



DIELSON MUNIZ SILVA

**COMPARAÇÃO DE ANÁLISE EXPERIMENTAL DO
COMPORTAMENTO DO CARVÃO VEGETAL DE AÇAÍ
(*Euterpe Oleracea*) E DO MILHO (*Zea Mays Everta*) EM LEITO
FLUIDIZADO**

DIELSON MUNIZ SILVA

**COMPARAÇÃO DE ANÁLISE EXPERIMENTAL DO
COMPORTAMENTO DO CARVÃO VEGETAL DE AÇAÍ
(*Euterpe Oleracea*) E DO MILHO (*Zea Mays Everta*) EM LEITO
FLUIDIZADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado de Curso da Engenharia Química do Centro de Ciências 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

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Muniz Silva, Dielson.

COMPARAÇÃO DE ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DO CARVÃO VEGETAL DE AÇAÍ *Euterpe Olereacea* E DO MILHO *Zea Mays Everta* EM LEITO FLUIDIZADO / Dielson Muniz Silva. - 2022.

64 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. 2. Leito Fluidizado. 3. Milho de pipoca. I. Pereira Rodrigues, José Roberto. II. Título.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO PEREIRA RODRIGUES
Orientador – COEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. FABIO ALEJANDRO CARVAJAL FLORES
COEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. MARCELO FÁBIO LEONARDO
COEQ/CCET/UFMA

21 de janeiro de 2022

DADOS CURRICULARES**Dielson Muniz Silva**

NASCIMENTO 31/12/1982 – VIANA / MA

FILIAÇÃO José Benedito Silva
Ivete de Jesus Muniz Silva

2017.2/2021.2 Curso de Graduação
Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

Dedico este trabalho aos meus pais, José Benedito Silva e Ivete de Jesus Muniz Silva, a minha esposa Amanda Valeska Ribeiro Gomes e aos meus irmãos: Denize Muniz Silva, Denivaldo Muniz Silva e Denilma Muniz Silva que sempre me incentivaram aos estudos e que sempre acreditaram no poder transformador da educação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por todas as oportunidades que tive até chegar neste momento, sem ele eu não estaria aqui. Agradeço aos meus pais e a professora Ligia Fernanda Marques Morgado que sempre me incentivou a buscar o meu melhor, independente das situações adversas. A maior herança que a família pode dar aos filhos é o caráter e os estudos, por servirem sempre de referência e inspiração para mim, por me incentivarem e torcerem pelo meu melhor.

Ao meus avós maternos João Miguel Nunes Muniz e Maria do Rosário Nunes Muniz que pedir ao longo desta caminhada e por todo amor e carinho que tem me dedicado ao longo dos anos. Agradeço ao meu orientador Prof. Dr Fábio Alejandro Carvajal pela disponibilidade em me auxiliar neste trabalho de conclusão de curso, me permitindo usar o seu laboratório de pesquisa. Agradeço também à banca avaliadora formada pelo Prof. Dr José Roberto Rodrigues e ao Prof. Dr Marcelo Fábio Leonardo por disponibilizarem o seu tempo para avaliarem esse momento tão importante da minha vida.

Agradeço aos meus amigos João Gabriel e Rayssa Nogueira pela troca de experiência no decorrer do curso, onde me ajudaram a ver diferentes situações em uma outra perspectiva. Tenho imensa gratidão ao professor Dr. Jose Roberto Pereira Rodrigues em especial, onde foi meus superior nessa caminhada de formação do TCC nos diversos experimentos de fluidização, onde fiquei trabalhando bons dias de estudo e me rendeu resultados muito satisfatório o start para o mercado de trabalho.

Todos aqui citados foram peças fundamentais para o profissional que tenho me tornado. Agradeço a todos os envolvidos, diretamente e indiretamente pelo suporte durante estes 5 anos de caminhada, aos colegas bolsistas pela contribuição e realização dos ensaios de fluidização no Laboratório de Instrumentação e Automação de Processos – LEPEC vinculado ao Centro de Ciências Exatas e Tecnologias da Universidade Federal do Maranhão. E não menos importante, agradeço principalmente a mim mesmo por nunca ter desistido apesar dos infortúnios.

“Ensinar é um exercício de imortalidade. De alguma forma continuamos a viver naqueles cujos olhos aprenderam a ver o mundo pela magia da nossa palavra. O professor, assim, não morre jamais...”

Rubem Alves

SILVA, Dielson Muniz. **Comparação de análise experimental do comportamento do carvão vegetal de açaí (*Euterpe oleracea*) e do milho (*zea mays everta*) em leito fluidizado**. 2022. 64 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.2.

RESUMO

No Maranhão o açaí possui grande importância econômica e nutricional. Além disso, constitui-se como fonte de renda para muitos comerciantes e famílias extrativistas. Apesar de ser uma fonte de material lignocelulósico renovável, o açaí representa, atualmente, um grave problema de limpeza pública devido à grande quantidade de resíduo constituídos basicamente de fibras e caroço, que normalmente são dispostos de maneira inadequada no meio ambiente, como em ruas e em lixões, sem serem submetidos a nenhum tratamento prévio, causando inúmeros prejuízos ao meio ambiente. Nesse sentido, o aproveitamento desses resíduos da extração da polpa de açaí como recheio em colunas de leito fluidizado no tratamento de sistemas gás - sólido e líquido - sólido daria uma destinação final conveniente. Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar experimentalmente o comportamento do regime de fluidização do carvão vegetal de açaí e comparar com o milho em leito fluidizado. Para o desenvolvimento desse trabalho, utilizou-se um leito fluidizado com um formato geométrico cônico de vidro, acoplada a uma caixa de madeira interligada por um tubo de PVC de diâmetros interno e externo 5, 3 e 6 cm respectivamente a um compressor centrífugo que impulsiona o ar para o sistema experimental. Para o controle da vazão do fluido (ar comprimido) foi utilizado um inversor de frequência, cuja velocidade máxima era de 3480rpm. Os ensaios foram realizados em três altura distintas: $H_1 = 5\text{cm}$; $H_2 = 10\text{cm}$; $H_3 = 15\text{cm}$. Os sinais digitais foram processados e analisados num microcomputador com o auxílio do software Labview. O estudo indicou que o carvão vegetal de açaí foi o que apresentou um melhor comportamento dentro do leito fluidizado em comparação com o milho de pipoca.

Palavras-chave: Leito fluidizado. Carvão vegetal de Açaí. Milho de pipoca

SILVA, Dielson Muniz. **Comparison of experimental analysis of the behavior of açai (Euterpe oleracea) and corn (zea mays everta) charcoal in a fluidized bed.** 2022. 64 sheets. Completion of course work in Chemical Engineering of the Center for Exact Sciences and Technology of the Federal University of Maranhão, São Luís, 2021.2.

ABSTRACT

In Maranhão, açai has great economic and nutritional importance. Furthermore, it is a source of income for many traders and extractive families. Despite being a source of renewable lignocellulosic material, açai currently represents a serious public cleaning problem due to the large amount of waste basically consisting of fibers and seeds, which are normally disposed of inappropriately in the environment, such as on streets and in dumps, without being subjected to any previous treatment, causing countless damages to the environment. In this sense, the use of these residues from the extraction of açai pulp as filling in fluidized bed columns in the treatment of solid gas - solid and liquid - systems would provide a convenient final destination. Thus, the objective of this work is to experimentally evaluate the behavior of the fluidization regime of the residues from the extraction of açai pulp and compare it with corn in a fluidized bed. For the development of this work, a fluidized bed with a conical geometric shape of glass was used, coupled to a wooden box interconnected by a PVC tube with internal and external diameters of 5, 3 and 6 cm respectively to a centrifugal compressor that drives the air to the experimental system. To control the flow of fluid (compressed air) a frequency inverter was used; whose maximum speed was 3480rpm? The tests were carried out at three different heights: H1 = 5cm; H2 = 10cm; H3 = 15cm. Digital signals were processed and analyzed on a microcomputer with the aid of Labview software. The study indicated that the açai charcoal was the one that presented a better behavior inside the fluidized bed compared to popcorn corn.

Keywords: Fluidized bed. Coal. Residue. Açai. Corn

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fruto do açazeiro maduro para ser colhido.....	5
Figura 2 - Milho pós colheita, milho de pipoca e Sub produto (sabugo ou tamboeira)	6
Figura 3 - Sub produto de açai, 3.6: Sub produto de milho.....	7
Figuras 4 e 5 - Descarte irregular de caroço de açai. Bairro do Anil, São Luis-MA.....	9
Figura 6 - Conformação inicial do fenômeno de fluidização, relacionando a dinâmica de forças sobre a partícula.....	10
Figura 7 - Conformação inicial para a verificação do fenômeno de fluidização na condição de mínima fluidização.....	12
Figura 8 - Conformação inicial para a verificação do fenômeno de fluidização para um sistema de n partículas.....	13
Figura 9 - Comportamento do leito fluidizado em diferentes circunstâncias.....	13
Figura 10 - Diagrama de classificação das partículas para fluidização gás-sólido.....	15
Figura 11 - Leito poroso com escoamento de fluido.....	18
Figura 12 - Curva característica da fluidização com descrição das etapas.....	22
Figura 13 - a) caroço de açai, b) Carvão de açai, c) Milho de pipoca.....	22
Figura 14 - a) Procedimento realizado para a obtenção da biomassa do fruto do açai.....	22
Figura 15 - Laboratório de Inst. e Aut. de Processos Químicos (LEPEQ).....	23
Figura 16 – Montagem dos equipamentos do processo de fluidização.....	23
Figura 17 – Equipamentos eletrônicos para leitura no leito fluidizado Placa myRIO, Inversor de Frequência, compressor de ar e tubulação conectada ao compressor.....	24
Figura 18 - Sensor de pressão diferencial MPXV7002D. Fonte: Metaltex.....	25
Figura 19 – Interface do Software de Aquisição de Dados.....	27
Figura 20 - Etapas de Processamento.....	27
Figura 21 - Curva de calibração para o sensor de pressão 1.....	28
Figura 22 - Curva de calibração para o sensor de pressão 2.....	28
Figura 23 - Curva de calibração para o sensor de pressão 3.....	38
Figura 24 – Comportamento do carvão com altura de 5cm.....	30
Figura 25 - Curva de calibração do carvão vegetal de açai com altura de 5 cm.....	31
Figura 26 - Altura de 10cm do carvão vegetal do caroço de açai.....	32
Figura 27 - Curva de calibração do carvão vegetal de açai com altura de 10 cm.....	33
Figura 28 – Leito fluidizado com altura de 15cm para o carvão de açai.....	34

Figura 29 - Curva de calibração do carvão vegetal de açaí com altura de 15 cm.....	35
Figura 30 - Comportamento do milho de pipoca com altura de 5cm.....	36
Figura 31 - Curva de calibração do milho de pipoca para altura de 5 cm.....	36
Figura 32 - Milho de pipoca em leite fluidizado com altura de 10cm.....	37
Figura 33 - Curva de calibração do milho de pipoca para altura de 10 cm.....	38
Figura 34 – Milho de pipoca em leite fluidizado com altura de 15cm.....	38
Figura 35 - Curva de calibração do milho de pipoca para altura de 15 cm.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características distintivas dos quatro grupos de partículas segundo Geldart.....	16
Tabela 2 - Esfericidade de alguns materiais sólidos.....	20
Tabela 3 - Propriedades físicas dos materiais sólidas utilizadas neste estudo.....	20
Tabela 4 - Dados Iniciais Para os Ensaios.....	26
Tabela 5 – Dados da caracterização do carvão de açai.....	30

LISTA DE SÍMBOLOS

- A = Área de secção transversal do leito (m^2)
 Ar = Número de Arquimedes
 A = Maior intercepto (comprimento do sólido) (mm)
 B = Maior intercepto normal a “a” (espessura do sólido) (mm)
 C = Maior intercepto normal a “a” e “b” (largura do sólido) (mm)
 d_e = Diâmetro de uma esfera de mesmo volume da partícula (mm)
 d_{ec} = Diâmetro da menor esfera circunscrita (mm)
 d_{ins} = Diâmetro do círculo inscrito ao sólido (mm)
 d_c = Diâmetro do círculo circunscrito ao sólido (mm)
 (ε) = Porosidade
 V_L = Volume do leito (m^3)
 V_p = Volume dos sólidos (m^3)
 m_s = Massa do leito, igual à massa das partículas (kg)
 ρ_p = Densidade aparente das partículas (kg/m^3)
 ρ_B = Densidade a granel das partículas ou de leito empacotado (kg/m^3)
 (Ps) = Partícula sólida
 Q_o = Vazão inicial
 Q = Vazão volumétrica (m^3/s)
 \emptyset = Esfericidade da partícula (-)
 V_S = Volume do sólido (m^3)
 V_{ec} = Volume da esfera circunscrita (m^3)
 x_i = Fração mássica das partículas retidas na malha de cada peneira
 d_i = Abertura média da malha obtida entre peneiras subsequentes
 V = Velocidade (m^2/s)
 (V_m) = Velocidade mínima de fluidização
 (ΔP) = Queda de pressão

SUMÁRIO

	FOLHA DE APROVAÇÃO.....	ii
	DADOS CURRICULARES.....	iii
	AGRADECIMENTOS.....	iv
	DEDICATÓRIA.....	v
	EPÍGRAFE.....	vi
	RESUMO.....	vii
	ABSTRACT.....	viii
	LISTA DE FIGURAS.....	ix
	LISTA DE TABELAS.....	xi
	LISTA DE SÍMBOLOS.....	xii
	SUMÁRIO.....	xiii
1	INTRODUÇÃO.....	01
1.1	OBJETIVOS.....	04
1.1.1	Objetivos gerais.....	04
1.2	Objetivos específicos.....	04
2	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICA.....	05
2.1	Açaí e os seus produtos.....	05
2.1.1	O milho e seus produtos.....	06
2.2	Principais subprodutos da indústria de processamento do açaí e do milho.....	07
2.2.1	O problema do descarte inadequado do resíduo do açaí.....	08
2.3	Leito fluidizado	10
2.3.1	Os diferentes regimes de fluidização em leito fluidizado.....	11
2.3.2	Fluidodinâmica em sistema de leito fluidizado.....	14
2.3.3	Caracterização dos grupos de partículas de acordo com Geldart.....	14
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	22
3.1	Materiais utilizados.....	22
3.2	Local da pesquisa.....	23
3.3	Instrumentos/equipamentos/software utilizados.....	23
4	ENSAIO DO COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO.....	25
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
5.1	Análise de tratamento dos dados de pressão.....	28

5.2	Análise da caracterização do carvão vegetal de açaí.....	29
5.3	Determinação da análise do comportamento fluidodinâmico do carvão vegetal de açaí.....	30
5.3.1	Comportamento do carvão vegetal de açaí com alturas de 5cm, no leito fluidizado.....	30
5.3.2	Variação do comportamento inicial e final do carvão vegetal de açaí com altura de 10cm em leito fluidizado.....	32
5.3.3	Variação do comportamento inicial e final do carvão vegetal de açaí com altura de 15cm em leito fluidizado.....	33
5.4	Determinação do comportamento fluidodinâmico do milho de pipoca.....	35
5.4.1	Variação do comportamento inicial e final de milho para pipoca com altura de 5cm.....	35
5.4.2	Variação do comportamento inicial e final de milho para pipoca com altura de 10cm.....	37
5.4.3	Variação do comportamento inicial e final do milho para pipoca com altura de 15cm em leito fluidizado ao longo do processo.....	38
6	CONCLUSÃO.....	41
7	REFERÊNCIAS.....	42

1. INTRODUÇÃO

O mundo está mudando, com isso novas ideias vão surgindo em prol de beneficiamentos com o uso de todo o tipo de resíduos encontrados e que podem ser reaproveitados. Um desses aproveitamentos é o uso do carvão feito através do resíduo do caroço de açaí. O açaí (*Euterpe oleracea Mart.*) é um alimento típico do Brasil e pertence à família *Arecaceae* (palmeira). A palmeira está localizada nas regiões do baixo Amazonas, Maranhão, Tocantins e Amapá, alcançando as Guianas e a Venezuela (SOUZA et al., 1996), por ser uma espécie adaptada às condições elevadas de temperatura, precipitação pluviométrica e umidade relativa do ar (Nogueira; Figueirêdo; Müller, 2005).

O açaizeiro é uma árvore que pode atingir até 30 metros de altura, que cresce preferencialmente em áreas úmidas. O fruto é arredondado, com aproximadamente 1 a 2 cm de diâmetro e um peso médio de 0,8 a 2,3g. Seu epicarpo é de cor violácea-púrpura, muito fino e tem apenas 1 a 2 mm de espessura, e junto com o mesocarpo constitui a parte comestível do açaí (Teixeira et al., 2006). O fruto ganhou um apelo mundial por possuir uma cor roxa escura, com sabor exótico e sem nota doce, além de ser um produto nutracêutico (Fundação Banco do Brasil, 2010).

Devido ao grande aumento da demanda pela polpa do fruto do açaí a nível nacional, e um aumento da instalação de novas indústrias em várias partes do nosso estado para suprir essa necessidade, faz-se necessário o desenvolvimento da cadeia produtiva de polpa de açaí com a utilização de tecnologias para o manejo de açaizais nativos, melhoria da qualidade e aumento da produtividade de polpa, além de descartes adequados para os resíduos desse processo (Mochiutti et al., 2002). Como formas de aproveitamento desse caroço, cita-se que após a decomposição pode ser largamente empregado como matéria orgânica, sendo considerado ótimo adubo para o cultivo de hortaliças e plantas ornamentais (GANTUSS, 2006).

