



RAYSSA DE ARAUJO NOGUEIRA SILVA

COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO DO FEIJÃO
(Phaseolus vulgaris), **MILHO** (*Zea Mays Everta*) **E DO**
CARVÃO VEGETAL DE AÇAÍ (*Euterpe Oleracea*) **EM**
LEITO FLUIDIZADO CÔNICO

São Luís
2022

RAYSSA DE ARAUJO NOGUEIRA SILVA

**COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO DO FEIJÃO
(*Phaseolus vulgaris*), MILHO (*Zea Mays Everta*) E DO
CARVÃO VEGETAL DE AÇAÍ (*Euterpe Oleracea*) EM
LEITO FLUIDIZADO CÔNICO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Colegiado de Curso da
Engenharia Química do Centro de
Ciência Exatas e Tecnologia da
Universidade Federal do Maranhão,
como parte dos requisitos para obtenção
do diploma de Graduação em Engenharia
Química.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto P. Rodrigues

São Luís
2022

Silva, Rayssa de Araujo Nogueira.

COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO DO FEIJÃO *Phaseolus vulgaris*, MILHO *Zea Mays Everta* E DO CARVÃO VEGETAL DE AÇAÍ *Euterpe Olereacea* EM LEITO FLUIDIZADO CÔNICO / Rayssa de Araujo Nogueira Silva. - 2022.

55 f.

Orientador(a): José Roberto Pereira Rodrigues.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2022.

1. Carvão vegetal de açaí (*Euterpe olereacea*). 2. Condição mínima fluidização. 3. Feijão (*Phaseolus vulgaris*). 4. Leito fluidizado. 5. Milho (*Zea mays everta*). I. Rodrigues, José Roberto Pereira. II. Título.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO PEREIRA RODRIGUES

Orientador – COEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. ELMO DE SENA FERREIRA JUNIOR

COEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. MARCELO FABIO LEONARDO

COEQ/CCET/UFMA

27 de janeiro de 2022

DADOS CURRICULARES**Rayssa de Araujo Nogueira Silva**

NASCIMENTO 07/11/1994 – SÃO LUÍS / MA

FILIAÇÃO Andreia Reggia de Araujo Silva
Waldecy de Jesus Nogueira Silva

2013 / 2021 Curso de Graduação
Engenharia Química – Universidade Federal do Maranhão

Dedico este trabalho a Deus, por ser essencial em minha vida, aos meus pais Waldecy Nogueira e Andreia Reggia, aos meus avós paternos Francisco Nogueira (in memoriam) e Maria de Jesus que, com muito amor e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me proporcionar saúde, sustentação e em sua infinita bondade, trouxe a esperança e a fé necessárias para seguir em frente.

Aos meus pais e minha irmã Yanni Gabrielle, que sempre me apoiaram em todas as escolhas possíveis, por todo carinho, amor e incentivo.

Aos meus avós paternos, por todo o cuidado e por sempre me impulsionarem a ir além dos meus limites, mostrando-me sendo possível realizar meus sonhos.

Aos meus tios Francisco Júnior, Waldemir Nogueira, Francimar Nogueira e Márcio Santos por sempre me incentivarem em todos os momentos.

Aos meus primos, André Felipe e Sarah Santos, por serem como irmãos para mim e por torcerem pela minha vitória.

Ao meu namorado Marcos Paulo, que sempre esteve ao meu lado nas horas mais difíceis e felizes da minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Roberto Rodrigues, pela disponibilidade em me ajudar, por toda paciência, atenção, apoio em todos os momentos e etapas deste trabalho.

À banca avaliadora formada pelo Prof. Dr. Fábio Alejandro Carvajal, ao Prof. Dr. Marcelo Fabio Leonardo e o Prof. Dr. Elmo de Sena Ferreira Junior por disponibilizarem o seu tempo para avaliarem esse momento tão importante e especial em minha vida.

Aos professores do curso de Engenharia Química da UFMA, por todo aprendizado.

A todos os membros do Grupo de Pesquisa em Engenharia e Meio Ambiente (UFMA-UFPA), em especial, ao Prof. Dr. Luís Alves Venancio pela humildade e experiência partilhada.

Às minhas amigas Amanda Ferreira, Andressa Rocha, Gabriela Dominici, Kelsin Gomes e Laís Castro, meu sincero muito obrigada por toda amizade, companheirismo, apoio, incentivo e por se fazerem perto, mesmo à distância.

Aos meus colegas Dielson Muniz, Hiza Nayra, João Gabriel e Julles Mitoura pela amizade construída, ajuda, incentivo e por tirarem minhas dúvidas ao longo da graduação.

À minha amiga Marlyanne Kericy, meu sincero muito obrigada por toda amizade e companheirismo, sendo fonte contínua de apoio e incentivo.

“É da natureza humana fazer planos, mas é o SENHOR quem dirige nossos passos. ”

Provérbios 16:9 (Bíblia Sagrada)

SILVA, Rayssa A. R. **Comportamento fluidodinâmico do feijão (*Phaseolus vulgaris*), milho (*Zea mays everta*) e do carvão vegetal de açaí (*Euterpe oleracea*) em leito fluidizado cônico**. 2022. 55 f. Trabalho de conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2022.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise experimental do processo de fluidização utilizando feijão (*Phaseolus vulgaris*), milho (*Zea mays everta*) e carvão vegetal de açaí (*Euterpe oleracea*) como partículas constituintes do leito. O objetivo deste estudo é verificar o comportamento fluidodinâmico do leito em função da partícula representada pela curva característica do leito que apresenta o comportamento da altura deste em função da vazão de fluido ascendente. Para ambos os experimentos a altura inicial (h_0) foi fixada em 11 cm, dessa forma, somente as propriedades dos sólidos possuíram influência sobre o comportamento fluidomecânico. O desenvolvimento do experimento foi dado em um leito cônico de vidro com escoamento ascendente de ar proporcionado por um compressor. As medidas de temperatura, variação de pressão, variação de altura e umidade foram tomadas de forma simultânea por meio de sensores. Os dados lidos eram apresentados em tempo real com auxílio do *software LabView*. Os resultados indicam grande diferença entre as vazões mínimas de fluidização para os sólidos verificados. Utilizando o feijão como constituinte do leito, a vazão de mínima fluidização $0,804 \text{ m}^3/\text{s}$ com resultados experimentais, apresentando grande desvio com respeito ao comportamento predito que indica que para estas condições, a vazão de mínima fluidização deve ser igual a $0,845 \text{ m}^3/\text{s}$. Utilizando milho no leito de sólidos, a vazão de mínima fluidização $0,741 \text{ m}^3/\text{s}$ com resultados experimentais, apresentando concordância com respeito ao comportamento predito que indica que para estas condições, a vazão de mínima fluidização deve ser igual a $0,732 \text{ m}^3/\text{s}$. Para o carvão, a vazão de mínima fluidização deve ser igual a $0,655 \text{ m}^3/\text{s}$, com desvios expressivos com respeito ao comportamento predito que indica que para estas condições, a vazão de mínima fluidização deve ser igual a $0,642 \text{ m}^3/\text{s}$.

Palavras-chave: Leito fluidizado. Feijão (*Phaseolus vulgaris*). Milho (*Zea mays everta*). Carvão vegetal de açaí (*Euterpe oleracea*). Condição mínima fluidização.

SILVA, Rayssa A. R. **Fluid dynamic behavior of common bean (*Phaseolus vulgaris*), corn (*Zea mays everta*) and açai charcoal (*Euterpe oleracea*) in conical fluidized bed**. 2022. 55 f. Graduate Work (Graduate in Chemical Engineering) – Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2022.

ABSTRACT

This work presents an experimental analysis of the fluidization process using beans (*Phaseolus vulgaris*), corn (*Zea mays everta*) and açai charcoal (*Euterpe oleracea*) as constituent particles of the bed. The purpose of this study is to verify the fluid dynamic behavior of the bed as a function of the particle represented by the characteristic curve of the bed that presents the behavior of its height as a function of the ascending fluid flow. For both experiments, the initial height (h_0) was set at 11 cm, thus, only the properties of solids influenced the fluid-mechanical behavior. The experiment was carried out in a conical glass bed with ascending air flow provided by a compressor. The measurements of temperature, pressure variation, height variation and humidity were taken simultaneously through sensors. The read data were presented in real time with the aid of the *software LabView*. The results indicate a great difference between the minimum fluidization flows for the verified solids. Using beans as a constituent of the bed, the minimum fluidization flow was $0,804 \text{ m}^3/\text{s}$ with experimental results, showing a large deviation from the predicted behavior, which indicates that for these conditions, the minimum fluidization flow must be equal to $0,845 \text{ m}^3/\text{s}$. Using corn in the solid bed, the minimum fluidization flow $0,741 \text{ m}^3/\text{s}$ with experimental results, showing agreement with respect to the predicted behavior that indicates that for these conditions, the minimum fluidization flow must be equal to $0,732 \text{ m}^3/\text{s}$. For coal, the minimum fluidization flow must be equal to $0,655 \text{ m}^3/\text{s}$, with significant deviations from the predicted behavior that indicates that for these conditions, the minimum fluidization flow must be equal to $0,642 \text{ m}^3/\text{s}$.

Keywords: Fluidized bed. Beans (*Phaseolus vulgaris*). Corn (*Zea mays everta*). Açai charcoal (*Euterpe oleracea*). Minimal fluidization condition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Conformação inicial para a verificação do fenômeno de fluidização.	4
Figura 2: Dinâmica de forças sobre a partícula.	4
Figura 3: Conformação inicial para a verificação do fenômeno de fluidização na condição de mínima fluidização.	5
Figura 4: Conformação inicial para a verificação do fenômeno de fluidização para um sistema de n partículas.	6
Figura 5: Regimes de fluidização em função da velocidade do gás.	7
Figura 6: Diagrama de classificação de partículas para fluidização gás-sólido.	8
Figura 7: Conformação operacional ilustrativa de uma unidade de craqueamento catalítico.	10
Figura 8: Tipos de secadores de leito fluidizado (a: leito fluidizado convencional; b: fluxo pistonado de simples estágio; c: duplo estágio com correntes de ar independentes; d: duplo estágio contracorrente; e: múltiplos estágios com chicanas; f: fluidização por atomização; g: vibro-fluidização; h: leito de jorro).	11
Figura 9: Leito poroso com escoamento de fluido.	15
Figura 10: Curva característica da fluidização com descrição das etapas.	17
Figura 11: Sólidos utilizados como leito para o processo de fluidização (a: milho (Zea Mays Everta); b: feijão (Phaseolus vulgaris); c: carvão vegetal do caroço de açaí (Euterpe Olereacea)).	21
Figura 12: Leito cilíndrico cônico de vidro.	22
Figura 13: Inversor de frequência.	23
Figura 14: Sensor de pressão diferencial MPXV7002D.	24
Figura 15: Conformação operacional resumida.	26
Figura 16: Fluxograma de execução da campanha experimental.	27
Figura 17: Curva de calibração dos sensores (a: sensor 1; b: sensor 2; c: sensor 3).	29
Figura 18: Comportamento do leito contendo feijão em função do tempo.	30
Figura 19: Curva característica do sistema fluidizado contendo feijão.	30
Figura 20: Perfis de temperatura e umidade relativa no leito contendo feijão.	31
Figura 21: Comportamento do leito contendo milho em função do tempo.	32
Figura 22: Curva característica do sistema fluidizado contendo milho.	32
Figura 23: Perfis de temperatura e umidade relativa no leito contendo milho.	33

Figura 24: Comportamento do leito contendo carvão vegetal de caroços de açaí em função do tempo.	34
Figura 25: Curva característica do sistema fluidizado contendo carvão vegetal do caroço de açaí.	34
Figura 26: Perfis de temperatura e umidade relativa do leito contendo partículas de carvão do caroço de açaí.	35
Figura 27: Comportamento da velocidade de mínima fluidização em função da esfericidade do sólido.	36
Figura 28: Comportamento da velocidade de mínima fluidização em função da densidade do sólido.	37

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1: Esfericidade de partículas sólidas.....	19
Tabela 2: Propriedades físicas dos materiais sólidos utilizados neste estudo.	20
Tabela 3: Dados de tensão versus variação de altura para os sensores 1, 2 e 3.....	28
Tabela 4: Velocidade de mínima fluidização em função da esfericidade e da densidade dos sólidos.	36
Quadro 1: Classificação geral das partículas de Geldart.	18

SUMÁRIO

	FOLHA DE APROVAÇÃO.....	iii
	DADOS CURRICULARES.....	iv
	DEDICATÓRIA.....	v
	AGRADECIMENTOS	vi
	EPÍGRAFE.....	vii
	RESUMO.....	viii
	ABSTRACT.....	ix
	LISTA DE FIGURAS.....	x
	LISTA DE TABELAS E QUADROS.....	xii
	SUMÁRIO.....	xiii
1	INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO DESTE TRABALHO	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	Objetivo geral	3
2.2	Objetivos específicos.....	3
3	REVISÃO DA LITERATURA	4
3.1	O fenômeno de fluidização.....	4
3.1.1	O PROCESSO DE FLUIDIZAÇÃO NA INDÚSTRIA	9
3.1.1.1	REATORES DE LEITO FLUIDIZADO	9
3.1.1.2	SECADORES DE LEITO FLUIDIZADO.....	10
3.2	Controle de processos químicos	12
3.3	Tratamento matemático do fenômeno de fluidização.....	13
3.3.1	A DINÂMICA DA PARTÍCULA SÓLIDA	13
3.3.2	EFEITO DA PARTÍCULA SOBRE O COMPORTAMENTO FLUIDOMECÂNICO DO PROCESSO DE FLUIDIZAÇÃO	18
3.4	Considerações acerca dos sólidos verificados neste texto.....	20

4	METODOLOGIA.....	21
4.1	Local de desenvolvimento dos experimentos.....	21
4.2	Materiais utilizados	21
4.3	Equipamentos e instrumentos utilizados	22
4.4	Calibração dos sensores.....	24
4.5	Sobre os softwares utilizados	25
4.6	Procedimento experimental para aquisição de dados	25
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1	Curvas de calibração dos sensores.....	28
5.2	Comportamento fluidodinâmicos do leito fluidizado.....	29
5.2.1	LEITO FLUIDIZADO CONTENDO FEIJÃO	30
5.2.2	LEITO FLUIDIZADO CONTENDO MILHO	32
5.2.3	LEITO FLUIDIZADO CONTENDO CARVÃO VEGETAL DO CAROÇO DE AÇAÍ	34
5.3	Verificação do efeito da densidade e esfericidade dos sólidos sobre a condição de mínima fluidização	36
6	CONCLUSÃO.....	38
	REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

A indústria química moderna busca sempre por meios de otimizar a ocorrência de processos e com isso surgem novas operações unitárias e a necessidade de otimizar as mesmas. Dentre as operações de contato gás-sólido, o processo de fluidização apresenta ótima eficiência devido ao ótimo contato entre sólido e gás (VILLELA; DA SILVA, 1992). O processo de fluidização teve seu início com o processo de gaseificação em leito fluidizado em 1921 por Fritz Winkler da Alemanha. Este processo é amplamente aplicado em processos de transferência de calor e massa com reações químicas ou na ausência da ocorrência destas. Dentre os processos que ocorrem em leito fluidizado, destacam-se os processos de combustão, gaseificação, secagem, recobrimento de partículas, aquecimento e resfriamento de partículas, craqueamento do petróleo e diversas reações de síntese (BASU; FRASER, 1991).

