



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

IANNA LARAH MENDES SILVA

**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS FLUIDODINÂMICOS EM REATOR DE LEITO
FLUIDIZADO BORBULHANTE**

FORTALEZA

2018

IANNA LARAH MENDES SILVA

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS FLUIDODINÂMICOS EM REATOR DE LEITO
FLUIDIZADO BORBULHANTE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia de Energias
Renováveis da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
Engenheiro em Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. William Magalhães
Barcellos.

FORTALEZA

2018

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)

S58a Silva, Ianna Larah Mendes.
Avaliação de parâmetros fluidodinâmicos em reator de leito fluidizado borbulhante / Ianna Larah Mendes Silva. – 2018.
60 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. William Magalhães Barcellos.

1. Leito fluidizado. 2. lodo e areia de ETE. 3. estudo fluidodinâmico. I. Título.

CDD 621.042

IANNA LARAH MENDES SILVA

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS FLUIDODINÂMICOS EM REATOR DE LEITO
FLUIDIZADO BORBULHANTE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia de Energias
Renováveis da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
Engenheiro em Energias Renováveis.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

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

Profa. Dra. Maria Alexsandra de Sousa Rios
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Luiza e Antonio, pessoas que antes de tudo, eu admiro. Obrigada por nunca me deixarem faltar nada, por todo aprendizado, por toda a base educacional que me permitiu chegar até esse ponto e por me ensinarem que se eu fosse fazer algo, que fizesse bem feito.

Agradeço principalmente à minha irmã, Hannah Ially, que durante toda a minha vida foi um exemplo de dedicação, criatividade, competência e companheirismo. Obrigada por sempre acreditar em mim.

Ao professor William Barcellos, pela disponibilidade em ser meu orientador, pela atenção, paciência e pela oportunidade em trabalhar em seu laboratório. E agradeço ao Banco BNDES e a Cagece pelos investimentos no projeto, sem os quais esse trabalho não poderia ser realizado.

Agradecimento em especial ao meu líder de equipe, Diego Feitosa, pela ótima recepção, pelo acolhimento, pela paciência e pela boa vontade em compartilhar conhecimentos.

Aos meus parceiros de laboratório agradeço por tornar o ambiente de trabalho em um ambiente também de amizade e bem-estar. São eles: Gabryel Ferreira, Luiz Freire, Fernanda Cardoso, Lucas Ribeiro, Daniel Moraes, Pedro Diniz, Thiago Dantas, Yuri Moreira, Cícero Júnior, Arthur Tomé, Welbson Carneiro, Bruna Araújo, Melina Cantillo, Igor Cruz, João Victor e Lucas Loiola.

Preciso agradecer também minha querida amiga Riadyla Guedes pelo apoio, pela amizade, pelo conforto que ela me faz sentir em sua companhia e por todas as palavras de incentivo, amparo e conselhos.

E finalmente, agradeço aos amigos feitos durante a graduação que tanto permitiram meu crescimento, que me apoiaram e que marcaram esses longos anos de estudo com demonstrações de companheirismo e confiança. Sendo eles: Marina Araújo, Ana Beatriz Furtado, Islanya Aguiar, Gabrielle Prudencio, GeorGINelly Ferreira, Sérgio Alves, Natália Vieira e Gletson Girão.

*“Não é a posse da verdade, mas o sucesso que
acompanha a busca por ela, o que enriquece o
buscador e traz felicidade a ele.”*

(Max Planck)

RESUMO

O gerenciamento dos resíduos líquidos urbanos em Estações de Tratamento de Esgoto tem sido caracterizado como um problema complexo de altos custos operacionais e energéticos. Envolve ainda a consideração da necessidade de destinação apropriada dos rejeitos decorrentes do processo como, por exemplo, o lodo dos biodigestores e areia trazida nas redes de esgoto, os quais têm demandado alternativas tecnológicas para lidar com essa questão. Neste contexto, os reatores de leito fluidizado apresentam-se como uma solução tecnológica e economicamente sustentável, devido às suas propriedades térmicas notáveis, especialmente no tocante à baixa emissão relativa de poluentes, como NO_x , e na uniformidade da temperatura do leito. Em alinhamento com essa proposta, foi desenvolvido um protótipo desse gênero de reator, dedicado à operação em regime borbulhante, em que foram feitos procedimentos experimentais com o objetivo de compreender seus fenômenos fluidodinâmicos e, assim, determinar as condições adequadas de funcionamento. O reator utilizado possui diâmetro interno de 0,110 m, altura de 0,935 m, construído em aço carbono com revestimento interno de concreto refratário, sendo uma altura de 0,442 m da câmara de combustão preenchida com areia de granulometria na faixa de 300 a 355 μm , referente a 45-50 MESH ASTM, a qual participa termicamente do processo como um meio poroso inerte móvel. O protótipo de estudo se encontra no Laboratório de Combustão e Energias Renováveis (LACER), localizado na Universidade Federal do Ceará, que serve como base de pesquisa, visando a construção de uma caldeira de leito fluidizado dedicada à operação com biogás e lodo, enquanto combustível renovável de projeto e, ainda, utilizando a areia proveniente do esgoto como material-base constituinte do leito. Quanto à metodologia de trabalho, foram realizados os principais procedimentos de investigação, quais sejam: variar a altura do material inerte dentro do leito; inserir esferas cerâmicas de alumina (Al_2O_3) suspensas na parte superior do leito; verificar influência da inserção do pré-aquecedor de ar nos perfis de pressão durante a fluidização a temperatura ambiente e em operação. Complementarmente, foi comparado o comportamento fluidodinâmico do leito em diferentes diâmetros de câmara, 0,044; 0,065 e 0,090 m, utilizando uma bancada de estudo apropriada, constituída de tubos de acrílico. Por fim, realizou-se uma análise granulométrica da areia de esgoto e uma sucessiva fluidização de uma amostra semelhante a essas faixas granulométricas, usando areia comum. Através de experimentos, foi possível plotar gráficos de curvas de queda de pressão, descobrir a necessidade da mudança da proporção L/D (comprimento do leito / diâmetro do leito) para projetos futuros da caldeira e estudar resultados para fazer inferências sobre a influência de cada procedimento realizado.

Palavras-chave: Leito fluidizado; lodo; areia de ETE; estudo fluidodinâmico.

ABSTRACT

The management of urban liquid waste in sewage treatment stations has been characterized as a complex problem of high costs, both operational and energetic. It involves the consideration of the need for appropriate disposal of the waste that is resulting from the process, such as sludge from biodigestors and sand brought in sewage networks, which have been demanding technological alternatives to deal with this issue. In this context, fluidized bed reactors are a technological and economically sustainable solution due to their remarkable thermal properties, especially in relation to the relative low emission of pollutants. In line with this proposal, a prototype of this kind of reactor was developed, dedicated to the operation in a bubbling regime, in which experimental procedures were carried out in order to understand its fluid dynamics phenomena and, therefore, to determine the appropriate operating conditions. The reactor used has an internal diameter of 0.110 m, a height of 0.935 m, made of carbon steel with internal covering of refractory concrete. A large part of the combustion chamber is filled with sand of granulometry in the range of 300 to 355 μm , 50 MESH ASTM, which thermally participates in the process as a mobile inert porous medium. The study prototype is located in the Laboratory of Combustion and Renewable Energies (LACER), located at the Federal University of Ceará, which serves as a research base, aiming the construction of a fluidized bed boiler dedicated to the operation with biogas and sludge as fuel and also using the sand from the sewage as the bedrock constituent material. As for the work methodology, the main investigation procedures were carried out, namely: varying the height of the inert material inside the bed; insert alumina (Al_2O_3) ceramic beads suspended in the upper part of the bed; to verify the influence of the insertion of the air preheater on the pressure profiles during the fluidization at room temperature and in operation. In addition, the fluid dynamic behavior of the bed was compared in different chamber diameters, using an appropriate research stand, made of acrylic tubes. Finally, a granulometric analysis of the sewage sand and a successive fluidization of a sample equivalent to these granulometric bands were made using common sand. Through experiments, it was possible to draw graphs of pressure drop curves, to find out the need to change the L / D ratio for future boiler projects and to study results to make inferences about the influence of each performed procedure.

Keywords: Fluidized bed. Sludge. Sand from STS. Fluid dynamic tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de gaseificador de leito fluidizado borbulhante	18
Figura 2 – Esquema da caldeira de combustão em leito fluidizado circulante com sistemas auxiliares.	19
Figura 3 – Representação do fenômeno de fluidização. (a) Altura do leito em repouso; (b) Altura do leito em estado de fluidização incipiente; (c) Bolhas gasosas em leitos fluidizados.	21
Figura 4 – Representação dos regimes de fluidização juntamente com a curva de queda de pressão pela velocidade do fluxo.	22
Figura 5 – Classificação de partículas por Geldart.	23
Figura 6 – Protótipo em escala de laboratório da caldeira de leito fluidizado.	28
Figura 7 – Manômetro em U usado para medir pressão da base no leito.....	29
Figura 8 – Plenum de teflon presente na base do tubo de acrílico de diâmetro 0,090 m ..	31
Figura 9 – Plenum de teflon presente na base do tubo de acrílico de diâmetro 0,090 m...	31
Figura 10 – Bancada para experimentos fluidodinâmicos.....	33
Figura 11 – Peças do protótipo do reator de leito fluidizado.....	34
Figura 12 – Peças do protótipo do reator de leito fluidizado.....	34
Figura 13 – Pré-aquecedor de ar.....	35
Figura 14 – Variador de tensão gradual (Varivolt).....	35
Figura 15 – Peneira de 14 MESH ASTM com amostra da areia de esgoto.....	36
Figura 16 – Amostra de areia na granulometria maior que 14 MESH ASTM.....	58
Figura 17 – Amostra de areia na granulometria entre 14 e 20 MESH ASTM.....	58
Figura 18 – Amostra de areia na granulometria entre 20 e 45 MESH ASTM.....	58
Figura 19 – Amostra de areia na granulometria entre 45 e 50 MESH ASTM.....	58
Figura 20 – Amostra de areia na granulometria entre 50 e 100 MESH ASTM.....	59
Figura 21 – Amostra de areia na granulometria entre 100 e 120 MESH ASTM.....	59

Figura 22 – Amostra de areia na granulometria entre 120 e 170 MESH ASTM.....	59
Figura 23 – Amostra de areia na granulometria entre 170 e 200 MESH ASTM.....	59
Figura 24 – Amostra de areia na granulometria menor que 200 MESH ASTM.....	59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva de queda de pressão durante a fluidização	38
Gráfico 2 – Incremento comparativo entre diâmetros	40
Gráfico 3 – Decremento comparativo entre diâmetros	40
Gráfico 4 – Comparação entre diâmetros - Incremento (Ida base)	41
Gráfico 5 – Comparação entre diâmetros - Decremento (Volta base)	42
Gráfico 6 – Comparativo entre valores de massa e areia (Decremento)	43
Gráfico 7 – Comparativo entre valores de massa e areia (Incremento)	43
Gráfico 8 – Influência da inserção de aluminas no leito (Incremento)	45
Gráfico 9 – Influência da inserção de aluminas no leito (Decremento)	45
Gráfico 10 – Influência da adição do pré-aquecedor de ar a temperatura ambiente (Incremento)	46
Gráfico 11 – Influência da adição do pré-aquecedor de ar a temperatura ambiente (Decremento)	47
Gráfico 12 – Influência da adição do pré-aquecedor com variação de temperatura (Incremento)	48
Gráfico 13 – Influência da adição do pré-aquecedor com variação de temperatura (Decremento)	48
Gráfico 14 – Comparação da fluidização da areia com granulometria equivalente à areia de esgoto e areia de 45/50 MESH ASTM (Incremento).....	51
Gráfico 15 – Comparação da fluidização da areia com granulometria equivalente à areia de esgoto e areia de 45/50 MESH ASTM (Decremento).....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Percentual granulométrico da amostra de areia proveniente do esgoto.....	50
Tabela 2 – Equivalente em massa para cada intervalo granulométrico em areia presente no laboratório.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LACER	Laboratório de Combustão e Energias Renováveis
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
Abrelpe	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
RSU	Sistema Integrado de Bibliotecas
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FASTEF	Fundação de Apoio a Serviços Técnicos Ensino e Fomento de Pesquisas
LFC	Leito Fluidizado Circulante
LFB	Leito Fluidizado Borbulhante
CLFC	Caldeira de Leito Fluidizado Circulante
CLFB	Caldeira de Leito Fluidizado Borbulhante
LPT	Leitura de Pressão e Temperatura
SCFH	Pé cúbico por hora
Cagece	Companhia de Água e Esgoto do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

ε	Porosidade do leito
φ	Esfericidade das partículas do leito
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
ρ_g	Densidade do gás
d_p	Diâmetro das partículas do leito
U	Velocidade do fluxo de gás
H_m	Altura inicial preenchida por areia no leito
H_{mf}	Altura da areia expandida no leito
U_{mf}	Velocidade de mínima fluidização
Re	Número de Reynolds
Re_p	Número de Reynolds de partícula
ρ_f	Massa específica do fluido
d_{sv}	Diâmetro característico da partícula
d_v	Diâmetro de uma esfera possuindo o mesmo volume da partícula
D	Diâmetro do leito
L	Comprimento do leito
d_1	Menor diâmetro da partícula
d_2	Maior diâmetro da partícula

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1	Histórico	17
3.2	Fluidização e seus regimes	20
3.3	Classificação de partículas por Geldart	23
3.4	Características do leito fluidizado borbulhante.....	25
4	METODOLOGIA	28
4.1	Aparato Experimental: reator de leito fluidizado e bancada de estudos	28
4.2	Procedimento padrão para testes fluidodinâmicos	31
4.3	Testes fluidodinâmicos na bancada de estudo.....	33
4.4	Testes fluidodinâmicos no reator de leito fluidizado	34
4.5	Testes do reator com inserção de aluminas na sua parte superior.....	34
4.6	Testes do reator com inserção do pré-aquecedor de ar.....	35
4.7	Testes do reator com granulometria de areia equivalente a do esgoto.....	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
5.1	Resultados dos testes realizados na bancada de estudos	39
5.2	Resultados dos testes realizados no reator de leito fluidizado	42
5.3	Resultados dos testes do reator com inserção de aluminas na sua parte superior.....	44
5.4	Resultados dos testes do reator com inserção do pré-aquecedor de ar	46
5.5	Resultados dos testes do reator com granulometria de areia equivalente a do esgoto.....	50
6	CONCLUSÃO	53
	REFERÊNCIAS	55
	ANEXO – TABELA DE CONVERSÃO DE ABERTURA DAS PENEIRAS	57
	APÊNDICE – IMAGENS DA SEPARAÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA DE ESGOTO.	58

1 INTRODUÇÃO

No cenário brasileiro, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a matriz energética brasileira apresenta duas fontes principais: hidroelétricas e termoelétricas. Juntas, elas são responsáveis por mais de 85% da produção nacional (61,08% hidroelétricas e 27,12% usinas termoelétricas). No entanto, mesmo que a maior parte da energia produzida no Brasil seja oriunda de fontes renováveis, a falta de diversidade na matriz nacional torna a produção de energia vulnerável às condições adversas, que possam prejudicar a geração de energia (BARROS, 2018).