A partir dos estudos de Reis et al. (2002) verificou-se que a potência calorífica do caroço de açaí no processo de combustão é em média 4.500 Kcal/Kg. Então NAGAISHI (2007) afirma que o seu uso energético pode ser uma saída oportuna e se for bem analisada, pode ser considerada viável economicamente gerando benefícios sociais e ambientais. Já Junior (2010) indica que a produção de carvão ativado seria uma solução para esse desperdício, e daria a esse resíduo valor agregado, auxiliando na renda de comunidades onde esses produtos são descartados e diminuindo o impacto dos mesmos à natureza.

A indústria moderna utiliza diversas técnicas e variados equipamentos para a realização de seus processos. Nos processos que envolvem a interação entre fluído e sólido, seja o fluído

De ordem gasosa ou líquida, pode-se utilizar a técnica de fluidização, a qual destina-se a operações diversas como por exemplo: craqueamento catalítico, revestimento de partículas, torrefação de grãos, catálise de reações diversas, mistura, remoção de partículas indesejada e adsorção, dentre outros (FOUST et al., 1982).

No leito fluidizado ocorre o processo de fluidização, o qual é obtido a partir do movimento ascendente de um fluido (líquido ou gasoso) através de um leito de partículas, geralmente sólidas, denominada fase densa. 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 (FOX et al., 2010).

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, uma vez que possibilita eliminar uma quantidade considerável de estágios para se obter um resultado desejado, reduzindo custo financeiro da planta (GOMIDE, R. 1980).

A operação de fluidização é conhecida desde 1926 e foi inicialmente concebida para a gaseificação do carvão. Porém, somente na década de 40 esta técnica foi difundida com a construção do primeiro leito fluidizado para o craqueamento do carvão (ROBINSON, 2002).

Segundo Reis et al., (2002), a fluidização baseia-se na circulação de sólidos juntamente com um fluido impedindo a existência de gradientes de temperatura. Comporta-se num estado intermediário entre um leito estático e um em que os sólidos estejam suspensos num fluxo.

Nos sistemas gás-sólido, as bolhas de gás se alastram pelo leito através dos sólidos de maneira não uniforme, dando a aparência de um líquido no estado de ebulição (FONSECA, 2009).

A introdução de fluido pela base de um leito contendo sólidos pode causar a fluidização das partículas e com o aumento gradual da velocidade superficial do fluido no leito, alguns regimes podem ser identificados, são eles: Leito fixo, fluidização borbulhante, fluidização turbulenta e transporte pneumático, (CARVALHO, 2005).

Quando um fluido escoar através de um leito de partículas a uma baixa vazão, o fluido apenas percola os espaços entre as partículas estacionadas, caracterizando o leito fixo de sólidos. A transição do leito fixo para o leito fluidizado é delineada pela velocidade de mínima fluidização, a qual é a menor velocidade na qual todas as partículas do leito estão suspensas pelo gás, KUNII e LEVENSPIEL (1991). Essa velocidade pode ser determinada obtendo-se o

ponto em que a queda de pressão no leito diminui com o aumento da velocidade superficial do fluido de entrada, após um aumento contínuo que ocorre enquanto o leito está fixo, (RAMIREZ-BEHAINNE, 1999). Os regimes turbulentos e de fluidização rápida utilizam altas velocidades superficiais de fluido, nesses casos, existem agitações mais intensas no leito e o movimento dos sólidos torna-se mais vigoroso, (RODRIGUES, 2006).

A transição do regime turbulento para a fluidização rápida ocorre na velocidade de transporte, em que um significativo número de partículas deixa o leito pelo topo da coluna. Já a transição da fluidização rápida para o transporte pneumático ocorre quando a fase densa na base do leito desaparece e todos os sólidos presentes podem ser arrastados pelo fluido, (GIBILARO, 2001).

Segundo Cremasco (2012) leitos fluidizados são largamente utilizados em processos industriais, o que se deve ao fato proporcionarem mistura intensa entre a fase fluida e particulada, além de troca de massa e calor simultaneamente. Há diversos exemplos de aplicações industriais de leitos fluidizados, que incluem síntese e reações catalíticas, regeneração catalítica, combustão e gaseificação de carvão entre outros. São também empregados em processos físicos como secagem de partículas, recobrimento e granulação de sólidos, entre outros.

Por outro lado, optou-se pela utilização de milho para pipoca, pois o mesmo apresenta formato arredondado e regular bem próximo do referencial teórico que é a esfera de vidro, o milho para pipoca permite verificar a maior pressão e menor velocidade e melhor ajuste das partículas no tubo, mesmo que elas não apresentem o pico de mínima fluidização adquirindo velocidade suficiente para suportar as partículas (fase densa), (GUARDANI,1998).

O milho para pipoca é fundamental para o funcionamento do leito fluidizado, pois garante o contato íntimo entre fluido-partícula e partícula-partícula, bem como a interação de ambos o material particulado e a disponibilização da área superficial das partículas para a transferência, obtendo melhores resultados. O milho no Brasil é empregado principalmente para a alimentação de animais, seu subproduto que é conhecido como sabugo, juntamente com as folhas pode ser processado e transformado em farinha para animais e até mesmo em etanol de segunda geração (ROCHA, 2002).

Os resíduos de açaí são predominantemente constituídos de fibras e caroço O fruto dá rendimento de polpa de aproximadamente 26,4%, indicando um baixo aproveitamento, que gera grande quantidade de sementes, principalmente nas regiões Norte e Nordeste, onde são pouco aproveitados gerando assim, um problema ambiental decorrente do descarte dessas sementes (73,6%). Tendo em vista que o processamento do açaí origina um grande volume de resíduos,

o aproveitamento dos resíduos da extração da polpa de açaí em processos de fluidização no tratamento de sistemas gás-sólido e líquido-sólido, traria maior funcionalidade e uma destinação final mais conveniente, (CARVALHO et al., 2005)

Agregando com isso, mais valor ao material em questão, possibilitando a transformação do seu subproduto, via calcinação em carvão vegetal,—que poderia ser utilizado como combustível ou como carvão ativado no tratamento de água. Essas são alternativas de tirar essa matéria de lixões e terrenos baldios que são observados ao longo do tempo como um problema ambiental que ainda não foi solucionado pelas pessoas que extraem o açaí e indústrias que exportam a polpa desse produto rico em vitaminas e proteínas, dessa forma alternativas como estas demonstradas no texto são capazes de reduzir em até 95% do descarte aleatório na natureza, (SILVA, 2001).

Uma excelente alternativa para o emprego desses caroços de açaí foi a construção de tijolos para construção de casas para famílias carentes no estado do Pará, um projeto piloto coordenado e divulgado pelo Instituto de Ciência e Tecnologia do estado do Pará em 2019. Esse tipo de tijolos são muito mais resistente que os convencionais oriundos de argila, uma vez que o caroço de açaí é rico em ferro, (PERRY, 1998).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Comparar e analisar experimentalmente o comportamento do carvão vegetal de açaí (*Euterpe oleracea*) e do milho (*zea mays everta*) em leito fluidizado com geometria cônica.

1.2 Objetivos específicos

- Determinar as melhores condições experimentais do sistema fluidodinâmico;
- Avaliar e comparar o regime de fluidização do carvão vegetal de açaí e do milho;
- Relacionar a fluidização do carvão vegetal de açaí com o milho de pipoca;
- Avaliar a relação da altura com a pressão em diferentes pontos do leito fluidizado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Açaí e os seus produtos

O açaizeiro é uma palmeira da família *Arecaceae* amplamente difundida e cultivada na Amazônia brasileira. Ocorre de forma espontânea nesta região e tem se destacado pela importância econômica para a fruticultura regional. O açaizeiro é muito procurado devido ao palmito que é produzido pela sua palmeira. Mas, com os anos, o açaí tem sido bastante procurado devido a “cultura fitness”, pois onde o produto é muito consumido pelo seu alto teor energético, propriedades oxidantes além de possuir a chamada “gordura boa”, fazendo com que hoje seja incluindo na categoria dos super alimentos, (NEVES et al., 2015).

O açaí é um fruto bacáceo de cor roxa, oriundo do açaizeiro planta nativa da Amazônia Brasileira, e é a espécie mais importante do Gênero *Euterpe*, dentre as dez registradas no Brasil e das sete que ocorrem na Amazônia. Contudo, apenas 3 (três) são de interesse, do ponto de vista agroindustrial: *E. oleracea*, *E. edulise*, e a *E. precatória*. O açaí é um dos principais produtos do extrativismo nacional e seu maior produtor é o estado do Pará. A figura 1, mostra como é a aparência do fruto, (ALMEIDA, 2017).

Figura 1 - Frutos do açaizeiro maduro para ser colhido



Fonte: Globo Rural (2020).

São inúmeras as pesquisas que buscam valorizar este fruto amazônico por meio do conhecimento de suas funcionalidades como ação antioxidante (MARANHO, 2016), anti-inflamatória (2S,3S, antibiofilme e antimicrobiana. A agregação de valor a esse fruto amazônico ocasiona a expansão em seu consumo, que leva a indústria de polpas de frutas a buscar caminhos que atendam às necessidades dos consumidores nacionais e estrangeiros (NOGUEIRA; FIGUEIREDO, 2005).

2.1.1 O milho e seus produtos

O milho (*Zea Mays Everta*) possui grande importância cultural e econômica, representando a segunda maior cultura em importância na produção agrícola no Brasil, sendo superado apenas pela soja que lidera a produção de grãos no país. O milho está na história do Brasil desde os primórdios do descobrimento, sendo cultivado por tribos indígenas das regiões Centro-Oeste. Possui tradição na culinária brasileira com pratos como a pamonha, o curau, o mingau e a pipoca, dentre outros (RODRÍGUEZ-REINOSO).

No início de seu cultivo, o milho era utilizado basicamente para a subsistência humana, com o decorrer do tempo foi ganhando importância e transformou-se no principal insumo para a produção de aves e suínos, além de sua importância estratégica para a segurança alimentar do brasileiro ao longo das últimas décadas. Do milho se aproveitava tanto seu produto principal quanto seu sub produto, que é conhecido como sabugo, que juntamente com as folhas podem ser processados e transformados em farinha para animais e até mesmo em etanol de segunda geração, (KUNZ, 2002).

Figura 2 - Milho pós colheita, milho de pipoca e Sub produto (sabugo ou tamboeira).



Fonte: O próprio autor (2021).

Seu consumo proporciona vários benefícios à saúde, principalmente pelo fato de que, ao contrário do arroz e do trigo, o milho conserva sua casca, que é uma rica fonte de fibras importantíssimas para a manutenção do ritmo intestinal. Além disso, é rico em carboidratos, proteínas, vitaminas (principalmente B1 e E) e sais minerais. Mas, seu consumo na mesa dos brasileiros, seja direta ou indiretamente, ainda é muito baixo (CORTEZ, 2008).

Segundo a Embrapa (1995), apenas 5% de todo o milho produzido no Brasil é consumido diretamente pelo homem. A grande parte (65%) é utilizada na alimentação de animais. Em outros países, como no México país que teve sua origem, possui uma grande variedade do produto, a situação é diferente, visto que o cereal é a base da alimentação e a maior parte de sua produção é usada na alimentação direta, tal fato é marcado desde os primeiros registros de colheita do milho naquela região.

2.2 Principais subprodutos da indústria de processamento do açaí e do milho

Como principal subproduto da indústria de processamento do açaí, destaca-se o caroço do mesmo. Trata-se de uma semente oleaginosa, que na maturidade é rico em celulose (53,20%), hemicelulose (12,26%) e lignina (22,30%). Apesar da remoção da polpa do açaí o caroço continua com altos teores de hemicelulose e celulose. O açaí origina uma grande quantidade de resíduos, com rendimento de polpa de aproximadamente 26,4%, gerando grande quantidade de semente (73,6%) (CARVALHO et al., 2005).

Figura 3 - Sub produto de açaí. Sub produto de milho.



Fonte: O próprio autor, (2021).

Em função do aumento na produção e consumo de açaí na região Amazônica, e em todo o Brasil, tem crescido também a quantidade de resíduos gerados, como os caroços, por exemplo, que normalmente são dispostos de maneira inadequada no meio ambiente, como em ruas e em lixões, sem serem submetidos a nenhum tratamento prévio, causando inúmeros prejuízos ao meio ambiente (ALMEIDA et al., 2017).

O sabugo de milho disponibilizado como cama para animais desde 1960 é ainda pouco utilizado, em parte pelo baixo conhecimento do seu potencial biotecnológico. Possui aplicação comercial como abrasivo para polimento e lodo para a indústria de petróleo. Esse material tem baixo valor agregado, permite menor labor com trocas da cama em intervalos maiores; portanto menos estresse para o animal. Além disso, o sabugo de milho apresenta a propriedade de encapsular a amônia, (GULNAZ, 2006).

Essa característica permite que o animal desfrute de um ambiente saudável e maior interação com o material da cama. O benefício da baixa concentração de amônia no ambiente se estende também aos técnicos, prevenindo problemas alérgicos. Materiais como o sabugo de milho, derivados de matérias-primas naturais renováveis, obtidas de maneira sustentável, o reaproveitamento e a reciclagem por processos tecnológicos e ecologicamente correto, (BASU, 2006).

2.2.1 O problema do descarte inadequado do resíduo do açaí

Cerca de 80% do total de açaí processado transforma-se em resíduo, ainda sem destinação econômica adequada, sendo descartados sem nenhum tratamento nos rios e lixões. Entende-se por Resíduos Sólidos: Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, e cuja a destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, (FARINAS et al., 2009).

Entende-se por resíduo sólido o material, substância, bem como os gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos LEI 12.305/2010).

É crescente a busca por soluções para a redução do impacto ambiental, ocasionado pelo consumo exagerado da população, junto ao descarte inadequado dos resíduos sólidos urbanos e agroindustriais. Na tentativa de minimizar os impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos, o governo federal instituiu a política nacional de resíduos sólidos, LEI Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, cujos objetivos correspondem a qualidade ambiental e proteção da saúde ambiental, não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010). Na figura 3.2, mostra como fica o resíduo do açaí após a retirada da polpa.

Além disso, o potencial calorífico que o caroço de açaí possui reforça a sua utilidade para geração de energias diversas. Estudos comprovam que o potencial calorífico do caroço no processo de combustão está em torno de 4.500 Kcal/Kg.

A composição química desse subproduto apresenta uma alta quantidade de celulose e um baixo teor de cinza e umidade, que enfatizam a sua possível aplicação para a produção de carvão vegetal, possibilitando também o emprego na produção de combustível de biomassa verde, na forma de peletes, geração de energia elétrica, mecânica e gás combustível. Conclui-se que o descarte dos caroços de açaí em vias públicas do município, vem contribuindo para o aumento do lixo urbano, provocando poluição visual e diminuição de espaços do passeio público, assim como mostra as figuras 4 e 5 em uma região do Anil, bairro tradicional da área metropolitana de São Luís, onde o escoamento dos caroços descartados por uma fábrica de polpa de açaí agride diretamente o rio paciência, (CORDEIRO, et al., 2017).

Figuras 4 e 5 - Descarte irregular de caroço de açaí e lixo em São Luís - MA.



Fonte: O próprio autor (2021).

O descarte indevido do resíduo da polpa de açaí pode causar sérios problemas ambientais, sabendo disso é muito importante estudos que visem seu reaproveitamento, seja como adubo orgânico, em alguns casos até como incremento na ração animal e adsorção de compostos químicos nocivos ao meio ambiente, entre outros, (CONAB, 2019).

O IBGE (2010), mostra que a região Norte é a maior produtora de açaí, refletindo na quantidade de resíduos gerados, que estão propensos a serem apenas dispostos, irregularmente, nas ruas das cidades, ou ainda são jogados às margens de rios, resultando no aumento da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e na eutrofização dos mananciais, entre outros problemas (MARANHO; PAIVA, 2012).

Fazer a disposição final de rejeitos requer uma completa neutralidade com o meio ambiente. Isso significa que o destino final dos resíduos não deve poluir ou alterar o meio e/ou prejudicar a população local. As principais formas de poluição são a contaminação do solo, dos lençóis freáticos e do ar. As consequências dessa poluição é a proliferação de doenças decorrentes de pragas de ratos, insetos e animais que vivem dos rejeitos assim como doenças ocasionadas pela poluição dos lençóis freáticos como a diarreia (MACHADO, 2016).

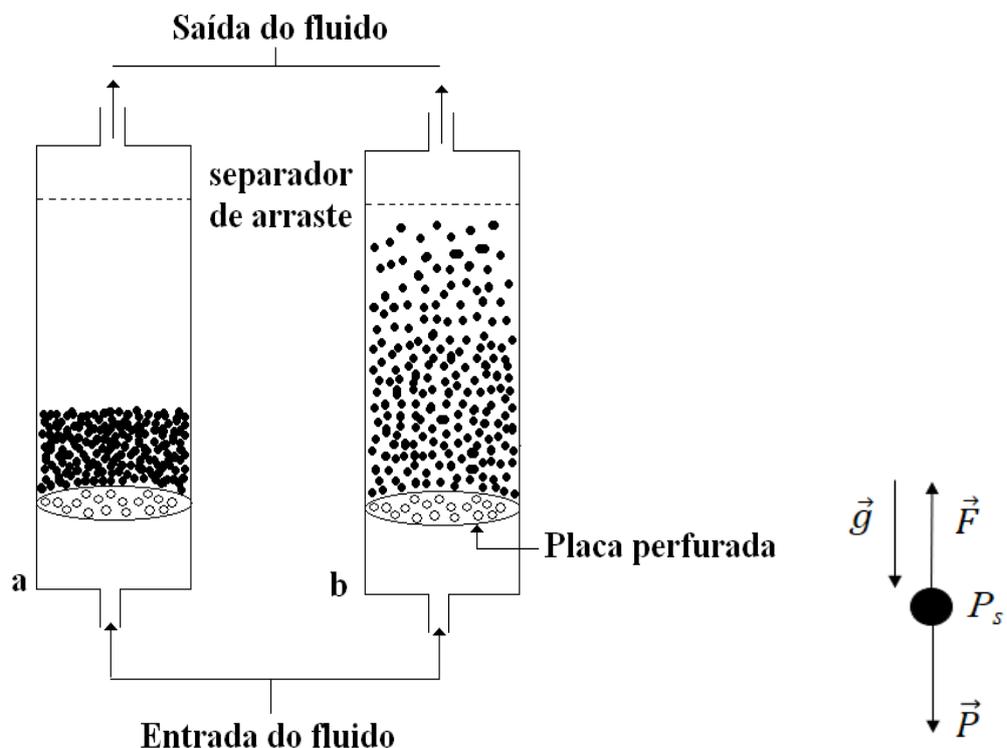
No Maranhão o açaí possui grande importância econômica e nutricional. Além disso, constitui-se como fonte de renda para muitos comerciantes e famílias extrativistas. Apesar de ser uma fonte de material lignocelulósico renovável, o açaí representa, atualmente, um grave problema de limpeza pública devido à grande quantidade de resíduo constituídos basicamente de fibras e caroço. (ROGEZ, 2000; RODRIGUES et al., 2006).