O gás ascendente entra em contato com o leito de sólidos a uma vazão que permite a suspensão das partículas, mas não o arraste das mesmas. Neste movimento, o fluido adquire velocidade suficiente para suportar as partículas, porém sem arrastá-las, originando algo parecido com um líquido em ebulição, daí o termo fluidizado. As vantagens da utilização deste sistema são: uma melhor mistura do fluido, altos coeficientes de transferência de calor e massa e a disponibilização da área superficial das partículas para a transferência, assim obtendo melhores resultados. As partículas, que pode ser de esferas, partículas irregulares, cilindros, e outros materiais de acordo com o objetivo a ser alcançado, é fundamental para o funcionamento do leito fluidizado, pois permite o contato íntimo entre fluido-partícula e partícula-partícula, bem como a interação de ambos, de forma a proporcionar a realização do processo desejado com o fluido ou gás (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2000).

O leito fluidizado é de suma importância na indústria pela sua capacidade de resolver problemas até então complicados no que se refere a troca de massa e calor simultaneamente. Este é amplamente aplicado em processos de desidratação de alimentos, sistemas reacionais em reatores de leito fluidizado, apresentam ótimos índices de conversão em reações gás-sólido, utilizando partículas sólidas para suportar catalisadores ou mesmo utilizando o sólido em suspensão como catalisador (LEVENSPIEL, 2000).

Uma outra aplicação muito comum em processos químicos é o uso de leitos fluidizados para purificação de correntes gasosas, utilizando sólidos porosos e com alto potencial de adsorção como leito para remover impurezas de gases. Em geral, independente do fim do sistema de fluidização, é necessário total compreensão do fenômeno e a relação partícula-fluido (GOMIDE, 1991).

Para melhor compreensão da ocorrência do fenômeno de fluidização e obtenção de parâmetros que definem o comportamento destes, faz-se necessário a realização de experimentos. O fenômeno de fluidização é estritamente influenciado pelo tipo de partícula que constitui o mesmo, uma vez que um determinado material possui características específicas e estas influenciam o desenvolvimento do processo. Porosidade, densidade, peso e volume são exemplos de propriedades específicas dos materiais sólidos que podem ser utilizados para a construção do leito (CREMASCO, 2014). Para um dado sistema de fluidização utilizando partículas do tipo qualquer como componente sólido, é necessário a realização de experimentos para determinar as propriedades que permitam que as partículas fiquem em suspensão sem deixar o leito. É necessário o conhecimento das propriedades de mínima fluidização e do perfil de altura do leito com respeito a velocidade do fluido. Dado um sistema em particular, independente da aplicação do mesmo, a caracterização do sistema de partículas que constituem o leito é de fundamental importância, assim, a motivação deste trabalho reside na verificação do comportamento fluidodinâmico para quando o leito é recheado com partículas de feijão (*Phaseolus vulgaris*), milho (*Zea Mays Everta*) e carvão ativado do caroço de açaí (*Euterpe Oleracea*). Serão verificados o comportamento deste no leito e as condições de melhor operação do sistema para cada um dos materiais citados anteriormente.

Os caroços de feijão (*Phaseolus vulgaris*), milho (*Zea Mays Everta*) e carvão vegetal do caroço de açaí (*Euterpe Oleracea*) possuem características específicas que podem se assemelhar a outros possíveis sistemas e resultados dessa natureza são fundamentais para o desenvolvimento de possíveis trabalhos mais aplicados. Assim, espera-se que as informações apresentadas neste trabalho possam auxiliar futuros trabalhos e projetos de operacionais envolvendo fluidização de leitos compostos de feijão (*Phaseolus vulgaris*), milho (*Zea Mays Everta*) e carvão vegetal do caroço de açaí (*Euterpe Oleracea*) para quais possível aplicação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar, por meio de ensaios experimentais, o processo de fluidização empregando feijão (*Phaseolus vulgaris*), milho (*Zea Mays Everta*) e carvão vegetal do caroço de açaí (*Euterpe Oleracea*), como constituintes do leito.

2.2 Objetivos específicos

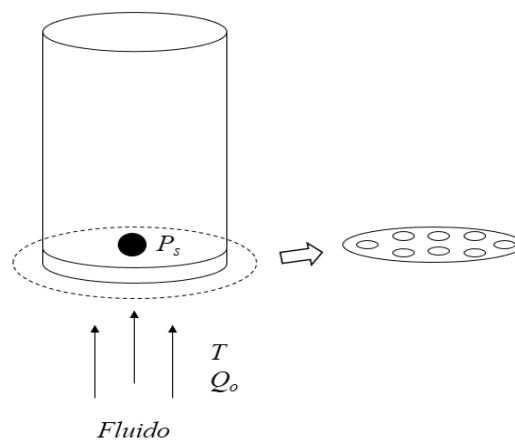
- Verificar o fenômeno de fluidização do feijão, milho e carvão vegetal do caroço de açaí em leito fluidizado;
- Avaliar o regime de fluidização do feijão, milho e carvão vegetal do caroço de açaí;
- Apresentar o comparativo de fluidodinâmico do processo de fluidização do feijão, milho e carvão vegetal do caroço de açaí;
- Buscar a curva característica para cada sistema visando determinar as condições de mínima fluidização.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 O fenômeno de fluidização

Para entender a fluidização, em um primeiro momento será proposto uma conformação em que há uma partícula sólida (P_s) dentro de um recipiente cilíndrico com orifícios no fundo dando acesso ao escoamento ascendente de um fluido a uma vazão inicial Q_o como apresenta a Figura 1.

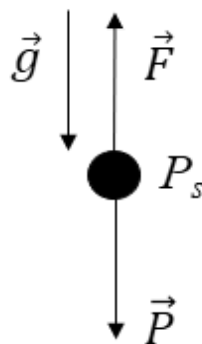
Figura 1: Conformação inicial para a verificação do fenômeno de fluidização.



Fonte: Autor deste trabalho (2022)

A uma baixa vazão de escoamento do gás, a partícula P_s permanece inerte na sua posição inicial, sugerindo que a vetor de força ascendente promovido pelo escoamento é inferior ao vetor gravidade, descendente, mantendo a partícula inerte. A Figura 2 apresenta a dinâmica de forças exercidas sobre a partícula.

Figura 2: Dinâmica de forças sobre a partícula.

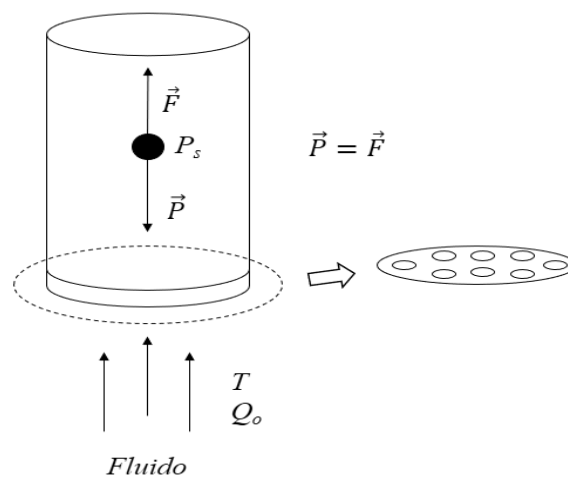


Fonte: Autor deste trabalho (2022)

Inicialmente será considerado que sobre a partícula agem as forças peso e gravidade em oposição à força \vec{F} , promovida pelo escoamento do fluido. À medida em que se aumenta a vazão de escoamento do gás, a força \vec{F} passa a assumir maior valor modular e a partícula passa a apresentar leves vibrações, indicando possíveis variações nas forças exercidas sobre esta. Com aumento contínuo da velocidade de escoamento do fluido, é alcançada a condição de equilíbrio onde as forças causadas pelo escoamento se iguala a força peso. Nessa situação, em que o movimento do material é mais vigoroso, atinge-se o que se chama de leito fluidizado. À velocidade do gás nessa condição é nomeada de mínima velocidade de fluidização, que é a velocidade correspondente ao regime de fluidização incipiente (CREMASCO, 2014; DAIZO; LEVENSPIEL, 1991).

A condição de mínima fluidização proporciona que a partícula fique suspensa sob efeito do escoamento do fluido de forma que a velocidade deste não permita que a partícula deixe o leito, possibilitando assim um intenso contato contínuo *gás-sólido* (GUPTA; SATHIYAMOORTHY, 1998). A Figura 3 apresenta o sistema descrito na Figura 1 na condição de mínima fluidização, onde a partícula encontra-se suspensa devido ao equilíbrio da força resultante do escoamento (\vec{F}) com a força peso (\vec{P}).

Figura 3: Conformação inicial para a verificação do fenômeno de fluidização na condição de mínima fluidização.

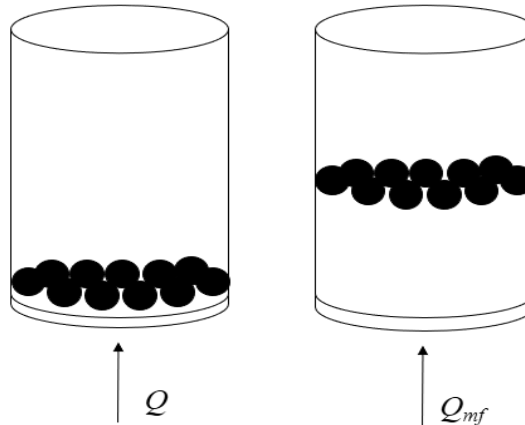


Fonte: Autor deste trabalho (2022)

O passo seguinte é passar a verificar o fenômeno de fluidização considerando um conjunto de partículas sólidas constituindo um leito que inicialmente é fixo devido à ausência de forças ascendentes, mas que passa a assumir o comportamento fluidizado,

como apresentado na Figura 3, a uma dada velocidade de escoamento de gás (Q_{mf}) como apresenta a Figura 4.

Figura 4: Conformação inicial para a verificação do fenômeno de fluidização para um sistema de n partículas.



Fonte: Autor deste trabalho (2022)

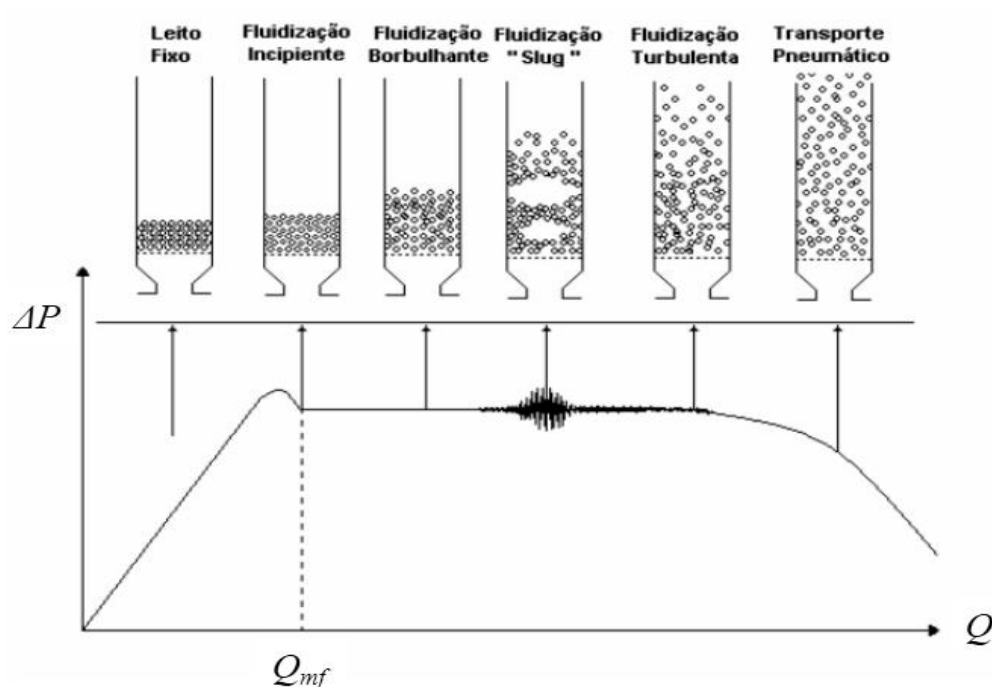
A variação da velocidade de escoamento do gás implica em comportamentos distintos com respeito às partículas que constituem o leito. O aumento da velocidade do gás dá origem ao regime de fluidização borbulhante, onde partículas com densidade geralmente menor do que $1,4 \text{ g/cm}^3$, ocorre uma expansão considerável do leito antes de surgirem as bolhas que caracterizam a fluidização borbulhante. Partículas mais densas a expansão do leito não vai muito além daquela adquirida na condição de fluidização incipiente e as bolhas já surgem com a velocidade de mínima fluidização (DAIZO; LEVENSPIEL, 1991; GELDART, 1973).