Dentro desse contexto, uma alternativa para a produção energética é o aproveitamento de resíduos urbanos, tanto os sólidos como os líquidos, por serem uma fonte renovável com razoável regularidade. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe), a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) atingiu a quantia de 79 milhões de toneladas no ano de 2015, no Brasil (BARROS, 2018).

Tendo em vista a crescente produção de RSU e o aumento da demanda energética mundial, desencadeou-se um interesse em novas tecnologias que produzissem energia a partir de resíduos, entre elas a combustão de biomassa para a qual os reatores de leito fluidizado são uma opção interessante e é o foco de estudo desse trabalho.

A conversão de biomassa é responsável por mais de 70% de toda a produção de energia renovável e por até 10% do total mundial de fornecimento de energia. Entre as diversas vantagens da utilização da biomassa estão: o potencial de gerar uma grande variedade de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos que podem ser armazenados, transportados e empregados longe de onde foram colhidos; geralmente envolve custos baixos devido à sua abundância em muitos países; é ambientalmente amigável pois pode absorver parte do CO₂ que é emitido durante o consumo de combustíveis e, finalmente, pode fomentar o controle de gestão de resíduos. Os recursos de biomassa são geralmente encontrados como resíduos agrícolas ou florestais, que incluem resíduos de madeira, cana-de-açúcar, milho, trigo, arroz e soja, (MOTTA, I. L, 2018).

Em termos de tecnologias apropriadas para lidar com as propriedades físico-químicas da biomassa, ressaltam-se os reatores de leito fluidizado borbulhante, porque apresentam alto potencial tanto para combustão direta como para gaseificação da biomassa, devida à grande possibilidade de otimizar o contato gás-sólido e de promover um bom grau de mistura, como também por propiciar transferência de calor e massa aumentada, além de permitir bom controle de temperatura e flexibilidade em termos de matéria-prima. Eles também são capazes

de trabalhar em uma faixa de temperatura intermediária (700 a 900 °C), o que é adequado para a gaseificação da biomassa (BASU, 2004). No Brasil, no entanto, pouco se tem feito nessa área, existindo apenas alguns trabalhos acadêmicos (estudos em laboratório) e algumas aplicações de caldeiras industriais de empresas internacionais que, em geral, não são fabricadas no Brasil, não havendo qualquer desenvolvimento tecnológico real no país nessa área.

Ressalta-se, então, o fato de estarem sendo desenvolvidos estudos nesse sentido na Universidade Federal do Ceará, através do Laboratório de Combustão e Energias Renováveis (LACER), suportado financeiramente por uma parceria institucional entre a Cagece, o BNDES e a Fundação ASTEF, que tem como escopo de projeto a construção de uma caldeira de leito fluidizado em escala real de uso, a partir da alimentação com rejeitos (lodo e areia) de estação de tratamento de esgoto. A caldeira em desenvolvimento pode ser considerada como um sistema térmico de combustão híbrido, por queimar simultaneamente duas formas de combustível: sólido (lodo, após sofrer um processo de secagem) e gasoso (biogás). O desenvolvimento desse projeto inova, também, ao pretender utilizar areia contaminada descartada da ETE, aplicada no reator em lugar da areia de sílica (SiO_2), enquanto o material inerte do leito. A areia contaminada é purificada pelo calor resultante do processo de combustão, conforme o fluxo de biomassa fresca é mantido juntamente com o suprimento de biogás, sendo que a areia esterilizada é liberada através de uma saída localizada a 0,551 m de altura da câmara de combustão da caldeira.

Para chegar a esse objetivo, o protótipo existente no LACER serve como referência para a modelagem do projeto final, com base em experimentos específicos previamente estabelecidos, tais como: testes fluidodinâmicos; análise granulométrica de potenciais materiais inertes; checagem da influência da inserção de componentes no sistema; dentre outros, os quais ajudaram a compor a realização do presente trabalho de conclusão de curso.

Foram realizados cinco principais procedimentos e seus resultados discutidos, gerando gráficos e tabelas que ajudaram na interpretação das informações e dos dados obtidos. O reator de leito fluidizado, então, revelou-se como promissor quanto à geração de energia com sustentabilidade ambiental, pois além de propor uma destinação mais nobre aos resíduos, com a geração de energia através da queima da biomassa, resulta menores emissões de poluentes para o meio ambiente.

Ressalta-se a importância e o agradecimento dos investimentos do Banco BNDES e da Cagece nesse projeto, sem o qual tal trabalho não poderia existir.

2 OBJETIVOS

Este trabalho de conclusão de curso teve como objetivo principal a investigação dos parâmetros fluidodinâmicos que influenciam o processo de fluidização, a fim de determinar as condições adequadas de inicialização e funcionamento do reator de leito fluidizado borbulhante do Laboratório de Combustão e Energia Renovável (LACER) da UFC.

Quanto aos objetivos específicos, destacam-se:

- Estimar a altura do leito de sílica mais compatível para funcionamento do reator de leito fluidizado borbulhante;
- Realizar a análise granulométrica da amostra de areia proveniente do esgoto;
- Realizar testes de fluidização com areia de faixa granulométrica semelhante à areia do esgoto que será utilizada no protótipo de laboratório;
- Avaliar a influência do uso de um leito fixo de esferas de alumina nos perfis de queda de pressão durante a fluidização;
- Analisar a influência da inserção de pré-aquecedor de ar no comportamento das curvas de queda de pressão;
- Realizar comparações do comportamento fluidodinâmico para diferentes diâmetros do leito.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Histórico

Criada pelo alemão Fritz Winkler, em 1921, a tecnologia do leito fluidizado se trata de um processo no qual um fluxo ascendente de fluido escoar através de um leito de partículas inertes e possibilita que estas adquiram velocidade suficiente para mantê-las em suspensão. Esse processo ganhou o nome de fluidização, a arte de fazer partículas sólidas se comportarem como um líquido (BASU, 2006).

O experimento de Winkler se tratou da primeira demonstração de gaseificação de carvão em um leito fluidizado, e logo foi usado comercialmente em 1926, no entanto, apenas após 1940 que seu uso foi bastante difundido. Desde então, ocorreram vários outros desenvolvimentos diferentes relacionados a esse processo, surgindo assim outros nomes como Jahnig, Kunii, Levenspiel, Geldart e Squires.

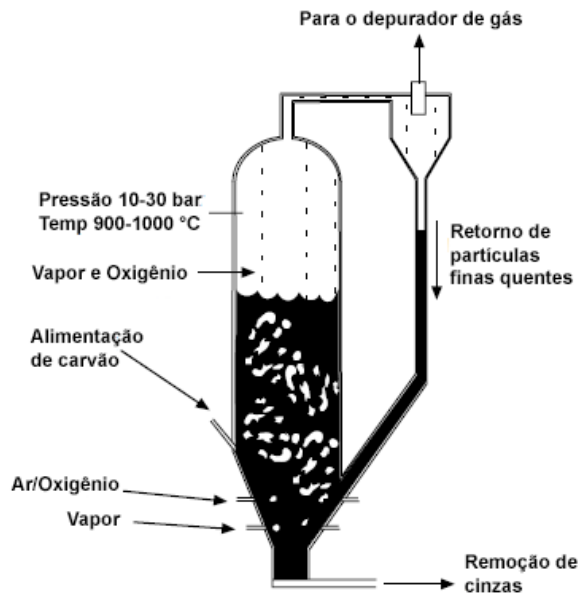
No fim dos anos cinquenta e início dos anos sessenta, o Conselho Nacional de Carvão na Grã-Bretanha dedicou-se a estudar combustão de carvão em leito fluidizado com o intuito de recuperar seu mercado fragilizado pela competição com combustíveis líquidos, mas foi apenas na década de setenta, que esse estudo teve seu ápice.

Nas décadas de 1970 e 1980, a combustão em leito fluidizado atraiu muita atenção graças a sua operação em temperaturas relativamente baixas (800 a 900 °C) e a sua capacidade em absorver SO_2 através do uso de calcário e dolomita (GELDART, 1986).

A aplicação da combustão de leito fluidizado é dividida principalmente em gaseificadores de leito fluidizado borbulhante, e de leito fluidizado circulante. Sendo borbulhante e circulante alguns dos exemplos de regime que o material inerte presente no leito pode se comportar e que serão melhores apresentados na seção 3.2 desse trabalho.

Caldeiras de leito fluidizado borbulhante (CLFB) são chamados também de gaseificadores de leito fluidizado de primeira geração, e eram nesse regime que estavam o material inerte nos primeiros modelos de caldeira de leito fluidizado. Essa tecnologia tornou-se padrão para secagem, produção de calor e vapor e geração de energia para aplicações menores (menos de 25 MW) (OKA, 2004). Uma representação desse tipo de caldeira pode ser vista na Figura 1.

Figura 1 – Exemplo de gaseificador de leito fluidizado borbulhante.



Fonte: Basu (2006) traduzido pela autora.

Gaseificação de carvão, craqueamento catalítico de hidrocarbonetos, reações catalisadas e não catalisadas de partículas gasosas, processos de secagem e mistura são apenas alguns exemplos de reações e tecnologias nas quais o processo de fluidização borbulhante é usado. (OKA, 2004)

Em 1982, começaram a existir CLFB alimentadas a biomassa, cuja primeira foi uma caldeira projetada por Prabir Basu de 10 t/h que era alimentada com casca de arroz. Desde então, foram desenvolvidos e comercializados vários tipos de caldeiras de leito fluidizado borbulhante queimando com uma grande variedade de combustíveis ao redor do mundo.

Segundo Oka (2004), entre as vantagens da combustão em leito fluidizado estão duas principais. Uma delas é a mistura intensiva das partículas, ocasionadas pela presença do material inerte fluidizado no forno, que permite que a combustão ocorra sob as mesmas condições para todo o leito. A outra vantagem é a grande capacidade térmica e transferência de calor para as partículas de combustível, que permitem a ignição até mesmo de combustíveis de baixa qualidade.

Já sobre as desvantagens da combustão em leito fluidizado borbulhante tem-se a mistura lateral das partículas ser menos intensiva em uma ordem de grandeza comparado com a mistura vertical, levando assim a necessidade de grande número de pontos de alimentação de combustível, e a eficiência de combustão relativamente baixa.

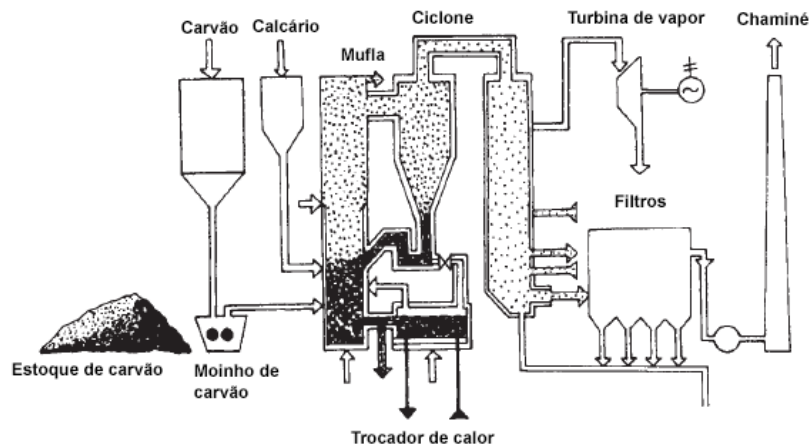
Em 1938, surgia a caldeira de leito fluidizado circulante (CLFC), também chamada de caldeira de segunda geração, um novo tipo de caldeira de leito fluidizado. Sua criação aconteceu quando Warren Lewis e Edwing Gilliland, do Instituto de tecnologia de Massachusetts, tentavam encontrar um processo apropriado de contato gás-sólido para o craqueamento catalítico de fluidos. No lugar, eles descobriram o processo de leito fluidizado rápido sem conhecimento da invenção de Winkler (BASU, 2006).

As CLFC foram inicialmente usadas apenas na indústria petroquímica, porém, mais tarde descobriu-se seu potencial para operação de sólidos finos a altas velocidades.

Nessas caldeiras o material inerte do leito está em um regime de fluidização rápida e a combustão acontece na câmara com o sólido se movendo verticalmente, sendo separado pelo ciclone e retornando ao fundo da câmara, como pode-se ver no esquema apresentado na Figura 2.

As caldeiras LFC têm algumas vantagens sobre as LFB como: melhor transferência de calor e massa, devido à alta velocidade de fluidização, e maior eficiência, graças a um maior contato gás-sólido, caldeiras LFC podem gerar em média 100 MW ou mais. No entanto, para o uso de CLFC há a necessidade de uma estrutura com comprimento elevado e de altas velocidades (pequenas escalas de leito circulante são raramente viáveis); essas caldeiras possuem também, um processo de arranque excessivamente longo e sua fabricação é muito mais complexa, necessitando de um alto nível tecnológico (Oka, 2004). Por esses e outros motivos o protótipo estudado opera em regime borbulhante e o presente trabalho focará apenas em reatores desse tipo.

Figura 2 – Esquema da caldeira de combustão em leito fluidizado circulante com sistemas auxiliares.



Fonte: Oka (2004), traduzido pela autora.

Tanto a caldeira de primeira geração quanto a de segunda geração aplicadas no setor industrial têm provado suas vantagens nos últimos anos de operação, seja para a produção de água quente, vapor ou eletricidade. Essa nova tecnologia deve fornecer alta eficiência de combustão, proteção ambiental satisfatória e aplicação para combustíveis de baixa qualidade.

3.2 Fluidização e seus regimes

A fluidização é um fenômeno no qual um aglomerado de partículas, inicialmente estático, recebe um fluxo ascendente de um fluido por seu comprimento, escoando a partir de um distribuidor, e, no ponto que esse fluido adquirir velocidade suficiente, as partículas se mantêm em suspensão sem serem arrastadas juntamente com o fluido. Para ilustrar melhor esse processo tem-se a situação descrita na Figura 3:

Um recipiente é esquematizado abaixo no qual o material inerte do leito, comumente areia, por seu baixo custo e fácil aquisição, está estático e preenche o recipiente até a altura H_m . A região dentro do tubo preenchida por partículas inertes onde a maioria das reações ocorre é dominada pelo leito. O comportamento desse leito pode ser modificado de acordo com mudanças de variáveis ao seu redor, como alterar a temperatura ou inserção de gases.

