



UNIVERSIDADE DE UBERABA

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E EXTENSÃO

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
MESTRADO PROFISSIONAL**

TALES MARTINS LONDE

**SECAGEM DE DEFENSIVO AGRÍCOLA DO TIPO GRÂNULO DISPERSÍVEL EM
LEITO FLUIDIZADO DE ESCALA PILOTO**

UBERABA-MG

2020



TALES MARTINS LONDE

**SECAGEM DE DEFENSIVO AGRÍCOLA DO TIPO GRÂNULO DISPERSÍVEL EM
LEITO FLUIDIZADO DE ESCALA PILOTO**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE)

Orientador:

Prof.: Dr. Euclides Antônio Pereira de Lima

Coorientador:

Prof.: Dr. José Roberto Delalibera Finzer

UBERABA-MG

2020

Catálogo elaborado pelo Setor de Referência da Biblioteca Central UNIUBE

L845s Londe, Tales Martins.
Secagem de defensivo agrícola do tipo grânulo dispersível em leito fluidizado de escala piloto / Tales Martins Londe. – Uberaba, 2020.
48 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade de Uberaba. Programa de Mestrado em Engenharia Química, concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais.

Orientador: Prof. Dr. Euclides Antônio Pereira de Lima.

Coorientador: Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer.

1. Defensivos agrícolas. 2. Processos de secagem. 3. Engenharia química. I. Lima, Euclides Antônio Pereira de. II. Finzer, José Roberto Delalibera. III. Universidade de Uberaba. Programa de Mestrado em Engenharia Química. IV. Título.

CDD 632.9

TALES MARTINS LONDE

SECAGEM DE DEFENSIVO AGRÍCOLA DO TIPO GRÂNULO DISPERSÍVEL EM
LEITO FLUIDIZADO DE ESCALA PILOTO

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais

Aprovado em: 21/12/2020

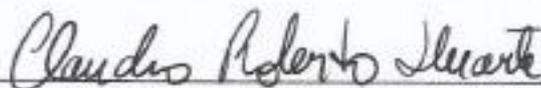
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Euclides Antônio Pereira de Lima - Orientador
Universidade de Uberaba



Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer
Universidade de Uberaba



Prof. Dr. Cláudio Roberto Duarte
Universidade Federal de Uberlândia

DEDICATÓRIA

Dedico esta conquista aos meus amados pais
Clésio e Gecione, pela força para nunca
desistir de meus sonhos, pelo apoio,
confiança e amor incondicional.

À minha esposa Tatiane, pela paciência e apoio,
por estar sempre presente ao meu lado,
sendo fonte de incentivo e inspiração
sempre dando suporte durante
toda a minha jornada.

A toda minha família e amigos que
contribuíram para essa conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida.

Aos meus pais Clésio e Gecione, que na escola da vida foram meus mestres, e me concederam os primeiros e mais importantes conhecimentos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Euclides Antônio Pereira de Lima, pela ajuda, paciência, dedicação e orientação sempre precisa.

Ao professor. Dr. José Roberto Delalibera Finzer, pelo apoio e valiosas contribuições no desenvolvimento desse trabalho.

A empresa Ourofino por disponibilizar a infraestrutura necessária para o desenvolvimento deste trabalho, assim como todos meus colegas de trabalho que contribuíram de forma significativa para o desenvolvimento do mesmo.

Aos meus amigos e familiares que de alguma forma contribuíram para que eu possa alcançar meus objetivos, e conquistar mais essa vitória.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

À Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais – FAPEMIG, pelo suporte dado ao desenvolvimento dessa dissertação.

EPÍGRAFE

*Se não puder voar, corra.
Se não puder correr, ande.
Se não puder andar, rasteje,
mas continue em frente de qualquer jeito.*

(Martin Luther King Jr.)

RESUMO

Para a indústria de defensivos agrícolas, as formulações de Grânulos Dispersíveis são bastante comuns, sendo assim garantir a qualidade do produto final é fundamental para uma boa formulação. Submeter os Grânulos Dispersíveis a secagem em leito fluidizado é utilizado pela empresa onde se desenvolve este projeto. Para este trabalho, se faz necessário conhecer o comportamento das partículas e um estudo das suas características, a fim de realizar a secagem dos granulos de um defensivo agrícola que será lançada futuramente pela empresa, e assim descrever o comportamento de um leito fluidizado em escala piloto, operando em batelada, na secagem dosgrânulos para previsão do comportamento de uma unidade industrial. Os ensaios realizados ajudaram a determinar as melhores condições operacionais, e sua influência na qualidade final do produto. A secagem na temperatura de 60°C possibilitou obter o produto com umidade média especificada entre 1% e 3% com a qualidade desejada.

Palavras-Chave: Secador de Leito Fluidizado. Grânulos Dispersíveis. Secagem. Defensivos Agrícolas.

ABSTRACT

For the pesticide industry, Dispersible Granule formulations are quite common, so ensuring the quality of the final product is essential for a good formulation. Submitting the Dispersible Granules to fluidized bed drying is used by the company where this project is being developed. For this work, it is necessary to know the behavior of the particles and a study of their characteristics, in order to dry the granules of a pesticide that will be launched in the future by the company, and thus describe the behavior of a fluidized bed on a pilot scale. , operating in batch, drying the granules to predict the behavior of an industrial unit. The tests carried out helped to determine the best operational conditions, and their influence on the final quality of the product. Drying at a temperature of 60°C made it possible to obtain the product with a specified average humidity between 1% and 3% with the desired quality.

Keywords: Fluidized Bed Dryer.Dispersible Granules.Drying.Pesticides.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Padrões de interação gás-sólido em secadores.	7
Figura 2: Diagrama de Geldart.	8
Figura 3: Comportamento de leitos fluidizados.	11
Figura 4: Comportamento de sólidos como líquido.	12
Figura 5: Regiões características de um leito de jorro.	13
Figura 6: Diagrama geral do regime de escoamento para toda a faixa de contato gás-sólido, a partir da classificação de Geldart para sólidos.	15
Figura 7: Comportamento da curva ΔP versus u_0 para um leito com partículas médias de tamanho uniforme.	17
Figura 8: Comportamento da curva de ΔP versus u_0 para um leito com ampla distribuição de tamanhos de partículas.	18
Figura 9: Diagramas de queda de pressão para leitos fluidizados “pobres”:	19
Figura 10: Gráfico para determinar a velocidade terminal de partículas que escoam através de fluidos.	22
Figura 11: Defensivo agrícola do Tipo WG.	29
Figura 12: Equipamento utilizado no experimento.	30
Figura 13: Principais dimensões do secador.	30
Figura 14: Esquema para eliminação da zona de menor escoamento de ar no equipamento.	31
Figura 15: Paquímetro digital utilizado na mensuração das partículas.	32
Figura 16: Imagem do produto não micronizado.	33
Figura 17: Moinho a jato de ar em espiral.	34
Figura 18: Aspecto do produto, após micronização, após umectação e durante etapa de extrusão respectivamente.	34
Figura 19: Quantificação da altura do leito fixo.	35
Figura 20: Anemômetro digital.	36
Figura 21: Representação de vista superior do secador e pontos de leituras das velocidades do ar.	36
Figura 22: Titulador Karl Fisher.	37
Figura 23: Curvas de secagem em leito fluidizado dos grânulos dispersíveis.	40
Figura 24: Modelo de distribuição GGS.	42
Figura 25: Modelo de distribuição RRB.	42
Figura 26: Representação dos regimes de escoamento encontrados no experimento.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Esfericidade de partículas.....	24
Tabela 2: Padrão de telas Tyler	25
Tabela 3: Resultados de umidade (base úmida) das amostras.....	39
Tabela 4: Resultado da análise granulométrica das partículas	40
Tabela 5: Distribuição de partículas em sistema de malhas Tyler.	41
Tabela 6: Resultados de dispersibilidade após testes de estabilidade.	46

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

WG	Grânulos Dispersíveis
°C	Graus Celsius
T.A	Temperatura Ambiente
m/s	Metros por segundo
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
mm	milímetros
%	Porcentagem
π	Pi
V _{cilindo}	Volume do cilindro
X _n	Fração de massa retida na malha
A _n	Média entre a abertura das duas peneiras
\bar{D}_p	Diâmetro de Sauter
GGS	Gates-Gaudin-Shaumann
RRB	Rosin-Rammler-Bennet
g	Grama
cm	Centímetros
μm	Micrometros
PD&I	Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
In	Polegadas
d_{ef}	Diâmetro efetivo
d_{sph}	Diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula
d_s	Diâmetro da esfera
S_p	Área de superfície específica de uma partícula;
V_p	Volume de uma partícula.
u_t	Velocidade terminal das partículas
d^*	Tamanho de partícula adimensional
d_p	Diâmetro da partícula
u^*	Velocidade adimensional de gás
C _D	Coeficiente de arrasto
H_{jm}	Altura do leito na condição de mínima fluidização
$-\Delta P_{jm}$	Perda de pressão de jorro mínimo.

A	Área da seção transversal do leito
m_p	Massa de material particulado.
ε_{mf}	Fração de vazios na condição de mínima fluidização
ρ_f	Densidade do fluido;
ΔP_{mf}	Perda de pressão do leito na condição de mínima fluidização;
H_{mf}	Altura do leito em mínima fluidização;
u_{mf}	Velocidade mínima de fluidização;
ΔP	Variação de pressão
ΔP_{max}	Máxima variação de pressão
u_g	Velocidade superficial do gás
Ar	Número de Archimedes
Re	Número de Reynolds
g	Aceleração da gravidade
μ	Viscosidade
ρ	Densidade do ar
ρ_s	Densidade das partículas
\emptyset	Esfericidade
\emptyset_s	Razão entre a superfície da esfera de mesmo volume que a partícula pela superfície da partícula.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Equação para cálculo do tamanho adimensional da partícula

Equação 2 – Equação para cálculo da velocidade adimensional do gás.

Equação 3 – Equação do número de Arquimedes

Equação 4 – Equação para numero de Reynolds da partícula

Equação 5 – Equação de Ergun

Equação 6 – Equação da perda de pressão na condição de mínima fluidização

Equação 7 – Equação para cálculo da fração de vazios

Equação 8 – Equação para cálculo máxima perda de pressão

Equação 9 – Equação para cálculo da perda de pressão na condição de jorro mínimo

Equação 10 – Equação para cálculo da velocidade terminal de queda livre da partícula

Equação 11 – Equação para cálculo do coeficiente de arrasto

Equação 12 – Equação para cálculo do coeficiente de arrasto para partículas esféricas

Equação 13 – Equação do tamanho da partícula em função do número de Archimedes.

Equação 14 – Equação da velocidade do gás em função dos números Archimedes e Reynolds

Equação 15 – Equação da velocidade terminal das partículas que escoam através de fluidos

Equação 16 – Equação para cálculo da esfericidade

Equação 17 – Equação para cálculo do diâmetro efetivo

Equação 18a – Equação para cálculo da superfície específica de uma partícula

Equação 18b – Equação para cálculo da superfície específica para todo o leito

Equação 19 – Equação para cálculo do diâmetro de peneiras

Equação 20a – Equação para cálculo do diâmetro de peneiras para partículas irregulares

Equação 20b – Equação para cálculo do diâmetro de peneiras para partículas irregulares com razão do comprimento inferior a 2:1

Equação 20c – Equação para cálculo do diâmetro de peneiras para partículas irregulares com razão do comprimento superior a 2:1

Equação 21 – Equação do Modelo matemático Gates-Gaudin-Schuhmann (GGS)

Equação 22 – Equação de Linearização do modelo de Gates-Gaudin-Shuhmann (GGS)

Equação 23 – Modelo do matemático Rosin-Rammler-Bennet (RRB)

Equação 24 – Equação de Linearização do modelo de Rosin-Rammler-Bennet (RRB)

Equação 25 – Equação regressão linear das partículas aplicado ao modelo (GGS)

Equação 26 – Equação regressão linear das partículas aplicado ao modelo (RRB)

Equação 27 – Equação do Diâmetro Médio de Sauter

Equação 28 – Cálculo de volume do cilindro

Equação 29 – Cálculo do diâmetro da esfera em função do volume do cilindro

Equação 30 – Cálculo do número de Reynolds

Equação 31 – Cálculo do número de Archimedes

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1 Defensivos agrícolas.....	2
2.1.1 Formulação de um defensivo.....	3
2.2 Grânulos dispersíveis (WG).....	3
2.3 Extrusão.....	4
2.4 Secagem de sólidos.....	5
2.5 Fundamentos de Secagem.....	5
2.6 classificação dos secadores.....	7
2.7 Classificação de Geldart.....	8
2.8 Fluidização.....	9
2.9 O comportamento da fluidização.....	10
2.10 Comportamento como líquido de um leito fluidizado.....	12
2.11 Leito de Jorro.....	12
2.12 Previsão do regime de fluidização.....	14
2.13 Qualidade da fluidização.....	15
2.14 Velocidade mínima de fluidização.....	16
2.15 Velocidade terminal das partículas.....	21
2.16 Caracterização de partículas.....	22
2.17 Classificação do material.....	23
2.18 Esfericidade.....	23
2.19 Diâmetro de peneiras.....	25
2.20 Modelos de distribuição granulométrica.....	27
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3.1 Material.....	29

3.2 O equipamento	29
3.4 Análise granulométrica das partículas	32
3.5 Densidade aparente das partículas	32
3.6 Experimento	32
3.6.1 Formulação e preparo do Material	32
3.6.2 Secagem do material	34
3.6.3 Determinação do Leito Fixo e Leito Expandido	35
3.6.4 Determinação da velocidade do ar	36
3.6.5 Determinação da umidade das amostras	36
3.7 Avaliação da estabilidade do Material	37
3.7.1 Dispersibilidade.....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 Avaliação dos resultados de umidade	39
4.2 Resultados da análise granulométrica	40
4.3 determinação do diâmetro médio de sauter	43
4.4 Regime de operação do leito Fluidizado.....	43
4.5 Avaliação da estabilidade do material	46
5 CONCLUSÃO.....	48
REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

Uma formulação de defensivo agrícola bastante utilizada na indústria, é a do tipo WG (Grânulos Dispersíveis em água) que comumente é efetuada por extrusão. É composta por inertes que podem ser solúveis ou não e por ingredientes ativos que são insolúveis, e que posteriormente serão dispersos em calda para aplicação.

Uma das etapas primordiais na produção dos grânulos é a de secagem, que pode influenciar diretamente na qualidade e custo do produto. A secagem por sua vez é uma etapa apoiada na termodinâmica onde ocorre transporte de massa (água) em contrapartida a troca de energia (calor). A duração da operação depende diretamente das características do material, do formato, do tipo de equipamento utilizado e de suas condições de operação.

A secagem normalmente é uma etapa de alto custo que demanda grandes quantidades de energia para evaporar a água presente no material úmido, por meio de seu aquecimento, cujo objetivo é reduzir a presença de água no material à valores especificados que normalmente variam de acordo com material e necessidades do processo.

Essa etapa do processo de fabricação de grânulos dispersíveis, pode ser primordial na qualidade do produto final, uma vez que durante a mesma, ocorrem inúmeras variações nas características físicas, químicas e mecânicas do material, tornando fundamental ter conhecimento desses mecanismos, do material e de seus efeitos.