Em vasos com diâmetros reduzidos, surgem os “*slugs*”, são formadas grandes bolhas por efeito da coalescência de bolhas menores e nesse regime observam-se grandes flutuações na queda de pressão do gás (GELDART, 1973).

Seguindo com acréscimos na velocidade de escoamento do gás, percebe-se que as grandes bolhas e espaços vazios deixam de existirem dentro do leito, diminuindo assim a queda de pressão. Este é o perfil de fluidização turbulento. O perfil seguinte é o de fluidização rápida, onde a velocidade do gás supera a velocidade terminal fazendo com que o sólido seja arrastado (BI; ELLIS; ABBA; GRACE, 2000; DAIZO; LEVENSPIEL,

1991). A Figura 5 apresenta o perfil de fluidização em função da velocidade de escoamento do gás.

Figura 5: Regimes de fluidização em função da velocidade do gás.



Fonte: Adaptado de Grace (1986)

A Figura 5 apresenta a curva característica do processo de fluidização de leito de sólidos genéricos. A fluidização é todo o intervalo compreendido entre a fluidização iniciante, quando as partículas se apresentam inertes, ao perfil turbulento (GUPTA; SATHIYAMOORTHY, 1998).

O perfil da variação de pressão no leito com a velocidade de escoamento do gás é função das propriedades dos sólidos que constituem o leito, uma vez que este tipo de partícula possui características físicas distintas facilitando ou dificultando o escoamento do gás ascendente. Em suma, conclusões extraídas de dados obtidos na fluidização de certo material não podem, a princípio, ser extrapoladas para outro. Dito isto, faz-se necessário a realização de experimentos para verificar a variação de pressão no leito em função da velocidade de escoamento do gás para um dado tipo de partícula sólida e assim operar este de forma ótima evitando o arraste do leito, possibilitando bom contato gás-sólido (DAIZO; LEVENSPIEL, 1991).

Para possibilitar correlações e comparações entre diferentes tipos de sólidos constituintes do leito, Geldart (1973) classificou os comportamentos do contato sólido-gás em quatro categorias:

A: apresentam, de maneira geral, pequeno tamanho médio e/ou baixa densidade (inferior a $1,4 \text{ g/cm}^3$). Esse tipo de material submetido à fluidização gasosa expande-se consideravelmente antes do surgimento de bolhas. As bolhas aparecem com velocidades superiores à de mínima fluidização.

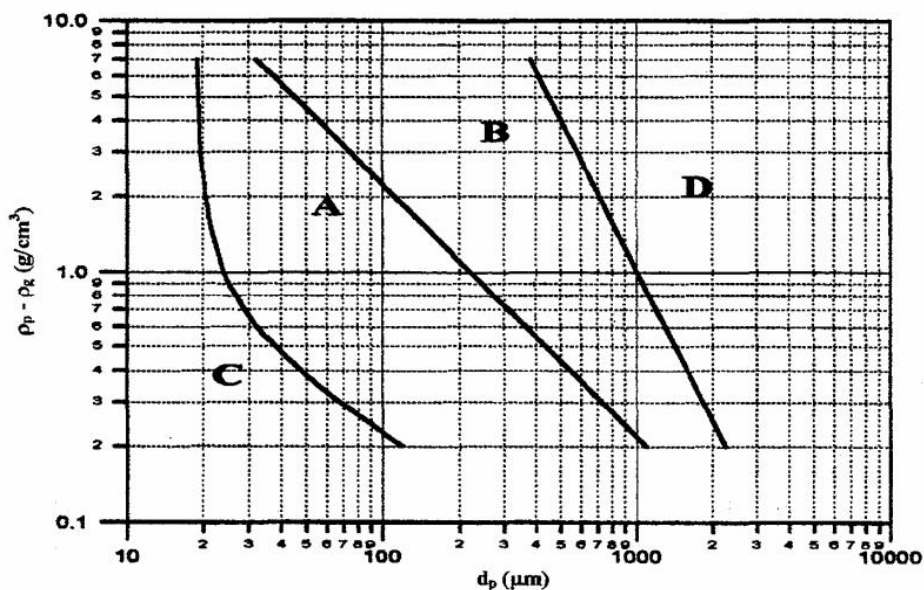
B: Apresentam diâmetro compreendido entre 40 e $500 \mu\text{m}$ e densidade superior a $1,4 \text{ g/cm}^3$. A areia é um exemplo.

C: Partículas que possuem tendência coesiva. À medida que a vazão de gás aumenta, aparecem canais preferenciais que se estendem da tela de distribuição do gás até a superfície do leito. Faz-se necessário um agitador.

D: Apresentam tamanho e/ou densidade elevada. A velocidade do gás necessária para a fluidização é alta, a mistura do material é pequena e a formação de jorro é favorecida.

A Figura 6 apresenta a classificação de partículas com respeito a variação do diâmetro de partícula e densidade específica da mesma.

Figura 6: Diagrama de classificação de partículas para fluidização gás-sólido.



Fonte: Adaptado de Geldart (1973)

O processo de fluidização apresenta ótima eficiência quanto ao contato gás-sólido para ambos os regimes de fluidização, possibilitando que esta seja uma rota interessante para a ocorrência de diversos processos industriais. Dentre estes, pode-se citar o processo de secagem em leito fluidizado, reações heterogêneas em leito fluidizado utilizando o recheio de sólidos como catalisador e outras muitas aplicações (GUPTA; SATHIYAMOORTHY, 1998).

3.1.1 O PROCESSO DE FLUIDIZAÇÃO NA INDÚSTRIA

Dentre as principais aplicações da fluidização em processos industriais, os secadores de leito fluidizado e reatores químicos de leito fluidizado são amplamente aplicados (DAIZO; LEVENSPIEL, 1991; GUPTA; SATHIYAMOORTHY, 1998).

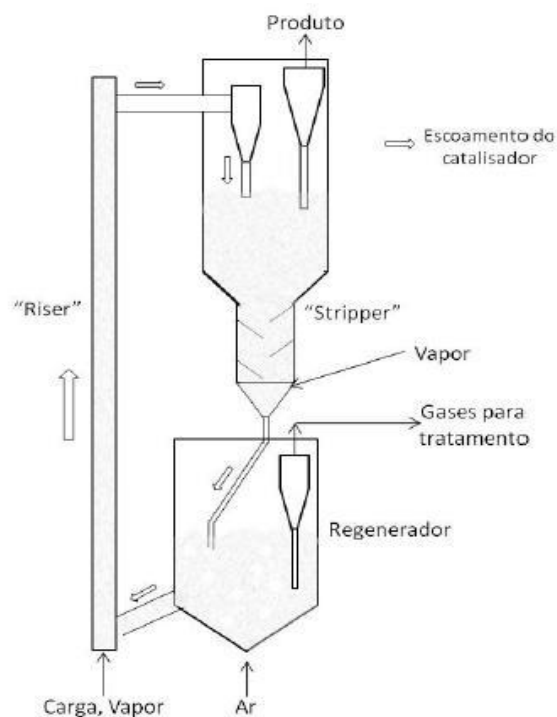
3.1.1.1 REATORES DE LEITO FLUIDIZADO

O processo de fluidização possibilita um ótimo contato gás-sólido ao longo do processo, permitindo que as partículas sejam mantidas dentro do leito com escoamento contínuo de gás. Essa possibilidade faz deste uma ótima opção para ocorrência de reações catalíticas, uma vez que as partículas constituintes do leito podem suportar catalisadores otimizando uma possível reação na corrente ascendente de gases. O reator de leito fluidizado alcança bons índices de conversão e em alguns casos é possível obter resultados próximos ao equilíbrio termodinâmico (FOGLER, 2010).

Os reatores de leito fluidizado apresentam vantagem se comparado com os demais para o processamento de reações químicas rápidas que normalmente são limitadas pelo efeito de transferência de massa pelo bom contato gás-sólido, permitindo bom índice de transferência de massa entre gás e partícula. Para a ocorrência de reações em leito fluidizado, normalmente busca-se utilizar conformações de partícula que permitam boa área de contato gás-sólido, favorecendo a ocorrência da reação além de altas velocidades relativas entre gás e partícula. Partículas pequenas são então mais favoráveis para aplicação em reatores de leito fluidizado. No entanto, estes sistemas apresentam maior perda de carga, uma vez que partículas pequenas apresentam alto fator de empacotamento e alta resistência ao escoamento, sendo necessário alto índice de escoamento do gás ascendente. Essas condições fazem com que as taxas de transferência de calor e massa entre o gás e as partículas sejam altas (GÓMEZ, 1996; MARTÍNEZ ANGEL; PINEDA VÁSQUEZ; JUNKES; HOTZA, 2009).

Na indústria química, o processo de maior aplicação de reatores de leito fluidizado é o processo de craqueamento catalítico. Este se faz presente em muitas refinarias e é responsável pela quebra de moléculas orgânicas grandes em moléculas menores, gerando assim um conjunto de produtos que são separados e seguem para demais destinos, como, por exemplo, para a produção de gasolina. No processamento de craqueamento catalítico, o sistema reacional normalmente é formado por dois reatores de leito fluidizado acoplados como apresentado na Figura 7. A carga de frações do petróleo é misturada e injetada com vapor na parte inferior do leito onde também é alimentado o catalisador.

Figura 7: Conformação operacional ilustrativa de uma unidade de craqueamento catalítico.



Fonte: Adaptado de Nitz e Guardani (2008)

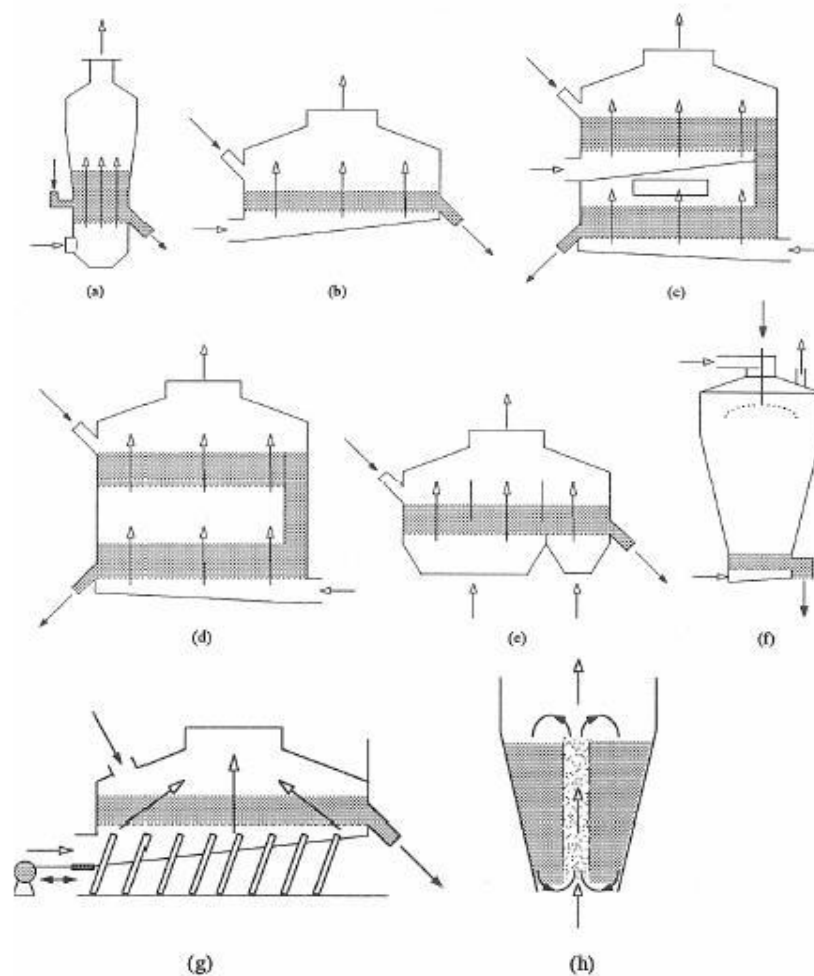
3.1.1.2 SECADORES DE LEITO FLUIDIZADO

O processo de secagem em leitos fluidizados pode ser desenvolvido em vários equipamentos dentro da indústria. Os mais comuns são os de leito fluidizado convencional, fluxo pistonado de simples estágio, duplo estágio com correntes de ar independentes, duplo estágio contracorrente, múltiplos estágios com chicanas,

fluidização por atomização, vibro-fluidização e leito de jorro (KERKHOF, 1996). Estes são apresentados na Figura 8.

Nos processos de secagem em leito fluidizado o gás ascendente é previamente aquecido e em alguns casos há uma fonte térmica interna no leito. A Figura 8 apresenta diversos tipos de secadores de leito fluidizado e a escolha do tipo de secador deve ser feita de acordo com o tipo de partícula a ser seca, da capacidade de produção, da eventual necessidade de recuperação de solvente e da demanda energética do processo (STRUMILLO, 1986).

Figura 8: Tipos de secadores de leito fluidizado (a: leito fluidizado convencional; b: fluxo pistonado de simples estágio; c: duplo estágio com correntes de ar independentes; d: duplo estágio contracorrente; e: múltiplos estágios com chicanas; f: fluidização por atomização; g: vibro-fluidização; h: leito de jorro).



Fonte: Adaptado de Kerkhof (1996)

3.2 Controle de processos químicos

Plantas químicas não operam em estado estacionário. Apesar de ser uma condição de operação desejável, nem sempre é atingido ou mantido por muito tempo. Assim, em uma planta química, as condições de operação estão sujeitas a mudanças ao longo do tempo. O nível de líquido em um equipamento, a pressão em um vaso, a vazão de um reagente ou sua composição; todas estas condições podem variar (MARTINS, 1992). Assim, existe a necessidade de se monitorar a operação destas plantas e intervir para garantir a satisfação dos objetivos operacionais.

Dentre os motivos para controlar um processo químico, os principais são:

1. Segurança:

Restrições de segurança e ambientais não podem ser violadas.

2. Operabilidade:

Condições são requeridas para que as reações desejadas ou outras operações ocorram.

