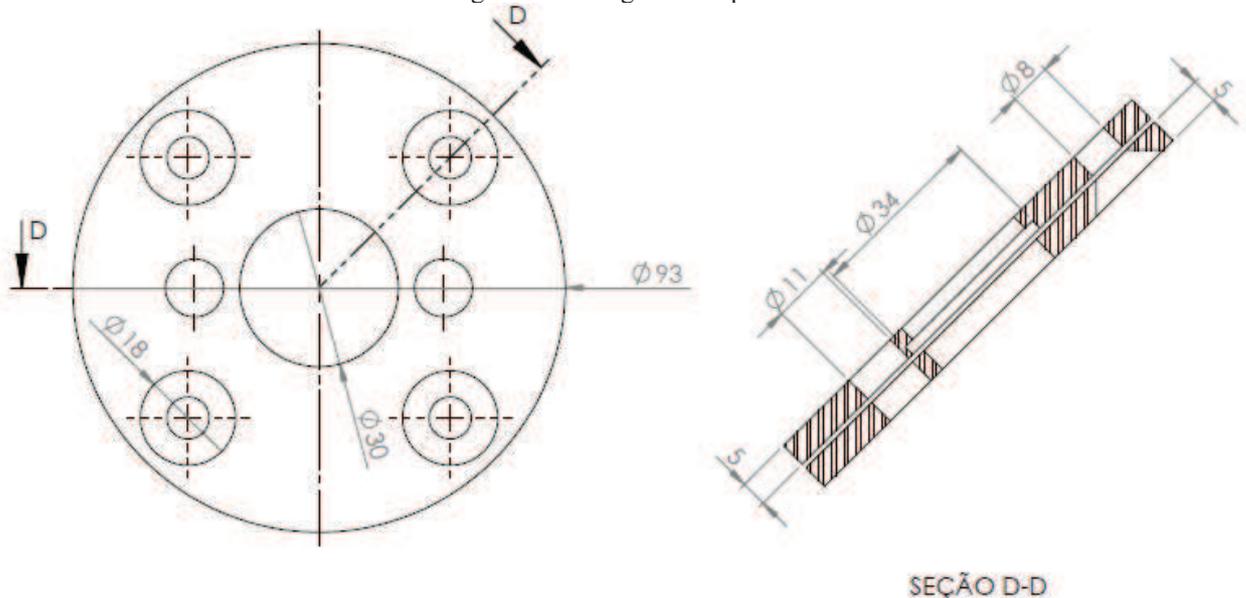
Figura 33 – Imagem do suporte da tela em alumínio usinado.



Fonte: Obtido pelo autor.

A Figura 33 trata de uma imagem obtida após a usinagem da tela em alumínio, entretanto, foi necessária uma reconstrução da mesma peça, agora em aço inox para suportar uma temperatura elevada sem perder suas propriedades mecânicas.

Figura 34 – Imagem do suporte da tela



Fonte: Obtido pelo autor.

Na vista em corte, na Figura 34, é perceptível que o suporte consiste em dois discos concêntricos que são pressionados um ao outro no momento da fixação, o furo central passa o ar pela tela que foi colocada de forma que a areia não passa no sentido inverso.

Há um rebaixo em um dos discos para alojamento da tela que foi usinado com 34 mm de diâmetro. Os outros dois furos foram usados tanto para o sensor piezo-resistivo e quanto para o manômetro em “U”.

***Flange inferior para adaptação e flange superior.***

Para a fixação do plenum e do suporte da tela, alguns furos no reator não eram suficientes, pois há o material cerâmico dentro do reator que impede a usinagem, então com um flange para servir como adaptador para o suporte da tela, não haveria necessidade de furar o reator comprometendo o equipamento de furação.