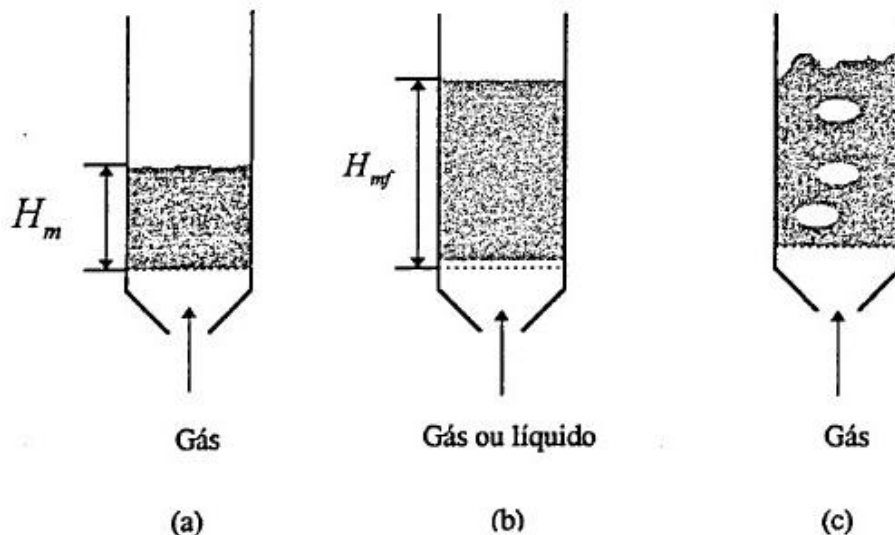
No fundo do recipiente, existe uma malha, pela qual será passado um fluido gasoso. Essa malha funciona como um distribuidor e a partir dessa ação podem ocorrer as seguintes situações:

- Se a velocidade do gás que entra pelo distribuidor for baixa, as partículas do leito permanecerão inalteradas e estáticas enquanto o determinado fluido passa pelo espaço entre elas. Essa situação se trata do regime estacionário, e está representado na Figura 3 (a).
- Quando a velocidade do gás aumenta um pouco, as partículas de areia começam a agitar-se ao redor de um ponto médio. Se essa velocidade continuar aumentando, as partículas começam a ficar suspensas na corrente ascendente de fluido e conseqüentemente a altura do leito aumenta para H_{mf} . Isso acontece porque a perda de carga vai aumentando até anular a força gravitacional das partículas, esse regime é chamado

fluidização incipiente e a velocidade nesse ponto é chamada de velocidade de mínima fluidização (U_{mf}) [Figura 3 (b)];

- No momento em que a velocidade do gás que passa pela areia ultrapassa a vazão em que ocorria a fluidização incipiente, ele ascende pelo leito na forma de bolhas. Bolhas essas que estouram ao chegar na superfície, abandonando o aspecto plano que podia ser visto anteriormente. Esse regime chama-se borbulhante e esse trabalho será focado nele [Figura 3 (c)].

Figura 3 – Representação do fenômeno de fluidização. (a) Altura do leito em repouso; (b) Altura do leito em estado de fluidização incipiente; (c) Bolhas gasosas em leitos fluidizados.

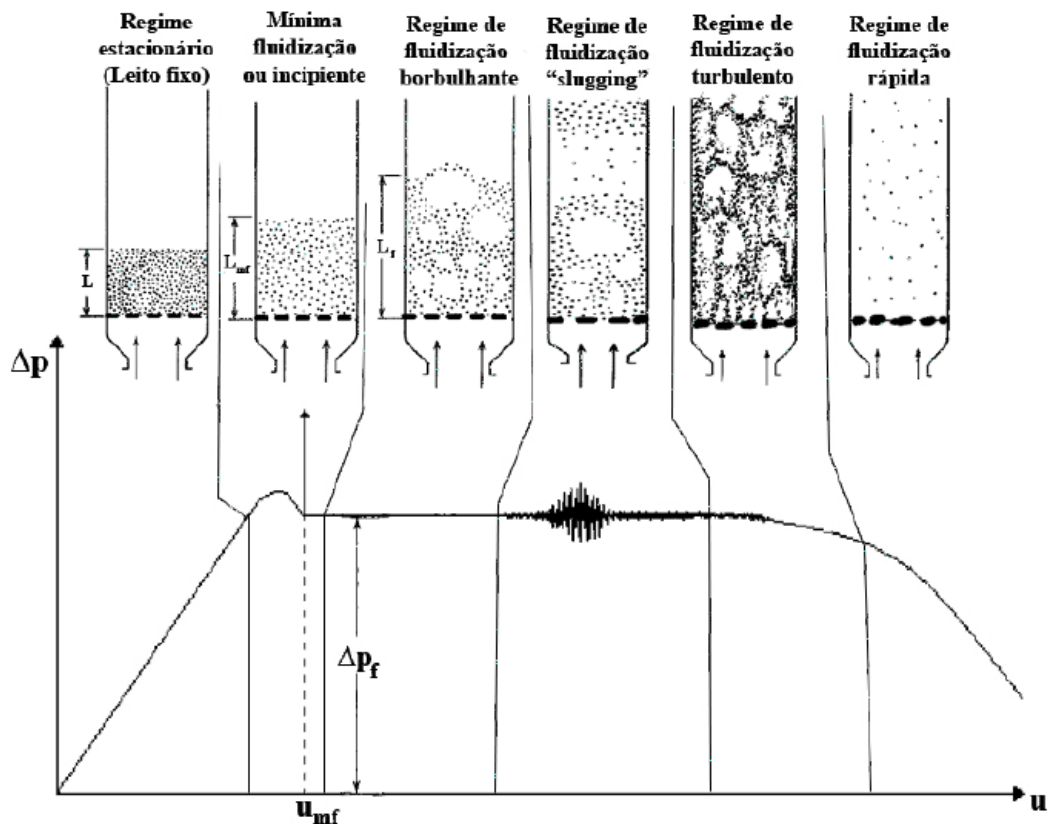


Fonte: Ribeiro (1996).

A forma das bolhas gasosas pode ser esférica, tipo cogumelo ou bolha tubular (slug), (Davidson et al, 1963).

Uma vez fluidizado, o sistema formado pelo leito mais o gás que passa pelo leito pode ser considerado uma suspensão que possui a maioria das características apresentadas pelos fluidos verdadeiros. Dessa forma, esse sistema possui a capacidade de passar por tubulações e válvulas e até de um vaso para outro por diferença de pressão hidrostática.

Figura 4 – Representação dos regimes de fluidização juntamente com a curva de queda de pressão pela velocidade do fluxo.



Fonte: Feitosa (2015).

Na Figura 4 estão representados todos os regimes de fluidização de um material inerte juntamente com sua curva de perda de carga (ou pressão) pela velocidade do fluido que ascende por seu comprimento.

Seguindo a ordem dos regimes, após o regime borbulhante, apresentado primeiramente pela Figura 3, tem-se o regime de fluidização ‘slugging’. Nele, são formadas grandes bolhas pela junção de bolhas menores e elas ocupam toda a seção transversal do leito, empurrando uma grande quantidade de partículas para cima, num fluxo empistonado. Esse é o regime em que há maiores flutuações na queda de pressão do gás.

Na fluidização turbulenta, a queda de pressão através do leito diminui com o aumento de velocidade do fluido. Segundo Cuenca e Anthony (1995) este regime é caracterizado por grandes números de Reynolds e grande movimentação caótica de vazios e aglomerados de partículas através do leito. O regime de fluidização rápida é o aplicado em caldeiras de leito fluidizado circulantes. Nele, a velocidade gás-sólido de suspensão é muito alta e as partículas são arrastadas, se movendo tanto no sentido ascendente como descendente, e recuperadas com o auxílio de um ciclone para a base do reator, provocando assim um

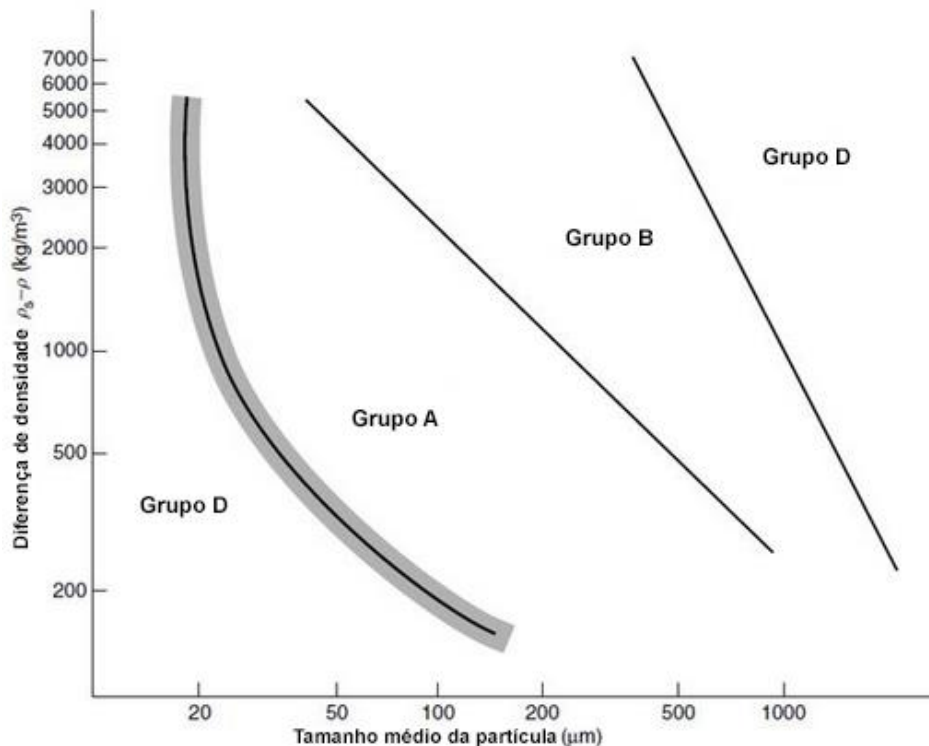
refluxo de sólidos que garantem uma uniformidade na temperatura da caldeira. Para velocidades ainda maiores, ocorre o transporte pneumático.

Quando fluidizado, o leito se comporta como um líquido em ebulição, apresentando características como sólidos poderem escoar através de uma abertura no recipiente, objetos mais leves flutuarem no topo do leito e a sua superfície permanecer horizontal mesmo que o recipiente seja inclinado, Nitz (2018).

3.3 Classificação de partículas por Geldart

Nem toda partícula, quando submetida à fluidização gasosa, comporta-se da mesma maneira. As propriedades como forma e densidade irão diretamente influenciar no comportamento das partículas presentes em um leito fluidizado. Dessa maneira, conclusões extraídas de dados obtidos na fluidização de certo material não podem, a princípio, ser extrapoladas para outro. Visando tornar as generalizações possíveis, ou pelo menos minimizar as chances de erro, Geldart (1973) classificou o comportamento de sólidos fluidizados por gases em quatro categorias: A, B, C e D, como pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 – Classificação de partículas por Geldart.



Fonte: Coulson e Richardson, *Chemical engineering* Vol.2, com modificações da autora.

A Figura 5 mostra essa classificação de partículas para diferentes diâmetros de partículas (d_p) e diferentes densidades de partículas.

- Grupo A: partículas com pequenas dimensões, diâmetros menores que $30\mu m$, e baixas densidades, menores que $1,4\text{ g/cm}^3$. Apresentam fácil fluidização e expandem-se consideravelmente antes de surgirem as primeiras bolhas, que aparecem com velocidades superiores à de mínima fluidização.
- Grupo B: partículas com dimensões médias, diâmetros geralmente maiores que $40\mu m$ e menores que $500\mu m$, e médias densidades, maiores que $1,4$, porém, menores que 4 g/cm^3 . O leito não sofre muita expansão e o surgimento das primeiras bolhas acontece com a velocidade de mínima fluidização. A areia, comumente usada como material inerte dos leitos fluidizados, pertence a esse grupo.
- Grupo C: partículas com pequenas dimensões, extremamente finas com diâmetros menores que $20\mu m$. Apresentam difícil fluidização pois possuem tendência coesiva, formando assim canas preferenciais à medida que a velocidade do gás aumenta. Uma alternativa para promover a fluidização mais uniforme nessas partículas é promovendo agitação. Talco e farinha são exemplos de partículas pertencentes a esse grupo.
- Grupo D: partículas com grandes dimensões e grandes densidades. Necessitam de uma alta velocidade do gás para fluidizar, maior que a velocidade de mínima fluidização, e a mistura do material é pequena, podendo ocorrer ainda a formação de jorro. Leitos rasos são recomendados ao se trabalhar com essas partículas. Um exemplo de partículas D é o café.

De acordo com Nitz (2018), apesar da existência de outros critérios de classificação, como Gupta & Sathiyamootthy (1999), a classificação de grupos de Geldart (1973) é muito bem aceita e citada com maior frequência na literatura.

3.4 Características do leito fluidizado borbulhante

Quando o fluxo de gás entrando no leito fluidizado chega na velocidade de mínima fluidização, ele também provoca uma queda de pressão. Isso acontece devido à força de arrasto gerada pelo contato fluido-partícula. Segundo (BASU, 2006), tal queda de pressão pode ser expressa através da seguinte equação 1 que considera a perda total sendo a soma das perdas cinética e viscosa:

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu U}{(\varphi d_p)^2} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon) \rho_g U^2}{\varepsilon^3 \varphi d_p} \quad (1)$$

Onde:

ε : porosidade do leito;

φ : esfericidade das partículas do leito;

μ : viscosidade dinâmica do fluido (Pa.s);

ρ_g : densidade do gás (kg/m³);

d_p : diâmetro das partículas do leito (m);

U : velocidade do fluxo de gás (m/s).

Outro parâmetro importante para caracterizar as condições de fluidização chama-se número de Reynolds da partícula (Re_p). Esse número é usado para classificar o escoamento como laminar ou turbulento, como pode ser visto na equação 2:

$$Re_p = \frac{u \cdot \rho_f \cdot d_{sv}}{\mu} \quad (2)$$

Onde u é a velocidade do fluxo de gás. ρ_f é a massa específica do fluido, μ é a viscosidade dinâmica do fluido e d_{sv} é o diâmetro característico da partícula, dado pelo produto da esfericidade da partícula e do diâmetro d_v , que significa o diâmetro de uma esfera que tem o mesmo volume da partícula, como pode ser visto na equação 3:

$$d_{sv} = \varphi \cdot d_v \quad (3)$$

- Sob fluxo laminar ($Re_p < 1$), o primeiro termo do lado direito da equação acima é dominante, anulando o segundo termo e;
- Sob fluxo turbulento ($Re_p > 1000$), o segundo termo do lado direito da equação acima é dominante, anulando o primeiro termo.

É importante não confundir o parâmetro Re_p com o número de Reynolds (Re), mostrado na equação 4:

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot D}{\mu} \quad (4)$$

Onde ρ é a massa específica do fluido, u é a velocidade média do fluido, μ é a viscosidade dinâmica do fluido e D é o diâmetro do tubo do fluxo.

Se torna necessário definir algumas propriedades presentes no estudo do leito fluidizado, como diâmetro da partícula, porosidade e esfericidade.