3. Economia:

Plantas químicas são caras e devem gerar lucros. Produtos finais devem atender aos requerimentos de pureza do mercado ou não serão vendidos.

Pode-se pensar no caso de uma coleção de tanques nos quais materiais são aquecidos, resfriados e reagem, e de tubulações através das quais estes materiais escoam. Estes sistemas em geral não se mantêm em tal estado que a temperatura requerida para uma reação se mantenha, que a pressão além dos limites de segurança em todos os tanques seja evitada ou que a vazão exata para atingir a composição ótima do produto seja atingida (PERLINGEIRO, 2005).

Em geral, controlar um processo significa atuar sobre ele, ou sobre as condições em que o processo está sujeito, de modo a atingir algum objetivo - por exemplo, podemos achar necessário ou desejável manter o processo sempre próximo de um determinado estado estacionário, mesmo que efeitos externos tentem desviá-lo desta condição. Este estado estacionário pode ter sido escolhido por atender melhor aos requisitos de qualidade e segurança do processo.

Para o processo em questão, a fluidização, é de extrema importância o conhecimento da velocidade de escoamento do gás ascendente, pois este possui influência direta no perfil de movimento da partícula. Além disso, é importante o conhecimento da temperatura do gás, uma vez que o mesmo é amplamente aplicado em processos reacionais e de secagem, e a temperatura do gás ascendente é um parâmetro indispensável. Neste sentido, o processo de fluidização a ser verificado neste texto contará com controladores de velocidade de escoamento do gás e medidores de temperatura. Estes serão discutidos com mais detalhes na Seção 4 deste texto.

3.3 Tratamento matemático do fenômeno de fluidização

Como já foi verificado neste texto, a fluidização ocorre quando um fluxo de fluido (gás ou líquido) ascendente através de um leito de partículas que adquirem velocidade suficiente para suportar as partículas, porém sem arrastá-las junto com o fluido (DAIZO; LEVENSPIEL, 1991). O leito assume então o aspecto de um líquido em ebulição e devido a isso surgiu o termo “*fluidizado*”. O processo de fluidização é amplamente aplicado em processos de secagem, mistura, revestimento de partículas, aquecimento e resfriamento de sólidos e também congelamento. A fluidização permite a ocorrência de altas taxas de transferência de massa, boa mistura de sólidos e possibilita que as áreas superficiais das partículas sólidas fiquem completamente disponíveis para a transferência.

A eficiência na utilização de um leito fluidizado depende em primeiro lugar do conhecimento da velocidade mínima de fluidização. Para isto, é necessário verificar a dinâmica da partícula sólida de forma a buscar o equacionamento matemático que descreva este fenômeno.

3.3.1 A DINÂMICA DA PARTÍCULA SÓLIDA

Depois de uma série de experimentos, Darcy demonstrou que a velocidade média (v) de um fluido quando escoar em um leito poroso é diretamente proporcional ao gradiente de pressão disponível para o escoamento do fluido e inversamente proporcional ao comprimento do percurso como apresenta a Equação 1.

$$v = K \frac{(-\Delta P)}{L} \quad (1)$$

Onde L é o percurso através do leito, K é a constante de proporcionalidade, que depende de propriedades físicas do leito e do fluido e ΔP é a queda de pressão através do leito. A Figura 9 apresenta o esquema de um leito poroso.

A Equação de Darcy também pode ser reescrita em função do coeficiente de permeabilidade (α) e da viscosidade do fluido (μ) conforme apresentado na Equação 2.

$$v = \frac{1}{\alpha} \frac{(\Delta P)}{\mu L} \quad (2)$$

Para caracterizar a estrutura de um leito poroso, uma série de variáveis precisam ser definidas para estudar a circulação do fluido através desse leito. Dentre estas, a superfície específica do leito poroso (Equação 3) e a superfície específica de uma partícula (Equação 4).

$$A = \frac{\text{Área do leito exposta ao fluido}}{\text{Volume do leito poroso}} \quad (3)$$

$$A_p = \frac{\text{Área de partícula}}{\text{Volume de partícula}} \quad (4)$$

Além destas, é importante calcular as propriedades específicas da partícula como: diâmetro de partícula (Equação 5), esfericidade (Equação 6), diâmetro equivalente (Equação 7) e também a porosidade do leito (Equação 8).

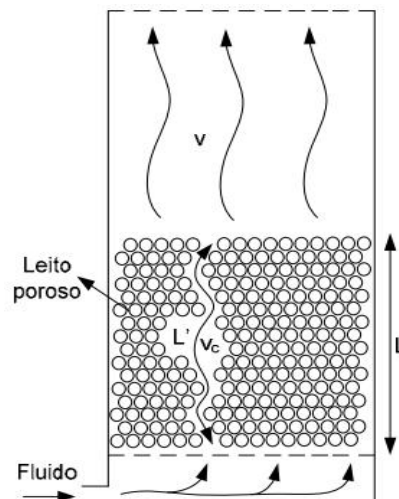
$$d_p = \frac{6V_p}{A_p} \quad (5)$$

$$\phi = \frac{\pi d_{eq}^2}{A_p} \quad (6)$$

$$d_{eq}^2 = \phi d_p^2 \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{\text{Volume de vazio}}{\text{Volume total do leito}} \quad (8)$$

Figura 9: Leito poroso com escoamento de fluido.



Fonte: Adaptado de GELDART (1973)

Em um leito poroso existem zonas sem partículas. A porosidade (ε) é definida como a razão entre o volume do leito que não está ocupado com material sólido e o volume total do leito.

Outro parâmetro importante a ser calculado sobre o fenômeno é o número de Reynolds para definir o regime de escoamento. A Equação 9 apresenta a relação para o cálculo do número de Reynolds com respeito ao escoamento do fluido.

$$Re = \frac{\rho_f v_f d_{eq}}{\mu_f} \quad (9)$$

Para o escoamento em um leito:

$$Re < 40 \rightarrow \text{Regime Laminar}$$

$$Re > 40 \rightarrow \text{Regime Turbulento}$$

Para ambos os regimes de escoamento, a equação de *Ergun* (Equação 10) descreve a variação de pressão por unidade de comprimento do leito fluidizado.

$$\frac{-\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2 \mu}{\phi^2 \varepsilon^3 d_p^2} v + 1,75 \frac{(1-\varepsilon) \rho_f}{\phi \varepsilon^3 d_p} v^2 \quad (10)$$

Tendo conhecimento do equacionamento que descreve a variação de pressão ao longo do leito, o passo seguinte é verificar a influência da velocidade do fluido sobre a variação de pressão e assim buscar as condições de mínima fluidização apresentadas na Figura 4, uma vez que este é o ponto inicial para o regime de fluidização.

Em regime laminar, a segunda parte do segundo termo da equação de *Ergun* é insignificante em relação à primeira, logo:

$$\frac{-\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2 \mu}{\phi^2 \varepsilon^3 d_p^2} v \quad (11)$$

Para uma partícula esférica:

$$\frac{-\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2 \mu}{\varepsilon^3 d_p^2} v \quad (12)$$

Onde:

$$\frac{\Delta P}{L} = (\rho_p - \rho)(1-\varepsilon) g \quad (13)$$

Dessa forma, substituindo a Equação 13 na Equação 12, o termo resultante da velocidade é a velocidade de mínima fluidização, assim:

$$v_{mf} = \frac{1}{150} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon_{mf})} \frac{\rho_p - \rho}{n} g d_p^2 \quad (14)$$

Onde n é o número de partículas que constituem o leito. Para tratando de um sistema em regime turbulento o primeiro termo passa a ser insignificante.

$$\frac{-\Delta P}{L} = 1,75 \frac{(1-\varepsilon) \rho_f}{\phi \varepsilon^3 d_p} v^2 \quad (15)$$

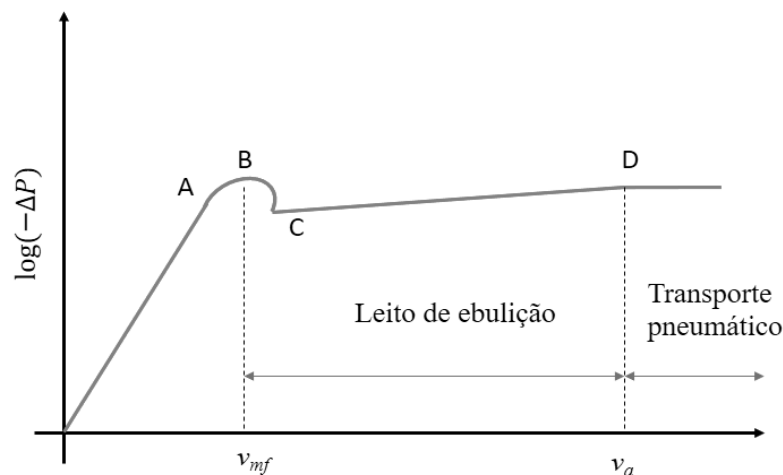
De forma análoga ao que foi feito para o processo em regime laminar, a equação 16 apresenta a velocidade de mínima fluidização para quando o escoamento interno ao leito é turbulento.

$$v_{mf} = 0,756 \left[\frac{\rho_p - \rho}{\rho} g \varepsilon_{mf}^3 d_p \right]^{1/2} \quad (16)$$

Tendo conhecimento das relações matemáticas que descrevem a condição de mínima fluidização, é possível verificar as etapas de fluidização apresentadas na Figura 10.

As Equações 14 e 16 descrevem a velocidade necessária para a mínima fluidização, a Figura 10 apresenta esta região mostrando com mais detalhes o efeito da velocidade do gás ascendente sobre a variação de pressão para um leito genérico.

Figura 10: Curva característica da fluidização com descrição das etapas.



Fonte: Autor deste trabalho (2021)

Da velocidade inicial ($v_{mf} = 0$) ao ponto A, verifica-se o aumento da velocidade e da queda de pressão do fluido. Do ponto A ao ponto B o leito está fluidizado. Do ponto B ao ponto C, com o aumento da velocidade, há pouca variação na pressão de maneira instantânea devido à mudança repentina da porosidade do leito. Do ponto C ao ponto D a velocidade varia linearmente com a queda de pressão até chegar no ponto D. Após o ponto D, as partículas começam a ser carregadas pelo fluido e perde-se a funcionalidade do sistema.

3.3.2 EFEITO DA PARTÍCULA SOBRE O COMPORTAMENTO FLUIDOMECÂNICO DO PROCESSO DE FLUIDIZAÇÃO

Como já verificado ao longo deste texto, as partículas não se comportam da mesma maneira quando submetida à fluidização gasosa. Geldart (1973) apresenta a classificação das partículas sendo estas dos tipos A, B, C e D, como pode ser verificado na Figura 5. O Quadro 1 apresenta um sumário das propriedades típicas dos diferentes tipos de partículas.

Quadro 1: Classificação geral das partículas de Geldart.

GRUPO	GRUPO C	GRUPO A	GRUPO B	GRUPO D
Características mais obvias.	dp<20µm Coesivo Muito difícil de fluidizar	20µm<dp<100µm Ideal para fluidizar Exibe faixa de fluidização não-borbulhante.	40µm<dp<500µm Começa borbulhamento a U _{mf}	dp>600µm Sólidos grossos
Sólidos típicos	Farinha, cimento	Catalisadores	Areia de construção.	Grãos de café.
PROPRIEDADES				
Expansão do leito	Baixa devido à canalização.	Alta	Moderado	Baixa
Taxa de de-aeração	Inicialmente rápida, logo exponencial	Lenta, linear.	Rápida	Rápida.
Propriedades das bolhas	Não existe bolhas só canalização	Bolhas rompem-se e coalescem. Máximo tamanho de bolha.	Não existe limite de tamanho	Não existe limite de tamanho.
Mistura de sólidos	Muito baixa	Alta	Moderada	Baixa
Jorro	Não	Não	Somente na superfície	Sim, ainda em leitos profundos.

Fonte: Adaptado de Geldart (1973)

Assim, o tamanho da partícula, densidade do fluido e da partícula, e viscosidade do fluido, são os fatores mais significantes na determinação do modo de fluidização. O número discriminação (D_n) apresenta um resultado interessante para determinar o modo de fluidização conforme apresenta a Equação 17 (WEN; YU, 1966).

$$D_n = \frac{A_r}{Re_{mf}} \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho} \quad (17)$$

Onde A_r é o número de Arquimedes, Re_{mf} é o número de Reynolds de mínima fluidização, este é calculado a partir da velocidade de mínima fluidização.

Com base no número de discriminação, a fluidização pode ser classificada como:

$$0 \leq D_n \leq 10^4 \rightarrow \textit{Fluidização particulada}$$

$$10^4 \leq D_n \leq 10^6 \rightarrow \textit{Fluidização transacional}$$

$$D_n > 10^6 \rightarrow \textit{Fluidização agregativa}$$

Para quando o número de discriminação é baixo há uma fluidização mais uniforme. Portanto, quando partículas grosseiras e pesadas são fluidizadas aumentando a massa específica do fluido e/ou a viscosidade do fluido tende-se à fluidização particulada. Além do tamanho da partícula, a esfericidade da mesma influencia na fluidodinâmica das partículas no leito. A esfericidade representa um fator de forma, ou seja, uma característica que reflete o formato ou geometria da partícula (BASU, 2006; JORDAN; BALDASSIN; CORTEZ; MOTOMIYA, 2016).

A Tabela 1 apresenta a esfericidade de alguns materiais sólidos comumente utilizados no processo de fluidização.

Tabela 1: Esfericidade de partículas sólidas.

Material	Esfericidade
Areia (média de vários tipos)	0,75
Areia sílica-quartzo (grão 407/40)	0,60
Bagaço de cana	0,30 - 0,55
Calcário	0,45
Carvão (picado)	0,65
Carvão (pulverizado)	0,73
Milho	0,66
Soja	0,90

Fonte: Adaptado de Basu (1991)

A temperatura do gás ascendente pode provocar variações inesperadas no comportamento do leito, assim, é necessário verificar a influência deste parâmetro sobre o comportamento do leito fluidizado. O efeito da temperatura sobre a qualidade de um leito fluidizado é função do tamanho da partícula. Para partículas do tipo A, como a areia,

o número de discriminação diminui com o aumento da temperatura. A diferença dos Grupo B e o Grupo D onde o número de discriminação aumenta com a aumento temperatura, implicando que a fluidização do Grupo A melhoraria em operações a alta temperatura (GELDART, 1973; YATES, 1996; YOSHIDA; SAKANE; SHIMIZU; FUNDAMENTALS, 1982).