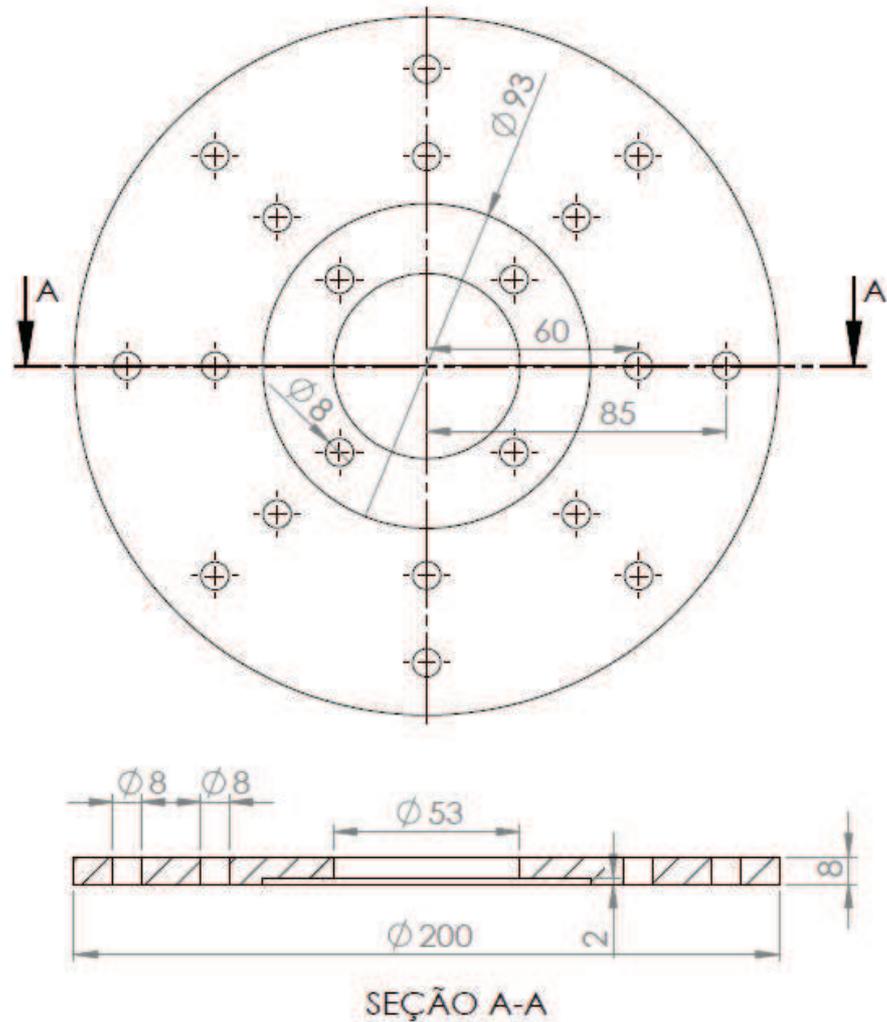
Figura 35 – Flange de adaptação inferior



Fonte: Obtido pelo autor.

Na Figura 35, falta inserir os furos para fixação do plenum, no caso, inserir quatro furos adicionais, adição que já está atualizada no desenho abaixo.

Figura 36 – Desenho do flange inferior para adaptação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com esta peça, mostrada na Figura 36, foi possível encaixar o plenum junto ao reator de forma que não houvesse vazamentos, levando em consideração que ainda existem alguns materiais colocados para garantir a estanqueidade citados na seção de montagem do reator. O flange superior foi desenhado com oito furos de fixação com 8 mm de diâmetro, dois furos de 6 mm para passagem do trocador de calor, um furo central com 19 mm de diâmetro para passagem do ar, sem combustão, e dos produtos, com combustão e um furo adicional para a vela automotiva para ignizar a chama por centelha.

Entretanto, tantas foram as mudanças que levou aos testes com reator aberto para melhor compreensão dos fenômenos, por esta causa, pouco é citado o flange superior, apesar de ter sido confeccionado e montado no reator.

### *O trocador de calor*

O trocador de calor foi obtido por processo simples de enroscamento do tubo de cobre de 4,8 mm de diâmetro com uma parte interna reta passando por dentro da parte espiralizada. Este trocador foi projetado para funcionar de forma retrátil, ou seja, como a frente de chama tende a procurar regiões de maior calor, o trocador serviria como mantenedor da chama sobre a superfície do leito que deve estar aquecida a no mínimo 1000°C. Para garantir a estanqueidade dentro do reator e não permitir a passagem de produtos da combustão pelas as conexões das anilhas que sustentam o trocador idealizou-se uma anilha confeccionada de politetrafluoretileno que resistisse a deformação e a temperatura e não permitisse o vazamento.