2.3 Leito Fluidizado

No leito fluidizado ocorre o processo de fluidização, o qual é obtido a partir do movimento ascendente de um fluido (líquido ou gasoso) através de um leito de partículas, geralmente sólidas, denominada fase densa. A fluidização pode ser definido, basicamente, como uma operação em que as partículas sólidas são suspensas por um fluxo ascendente do fluido (gás ou líquido), porém sem o arraste das partículas pela fase fluida. Durante este processo, as partículas sólidas se comportam como partículas em um estado líquido (GIBILARO, 2001).

Para entender sobre fluidização, num primeiro momento será proposto uma conformação onde 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 6. Inicialmente será considerado que sobre a partícula agem as forças peso e gravidade em oposição à força, promovida pelo escoamento do fluido. À medida em que se aumenta a vazão de escoamento do gás, e a partícula passa apresentar leves vibrações, indicando possíveis variações nas forças exercidas sobre esta. (GUPTA AND S. AMOORTHY, 1998).

Figura 6 - Conformação inicial do fenômeno de fluidização, relacionando a dinâmica de forças sobre a partícula.



Fonte: O próprio autor, (2021).

Devido à sua versatilidade, a fluidização pode ser aplicada a todos os processos que envolvam o contato entre a fase sólida particulada e a fase fluida. O processo de fluidização é muito utilizado na indústria, principalmente em: processos de secagem de sólidos, misturas, revestimentos de partículas, aquecimento, resfriamento e congelamento de sólidos (ROPELATO; FONTES; FUSCO, 2010).

Esse processo é empregado em tecnologias como adsorção de gases, reações gás-sólido e secagem por favorecer a interação sólido-fluido proporcionando altas taxas de transferências de calor e massa. A fluidização pode ser também empregada no processamento de diversos materiais granulares, tais como: areia, açúcares, produtos farmacêuticos, alimentícios e químicos, (KUNNI; LEVENSPIEL, 1991).

2.3.1 Os diferentes regimes de fluidização em leito fluidizado

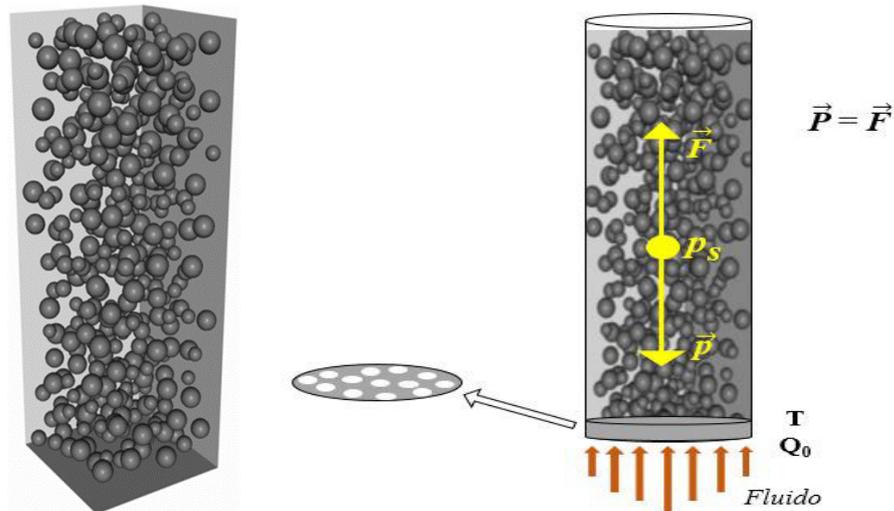
Um leito é um conjunto de partículas em uma coluna. Quando é injetado na parte inferior da coluna um fluxo ascendente de gás ou de líquido, cada partícula é submetida a diferentes forças. Durante o processo de fluidização, a força da gravidade que atua nas partículas é compensada pela força de arraste exercida pelo escoamento do fluido, (XAVIER, 2013).

Como a força de arraste que atua em cada partícula é diferente, o comportamento dessas moléculas também será diferenciado (SAMUELSBERG; HJERTAGER, 1996). Para a escolha do tipo de fluido (gás ou líquido) que será utilizado no sistema é necessário saber qual o melhor meio para o material de estudo.

A velocidade mínima da fluidização é importante para garantir a eficiência do processo, pois, abaixo dessa velocidade, o leito é fixo e, em velocidades muito acima da velocidade mínima, as partículas podem ser arrastadas pela fase fluida para fora do leito (SAMUELSBERG; HJERTAGER, 1996). Através de um gráfico relacionando a variação de pressão e a velocidade do fluido, pode-se analisar a velocidade mínima.

O passo seguinte é passar a verificar o fenômeno de fluidização considerando um conjunto de partículas sólidos constituindo um leito que inicialmente é fixo devido à ausência de forças ascendentes, mas que passa assumir o comportamento fluidizado, como apresentado na Figura 7, a uma dada velocidade de escoamento de gás (Qmf). O aumento da pressão será contínuo no início do processo até que a força aplicada pelo fluido na partícula se iguale a sua massa, isso ocorre com o aumento da velocidade do fluido e variação da pressão dentro do sistema fluidodinâmico, (GELDART, 1973).

Figura 7 - Conformação inicial para a verificação do fenômeno de fluidização na condição de mínima fluidização.



Fonte: O próprio autor, (2021).

A variação da velocidade de escoamento do gás implica em comportamentos distintos com respeito as partículas que constituem o leito. Aumentando a vazão do fluido que passa entre as partículas ocorre um distanciamento destas com pequenas vibrações e movimentações em pequenas regiões; neste momento o leito é chamado de leito expandido. (Figura 7).

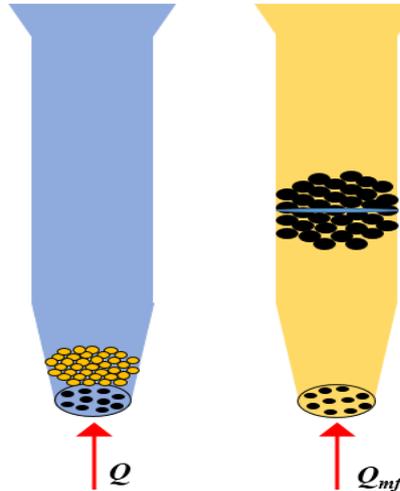
O aumento da velocidade do gás da origem ao regime de fluidização borbulhante, onde partículas com densidade geralmente menor do que $1,4 \text{ g/cm}^3$, ocorre uma expansão considerável do leito antes de surgirem as bolhas que caracterizam a fluidização borbulhante, (GELDART, 1973).

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). O aumento será contínuo no início do processo até que a força aplicada pelo fluido na partícula se iguale a sua massa, isso ocorrerá através do aumento da velocidade do fluido e a variação de pressão dentro do sistema fluidodinâmico. Dependendo da velocidade de vazão que o fluido irá passar, haverá um tipo específico de leito, (RODRÍGUEZ-ZÚÑIGA et al., 2008).

Quando a velocidade do fluido ascendente que percorre os sólidos é baixa, o fluido apenas percorre os espaços vazios entre as partículas estacionárias e o leito é chamado de leito fixo, ou seja, está abaixo da velocidade mínima de fluidização (Figura 8). Seguindo com acréscimos na velocidade de escoamento do gás, percebe-se que as grandes bolhas e espaços

vazios deixando de existirem dentro do leito, diminuindo assim a queda de pressão. Este é o perfil de fluidização turbulenta, (FONSECA, 2009).

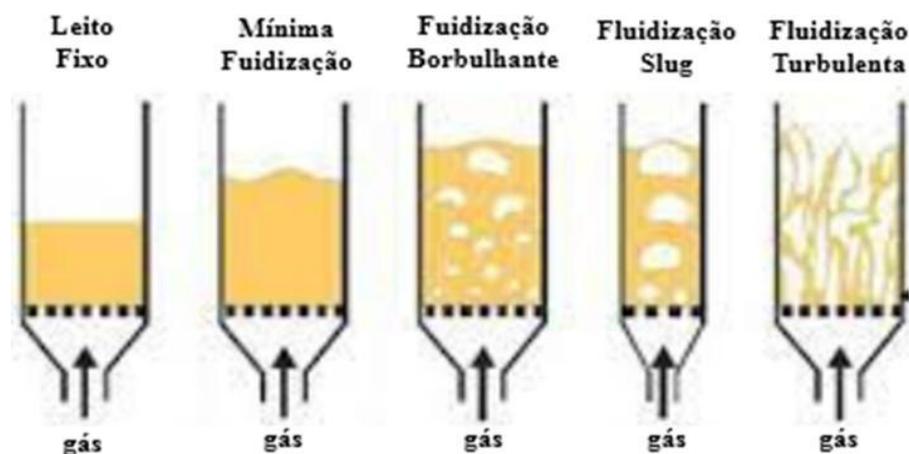
Figura 8 - Conformação inicial para a verificação do fenômeno de fluidização para um sistema de n partículas.



Fonte: O próprio autor (2021).

A variação da velocidade de escoamento do gás implica em comportamentos distintos com respeito as partículas que constituem o leito, figura 9. O aumento da velocidade do gás da origem 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, (PORTO, 2005).

Figura 9 - Comportamento do leito fluidizado em diferentes circunstâncias



Fonte: Adaptado de (KUNI e LEVENSPIEL, 1991).

Diversos fatores podem afetar a dinâmica dentro do leito fluidizado, por conta disso é necessária uma análise minuciosa dentro do equipamento após a fluidização do leito. A

geometria do equipamento e as propriedades das partículas são os principais fatores que podem influenciar a dinâmica dentro do fluido, (PÉCORA, 1995).

2.3.2 Fluidodinâmica em sistema de leito fluidizado

O fenômeno da fluidização caracteriza-se pelo contato entre partículas sólidas e uma corrente ascendente de gás, formando uma suspensão com comportamento semelhante a um fluido, que proporciona altas taxas de transferência de calor e de massa, sendo largamente utilizado em processos industriais, (SANCHEZ, 2010).

Quando partículas sólidas são adicionadas a um escoamento, seja de gás ou líquido, essas partículas tendem a aumentar a resistência ao escoamento do fluido, necessitando que as partículas sólidas se organizem para diminuir a resistência ao escoamento. Desse modo, aumentando a velocidade do fluido que escoava através dos sólidos, a reorganização das partículas ocorre mais rapidamente e, como consequência, tem-se um aumento da força de arrasto exercida sobre as partículas, (SANTOS, 2010).

O principal parâmetro determinante para distinguir os regimes de fluidização é a velocidade do fluido. Controlar a velocidade de fluidização é importante para a operação dentro do regime de fluidização esperado. Além disso, o desempenho fluidodinâmico de um leito fluidizado depende das propriedades da partícula sólida, tais como, diâmetro médio das partículas, densidade e esfericidade, (ROGEZ, 2000).

Outros parâmetros fundamentais para o estudo da fluidodinâmica das partículas são os denominados parâmetros dinâmicos, os quais se referem ao escoamento do fluido, como o coeficiente de arrasto, velocidade mínima de fluidização e a velocidade terminal da partícula (PÉCORA, 1995; FONSECA, 2009).

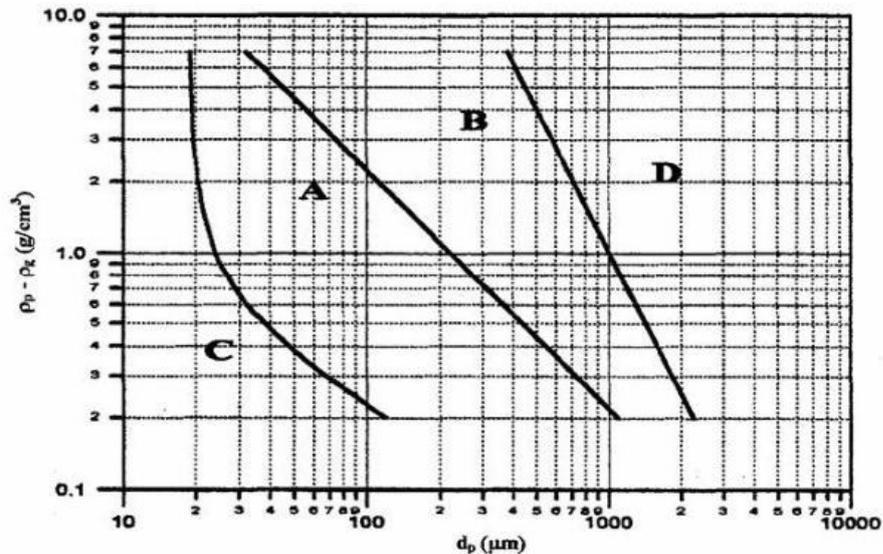
2.3.3 Caracterização dos grupos de partículas de acordo com Geldart

A caracterização da partícula pode ser feita de acordo com Geldart (1973), onde são organizados em 4 categorias (A, B, C, D). Com base nos diferentes tamanhos de partículas e na diferença de massas específicas de cada um, Geldart elaborou um diagrama como mostra a figura 10, que serve para classificar o comportamento fluidodinâmico das partículas.

Baseado na hipótese da importância dos regimes laminar e turbulento no comportamento da fluidização, classificou as partículas de acordo com o número de Arquimedes. A classificação proposta é de uso geral, aplicada igualmente para fluidização com gás ou líquido. As quatro fronteiras sugeridas por Goossen são mostradas a seguir, onde Ar é o

número de Arquimedes, (JIANG, 2012). As principais características dos grupos com base no diagrama de Geldart (1973) apresentado no diagrama mostrado na figura 10.

Figura 10 - Diagrama de classificação das partículas para fluidização gás-sólido



Fonte: Adaptado de Geldart (1973).

Grupo A

As partículas sólidas do grupo A, de modo geral, possuem pequeno tamanho e densidade inferior a $1,4 \text{ g/cm}^3$, sendo consideradas aeráveis e fáceis de fluidizar. Normalmente, encaixam-se nesse grupo pós-finos e leves, os quais se expandem consideravelmente quando expostos ao processo de fluidização (PORTO, 2005).

Grupo B

Nesse grupo, as partículas apresentam diâmetro entre $40 \text{ }\mu\text{m}$ e $500 \text{ }\mu\text{m}$ e uma densidade com valor superior a $1,4 \text{ g/cm}^3$ e inferior a $4,5 \text{ g/cm}^3$. A areia comum, bem como partículas de carvão menores que 1 mm se classificam neste grupo (GELDART, 1973; KUNII; e LEVENSPIEL, 1991).

Grupo C

Partículas de diâmetro inferior a $20 \text{ }\mu\text{m}$, com baixa densidade, possuindo tendência coesiva. Essas partículas têm uma predisposição de aderirem-se umas às outras, o que torna mais difícil o processo de fluidização.

Grupo D

As partículas do grupo D têm como características principais, o diâmetro médio superior a 1 mm e densidade elevada, o que traz como consequência a necessidade de uma maior velocidade de fluidização (PORTO, 2005).

Basu (2006) e Santos (2010), apontam que dentro dessa classificação os grupos C e D são preferenciais para o uso em fluidização de partículas. As características específicas de cada grupo são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1- Características distintivas dos quatro grupos de partículas segundo Geldart.

Grupo	C	A	B	D
Tamanho de partícula para $\rho_p = 2500 \text{ kg/m}^3$	< 20 μm	20 - 90 μm	90 - 650 μm	> 650 μm
Tendência para formação de canais preferenciais	Severa	Pequena	Insignificante	Insignificante
Expansão	Baixa	Alta	Média	Média
Velocidade mínima de borbulhamento, u_{mb}	Não forma bolhas	> u_{mf}	= u_{mf}	= u_{mf}
Forma de bolha	Canal único	Base plana Calota esférica	Arredondada com pequenos entalhes	Arredondada
Mistura sólida	Muito pequena	Alta	Média	Pequena
Gas back-mixing	Muito pequena	Alta	Média	Pequena
Tendência a fluxo pistonado	Pistões planos	Assimétrico	Principalmente assimétrico	Principalmente pistões espessos na parede
Efeito do tamanho da partícula na fluidodinâmica	Desconhecido	Apreciável	Pequeno	Desconhecido

Fonte: Adaptado de Basu (2006).

Dentre todos os parâmetros, a densidade destaca-se como um dos mais importantes para a fluidização. Para Geldart (1986 apud RAMIREZ-BEHAINNE, 1999), a relação entre massa do sólido e seu volume contendo os vazios internos e superficiais corresponde à densidade aparente da partícula. Isto é, a densidade aparente inclui a porosidade da partícula.