3.4 Considerações acerca dos sólidos verificados neste texto

O presente trabalho tem como objetivo verificar o comportamento fluidodinâmico empregando feijão (*Phaseolus vulgaris*), milho (*Zea Mays Everta*) e carvão vegetal do caroço de açaí (*Euterpe Oleracea*), como constituintes do leito, assim, se faz necessário verificar propriedades de esfericidade, densidade e diâmetro médio de partícula destes componentes sólidos. A Tabela 2 apresenta as propriedades físicas dos materiais sólidos que serão verificados neste estudo.

Tabela 2: Propriedades físicas dos materiais sólidos utilizados neste estudo.

Material	Esfericidade	Densidade
Caroço de feijão	0,66	1,351 g/cm ³
Caroço de milho	0,79	1,244 g/cm ³
Carvão vegetal do caroço de açaí	0,91	0,684 g/cm ³

Fonte: Autor deste trabalho com dados de Resende (2005) e dados de referências não especificadas

O objetivo principal deste trabalho é verificar o comportamento fluidodinâmico do leito em função dos materiais sólidos previamente descritos sem buscar uma aplicação específica para estes, dessa forma a descrição feita sobre estes será sucinta, apresentada junto dos materiais e métodos, destacando somente as características destes que influenciam o comportamento fluidodinâmico do leito.

4 METODOLOGIA

Esta secção tem por objetivo apresentar detalhes acerca da metodologia utilizada para aquisição dos dados experimentais que serão posteriormente discutidos bem como materiais, equipamentos, instrumentos e softwares utilizados nos ensaios.

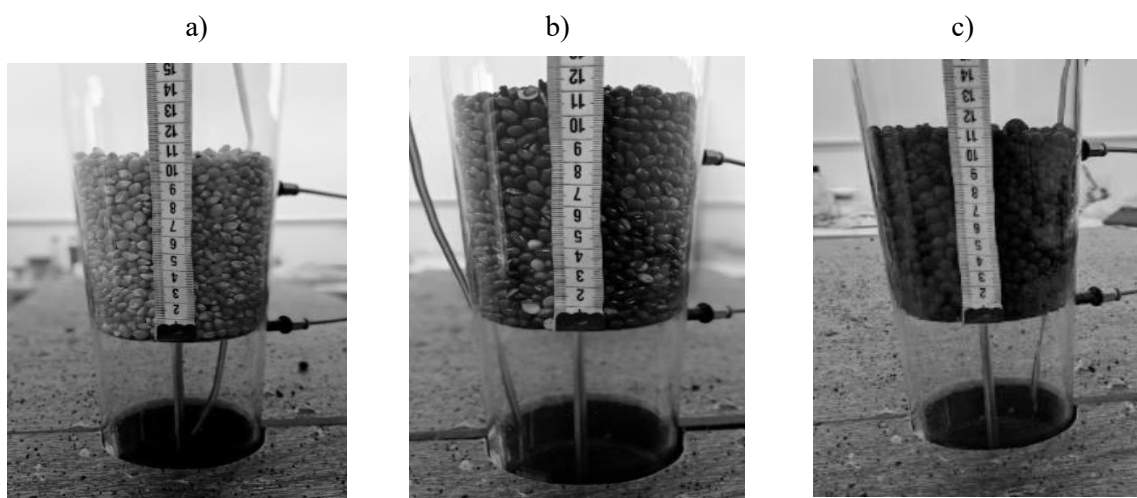
4.1 Local de desenvolvimento dos experimentos

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Instrumentação e Automação de Processos localizado no Laboratórios de Ensino e pesquisa em Engenharia Química – LEPEQ do Centro de Ciências Exatas e Tecnologias da Universidade Federal do Maranhão – UFMA.

4.2 Materiais utilizados

Como já dito anteriormente, este trabalho tem por objetivo verificar o comportamento fluidodinâmico de um leito fluidizado contendo feijão (*Phaseolus vulgaris*), milho (*Zea Mays Everta*) e carvão vegetal do caroço de açaí (*Euterpe Oleracea*) como recheio para o leito. A Figura 11 apresenta de forma ilustrativa os materiais utilizados como sólidos particulados para preenchimento do leito.

Figura 11: Sólidos utilizados como leito para o processo de fluidização (a: milho (*Zea Mays Everta*); b: feijão (*Phaseolus vulgaris*); c: carvão vegetal do caroço de açaí (*Euterpe Oleracea*)).



Para ambos os ensaios, fixou-se uma altura do leito igual a 11 cm. Assim, este não será um parâmetro a ser avaliado ao longo deste experimento.

As amostras de feijão (*Phaseolus vulgaris*) e milho (*Zea Mays Everta*) foram obtidas em mercados convencionais da cidade de São Luís/MA e utilizadas nas condições que estas são comercializadas sem nenhum tipo de tratamento prévio. As amostras de carvão vegetal de açai foram obtidas em processo de calcinação à 350 °C. Ambos os materiais utilizados são considerados do GRUPO D de acordo com Geldart (1973), sendo materiais de diâmetro superior a 1 mm.

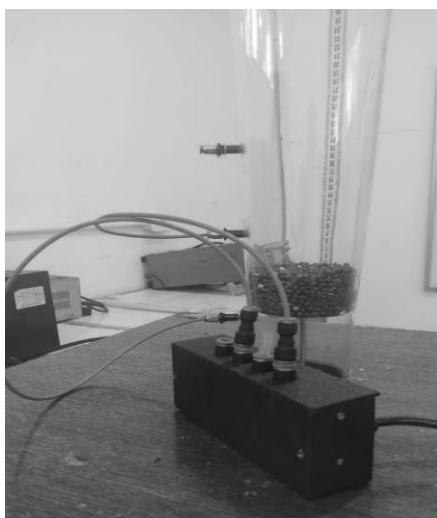
4.3 Equipamentos e instrumentos utilizados

Para o desenvolvimento deste experimento, utilizou-se um aparato experimental do Laboratório de Instrumentação e Automação de Processos localizado no Laboratórios de Ensino e pesquisa em Engenharia Química – LEPEQ para verificação do fenômeno de fluidização. Para tanto, foram utilizados os seguintes equipamentos e instrumentos:

1. Leito cilíndrico cônico de vidro

A Figura 12 apresenta o leito experimental utilizado para verificação do fenômeno de fluidização. Confeccionado em vidro, apresenta diâmetro não constante por ser cônico, baixo fator de atrito nas laterais minimizando a perda de carga devido ao atrito das partículas com o leito.

Figura 12: Leito cilíndrico cônico de vidro.



Fonte: Autor deste trabalho (2022)

Da Figura 12, nota-se que conectado ao leito tem-se três sensores acoplados através de cabos azuis. Estes são responsáveis por medir a temperatura do leito e a variação de pressão em função da variação da velocidade de escoamento de ar.

A coluna é acoplada a uma caixa de madeira que isola o escoamento interno. Conectado a entrada do leito, tem-se um compressor de ar responsável por promover o escoamento ascendente na coluna. Para o controle da vazão do fluido, foi utilizado um inversor de frequência, com velocidade máxima de 3480rpm.

2. Inversor de frequência

A Figura 13 apresenta o inversor de frequência utilizado para o controle da velocidade de escoamento do ar comprimido.

Figura 13: Inversor de frequência.



Fonte: Autor deste trabalho (2022)

Em geral, o inversor de frequência variável é um tipo de controlador que tem a função de acionar um motor elétrico e ao mesmo tempo variar a frequência e a tensão que é fornecida ao motor com o objetivo de controlar a sua velocidade e potência consumida (FRANCHI, 2009).

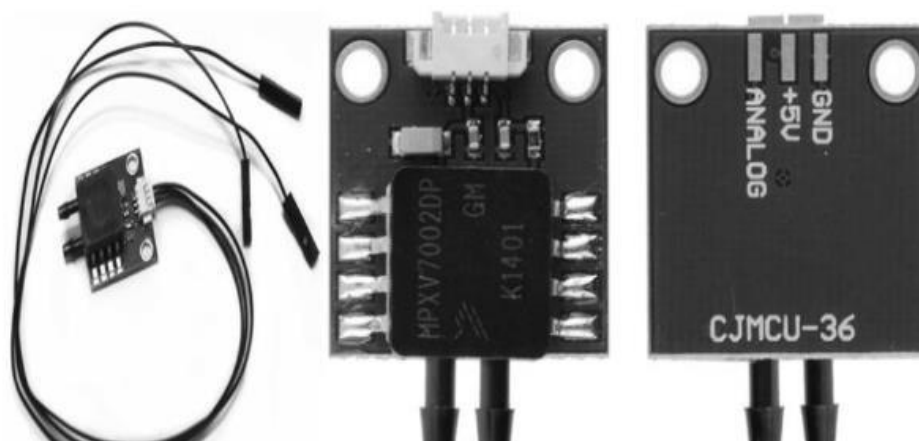
3. Sensor de pressão diferencial MPXV7002D

Para a verificação da pressão pontual do sistema na base da coluna e desta com a variação provocada pelo escoamento do fluido, utilizou-se um sensor de pressão diferencial analógico MPXV7002DP da *Metaltext* que fornece um sinal de saída

proporcional à pressão aplicada, sendo capaz de medir faixas de -2 a +2 kPa (-0.3 a +0.3psi).

A Figura 14 apresenta o sensor de pressão diferencial *MPXV7002D* utilizado para medir a variação de pressão do leito, parâmetro de extrema importância para caracterização do sistema de fluidização, uma vez que a pressão é função das variações de velocidade de escoamento do fluido.

Figura 14: Sensor de pressão diferencial MPXV7002D.



Fonte: Imagem ilustrativa obtida do portal digital da *Metalex*

O sensor de Pressão 40KPa MPXV7002D é um componente eletrônico muito compacto e tecnológico, que pode atuar em conjunto com plataformas de prototipagem. É capaz de medir a pressão em gases entre 0kPa a 40kPa, entretanto esses gases devem ser límpidos, secos e completamente não corrosivos.

4.4 Calibração dos sensores

Uma vez que os resultados reportados pelos sensores não apresentam necessariamente o resultado de interesse, faz-se necessário a calibração deste para correlacionar a informação fornecida pelo sensor com a grandeza que se busca mensurar. Para o problema em questão, são utilizados sensores que medem a variação de altura dos sólidos dentro do leito, os resultados apresentados pelo sensor devem ser relacionados com a altura através de uma relação matemática.

Os sensores informam dados de tensão de acordo com a variação da grandeza de interesse, assim, a uma dada condição inicial, a tensão apresentada pelo sensor será nula,

uma vez que ainda não foram verificadas variações no sistema. Variando esta grandeza, a tensão apresentada pelo sensor tende a variar.

Verificando a variação de altura, no instante $t = 0$ a tensão apresentada pelo sensor é nula, neste momento tem-se conhecimento do primeiro ponto, este sendo $(T = 0, h = 0)$. Onde T é a tensão apresentada pelo sensor e h é a variação de altura. Variando a altura para $h = h_1$, a tensão fornecida pelo sensor será T_1 , assim, é conhecido o segundo ponto (T_1, V_1) . Repetindo este experimento para distintas condições de altura, obtém-se distintas condições de tensão e este conjunto de pontos podem ser utilizados para obtenção de um ajuste polinomial que relacione os dados de tensão com a altura do leito.

4.5 Sobre os softwares utilizados

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados os seguintes *softwares*:

1. ***Excel versão 2016***

O *software Excel* da *Microsoft* foi utilizado para o tratamento dos dados obtidos ao longo do experimento.

2. ***LabVIEW***

Para o controle do processo e das respostas fornecidas pelos sensores e para o controle dos equipamentos envolvidos no experimento, foi utilizado o *software LabVIEW* com o objetivo de verificar em tempo real informações de interesse dentro do processo que está em execução. O *LabVIEW* é um software de engenharia de sistemas criado especificamente para aplicações de teste, medição e controle, com rápido acesso ao hardware e às informações obtidas a partir dos dados. Trata-se de um *software* comercial, cuja licença de uso, o Laboratório de Instrumentação e Automação de Processos possui.

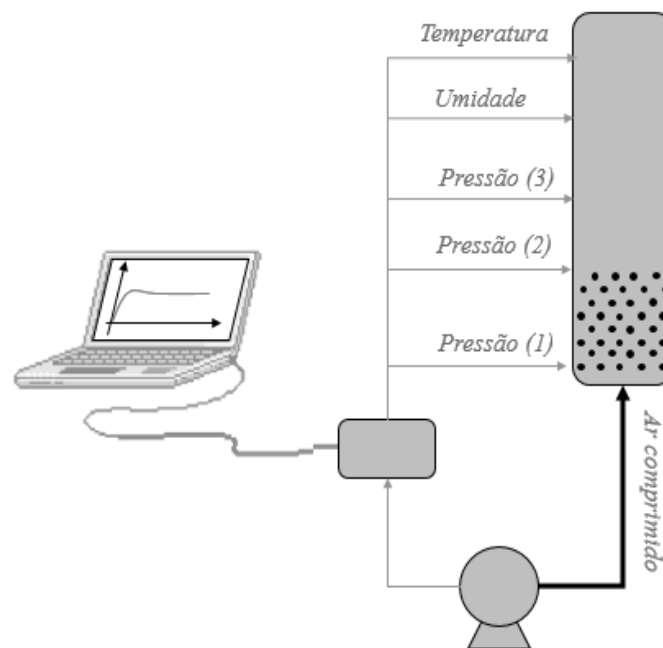
4.6 Procedimento experimental para aquisição de dados

A Figura 15 apresenta de forma superficial a conformação operacional para aquisição dos dados experimentais do leito fluidizado. Os sensores acoplados no leito são conectados ao computador sendo operados e controlados pelo *software LabVIEW*,

apresentando em tempo real o comportamento do leito. O compressor de ar é conectado ao inversor de frequência, permitindo o controle da vazão de alimentação do ar comprimido na base do leito. A velocidade de escoamento do leito pode ser controlada pelo *LabVIEW* e a variação de altura bem como a pressão do leito podem então, ser medidos. Os resultados são exportados na forma de planilha podendo ser lidas no *software Excel*.