Um estudo de estabilidade dos produtos finais após os ensaios, será realizado com as amostras produzidas, a fim de entender a influência das variáveis do processo em suas características e em sua vida de prateleira, para que se garanta um produto de qualidade juntamente com a otimização das condições de operação do secador.

O presente trabalho tem por objetivo utilizar um secador de leito fluidizado em escala piloto para realizar a secagem de um novo produto que será lançado pela empresa Ouro Fino Química S.A, a fim de se determinar qual a melhor temperatura de secagem para o produto, e garantir que se tenha uma alta qualidade durante toda a vida de prateleira.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DEFENSÍVOS AGRICOLAS

Agrotóxicos, defensivos agrícolas, pesticidas, praguicidas, remédios de planta ou veneno: são inúmeras denominações relacionadas a um grupo de substâncias químicas utilizadas no controle de pragas e doenças de plantas.

No Brasil o MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento) estabelece por meio do decreto nº 4.074, de 4 de janeiro de 2002, a seguinte denominação para os defensivos agrícolas:

Agrotóxicos e afins - produtos e agentes de processos físicos, químicos ou biológicos, destinados ao uso nos setores de produção, no armazenamento e beneficiamento de produtos agrícolas, nas pastagens, na proteção de florestas, nativas ou plantadas, e de outros ecossistemas e de ambientes urbanos, hídricos e industriais, cuja finalidade seja alterar a composição da flora ou da fauna, a fim de preservá-las da ação danosa de seres vivos considerados nocivos, bem como as substâncias e produtos empregados como desfolhantes, dessecantes, estimuladores e inibidores de crescimento (BRASIL, 2002).

Os principais tipos de defensivos descritos por Silva e Costa (2012) são:

Herbicidas – produtos destinados para eliminação de ervas daninhas. E podem ser classificados de acordo com seu uso (aplicados no solo, pré-emergentes ou pós-emergentes) e modo de ação sobre o mecanismo bioquímico da planta. Podem ser também segmentados em herbicidas não seletivos (que destroem todas as plantas) e seletivos (aqueles que atacam unicamente a praga, preservando a lavoura).

Inseticidas – são produtos à base de substâncias químicas ou agentes biológicos destinados a eliminar insetos.

Fungicidas – são agentes físicos, químicos ou biológicos destinados a combater os fungos.

Acaricidas – produtos químicos destinados a controlar ou eliminar ácaros.

Agentes biológicos de controle – organismos vivos que atuam por meio de uma ação biológica como a de parasitismo ou de competição com a praga.

Produtos domissanitários – destinam-se às regiões urbanas, com suas principais categorias de produtos divididas em inseticidas domésticos, moluscicidas, rodenticidas e repelentes de insetos.

2.1.1 Formulação de um defensivo

Os defensivos agrícolas estão disponíveis no mercado em várias formas diferentes, e a sua formulação é um processo pelo qual o produto é colocado em uma forma que pode ser facilmente produzido, armazenado, transportado e aplicado de modo prático e seguro, e que também possua eficácia no controle (HAZRA; PURKAIT, 2019).

Para a elaboração de uma formulação Azevedo e Freire (2006) relatam que se faz necessário conhecer as principais características físico químicas do ingrediente ativo utilizado, sendo elas.

Aspecto físico – O ingrediente ativo pode ser um líquido viscoso, ou cristais.

Solubilidade – Se possui ou não solubilidade em água, ou em algum outro solvente orgânico, e se é estável no mesmo.

Ponto de Fusão – Para formulações que necessitem processos de moagem, pode ocorrer o aquecimento durante o mesmo.

Estabilidade Química – conhecimento da estabilidade química é importante e útil para se definir qual o tipo de formulação que poderá ser desenvolvido. Por exemplo, se o ingrediente ativo tem facilidade de se hidrolisar. Neste caso, não é seguro uma formulação que possua água em sua composição.

A correta escolha do tipo de formulação para Hazra *et al.* (2017) também depende de alguns fatores de suma importância.

Segurança do aplicador, preocupações ambientais, biologia das pragas, equipamentos disponíveis, e também custos.

2.2 GRÂNULOS DISPERSÍVEIS (WG)

Os grânulos dispersíveis em água (WG), são descritos por Hazra e Purkait (2019) como um produto composto pela agregação de pós em grânulos uniformes para facilitar o manuseio e minimizar a suspensão de particulados respiráveis. Para aplicação são dispersos em tanque de pulverização e então aplicados como uma suspensão. Os grânulos devem ser resistentes o suficiente para não se desintegrarem em pó, e também se dispersar prontamente e completamente no tanque de pulverização, evitando assim o entupimento dos bicos de aplicação.

Vários métodos podem ser usados para a formação dos granulos a partir da mistura de pós inicial, estes incluem a granulação em panela rotativa (*pan granulation*), granulação em leito fluidizado, secagem por pulverização (*spray dryer*) e extrusão, sendo esta ultima a mais comum. Existem várias vantagens da formulação WG em relação as demais, como:

- Baixa emissão de pós durante o preparo da calda
- Facilidade no manuseio e dosagem
- Boa estabilidade físico química
- Possibilita formulações de altas concentrações de ingredientes ativos
- Fácil estocagem de embalagens após o uso.

2.3 EXTRUSÃO

Riaz *et al.* (2009) descreve a extrusão como um processo que combina várias operações unitárias. E também modificações físico-químicas, frequentemente em combinação, como mistura, corte, moldagem, fusão, secagem e também processos como a texturização, culminando na saída do respectivo produto através de um orifício. O processo de extrusão pode ser promovido através da utilização de um pistão, de um conjunto de rolos ou uma rosca sem fim (parafuso), para forçar o material, normalmente através de uma abertura estreita, a chegar à forma desejada. Os equipamentos que asseguram a efetivação desta etapa de processamento industrial denominam-se extrusoras ou extrusores (LOPES-DA-SILVA; CHOUPINA, 2014).

São utilizados, para produzir diversos tipos de produtos com uma gama de formas e texturas (BERNARDES, 2006).

A extrusão tem por objetivo transformar partículas de pós cristalinos ou amorfos em agregados sólidos de resistência e porosidade variada. Em comparação a uma simples mistura de pós, o granulado apresenta algumas vantagens (COUTO, 2000).

Facilidade de escoamento e boas propriedades de fluidez – Muitos pós, devido ao seu tamanho pequeno, forma irregular ou características de superfície, são muito aderentes e permitem uma boa fluidez.

Melhor conservação da homogeneidade de distribuição de componentes e das fases granulométricas.

Maior reprodutibilidade em medições volumétricas.

Maior densidade

2.4 SECAGEM DE SÓLIDOS

Lima (2017)descreve a secagem como uma complicada operação que envolve fenômenos de transferência simultânea de calor, massa e quantidade de movimento, existência do estado de equilíbrio e variações dimensionais do sólido sendo secado.

Uma diferença primordial entre a secagem e as demais técnicas de separação, se dá pela maneira com que água é retirada do sólido. Uma vez que a retirada de voláteis é realizada pela movimentação do líquido, ocasionada pela diferença da pressão parcial de vapor d'água entre a superfície do produto e o ar que o envolve.

O material a ser seco pode receber calor de fontes distintas, como: convecção, radiação térmica, condução ou mesmo absorção de energia eletromagnética gerada por frequência de rádio ou microondas. A secagem por transferência volumétrica de calor pode acelerar e oferecer uma série de benefícios em relação aos demais métodos convencionais. A transferência de calor comumente ocorre através de vários mecanismos combinados.

Dentre uma série de operações a secagem comumente é a etapa final, e o produto resultante normalmente está pronto para a embalagem final. Este sistema pode ser descrito como a remoção de parte da água ou de outro líquido do material sólido com objetivo de reduzir o seu conteúdo a valores especificados.Cada material possui conteúdo de umidade diferente, e secar pode ser um termo relativo apenas a redução do seu conteúdo úmido de um valor inicial a um valor final aceitavelmente menor.

As formas dos sólidos a serem secos podem ser variadas, como: grânulos, cristais, pós, flocos, placas ou também folhas contínuas, o que apresenta propriedades únicas para cada material. O líquido a ser vaporizado pode estar presente em formas diferentes, como totalmente na superfície do sólido, parcialmente fora e parcialmente dentro, ou inteiramente dentro do sólido(McCABE et al., 1993).

2.5 FUNDAMENTOS DE SECAGEM

Lima(2017)cita que as condições de secagem são muito diversas, de acordo com as propriedades doar de secagem e também da forma como se faz o contato ar-produto: exemplo, uma secagem com ar quente na superfície de um leito de partículas (a água estando situada dentro daspartículas), ou outro é a suspensão de uma partícula comescoamento de ar.

Mujumdar et al. (2006) descreve que quando um sólido úmido é submetido à secagem térmica, dois processos ocorrem simultaneamente:

Transferência de energia (principalmente como calor) do ambiente circundante para o sólido, utilizada para evaporar a umidade da superfície. A remoção de água como vapor da superfície do material, depende das condições externas de temperatura, umidade do ar e velocidade, área superficial e pressão.

Transferência de umidade interna para a superfície do o sólido e sua subsequente evaporação associado ao mecanismo citado anteriormente. O movimento da umidade de dentro para fora do sólido, é uma função da natureza física do sólido, da temperatura e seu teor de umidade.

Para Albuquerque (2011) para descrição do fenômeno de secagem é fundamental o conhecimento sobre mecanismos de transferência de água do interior do material para a superfície, dentre estes mecanismos alguns dos mais importantes são:

Difusão líquida: Relacionada a existência de um gradiente de concentração no material.

Difusão de Vapor: Devido ao gradiente de pressão de vapor que é causado pelo gradiente de temperatura e concentração.

Escoamento de Líquido e vapor: Que ocorre devido a diferença de pressão externa, capilaridade, concentração e alta temperatura.

Determinar quais dos mecanismos estão atuando durante a secagem do material pode ser bastante complexo, normalmente um mecanismo tem predominância durante determinado instante do processo, porém pode haver diferentes mecanismos atuando em diferentes fases ou até mesmo em conjunto durante a etapa completa de secagem. A predominância do mecanismo está relacionada às características físicas e estruturais do sólido e a distribuição da umidade durante a secagem. Durante a secagem é bastante comum a classificação de dois períodos de taxa de secagem. Sendo um período de taxa constante de secagem e um período de taxa decrescente, ambos baseados na velocidade de secagem do material.

Durante o período de taxa constante, a transferência de umidade no produto é suficientemente alta para manter uma saturação de água na superfície, e a taxa de secagem é controlada pela taxa de calor transferida para a superfície de evaporação. A taxa de transferência de massa se equilibra com a taxa de transferência de calor e a temperatura da superfície permanece constante. O término desta etapa corresponde ao momento em que a migração interna de água para a superfície do material não consegue mais compensar a evaporação da água livre na superfície, então a taxa de secagem começa a diminuir e a temperatura do sólido a

umentar. Então é atingido o segundo período, o de taxa decrescente de secagem. Neste período a taxa de secagem depende do transporte de umidade do interior do material para a sua superfície. Então a taxa de secagem decresce continuamente até que o sistema atinja o equilíbrio caracterizado pela igualdade de atividade de água no ar e superfície do sólido (PERRY *et al.*, 1997)

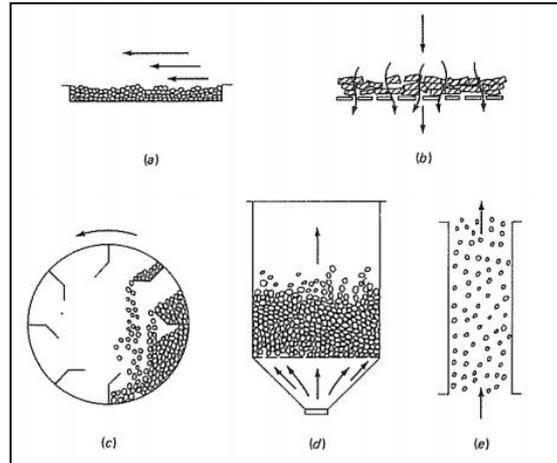
2.6 CLASSIFICAÇÃO DOS SECADORES.

A classificação de equipamentos de secagem não é simples, alguns secadores são contínuos enquanto outros operam em batelada, alguns agitam os sólidos e outros essencialmente são dotados de movimento. Há também a possibilidade de se adotar uma operação sob vácuo para reduzir a temperatura de secagem. Alguns equipamentos podem ser aptos a operar com quase qualquer tipo de material, enquanto outros são projetados especificamente para o tipo de material a ser processado.

Uma classificação que pode ser feita entre secadores, é quanto à maneira em que os sólidos serão expostos, sendo que podem ser diretamente expostos a um fluido aquecido (geralmente ar) ou receber o calor transferido por um meio externo. Os secadores que expõem os sólidos a um fluido aquecido são denominados secadores adiabáticos ou diretos e aqueles em que o calor é transferido a partir de um meio externo são conhecidos como secadores não adiabáticos ou indiretos. Nos secadores adiabáticos, os sólidos podem ser expostos ao gás de secagem por vários mecanismos distintos, alguns são descritos na Figura 1 por (McCABE *et al.*, 1993).

(a) escoamento de gás em um leito estático de sólidos: O gás é admitido na superfície de um leito de sólidos ou através de uma ou mais faces de uma folha ou filme contínuo; (b) passagem de gás através de um leito de sólidos: O gás é admitido através de um leito composto por sólidos granulares que são suportados em uma tela; (c) ação de cascadeamento em um secador rotativo: Os sólidos se movimentam em cascata através de uma corrente de gás, geralmente com algum arraste indesejado de partículas finas na corrente gasosa; (d) leito de sólidos fluidizados: O gás escoar pelos sólidos a uma velocidade suficiente para fluidizar o leito. Comumente, há um arrasto de partículas mais finas; (e) escoamento contínuo de gás-sólidos em um secador tipo transportador pneumático: Os sólidos são transportados pneumaticamente em uma corrente de gás de alta velocidade.

Figura 1: Padrões de interação gás-sólido em secadores.

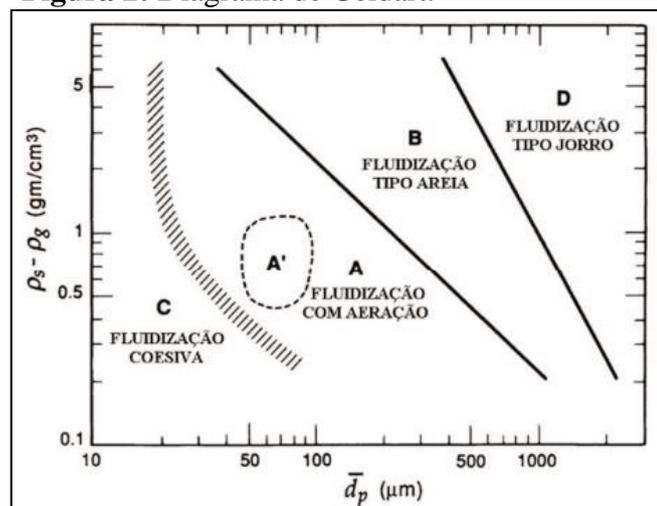


Fonte: Adaptado de (McCABE et al., 1993)

2.7 CLASSIFICAÇÃO DE GELDART

Segundo Moris (2002), foram classificados por Geldart quatro grupos de partículas de acordo com suas propriedades e condições de operação, e diversos campos da tecnologia de partículas sólidas usam amplamente essa classificação, a qual denomina que o comportamento das partículas no leito fluidizado esta diretamente relacionado a combinação entre a densidade do fluido, do sólido e o tamanho das partículas. Na Figura 2 é demonstrado o diagrama de fluidização de Geldart, aplicado para verificar o regime de fluidização e a classificação dos sólidos.