## APÊNDICE B – DETALHES DE MONTAGEM DO RLF.

O processo de montagem iniciou pela parte inferior do reator estendendo ao resto do corpo do reator. As montagens foram feitas observando as conexões existentes, os encaixes e, o mais importante, a estanqueidade.

Foram feitas duas montagens para a caldeira: a primeira usando uma manta cerâmica, comumente usadas neste tipo de projeto, como isolamento térmico e outra usando uma pasta de silicone usada para fins automotivo resistente a temperaturas próximas a 320°C. O procedimento na primeira montagem foi:

- Suporte da tela com a tela, colado com silicone e adicionados as conexões para anilha para conectar o manômetro em “U” e o sensor piezo resistivo.

Também estão inclusos os parafusos com a finalidade de centralizar a peça e manter a cola na posição correta durante a cura da tela, além das conexões para anilha vedadas com fita de veda rosca com o rebaixo interno retirado em uma delas para passagem do tubo de cobre de 6 mm de diâmetro com redução na extremidade para leitura de pressão manométrica na base do leito de partículas de sílica.

- Unir o flange inferior do reator, flange inferior adaptador e o suporte da tela com a tela já colada.

Em todas as roscas foram usada a fita de politetrafluoretileno (veda rosca) para impedir vazamentos de ar e gás. Nesta montagem, não houve vazamentos entre os flanges mostrados devido à compressão dos parafusos.

- Foram cortadas as peças de manta cerâmica para criar flanges compressíveis para controlar vazamentos, essas flanges continham cerca de cinco camadas de espessura de 3 mm cada, sem compressão.

Durante o procedimento de montagem, com essa manta cerâmica, foi imprescindível o uso de EPI, como luvas e máscaras, pois ao comprimi-la, essa manta libera algumas partículas que são prejudiciais à saúde, quanto ao sistema respiratório.

Esses discos foram colocados entre o flange inferior adaptador e o suporte que sustenta o reator para impedir perdas de temperatura e vazamento de gás e ar.

Durante os testes fluidodinâmicos com o reator, sem combustão, foi feita uma flange do mesmo material, mas como não havia problemas com temperatura, foram feitas três camadas e unidas com cola branca comum.

Com isso, foi formado um disco isolante adequada ao teste em questão. Contudo, a mesma placa foi utilizada no reator para a combustão, ao atingir temperatura acima de 300°C, esse flange começou a liberar uma fumaça clara de odor forte. O reator foi resfriado e substituído o isolamento para o de silicone.

- Conectados adaptadores de pressão temperaturas laterais, termopares, tubos e conexões.

Foi adotado um procedimento de averiguação de estanqueidade, que passa por quatro etapas:

1. Ainda com ar na linha, é feito um pouco de espuma e aplica-se nas conexões e válvulas.
2. Caso seja possível, imergir em água as conexões e válvulas duvidosas.
3. Com ar na linha, confina-se o ar na região desejada e observa alguma alteração na medida no manômetro.

Em alguns pontos foram possíveis, realizar todas as medições, em outros, algumas dessas, entretanto, durante a primeira montagem não houve vazamentos significativos. No processo entre a primeira e segunda montagem, a estanqueidade não foi mantida e os resultados estavam equivocados, por esse motivo a necessidade de uma remontagem com atenção aos pontos de possíveis vazamentos.

Existem conexões presas com rosca com fitas de vedação e tubos conectados por dilatação térmica (pontos de baixa pressão).

- Unir as peças montadas ao suporte do reator.

As partes do reator foram unidas em uma parte, sem a inclusão do plenum, por detalhes nas anilhas. As peças foram unidas com os parafusos e para estes foram criados arruelas para não permitir ao mesmo transmitir calor ou eletricidade.

- Revestimento do reator com manta cerâmica.

O revestimento externo do reator foi realizado com a manta cerâmica em camadas. Em cada camada para sustentação foi presa com um fio de cobre e assim o processo foi repetido algumas vezes até atingir os adaptadores de pressão e temperatura.

- Preparar a anilha no tubo de cobre e alinhar o plenum.