Na Figura 15 são destacados os sensores de temperatura, umidade, pressão 1, pressão 2 e pressão 3. Os sensores de pressão 1, 2 e 3 são responsáveis por medir as pressões antes da placa distribuidora, 5 cm após a placa distribuidora e 10 cm após a placa distribuidora, respectivamente.

Figura 15: Conformação operacional resumida.

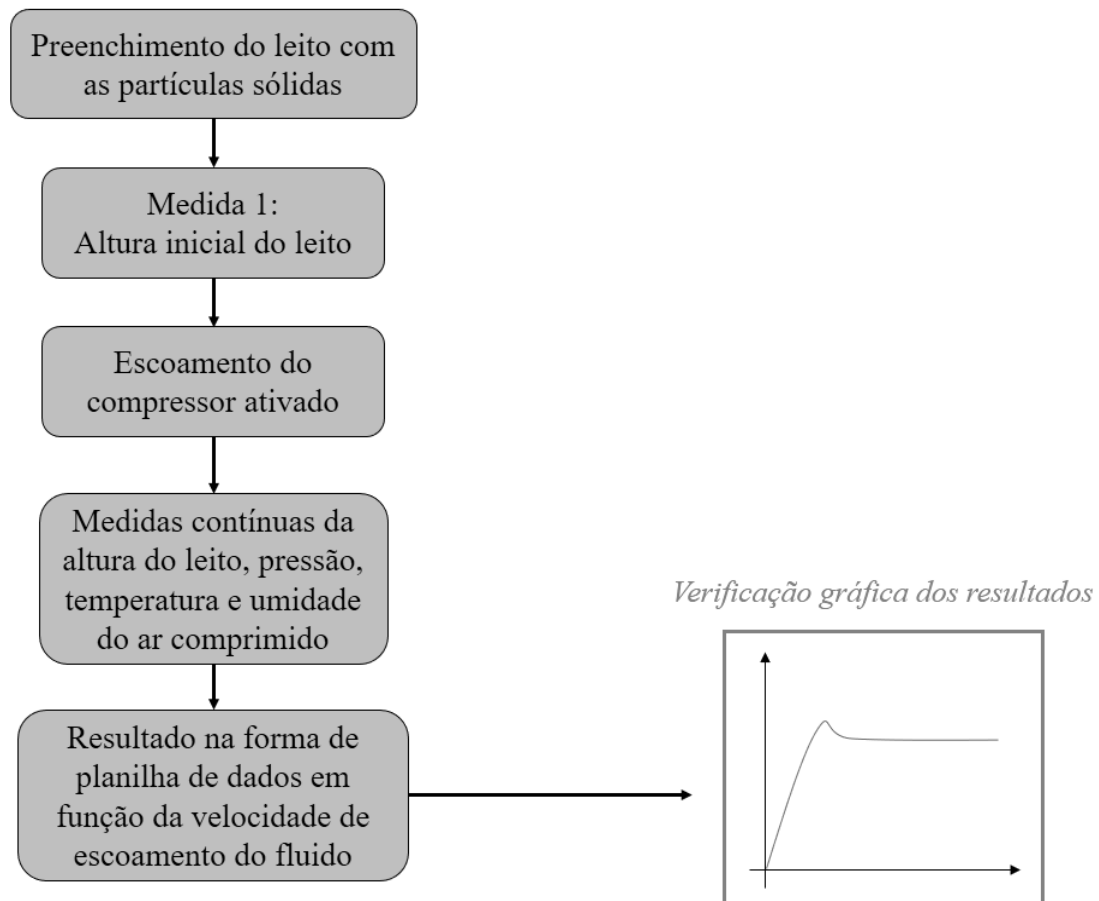


Fonte: Autor deste trabalho (2022)

No início do experimento, o leito foi preenchido com os sólidos selecionados. Para este estudo, a altura inicial do leito foi fixada em 11 cm. Iniciou-se o escoamento do leito com baixa vazão de forma que os sólidos ainda não apresentavam perfil de agitação. Neste momento a variação de pressão foi mínima, uma vez que os sólidos ainda apresentavam estado fixo. O passo seguinte foi variar a velocidade de escoamento do ar comprimido e verificar as variações de pressão e altura em função da velocidade de escoamento do fluido. A Figura 16 apresenta o fluxograma de execução do experimento de leito

fluidizado utilizado para o desenvolvimento deste trabalho. Os resultados da pressão e altura do leito em função da velocidade de escoamento do fluido são reportados na forma de dados de planilha e podem ser plotados para melhor verificação do comportamento experimental. Além desta possibilidade, o *LabVIEW* também apresenta graficamente os resultados.

Figura 16: Fluxograma de execução da campanha experimental.



Fonte: Autor deste trabalho (2022)

A secção seguinte tem por objetivo apresentar os resultados obtidos seguindo este procedimento experimental para a obtenção da curva característica do sistema de fluidização dos três sólidos verificados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta secção tem por objetivo apresentar as discussões acerca dos resultados obtidos descrevendo os comportamentos fluidodinâmicos de fluidização dos leitos contendo feijão (*Phaseolus vulgaris*), milho (*Zea Mays Everta*) e carvão vegetal do caroço de açaí (*Euterpe Oleracea*), como constituintes do leito.

5.1 Curvas de calibração dos sensores

Antes de tratar dos resultados específicos dos leitos fluidizados, é necessário buscar correlações matemáticas que possibilitem relacionar os dados apresentados pelos sensores com os que são necessários para a descrição do comportamento do leito. A Tabela 3 apresenta dados que relacionam a medida de altura verificada pelo sensor com a tensão apresentada no mesmo. Dessa, será possível traçar uma curva que descreva relação tensão *versus* variação de altura e esta será utilizada para converter dados de tensão em altura e assim verificar o comportamento do leito.

Tabela 3: Dados de tensão versus variação de altura para os sensores 1, 2 e 3.

Sensor 1		Sensor 2		Sensor 3	
ΔH (in)	Tensão (V)	ΔH (in)	Tensão (V)	ΔH (in)	Tensão (V)
0,000	2,730	0,000	2,830	0,000	2,730
1,000	2,970	1,000	3,060	0,900	2,890
3,000	3,220	2,000	3,275	1,900	3,150
3,800	3,640	2,950	3,520	2,900	3,350
4,900	3,940	3,900	3,800	3,900	3,600
5,900	4,190	4,900	3,970	4,900	3,870
6,800	4,370	5,900	4,290	5,870	4,100
7,850	4,650	6,800	4,440	6,900	4,350
8,900	4,850	7,800	4,700	7,800	4,550
9,400	4,990	9,300	4,950	8,900	4,840

Fonte: Autor deste trabalho (2022)

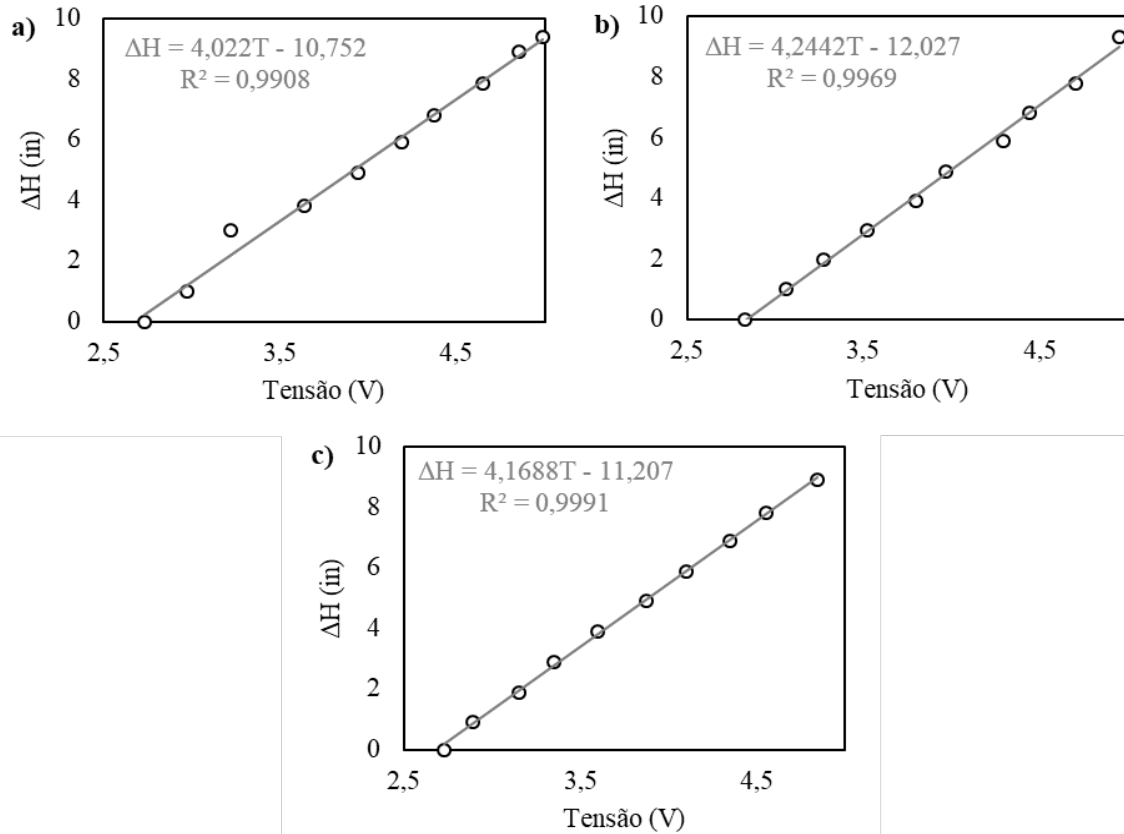
Tendo os dados de tensão *versus* variação de altura é possível verificar graficamente este resultado e buscar um ajuste polinomial que possibilite a conversão de dados de tensão para altura. A Figura 17 apresenta os ajustes polinomiais para os sensores e com os resultados destes, as Equações 18, 19 e 20 apresentam as equações de calibração dos sensores 1, 2 e 3, respectivamente.

$$\Delta H(in) = 4.022T(V) - 10.752 \quad (18)$$

$$\Delta H(in) = 4.242T(V) - 12.027 \quad (19)$$

$$\Delta H(in) = 4.168T(V) - 11.207 \quad (20)$$

Figura 17: Curva de calibração dos sensores (a: sensor 1; b: sensor 2; c: sensor 3).



Fonte: Autor deste trabalho (2022)

Tendo conhecimento das relações matemáticas entre tensão e variação de altura no leito, o passo seguinte é verificar o comportamento fluidodinâmico do leito fluidizado em função do sólido constituinte do leito.

5.2 Comportamento fluidodinâmicos do leito fluidizado

Para verificação do comportamento fluidodinâmico do leito serão apresentadas as curvas características do leito (ΔP versus Q) e o comportamento térmico do leito (*Temperatura versus Q* e *Umidade versus Q*).

5.2.1 LEITO FLUIDIZADO CONTENDO FEIJÃO

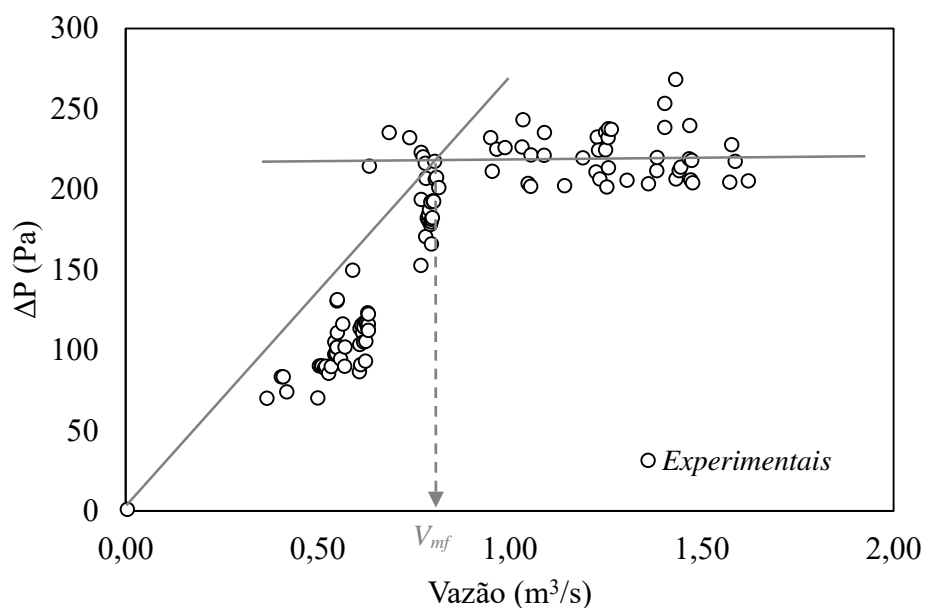
A Figura 18 apresenta o comportamento do leito contendo feijão. No instante zero, as partículas estão inertes. Com o aumento da vazão de escoamento do ar comprimido, os espaçamentos entre os sólidos tendem a ser elevados. Visualmente, o fenômeno de fluidização tem início para vazões próximas a $0,804 \text{ m}^3/\text{s}$, em que as partículas passam a ter maior espaçamento e o ar passa a escoar entre os sólidos com maior facilidade. Além disto, nesta condição a variação de pressão no leito passa a ser menor, indicando que o sistema entrou em estado de fluidização. A Figura 19 apresenta a curva característica do leito contendo feijão como sólido particulado.

Figura 18: Comportamento do leito contendo feijão em função do tempo.



Fonte: Autor deste trabalho (2022)

Figura 19: Curva característica do sistema fluidizado contendo feijão.