Figura 2: Diagrama de Geldart.



Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel, (1991).

Grupo A - partículas com pequenos diâmetros médios e/ou baixas densidades aparentes ($< 1,4 \text{ g/cm}^3$). Estes materiais fluidizam bem, porém após exceder a velocidade de mínima fluidização, acaba ocorrendo uma grande expansão do leito mesmo antes do aparecimento de bolhas.

Grupo B: Neste grupo têm-se partículas com diâmetros médios entre 40 e 500 μm e densidades aparentes entre 1,4 e 4 g/cm^3 . Essas partículas fluidizam bem com vigorosa ação das bolhas e rápido crescimento das mesmas, que aparecem logo após a velocidade de mínima fluidização, ou levemente acima dela. Com uma pequena expansão do leito, com incremento na velocidade do fluido, pequenas bolhas se formam e ao escoar pelo leito se desfazem. Normalmente a velocidade das bolhas é maior que a do gás (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Grupo C: Grupo caracterizado por apresentar partículas muito finas e coesivas (particulados finos e aderentes) fazendo com que a fluidização seja muito difícil de acontecer, pois provocam canais preferenciais e/ou *slugs*, formados por forças interpartículas geralmente mais fortes que as forças de ação do gás, assim para ser possível fluidizar este tipo de material, geralmente, utilizam-se agitadores e/ou vibradores, os quais realizam o desprendimento de sólidos, através da quebra dos canais preferenciais estáveis

Grupo D: É composto por partículas grandes ($d_p > 1 \text{ mm}$). Da mesma forma que no Grupo B, as bolhas aparecem assim que se atinge a velocidade mínima de fluidização. A mistura das partículas não é pior que nos grupos A e B e uma elevada vazão de gás é necessária para a fluidização. As bolhas formadas atingem tamanhos elevados e seu regime de defluidização é um caso particular, em que a fluidodinâmica presente no leito é caracterizada por jorro (ALMEIDA, 2018).

2.8 FLUIDIZAÇÃO

Para Kunii e Levenspiel (1991) a fluidização é uma condição em que partículas sólidas são colocadas em estado de fluido por meio de suspensão em um gás ou líquido. Quando o fluido escoar em baixa velocidade, percolando entre os espaços vazios do material particulado, inicialmente em estado estacionário, sem promover sua suspensão, este leito é dito como fixo. Aumentando a velocidade de escoamento do fluido, ao ponto em que a força de arrasto promovida pelo fluido nas partículas se iguala a força peso das partículas, ocorre a suspensão do sólido particulado, classificando assim, o leito como fluidizado.

De acordo com Almeida (2018) em geral, a classificação do regime de escoamento é determinada pela classificação das partículas, e pela análise do comportamento das bolhas que se formam, e são realizadas em função de suas massas específicas e dimensões.

2.9 O COMPORTAMENTO DA FLUIDIZAÇÃO

O fluido ao escoar através de um leito de partículas finas, como se pode ver na Figura 3(A), a uma baixa velocidade, apenas penetra pelos espaços vazios entre partículas estacionárias, este é um leito fixo. Com um aumento na velocidade do fluido, as partículas se afastam, tendem a vibrar e o leito se expande um pouco, mas ainda existe o contato entre as partículas.

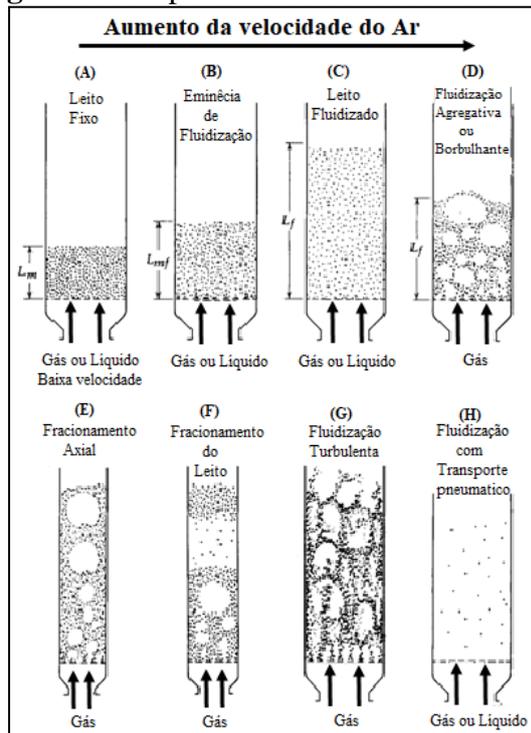
Ao aumentar mais a velocidade do fluido, é atingido o ponto em que todas as partículas são suspensas pelo gás ou líquido que escoar no sentido ascendente. Neste ponto, a força de atrito entre partícula e fluido se equilibra com o peso das partículas, e a perda de pressão através de qualquer seção do leito multiplicada pela área é igual ao peso das partículas nessa seção, o leito é denominado incipiente ou na eminência de fluidização Figura 3(B). Quando o leito se expandiu é denominado leito fluidizado Figura 3(C).

Em sistemas sólido-líquido, o aumento na velocidade do fluido acima da mínima de fluidização geralmente resulta em uma expansão suave e progressiva do leito. Em sistemas gás-sólidos, esses leitos podem ser observados apenas sob condições especiais de partículas leves e finas com gás denso a alta pressão.

Geralmente, os sistemas gás-sólido se comportam de maneira bem diferente. Com um aumento na velocidade além da mínima de fluidização, grandes instabilidades com bolhas e canalização de gás são observados.

Em velocidades mais altas, a agitação se torna mais violenta e o movimento de sólidos se torna mais vigoroso. Esses leitos são chamados leitos fluidizados borbulhantes, como se pode observar na Figura 3(D). Em alguns casos raros, os sistemas líquido-sólido também podem se comportar como leitos borbulhantes. Isso ocorre apenas com sólidos muito densos e fluidizados com líquidos de baixa densidade.

Nos sistemas gás-sólido, as bolhas de gás coalescem e crescem à medida que ascendem, em leitos profundos e de pequeno diâmetro, eles podem eventualmente ocupar toda a seção transversal do vaso.

Figura 3:Comportamento de leitos fluidizados.

Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel, (1991).

No caso de partículas finas, elas escoam suavemente pela parede em torno do espaço vazio com gás. Isso é chamado de *slugging*, com bolhas axiais, como mostrado na Figura 3(E).

Para partículas maiores, a porção do leito acima da bolha é empurrada para cima, como por um pistão. As partículas deslocam-se no sentido descendente quando a bolha se desintegra, e abaixo outras bolhas se formam. Este movimento oscilatório instável é repetido e esse comportamento é denominado de empistonamento, representado na Figura 3(F).

A formação de bolhas é especialmente grave em leitos fluidizados longos e estreitos. Quando partículas finas são fluidizadas a uma velocidade do gás suficientemente alta, e a velocidade terminal dos sólidos é excedida, a superfície superior do leito desaparece, e o arraste de partículas se torna apreciável. Em vez de bolhas, se observa um movimento turbulento de aglomerados sólidos e vazios de gás com vários tamanhos e formas. Este então é denominado leito fluidizado turbulento, mostrado na Figura 3(G).

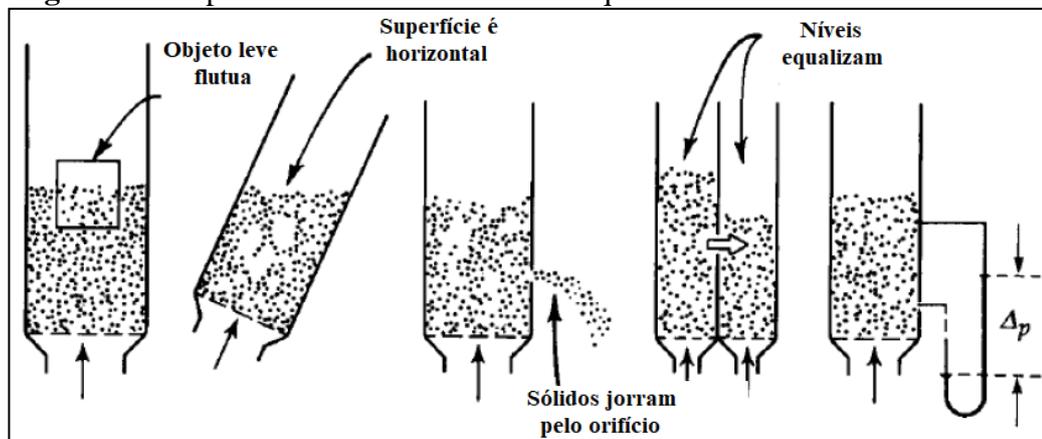
Maior aumento da velocidade do gás, os sólidos são arrastados para fora do leito com o gás. Nesse estado, tem-se um leito fluidizado de fase dispersa, com transporte de sólidos, veja a Figura 3(H). Na fluidização turbulenta, grandes quantidades de partículas são arrastadas, impedindo operações em estado estacionário. Para operação em estado estacionário nesse

comportamento de contato, as partículas arrastadas devem ser coletadas e retornadas para o leito.

2.10 COMPORTAMENTO COMO LÍQUIDO DE UM LEITO FLUIDIZADO

Um leito fluidizado por um gás em fase densa apresenta comportamento semelhante a um líquido em ebulição e de muitas formas possui características parecidas com líquido, este comportamento poder ser observada na Figura 4. Por exemplo, se um objeto leve e grande suficiente é submetido ao leito fluidizado, o mesmo pode facilmente ser deslocado e comumente apresentará estar flutuando na superfície do mesmo. O recipiente ao ser inclinado, a superfície superior do leito permanece na horizontal, se dois leitos com níveis diferentes são conectados, os mesmos se igualam. O leito por possuir também propriedades semelhantes a um líquido em escoamento, caso haja um orifício na lateral do vaso, os sólidos em fluidização irão jorrar pelo orifício em um jato, esse comportamento pode ser usado para escoar o material de um vaso a outro (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Figura 4: Comportamento de sólidos como líquido.



Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel (1991).

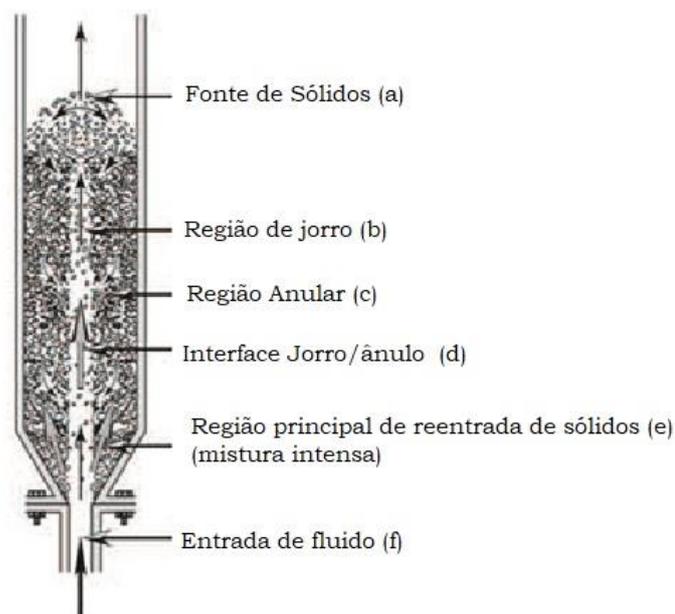
2.11 LEITO DE JORRO

Para Cremasco (2018) o leito de jorro é um caso particular da fluidização, sendo aplicados em partículas grandes como as do grupo D de Geldart, para promover o contato fluido-partículas durante a fluidização. A rápida coalescência de bolhas, altas taxas de transferência de massa e calor, intensa mistura do material fluidizado, as altas taxas de circulação das partículas que acendem na parte central do leito com recirculação pelas laterais

e a necessidade de grandes quantidades de fluido para promover a fluidização dos materiais são algumas das principais características deste tipo de fluidização. Este sistema é classificado em cinco regiões distintas do contato fluido-partículas, conforme Figura 5.

A região de fonte de sólidos, Figura 5(a), é o local onde finaliza o jorro vertical onde se distribuem as partículas para o espaço radial. A região de jorro, Figura 5(b), é onde ocorre o transporte ascendente e diluído das partículas; a região anular, Figura 5(c), é o domínio onde se tem as partículas em fase densa, escoando em contracorrente à fase fluida em ascensão; a interface jorro/ânulo, Figura 5(d), como o próprio nome diz, é o local que limita as regiões de jorro e anular; já a região principal de reentrada de sólidos, Figura 5(e), situa-se na base do leito, onde ocorre uma mistura intensa fluido/partícula.

Figura 5: Regiões características de um leito de jorro.



Fonte: Adaptado de Cremasco, (2018).

Em se tratando de fluidização gás-sólido, geralmente usa-se distribuidores localizados na base do leito, na região de entrada de fluido, Figura 5(f), os quais têm as funções de servir como suporte aos sólidos particulados, bem como, homogeneizar o escoamento de fluido, e melhorando a distribuição nos sólidos particulados. No entanto, é necessário empregar um distribuidor adequado ao tipo de material particulado utilizado, pois o modelo/formato deste distribuidor pode influenciar o comportamento da interação fluido-partículas, conseqüentemente, alterando o desempenho da fluidização e a perda de pressão no leito. Para

auxiliar na formação do jorro, geralmente um secador ou outro equipamento como um reator para este fim tem base cônica.

2.12 PREVISÃO DO REGIME DE FLUIDIZAÇÃO

Inicialmente para prever o comportamento de uma operação de secagem em sistema gás-sólido, o regime de contato durante a operação deve ser identificado, para assim utilizar as equações de desempenho apropriadas ao regime determinado, entre vários gráficos construídos para mapear estes regimes Kunii e Levenspiel, (1991) citam que o modelo de Grace, apresenta ser útil para aplicações em engenharia.

Utilizando-se o diagrama Figura 6 é possível quantificar as configurações possíveis de leitos fluidizados gás-sólido em função do tamanho adimensional das partículas, d_p^* , calculada conforme a Equação (1). É possível quantificar o início da fluidização assim como a velocidade terminal em leitos com partículas de tamanho único e localizar os limites para a classificação de sólidos de Geldart.

$$d_p^* \equiv d_p \left[\frac{\rho_g(\rho_p - \rho_g)g}{\mu_f^2} \right]^{\frac{1}{3}} = Ar^{\frac{1}{3}}, (1)$$

A velocidade adimensional do gás, u^* , calculada conforme a equação (2);

$$u^* \equiv u_g \left[\frac{\rho_g^2}{\mu_f(\rho_p - \rho_g)g} \right]^{\frac{1}{3}} = \frac{Re_p}{Ar^{\frac{1}{3}}}. (2)$$

Nas Equações (1) e (2), u_g é a velocidade superficial do gás, ρ_g é a densidade do gás, ρ_p é a densidade da partícula, μ_f é a viscosidade do gás.