O plenum possui três furos na parte inferior, um para o manômetro, outro para o ar e outro para o sensor piezo resistivo, entretanto o suporte da tela tem dois furos e pode ficar desalinhados por isso a necessidade em pôr o tubo de cobre com a anilha na posição e prender seus parafusos no flange, impedindo a montagem incorreta.

- Verificar estanqueidade no leito antes de introduzir a areia.

- Introduzir a areia e colocar a resistência e parte elétrica.

Na segunda montagem o processo foi o mesmo, a única alteração estava em substituir o flange confeccionado de manta cerâmica para pasta de silicone usado para vedações em motores automotivos. Esse silicone possui resistências a temperaturas que variam de -32 a 320°C.

Há uma camada mais escura na região que contém o flange do reator e a superfície do suporte do reator. Ao final do processo, o reator foi revestido com um papel alumínio para impedir alguma liberação de produtos devido ao aquecimento da manta cerâmica.

**ANEXO A: FOTOS DA MONTAGEM DO RLF.**

Figura 37 – Montagem parte 1



Fonte: Obtido pelo autor.

Figura 38 – Montagem parte 2



Fonte: Obtido pelo autor.

Figura 39 – Montagem parte 3



Fonte: Obtido pelo autor.

Figura 40 – Montagem parte 4



Fonte: Obtido pelo autor.

Figura 41 – Montagem parte 5



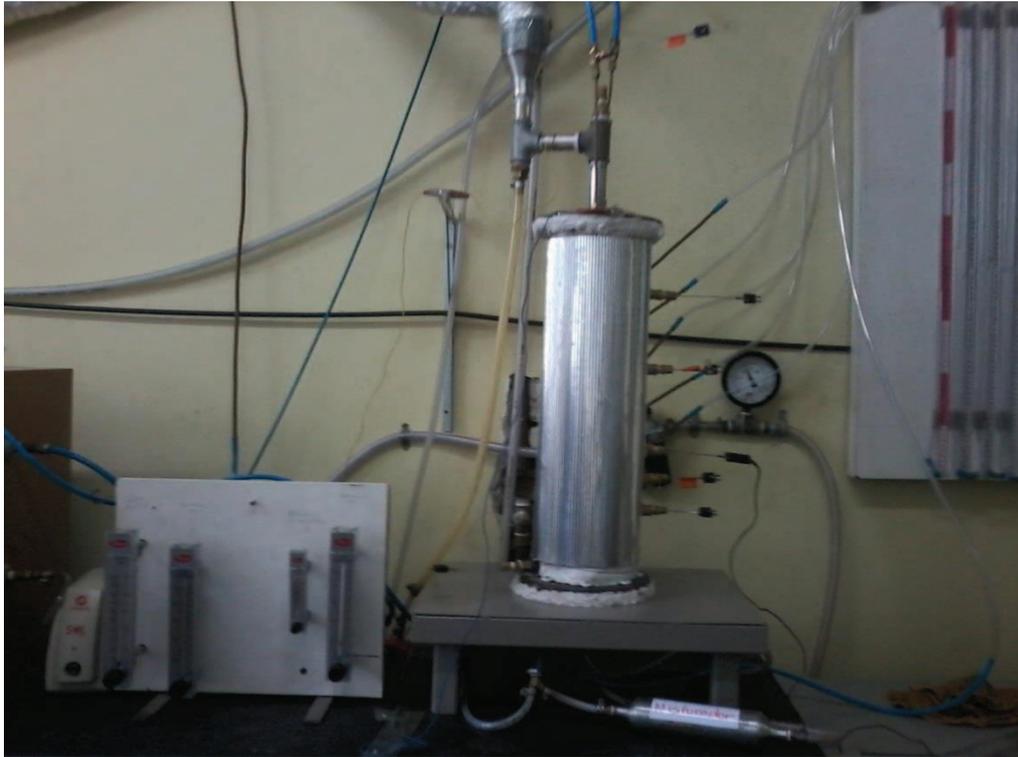
Fonte: Obtido pelo autor

Figura 42 – Montagem parte 6



Fonte: Obtida pelo autor.