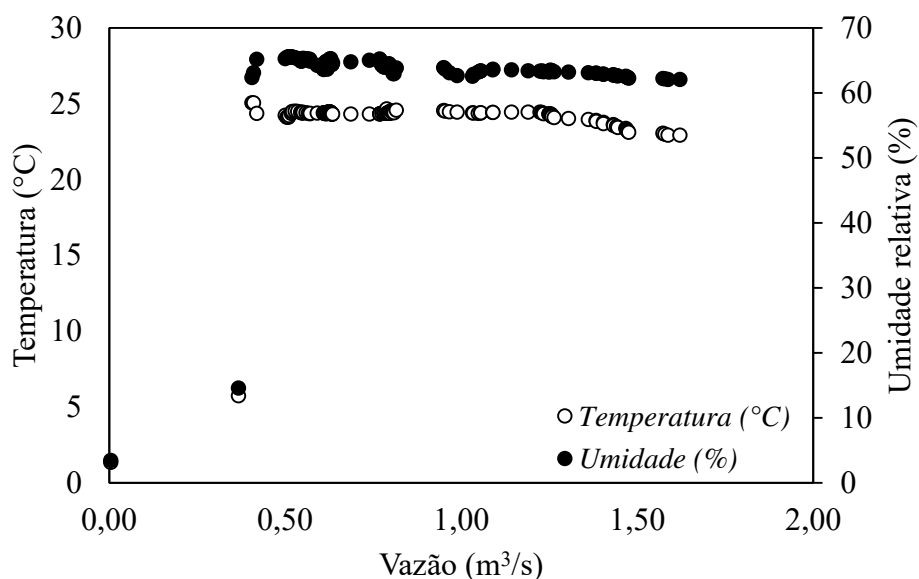


Fonte: Autor deste trabalho (2022)

Os resultados experimental e calculado por *Ergun* concordam para a afirmação de que a condição de mínima fluidização é algum valor próximo a $0,804 \text{ m}^3/\text{s}$. Os resultados obtidos utilizando a equação de *Ergun* indicam que a mínima fluidização deste sistema é para a vazão igual a $0,845 \text{ m}^3/\text{s}$ e para os dados experimentais esta condição é obtida para vazões entre $0,78$ e $0,861 \text{ m}^3/\text{s}$, assim, apesar dos desvios visíveis entre dados calculados e experimentais, pode-se afirmar que estes concordam quanto a condição de mínima fluidização.

A Figura 20 apresenta os perfis de temperatura e da umidade relativa no leito contendo caroços de feijão. Nota-se que inicialmente estas propriedades apresentam baixo valor modular, que tendem a crescer exponencialmente com o aumento da vazão. A temperatura do leito mantém-se próxima a temperatura ambiente com acréscimos na vazão de escoamento, mantendo valores constantes próximos a $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Os primeiros dados de temperatura são erros de medida, uma vez que estão muito abaixo da temperatura ambiente.

Figura 20: Perfis de temperatura e umidade relativa no leito contendo feijão.



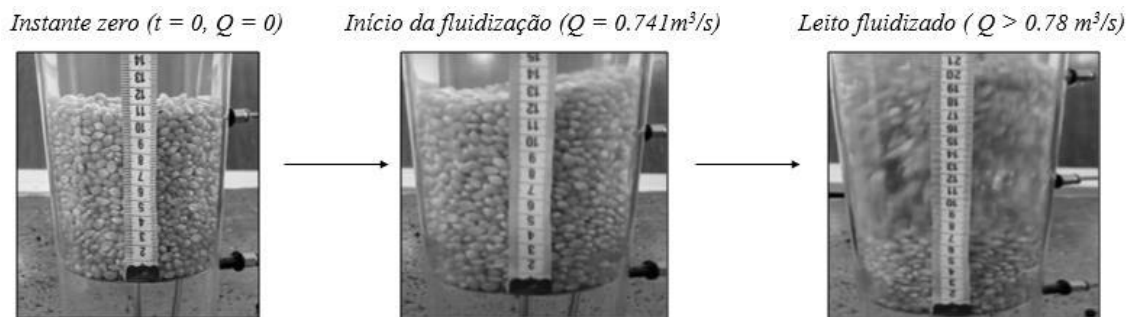
Fonte: Autor deste trabalho (2022)

Os resultados para a umidade relativa comportam-se de forma semelhante aos da temperatura, mantendo-se constantes próximos a 70% , umidade relativa próxima à condição ambiente.

5.2.2 LEITO FLUIDIZADO CONTENDO MILHO

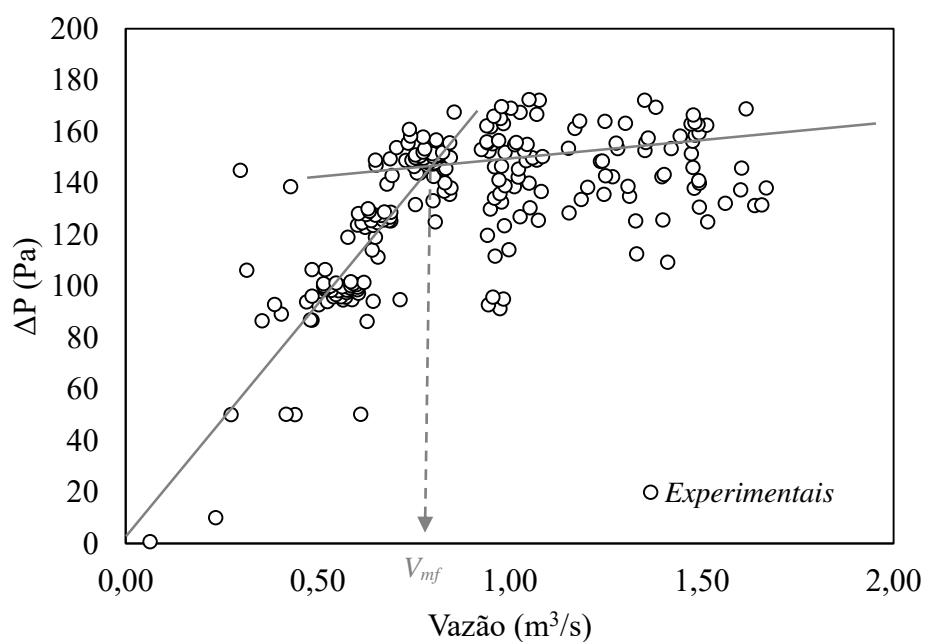
A Figura 21 apresenta o comportamento do leito contendo milho. No instante zero, as partículas estão inertes. Com o aumento da vazão de escoamento do ar comprimido, os espaçamentos entre os caroços de milho tendem a ser elevados. Visualmente, o fenômeno de fluidização tem início para vazões próximas a $0,741 \text{ m}^3/\text{s}$, em que as partículas passam a ter maior espaçamento e o ar passa a escoar entre os sólidos com maior facilidade. Além disto, nesta condição a variação de pressão no leito passa a ser menor, indicando que o sistema entrou em estado de fluidização. A Figura 22 apresenta a curva característica do leito contendo caroços de milho como sólido particulado.

Figura 21: Comportamento do leito contendo milho em função do tempo.



Fonte: Autor deste trabalho (2022)

Figura 22: Curva característica do sistema fluidizado contendo milho.

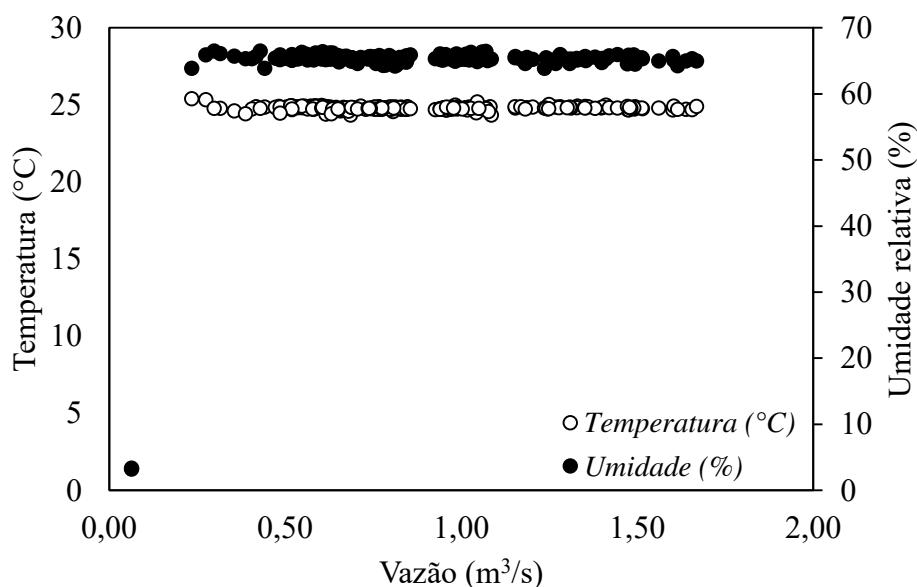


Fonte: Autor deste trabalho (2022)

Os resultados experimental e calculado por *Ergun* concordam para a afirmação de que a condição de mínima fluidização é algum valor próximo a $0,741 \text{ m}^3/\text{s}$. Os resultados obtidos utilizando a equação de *Ergun* indicam que a mínima fluidização deste sistema é para a vazão igual a $0,732 \text{ m}^3/\text{s}$ e para os dados experimentais esta condição é obtida para vazões entre $0,7$ e $0,75 \text{ m}^3/\text{s}$, assim, apesar dos desvios visíveis entre dados calculados e experimentais, pode-se afirmar que estes concordam quanto a condição de mínima fluidização.

A Figura 23 apresenta os perfis de temperatura e da umidade relativa do leito contendo caroços de feijão. Nota-se que inicialmente estas propriedades apresentam baixo valor modular, que tendem a crescer exponencialmente com o aumento da vazão. A temperatura do leito mantém-se próxima a temperatura ambiente com acréscimos na vazão de escoamento, mantendo valores constantes próximos a $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Os primeiros dados de temperatura são erros de medida, uma vez que estão muito abaixo da temperatura ambiente. Os resultados para a umidade relativa comportam-se de forma semelhante aos da temperatura, mantendo-se constantes próximos a 70% , umidade relativa próxima à condição ambiente.

Figura 23: Perfis de temperatura e umidade relativa no leito contendo milho.

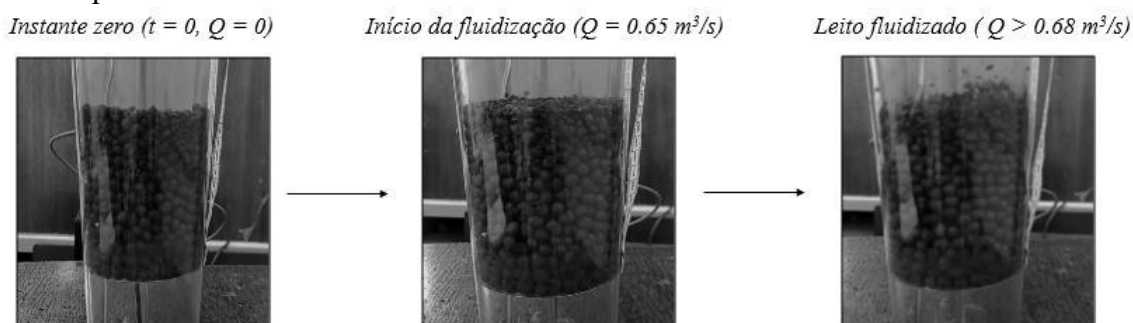


Fonte: Autor deste trabalho (2022)

5.2.3 LEITO FLUIDIZADO CONTENDO CARVÃO VEGETAL DO CAROÇO DE AÇAÍ

A Figura 24 apresenta o comportamento do leito contendo *carvão vegetal do caroço de açaí*. No instante zero, as partículas estão inertes. Com o aumento da vazão de escoamento do ar comprimido, os espaçamentos entre as partículas de carvão do caroço de açaí tendem a ser elevados. Visualmente, o fenômeno de fluidização tem início para vazões próximas a $0,655 \text{ m}^3/\text{s}$, em que as partículas passam a ter maior espaçamento e o ar passa a escoar entre os sólidos com maior facilidade. Além disto, nesta condição a variação de pressão no leito passa a ser menor, indicando que o sistema entrou em estado de fluidização.

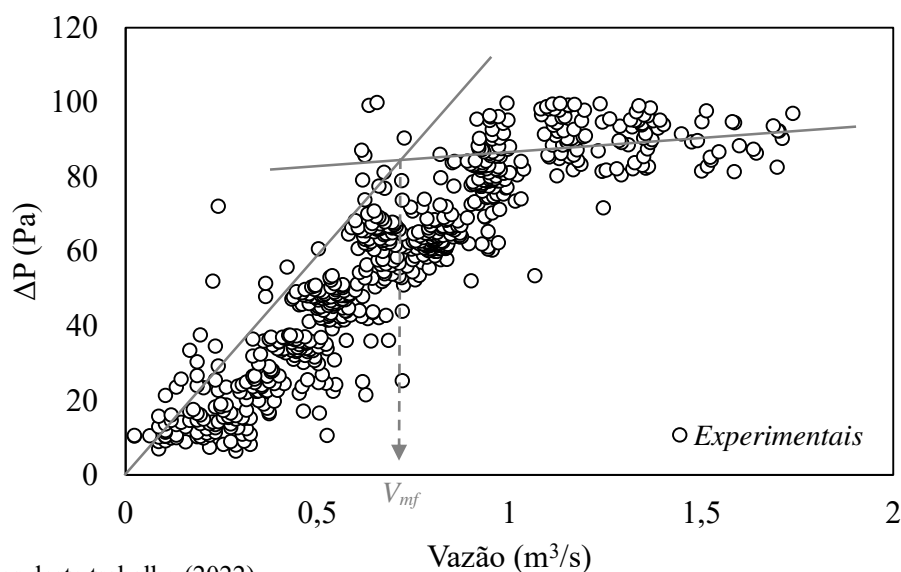
Figura 24: Comportamento do leito contendo carvão vegetal de caroços de açaí em função do tempo.



Fonte: Autor deste trabalho (2022)

A Figura 25 apresenta a curva característica do leito contendo partículas de carvão do caroço de açaí como sólido particulado.

Figura 25: Curva característica do sistema fluidizado contendo carvão vegetal do caroço de açaí.