Ar é o número de Arquimedes representado pela equação (3);

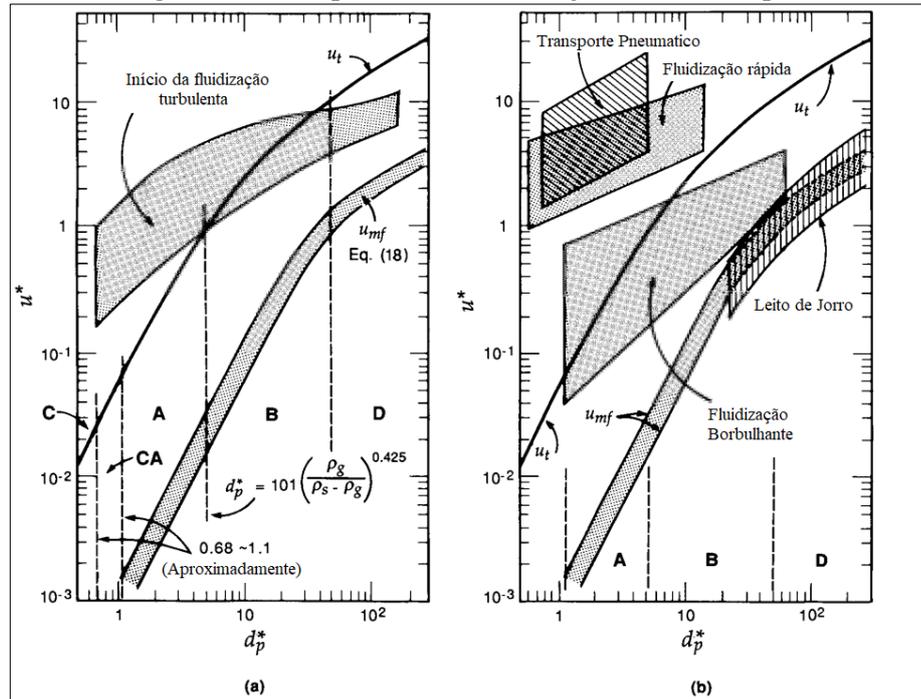
$$Ar = \left(\frac{g d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g)}{\mu_f^2} \right) \quad (3)$$

Re_p é o número de Reynolds da partícula representado pela equação (4);

$$Re_p = \left(\frac{\rho_g u_g d_p}{\mu_f} \right) \quad (4)$$

Diagramas como este se aplicam a velocidade mínima de fluidização, e velocidade terminal para leitos com partículas de um único tamanho. Também mostram que as partículas do grupo A e B de Geldart operam de forma estável, enquanto que para as do grupo D, a faixa de velocidade para o regime borbulhante é estreita.

Figura 6: Diagrama geral do regime de escoamento para toda a faixa de contatogás- sólido, a partir da classificação de Geldart para sólidos.



Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel, (1991).

2.13 QUALIDADE DA FLUIDIZAÇÃO

O estado de fluidização é a faixa de condições de operação capaz de manter a fluidização estável, podem variar muito de acordo com o sistema gás-sólido considerado, e diversos fatores afetam a estabilidade do regime de fluidização. A primeira condição importante é o tamanho médio e a distribuição de tamanho dos sólidos. Em geral, partículas finas tendem a se agrupar e aglomerar, caso estas estejam úmidas ou apresentem facilidade de aglomeração, por isso são também chamadas de partículas coesivas. Para esse tipo de partícula usualmente o leito precisa ser “agitado” para manter as condições de fluidização adequadas. Pode-se reduzir a possibilidade de aglomeração em leitos fluidizados, o que vale dizer, aumentar o efeito de mistura das fases, de diversas formas: utilizando um agitador mecânico ou um sistema de vibração tomando-se o cuidado para não fragmentar as partículas ou operando o leito com

velocidades do gás relativamente altas (bem acima da velocidade mínima de fluidização). Partículas finas de ampla distribuição de tamanho podem ser fluidizadas em uma grande faixa de velocidade de gás, permitindo flexibilizar as condições de operação podendo inclusive trabalhar com leitos profundos e de grandes diâmetros.

Ao contrário, leitos de grande uniformidade de tamanho de sólidos, frequentemente fluidizam mal, com trepidações e formação de jorros e *slugging*, os quais podem causar sérios danos estruturais em leitos grandes. A qualidade da fluidização desses leitos pode muitas vezes ser melhorada pela adição de pequena quantidade de finos para atuarem como “lubrificante”. Além disso, grandes partículas fluidizam em uma estreita faixa de vazão de gás, portanto, leitos rasos devem ser usados.

Um segundo fator é a razão de densidade fluido/sólido. Normalmente, sistemas líquido-sólido fluidizam homoganeamente, ao passo que sistemas gás-sólido apresentam heterogeneidade. No entanto, como mencionado anteriormente, podem se comportar fora do padrão do regime em situações extremas, tais como nos contatos de partículas de baixa densidade em gás denso ou partículas de alta densidade em gases com densidade baixa.

Inúmeros outros fatores podem afetar a qualidade da fluidização, tais como a geometria do leito, sistema de distribuição do gás à entrada do leito, tipo de sólido usado, como, por exemplo; se as partículas apresentam características de permanecerem livremente suspensas no gás ou se são capazes de formarem aglomerados (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

2.14 VELOCIDADE MÍNIMA DE FLUIDIZAÇÃO

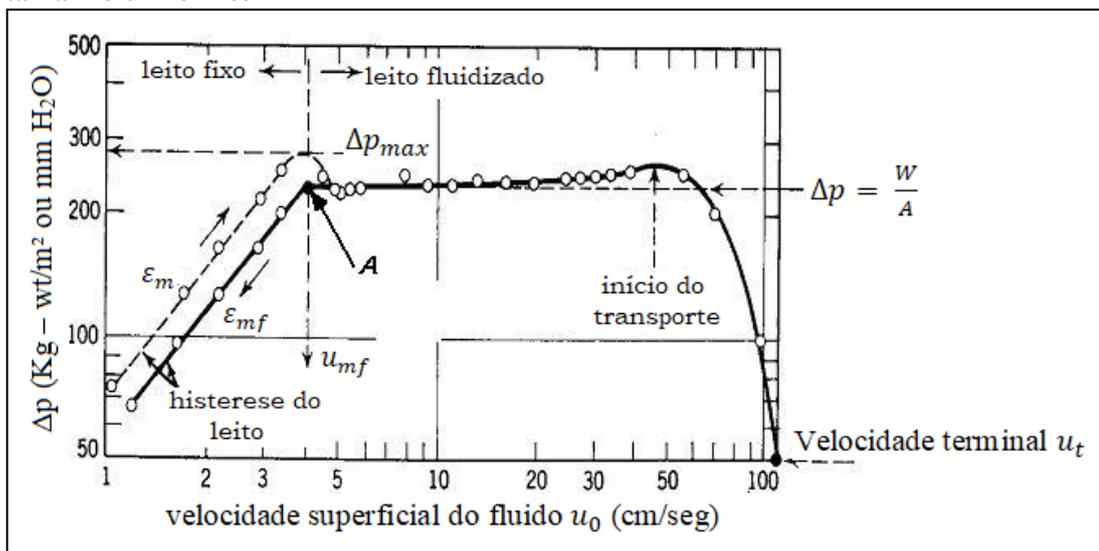
YANG, (2003), menciona que a velocidade mínima de fluidização é um fator que pode ser influenciado diretamente pelas características físicas das partículas e pelos parâmetros geométricos da unidade.

A velocidade mínima de fluidização para partículas de diâmetro médio (150 μm) e granulometria uniforme, Kunii e Levenspiel(1991), explica da seguinte forma, com vazões relativamente baixas em um leito fixo, a queda de pressão é aproximadamente proporcional à velocidade do gás, e geralmente alcança a máxima queda de pressão (ΔP_{max}) ligeiramente superior à pressão estática do leito. Com um aumento da velocidade do gás, o leito fixo se expande, ou seja, a porosidade aumenta de ε_m para ε_{mf} resultando em uma diminuição na queda de pressão para o patamar de pressão constante do leito. Com a velocidade do gás superior a de mínima fluidização, o leito expande-se e bolhas de gás são observadas, resultando em não-

homogeneidade. Apesar deste aumento no fluxo de gás, a queda de pressão permanece praticamente inalterada. Para explicar esta constância na queda de pressão, nota-se que a fase densa gás-sólido é bem aerada e pode deformar-se facilmente, pois não apresenta uma resistência significativa, e apresenta comportamento similar a de um líquido. Ao introduzir um gás no fundo de um recipiente preenchido por um líquido de baixa viscosidade, nota-se que a pressão necessária para a injeção é similar a pressão estática do líquido, e não depende da taxa de escoamento do gás. Pode-se observar a similaridade no comportamento das duas situações, leito fluidizado borbulhante e líquido borbulhante.

Após estabilização do leito fluidizado, ilustrado na Figura 7, e então reduzindo a velocidade do gás, as partículas fluidizadas se acomodam novamente na forma de um leito fixo expandido de porosidade ε_{mf} . Com o escoamento do gás suprimido, suaves batidas ou vibração reduzirá novamente a porosidade do leito para seu valor inicial de ε_m . Geralmente, u_{mf} é considerada a intersecção da linha ΔP versus u_0 do leito fixo de porosidade ε_{mf} (no retorno) com a linha horizontal correspondente à W/A (ponto A, Figura 7).

Figura 7: Comportamento da curva ΔP versus u_0 para um leito com partículas médias de tamanho uniforme.



Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel, (1991).

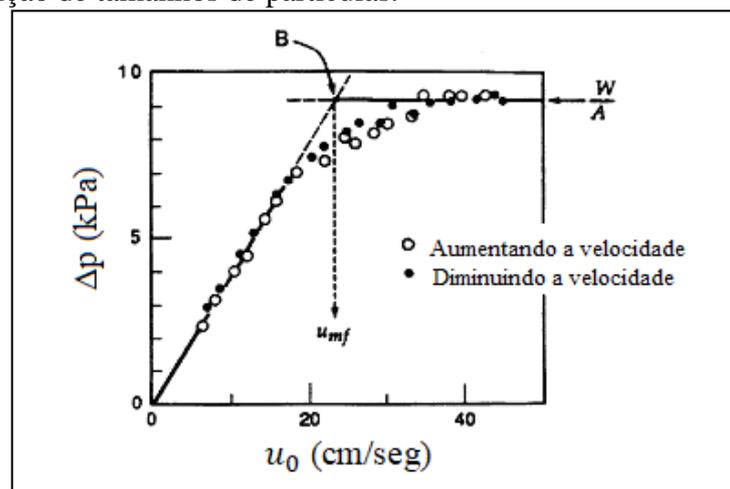
A velocidade mínima de fluidização para partículas com ampla distribuição de tamanho quando a velocidade do gás u_0 é aumentada através destes tipos de leitos, as partículas menores tendem a deslocar para dentro dos espaços vazios entre as partículas maiores e fluidizam enquanto as maiores permanecem em estado estacionário, ocasionando uma fluidização parcial, para um valor intermediário de ΔP .

Com aumento da velocidade do gás, ΔP aproxima-se de W/A , mostrando que todos os sólidos eventualmente se fluidizam. A Figura 8 representa este sistema, e mostra que a histerese não é significativa. Para mistura de partículas consideravelmente grandes $d_p > 1$ mm, a segregação e sedimentação dessas partículas pode ocorrer dando consequentemente um aumento gradual em ΔP e histerese da curva ΔP versus u_0 . Entretanto com uma presença de uma fração suficientemente grande de partículas finas essa histerese desaparece. Para sistemas mistos u_{mf} é definida por convenção como a intersecção da linha de leito fixo ΔP versus u_0 com a linha W/A , (ponto B na Figura 8) (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Segundo Oliveira (2012) quando a observação visual da fluidização não é possível, o diagrama de ΔP versus u_0 é bastante útil como indicação da qualidade da fluidização. A Figura 7, mostrada anteriormente, ilustra uma de fluidização considerada de boa qualidade.

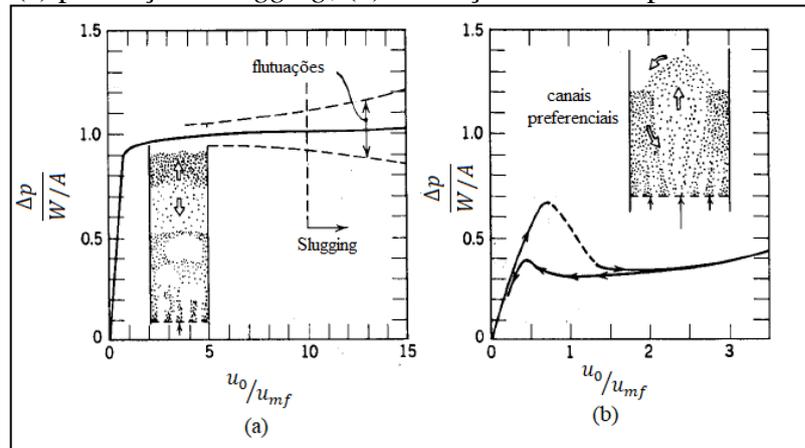
Os diagramas ilustrados na Figura 9 mostram exemplos de resultados experimentais de ΔP versus u_0 de leitos fluidizados considerados “pobres” ou de baixa qualidade. As grandes flutuações de pressão, ilustradas na Figura 10(a), sugerem a ocorrência de *slugging*. A ausência de uma mudança característica da inclinação da curva na condição de mínima fluidização e uma inesperada redução da queda de pressão sugere como mostra a Figura 10(b), um contato incompleto e um leito de partículas parcialmente fluidizado.

Figura 8: Comportamento da curva de ΔP versus u_0 para um leito com ampla distribuição de tamanhos de partículas.



Fonte: Adaptado de Oliveira, (2012).

Figura 9: Diagramas de queda de pressão para leitos fluidizados “pobres”: (a) presença de *slugging*; (b) formação de canais preferenciais.



Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel,(1991).

Kunii; Levenspiel (1991)descreve o estudo da fluidodinâmica de um leito fluidizado é dado pela análise da velocidade de mínima fluidização e da queda de pressão nesta condição. A velocidade teórica de mínima fluidização é obtida quando a força de arrasto exercida pelo fluido sobre as partículas se iguala ao peso de material particulado presente no leito, e pode ser determinada através da Equação (5), Equação de Ergun, tomando a seguinte forma:

$$-\frac{\Delta P_{mf}}{H_{mf}} = 150 \left[\frac{(1-\varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \right] \frac{\mu}{(\varphi d_p)^2} u_{mf} + 1,75 \left(\frac{1-\varepsilon_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3} \right) \frac{\rho_f}{(\varphi d_p)} u_{mf}^2 \quad (5)$$

Sendo:

ΔP_{mf} representa a perda de pressão o leito na condição de mínima fluidização;

H_{mf} representa a altura do leito em mínima fluidização;

u_{mf} é a velocidade mínima de fluidização;

ε_{mf} é a fração de vazios em condição de mínima fluidização;

μ é a viscosidade dinâmica do fluido;

ρ_f é a densidade do fluido;

d_p é o diâmetro médio das partículas;

φ é a esfericidade das partículas.