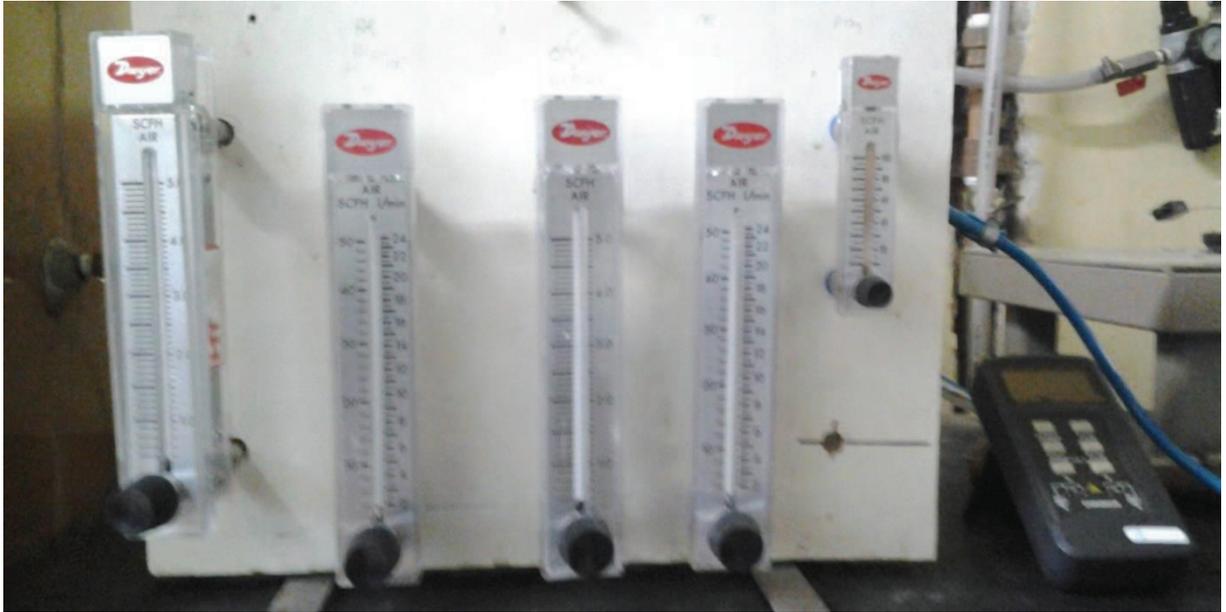
Figura 43 – Montagem parte 7



Fonte: Obtido pelo autor

## ANEXO B: EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS TESTES FLUIDODINÂMICOS COM E SEM COMBUSTÃO.

Figura 44 – Bancada de rotâmetros utilizados para medir vazão de ar e gás separadamente.



Fonte: Obtido pelo autor.

Figura 45 – Lança-chamas introduzido para aquecer o leito.



Fonte: Obtido pelo autor.

Figura 46 – Cilindro de gás natural utilizado nos testes de combustão.



Fonte: Obtido pelo autor.

Figura 47 – Variador de tensão elétrica 0 – 240 V – VARIVOLT



Fonte: Obtido pelo autor.

Figura 48 – Compressor utilizado nos testes de combustão e fluidodinâmicos.



Fonte: Obtido pelo autor.

Figura 49 – Balança utilizada na pesagem da areia.



Fonte: Obtido pelo autor.

Figura 50 – Termômetro digital utilizado.



Fonte: Obtido pelo autor.

Figura 51 – Tubulação de escape do gás com saída com tubo de cobre para o analisador



Fonte: Obtido pelo autor.

## ANEXO C: INSTRUMENTAÇÃO PARA TESTE DE DESEMPENHO

Para realização dos testes de desempenho no reator de leito fluidizado, foi realizada a instrumentação do mesmo para a monitoração e controle de seu funcionamento assim como de parâmetros como temperatura e pressão.

Alguns instrumentos foram adquiridos em lojas especializadas e outros desenvolvidos para melhoramento da aquisição de dados. Estes foram divididos em grupos para detalhamento.

### *Conexões*

Foram usadas diversas conexões no projeto, conexões pneumáticas de engate rápido para tubos de 10 mm, conexões “T” também de engate rápido para outros tubos de 10 mm, todos estes usados apenas para ar do compressor. Para o gás natural e a mistura gás e ar foram usados conexões com “espigões” presos por braçadeiras de faixa de aperto que varia de 9 a 13 mm.