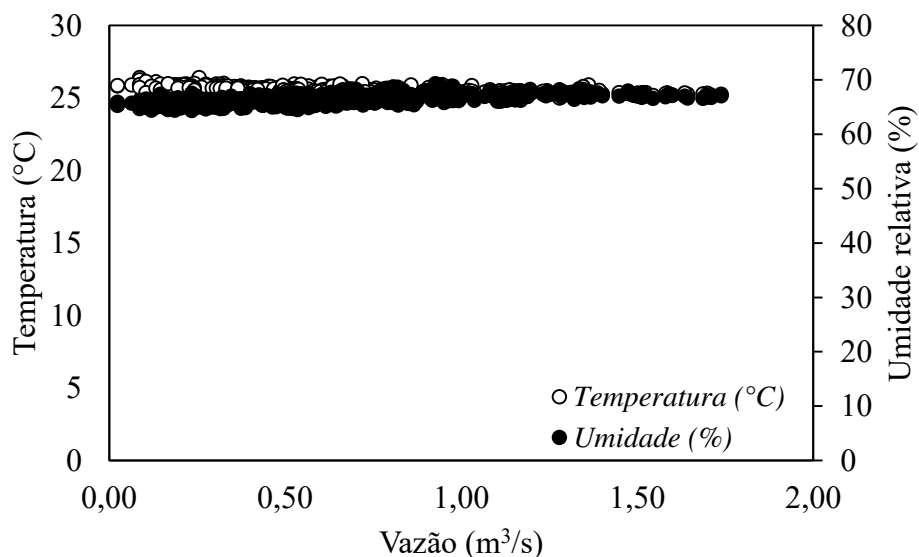


Fonte: Autor deste trabalho (2022)

Os resultados experimental e calculado por *Ergun* concordam para a afirmação de que a condição de mínima fluidização é algum valor próximo a $0,655 \text{ m}^3/\text{s}$. Os resultados obtidos utilizando a equação de *Ergun* indicam que a mínima fluidização deste sistema é para a vazão igual a $0,642 \text{ m}^3/\text{s}$ e para os dados experimentais esta condição é obtida para vazões entre $0,62$ e $0,655 \text{ m}^3/\text{s}$, assim, apesar dos desvios visíveis entre dados calculados e experimentais, pode-se afirmar que estes concordam quanto a condição de mínima fluidização.

A Figura 26 apresenta os perfis de temperatura e da umidade relativa no leito contendo partículas de carvão do caroço de açaí. Nota-se que inicialmente estas propriedades apresentam baixo valor modular, que tendem a crescer exponencialmente com o aumento da vazão. A temperatura do leito mantém-se próxima a temperatura ambiente com acréscimos na vazão de escoamento, mantendo valores constantes próximos a $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Os primeiros dados de temperatura são erros de medida, uma vez que estão muito abaixo da temperatura ambiente. Os resultados para a umidade relativa comportam-se de forma semelhante aos da temperatura, mantendo-se constantes próximos a 70% , umidade relativa próxima à condição ambiente.

Figura 26: Perfis de temperatura e umidade relativa do leito contendo partículas de carvão do caroço de açaí.



Fonte: Autor deste trabalho (2022)

5.3 Verificação do efeito da densidade e esfericidade sobre a condição de mínima fluidização

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos para as velocidades de mínima fluidização com as demais propriedades dos sólidos que constituem o leito para fins de comparação. Os dados dos sólidos foram obtidos do texto de Resende (2005).

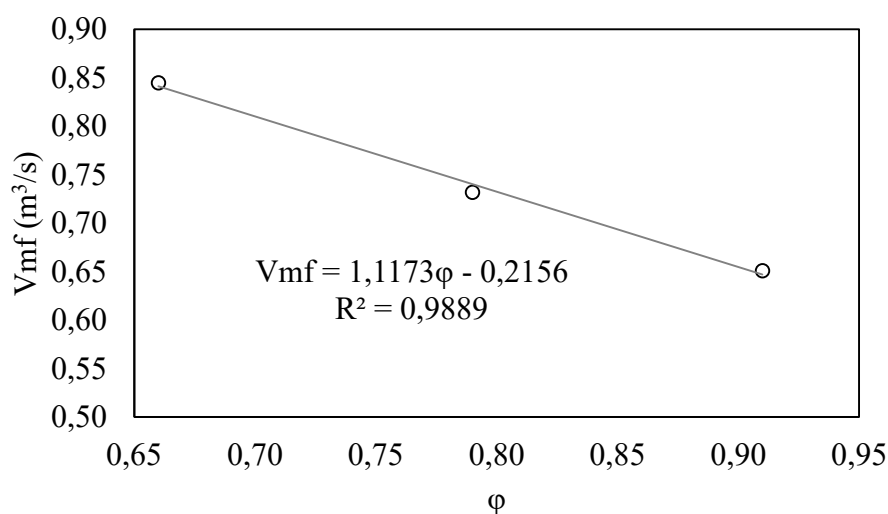
Tabela 4: Velocidade de mínima fluidização em função da esfericidade e da densidade dos sólidos.

Material	$V_{mf}(m^3/s)$	φ	$\rho (g/cm^3)$
Caroço de feijão	0,845	0,66	1,351
Caroço de milho	0,732	0,79	1,244
Carvão vegetal do caroço de açaí	0,651	0,91	0,684

Fonte: Autor deste trabalho (2022)

Tendo conhecimento dos dados das velocidades de mínima fluidização com as demais propriedades dos sólidos, estas podem ser relacionadas graficamente de forma a verificar a influência das propriedades dos sólidos sobre a velocidade de mínima fluidização do leito. A Figura 27 apresenta o comportamento da velocidade de mínima fluidização em função da esfericidade do sólido.

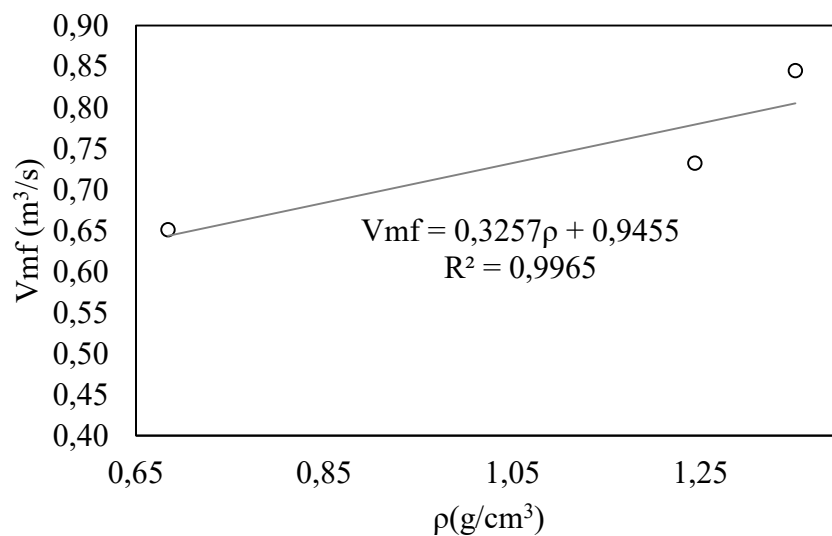
Figura 27: Comportamento da velocidade de mínima fluidização em função da esfericidade do sólido.



Fonte: Autor deste trabalho (2022)

O resultado apresentado na Figura 27 indica que há uma ótima relação linear entre a velocidade de mínima fluidização com a esfericidade do sólido, com coeficiente de determinação igual a 0,988. A seguinte verificação será com respeito a velocidade de mínima fluidização em função da densidade do sólido. A Figura 28 apresenta esta verificação.

Figura 28: Comportamento da velocidade de mínima fluidização em função da densidade do sólido.



Fonte: Autor deste trabalho (2022)

Como esperado, a velocidade de mínima fluidização apresenta comportamento crescente com o aumento da densidade, uma vez que para sólidos com maior densidade apresentam maior gradiente de força descendente, necessitando assim de maiores velocidades de escoamento para ocorrência do fenômeno de fluidização. Estes resultados estão de acordo com observações feita por Calvi (2013).

6 CONCLUSÃO

Ao longo deste trabalho foi verificado o comportamento fluidodinâmico de um leito fluidizado cônico contendo três tipos distintos de sólidos. O primeiro ensaio foi realizado utilizando caroços de feijão como constituinte do leito. O segundo utilizou caroços de milho e o terceiro utilizou o carvão vegetal obtido de caroços de açaí.

Os resultados do primeiro ensaio indicaram que a condição de mínima fluidização para o sistema utilizando caroços de feijão foi alcançada para vazões próximas a $0,804 \text{ m}^3/\text{s}$. Os resultados teóricos indicaram que a vazão de mínima fluidização para um sistema semelhante ao verificado seria de $0,845 \text{ m}^3/\text{s}$, resultado que não apresenta grande desvio com o obtido experimentalmente. O segundo ensaio experimental utilizando caroços de milho no leito indicou que a condição de mínima fluidização foi obtida para vazões próximas a $0,74 \text{ m}^3/\text{s}$. Os resultados da mínima fluidização obtidos da equação de *Ergun* são próximos aos obtidos experimental sendo igual a $0,732 \text{ m}^3/\text{s}$. Para o terceiro ensaio, utilizou-se o carvão vegetal obtido de caroços de açaí como constituinte do leito. A condição de mínima fluidização foi obtida para vazões próximas a $0,655 \text{ m}^3/\text{s}$. Os resultados teóricos indicaram que a vazão de mínima fluidização para um sistema semelhante ao verificado seria de $0,642 \text{ m}^3/\text{s}$, resultado que não apresenta grande desvio com o obtido experimentalmente. Além deste resultado, verificou-se que para os três ensaios, a temperatura e a umidade do leito mantiveram-se constantes iguais a 25°C e 70% , respectivamente.

A velocidade de mínima fluidização apresentou comportamento crescente com o aumento da densidade, e decrescente com o aumento da esfericidade, o que era esperado tendo por base a dinâmica da partícula sólida, validando assim este estudo.

Em geral, o experimento descrito permitiu verificar e tomar conhecimento de aspectos gerais do fenômeno de fluidização. Para o caso em questão, o objetivo foi alcançado quando os efeitos das características físicas dos sólidos sobre o comportamento fluidodinâmico do leito foram verificados.

REFERÊNCIAS

BASU, P. **Combustion and gasification in fluidized beds.** CRC press, 2006. 1420005154.

BASU, P.; FRASER, S. A. **Circulating fluidized bed boilers.** Springer, 1991. 1322286264.

BI, H.; ELLIS, N.; ABBA, I.; GRACE, J. J. C. E. S. A state-of-the-art review of gas–solid turbulent fluidization. 55, n. 21, p. 4789-4825, 2000.

CALVI, F. A. Estudo da fluidodinâmica de uma mistura de sólidos em um leito fluidizado gás-sólido. 2013.

CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos e outros trabalhos.** Editora Blucher, 2014. 8521208561.

DAIZO, K.; LEVENSPIEL, O. Fluidization engineering. 1991.

FOGLER, H. S. **Essentials of Chemical Reaction Engineering: Essenti Chemica Reactio Engi.** Pearson Education, 2010. 0132317176.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução À Mecânica Dos Fluidos.** Grupo Gen-LTC, 2000. 8521618301.

FRANCHI, C. M. **Inversores de frequência: teoria e aplicações.** Saraiva Educação SA, 2009. 8536511656.

GELDART, D. J. P. t. Types of gas fluidization. 7, n. 5, p. 285-292, 1973.

GÓMEZ, E. J. F. d. E. A. d. U. Projeto, construção e avaliação preliminar de um reator de leito fluidizado para gaseificação de bagaço de cana-de-açúcar. 1996.

GOMIDE, R. **Manual de operações unitárias.** Edição do Autor, 1991.

GRACE, J. R. J. T. C. J. o. C. E. Contacting modes and behaviour classification of gas—solid and other two-phase suspensions. 64, n. 3, p. 353-363, 1986.

GUPTA, C. K.; SATHIYAMOORTHY, D. **Fluid bed technology in materials processing.** CRC press, 1998. 1420049860.

JORDAN, R. A.; BALDASSIN, R.; CORTEZ, L. A.; MOTOMIYA, A. V. J. E. A. Caracterização granulométrica de biomassa polidispersa pelo método de peneiramento mecânico. 36, p. 102-113, 2016.

KERKHOF, P. Fluid bed drying: basics and challenges. 1996.

LEVENSPIEL, O. **Engenharia das reações químicas**. Editora Blucher, 2000. 8521216874.

MARTÍNEZ ANGEL, J. D.; PINEDA VÁSQUEZ, T. G.; JUNKES, J. A.; HOTZA, D. J. Q. n. Caracterização de cinza obtida por combustão de casca de arroz em reator de leito fluidizado. 32, p. 1110-1114, 2009.

MARTINS, M. I. Monitoramento e controle de processos químicos por microcomputador. 1992.

NITZ, M.; GUARDANI, R. J. R. b. d. e. q. Fluidização gás-sólido–fundamentos e avanços. p. 20-24, 2008.

PERLINGEIRO, C. A. G. **Engenharia de processos: análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos**. Editora Blucher, 2005. 8521215002.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; CECON, P. R. J. R. B. d. P. A. Forma, tamanho e contração volumétrica do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) durante a secagem. 7, n. 1, p. 15-24, 2005.

STRUMILLO, C. **Drying: principles, applications, and design**. CRC Press, 1986. 0677216300.

VILLELA, F.; DA SILVA, W. J. S. a. Curvas de secagem de sementes de milho utilizando o método intermitente. 49, p. 145-153, 1992.

WEN, C. Y.; YU, Y. H. A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity. 12, n. 3, p. 610-612, 1966.

YATES, J. J. C. e. s. Effects of temperature and pressure on gas-solid fluidization. 51, n. 2, p. 167-205, 1996.

YOSHIDA, K.; SAKANE, J.; SHIMIZU, F. J. I.; FUNDAMENTALS, E. C. A new probe for measuring fluidized bed characteristics at high temperatures. 21, n. 1, p. 83-85, 1982.