Esse tipo de densidade é superior à densidade a granel do leito empacotado e inferior à densidade real da partícula (massa específica da partícula), (EICHHORN, 2002).

Outra característica é a porosidade de um leito de partículas que é representada pela seguinte equação 1.

$$\varepsilon_f = \frac{\text{volume de vazio}}{\text{volume do leito}} = \frac{V_L - V_p}{V_L} \quad \text{Equação (1)}$$

onde:

V_L : Volume do leito (m^3);

V_p : Volume dos sólidos (m^3).

A equação anterior pode ser representada da seguinte maneira, de acordo com a densidade do leito e das partículas.

$$\varepsilon_f = 1 - \frac{(m_s/\rho_p)}{V_L} = 1 - \frac{(m_s/V_L)}{\rho_p} = 1 - \frac{\rho_B}{\rho_p} \quad \text{Equação (2)}$$

sendo:

m_s : massa do leite, igual à massa das partículas (kg);

ρ_p : densidade aparente das partículas (kg/m³);

ρ_B : densidade a granel das partículas ou de leite empacotado (kg/m³).

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, figura 11. Quando um leito de partículas está levemente empacotado, a porosidade depende do diâmetro e da natureza das partículas, (SOUZA, 2011).

A maior parte dos materiais porosos e relativamente esféricos formam colunas de sólidos com porosidades perto de 0,45. Outra característica física que influencia na fluidodinâmica das partículas no leito é a esfericidade de partícula, (Cortez et. Al, 2008). Com o rearranjo das equações, tem-se a equação (3) que descreve a porosidade:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\Delta P}{g \cdot L \cdot (\rho_p - \rho)} \quad \text{Equação (3)}$$

ΔP = Perda de carga (Pa);

L = Comprimento do tubo (m);

ρ_p = Densidade da partícula (kg/m³);

ρ = Densidade do fluido (kg/m³);

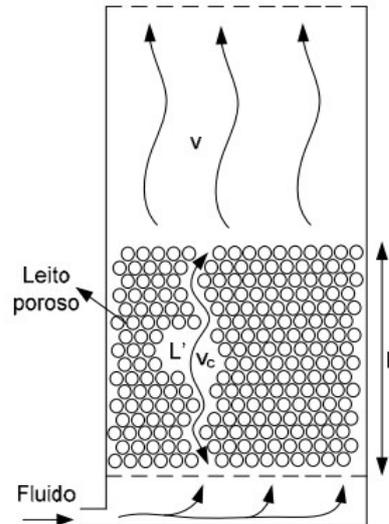
ε = Porosidade da partícula;

g = Gravidade (m/s²).

Em um leito poroso existem espaços vazios (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 sendo escrita pela equação 4 simplificada.

$$\varepsilon = \frac{\text{volume vazio}}{\text{volume total do leito}} \quad \text{Equação (4)}$$

Figura 11 - Leito poroso com escoamento de fluido.



Fonte: Adaptado de Geldart (1973)

Outra característica física que influencia na fluidodinâmica das partículas no leito é a esfericidade de partícula. Segundo Cortez et al. (2008), a esfericidade representa um fator de forma, ou seja, uma característica que reflete o formato ou geometria da partícula. Mohsenin (1970 apud CORTEZ et al., 2008) sugeriu algumas equações para calcular a esfericidade da partícula, como mostra a equação 4.

$$\emptyset = \frac{d_e}{d_{ec}} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde,

\emptyset : esfericidade da partícula (-);

d_e : diâmetro de uma esfera de mesmo volume da partícula (mm);

d_{ec} : diâmetro da menor esfera circunscrita (mm).

A equação anterior descreve a forma característica do sólido em relação à de uma esfera de mesmo volume. Uma segunda expressão para calcular a esfericidade assume que o volume de um sólido é igual ao volume de um elipsoide triaxial com seus interceptos “a”, “b” e “c”, e que o diâmetro de uma esfera circunscrita é o maior intercepto do elipsoide, conforme equação 6.

$$\emptyset = \left(\frac{V_S}{V_{ec}} \right)^{1/3} \quad \text{Equação (6)}$$

Sendo:

V_S : volume do sólido (m³);

V_{ec} : volume da esfera circunscrita (m³).

Ou,

$$\phi = \left[\frac{\pi abc}{\pi a^3} \right]^{1/3} = \left(\frac{bc}{a^2} \right)^{1/3} \quad \text{Equação (7)}$$

onde,

a: maior intercepto (comprimento do sólido) (mm);

b: maior intercepto normal a “a” (espessura do sólido) (mm);

c: maior intercepto normal a “a” e “b” (largura do sólido) (mm).

Os interceptos a, b e c não necessitam necessariamente se cruzar em um ponto comum. Por fim, tem-se uma terceira definição, mais simples e de resultados satisfatórios, indicada por Massarani e Peçanha (1989 apud CORTEZ et al., 2008) na equação 8:

$$\phi = \frac{d_{ins}}{d_c} \quad \text{Equação (8)}$$

onde,

d_{ins} : diâmetro do círculo inscrito ao sólido (mm);

d_c : diâmetro do círculo circunscrito ao sólido (mm).

O grau de esfericidade (ϕ) das partículas mostra o quão próximo seu formato é de uma esfera. Quanto mais próximo a 1 estiver o grau, mais próximo do esférico é o formato. Como a fluidização é mais indicada para formatos esféricos, é de se esperar que as partículas mais próximas desse formato tenham um melhor desempenho. No caso dos produtos utilizados neste trabalho o caroço de açaí se aproxima mais da esfericidade do que o milho, que no entanto também é bem esférico, (COSTA,2014).

Conforme o apresentado posteriormente, dentre as mais variadas partículas analisadas, a microesfera de vidro possui grau de esfericidade mais próximo a um, o que contribui para a justificativa de seu melhor desempenho da fluidização dos ensaios realizados neste trabalho. A esfericidade de alguns sólidos é apresentada na tabela 2, (CULLITY, 1978).

Tabela 2 - Esfericidade de alguns materiais sólidos

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 de pipoca	0,66
Caroço de açaí	0,87

Fonte: Adaptado de Basu (2006); Cortez *et al.* (2008).

A fluidodinâmica do sistema de leito fluidizado também depende do tamanho e da distribuição granulométrica das partículas, tabela 3. Normalmente, as partículas de um material sólido não apresentam um padrão de tamanho, (DENARI, 2021).

Tabela 3 - Propriedades físicas dos materiais sólidos utilizadas neste estudo.

Material	Esfericidade	Densidade
Caroço de milho	0,66mm	1,244 g/cm ³
Carvão vegetal de açaí	0,91mm	0,684 g/cm ³

Fonte: O próprio autor, adaptado de Resende (2005).

O tamanho de uma partícula pode ser obtido mediante microscopia óptica, onde se analisa uma amostra para determinar o tamanho médio da partícula. Outra maneira é por meio de peneiras padronizadas, o método mais utilizado, principalmente pela simplicidade e rapidez (CORTEZ *et al.* 2008).

O método utilizando peneiras é padronizado, e cada peneira tem um diâmetro diferente capaz de fazer diferenciação do tamanho das partículas. O diâmetro médio é obtido através da análise de distribuição granulométrica, que irá demonstrar a dimensão característica do conglomerado de partículas. Segundo Basu (2006), o diâmetro médio de Sauter é calculado a partir da Equação (9):

$$d_m = \frac{1}{\sum_{i=1} x_i / d_i} \quad \text{Equação (9)}$$

Sendo:

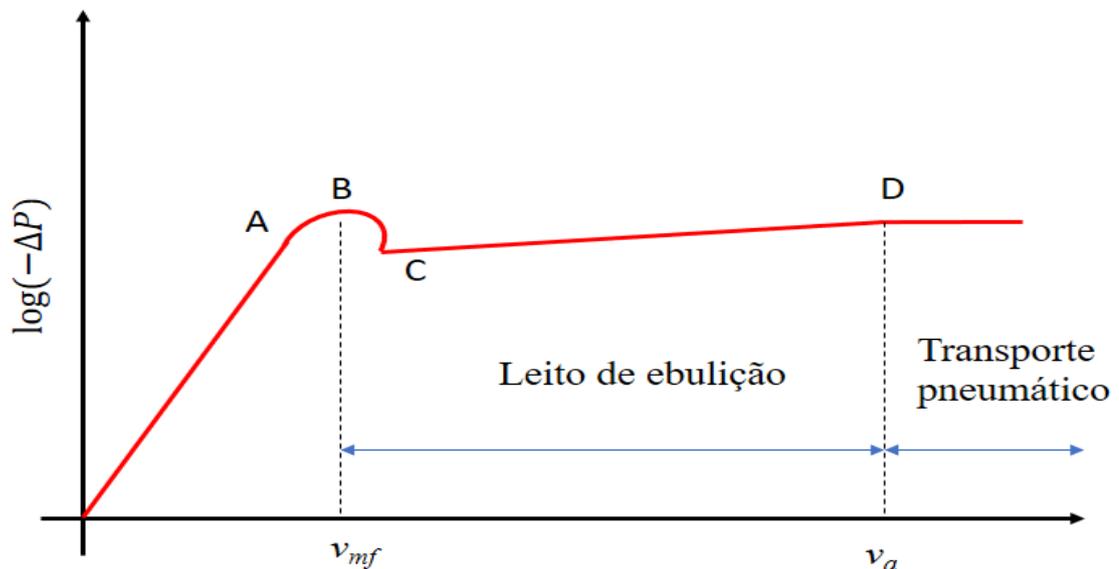
x_i : fração mássica das partículas retidas na malha de cada peneira;

d_i : abertura média da malha obtida entre peneiras subsequentes.

O efeito da partícula sobre o comportamento fluido mecânico do processo de fluidização como já verificado ao longo deste texto, as partículas não se comportam da mesma maneira quando submetida à fluidização gasosa. Apresenta a classificação das partículas sendo estas dos tipos A B, C e D, como pode ser verificado na tabela 2. As propriedades de fluidização com ar de uma partícula ar podem ser previstas estabelecendo em que grupo as partículas encontram-se posicionadas, Geldart (1973).

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, (FERNANDES, 2010).

Figura 12 - Curva característica da fluidização com descrição das etapas.



Fonte: O próprio autor (2021).

É denominado fluidização todo o intervalo compreendido entre a fluidização incipiente e a turbulenta, que compreende entre os pontos B e D, tendo o leito em ebulição, denominado de leito fluidizado, como mostra a figura 12.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Materiais utilizados

Para avaliar o comportamento fluidodinâmico, foram utilizados resíduos da extração da polpa de açaí obtidos em feiras livres de São Luís/MA. Na figura 14, são apresentadas as amostras dos sólidos utilizadas no leito fluidizado para avaliar o comportamento fluidodinâmico em diferentes alturas no interior do leito fluidizado.

Figura 13 - a) caroço de açaí com fibra, b) Carvão vegetal de açaí, c) Milho de pipoca



Fonte: O próprio autor (2021).

Após obtenção do caroço de açaí, o mesmo foi exposto ao sol durante o período de 6 horas, para retirada natural de água em excesso. Após a pré-secagem, fez-se uma separação manual, objetivando a retirada de sedimentos e impurezas, sendo considerado como material apenas o caroço de açaí com fibra e caroço de açaí sem fibra, (FUNDAÇÃO BB, 2010). Na figura 13, são apresentadas as etapas de procedimento utilizadas para a obtenção da biomassa do fruto do açaí.

Figura 14 - Procedimento realizado para a obtenção da biomassa do fruto do açaí.



Fonte: O próprio autor (2021).

O carvão vegetal de açaí foi obtido em processo de calcinação à 350 °C, esse material é considerado do GRUPO D de acordo com Geldart (1973), cujo o diâmetro médio superior a 1 mm e densidade elevada.

3.2 Local da pesquisa

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Instrumentação e Automação de Processos localizado no Laboratórios de Ensino e Pesquisa em Engenharia Química – LEPEQ vinculado ao Centro de Ciências Exatas e Tecnologias da Universidade Federal do Maranhão.

Figura 15 - Laboratório de Ensino e Pesquisa de Engenharia Química (LEPEQ).

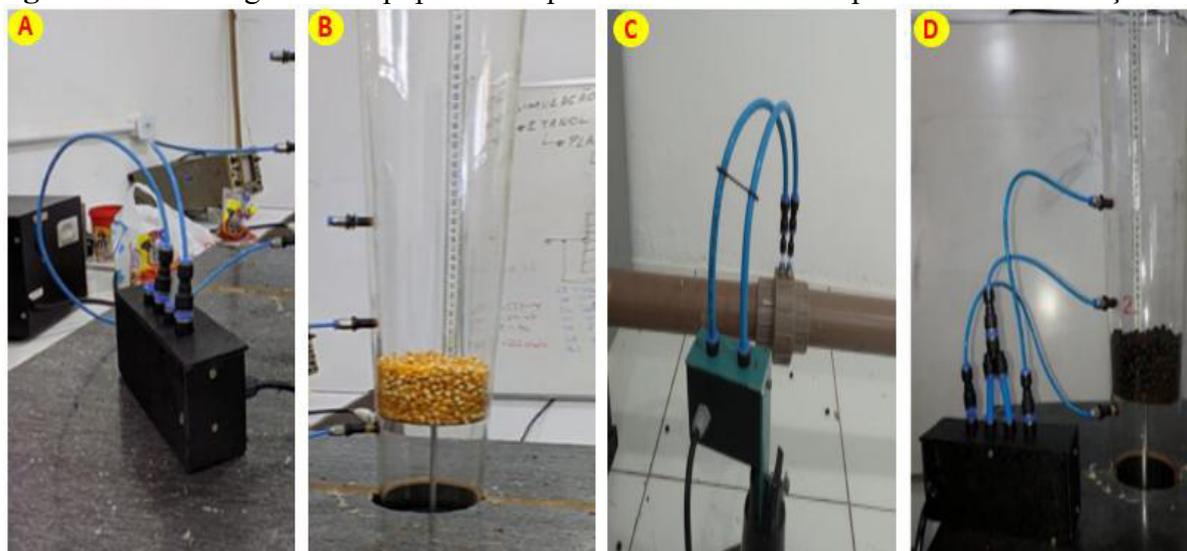


Fonte – O próprio autor (2021).

3.3 Equipamentos utilizados

Na figura 16, é apresentado a montagem dos equipamentos para funcionamento do processo de fluidização.

Figura 16 – Montagem dos equipamentos para funcionamento do processo de fluidização.



Fonte – O próprio autor, 2021.

O sensor já ligado a coluna, foi acoplada a uma caixa de madeira interligada por um tubo de PVC de diâmetros interno 5,3 cm e externo de 6 cm. Há três tomadas de pressão dentro da coluna, que são conectadas os sensores de pressão diferencial.

Esse sistema está conectado a um compressor centrífugo que impulsiona o ar para o sistema experimental, (OLIVEIRA, 2014). Para o controle da vazão do fluido (ar comprimido) alimentada ao sistema durante a realização do ensaio, foram utilizados uma placa myRIO e um inversor de frequência, cuja velocidade máxima era de 3480 rpm, conforme apresentado na figura 17.

Figura 17 – Equipamentos eletrônicos que captavam os dados para leitura no leito fluidizado
a) Placa myRIO, b) Inversor de Frequência, c) compressor de ar e d) tubulação conectada ao compressor, respectivamente.

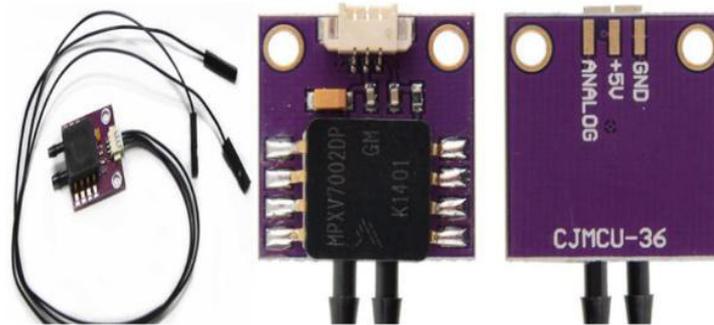


Fonte: O próprio autor

Foi utilizado o software Labview a fim de fornecer ao usuário informações de interesse dentro do processo que está em execução, tudo isso em tempo real, o que garante um maior controle sobre o mesmo, além da possibilidade de se realizar ajustes ou paradas extraordinárias.

Para analisar o comportamento da queda de pressão dentro da coluna, utilizou-se o sensor de pressão diferencial analógico na MPXV7002DP da Metaltex, 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), o qual é mostrado na figura 18.

Figura 18 - Sensor de pressão diferencial MPXV7002D. Fonte: Metaltex



Fonte: O próprio autor

O Datasheet do instrumento já fornece a seguinte curva de calibração, a partir da equação 9:

$$V_{out} = V_s(0.2 \times P(\text{kPa}) + 0.5) \quad \text{Equação (10)}$$

onde

V_{out} = É a temperatura ambiente do sistema

V_s = Volume dos sólidos

P = Pressão interna no leito

K = Constante que depende das propriedades do leito poroso e do fluido

P_a = Pressão diferencial na entrada do leito (Pascal)

Segundo Claudino (2003), a medição e controle de pressão são as variáveis de processo mais usadas na indústria de controle de processos nos seus mais diversos segmentos. Além disso, através da pressão é facilmente possível inferir uma série de outras variáveis de processo, tais como nível, volume, vazão e densidade.