Nos pontos onde não havia conexões, havia junções feitas por dilatação térmica do plástico dos tubos, não havendo a necessidade das braçadeiras pela pressão no ponto que era muito baixa e não ocorria nenhum tipo de vazamento.

Também foi usada conexão com espigão e “macho” 1/4 de polegada para os rotâmetros de gás, todos estes presos com braçadeira.

Para a conexão dos termopares foi projetado uma anilha que resistisse ao calor no adaptador e ao se deformar devido ao aperto da chave, não danificasse o termopar. Para este fim, essa anilha foi produzida com politetrafluoretileno capaz de resistir a uma temperatura de aproximadamente 300°C, sem perder suas propriedades mecânicas além de ser conformável de forma a gerar a estanqueidade para não influenciar na medida de pressão lateral e não danificar o termopar.

### *Termopares, manômetros em “U” e termômetro digital.*

Nos pontos próximos ao leito de partículas de sílica foram utilizados termopares do tipo K e nos pontos onde a temperatura era previsivelmente mais baixa foram utilizados termopares do tipo J. Na Figura XXX podem ser observados os termopares conectados nas

laterais do reator, através destes, o perfil de pressão ao longo do leito e acima dele pode ser monitorado.

O adaptador citado anteriormente foi desenvolvido para mensurar pressões laterais, o furo de 1,0 mm de diâmetro, não permite a passagem da areia, pois há um termopar inserido e impede a passagem da areia, mas o ar passa com mais facilidade que areia. Esse ar desloca os tubos que funcionam com manômetro em “U” fornecendo dados que são tratados em curvas de pressão versus vazão.

Em todo teste, a areia é removida e esse furo de 1,0 mm é limpo por ar comprimido injetado diretamente no sentido inverso de medição de pressão, logo após remover a conexão “T” usada para separar a termopar do manômetro em “U”.

### ***Compressores, filtros e reguladores de ar.***

Para manutenção da fluidização do leito é necessário ar comprimido que é suprido por um compressor da marca Schulz com 10 HP de potência. Entretanto, para realizar medições na bancada e medições de NOx foi preciso um outro compressor de potência reduzida.

O compressor Schulz de 350 litros, apesar de fornecer pressão elevada, as válvulas e reguladores de pressão ao longo do leito reduziam a pressão na linha de ar para 5 bar e variava a medida em que o ar ia sendo consumido.

Para este compressor, foi necessário purga-lo várias vezes, bem como, purgar também os filtros de pressão que tinha bastante óleo devido a forma que o compressor operava.

O outro compressor, que funciona por diafragma, gerava pouco liquido na linha de pressão, então a periodicidade de suas purgas eram bem maiores. Infelizmente, como era um compressor com pequeno reservatório, logo o ar era consumido e o compressor era religado e isso gerava pulsos de pressão, dificultando as medidas de pressão lateral, além de mascarar pontos relevantes como o de mínima fluidização.

O problema acima citado acontecia nos dois compressores até o momento em que foi idealizado um rotâmetro para atmosfera para gerar um vazamento controlado visando manter o funcionamento contínuo do compressor garantindo assim, uma pressão mais constante e obtendo valores mais precisos.

### ***Regulador de tensão e resistência térmica.***

Após constata-se a necessidade do aquecimento prévio do leito de partículas de areia para o início do processo de combustão, utilizou-se uma resistência elétrica juntamente com um equipamento eletrônico, denominado “VARIVOLT”, que varia a tensão desde 0 a 240 V.

Na Figura A – 6, que está em anexo, mostra uma vista superior do reator, enquanto o leito é aquecido por uma resistência elétrica ligada ao VARIVOLT.

Após alguns testes e estudos optou-se após um aquecimento inicial com a resistência elétrica, utilizar um tubo de quartzo como lança-chamas para aquecer mais rapidamente o leito e sem a interferência da resistência dentro do leito de partículas de sílica.