A perda de pressão na condição de mínima fluidização é obtida pela Equação (6).

$$-\Delta P_{mf} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_f)gH_{mf} \quad (6)$$

Sendo:

g é a aceleração gravitacional.

A fração de vazios na condição de mínima fluidização, ou porosidade de mínima fluidização é dada pela Equação (7), relacionando a queda de pressão na condição de mínima fluidização com o peso aparente do leito.

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{m_p}{H_{mf}(A)(\rho_p - \rho_f)} \quad (7)$$

Sendo:

m_p é a massa de material particulado;

A área da seção transversal do leito;

ρ_p é a massa específica das partículas.

ε_{mf} representa a porosidade mínima de fluidização do leito

Tratando-se de fluidização tipo jorro, a descrição do comportamento fluidodinâmico torna-se mais complexa em relação à fluidização homogênea, em virtude das características de regiões com interação fluido-partícula.

A perda de pressão na condição de jorro mínimo, ΔP_{jm} , pode ser determinada por correlações empíricas, conhecida da máxima queda de pressão no leito, Silva(2019) cita as Equações (8) e (9), respectivamente que foram definidas por Becker e também Malek e Lu.

$$-\Delta P_{max} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_f)gH_{jm} \quad (8)$$

sendo:

H_{jm} é a altura do leito na condição de mínima fluidização. A perda de pressão de jorro mínimo é definida como dois terços da perda de pressão no pico da curva:

$$-\Delta P_{jm} = \frac{2}{3}(-\Delta P_{max}) \quad (9)$$

Cremsco (2018), ressalta que os fenômenos de interação fluido-partículas, o formato do leito, assim como outras características do leito, são variáveis bastante complexas, fazendo com que as correlações utilizadas apresentem um erro na previsão de suas estimativas, na qual a Equação (5), por exemplo, apresenta um erro de aproximadamente 20%. No entanto,

evidencia-se na literatura, diversos trabalhos propondo novas correlações para diferentes configurações de leito, material particulado e tipos de fluido, cabendo ao pesquisador avaliar e empregar a correlação que mais se aproxima das suas condições experimentais.

2.15 VELOCIDADE TERMINAL DAS PARTÍCULAS

Quando uma partícula esférica de tamanho d_p desloca-se através de um fluido parado em meio infinito, sua velocidade terminal de queda livre pode ser estimada a partir da mecânica dos fluidos pela expressão da Equação (10):

$$u_t = \left[\frac{4d_p(\rho_s - \rho_g)g}{3\rho_g C_D} \right]^{1/2} \quad (10)$$

Sendo C_D é um coeficiente de arrasto determinado experimentalmente. Em geral, Kunii; Levenspiel(1991) disponibilizam o ajuste conforme Equação (11):

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \left[1 + (8.1716e^{-4.0655\phi_s}) Re_p^{0.0964+0.5565\phi_s} \right] + \frac{73.69(e^{-5.0748\phi_s}) Re_p}{Re_p + 5.378e^{6.2122\phi_s}} \quad (11)$$

Para partículas esféricas, essa expressão se reduz a Equação (12):

$$C_D = \frac{24}{Re_p} + 3.3643 Re_p^{0.3471} + \frac{0.4607 Re_p}{Re_p + 2682.5} \quad (12)$$

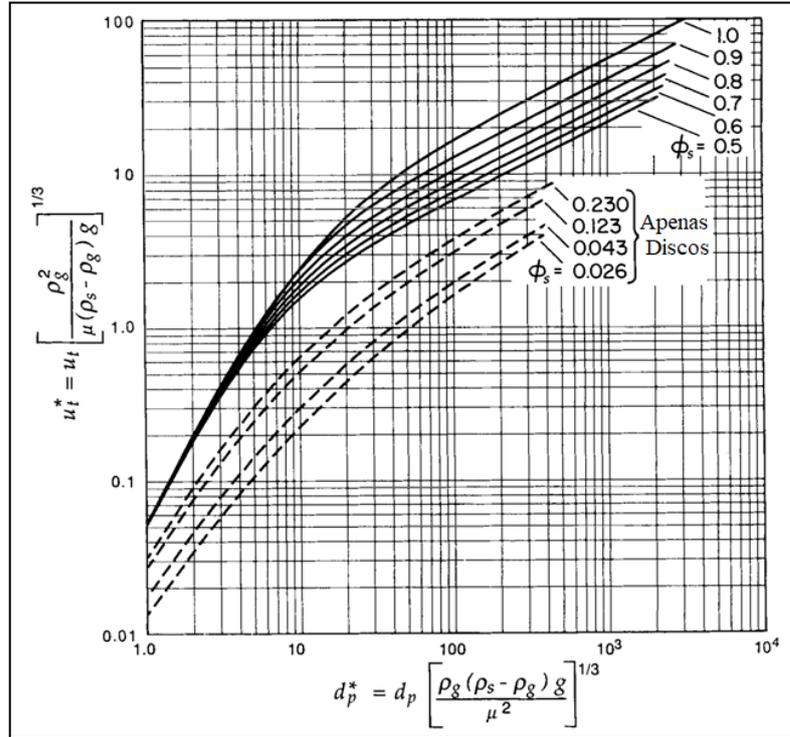
A Figura 10 é uma representação gráfica dessas equações, que permite uma avaliação direta de u_t , conhecido d_p e as propriedades físicas do sistema. Este gráfico apresenta um tamanho de partícula adimensional d^* Equação (13) e uma velocidade adimensional do gás, u^* Equação (14). Esses parâmetros são definidos da seguinte maneira:

$$d_p^* = d_p \left[\frac{\rho_g(\rho_s - \rho_g)g}{\mu^2} \right] = Ar^{1/3} = \left(\frac{3}{4} C_D Re_p^2 \right)^{1/3} \quad (13)$$

e também:

$$u^* = u \left[\frac{\rho_g^2}{\mu(\rho_s - \rho_g)g} \right]^{1/3} = \frac{Re_p}{Ar^{1/3}} = \left(\frac{4}{3} \frac{Re_p}{C_D} \right)^{1/3} \quad (14)$$

Figura 10: Gráfico para determinar a velocidade terminal de partículas que escoam através de fluidos.



Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel (1991).

Haider; Levenspiel(1989) usando a forma da equação sugerida por Turton; Clark, (1987), apresentam a seguinte aproximação útil para a avaliação da velocidade terminal das partículas, veja Equação (15):

$$u_t^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{2.335 - 1.744\phi_s}{(d_p^*)^{0.5}} \right]^{-1}, \quad 0.5 < \phi_s < 1 \quad (15)$$

2.16 CARACTERIZAÇÃO DE PARTÍCULAS

O conhecimento das características de uma partícula ou de uma população de partículas é de suma importância em sistemas particulados, uma vez que tais sistemas são regidos pela interação partícula/partícula (morfologicamente e fisicamente semelhantes ou distintas), partícula/fluido (gás ou líquido) e a interação entre tais fases e o estudo fenomenológico de tais interações caracterizam a ciência de sistemas particulados e as aplicações decorrentes destes estudos dizem respeito à tecnologia de sistemas particulados (CREMASCO, 2018).

A caracterização das partículas será realizada no capítulo seguinte: Materiais e Métodos.

2.17 CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL

As partículas sólidas individuais são caracterizadas por seu tamanho, forma e densidade. Partículas de sólidos homogêneos têm a mesma densidade que o material a granel. Partículas obtidas pela quebra de um sólido compósito, como um minério contendo metais, têm várias densidades, geralmente diferentes da densidade do material a granel. Tamanho e forma são facilmente especificados para partículas regulares, como esferas e cubos, mas para partículas irregulares, os termos tamanho e forma não são tão claros e devem ser definidos.

2.18 ESFERICIDADE

A forma de uma partícula individual é convenientemente expressa em termos da esfericidade ϕ_s , que é independente do tamanho da partícula. Para uma partícula esférica de diâmetro D_p , a esfericidade é $\phi_s = 1$; para uma partícula não esférica, a esfericidade é definida pela relação da Equação (16):

$$\phi_s \equiv \frac{6V_p}{D_p S_p} \quad (16)$$

Onde:

D_p é o diâmetro equivalente ou diâmetro nominal da partícula;

S_p é a área de superfície de uma partícula;

V_p é o volume de uma partícula.

O diâmetro equivalente é algumas vezes definido como o diâmetro de uma esfera devolume igual ao da partícula. Para materiais granulares finos, no entanto, é difícil determinar o volume exato e área de superfície de uma partícula, e D_p é geralmente considerado o tamanho nominal com base em análises granulométricas ou exame microscópico. A superfície da partícula pode ser obtida em medidas de adsorção ou na perda de pressão no leito de partículas e a Equação (16) usada para calcular ϕ_s . (McCABE et al., 1993).

O tamanho das partículas esféricas pode ser medido facilmente, porém o mesmo não ocorre com partículas não esféricas. Contudo pode-se definir o tamanho em várias formas, Kunii; Levenspiel(1991) adotam um tamanho d_{ef} . O tamanho das partículas maiores (> 1 mm) pode ser obtido por micrómetro se as partículas tiverem uma forma regular ou se determinar a

massa de um certo número de partículas, se a sua densidade é conhecida, ou por deslocamento de fluido se as partículas são não porosas. O diâmetro característico é definido da seguinte forma pela Equação (17):

$$d_{ef} = \phi_s d_{sph} \quad (17)$$

sendo:

d_{sph} é dado pelo diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula;

ϕ_s é a razão entre a superfície da esfera de mesmo volume que a partícula pela superfície da partícula. Ou seja Esfericidade

A superfície específica de uma partícula em qualquer leito é obtida pela Equação (18a)

$$a' = \left(\frac{\text{superfície específica da partícula}}{\text{volume da partícula}} \right) = \frac{\pi d_{sph}^2 / \phi_s}{\pi d_{sph}^3 / 6} = \frac{6}{\phi_s d_{sph}}, \quad [m^{-1}] \quad (18a)$$

e para todo o leito pela Equação (18b):

$$a = \left(\frac{\text{superfície de todas as partículas}}{\text{volume total das partículas no leito}} \right) = \frac{6(1-\varepsilon_m)}{\phi_s d_{sph}}, \quad [m^{-1}] \quad (18b)$$

sendo ϕ é medido diretamente, estimado da Tabela 1, ou avaliado pelo Equação (16).

Com esta definição $\phi = 1$ para esferas e $0 < \phi < 1$ para todas as outras formas de partículas. A Tabela 1 lista exemplos de esfericidades calculadas para diferentes sólidos.

Tabela 1: Esfericidade de partículas.

Tipo de partícula	Esfericidade ϕ_s
Esfera	1.00
Cubo	0.81
Cilindro h = d	0.87

h = 5d	0.70
h = 10d	0.58
Discos	
h = d/3	0.76
h = d/6	0.60
h = d/10	0.47
Carvão ativado e sílica gel	0.70-0.90
Sólidos partidos	0.63
Carvão	
Antracito	0.63
Bituminoso	0.63
Poeira Natural	0.65
Pulverizado	0.73
Cortiça	0.69
Vidro triturado	0.65
Magnetita, catalizador Fischer-Tropsch	0.58
Flocos de mica	0.28
Areia	
Aredondada	0.86
Afiada	0.66
“oldbeach”	0.86
“Young river”	0.53
Tungstênio em Pó	0.89
Trigo	0.85

Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel, (1991).

2.19 DIÂMETRO DE PENEIRAS

Para tamanhos intermediários de partículas, a análise granulométrica é a maneira mais conveniente para medir o tamanho das partículas. São disponíveis várias peneiras padronizadas e a Tabela 2 mostra o tamanho das aberturas para a série padrão Tyler. Partículas passando através de uma tela de malha 150, mas retidas em uma tela de malha 200 são representadas por 150 + 200, e então calculado conforme Equação (19):

$$d_{\#} = \frac{104 + 74}{2} = 89\mu m \quad (19)$$

Tabela 2: Padrão de telas Tyler

<i>Mesh</i> ¹	Abertura ²		<i>Mesh</i>	Abertura	
	(in)	(μ m)		(in)	(μ m)
3	0.263	6680	35	0.0165	417
4	0.185	4699	48	0.0116	295
6	0.131	3327	65	0.0082	208

8	0.093	2362	100	0.0058	147
10	0.065	1651	150	0.0041	104
14	0.046	1168	200	0.0029	74
20	0.0328	833	270	0.0021	53
28	0.0232	589	400	0.0015	38

¹ Número de aberturas por polegada ²Aberturas entre fios adjacentes

Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel, (1991).

Como não existe uma relação geral entre de d_{ef} e $d_{\#}$, o melhor pode-se dizer sem fazer experimentos é o seguinte:

Para partículas irregulares sem dimensão aparentemente mais longa ou mais curta (portanto, de forma isotrópica) representada conforme Equação (20a).

$$d_{ef} = \phi_s d_{sph} \cong \phi_s d_{\#} \quad (20a)$$

Para partículas irregulares com uma dimensão um pouco mais longa, mas com uma razão de comprimento não superior a 2: 1 (ovos, por exemplo), são representadas pela Equação (20b).

$$d_{ef} = \phi_s d_{sph} \cong d_{\#} \quad (20b)$$

Para partículas irregulares com dimensões um pouco menor, mas com uma relação comprimento não inferior a 1: 2, são representadas pela Equação (20c).

$$d_{ef} = \phi_s d_{sph} \cong \phi_s^2 d_{\#} \quad (20c)$$

Para partículas muito planas ou semelhantes a agulhas, estima-se a relação entre d_p e d_{ef} dos valores ϕ_s para os discos e cilindros correspondentes.

Para Kunii; Levenspiel, (1991) a maioria das operações de leito fluidizado trata partículas cujos tamanhos são medidos com análises granulométricas, que não classificam as partículas, não gerando dados quanto suas formas físicas. Portanto, considera-se o tamanho das partículas dado pela Equação (20a). Quando as partículas são semelhantes a agulhas, planas ou escamas, pode-se querer usar a Equação (20b) ou (20c) para relacionar $d_{\#}$ a d_{sph} .

No entanto, essa abordagem não é realmente funcional. Recomenda-se o procedimento experimental descrito na Equação (16). Isso fornecerá uma esfericidade eficaz que pode então ser usado com segurança com a Equação (20a).

2.20 MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Segundo Massarani (2001) qualquer distribuição granulométrica pode ser descrita por modelos matemáticos na formade $X=X(D)$.

Dois modelos clássicos que estabelecem essa função são: Os modelos de Gates – Gaudin – Schumann (GGS) e o de Rosin – Rammler – Bennet (RRB).