Segundo Oka (2004), para caldeiras de leito fluidizado, a forma mais comumente usada para determinar o diâmetro da partícula (d_p) é realizar a média geométrica entre o menor diâmetro de partícula (d_1) e o maior diâmetro de partícula (d_2). Esses valores são encontrados através dos valores de abertura da peneira em que as partículas são passadas, a menor abertura originará d_1 e o maior abertura, d_2 , como pode ser visto na equação 5:

$$d_p = \sqrt{(d_1 \cdot d_2)} \quad (5)$$

A porosidade (ε), equação 6, representa o volume de vazios existente em todo o volume do leito, ou seja, é contabilizado apenas o volume que não está ocupado por partículas e divide-se esse valor pelo volume total:

$$\varepsilon = \frac{\text{Volume vazio}}{\text{Volume total}} \quad (6)$$

Quando se inicia a fluidização, há um aumento da porosidade e da altura do leito, e é importante notar que existe uma relação entre eles, equação 7, que torna possível o cálculo da esfericidade com dados experimentais:

$$S \cdot L_1(1 - \varepsilon_1) = S \cdot L_2(1 - \varepsilon_2) \quad (7)$$

Sendo a primeira parte da equação representando o volume de sólidos no leito estático, e a segunda parte o volume de sólidos no leito fluidizado. Simplificando, tem-se a equação 8:

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{(1 - \varepsilon_1)}{(1 - \varepsilon_2)} \quad (8)$$

Para a esfericidade (φ), equação 9, que mede o afastamento de uma partícula da forma esférica, o cálculo feito é mostrado a seguir e $0 < \varphi < 1$:

$$\varphi = \frac{\textit{superfície da esfera de igual volume da partícula}}{\textit{superfície externa da partícula real}} \quad (9)$$

De acordo com Oka (2004) no entanto, Wen e Yu mostraram através de cálculos experimentais que é possível usar as equações 10 e 11 a seguir:

$$\frac{1}{\varphi u_{mf}^3} \cong 14 \quad (10) \quad \frac{1-u_{mf}}{\varphi^2 u_{mf}^3} \cong 11 \quad (11)$$

Com a velocidade de mínima fluidização conhecida, essa se torna outra forma de encontrar a esfericidade.

4 METODOLOGIA

4.1 Aparato Experimental: reator de leito fluidizado e bancada de estudos

O reator de leito fluidizado presente no LACER foi projetado para o projeto, em parceria com a Cagece, que tem como objetivo utilizar o lodo do esgoto e biogás como combustível e purificar a areia contaminada.

O protótipo, Figura 6, possui 110 mm de diâmetro, 0,935 m de comprimento, feito de aço com revestimento interno de concreto refratário, possui 12 pequenas aberturas, (LPT's), em sua parte posterior para eventuais monitoramentos da temperatura feitos com o auxílio de termopares tipo K em conjunto com um termômetro digital portátil (marca Equitherm DM6802B). Em sua estrutura existem outras três entradas do lado esquerdo, destinadas para avaliar a melhor altura possível para alimentação de biomassa, enquanto do lado direito há uma entrada e uma saída para que a areia contaminada possa entrar e areia purificada possa sair, possibilitando assim a renovação da areia usada. No lado posterior há uma entrada para o engate do lança-chamas que provocará a centelha da combustão.

Figura 6 – Protótipo em escala de laboratório da caldeira de leito fluidizado.



Fonte: Fornecido pela autora.

Para que a areia não entre do leito para a base do reator, o distribuidor localizado no *plenum* do protótipo, possui um conjunto de três telas metálicas de malhas finas sobrepostas. Dessas malhas, duas possuem abertura de 45 MESH ASTM ($< 0,354$ mm) e uma, central, possui abertura de 200 MESH ASTM ($< 0,074$ mm), de modo a impedir a sílica de entrar no leito e ao mesmo tempo permitir a passagem do ar de fluidização. O *plenum* se trata de uma peça cônica toda feita de aço onde o conjunto de telas é colocado e onde o ar é distribuído para o leito durante os testes. Durante os testes fluidodinâmicos, medidas de pressão são realizadas tanto na base do reator como após o *plenum* com dois manômetros U, com faixa de medição de 0 a 1000 mmH₂O. Na Figura 7 mostra-se o manômetro usado para realizar medidas de pressão referente à base do leito fluidizado, posicionada logo após a tela com as três malhas citadas. O outro manômetro usado possui maior comprimento e está responsável por medir a pressão na entrada do *plenum*.

Figura 7 – Manômetro em U usado para medir pressão da base no leito.



Fonte: Obtida pela autora.

Para o controle da velocidade do gás, ou vazão, usou-se 4 rotâmetros (Modelo Rate Master; fabricante Dwyer), 3 rotâmetros de faixa de medição de 0 a 100 SCFH, (pé cúbico por hora), com valor de divisão de escala de 5 SCFH e 1 rotâmetro de faixa de medição 0 a 50 SCFH, com valor de divisão de escala de 2 SCFH. Buscou-se priorizar o uso dos mesmos na faixa de medida mais confiável de 25% a 75% do valor máximo de cada rotâmetro.

Quanto ao material inerte, foi usada areia de praia natural. Realizou-se e separação da areia, separando-a em faixas granulométricas. Para isso pequenas amostras de areia passaram por uma sequência de peneiras dispostas verticalmente e com malhas de 20, 45, 50, 100, 120, 170 e 200 MESH ASTM para separá-la em faixas de diferentes granulometrias. A granulometria escolhida para ser usada em testes foi o intervalo de 45 – 50 MESH ASTM, por motivos de resultados de artigos pesquisados sugerirem essa faixa como equivalente para a granulometria de areia proveniente do esgoto. O necessário para realização de testes eram aproximadamente 7 kg de areia na granulometria de 45/50 MESH ASTM então um valor bem maior que esse de areia foi peneirada, já que a amostra inicial continha granulometrias de todas as faixas. O autor Feitosa (2015) realizou a análise granulométrica em laboratório de uma amostra dessa faixa de areia e chegou-se no valor médio de 321 μm para a areia de 45/50 MESH ASTM.

O compressor responsável por fornecer ar comprimido para realizar os testes de fluidização tem 2 HP de potência, reservatório com 93 L de capacidade, e da marca Schulz (modelo CSL 10/100 twister bravo, 140 psi). Foi instalado na linha de alimentação um conjunto de preparação do ar composto por regulador de pressão, filtro e purgador automático. Além disso, para verificação da pressão da linha de ar comprimido fornecida ao medidor de vazão foi instalado um manômetro analógico com faixa de operação de 0 a 10 kgf/cm^2 (marca Record).

Quanto a bancada de estudos de fluidização, ela se trata de um sistema com três cilindros de acrílico de diâmetros diferentes, onde na parte superior de cada tubo existe uma tubulação de PVC responsável por levar as partículas mais finas existentes no leito para um filtro e um sistema de coleta de pó. Os diâmetros internos dos tubos são de 0,044 m, 0,065 m e 0,090 m, e foram assim definidos baseado em estudos de vários trabalhos na área, realizado por integrantes anteriores do LACER. O comprimento dos tubos é de 1 m.

Na base de cada tubo existe um distribuidor semelhante ao do reator de leito fluidizado, onde também possui um conjunto de três telas metálicas de malhas finas sobrepostas de mesmas especificações e está localizado em peças cônicas chamadas de plenum, responsáveis por distribuir o ar nos tubos. No entanto, o material usado nos três plenums para os tubos de acrílico foi teflon. Nas Figura 8 e 9 o *plenum* presente no tubo de diâmetro 0,090 m é mostrado.

Figuras 8 – Plenum de teflon presente na base do tubo de acrílico de diâmetro 0,090 m.



Fonte: Obtida pela autora.

Figuras 9 – Plenum de teflon presente na base do tubo de acrílico de diâmetro 0,090 m.



Fonte: Obtida pela autora.

Quanto à leitura de pressão e o controle da vazão do gás foram usados os mesmos manômetros U e rotômetros acima citados. O ar comprimido de alimentação provém do mesmo compressor usado no reator de leito fluidizado.

4. 2 Procedimento padrão para testes fluidodinâmicos

Os cinco principais procedimentos realizados foram: variar a altura do material inerte dentro do leito; inserir aluminas suspensas na parte superior do leito; verificar

influência da inserção do pré-aquecedor de ar nos perfis de pressão durante a fluidização a temperatura ambiente e em operação e, finalmente comparar o comportamento fluidodinâmico para diferentes diâmetros do leito.

Quanto aos testes fluidodinâmicos para a elaboração da curva de queda de pressão, eles são semelhantes e por isso, essa seção será reservada para detalhar as etapas para realização do experimento.

01. Verificar se os níveis de água dentro dos manômetros U estão ajustados no ponto zero prontos para realizar medidas de pressão;
02. Fazer o teste de estanqueidade da linha de alimentação, dos bujões, conexões e entradas e saídas dos rotômetros realizando os ajustes para a vedação necessária;
03. Pesagem da quantidade de areia que será usada e transferência para o tubo de acrílico ou reator, realizando uma compactação suave do material inerte;
04. Realizar medida da altura do leito preenchido, com o auxílio da malha anexada ao tudo de acrílico ou uma régua para o caso do reator;
05. Abertura da válvula do compressor, preenchendo, assim, a linha com ar comprimido;
06. Abertura cuidadosa da válvula do rotômetro de ar, iniciando com a vazão mínima de 10 SCFH (ft^3/h) para o rotômetro com valor máximo de escala de 100 SCFH;
07. Anotação em uma planilha de dados previamente preparada com valores de vazão, ocasional altura do leito, queda de pressão na base e no plenum (em mmH_2O) para a vazão correspondente;
08. Incremento gradual na vazão do rotômetro, com a devida observação constante para notar os acontecimentos no leito (começo da fluidização, começo do empistonamento e etc).
09. Após o leito começar a empistonar, o que significa o término do regime de fluidização borbulhante e que atualmente ele está na fluidização “slug”, inicia-se a redução da vazão no rotômetro de ar, documentando o decremento da vazão e seus acontecimentos da mesma maneira que no incremento, até a vazão chegar a zero.
10. Fechamento total da válvula do compressor e anotação final da altura do leito.

Esse processo é o mesmo em cada um dos procedimentos, com o objetivo de coletar dados para fazer curvas ou observações, apenas alguns parâmetros serão modificados, como a inserção de algum componente ao reator, ou a granulometria da areia inserida no leito.

4.3 Testes fluidodinâmicos na bancada de estudo

A bancada fluidodinâmica do Laboratório de Combustão e Energias Renováveis, como mencionado anteriormente, possui três tubos de acrílico de diâmetros internos de 0,044 m, 0,065 m e 0,090 m, como pode ser visto na Figura 10.

Em experimentos anteriores, Feitosa (2015) realizou testes fluidodinâmicos nos três tubos com areia de granulometria equivalente ao intervalo de 20 a 45 MESH ASTM com o intuito de estudar a influência do diâmetro na curva de pressão por vazão.

Feitosa (2015) também realizou testes com areia mais fina, na granulometria média de 321 μm , equivalente a 45/50 MESH ASTM, para verificar a influência de diferentes granulometrias nas curvas de queda de pressão, no entanto, apenas nos diâmetros de 0,044 m e 0,090 m. No procedimento descrito nessa seção foi realizado testes nessa mesma granulometria no tubo de acrílico de diâmetro interno de 0,065 m e no reator de leito fluidizado de diâmetro de 0,110 m para perceber a influência completa da alteração da granulometria.

Figura 10 – Bancada para experimentos fluidodinâmicos.



Fonte: Obtida pela autora.

Os testes fluidodinâmicos realizados seguem exatamente o processo descrito em 4.2. Foram realizados dois ciclos (incremento de vazão logo seguido pelo decremento da mesma) para cada diâmetro.

4. 4 Testes fluidodinâmicos no reator de leito fluidizado

O reator de leito fluidizado presente no LACER possui 0,935 metro de comprimento. Existe a necessidade da especificação de uma altura do material inerte na qual ocorrerá as operações de testes fluidodinâmicos e posteriormente combustão. O procedimento apresentado nessa seção descreverá como foi encontrada essa altura.

Começando com 23 mm, a altura resultante ao inserir 500 g de areia no reator, foram realizados testes fluidodinâmicos, seguindo o processo descrito em 4.2, e traçado curvas para avaliar qual melhor comportamento referente a melhor altura.

Posteriormente ao ensaio com 500 g, foram feitos testes com 1 kg; 2 kg; 3 kg; 4 kg; 5 kg; 5,5 kg; 6 kg; 6,25 kg e 6,5 kg, resultando nas respectivas alturas: 54 mm; 142 mm; 220 mm; 300 mm; 355 mm; 400 mm; 435 mm; 442 mm e 460 mm.

4. 5 Testes do reator com inserção de aluminas na sua parte superior

O protótipo do reator de leito fluidizado foi projetado de forma que sua parte central principal fosse dividida em três componentes, como pode ser visto nas Figuras 11 e 12.

Figuras 11 – Peças do protótipo do reator de leito fluidizado.



Fonte: Feitosa (2015).

Figuras 12 – Peças do protótipo do reator de leito fluidizado.



Fonte: Feitosa (2015).

A parte central da Figura 12 é a peça do topo do reator, ela possui revestimento interno de concreto refratário e seu invólucro é feito de aço. A superfície do leito não chegará até essa peça e seu diâmetro interno é ligeiramente maior, sendo de 0,174 m.

Depois de montado o protótipo, um dos procedimentos realizados foi o de inserir no interior dessa estrutura esferas de alumina (Al_2O_3) a altura de 150 mm equivalente a 7735 g de aluminas. Tomou-se a precaução de colocar uma pequena grade entre a peça do meio do protótipo e a do topo para evitar que aluminas caíssem diretamente na areia. Foram realizados testes como descrito na seção 4.2.

Como as aluminas possuem resistência a altas temperaturas, são inertes, possuem grande porosidade e boa estabilidade térmicas elas serão usadas futuramente para evitar grandes perdas de calor quando o protótipo estiver experimentando ensaios de combustão.

Portanto, o experimento serviu para verificar se existiria alguma influência da presença dessas aluminas na curva de queda de pressão a temperatura ambiente.

4. 6 Testes do reator com inserção do pré-aquecedor de ar

O pré-aquecedor de ar de entrada a ser inserido na linha de alimentação de gás do reator de leito fluidizado foi constituído de um pequeno invólucro de metal repleto de esferas de alumina e um trocador de calor espiral, com 20 voltas, feito de tubo de cobre. Enrolado no trocador de calor fabricado, havia um fio de resistência que, ligado a um variador de tensão graduado (Varivolt 0 – 240 V), gerava aquecimento (Figura 14). Para evitar mais perdas de calor, enrolou-se o invólucro de metal do pré-aquecedor com um isolamento térmico de fibra cerâmica da marca Kawool e alumínio. A Figura 13 mostra a peça referida.

Figura 13 – Pré-aquecedor de ar.



Fonte: Obtida pela autora.

Figura 14 – Variador de tensão gradual (Varivolt).



Fonte: Obtida pela autora.

Quando aos procedimentos usando o pré-aquecedor de ar, foram feitos dois. Um no qual o pré-aquecedor foi inserido na linha do reator e realizou-se testes fluidodinâmicos a temperatura ambiente, como descrito em 4.2, para verificar possíveis influências de sua presença na curva final. E outro experimento onde foi usado um variador de tensão gradual (Varivolt) para aplicar voltagem em uma resistência e com isso, permitir o aquecimento do ar que passasse pelas espirais do tubo de cobre no interior do invólucro do pré-aquecedor.

Para acompanhar o aumento na temperatura, foram usados quatro termopares tipo K: o primeiro localizado na entrada do pré-aquecedor de ar; o segundo na imediata saída do pré-aquecedor; o terceiro no LPT 1 e finalmente, o último no LPT 2. Também havia um multímetro para medir a exata voltagem proveniente do variador de tensão. Todos esses valores foram documentados durante os testes fluidodinâmicos, tanto para o incremento nos

valores de vazão quanto no decremento, juntamente com os eventuais valores de variação de pressão. Com isso, foi possível traçar as curvas de queda de pressão.