4.2 Ensaio do comportamento fluidodinâmico

Antes de analisar o comportamento fluidodinâmico empregando o milho (*Zea Mays Everta*) e o carvão vegetal de açaí (*Euterpe Oleracea*), como constituintes do leito, foi necessário verificar as propriedades de esfericidade, densidade e diâmetro médio de partícula destes componentes sólidos (CREMASCO, 2014).

Os ensaios foram realizados em três diferentes alturas (5, 10 e 15cm), tanto para o carvão vegetal de açaí como para o milho. Todos os ensaios foram realizados em temperatura ambiente. Na tabela 4, são apresentados os dados iniciais para a realização dos ensaios no leito fluidizado.

Tabela 4 - Dados iniciais para os ensaios do comportamento fluidodinâmico .

Ensaio	Altura (m)	Volume (L)	Massa(g)
1° Ensaio	0,05	0,336	152,28
2° Ensaio	0,1	0,710	321,78
3° Ensaio	0,15	1,244	563,81

Fonte- O próprio autor (2021).

O sistema foi submetido a variações na vazão de ar ascendente no leito, que então foi aumentada até a ocorrência da fluidização intensa. Em seguida, realizou-se o decréscimo da vazão até que o leito se tornasse estático. Para a construção da curva característica do carvão vegetal de açaí, a velocidade superficial do gás, obtida através da relação entre a vazão volumétrica e a área de secção transversal, como apresentado na equação (11) (FU, 2001).

$$V = \frac{Q}{A} \quad \text{Equação(11)}$$

Onde:

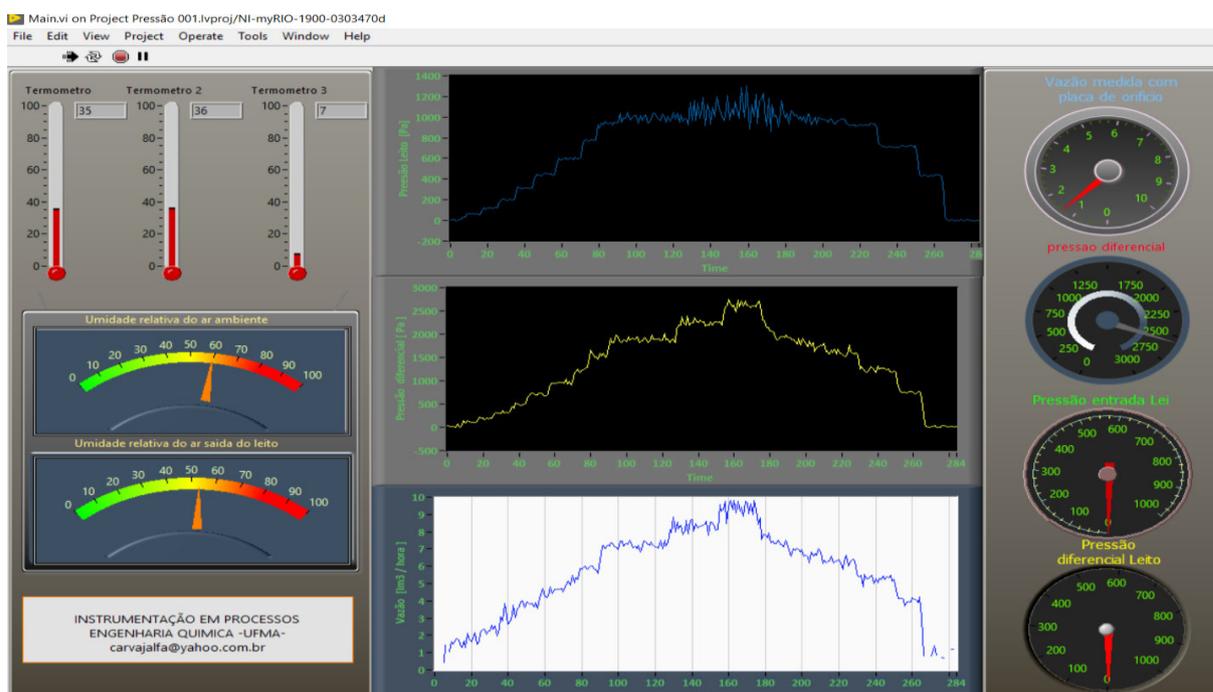
Q = Vazão volumétrica(m³/s);

A= Área de secção transversal do leito (m²);

V= velocidade (m²/s)

Essas medidas, eram observadas com a ajuda de uma interface do software Labview, que auxiliava na aquisição dos dados, figura 19. O compressor que alimenta o leito tem seu motor regulado pelo inversor de frequência, e a vazão do ar que sai do equipamento e entra no leito é medido através de uma placa de orifício, (GULNAZ, 2006).

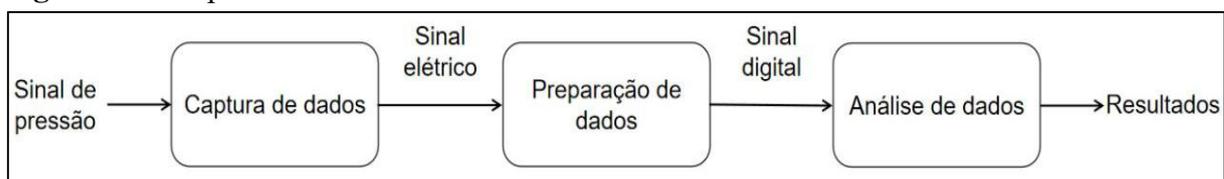
Figura 19 – Interface do Software de Aquisição de Dados.



Fonte – O próprio autor (2021).

Após coletados os dados das flutuações de pressão, os mesmos eram transformados em um sinal analógico de saída, proporcional à pressão aplicada. Esse processo de aquisição de dados foi realizado com o auxílio do software Labview, que analisou o comportamento do leito a partir de uma linha que representava a altura inicial e final do leito. Na figura 20 são apresentados as etapas de processamentos dos dados.

Figura 20 - Etapas de Processamento.



Fonte: O próprio autor (2021).

Em geral a forma de aquisição e processamento de dados possui passos determinados e esquematizados, que dependem do fenômeno físico medido, e que é transformado em sinal analógico elétrico, através de entradas e saídas apropriadas.

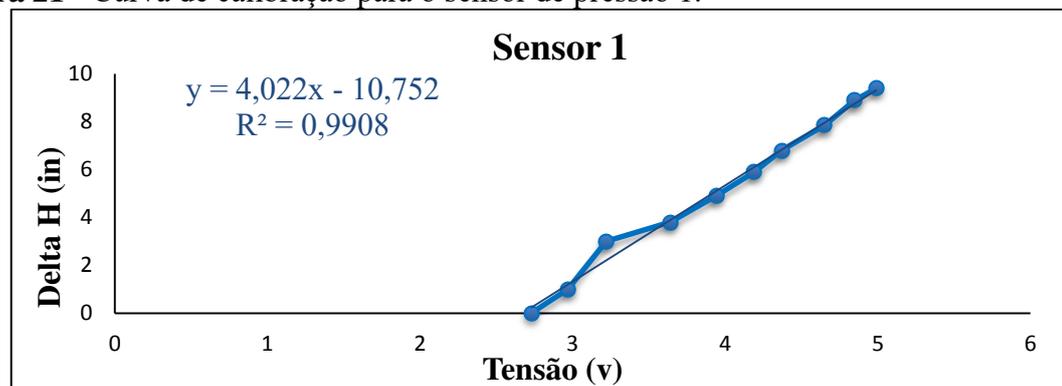
Após a realização do experimento os dados foram coletados e selecionados em seguida foram plotados os gráficos de acordo com as variações das alturas juntamente com a curva de calibração. As mesmas condições de ensaio foram adotadas para ambos os materiais para uma melhor análise de comparação entre ente os materiais.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise do tratamento dos dados de pressão

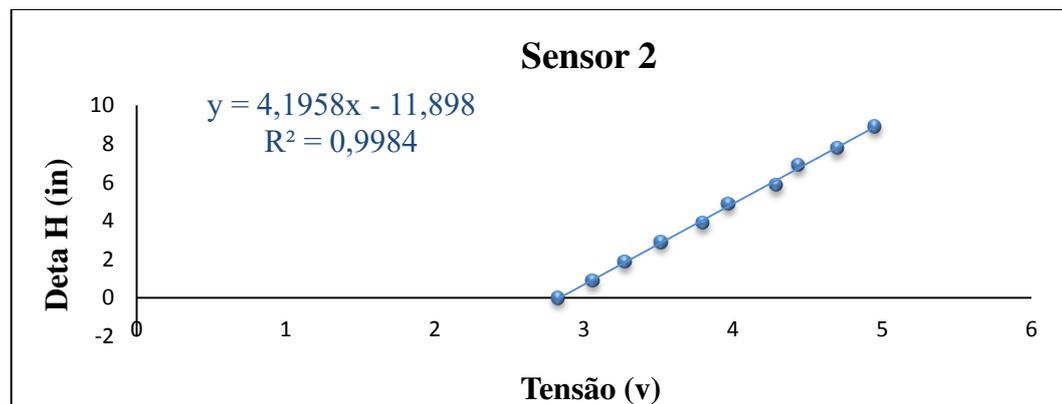
Nas figuras 21, 22 e 23 são apresentadas as curvas de calibração para cada um dos sensores que compõem o sistema experimental no leito fluidizado.

Figura 21 - Curva de calibração para o sensor de pressão 1.



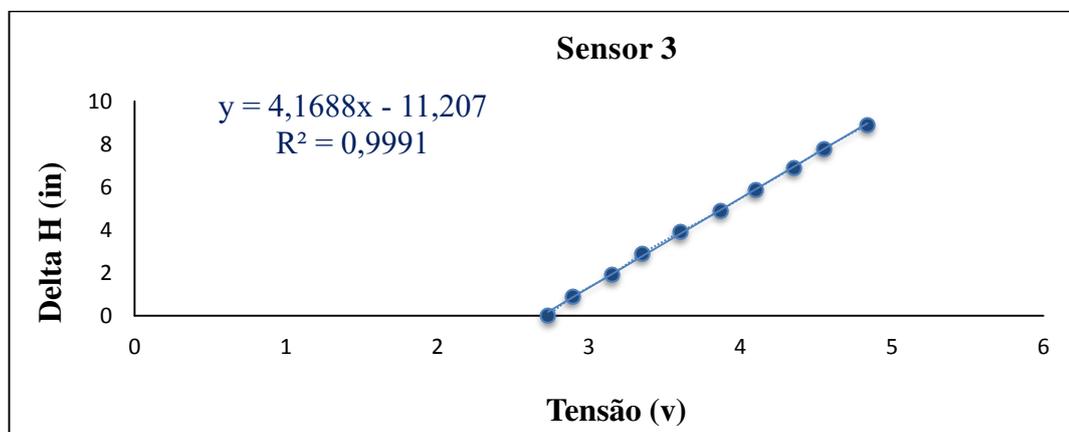
Fonte: Próprio Autor (2021).

Figura 22 - Curva de calibração para o sensor de pressão 2.



Fonte: Próprio Autor (2021).

Figura 23 - Curva de calibração para o sensor de pressão 3.



Fonte: Próprio Autor (2021).

Por meio da análise dos valores de R^2 encontrados para os sensores, e considerando que os mesmos estão bem próximos de 1, logo podemos considerar que os sensores se encontram aptos a oferecerem resultados seguros, (MOCHIUTTI, 2002). Vale salienta que o efeito da temperatura sobre a qualidade de um leito fluidizado é função do tamanho da partícula, conseqüentemente há uma variação nos dados capitados pelos sensores de velocidade e pressão, sendo demonstrados em suas respectivas curvas de calibração de acordo com os sensores, (FOGLER, 2010).

5.2 Análise da caracterização da partícula do carvão vegetal de açaí

Determinou-se experimentalmente o diâmetro médio da partícula de 8,8075 mm, o grau de alongamento médio das partículas foi de 1,2845, e o grau de esfericidade foi de 78%. Tendo em vista a relação entre eles, quanto mais próximo de “1” maior é a esfericidade como mostrado na Tabela 6, (MUCCIACITO, 2009).

Tabela 5- Dados da Caracterização do Carvão vegetal de Açaí.

Partículas	D1 (mm)	D2 (mm)	Alongamento(AI)	Esfericidade Ø	Esfericidade %
1	11,5	9,2	1,25	0,8	80%
2	11	8,6	1,279	0,782	78%
3	10,1	7,8	1,295	0,772	77%
4	9,5	7,5	1,267	0,789	79%
5	8,8	7,1	1,239	0,807	81%
6	10	8,1	1,234	0,81	81%
7	8,9	6,5	1,369	0,73	73%
8	10,8	8,5	1,27	0,787	79%
9	9,05	6,7	1,35	0,74	74%
10	9,3	7,2	1,292	0,774	77%
Média	9,895	7,72	1,2845	0,7791	78%

Fonte – O próprio autor, (2021).

A massa específica aparente, resultante de uma média de cálculos realizados para 6 partículas pelo método de Arquimedes, foi de 0,9893 g/cm³. Após a definição do diâmetro médio e massa específica, com base na classificação de Geldart pôde-se determinar o tipo da partícula (carvão vegetal do caroço de açaí) como pertencente ao grupo D. (RODRÍGUEZ-ZÚÑIGA et al., 2008).

Apesar de não possuir uma alta densidade e ter um bom grau de esfericidade, que facilita a fluidodinâmica, a partícula possui um grande diâmetro médio considerado para o sistema de fluidização, essas características influenciaram no tipo de regime dentro do leito, (MUCCIACITO, 2009).

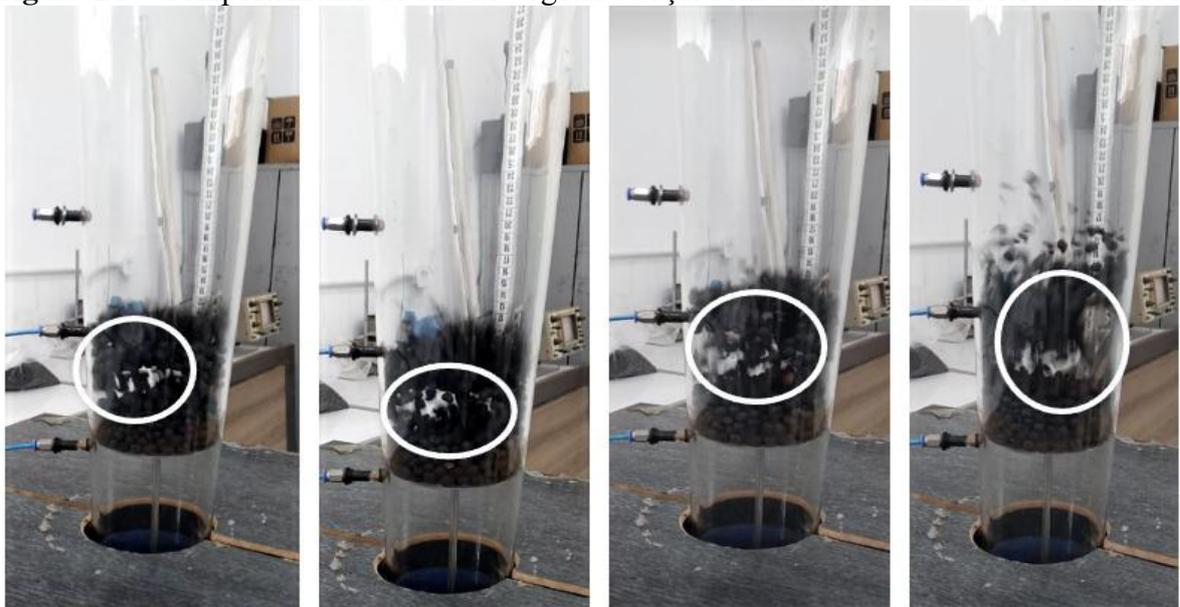
5.3 Análise do Comportamento Fluidodinâmico do Carvão Vegetal de Açai

5.3.1 Comportamento do carvão vegetal de açai com alturas de 5cm.

Na figura 26, são apresentados os resultados obtidos para o comportamento fluidodinâmico do carvão vegetal de açai, dentro do leito com uma altura fixa de 5 cm, nos estágios inicial com a vazão de ar igual e estágio final com um aumento na velocidade do inversor e a vazão de ar ao máximo.

Inicialmente esse material não apresentou grandes modificações relacionadas a seu regime inicial, demonstrando apenas uma pequena expansão no leito e apresentando comportamento estático, caracterizando um regime de leito fixo. Por ser uma partícula do grupo D, a mesma tem tendência a leito de jorro, porém, apesar do leito possuir um tronco cônico o seu grau de inclinação é baixo, com pouca diferença de diâmetro dentro da coluna, assim dificultando o movimento de jorro.

Figura 24 – Comportamento do carvão vegetal de açai com altura de 5cm no leito fluidizado.



Fonte – O próprio autor (2021).