Almeida et al (2020), descreve os modelos da seguinte forma:

Modelo matemático Gates-Gaudin-Schuhmann (GGS), Equação (21).

$$X_f = \left(\frac{a_n}{k_{GGS}} \right)^{I_{GGS}} \quad (21)$$

sendo:

X_f : fração mássica do material mais fino que a abertura da peneira

a_n : diâmetro de abertura da peneira

K_{GGS} : parâmetro que representa o tamanho médio das partículas

I_{GGS} : parâmetro que representa a dispersão, também chamado de derivada de Schuhmann;

Linearização do modelo de Gates-Gaudin-Shuhmann (GGS) Veja Equação (22).

$$\ln X_f = I_{GGS} \ln \left(\frac{a_n}{K_{GGS}} \right) = I_{GGS} \ln a_n - I_{GGS} \ln K_{GGS} \quad (22)$$

Modelo matemático Rosin-Rammler-Bennet (RRB) Veja Equação (23).

$$X_f = 1 - \exp[-(a_n/K_{RRB})^{I_{RRB}}] \quad (23)$$

sendo:

K_{RRB} : parâmetro que representa o tamanho médio das partículas

I_{RRB} : parâmetro que representa a dispersão

Linearização do modelo de Rosin-Rammler-Bennet (RRB). Equação (24).

$$X_f = 1 - \exp \left[- \left(\frac{a_n}{K_{RRB}} \right)^{I_{RRB}} \right]$$

$$1 - X_f = \exp \left[- \left(\frac{a_n}{K_{RRB}} \right)^{I_{RRB}} \right]$$

$$\ln(1 - X_f) = - \left(\frac{a_n}{K_{RRB}} \right)^{I_{RRB}}$$

$$\ln(-\ln(1 - X_f)) = I_{RRB} \ln \left(\frac{a_n}{K_{RRB}} \right) = I_{RRB} \ln a_n - I_{RRB} \ln K_{RRB} \quad (24)$$

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATERIAL

O material trabalhado consiste em um defensivo agrícola do tipo WG (Grânulo Dispersível) produzido por extrusão, possui formato similar a um cilindro e aspecto poroso, como pode ser visto na Figura 11.

Figura 11: Defensivo agrícola do Tipo WG.



Fonte: Autor, (2020).

3.2 O EQUIPAMENTO

A Figura 12 demonstra o aparato experimental que é composto pelo leito fluidizado, unidade de controle e leitura de dados, câmera de aquecimento do ar, e compressor centrífugo. O conjunto fica alocado em uma capela equipada com lavador de gases, (em virtude de particulados finos ($< 100\mu\text{m}$) não serem retidos pelo filtro na extremidade do equipamento) no laboratório de PD&I (Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação) da Empresa Ourofino Química S.A.

O secador de leito fluidizado, de formato cilíndrico é constituído em acrílico para melhor observação do conteúdo processado, possui 19,3 cm de diâmetro Interno, 32,0 cm de altura. Possui três pontos de monitoramento de temperatura, sendo, um na entrada do ar, o segundo a altura de 3,0 cm em contato com material, este por sua vez utilizado como ponto de coleta de amostras, e o terceiro ponto a 39,5 cm de altura na saída do ar.

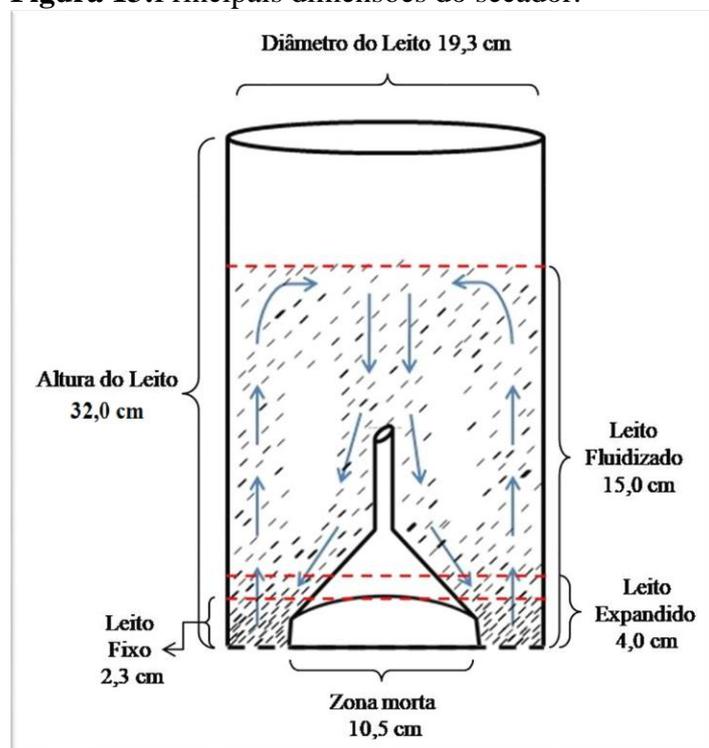
Figura 12: Equipamento utilizado no experimento.



Fonte: Autor, (2020).

O fundo do leito para que se possa ter uma distribuição uniforme do ar em escoamento, é constituído por uma malha (*mesh*)100 que possui abertura de 150 μm , as dimensões do equipamento são apresentadas na Figura 13.

Figura 13: Principais dimensões do secador.



Fonte: Autor, (2020).

O ar alimenta o leito fluidizado por sua base, sendo transportado por uma tubulação de diâmetro 12 cm, menor que o diâmetro do leito, o que concentra o ar em escoamento no centro do equipamento ocasionando na periferia do leito uma região sem escoamento de ar.

A fim de distribuir melhor o ar no equipamento, uma barreira foi adicionada abaixo da malha que constitui o fundo do mesmo, observe Figura 14, entretanto, o problema não foi mitigado, pois gerou na região central do equipamento uma zona de menor fluxo de ar, que acarreta no acúmulo de particulados não fluidizados, devido ao baixo fluxo. Para mitigar o problema, um funil com as extremidades vedadas e de mesmas dimensões da barreira foi adicionado no interior do leito ocupando a região de menor fluxo, assim durante a fluidização as partículas se deslocam para a região central (de menor escoamento de ar) no sentido descendente, se chocam com o funil e são reorientadas para as extremidades do equipamento, sendo esta a região de ar em escoamento. Devido à necessidade de tais ajustes o funcionamento do leito é similar ao de um leito de jorro, porém com o escoamento na fonte com direção invertida.

Figura 14: Esquema para eliminação da zona de menor escoamento de ar no equipamento.



Fonte: Autor, (2020).

3.4 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS

A fim de realizar uma análise granulométrica das partículas uma população de 50 partículas foi separada aleatoriamente durante o experimento e foram mensuradas suas dimensões de comprimento e diâmetro com auxílio de um paquímetro digital da marca *Mitutoyo* que é submetido a calibração anualmente, o mesmo pode ser visto na Figura 15.

Figura 15: Paquímetro digital utilizado na mensuração das partículas



Fonte: Autor, (2020).

3.5 DENSIDADE APARENTE DAS PARTÍCULAS

Para determinar a densidade aparente das partículas utilizou-se uma proveta que teve seu volume preenchido quantitativamente com as partículas até a marca volumétrica determinada de 10 mL cuja massa foi de 6,38 g. Isto possibilitou determinar a densidade aparente das partículas é de 0,638 g/cm³.

3.6 EXPERIMENTO

3.6.1 Formulação e preparo do Material

O material trabalhado foi preparado conforme composição registrada do produto, após desenvolvimento do mesmo no laboratório de pesquisa e desenvolvimento da Ourofino Agrociência S.A. O mesmo é constituído de matérias primas sólidas que possuem características físicas e químicas distintas entre si, que após adicionadas em suas devidas

proporções o material final apresenta assim aspecto de mistura não homogênea mostrado na Figura 16.

Figura 16: Imagem do produto não micronizado.



Fonte: Autor, (2020).

Após formulação, o material então é submetido a etapa de micronização que ocorre em um moinho a jato de ar em espiral, modelo MS200P fabricado pela empresa Micro Service visto na Figura 17, que durante o processo de micronização reduz uniformemente todos os materiais constituintes da formulação, devido seu mecanismo de funcionamento equipamento promove simultaneamente ao processo de moagem uma homogeneização altamente eficaz do material.

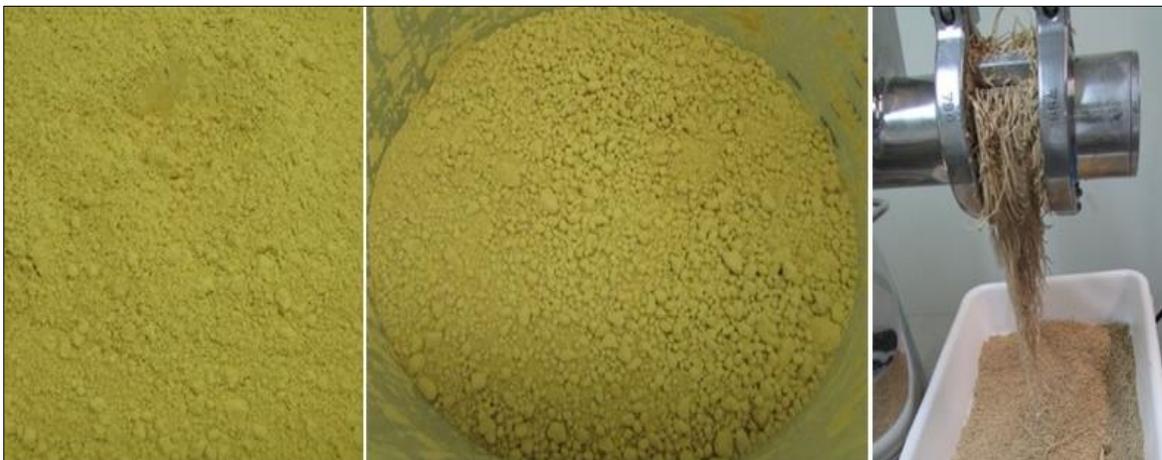
O material após a etapa de micronização recebe então uma quantidade já pré determinada de água a fim de umidecer o material formando um aspecto de “pasta” ou que o material adquira aspecto aglomerativo suficiente para que possa ser submetido ao processo de extrusão, no qual o material será comprimido contra uma malha com objetivo de formar granulos que sejam capazes de manter sua forma. Algumas etapas desse processo podem ser vistas na figura 18.

Figura 17: Moinho a jato de ar em espiral



Fonte: Autor, (2020).

Figura 18: Aspecto do produto, após micronização, após umectação e durante etapa de extrusão respectivamente.



Fonte: Autor, (2020)

3.6.2 Secagem do material

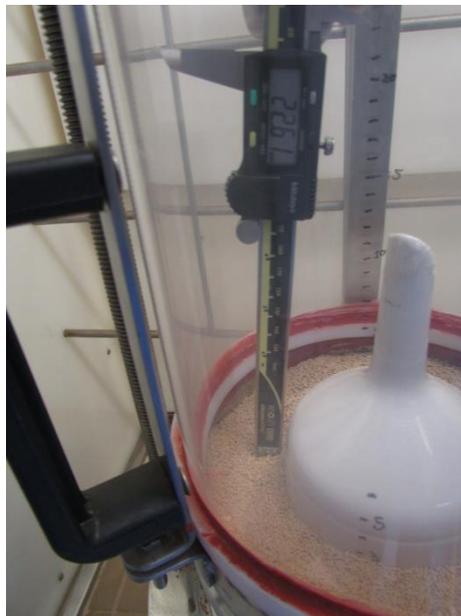
Após a etapa de extrusão o material então passa por uma etapa manual de quebra dos grânulos para obter-se um produto mais homogêneo granulometricamente. Uma amostra representativa de todo material foi retirada para determinação da umidade inicial do material, e então o mesmo foi fracionado em 6 partes de 450 gramas e foram submetidas ao secador nas

mesmas condições de operação, as quais são utilizadas no dia a dia de operação do equipamento conforme indicação do fabricante, assim tendo como única variável a temperatura de secagem. As frações do material foram submetidas às temperaturas de 45°C, 50°C, 55°C, 60°C, 65°C e 70°C. Durante a secagem amostras foram retiradas a cada 2 minutos para acompanhamento da umidade das mesmas.

3.6.3 Determinação do Leito Fixo e Leito Expandido

Para determinar a altura do leito fixo, o material foi distribuído uniformemente no equipamento, e com auxílio do paquímetro mostrado anteriormente na Figura 15, a altura do leito foi medida em triplicata em 4 pontos distintos do leito como pode ser visto na Figura 19 a seguir. Para a determinação do leito expandido a admissão de ar no equipamento foi iniciada, e determinou-se que a menor vazão de ar que possibilitou a expansão do leito, após o leito estar na eminência de fluidização, a altura foi determinada com auxílio de marcações milimetradas feitas nas laterais do equipamento.

Figura 19: Quantificação da altura do leito fixo.



Fonte: Autor, (2020).

3.6.4 Determinação da velocidade do ar

Para determinação da velocidade do ar de operação foi utilizado um Termoanemômetro digital da marca MINIPA modelo MDA-11 Figura 20.

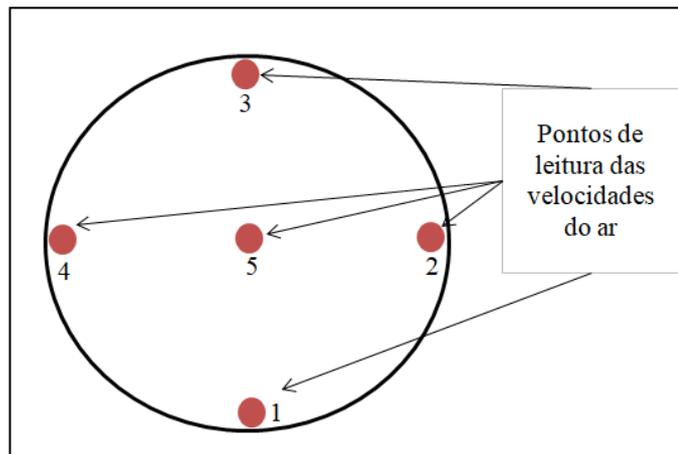
Figura 20: Anemômetro digital.



Fonte: Autor, (2020).

As leituras de velocidade do ar foram realizadas em triplicata nas 5 regiões demonstradas na Figura 21 a seguir.

Figura 21: Representação de vista superior do secador e pontos de leituras das velocidades do ar.



Fonte: Autor, (2020).

3.6.5 Determinação da umidade das amostras

Para determinação do teor de umidade das amostras, o material foi analisado por titulação pelo método de Karl Fischer no equipamento (Methrom 870 KF Titrino Plus), ver a

Figura 22. Foram utilizadas amostras de aproximadamente 0,2 gramas para cada determinação. As medidas foram realizadas em triplicata e os resultados expressos em média.

Figura 22: Titulador Karl Fisher



Fonte: Autor, (2020).

3.7 AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DO MATERIAL

Durante o desenvolvimento de formulações de defensivos, é essencial que o produto mantenha suas características físicas e químicas durante todo o seu prazo de validade similares, as iniciais de quando o produto foi desenvolvido, para isso o material é armazenado em diversas condições e análises são realizadas ao decorrer do tempo a fim de avaliar o comportamento do produto durante o seu prazo de validade. É denominado testes de estabilidade acelerada quando o produto é armazenado em altas temperaturas para que o produto fique sob situação de maior *stress* do que quando armazenado em temperatura ambiente, estas condições de armazenagem usadas nos testes são as descritas a seguir:

54°C por 14 dias;

40°C por um mês;

40°C por dois meses;

40°C por três meses;

Temperatura ambiente durante o prazo pretendido de validade do produto;

Para que o produto seja considerado uma formulação estável o mesmo precisa ser aprovado nas análises pertinentes a cada tipo de formulação quando submetidas às temperaturas descritas acima.