4.7 Testes do reator com granulometria de areia equivalente a do esgoto

Com uma amostra da areia de esgoto vinda da Cagece, foi feita uma análise granulométrica de 84 g com a utilização da sequência de peneiras dispostas verticalmente e com malhas de 20, 45, 50, 100, 120, 170 e 200 MESH ASTM. A Figura 15 mostra uma dessas peneiras com a amostra da areia.

Figura 15 – Peneira de 14 MESH ASTM com amostra da areia de esgoto.



Fonte: Obtida pela autora

Foram fotografados cada conjunto de areia correspondente ao intervalo entre as malhas em pequenos potes, e, essas imagens podem ser encontradas no Anexo 2.

Feito isso, calculou-se o percentual de cada intervalo e reproduziu-se esses números nas granulometrias equivalentes de areia existentes no laboratório. Devido à falta de areia nas granulometrias maiores que 14 MESH ASTM e entre 14 a 20 MESH ASTM, usou-se a massa equivalente desses intervalos no intervalo subsequente, de 20 a 45 MESH ASTM, como forma de diminuir a diferença. Também foram feitas as médias ponderadas das granulometrias de areia de esgoto e da equivalente em areia do laboratório.

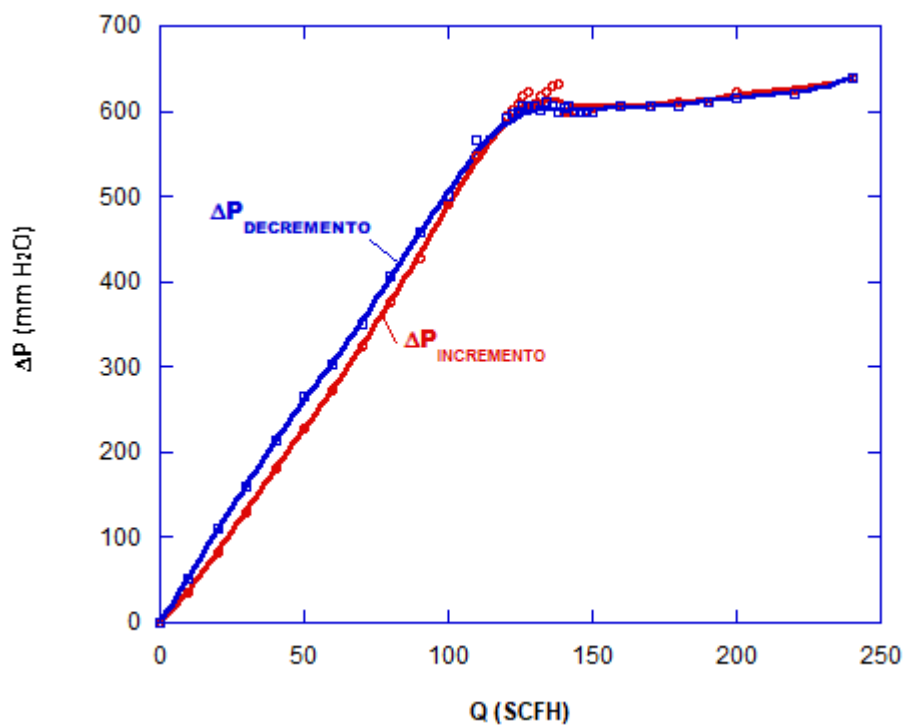
Escolheu-se realizar o teste com a massa de 6,25 kg nas devidas proporções granulométricas da areia de esgoto. Após a mistura da areia de diferentes granulometrias, realizou-se testes como o descrito na seção 4.2.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, para entendimento completo dos resultados apresentados a seguir, será detalhado o perfil característico da curva resultante do processo de fluidização.

O Gráfico 1 mostra a curva de queda de pressão no leito (ΔP) versus a vazão de entrada do ar (Q) de 6,25 kg de areia da granulometria 45/50 MESH ASTM equivalente a 321 μm , durante o incremento e o decremento de vazão. Os termos incremento e decremento indicado no gráfico se referem a curva de pressão durante o acréscimo e decréscimo de vazão do fluido, característica que será repetida em gráficos futuros. Os valores de pressão foram lidos por um manômetro U.

Gráfico 1 – Curva de queda de pressão durante a fluidização.
(Massa: 6,25 kg; granulometria: 45/50 MESH ASTM.)



Fonte: Elaborado pela autora.

À medida que se aumenta a vazão, e conseqüentemente a velocidade do ar de entrada, no leito, a perda de carga aumenta até atingir um valor máximo de pressão. Após esse valor, qualquer incremento a mais na vazão, ou apenas com a permanência prolongada no mesmo valor de vazão, causa uma queda de pressão, e no leito, é possível ver movimentações da areia, pois a fluidização se inicia.

Partindo desse ponto, ao continuar aumentando a vazão do ar de entrada, os valores de pressão tendem a permanecer constante e isso caracteriza o regime de leito

fluidizado borbulhante. É nessa faixa de constância que a caldeira final do projeto funcionará. A queda de pressão só aumentará significativamente com grandes incrementos na velocidade de fluidização, e, esse aumento sugere o começo do regime de transição entre borbulhante e turbulento (leito empistonado). O regime empistonado não é interessante para operação da caldeira de leito fluidizado por não ser estável.

Outra característica marcante da curva $\Delta p \times Q$ do processo de fluidização é a diferença entre os picos de pressão durante a curva de incremento e a de decremento de vazão, como pode ser visto no Gráfico 1. Geldart (1987) cita que o valor máximo de pressão pode variar, aumentando com o grau de compactação do leito antes dos testes. Quanto mais compactada tiver a areia, maior esse pico se apresentará. É por essa razão que a curva de decremento se torna mais interessante para se avaliar a operação, pois não possui influência visível da compactação do leito.

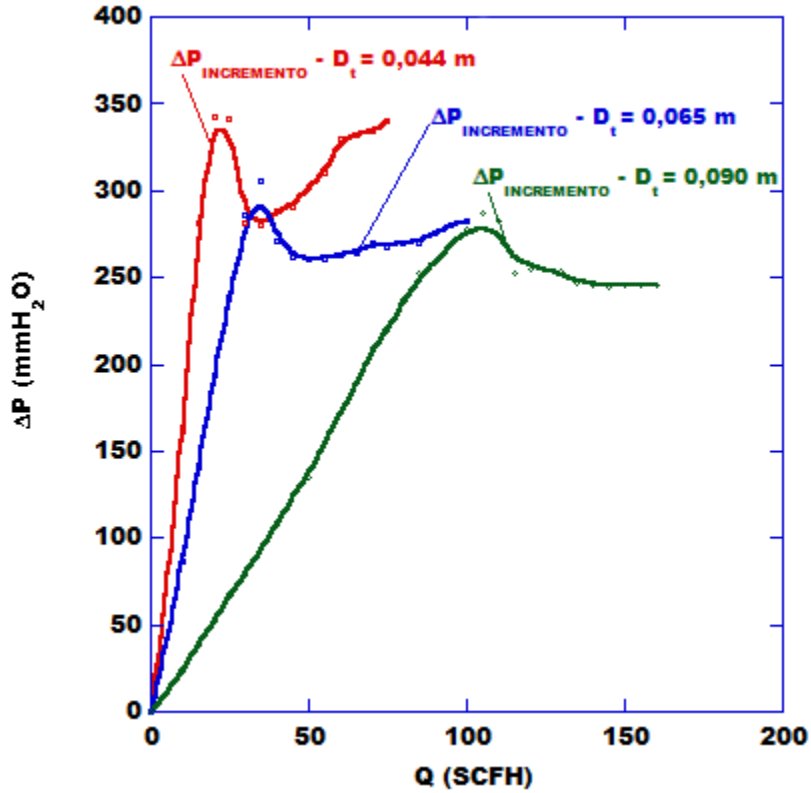
É importante notar que os valores de pressão são dados em milímetros de coluna d'água (mm H₂O) medidos a partir de manômetros U, cuja precisão já foi provada equivalente a de um sensor piezo-resistivo (Kistler), por Feitosa (2015).

O Gráfico 1 apresenta semelhanças com a Figura 3, mostrando os regimes de fluidização até chegar no começo do regime empistonado (slugging). A Figura 3 mostra a aparência dessa curva completa, para todos os diferentes regimes de fluidização.

5.1 Resultados dos testes realizados na bancada de estudos

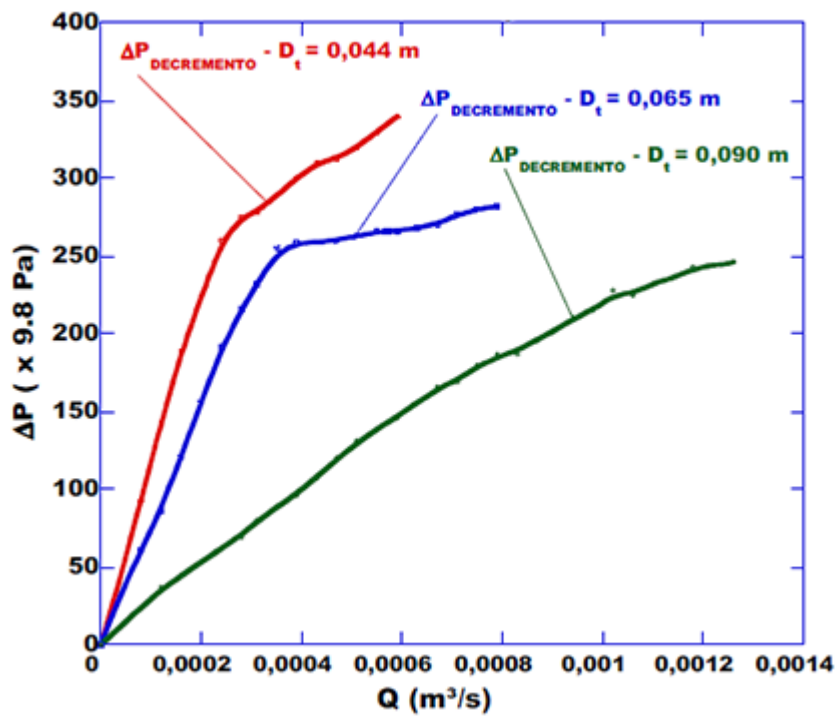
Nos Gráficos 2 e 3, têm-se os resultados do autor Feitosa (2015) ao comparar testes fluidodinâmicos realizados com uma cota inicial de 0,175 m nos tubos de acrílico para diâmetros internos diferentes de 0,044 m; 0,065 m e 0,090 m a temperatura ambiente. Os resultados dessa seção serão comparados com esses gráficos.

Gráfico 2 – Incremento comparativo entre diâmetros.
(Altura: 0,175 m; granulometria: 45/50 MESH ASTM.)



Fonte: Feitosa (2015).

Gráfico 3 – Decremento comparativo entre diâmetros.
(Cota: 0,175 m; granulometria: 45/50 MESH ASTM.)

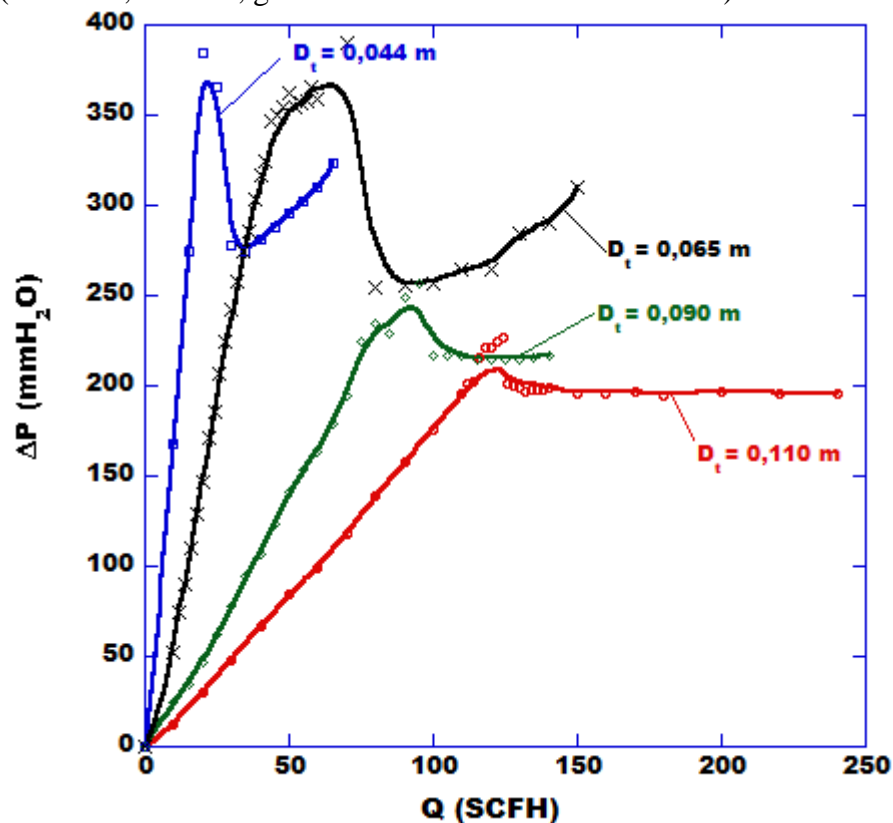


Fonte: Feitosa (2015).

Nos resultados de Feitosa (2015) nota-se que o diâmetro influencia diretamente na inclinação inicial da curva, onde o leito apresenta-se fixo. Percebe-se também que a vazão para atingir o pico de pressão máxima aumenta de acordo com o aumento do diâmetro, e conseqüentemente, também a velocidade de mínima fluidização. Além disso, é possível ver que as faixas do regime borbulhante, as linhas constantes logo após o pico, são mais longas nas curvas de maiores diâmetros. Logo, ao aumentar o diâmetro do leito, temos um aumento na faixa do regime borbulhante, característica importante pois esse será o regime no qual a caldeira final do projeto trabalhará.

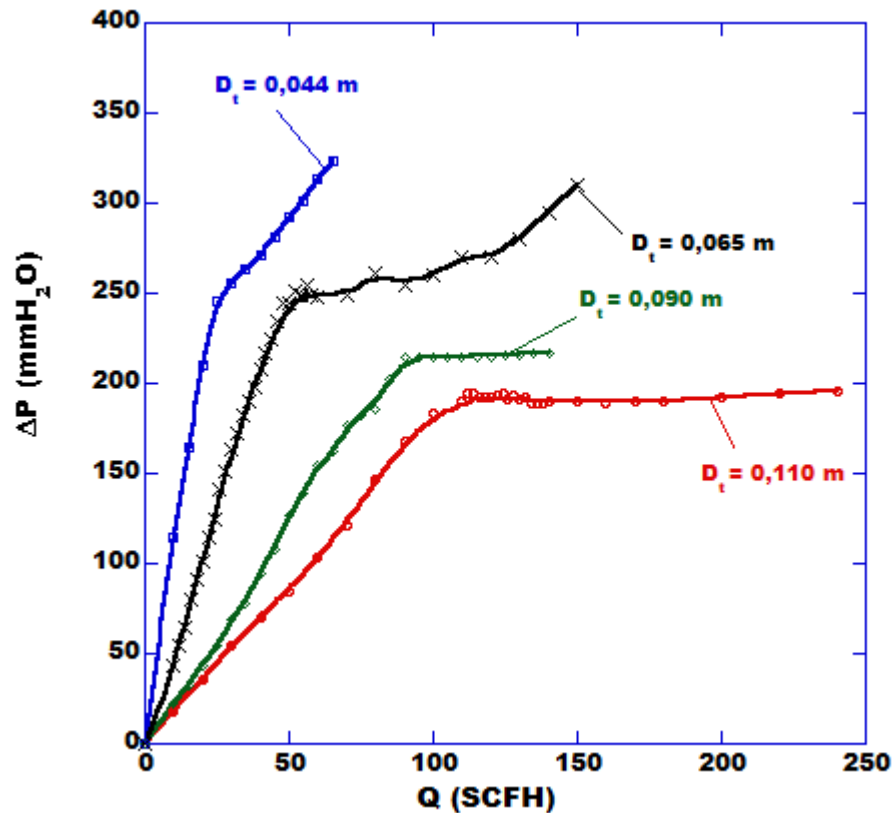
Os resultados da curva de queda de pressão dos testes realizados com areia de granulometria de 321 μm nos três tubos de acrílico e também no reator de leito fluidizado podem ser vistos nos Gráficos 4 e 5.