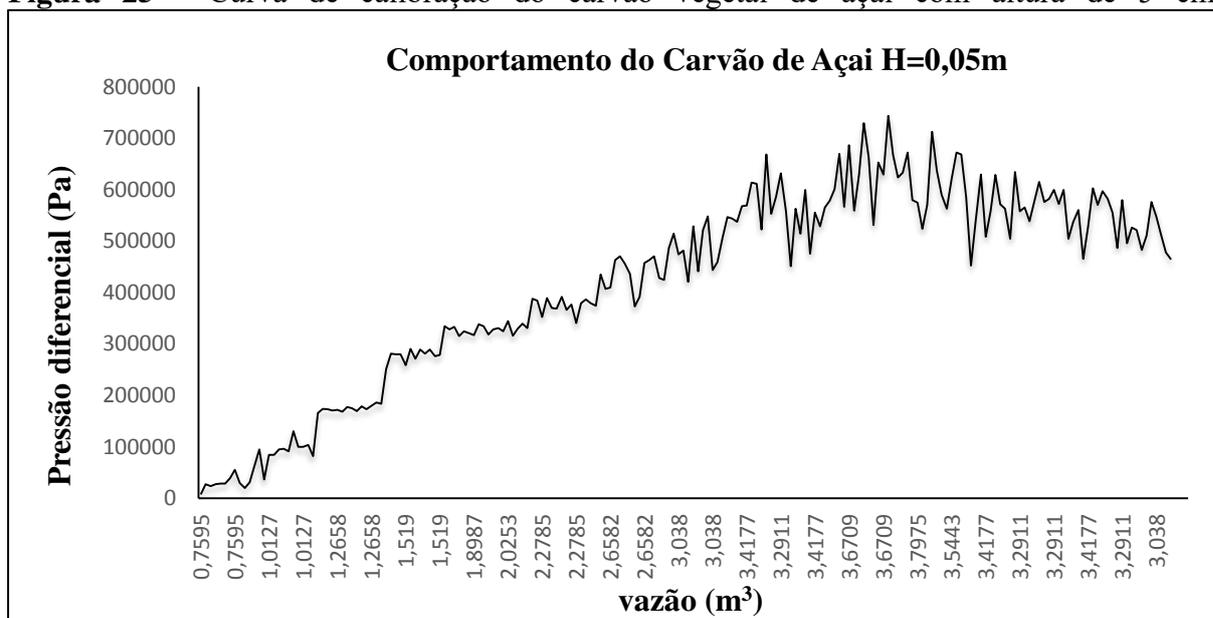
Observando as imagens acima, verificou-se que o carvão vegetal de açai apresentou uma grande variação em relação ao seu estado inicial, demonstrando um comportamento bastante

vigoroso e instável, o que pode ter sido causado pela diminuição da massa específica do material após o processo de calcinação, ocasionando perda de massa e favorecendo a sua agitação dentro do leito, tendo como resultado agitações mais intensas e movimento mais vigoroso dos sólidos, características clássicas do regime turbulento de fluidização.

É possível observar o comportamento das partículas a partir das direções dos vetores velocidade das partículas no interior do leito fluidizado. Observa que partículas chegam a determinadas alturas, onde as forças de arraste não superam a força peso das partículas e, assim, as partículas retornam em direção do leito de partículas. Novamente encontra a corrente gasosa favorecendo forças de arraste superior as forças peso. Este comportamento se repete caracterizando o leito fluidizado estável. Levando a um maior contato das partículas com as paredes do sistema fluidizado, a consequência é uma maior pressão estática em todas as tomadas de pressão quando a relação mássica de mistura apresenta como combustível uma partícula menos densa.

Nas curvas de formação do gráfico apresentados na figura 27, observa-se que a linha de base é responsável por determinar a existência ou não de processos durante a análise. Esse comportamento é devido à ausência das fibras que pode diminuir a resistência atribuída ao movimento das partículas, diferente do caroço fresco que é mais denso e possui muito atrito, o material à medida que a velocidade é amentada o material poroso se favorece uma agitação mais vigorosa e um empuxo com maior capacidade para sustentar as partículas arrastadas pelo fluido. (HENRIQUES, 2018).

Figura 25 - Curva de calibração do carvão vegetal de açaí com altura de 5 cm.



Fonte: O próprio autor (2021).

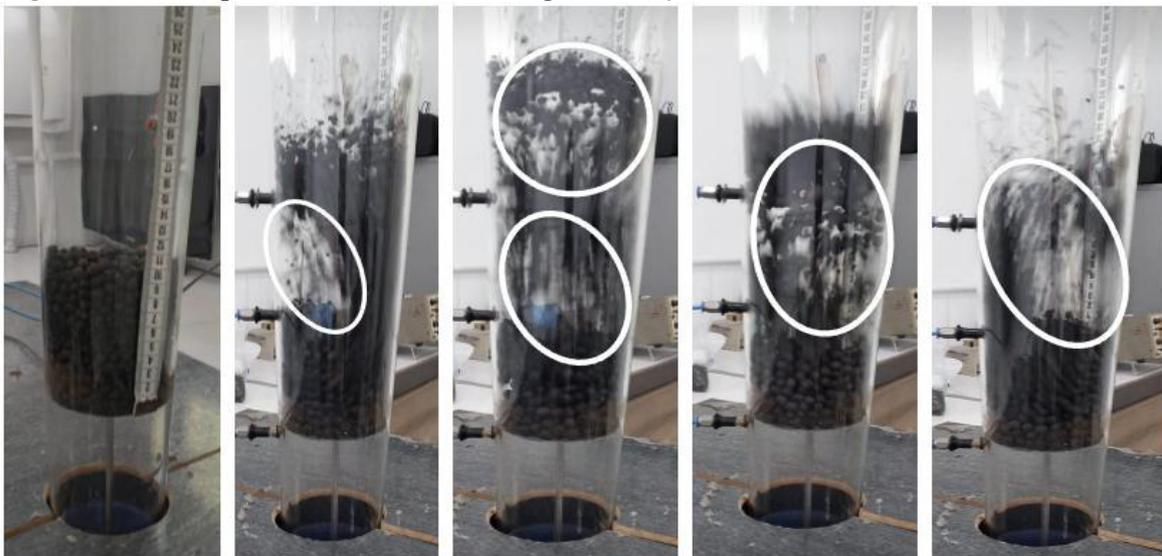
Embora tenha apresentado um pico de mínima fluidização, sua linha indicou uma maior tendência ao crescimento constante que a estabilidade antes do ponto de arraste. Diferentemente do resultado obtido no ensaio com o tubo anterior, no tubo de 50 mm o carvão ativado não apresentou o pico de mínima fluidização, mas, uma linha crescente como resultado.

Assim que o leito se estabiliza, outro comportamento pode ser obtido. Ao se diminuir a velocidade até o limite de mínima fluidização, não será observado um ponto de alta queda de pressão como anteriormente. O ponto de maior queda de pressão ocorre pois o fluido precisa vencer as forças resistivas do leito para a flutuação das partículas em sua superfície. Quando a velocidade é diminuída, o fluido não precisa mais vencer essa resistência, e por isso, ao atingir uma velocidade inferior à de mínima fluidização

5.3.2 Comportamento do carvão vegetal de açaí com altura de 10cm

Na figura 28 é apresentado as variações do comportamento inicial e final do carvão vegetal de açaí com altura de 10cm. Observa-se que aumentando a velocidade do ar para 4,0 m/s), é possível perceber que os espaços entre as partículas aumentam um pouco. Neste ponto de transição, as forças entre as partículas e o fluido contrabalançam o peso das partículas, a queda de pressão através de qualquer seção do leito é igual ao peso do fluido e das partículas naquela seção.

Figura 26 - Comportamento do carvão vegetal de açaí com altura de 10cm no leito fluidizado.

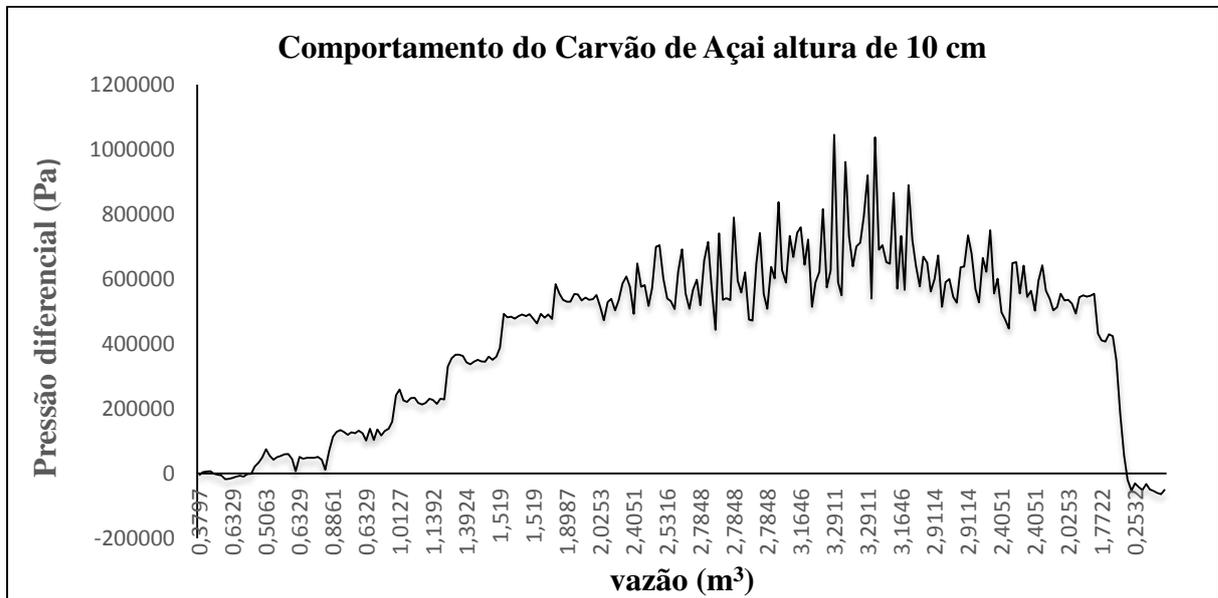


Fonte: O próprio autor (2021)

Partindo da velocidade inicial, foi aumentada gradativamente até chegar na velocidade máxima do fluidização. Foi observado um acréscimo na velocidade superficial do ar, o que aumenta a fração de vazios, com o surgimento de grandes aglomerados e bolhas e sulcos, como

demonstrado que corresponde ao ensaio para a altura de 10cm. Esse comportamento também pode acompanhado na figura 29.

Figura 27 - Curva de calibração do carvão vegetal de açai com altura de 10 cm



Fonte: O próprio autor (2021).

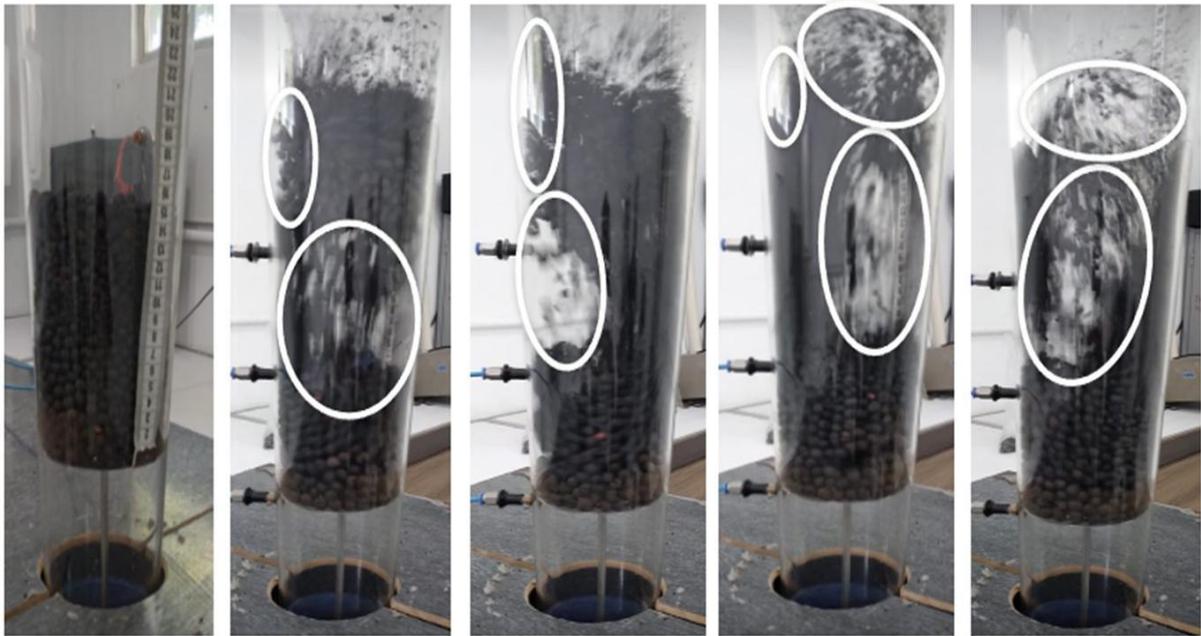
Além disso, relacionado com o aumento gradual da velocidade, o movimento se torna mais vigoroso no leito, que é refletido nas quedas de pressão. Uma vez que, partículas possuem grandes diâmetros, não há arraste no leito, com exceção de poucas e pequenas partes do carvão que se desligaram da esfera, devido choque entre as partículas por conta da grande agitação.

Assim que o leito se estabiliza, outro comportamento pode ser obtido. Ao se diminuir a velocidade até o limite de mínima fluidização, não será observado um ponto de alta queda de pressão como anteriormente. O ponto de maior queda de pressão ocorre pois o fluido precisa vencer as forças resistivas do leito para a flutuação das partículas em sua superfície. Quando a velocidade é diminuída, o fluido não precisa mais vencer essa resistência, e por isso, ao atingir uma velocidade inferior à de mínima fluidização

5.3.3 Comportamento do carvão vegetal de açai com altura de 15cm.

N figura 30 é apresentado o comportamento do leito fluidizado com altura de 15cm para o carvão vegetal do caroço de açai.

Figura 28 – Comportamento do carvão vegetal de açai com altura de 15cm no leito fluidizado



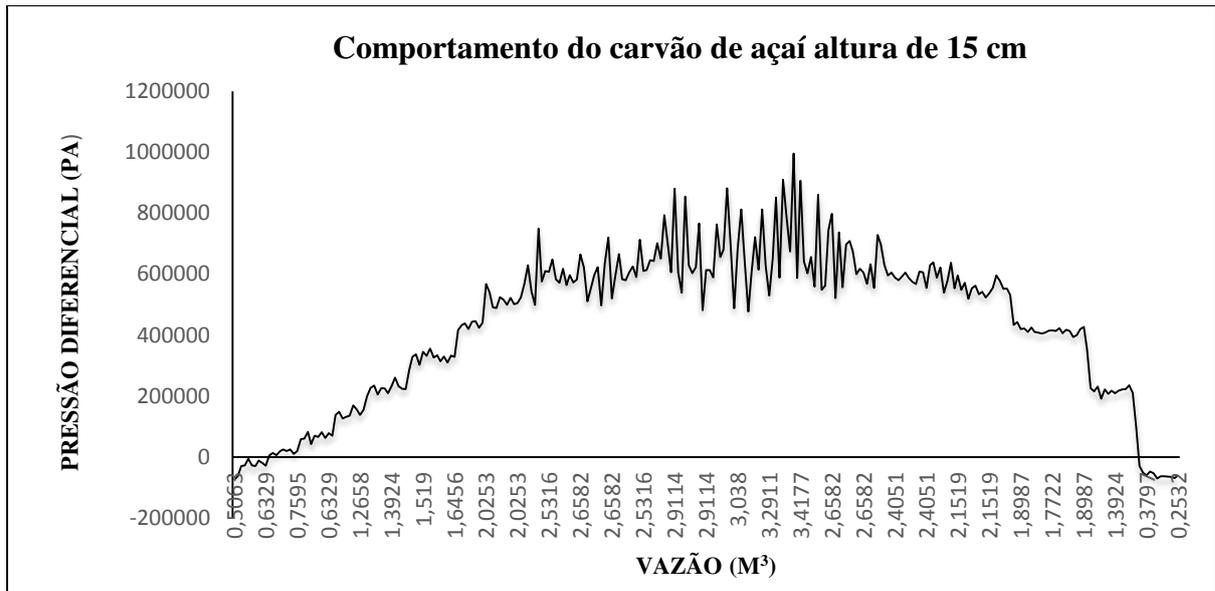
Fonte: O próprio autor (2021).

De uma maneira geral, observa-se um aumento significativo do nível de mistura gás/partícula no interior do leito fluidizado, conseqüentemente, uma maior dispersão das partículas. É possível observar a diferença no comportamento do leito de acordo com a mudança da velocidade.

Esse comportamento pode ser explicado pela atribuição a uma resistência menor ao movimento livre causada pela ausência das fibras contida no caroço, que provocam um entrelaçamento entre si, fazendo com que o empuxo que age sobre o caroço não seja suficiente para compensar e atingir a fluidização. Já na altura de 15cm como o recheio do leito está em maior compactação o processo de arraste das partículas é mais demorado por exigir uma maior pressão em aumento da porosidade entre as partículas.

Observa-se também um movimento desordenados entre as partículas, formando vários caminhos diferentes e lacunas no interior do leito, e função de uma maior quantidade de material inserida na coluna.

Na figura 31 é apresentado a curva de calibração do carvão vegetal de açai com altura de 15 cm O carvão vegetal apresentou o pico de mínima fluidização e uma linha crescente bem acentuada visivelmente notada na observação como resultado.

Figura 29 - Curva de calibração do carvão vegetal de açaí com altura de 15 cm

Fonte- O próprio autor (2021).

Podemos observar que houve uma redução da pressão necessária para o início da movimentação das partículas, bem como uma redução da velocidade. Devido ao maior espaço do tubo, é possível que as partículas tenham se acomodado de maneira melhor de forma a regirem mais rapidamente à resposta do fluido.

O carvão vegetal de açaí apresentou um bom desempenho na coluna de fluidização, pois atingiu o ponto de mínima fluidização. Não houve pressão constante antes do arraste, porém houve um aumento que indicou este ponto.