3.7.1 Dispersibilidade

Para formulações de Grânulos dispersíveis (WG), uma avaliação de suma importância é a dispersibilidade, este teste consiste adicionar uma determinada massa do produto em uma proveta com água, e então a mesma é invertida 180° e retorna a sua posição inicial, considerando este ciclo como uma unidade, e então esta operação é repetida até total dispersão dos grânulos adicionados na proveta. Para este teste quanto menor a quantidade de inversões melhor. Parâmetros internos para este teste, um bom produto deve iniciar a estabilidade com menos de 20 inversões, e nas análises de 14 dias a 54°C e três meses a 40°C não ultrapassem 30 inversões.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE UMIDADE

Para realização do experimento o material formulado foi fracionado e identificado da seguinte forma:

- Amostra 1: Material submetido a secagem a 45°C.
- Amostra 2: Material submetido a secagem a 50°C.
- Amostra 3: Material submetido a secagem a 55°C.
- Amostra 4: Material submetido a secagem a 60°C.
- Amostra 5: Material submetido a secagem a 65°C.
- Amostra 6: Material submetido a secagem a 70°C.

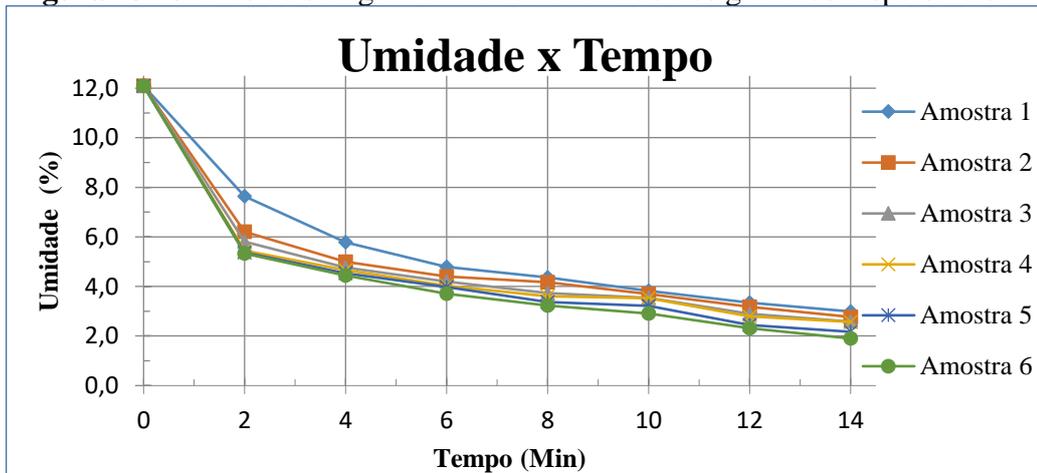
Inicialmente antes das etapas de secagem o foi determinada a umidade inicial do material que foi de 12,09% (base úmida), determinada via Karl Fisher. Após análise inicial as amostras foram submetidas à secagem em leito fluidizado e os resultados obtidos são mostrados na Tabela 3 referente aos valores de umidade das amostras.

Tabela 3: Resultados de umidade (base úmida) das amostras.

Tempo de secagem (min)	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6
2	7,63	6,2	5,81	5,45	5,37	5,33
4	5,78	4,99	4,76	4,66	4,53	4,44
6	4,79	4,4	4,19	4,03	3,98	3,71
8	4,36	4,17	3,73	3,61	3,37	3,23
10	3,82	3,69	3,54	3,53	3,22	2,91
12	3,34	3,18	2,89	2,79	2,44	2,32
14	2,99	2,77	2,58	2,57	2,17	1,9

Fonte: Autor, (2020).

Relacionando os valores de umidade x tempo das amostras obtém-se o gráfico da Figura 23 que mostra as curvas de secagem em leito fluidizado. Em cada batelada foram alimentados no leito 0,45 kg de granulado com umidade inicial de 12,09% (base úmida). Os grânulos que devem ter a umidade reduzida para valores entre 1 e 3% por razões do processo industrial. Para os grânulos temperaturas de até 70°C não apresentam restrições no sistema de secagem.

Figura 23: Curvas de secagem em leito fluidizado dos grânulos dispersíveis.

Fonte: Autor, (2020).

Para obter a umidade menor que 3% (base úmida) a temperatura do ar de secagem em 70°C possibilita a obtenção desta umidade em um menor tempo 10 minutos. Porém ainda será necessário uma avaliação de estabilidade do material.

4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Tabela 4: Resultado da análise granulométrica das partículas

Nº da Partícula	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Comprimento (mm)	2,87	3,49	2,39	2,14	2,83	2,67	1,88	2,49	2,88	3,08
Diâmetro (mm)	0,97	0,99	0,97	0,97	0,98	1,00	0,98	0,96	0,99	0,96
Nº da Partícula	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Comprimento (mm)	2,85	1,86	1,88	3,73	2,89	3,65	3,02	3,30	2,19	3,26
Diâmetro (mm)	0,98	0,99	1,00	0,96	0,97	1,00	0,97	0,98	1,02	0,95
Nº da Partícula	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Comprimento (mm)	2,74	3,72	2,28	2,90	4,62	3,96	3,49	4,22	2,50	3,05
Diâmetro (mm)	0,94	1,00	0,94	0,96	1,00	0,94	0,94	0,98	1,01	0,96
Nº da Partícula	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Comprimento (mm)	1,66	3,26	2,18	3,44	3,54	2,34	3,06	3,87	2,63	3,27
Diâmetro (mm)	0,98	0,99	1,01	0,95	0,97	0,97	0,94	0,96	0,98	0,99
Nº da Partícula	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Comprimento (mm)	3,03	3,83	2,40	5,58	3,97	4,39	2,73	2,07	2,89	2,17
Diâmetro (mm)	1,00	0,99	1,00	1,00	0,97	0,98	0,99	0,98	0,98	0,97

Fonte: Autor, 2020.

Os resultados encontrados da análise granulométrica realizada no experimento são representados na Tabela 4, como o formato das partículas é similar a um cilindro, foi

quantificado o comprimento e diâmetro médio da população total das partículas analisadas, sendo encontrado um comprimento de 3,02 mm e diâmetro de 0,98 mm.

Simulando que a população de partículas fosse submetida a uma série de peneiras Tyler, e que a retenção das mesmas seja apenas pelo comprimento, obtém-se a seguinte distribuição, que auxilia na determinação de parâmetros como, o melhor modelo estatístico de distribuição que relaciona a quantidade de material com o tamanho das partículas, neste caso os modelos escolhidos para avaliação da distribuição foram GGS (Gates-Gaudin-Shaumann) e RRB (Rosin-Rammler-Bennet) por se tratarem de modelos amplamente conhecidos e que se adequam a maioria dos casos de distribuição granulométrica.

Tabela 5:Distribuição de partículas em sistema de malhas Tyler.

Malhas Tylers	Abertura (mm)	Diâmetro médio (mm)	Número Partículas Retidas	Fração retida	Fração Passante (X_f)	$\frac{X_n}{a_n}$	GGS		RRB	
							$\ln(a_n)$	$\ln(X_f)$	$\ln(a_n)$	$\ln(-\ln(1-X_f))$
3,5	5,66	-	0	0,000	1,000	0,000				
4,0	4,76	4,380	1	0,020	0,980	0,005	1,477	-0,020	1,477	1,364
5,0	4,00	3,680	3	0,060	0,920	0,016	1,303	-0,083	1,303	0,927
6,0	3,36	3,095	11	0,220	0,700	0,071	1,130	-0,357	1,130	0,186
7,0	2,83	2,605	15	0,300	0,400	0,115	0,957	-0,916	0,957	-0,672
8,0	2,38	2,190	9	0,180	0,220	0,082	0,784	-1,514	0,784	-1,392
10,0	2,00	1,840	7	0,140	0,080	0,076	0,610	-2,526	0,610	-2,484
12,0	1,68	1,545	3	0,060	0,020	0,039	0,435	-3,912	0,435	-3,902
14,0	1,41	1,300	1	0,020	0,000	0,015	0,262		0,262	

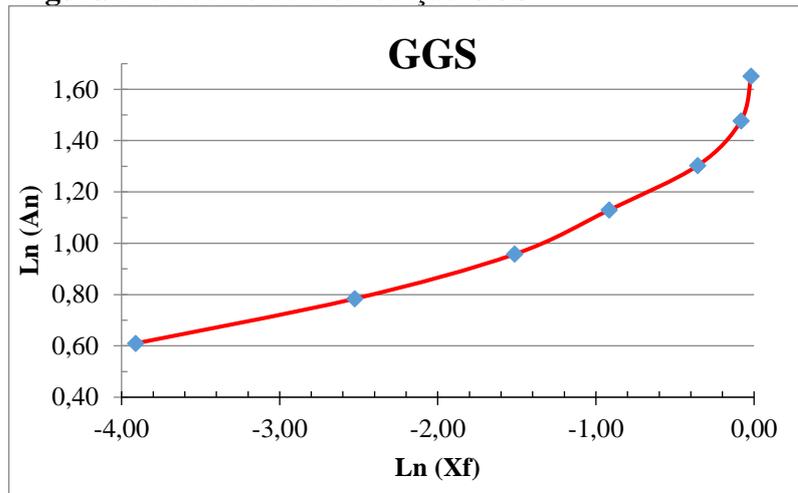
Fonte:Autor, 2020.

Após a análise da distribuição granulométrica das partículas, os dados obtidos foram avaliados a seguir.

Para o modelo GGS plotou-se um gráfico $\ln(a_n)$ versus $\ln(X_f)$, o qual aplicou-se uma regressão linear nos dados obtidos e determinou-se a equação da reta que mostra os coeficientes linear e angular, o gráfico está expressos na Figura 24.

Ao analisar o gráfico GGS tem-se o valor de coeficiente angular de 0,245 e o coeficiente linear de 1,457, e um valor de R^2 de 0,895. A equação encontrada para modelo GGS é descrita conforme Equação 25.

$$y = 0,245x + 1,284 \quad (25)$$

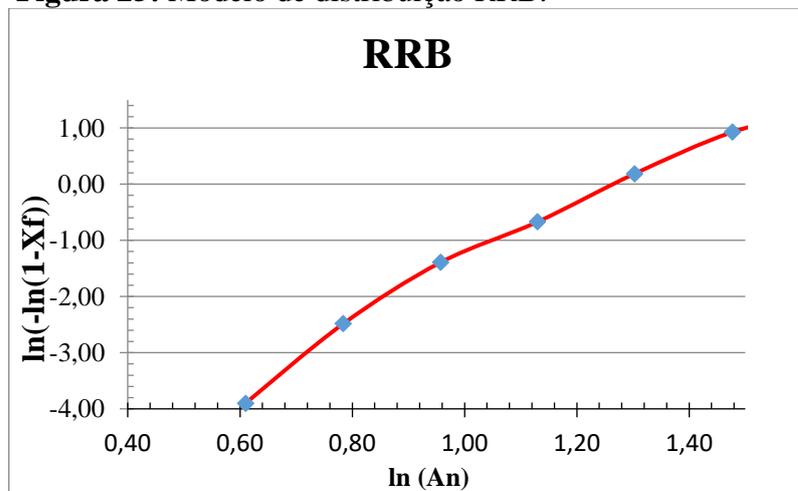
Figura 24:Modelo de distribuição GGS.

Fonte: Autor, 2020.

Para o modelo RRB plotou-se um gráfico expresso por $\ln(a_n)$ versus $\ln(-\ln(1-X_f))$, assim como no modelo GGS aplicou-se a regressão linear nos dados obtidos e determinou-se a equação da reta que mostra os coeficientes angular e linear. O gráfico para o modelo está representado na Figura 25.

A partir da análise gráfica tem-se o valor de coeficiente angular de 4,985 e o coeficiente linear de -6,487, e um valor de R^2 de 0,975. A equação encontrada para o modelo RRB é descrita conforme Equação 26 a seguir.

$$y = 4,985x - 6,487 \quad (26)$$

Figura 25: Modelo de distribuição RRB.

Fonte: Autor, 2020.

Avaliando os modelos matemáticos GGS e RRB empregados nos dados obtidos conclui-se que o modelo RRB apresentou melhor ajuste aos dados pois após fazer a linearização apresentou coeficiente de determinação significativamente maior, RRB apresentou $R^2 = 0,975$ enquanto GGS apresentou $R^2 = 0,895$.

4.3 DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO DE SAUTER

O diâmetro Médio de Sauter, diâmetro médio da partícula tal que: se todas as partículas tivessem esse diâmetro médio, a área da superfície total seria a mesma que a da mistura (RICHARDSON, et al, 2006). Calculado conforme a Equação 27:

$$\bar{D}_P = \frac{1}{\sum \frac{X_n}{a_n}} \quad (27)$$

Sendo: X_n a fração de massa retida na malha

a_n a média entre a abertura das duas peneiras, passante e retida.

$$\bar{D}_P = \frac{1}{0,3528} = 2,83 \text{ mm}$$

4.4 REGIME DE OPERAÇÃO DO LEITO FLUIDIZADO

Analisando a distribuição granulométrica pode-se observar que maior parte das partículas ficaram retidas na peneira nº 70 que indica diâmetro médio para essas partículas de 3,095 mm não gerando grande discrepância em relação ao diâmetro de Sauter que é de 2,83 mm.

O comprimento e diâmetro médio dos grânulos são de 3,02mm e 0,98mm, respectivamente, obtidos pela média de leitura de 50 partículas. Os dados do experimento foram usados para quantificar a densidade absoluta das partículas obtendo-se 1,33 g/cm³.

O diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula, foi calculado considerando que, as partículas possuem forma cilíndrica, com comprimento médio de 3,08 vezes o diâmetro, aplicando as equações 28 e 29.

$$V_{cilindro} = \left(\frac{\pi d^2}{4}\right) 3,08d = \frac{\pi d_s^3}{6} \quad (28)$$

Relacionando o volume do cilindro no cálculo do diâmetro da esfera tem-se:

$$d_s = \left[\left(\frac{6 \times 3,08}{4}\right) d^3\right]^{1/3} \rightarrow d_s = 4,62^{1/3} d = 1,73 d \quad (29)$$

Sendo o diâmetro 0,98 mm tem-se:

$$d_s = 1,73 \times 0,98 = 1,70 \text{ mm}$$

Ao obter o diâmetro da esfera de mesmo volume pode-se relacionar a Equação (16) ver Capítulo 2.

$$\phi_s \equiv \frac{6V_p}{D_p S_p} \rightarrow \phi_s = \frac{\pi \cdot (1,70^2) \cdot d^2}{\frac{\pi}{2} \cdot d^2 + 3,08\pi d^2} \rightarrow \frac{(1,70)^2}{0,5 + 3,08} \rightarrow \frac{2,89}{3,58} \rightarrow \phi_s \cong 0,82 \quad (16)$$

O diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula é de 1,70 mm e a esfericidade 0,82. A velocidade do ar na entrada do leito foi de 2,36m/s, medida com anemômetro digital, como média aritmética de 12 repetições. Na parte central do secador a velocidade média na operação foi de 1,90 m/s, devido a influência do funil central adicionado para eliminar a zona de menor escoamento de ar presente no equipamento.

A porosidade do leito fixo foi quantificada determinando-se o número de partículas contidas (2340 partículas) em uma proveta de 10 mL, com o volume médio de uma partícula se obtém o volume total das partículas e a porosidade do leito em 47%.