Gráfico 4 – Comparação entre diâmetros – Incremento (Ida base).
(Altura: 0,175 m, granulometria: 45/50 MESH ASTM.)



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 5 – Comparação entre diâmetros – Decremento (Volta base).
(Altura: 0,175 mm, granulometria: 45/50 MESH ASTM.)



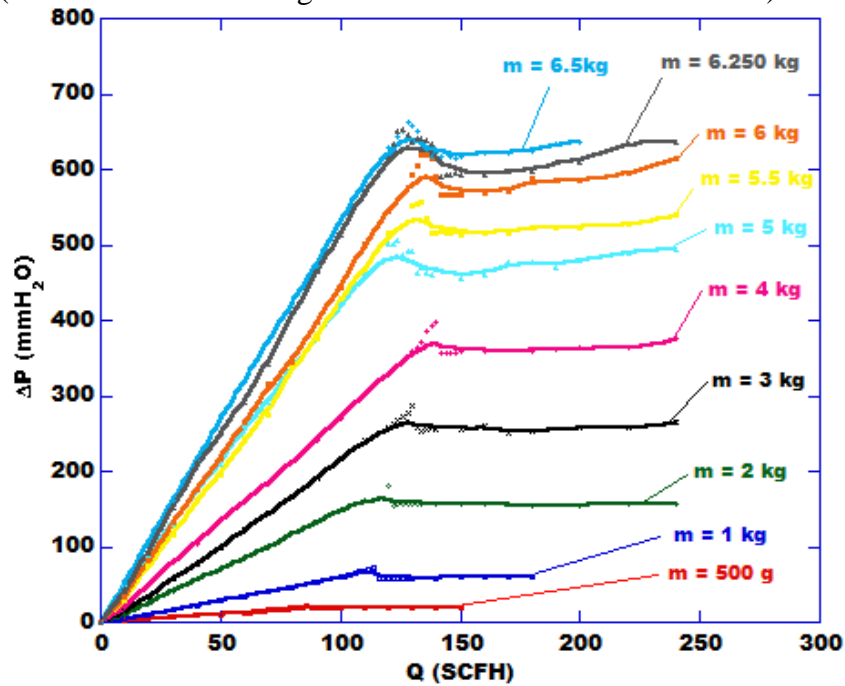
Fonte: Elaborado pela autora.

As curvas obtidas são parecidas com as curvas anteriores demonstrando assim comportamentos parecidos nas duas situações, tanto ao aumentar quanto ao diminuir a vazão do ar de entrada. Também percebe-se que com a adição do diâmetro de 0,110 m, a curva apresenta-se com o comportamento esperado: a angulação no começo da curva é menor já que possui um diâmetro interno maior. Nota-se que a faixa constante referente ao regime borbulhante do diâmetro 0,065 m é maior que a de 0,044 m e a de 0,110 m é maior que a de diâmetro 0,090 m, resultado também esperado baseando-se nos gráficos anteriores. Logo, para as duas granulometrias diferentes há o mesmo comportamento para a curva de queda de pressão.

5.2 Resultados dos testes realizados no reator de leito fluidizado

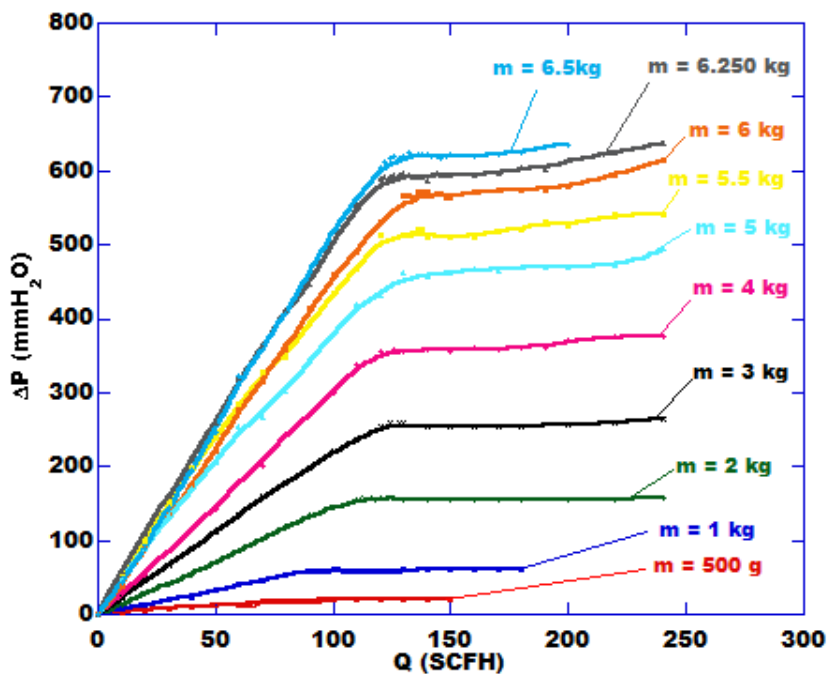
Os Gráficos 6 e 7 mostram os resultados de todas as curvas de queda de pressão dos testes feitos desde 500 g de areia com granulometria de 321 μm até a massa de 6.5 kg de areia.

Gráfico 6 – Comparativo entre valores de massa de areia.
(Incremento - Areia de granulometria: 45/50 MESH ASTM.)



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 7 – Comparativo entre valores de massa de areia.
(Decremento - Areia de granulometria: 45/50 MESH)



Fonte: Elaborado pela autora.

Para essa comparação, percebeu-se que o comportamento do processo de fluidização aproxima-se mais do teórico para maiores valores de massa. No entanto, quanto mais a massa é aumentada, mais curta vai ficando a faixa do regime borbulhante e mais rápido

a fluidização chega ao regime empistonado, o qual não é proveitoso para a operação da caldeira. Essas curvas também sugerem que a velocidade de mínima fluidização aumenta conforme se adiciona massa ao leito.

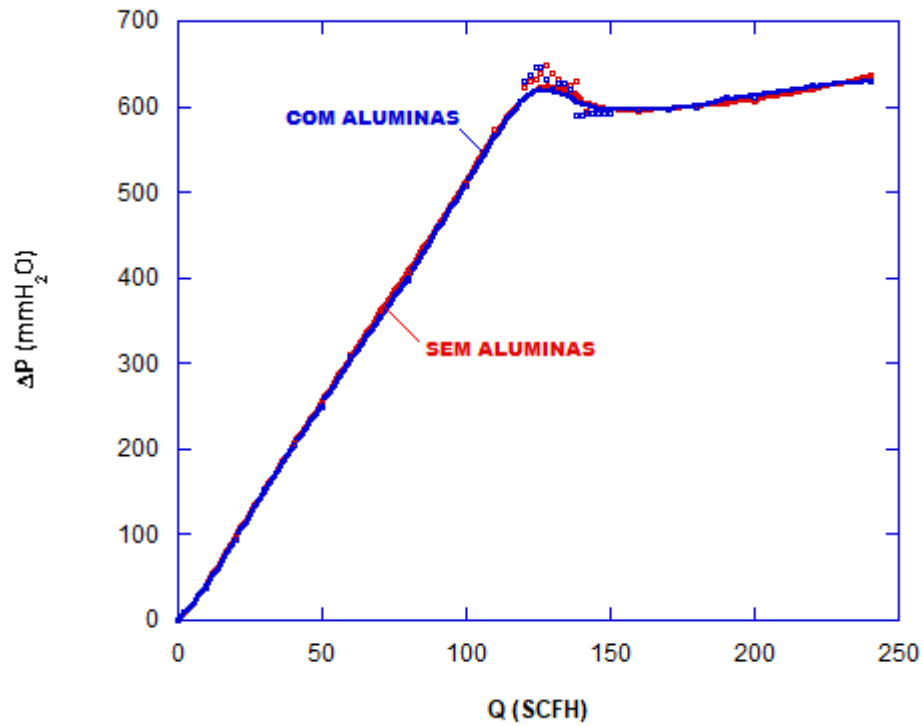
Dessa maneira, com base nos ensaios realizados, a melhor massa para ser trabalhada seria a de 6 kg, que aparenta ter a maior faixa constante, porém, para o presente protótipo de leito fluidizado trabalhado, escolheu-se a massa de 6,25 kg. Essa decisão foi tomada devido a particularidades estruturais, a areia expandida deveria chegar a determinado ponto na estrutura do reator em que haveria renovação de areia, a saída de areia purificada. Além disso, também deveria se levar em conta a altura do leito em relação ao furo no reator referente a entrada do lança-chamas. A altura do leito deve ser de tal maneira que a ponta do lança-chamas embutido deve alcançar a superfície do leito, mas não pode ser engolida quando a areia tiver se expandido. A altura equivalente a massa de 6,25 kg também cumpre essa particularidade.

Ainda assim, para a massa de 6,25 kg, a curva de fluidização é bem definida e possui um intervalo de regime borbulhante significativo, sendo a faixa de regime borbulhante referente a 6,5 kg bem menor comparativamente.

5.3 Resultados dos testes do reator com inserção de aluminas na sua parte superior

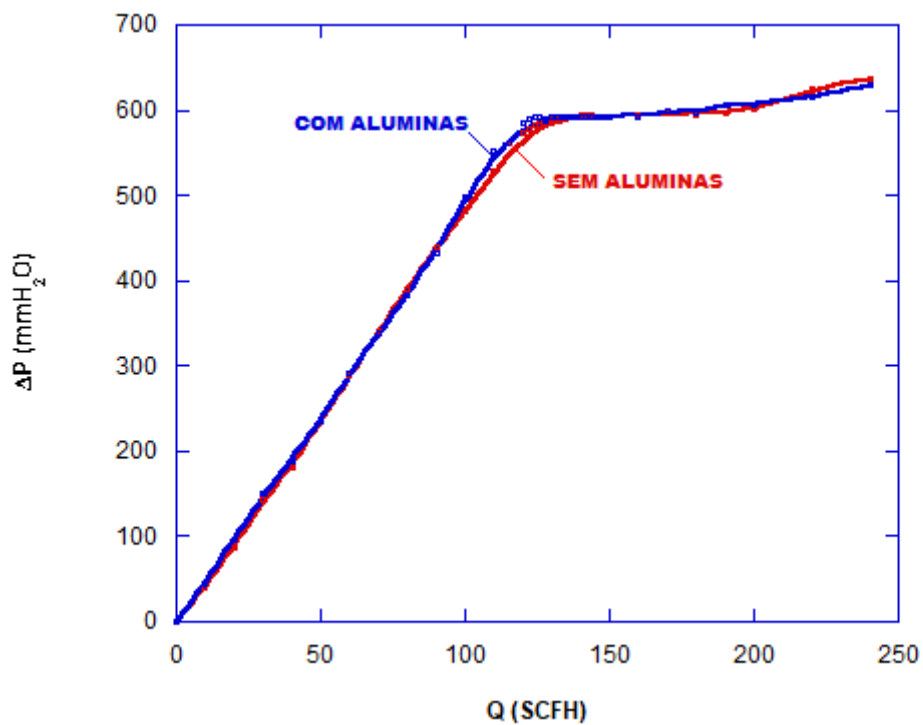
Ao gerar as curvas de queda de pressão referente ao teste feito ao inserir aluminas suspensas no leito, obteve-se os Gráficos 8 e 9:

Gráfico 8 – Influência da inserção de aluminas no leito.
(Incremento - Areia de granulometria: 45/50 MESH ASTM.)



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 9 – Influência da inserção de aluminas no leito.
(Decremento - Areia de granulometria: 45/50 MESH ASTM.)



Fonte: Elaborado pela autora.

Ao comparar as duas curvas de queda de pressão do leito percebe-se que quase não houve mudança, podendo assim dizer que a inserção de aluminas no reator não causa nenhuma influência.

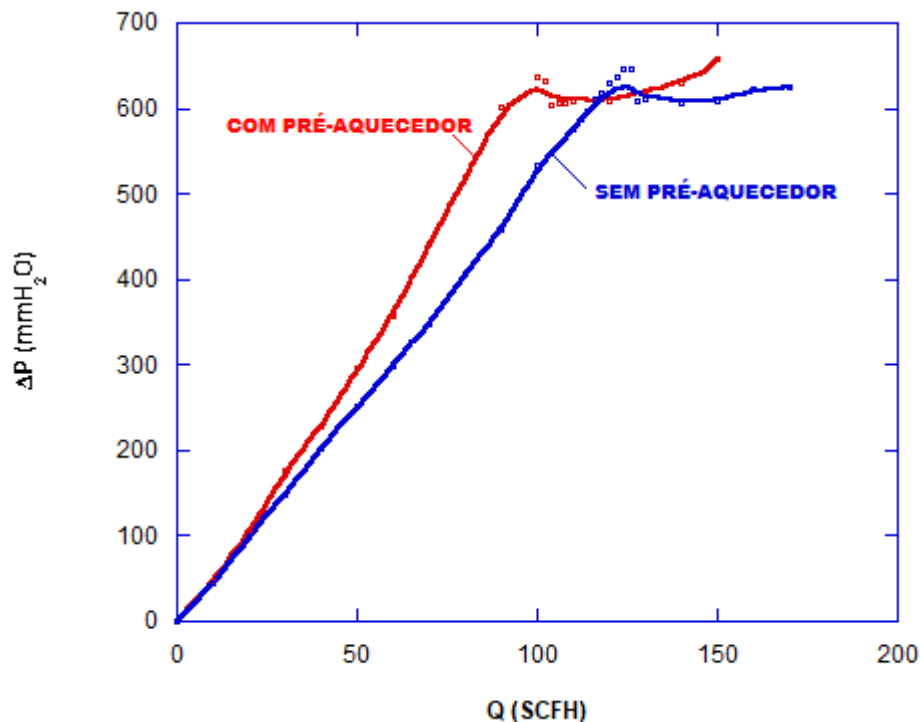
Isso ocorre, provavelmente, pelo fato das esferas de alumina serem posicionadas acima do leito, onde não tem mais influência com a curva de perda de carga ou com a leitura de pressão nos manômetros; pelo fato do topo do reator estar aberto a pressão ambiente e por motivo das aluminas possuírem 40% de porosidade, permitindo assim, a passagem total do ar.