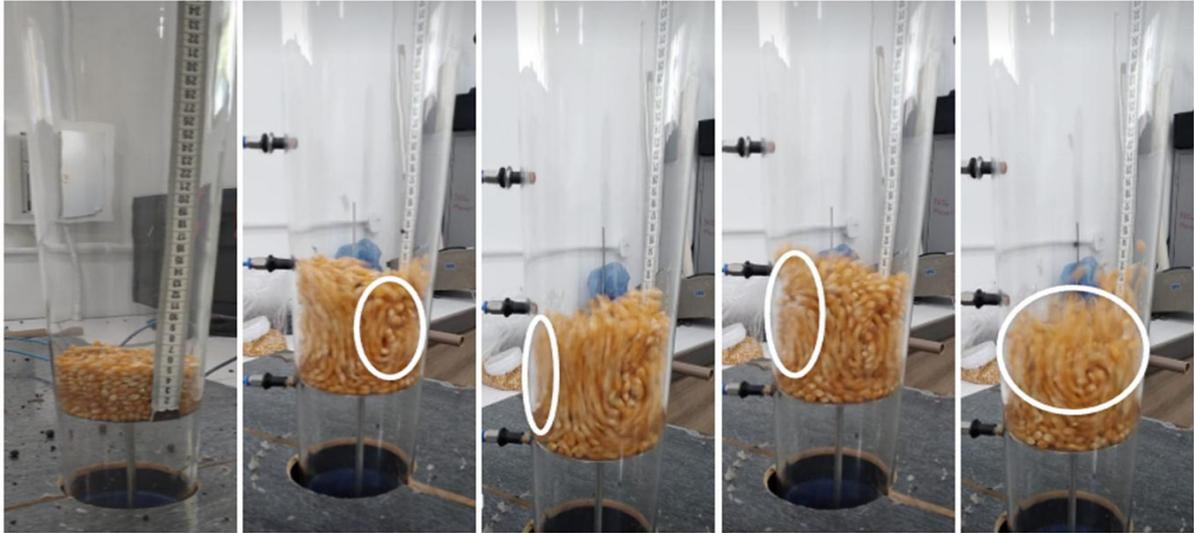
5.4 Análise do comportamento Fluidodinâmico do Milho de Pipoca.

5.4.1 Comportamento do milho de pipoca com altura de 5cm.

Na figura 35 é apresentado o comportamento do milho de pipoca com altura de 5cm no leito fluidizado. Observa-se que o milho de pipoca apresentou um bom desempenho no leito, pois atingiu o ponto de mínima fluidização. Não houve pressão constante antes do arraste, porém houve um aumento progressivo que indicou este ponto.

Embora tenha um formato próximo do esférico, essa partícula apresenta um afunilamento em uma das extremidades, algo que lhe confere a característica de uma gota e, desse modo, apresentou uma fluidização visualmente boa nos ensaios.

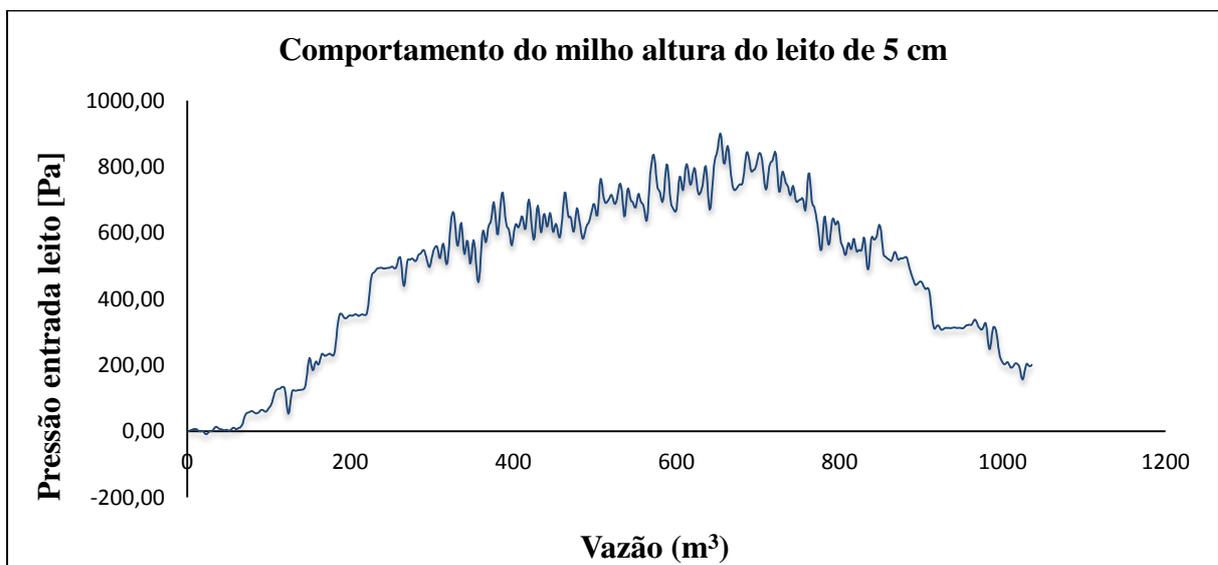
Figura 30 - Comportamento do milho de pipoca com altura de 5cm no leito fluidizado.



Fonte: O próprio autor (2021).

Quando a velocidade do fluido é muito baixa, o mesmo passa pelas partículas como que um percolado, sem promover o carregamento das mesmas, porém, quando ocorre o aumento da velocidade do fluido as partículas saem do lugar e passam ao estado de agitação com o fluido, nesta velocidade ocorre a chamada velocidade mínima de fluidização, ou seja, há a indicação do início da fluidização no leito. No momento em que o milho começa a sofrer o processo, apresentou uma fluidização mais rápida, no entanto necessitou de maior pressão, devido à quantidade de partículas a porosidade da fase densa foi menor alterando a pressão, contudo em menor velocidade já que a dispersão das partículas foi mais fácil em virtude do maior espaço no tubo. Não houve tendência à pressão constante antes do arraste.

Figura 31 - Curva de calibração do milho de pipoca para altura de 5 cm



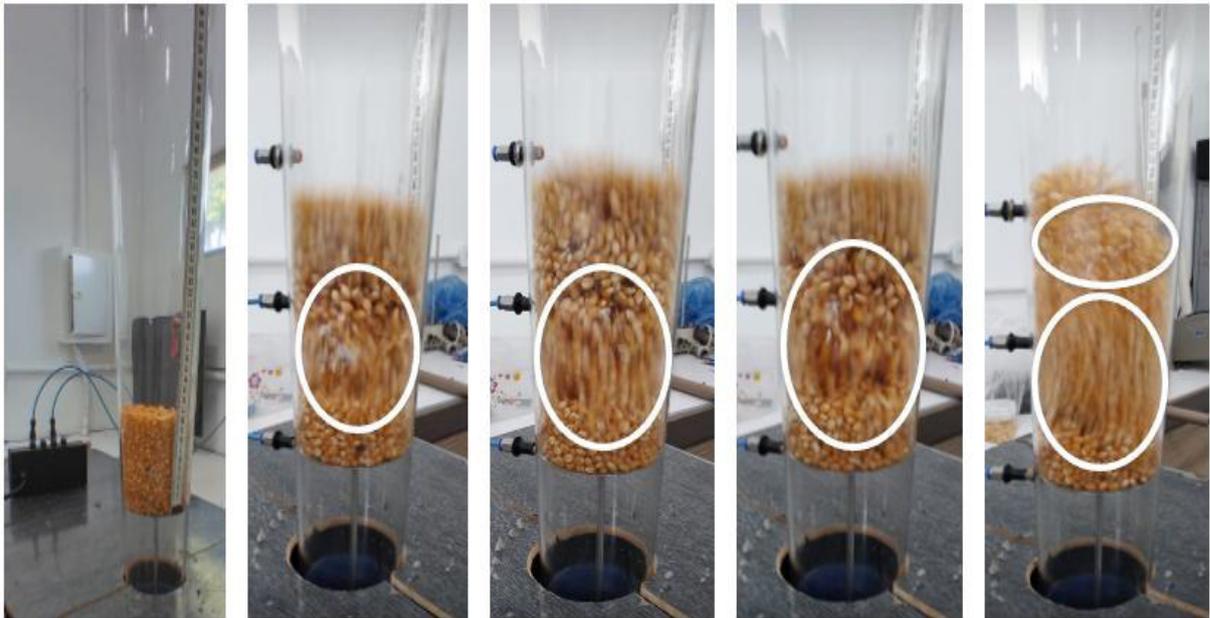
Fonte : o próprio autor (2021).

Com uma menor velocidade em relação à altura de 5cm houve uma maior estabilidade das partículas, com tendência à pressão constante antes do ponto de arraste, que é padrão de fluidização, e as variações de pressão ao longo do tempo são demonstradas no gráfico acima.

5.4.2 Comportamento do milho de pipoca com altura de 10cm.

Na figura 37 é apresentado o comportamento do milho de pipoca em leito fluidizado com altura de 10cm. Observou-se que comparando a altura de 10cm com a altura de 5cm foi necessária uma maior pressão para que a movimentação das partículas ocorresse mais rapidamente, de forma visível. Observou-se também que esse formato afunilado do milho de pipoca permitiu um rearranjo das partículas após a fluidização, o que ocasionou a formação de caminhos preferenciais, sulcos na coluna e movimento *slug*, similares ao de fluidização com líquidos.

Figura 32 - Comportamento do milho de pipoca com altura de 10 cm no leito fluidizado.



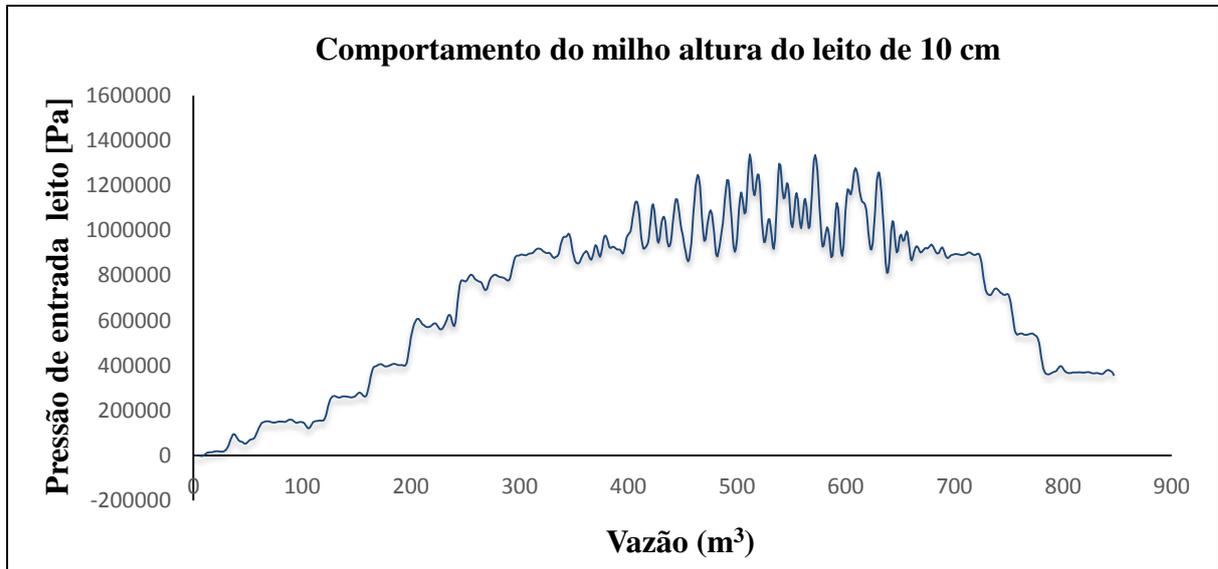
Fonte: O próprio autor (2021).

Esse comportamento pode estar relacionado com o escoamento das partículas. Uma vez que o escoamento de partículas tais quais lâminas, ocorrido individualmente, sem que ocorra troca de massa e, por regime turbulento o movimento aleatório e microscópico de partículas, o qual ocorre em velocidade transversal ao movimento do conjunto do fluido.

Estabelecidos os escoamentos laminar e turbulento, define-se o escoamento transiente, como a interface entre laminar e turbulento. Se o escoamento ascendente em velocidade superficial (relação entre a vazão e a seção transversal do tubo) for suficientemente baixo caracteriza o leito como fixo, onde a perda de carga ou a queda de pressão do fluido ao

atravessar o leito aumenta linearmente com o aumento da velocidade superficial, desse modo, tem-se que a expansão do leito é iniciada quando a força de arraste é igualada ao peso das partículas, conforme observado na figura 38.

Figura 33 - Curva de calibração do milho de pipoca para altura de 10 cm

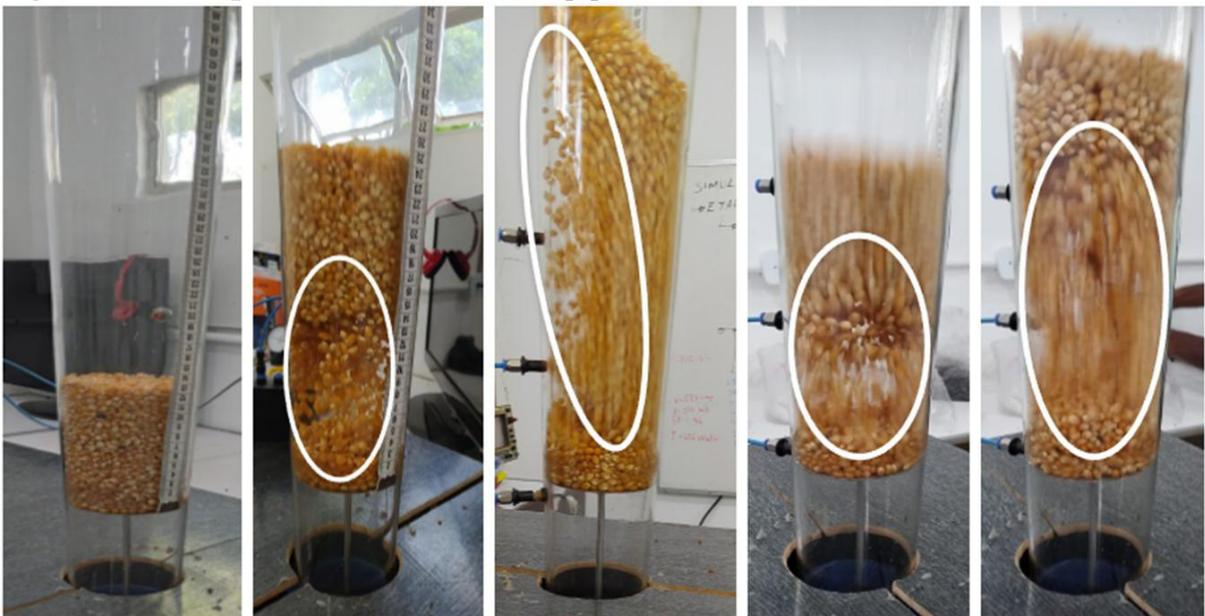


Fonte: O próprio autor (2021).

5.4.3 Comportamento do milho para pipoca com altura de 15cm em leito fluidizado

Na figura 39 é apresentado o comportamento do milho de pipoca em leito fluidizado com altura de 15cm.

Figura 34 – Comportamento do milho de pipoca em leito fluidizado com altura de 15cm

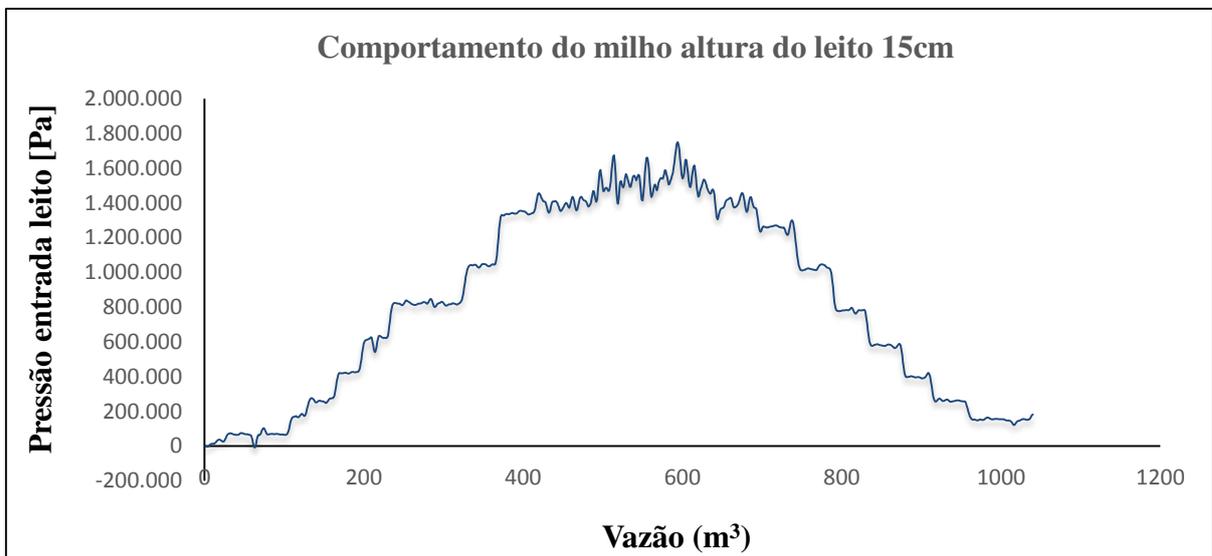


Fonte: O próprio autor (2021).

Observa-se que à medida que velocidade do fluido aumentava gradativamente até atingir a velocidade máxima através da pressão exercida no interior do cilindro, o mesmo promoveu o carregamento das partículas ficando visivelmente observada, ocorrendo o arraste das partículas por todo corpo do leito fazendo com que as partículas formassem movimentos circulares nos sentidos horários e ante horários.