A velocidade mínima de fluidização foi obtida com aplicação da Equação (30), em função do número de Archimedes, Equação 31, descritas por Rhodes (2008).

$$Re_{mf} = 25,7 \left(\sqrt{(1 + 5,53 \cdot 10^{-5} Ar)} \right) - 1 \quad (30)$$

$$Ar = \frac{d_p^3 \cdot \rho (\rho_s - \rho) \cdot g}{\mu^2} \quad (31)$$

Sendo: Re_{mf} referente à velocidade mínima de fluidização; d_p o diâmetro médio de Sauter (2,83 mm); ρ e ρ_s a densidade do ar e das partículas, respectivamente; g a aceleração gravitacional e μ a viscosidade do ar, referente à operação de secagem na temperatura de 70°C.

Com o número de Archimedes (1.832.480,37) e de Reynolds obtidos (258,98) se obtém a velocidade mínima de fluidização 0,97 m/s. A velocidade de operação é 2,43 vezes a u_{mf} . O regime de escoamento pode ser descrito pela representação de Geldard descrita na Figura 7 ver capítulo 2.

Para os parâmetros da Figura 26: $d_p^* = Ar^{1/3}$ e $u^* = Re_p / Ar^{1/3}$, sendo 122,7 e 2,12, respectivamente. O ponto P em azul da referida figura consiste na representação da operação de secagem do estudo atual para as partículas calculadas a partir do diâmetro médio de Sauter.

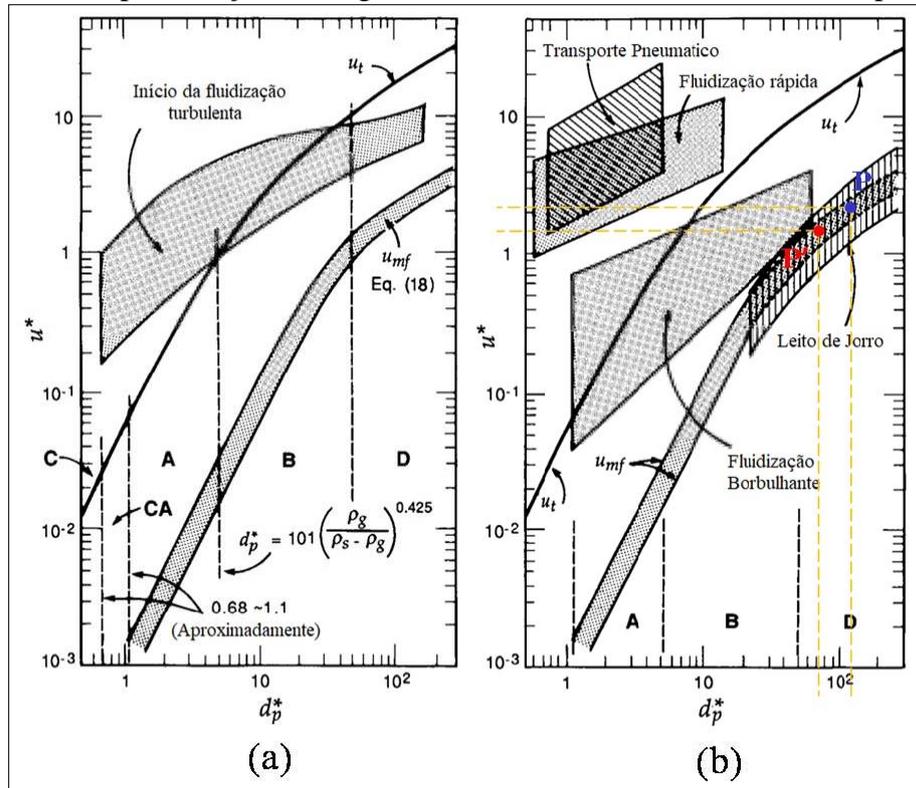
Considerando os cálculos feitos anteriormente agora para d_p sendo o diâmetro da esfera de mesmo volume (1,70 mm); e todos os demais parâmetros conforme utilizados no exemplo anterior, obtém-se, número de Archimedes (397.216,05) e de Reynolds (122,16), que nos permite calcular novos valores de d_p^* e u^* , conforme Equações (1) e (2).

$$d_p^* = Ar^{1/3} \rightarrow d_p^* = 138.346^{1/3} \rightarrow d_p^* \cong 73,5 \quad (1)$$

$$u^* = Re_p / Ar^{1/3} \rightarrow u^* = 66,42 / 138.346^{1/3} \rightarrow u^* \cong 1,66 \quad (2)$$

Os novos valores obtidos são representados na Figura 26 pelo ponto P' em vermelho (para partículas considerando diâmetro da esfera) e P azul (para partícula calculado pelo Diâmetro Médio de Sauter).

Figura 26: Representação dos regimes de escoamento encontrados no experimento.



Fonte: Adaptado de (Kunii e Levenspiel,1991).

4.5 AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DO MATERIAL

Tabela 6: Resultados de dispersibilidade após testes de estabilidade.

Material	Temp. Ar Secagem	Inicial	54°C14Dias	T.A 1Mês	T.A 2Meses	T.A 3Meses	40°C 1Mês	40°C 2Meses	40°C 3Meses
Amostra 1	45°C	13	15	13	14	14	17	16	17
Amostra 2	50°C	14	16	14	15	15	17	18	18
Amostra 3	55°C	13	16	15	14	15	17	18	18
Amostra 4	60°C	14	28	15	15	16	18	18	21
Amostra 5	65°C	15	44	17	17	17	18	22	28
Amostra 6	70°C	18	68	17	17	17	18	25	57

Fonte: Autor, 2020.

O material produzido durante os testes de secagem foram submetidos ao procedimento de avaliação da estabilidade conforme parâmetros internos da empresa onde o material foi desenvolvido, o teste realizado foi de dispersibilidade devido a sua criticidade para este tipo de formulação. Os resultados de dispersibilidade do produto são apresentados na Tabela 6, e

representam quantas vezes a proveta contendo o material foi invertida em um ângulo de 180° para que ocorra total dispersão dos granulos.

Ao avaliar cada amostra conforme os padrões internos para aprovação de um produto, as **amostras 1; 2 e 3**, apresentaram resultados muito bons após testes de estabilidade mantendo características similares as dos testes iniciais. Sendo consideradas Aprovadas.

A **amostra 4** apresentou considerável aumento no número de inversões após estabilidade de 54°C 14 dias, 28 inversões e 21 inversões após 3 meses a 40°C, porém os resultados obtidos são aceitáveis para aprovação do produto. Amostra considerada Aprovada.

A **amostra 5** após 3 meses a 40°C ainda apresentou valores dentro do aceitável, 28 inversões, porem ao avaliar amostra após submetida a 54°C por 14 dias, a mesma apresentou 44 inversões, o que reprova o produto de acordo com os parâmetros internos.

A **amostra 6**, foi Reprovada por apresentar altos valores após submetida a 40°C por 3 meses, 57 inversões, e68 após 54°C por 14 dias. Resultados que não atendem padrões internos de aprovação do produto.

5 CONCLUSÃO

Para as duas classificações de partículas determinadas, do sistema de secagem em leito fluidizado utilizado no experimento, localizou-se o regime de operação para ambas as simulações na região de leito de jorro conforme os regimes mapeados por Kunii e Levenspiel, (1991). O comportamento na região de leito de jorro para as duas simulações possui uma explicação física, pois a velocidade no centro do secador é inferior da região anular o que provoca um escoamento da periferia para o centro e com circulação do fundo para a periferia, então ao contrário do leito de jorro convencional, porém, com o mesmo desempenho em termos de secagem.

A temperatura do ar de secagem de 70°C possibilitou a secagem dos grânulos dispersíveis dentro dos padrões necessário de umidade, em 10 minutos sendo a mais eficiente para o processo. Porém, após avaliação das amostras de estabilidade geradas no experimento, as Amostras 5 e 6 não apresentaram resultados satisfatórios de aprovação do produto, o que nos leva a concluir que a etapa de secagem nas temperaturas de 65°C e 70°C apesar de serem as mais eficientes, não são indicadas para o produto, por influenciarem na qualidade final do material.

Para determinar a melhor temperatura de secagem mostra-se necessária uma avaliação direta entre a temperatura de secagem e a estabilidade do produto, os dados colhidos no experimento permitiu determinar que as etapas de secagem nas temperaturas de 55°C e 60°C respectivamente apresentaram rendimento de secagem muito próximos, e a estabilidade das amostras 3 e 4 também apresentaram resultados adequados para aprovação do produto.

Baseado nos resultados obtidos nos testes, os parâmetros indicados neste trabalho podem ser utilizados como referências para a produção em escala industrial do novo produto, reduzindo riscos de que o mesmo apresente qualidade fora dos parâmetros desejados, com tendência de se manter estável durante sua vida de prateleira.

Sugestão de trabalho futuro a ser realizado é: uma análise granulométrica da distribuição das partículas na série de peneiras Tyler, uma vez que para esse experimento os dados utilizados são teóricos, considerando que a retenção em malhas aconteceria apenas em função do comprimento das partículas.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Waldízia Maria Souza de. **Estudo da secagem de tecido jeans**. 2011. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

ALMEIDA, R. L. J.; et al. **Differential particle size analysis of jaboticaba bark flour (*Myrciaria cauliflora* Berg)**. *Research, Society and Development*, [S. l.], v. 9, n. 1, p. e156911875, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i1.1875.

ALMEIDA, L. C. D. **Simulação Acoplada CFD-DEM de Reatores Nucleares de Leito Fluidizado**. Orientador: JIAN, S. 2018. 141 f. (Doutorado) - Programa de Engenharia Nuclear, UFRJ, Rio de Janeiro.

AZEVEDO, Francisco Roberto de; FREIRE, Francisco das Chagas Oliveira. **Tecnologia de Aplicação de Defensivos Agrícolas**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2006. 47 p

BECKER, H. A. **Una investigation of laws governing the spouting of coarse particles**. *Chemical Engineering Science*, v. 13, n. 4, p. 245–262, 1961

BERNARDES, Laudo José Landi. A Granulação de Materiais. **Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 11, n. 3, p. 17-22, maio 2006. Trimestral.

BRASIL. **Decreto nº 4074, de 2 de janeiro de 2002**. Regulamenta a Lei Nº 7.802, De 11 De Julho de 1989, que dispõe sobre a pesquisa, a experimentação, a produção, a embalagem e rotulagem, o transporte, o armazenamento, a comercialização, a propaganda comercial, a utilização, a importação, a exportação, o destino final dos resíduos e embalagens, o registro, a classificação, o controle, a inspeção e a fiscalização de agrotóxicos, seus componentes e afins, e dá outras providências. **Lex**: Coletânea de Legislação e Jurisprudência, Brasília, 8 jan. 2002.

COUTO, A.G.; GONZÁLEZ, G.O; PETROVICK, P.R. **Granulação**. *CadernodeFarmácia*, v. 16, n.1, p13-20. ProgramadePós-graduaçãoemciências farmacêuticas, Faculdade de Farmácia, UFRGS, 2000.

CREMASCO, M. A. **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos**. São Paulo: Blucher, 2018. 424 p.

GELDART, D., **Gas Fluidization Technology**. Edited by D. Geldart, John Wiley & Sons, Great Britain, 1986, 468p.

GRACE, J. R.; AVIDAN, A. A. E.; KNOWLTON, T. M. **Circulating Fluidized Beds**. 1ª ed. Londres: Blackie Academic & Professional, 1997, 585p.

HAIDER , A.; LEVENSPIEL , O. **Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles.***Powder Technology*, 58, p. 63-70, 1989.

HAZRA, Dipak Kumar; PURKAIT, Alope. Role of pesticide formulations for sustainable crop protection and environment management: A review. **Journal Of Pharmacognosy And Phytochemistry**. Gurgaon, p. 686-693. fev. 2019.

HAZRA, Dipak Kumar et al. Recent advances in pesticide formulations for eco-friendly and sustainable vegetable pest management: A review. **Archives Of Agriculture And Environmental Science**. Haridwar, p. 232-237. ago. 2017

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. Second ed. New York: 1991. 412 p.

LIMA, W. M. P. B. D. **Transferência de calor e massa em sólidos porosos com geometria complexa via análise concentrada: modelagem e simulação**. 2017. 105 f. (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

LONDE, Tales Martins *et al.* **Desempenho de secador piloto em leito fluidizado na secagem de grânulos dispersíveis**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 23., 2021, Gramado. **Anais (Prelo)**. Gramado: Cobeq, 2021. p. 1-4

MALEK, M. A.; LU, B. C. Y. **Pressure drop and spoutable bed height in spouted beds**. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, v. 4, n. 1, p. 123– 128, 1965.

LOPES-DA-SILVA, Maria de Fátima; CHOUPINA, Luís Santos¹ e Altino. A extrusão em tecnologia alimentar: tipos, vantagens e equipamentos. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 1, n. 38, p. 3-10, nov. 2014. Trimestral.

MASSARANI, Giulio. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. 2. ed. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais Ltda., 2002. 152 p.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit Operations Of Chemical Engineering**. 5 ed. New York: 1993. 1130 p.

MORIS, V. A. D. S. **Fluidodinâmica E Secagem Do Ácido Adípico Em Leito Vibrofluidizado**. Orientador: ROCHA, S. C. D. S. 2002. 223 f. (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual De Campinas

MUJUMDAR, Arun S. *et al* (ed.). **Handbook of Industrial Drying**. 3. ed. Boca Raton: Crc Press, 2006. 1312 p.

OLIVEIRA, T. J. P. D. **Aspectos Fluidodinâmicos de Misturas Binárias de Resíduo de Tabaco e Areia em Leito Fluidizado**. Orientador: ATAÍDE, C. H. 2012. 67 f. (Mestre) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

PERRY, Robert H. *et al* (ed.). **Perry's Chemical Engineers' Handbook**: prepared by a staff of specialists under the editorial direction of. 7. ed. United States Of America: R. R. Donnelley & Sons Company., 1997.

RIAZ, Mian N. *et al*. Stability of Vitamins during Extrusion. **Critical Reviews In Food Science And Nutrition**, [S.L.], v. 49, n. 4, p. 361-368, 24 fev. 2009. Informa UK Limited.

RICHARDSON, J.F.; HARKER, J.H.; BACKHURST, J.R. Chemical Engineering. **Particle technology and separation processes**. London: Butterworth. 2006. 1229p

SILVA, Á. R. S. D. **Modelagem Experimental E Computacional Dem-Cfd Da Fluidização De Partículas Geldart-D Com Formato Irregular**. Orientador: ZINANI, F. S. F. 2019. 119 f. (Mestrado) - Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica, Universidade Do Vale Do Rio Dos Sinos, São Leopoldo.

SILVA, Martim Francisco de Oliveira e; COSTA, Letícia Magalhães da. **A indústria de defensivos agrícolas**. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social: BNDES Setorial, Rio de Janeiro, v. 35, p. 233-279, mar. 2012.

TURTON, R.; CLARK, N. N. **An explicit relationship to predict spherical particle terminal velocity**. **Powder Technology**, 53, n. 2, p. 127-129, 1987.

YANG, W.-C. **Handbook of Fluidization And Fluid-Particle Systems**. 1ª ed ed. New York: Marcel Dekker, 2003. 851 p.