Se o mesmo experimento fosse feito em uma situação em que o reator fosse fechado e um sistema de exaustão fosse ligado, o resultado poderia ser diferente e a inserção de aluminas poderia influenciar na curva da queda de pressão.

5.4 Resultados dos testes do reator com inserção do pré-aquecedor de ar

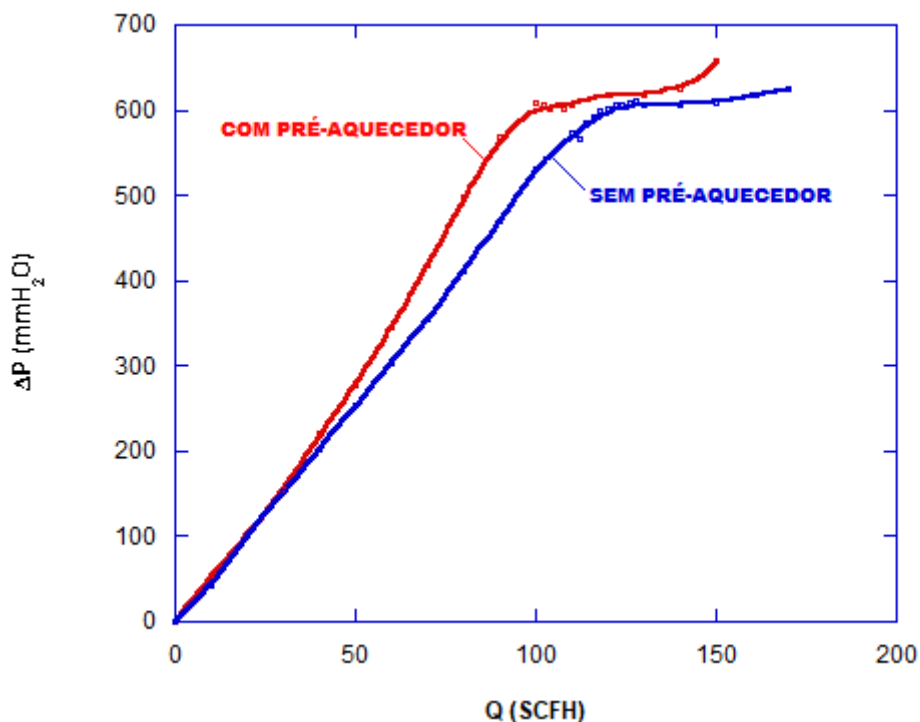
Assim como o procedimento com o pré-aquecedor de ar foi dividido em duas partes, os resultados também serão divididos em duas partes. No primeiro experimento, onde apenas foi adicionado o pré-aquecedor de ar na linha de alimentação do reator de leito fluidizado, obteve-se os seguintes Gráficos 10 e 11 referentes às curvas de perda de carga:

Gráfico 10 – Influência da adição do pré-aquecedor de ar a temperatura ambiente. (Incremento - Areia de granulometria: 45/50 MESH ASTM.)



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 11 – Influência da adição do pré-aquecedor de ar a temperatura ambiente. (Decremento - Areia de granulometria: 45/50 MESH ASTM.)



Fonte: Elaborado pela autora.

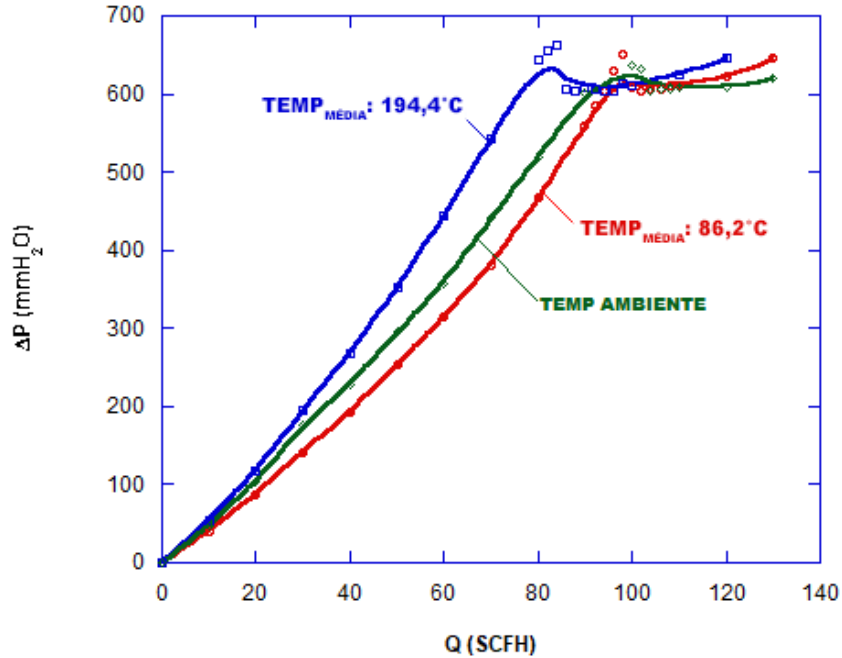
Ao comparar as curvas com o pré-aquecedor e sem, pode-se notar que a curva do experimento com o pré-aquecedor de ar encontra-se mais à esquerda e com valores de pressão maiores. Esse comportamento significa que a simples inserção do pré-aquecedor de ar na linha de alimentação do reator de leito fluidizado fez com que o leito começasse a fluidizar com valores menores de vazão, significando assim menor valor para a velocidade de mínima fluidização e o começo do empistonamento mais cedo, como pode-se ver no gráfico.

Esse comportamento é causado por alguns fatores. O primeiro é a diminuição do diâmetro do tubo, para a inserção do pré-aquecedor de ar, precisou-se trocar a mangueira anterior de 7 mm de diâmetro interno por um tubo de cobre de meia polegada, de diâmetro interno de 2,35 mm que resistiria a passagem de ar quente. Essa diminuição no diâmetro da passagem de ar, fez aumentar a velocidade do fluido para manter constante a vazão. Outro fator é a passagem do ar pela espiral feita com o tubo de cobre, caminho que também acelera o fluxo. É provável que na saída do pré-aquecedor para o plenum, o escoamento chegue turbulento e assim ocasione a formação de bolhas de ar mais rapidamente dentro do leito.

No segundo procedimento, foram monitoradas as temperaturas do ar na saída do pré-aquecedor e feito uma média, que está apresentada nos Gráficos 12 e 13 referente as curvas de pressão durante o incremento e decremento de vazão do fluxo de ar. Observa-se que a

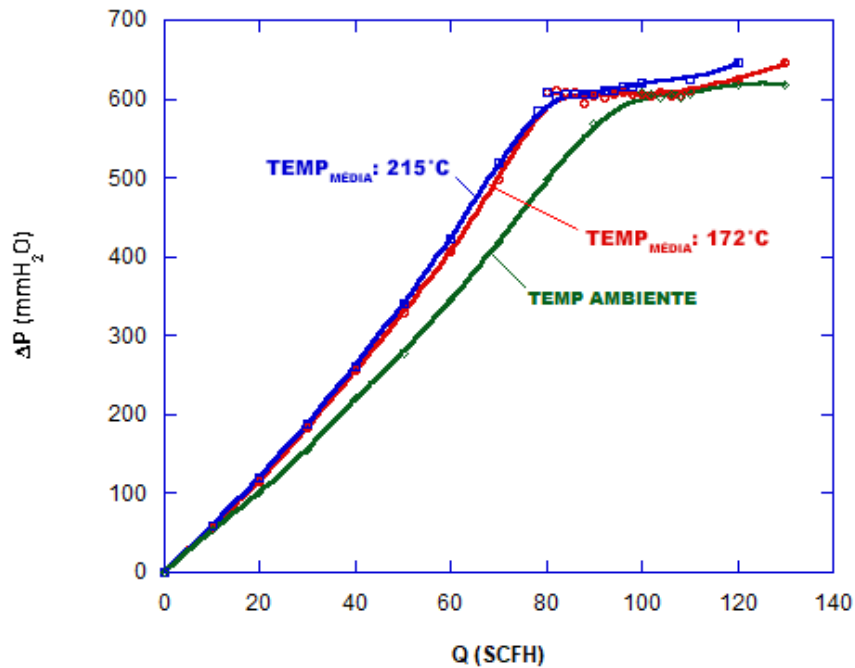
resistência está funcionando bem ao ver que a temperatura média do ar no primeiro teste foi de 86,2 °C durante o incremento de vazão.

Gráfico 12 – Influência da adição do pré-aquecedor com variação de temperatura. (Incremento - Areia de granulometria: 45/50 MESH ASTM.)



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 13 – Influência da adição do pré-aquecedor com variação de temperatura. (Decremento - Areia de granulometria: 45/50 MESH ASTM.)



Fonte: Elaborado pela autora.

Também percebe-se o comportamento das curvas se encontrarem mais à esquerda, significando a fluidização a vazões menores, menores velocidades de mínima fluidização e começo rápido de empistonamento. Isso deve-se ao fato que ao aquecer o fluxo de ar que chega ao leito, as partículas ganham mais velocidade, e por isso se torna mais fácil o surgimento de bolhas no leito.

Outro aspecto notável em ambos os experimentos é o encurtamento do intervalo de regime borbulhante. Isso também está relacionado ao aumento da velocidade do fluxo de ar, que ao fluidizar mais cedo também começa a ficar empistonado mais rapidamente, encurtando assim o regime borbulhante, e, conseqüentemente, a faixa de operação da caldeira.

É importante mencionar que as condições futuras de testes e mesmo da operação do reator de leito fluidizado são com combustão. A temperatura média do leito será entre 750 a 1000°C, fazendo assim, a temperatura do ar pré-aquecido que entra no leito, aumentar mais ainda. Essa situação irá agravar mais ainda o estreitamento observado na faixa do regime borbulhante, implicando assim a necessidade da resolução ou minimização desse problema.

Existe um parâmetro interessante para projetos de caldeira de leito fluidizado estudado por Feitosa (2015). Ele se trata da proporção comprimento do leito pelo diâmetro (L/D). Como visto nesse trabalho, ao aumentar a massa presente no leito, ou seja, aumentar o comprimento do leito, percebe-se o estreitamento da região do regime borbulhante. Também foi observado que quanto maior o diâmetro do leito, maior a faixa do regime borbulhante. Logo, a solução está em reduzir a proporção L/D do reator. A proporção atual é $0,442/0,110 = 4,018$. Pode-se ver que é imprescindível que para o projeto da caldeira final do projeto, o diâmetro do leito seja mantido, ou aumentado e o comprimento do leito seja diminuído, diminuindo assim a proporção L/D.

Quanto ao protótipo estudado pretende-se diminuir a massa presente na caldeira para 6 kg, diminuído assim um pouco o comprimento do leito, e ainda deixando uma altura em que a ponta do lança-chamas alcançará a superfície do leito e a areia expandida alcançará a saída de areia para renovação.

5.5 Resultados dos testes do reator com granulometria de areia equivalente a do esgoto

A Tabela 1 mostra os valores referentes a massa de cada intervalo de granulometria referente à amostra de 84 g da areia de esgoto recebida da Cagece depois de peneirada. Nela também encontra-se o equivalente em porcentagem para cada intervalo. Na Tabela 2, está a massa equivalente em areia de cada intervalo granulométrico totalizando 6,25 kg que foi usada para realizar os testes fluidodinâmicos.

Tabela 1 – Percentual granulométrico da amostra de areia proveniente do esgoto.

MESH ASTM	MASSA (g)	(%)
>14	10	11,90
14-20	9	10,71
20-45	25	29,76
45-50	5	5,95
50-100	22	26,19
100-120	4	4,76
120-170	4	4,76
170-200	1	1,19
<200	3	3,57
TOTAL	83	98,81

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 2 – Semelhante em massa para cada intervalo granulométrico em areia presente no laboratório.

MESH ASTM	MASSA (g)
20/45	3292
45/50	382
50/100	1646
100/120	307
120/170	308
170/200	83
200	232
TOTAL	6250

Fonte: Elaborado pela autora.

A massa da amostra referente ao fundo da peneira, logo para granulometrias maiores que 200 MESH, é a especificada pela linha de 200 MESH ASTM na tabela 1, assim como para menores que 14 MESH, está especificada na linha de 14 MESH ASTM. Nota-se

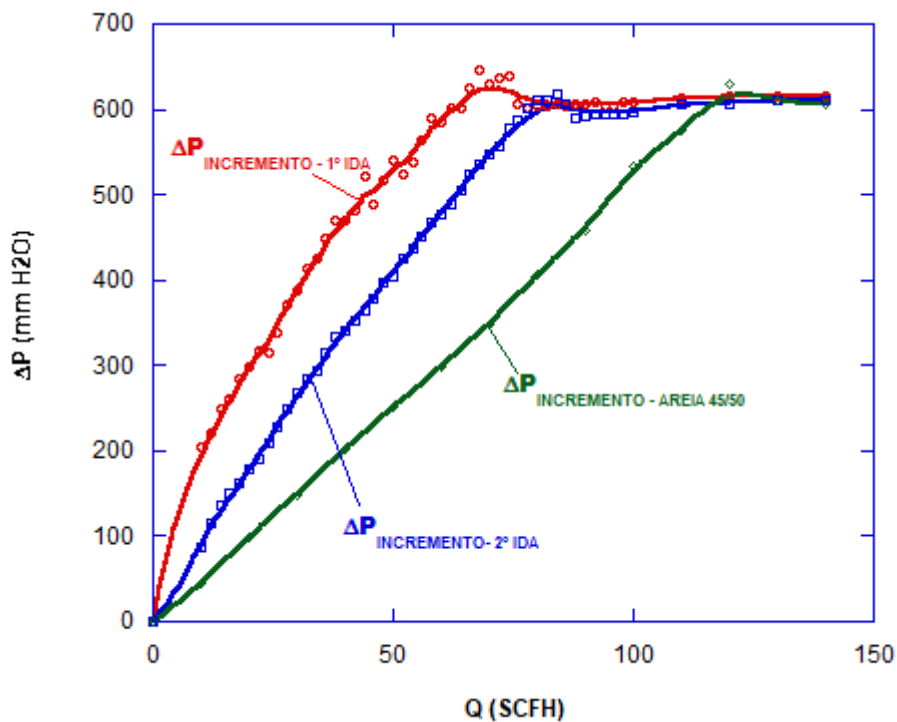
também que perdeu-se 1 g da amostra que ficaram presos nas grades das peneiras provavelmente.

Feita uma média ponderada das granulometrias da areia de esgoto, tem-se 566 μm , cujo equivalente em MESH ASTM encontra-se entre 30 e 35 MESH ASTM. Também foi realizada a média ponderada da mistura final da areia equivalente, que resultou em 409 μm cujo equivalente em MESH ASTM encontra-se entre 35 e 40 MESH ASTM.

É importante a realização posterior de mais análises como essas com amostras diferentes da areia de esgoto, para expandir a exatidão dos resultados.

Nos Gráficos 14 e 15 estão os resultados da curva de queda de pressão do experimento feito com areia com a granulometria equivalente à areia de esgoto.