Nesta velocidade ocorre a chamada velocidade mínima de fluidização, onde ocorre então uma redução na resistência do escoamento devido à movimentação das partículas que, pelo atrito entre si promovem um aumento da velocidade e acabam por atingir o ponto de maior perda de carga, ou seja, estado de fluidização, no qual a perda de carga é constante e ocorre o equilíbrio entre força de arraste e peso, mesmo com o aumento da altura do leito, figura 40.

Figura 35 - Curva de calibração do milho de pipoca para altura de 15 cm



Fonte: O próprio autor (2021).

Ao aumentar a velocidade superficial do fluido, aumenta-se a queda de pressão no leito, a partir do início do processo ocorre a expansão do leito, na condição de velocidade de mínima fluidização, e para as três diferentes alturas encontrou-se valores aproximados. Uma vez que, partículas possuem grandes diâmetros, não há arraste no leito, com exceção de poucas e pequenas partes do carvão que se desligaram da esfera, devido choque entre as partículas por conta da grande agitação.

A velocidade mínima de fluidização (V_m) é obtida graficamente pelo ponto de maior valor após a região linear de crescimento da queda de pressão (ΔP), nessa região. O leito se expande de maneira homogênea, a superfície superior é bem definida, e é caracterizado com fluidização particulada, após essa fase, o sistema é classificado como fluidização borbulhante, há a

ocorrência da formação de várias bolhas próximas ao distribuidor que sobem para o leito. Para uma maior proximidade com o processo realizado na escala industrial, escolheu-se esses dois materiais de forma a verificar-se seu comportamento na fluidização.

6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que carvão vegetal de açaí apresentou uma grande variação em relação ao seu estado inicial, demonstrando um comportamento bastante vigoroso quando comparado com o milho de pipoca. Esse comportamento pode ser explicado com base na sua baixa densidade em função do processo de calcinação. Além disso, conclui-se que, com base nos critérios propostos por Geldart (1973) para classificar as partículas constituintes da amostra, verificou-se que os materiais utilizado é composta por partículas da classe D. Em linhas gerais, o trabalho teve seus objetivos alcançados.

Para continuidade deste estudo, sugere-se a realização de experimentos adicionais, utilizando diferentes partículas de baixa esfericidades, afim de estudar o comportamento fluidodinâmico do leito de fluidizado, carregado com carvão de açaí e milho de pipoca sendo partículas de diferentes tamanhos, usando as técnicas de CFD e FFT.

7. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. V. DA C.; MELO, I. M.; PINHEIRO, I. S.; FREITAS, J. F.; MELO, A.C.S. **Revalorização do caroço de açaí em uma beneficiadora de polpas do município de Ananindeua/PA: proposta de estruturação de um canal reverso orientado pela PNRS e logística reversa.** GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sist. v. 12, n. 3, p. 59, 2017. <https://doi.org/10.15675/gepros.v12i3.1668>.

BASU, Prabir. **Combustion and Gasification in Fluidized Beds.** USA: Taylor & Francis, 2006. 473 p.

BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei n. 12305, de 02 de agosto de 2010. Diário Oficial da União. Brasília, 02 de agosto de 2010.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. RESOLUÇÃO n. 430, de 13 de maio de 2011. Diário Oficial da União. DISTRITO FEDERAL, 16 de maio de 2011. Disponível em: http://www.adasa.df.gov.br/images/stories/anexos/8Legislacao/Res_CONAMA/Resolucao_CONAMA_430_2011.pdf. Acesso em: 3 jul. 2020.

CASSIOLATO, C. **Medições de Pressão: características e tecnologias.** Intech Edição 93, 2007 CREMASCO, M. A. **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidodinâmicos.** 2ª ed. São Paulo. Blucher, 2012

CARVALHO, J. E. U DE; MÜLLER, C. H. **Biometria e rendimento percentual de polpa de frutos nativos da amazônia.** Belém, PA. Embrapa Amazônia Oriental, 2005. 3 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Circular Técnica, 139).

CLAUDINO, Andréia. Preparação de Carvão Ativado a partir de Turfa e sua Utilização na Remoção de Poluentes. Florianópolis, 2003. Dissertação (Engenharia química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/86346/192226.pdf?sequence>. Acesso em: 4 jul. 2020.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Açaí: Análise Mensal - Março 2019. 2019. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-acai/item/11112-acai-analise-mensal-marco-2019>. Acesso em: 2 jul. 2020.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E.O. **Caracterização da Biomassa.** Biomassa para Energia. Campinas: Unicamp, 2008. p. 32-62.

CORDEIRO, Tamires Reis et al. . Aproveitamento do caroço de açaí como fonte de energia térmica para as olarias do município de Bragança-Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, VIII. 2017. Disponível em: <http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2017/XI-050.pdf>. Acesso em: 1 jul. 2020.

COSTA, Leticia dos Santos. UTILIZAÇÃO DO CAROÇO DE AÇAÍ COMO LEITO FILTRANTE NO TRATAMENTO DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO E RESIDUÁRIA. Belém, 2014. Dissertação (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2014. Disponível em: <http://ppgec.prosp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/2014/leticia.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2020.

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

DENARI, Gabriela Bueno; CAVALHEIRO, Éder Tadeu Gomes. Princípios e Aplicações de Análise Térmica. São Carlos: IQSC/USP, 2012. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75135/tde04042013151955/publico/GabrielaBuenoDenari_Revisado_Anexo.pdf. Acesso em: 2 jul. 2020.

EICHHORN, Peter et al. Incomplete degradation of linear alkylbenzene sulfonate surfactants in Brazilian surface waters and pursuit of their polar metabolites in drinking waters. The Science of the Total Environment, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969701008737?via%3Dihub>. Acesso em: 26 ago. 2020.

EMBRAPA. A cultura do açaí. 1. ed. Brasília: Textonovo Editora e Serviços Editoriais Ltda, 1995.50p.(Plantar).Disponívelem:https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Colecao_Plantar_000gbzhkoaj02wx5ok01dx9lcub0tr75.pdf. Acesso em: 2 jul. 2020.

FARINAS; SANTOS; NETO & PESSOA, 2009. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/658280>>. Acesso em: 14 de março de 2021.

FERNANDES, Kendra D'Abreu Neto. Uso de carvão ativado de endocarpo de coco no tratamento de água. Porto Alegre-RS, 2010. Disponível em: <http://revistaseletronicas.pucrs.br/ojs/index.php/graduacao/article/view/7906>. Acesso em: 4 jul. 2020.

FOUST, A. S et al. Princípios das Operações Unitárias. São Paulo: Ed. LTC, 1982.

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

FONSECA, O.L. C. **Estudo Preliminar da Fluidodinâmica do Escoamento Gás-Sólido de um Leito Fluidizado Circulante Através da Análise dos Sinais Dinâmicos de Pressão**. 2009. 157 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

FOX, RM, Hanlon, CD, Andrew, DJ (2010). Os fatores de transcrição do tipo CrebA / Creb3 são reguladores principais e diretos da capacidade secretora.

FONSECA, O.L. C. **Estudo Preliminar da Fluidodinâmica do Escoamento Gás-Sólido de um Leito Fluidizado Circulante Através da Análise dos Sinais Dinâmicos de Pressão**. 2009. 157 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

FUNDAÇÃO BANCO DO BRASIL. Fruticultura: Açaí. Brasília, v. 2, 2010. Disponível em: <https://www.bb.com.br/docs/pub/inst/dwn/Vol2FruticAcai.pdf>. Acesso em: 30 Out. 2021.

GANTUSS, Carlos Alberto Ribeiro. **CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DE LOCAIS DE OCORRÊNCIA DO AÇAIZEIRO (Euterpe oleracea, Mart) NO ESTADO DO AMAPÁ E SUA RELAÇÃO COM O RENDIMENTO E QUALIDADE DO FRUTO**. Areia - Paraíba, 2006. Dissertação (Agronomia) - Universidade Federal da Paraíba, Areia - Paraíba, 2006. Disponível em: <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp009006.pdf>. Acesso em: 3 Out. 2021.

GELDART, D. **Types of gas fluidization**. Powder Technology, v. 7, p. 55–86, 1973.

GOMIDE, R.L. Determinação e análise da uniformidade de distribuição da água no sistema de irrigação por aspersão. Viçosa, U.F.V., 1980. 87 p. (Tese M.S.).

GIBILARO, L. G. **Fluidization Dynamics**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.

GULNAZ, Osman; KAYA, Aysenur; DINCER, Sadik. The reuse of dried activated sludge for adsorption of reactive dye. Journal of Hazardous Materials, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389405006746?via%3Dihub>. Acesso em: 26 Nov. 2021.

GULNAZ, Osman; KAYA, Aysenur; DINCER, Sadik. The reuse of dried activated sludge for adsorption of reactive dye. Journal of Hazardous Materials, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389405006746?via%3Dihub>. Acesso em: 26 ago. 2020.

GUARDANI, R.; TEIXEIRA, A C. S. C.; CASELLA, E. L.; SOUZA, A. M. I. Fluidynamic aspects of gas-phase ethylene polymerization reactor design. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 15, n.r 3, p. 281-294, 1998.

IONASHIRO, Massao. Giolito. Fundamentos da Termogravimetria, Análise Térmica Diferencial e Calorimetria Exploratória Diferencial. GIZ Editorial, 2004. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=2314642>. Acesso em: 1 jul. 2020.

RAMIREZ-BEHAINNE, J. J. **Diminuição de H₂S na Gaseificação de Carvão Mineral Mediante Adição de Dolomita em Reator de Leito Fluidizado**. 1999. 173 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1999.

RODRÍGUEZ-REINOSO, Francisco. An Overview of Methods for Characterization of Activated Carbons.,v.61.1989.Disponível em:<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.550.4131&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 4 jul. 2020.

RODRÍGUEZ-ZÚÑIGA, U. F; FARINAS, C. S.; BERTUCCI NETO, V.; LEMO, V. **Produção de Complexos Lignocelulíticos em Substratos Derivados de Resíduos Agroindustriais por Fermentação Semi-sólida**. In: Workshop de biocatálise e biotransformação, 4., 2008, São Carlos. Livro de resumos. São Carlos, SP: Instituto de Química de São Carlos. p. 107. 2008.

ROGEZ, H. **Açaí: preparo, composição e melhoramento da conservação**. Belém: EDFPA, 2000. 313p.

ROPELATO, K.; FONTES, C. E.; FUSCO, J. M. **On CFD practices for cyclone simulation**. 7th International Conference on Multiphase Flow (ICMF 2010). Tampa, FL USA, May 30-June 4, 2010.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censos 2007. Inovações e impactos nos sistemas de informações estatísticas e geográficas do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2008.

JIANG, Nanzhe et al. Effect of hydrogen spillover in decalin dehydrogenation over supported Pt catalysts. Applied Catalysis A: General , v. 35, f. 371-376, 2012.

JUNIOR, Orlando Ferreira Cruz. **PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DE PRODUTOS RESIDUAIS DE ESPÉCIES NATIVAS DA REGIÃO AMAZÔNICA**. Manaus, 2010. Dissertação (Engenharia Mecânica e de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Manaus, 2010. Disponível em: <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp148880.pdf>. Acesso em: 3 jul. 2020.

JUNIOR, Orlando Ferreira Cruz. Manaus, 2015. Dissertação (Engenharia Mecânica e de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Manaus, 2010. Disponível em: <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp148880.pdf>. Acesso em: 3 jul. 2020.

KUNNI, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2nd ed. Boston, 1991.

KUNZ, Airton et al. NOVAS TENDÊNCIAS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS. *Química Nova*, v.25, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/qn/v25n1/10428.pdf>. Acesso em: 8 ago. 2020.

MACHADO, G. B. **Disposição Final Ambientalmente Adequada de Rejeitos**. 2016.

MACHADO, Mary Ester Santiago. ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL E TERMOGRAVIMÉTRICA. 2008. Disponível em: https://www.academia.edu/7599003/AN%C3%81LISE_T%C3%89RMICA_DIFERENCIAL_E_TERMOGRAVIM%C3%89TRICA. Acesso em: 7 jul. 2020.

MARANHO, Á. S.; PAIVA, A. V. **Produção de mudas de *Physocalymma scaberrium* em substratos compostos por diferentes porcentagens de resíduos orgânicos e açaí**. *FLORESTA*, v. 42, n. 2, p. 399 - 408, 2012.

MELO, Tereza Noêmia Tavares da Fonsêca. Utilização dos tensoativos na indústria de petróleo. Angicos, 2013. Monografia (Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Angicos, 2013. Disponível em: <http://www2.ufersa.edu.br/portal/view/uploads/setores/232/TCC%20FINAL%20Tereza%20Noemia%20-%20depois%20da%20defesa.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2020.

MOCHIUTTI, Silas et al. Geração de Tecnologias para a Produção Sustentável e Processamento de Frutos de Açaí no Estuário Amazônico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 17. 2002. Anais [...] Belém, 2002. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/406250/1/857.pdf>. Acesso em: 3 jul. 2020.

MUCCIACITO, João Carlos. Uso eficiente do carvão ativado como meio filtrante em processos industriais. 2009. Disponível em: <https://www.tratamentodeagua.com.br/artigo/uso-eficiente-do-carvao-ativado-como-meio-filtrante-em-processos-industriais/>. Acesso em: 4 jul. 2020.

NAGAISHI, Thais Yuri Rodrigues. AÇAÍ (*Euterpe oleracea* Mart): EXTRATIVISMO, CARACTERÍSTICAS, ENERGIA E RENDA EM UMA COMUNIDADE NA ILHA DE MARAJÓ/ PA. . Belém, 2007. Dissertação (Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2007. Disponível em: http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/7370/dissertacao_Thais%20Yuri%20Rodrigues%20Nagaishi.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 3 jul. 2020.

NOGUEIRA, Oscar Lameira; FIGUEIRÊDO, Francisco José Câmara; MÜLLER, Antonio Agostinho. **Açaí: : Sistemas de Produção 4**. 1. ed. Belém-PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2005. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/408196/1/SISTEMAPROD4ONLINE.pdf>. Acesso em: 11 Agos. 2021.

OLIVEIRA, Johnatt Allan Rocha de. **Investigação das etapas para o processo de produção de etanol de segunda geração a partir da biomassa do caroço de açaí (euterpe oleracea)**. Campinas, 2014. Tese (Engenharia química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/266070/1/Oliveira_JohnattAllanRochade_D.pdf. Acesso em: 1 jul. 2020.

PÉCORA, A. A. B. **Estudo da Fluidodinâmica de Leitos Fluidizados Circulantes com Injeção de Ar Secundário**. 1995. 258 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1995.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**, 7th ed., McGraw-Hill, 1998.

PORTO, Paulo Sérgio da Silva. **Investigações sobre a secagem de partículas de xisto**. 2005. 198 p. Tese de Doutorado-Unicamp, Campinas, 2005.

REIS, Bruno de Oliveira et al. **Produção de briquetes energéticos a partir de caroços de açaí**. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4. 2002, Belém, 2002. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n4v2/112.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2020.

ROBINSON, T.; CHANDRAN, B.; NIGAM, P.. **Removal of dyes from a synthetic textile dye effluent by biosorption on apple pomace and wheat straw**. Water Research, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135401005218?via%3Dihub>. Acesso em: 26 ago. 2020.

RODRIGUES, R.B.; LICHTENTHÄLER, R.; ZIMMERMANN, B.F.; PAPAGIANNPOULOS, M.; FABRICIUS, H.; MARX, F. **Total oxidant scavenging capacity of *Euterpe oleracea* Mart. (açaí) seeds and identification of their polyphenolic compounds**. Journal of Agricultural and Food Chemistry, Washington, v.54, n.12, p.4162-4167, 2006.

ROGEZ, H. **Açaí: preparo, composição e melhoramento da conservação**. Belém: EDFPA, 2000. 313p.

ROCHA, S.C.S. **Fluidodinâmica de sementes de brócolis em leite fluidizado e leite de jorro**. Scientia Agrícola, Piracicaba – SP, V.59, n.04, P.645 – 652, 2002.

SAMUELSBERG, A.; HJERTAGER, B. H. **An experimental and numerical study of flow patterns in a circulating fluidized bed reactor.** International Journal of Multiphase Flow, v.22, p. 575–591, 1996.

SANCHEZ, C. G.; BARREDA, E.; SANCHEZ, E.; SANTOS, F.; RAMIREZ-BEHAINNE, J.J.; FERNANDES, M.; CRUZ, R.; BIZZO, W. **Tecnologia da Gaseificação de Biomassa.** 1. ed. Campinas: Átomo, 2010. v. 1. 430p.

SANTOS, Marilin Mariano Dos; MATAI, Patricia Helena Lara Dos Santos. **A importância da industrialização do xisto brasileiro frente ao cenário energético mundial.** Revista Escola de Minas, Ouro Preto, p.673-678, dez. 2010.

SOUZA, Selene Maria de Arruda Guelli Ulson de et al. Removal of Toxic Contaminants from Petrochemical Effluents using Adsorption and Biodegradation Processes. 1. ed. Kassel: University of Kassel, v. 1, 2011, p. 1-20. Disponível em: https://www.academia.edu/20918539/Removal_of_Toxic_Contaminants_from_Petrochemical_Effluents_using_Adsorption_and_Biodegradation_Processes. Acesso em: 8 ago. 2020.

SILVA, E. L. *Notas de Operações Unitárias da Indústria Química I.* Universidade Federal de São Carlos. Departamento de Engenharia Química. 2001.

VILLELA, F.; DA SILVA, W. J. S. A. Curvas de secagem de sementes de milho utilizando o método intermitente. v. 49, p. 145-153, 1992. ISSN 0103-9016.

XAVIER, L. H.; CORRÊA, H. L. *Sistemas de Logística Reversa: Criando cadeias de suprimentos sustentáveis.* São Paulo: Ed. Atlas, 2013.