### ***Rotômetros e lança chamas.***

Para controle das vazões de ar e de combustível (gás natural veicular) utilizou-se rotômetros de 5 SCFH para o gás e de 50 SCFH para o ar. Foram utilizados um par de rotômetros de 5 SCFH e 50 SCFH, e um rotômetro de 100 SCFH, este último com saída para atmosfera para regular as variações de pressão no manômetro após o último filtro de ar. Tentou-se manter a pressão neste manômetro em torno de 4 bar, controlando suas oscilações com este rotômetro de 100 SCFH com saída para a atmosfera.

Na alimentação do leito utilizou-se um rotômetro de 5 SCFH para o gás e um de 50 SCFH para o ar. A saída de ambos os rotômetros foi conectada a um pré-misturador responsável por alimentar o leito com a mistura de ar-combustível que entra no leito através do distribuidor inferior. O outro par de rotômetros foi utilizado para distribuir a mistura para um tubo de quartzo que funcionou como um lança-chamas para aquecimento do leito.

O quartzo foi escolhido por resistir a altas temperaturas, pois foi necessário aquecer o leito até uma temperatura de 1000° para obter a combustão desejada. Neste caso, ao invés de optar por um reservatório para misturar o ar e combustível, usou-se o próprio tubo para gás para fazer a mistura que funcionou adequadamente.

**ANEXO D: TABELA TERMODINÂMICA PARA OBTENÇÃO DO PODER CALORÍFICO DO GNV UTILIZADO.**

	Comp. (%)	Molécula	Entalpia de formação <sup>(1)</sup> (kJ/kmol)
Combustível (GNV)	0,91158	Metano	-74850,000
	0,03926	Etano	-84680,000
	0,00094	Propano	-103850,000
	0,00125	Butano	-126150,000
	0,00008	Pentano	-146440,000
	0,01381	CO2	-393520,000

Comburente	1,95143	H2O	-241820,000
	1,01213	CO2	-393520,000

-68231,763	$\bar{h}_R$	-77257,8 (kJ/kmol)
-3324,537		
- 97,619		
-157,688		
-11,715		
-5434,511		

-471894,803	$\bar{h}_P$	-870188,2 (kJ/kmol)
-398293,398		

$\bar{h}_{RP}$	$\bar{h}_P - \bar{h}_R$	792930,368	kJ/kmol
----------------	-------------------------	------------	---------

$M_{comb}$	16,664	kg/kmol
------------	--------	---------

PCI	47583,435	kJ/kg
-----	-----------	-------

<sup>(1)</sup> – Fonte: Moran e Saphiro, 2002

Ao realizar a comparação do valor com o valor da porcentagem do PCI de cada elemento que compõe o gás multiplicado com sua proporção na composição química, é encontrado um valor de 47554,889 kJ/kg, levando a um erro de 0,06%. Sendo, portanto, um valor de PCI confiável.

**ANEXO E: IMAGENS RELEVANTES A CERCA DOS TESTES DE COMBUSTÃO.**

Figura 52 – Simulações de aquecimento do reator com resistência.

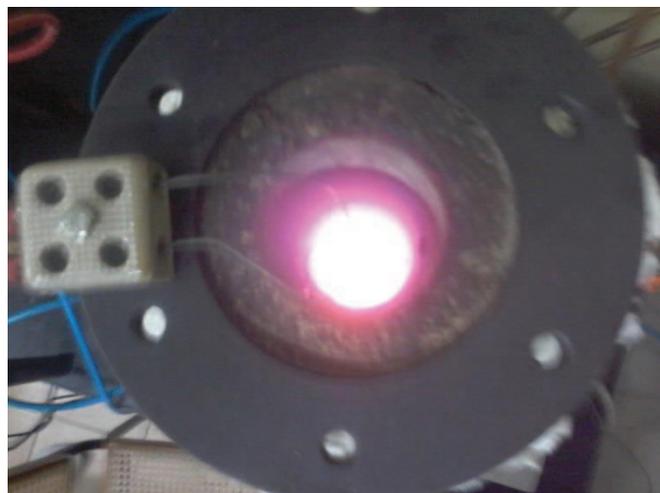


Fonte: Obtido pelo autor.

Figura 53 – Reator aquecido com resistência desligada (a) e ligada (b), temperatura na superfície interna do reator a aproximadamente 1100°C.



(a)



(b)

Fonte: Obtido pelo autor.