Gráfico 14 – Comparação da fluidização da areia com granulometria equivalente à areia de esgoto e areia de 45/50 MESH ASTM (Incremento)



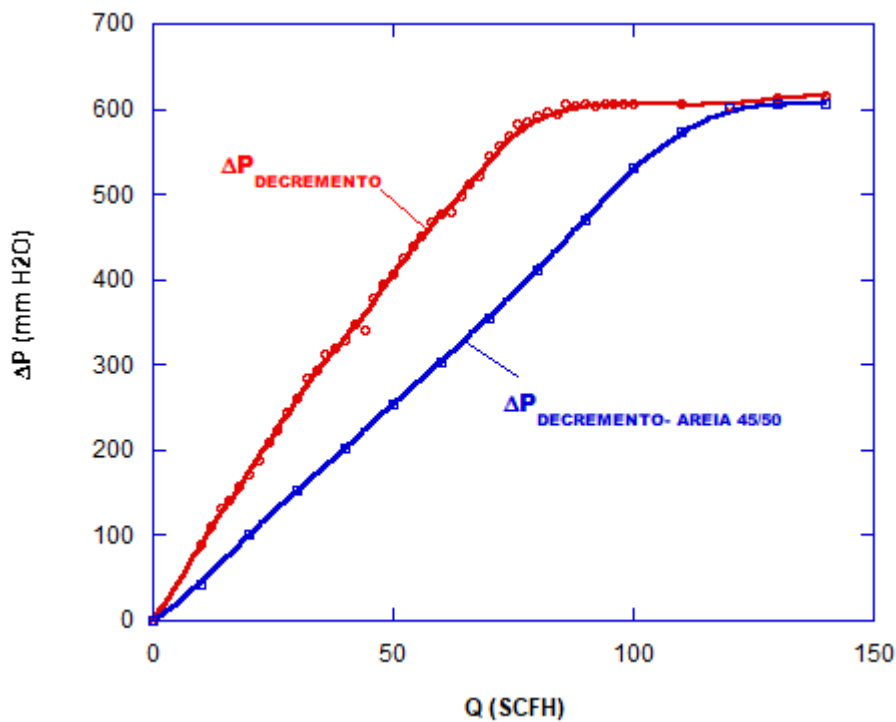
Fonte: Elaborado pela autora.

Para realização desse teste, foi feita o incremento gradual da vazão, seguido pelo seu decremento e, após, um novo incremento da vazão, referenciado por 1º IDA e 2º IDA. Isso foi feito com o intuito de perceber os efeitos da perda da granulometria mais fina, que foram arrastadas durante o teste.

Percebe-se a diminuição na necessidade de vazão para o começo da fluidização na curva do primeiro incremento, e uma instabilidade desta comparada à curva do segundo

incremento. Isso deve-se ao fenômeno da fluidização ocorrer antes, apenas na superfície do leito, devido as partículas mais finas se deslocarem para esse lugar. Assim, no segundo incremento, uma grande parte dessas partículas mais finas foram arrastadas e essa situação é amenizada. Também é observado que por esse mesmo motivo, a faixa da curva que começa o empistonamento nos testes com a areia com mistura granulométrica ocorre bem antes do que a outra amostra, acontecendo no início da região constante da curva da areia de 45/50 MESH ASTM.

Gráfico 15 – Comparação da fluidização da areia com granulometria equivalente à areia de esgoto e areia de 45/50 MESH ASTM (Decremento)



Fonte: Elaborado pela autora.

No Gráfico 15 o comportamento é semelhante.

Como a amostra apresenta porcentagens razoáveis de granulometrias muito finas, isso se mostra um problema, já que, na fluidização, as partículas mais finas são arrastadas. Isso causa uma nuvem de partículas que impossibilita a observação clara do leito e atrapalha a realização dos testes, necessitando assim, um cuidado para realizar a separação dessas partículas menores das maiores. Uma possível ação que diminuiria esse problema seria a inserção de um ciclone na estrutura do reator. Ação essencial para o projeto da caldeira final a ser realizado.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho de conclusão do Curso de Engenharia de Energias Renováveis ficou basicamente centrado na compreensão dos fenômenos fluidodinâmicos manifestados em um protótipo de laboratório de um reator de leito fluidizado em regime borbulhante. Com o objetivo de se alcançar condições adequadas de funcionamento e operação, foram realizados vários experimentos previamente especificados, dos quais as seguintes conclusões puderam ser obtidas:

1. Ao fluidizar areias de diferentes granulometrias, observa-se um mesmo comportamento quanto ao perfil (curva) de queda de pressão pela vazão. Além disso, comparando os perfis obtidos em tubos de acrílico de diferentes diâmetros, sob as mesmas condições, percebe-se que o diâmetro tem uma influência direta na inclinação inicial da curva de queda de pressão, no pico de pressão máxima e no comprimento da faixa do regime borbulhante.
2. Ao variar a cota (altura) do leito de areia no reator, observa-se que quanto maior a altura do leito, mais rápido acontece a fluidização, mais rápido se chega no regime de empistonamento e mais curta apresenta-se a faixa do regime borbulhante.
3. Com a inserção de esferas de alumina no reator, verificou-se que elas não interferem na curva de queda de pressão para as condições testadas.
4. Ao realizar testes com o pré-aquecedor de ar, incluso na linha de alimentação do reator de leito fluidizado a temperatura ambiente, notou-se o deslocamento da curva de queda de pressão para a esquerda, significando o começo da fluidização com valores menores de pressão, estreitamento da faixa de regime borbulhante e começo mais rápido do empistonamento.
5. Um estreitamento acentuado da faixa do regime borbulhante nas curvas de queda de pressão foi percebido nos testes com inserção do pré-aquecedor de ar variando a temperatura. Então sugeriu-se uma redução na altura do leito para a correspondente a 6 kg.

6. A necessidade da redução da proporção L/D do projeto da caldeira final do projeto foi constatada.
7. Observou-se a tendência da média granulométrica da areia proveniente do esgoto é aumentar, a medida que granulometrias muito finas são arrastadas do leito.
8. Por fim, constatou-se a necessidade de inserção de um ciclone ou separador para remover partículas que não são fluidizadas ou são carregadas durante o processo de fluidização no projeto final da caldeira final do projeto.

REFERÊNCIAS

- BARBEIRO, Filipe Miguel Alves. **Queima de biomassa numa caldeira em leito fluidizado borbulhante com 2MW de potência térmica**. 2006. 92 p. Relatório de Estágio (Licenciatura em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2006. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/60747>>. Acesso em: 22 nov. 2018.
- BARROS, Jean Michell Nogueira; BORGES, João Vitor Quintiliano Silverio. **Estudo da caracterização de um reator de leito fluidizado borbulhante**. 2017. 87 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2017. Disponível em: <<http://bdm.unb.br/handle/10483/18394>>. Acesso em: 22 nov. 2018.
- BASU, Prabir. **Combustion and gasification in fluidized beds**. New York: CRC Press, 2006.
- CUENCA, M. A.; ANTHONY, E. J. **Pressurized Fluidized Bed Combustion**. Michigan: Blackie Academic & Professional, 1995.
- FEITOSA, João Diego Moreira. **Aplicação da tecnologia de leito fluidizado em projeto de caldeira de vapor**. 2015. 79 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.
- GELDART, D. **Gas Fluidization Technology**. New Jersey: John Wiley & Sons, 1986.
- GUPTA, C.K.; SATHIYAMOORTHY, D. **Fluid Bed Technology in Materials Processing**. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.
- KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2. Ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 1991.
- MOREIRA, A. P. A. **Desenvolvimento de um reator de leito fluidizado aplicado à combustão de gás natural**. Dissertação – Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.
- MOTTA, I. L.; MIRANDA, N. T.; FILHO, R. M.; MACIEL, M. R. W. **Biomass gasification in fluidized beds: A review of biomass moisture content and operating pressure effects**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [S.l.], v. 94, p. 998-1023, out. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118304805>>. Acesso em: 22 nov. 2018.
- MOURA, J.P; GAMA, P; CARDIM, G. de. **Fundamentos da combustão de biomassa em leito fluidizado circulante**. 2011. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2011_2/FundamentosCombustao/index.htm>. Acesso em: 22/11/2018

NITZ, Marcello; GUARDANI, Roberto. **Fluidização Gás-Sólido - Fundamentos e Avanços**. Revista Brasileira de Engenharia Química, São Paulo, 13 p, dez. 2008. Disponível em: <<https://maua.br/files/artigos/artigo-fluidizacao-gas-solido-prof-nitz.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2018.

OKA, Simeon. **Fluidized Bed Combustion**. New York: CRC Press, 2003.

RIBEIRO, Leonardo José da Silva. **Combustão de bolhas de propano e de metano na superfície livre de um leito fluidizado**. 1996. 127 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 1996. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/13398>>. Acesso em: 22 nov. 2018.

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

ANEXO – TABELA DE CONVERSÃO DE ABERTURA DAS PENEIRAS

ASTM USS	MESH TYLER	Abert. µm./ y	TOL. (malha)		Máx. até 6% + Z	Máx. indiv. + X	FIO mm.	TOL. (fio)	
			DE	ATÉ				DE	ATÉ
4" .	****	100,00	97,06	102,94	103,38	103,82	6,30	5,4	7,2
3.1/2" .	****	90,00	87,34	92,66	93,09	93,53	6,30	5,4	7,2
3" .	****	75,00	72,78	77,22	77,65	78,09	6,30	5,4	7,2
2.1/2" .	****	63,00	61,13	64,87	65,29	65,71	5,60	4,8	6,4
2" .	****	50,00	48,51	51,49	51,89	52,29	5,00	4,3	5,8
1.3/4" .	****	45,00	43,65	46,35	46,73	47,12	4,50	3,9	5,2
1.1/2" .	****	37,50	36,37	38,63	38,99	39,35	4,50	3,8	5,2
1.1/4" .	****	31,50	30,55	32,45	32,79	33,13	4,00	3,4	4,6
1" .	****	25,00	24,24	25,76	26,07	26,38	3,55	3,0	4,1
3/4" .	****	19,00	18,42	19,58	19,85	20,13	3,15	2,7	3,6
5/8" .	****	16,00	15,51	16,49	16,74	16,99	3,15	2,7	3,6
1/2" .	****	12,50	12,11	12,89	13,11	13,33	2,50	2,1	2,9
		10,00	9,69	10,31	10,51	10,71	2,50	2,1	2,9
3/8" .	****	9,50	9,20	9,80	9,99	10,18	2,24	1,9	2,6
5/16" .	****	8,00	7,75	8,25	8,43	8,60	2,00	1,7	2,3
1/4" .	****	6,30	6,10	6,50	6,65	6,81	1,80	1,5	2,1
3,5	3,5	5,60	5,42	5,78	5,92	6,07	1,60	1,3	1,9
		5,00	4,84	5,16	5,29	5,43			
4	4	4,75	4,60	4,90	5,03	5,16	1,60	1,3	1,9
5	5	4,00	3,87	4,13	4,25	4,37	1,40	1,2	1,7
6	6	3,35	3,24	3,46	3,57	3,67	1,25	1,06	1,5
7	7	2,80	2,71	2,89	2,99	3,09	1,12	0,95	1,3
8	8	2,36	2,28	2,44	2,53	2,61	1,00	0,85	1,15
10	9	2,00	1,93	2,07	2,15	2,23	0,90	0,77	1,04
12	10	1,70	1,64	1,76	1,83	1,90	0,80	0,68	0,92
14	12	1,40	1,35	1,45	1,51	1,58	0,71	0,60	0,92
16	14	1,18	1,14	1,22	1,28	1,34	0,63	0,54	0,72
18	16	1,00	0,97	1,03	1,09	1,14	0,56	0,48	0,64
*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
20	20	850	821	879	928	977	500	430	580
25	24	710	685	735	779	822	450	380	520
30	28	600	579	621	661	701	400	340	460
35	32	500	482	518	554	589	315	270	360
40	35	425	409	441	473	506	280	240	320
45	42	355	342	368	398	427	224	190	260
50	48	300	288	312	338	365	200	170	230
60	60	250	240,1	259,9	284	308	160	130	190
70	65	212	203,3	220,7	242	264	140	120	170
80	80	180	172,4	187,6	207	227	125	105	150
100	100	150	143,4	156,6	175	193	100	85	115
120	115	125	119,2	130,8	147	163	90	77	104
140	150	106	100,8	111,2	126	141	71	60	82
170	170	90	85,4	94,6	108	122	63	54	72
200	200	75	70,9	79,1	92	104	50	43	53
230	250	63	59,3	66,7	78	89	45	38	52
270	270	53	49,6	56,4	67	77	36	31	41
325	325	45	41,9	48,1	58	67	32	27	37
400	400	38	35,1	40,9	49	58	30	24	35
500	500	25	22	28	34	41	25		
635	635	20	17	23	29	36	25		

APÊNDICE – IMAGENS DA SEPARAÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA DE ESGOTO.

Figuras 16 – Amostra de areia na granulometria maior que 14 MESH ASTM.



Fonte: Obtida pela autora

Figuras 18 – Amostra de areia na granulometria entre 20 e 45 MESH ASTM.



Fonte: Obtida pela autora

Figuras 17 – Amostra de areia na granulometria entre 14 e 20 MESH ASTM.



Fonte: Obtida pela autora

Figuras 19 – Amostra de areia na granulometria entre 45 e 50 MESH ASTM.



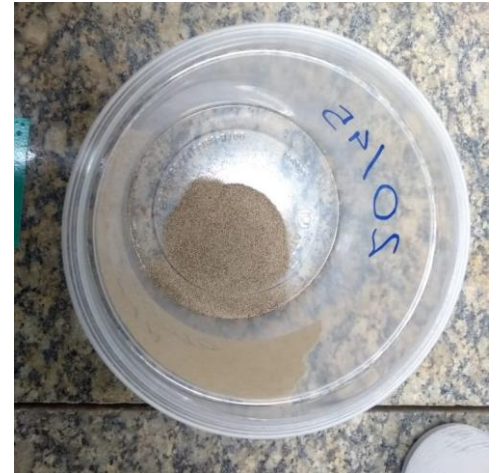
Fonte: Obtida pela autora

Figuras 20 – Amostra de areia na granulometria entre 50 e 100 MESH ASTM.



Fonte: Obtida pela autora

Figuras 22 – Amostra de areia na granulometria entre 120 e 170 MESH ASTM.



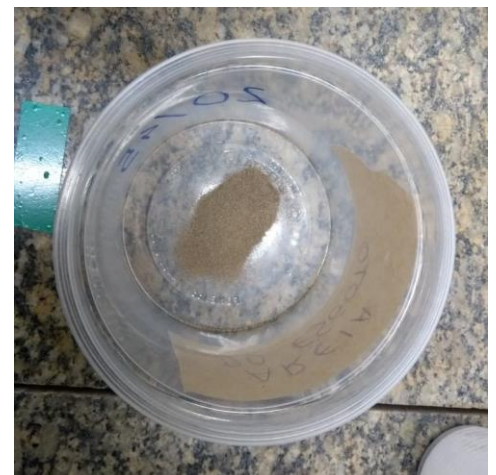
Fonte: Obtida pela autora

Figuras 21 – Amostra de areia na granulometria entre 100 e 120 MESH ASTM.



Fonte: Obtida pela autora

Figuras 23 – Amostra de areia na granulometria entre 170 e 200 MESH ASTM.



Fonte: Obtida pela autora

Figura 24 – Amostra de areia na granulometria menor que 200 MESH ASTM.



Fonte: Obtida pela autora