CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
BIANCA SCREPANTE GARÉ

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA UMIDADE NAS PROPRIEDADES DE FLUXO DE MISTURAS COMPOSTAS POR LACTOSE E CELULOSE

São Bernardo do Campo
2019

BIANCA SCREPANTE GARÉ

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA UMIDADE NAS PROPRIEDADES DE FLUXO DE MISTURAS COMPOSTAS POR LACTOSE E CELULOSE

Dissertação apresentada ao Centro Universitário FEI, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química. Orientada pelo Prof. Dr. Rodrigo Condotta.

São Bernardo do Campo

2019

Screpante Garé, Bianca.
Estudo da Influência da Umidade nas Propriedades de Fluxo de Misturas Compostas por Lactose e Celulose / Bianca Screpante Garé. São Bernardo do Campo, 2019.
138 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário FEI.
Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Condotta.

1. Propriedades de fluxo. 2. Umidade. 3. Lactose. 4. Celulose. I. Condotta, Rodrigo, orient. II. Título.

Elaborada pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da FEI com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

centro universitário FEI

Mestrado

APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO
ATA DA BANCA EXAMINADORA

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Química

PGQ-10

Aluno: Bianca Screpante Garé **Matrícula:** 417301-9

Título do Trabalho: Estudo da influência da umidade nas propriedades de fluxo de misturas compostas por lactose e celulose.

Área de Concentração: Engenharia Química

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Condotta

Data da realização da defesa: 23/09/2019

ORIGINAL ASSINADA

Avaliação da Banca Examinadora:

São Bernardo do Campo, / / .

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rodrigo Condotta Ass.: _____

Prof. Dr. Luís Fernando Novazzi Ass.: _____

Profª Drª Kaciane Andreola Ass.: _____

A Banca Julgadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO ☒ REPROVADO ☐

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

APROVO A VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO EM QUE FORAM INCLUÍDAS AS RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA

_____

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Ricardo Belchior Torres

AGRADECIMENTOS

À minha mãe e meu pai, que sempre me incentivaram a alçar voos cada vez mais altos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo Condotta, pela confiança demonstrada, pelo suporte, por todo o apoio, dedicação e paciência oferecida durante toda esta caminhada.

Ao coordenador, Prof. Dr. Ricardo Belchior, pelo incentivo contínuo e pela oportunidade oferecida.

À Yasmin, Pedro Henrique, Camila e Jade, pelo apoio, estímulo constante e companheirismo em todos os momentos.

Aos técnicos do Centro de Laboratórios Químicos do Centro Universitário FEI, em especial ao Paulo, pela paciência, boa vontade e apoio durante meus dias e noites nos laboratórios.

Ao Centro Universitário FEI, pelo apoio financeiro.

“Para se ter sucesso, é necessário amar de verdade o que se faz. Caso contrário, levando em conta apenas o lado racional, você simplesmente desiste”

(Steve Jobs, 2007)

RESUMO

Atualmente, grande parte dos processos químicos de manufatura utilizam pós em algum momento do seu processamento, sendo que seu manuseio e processamento são dois grandes problemas encontrados na indústria. O estudo das propriedades de fluxo destes materiais é de grande importância, pois pode haver mudanças nas características dos pós durante o processamento. Assim, o objetivo geral deste trabalho foi analisar a influência da umidade nas propriedades de fluxo de materiais orgânicos amplamente utilizados como excipientes na indústria farmacêutica: lactose e celulose. A avaliação da influência da umidade foi realizada com base em diversas caracterizações físicas das amostras. Os materiais foram utilizados em 3 misturas de diferentes proporções: 35/65%, 50/50% e 65/35%, as quais foram analisadas em diferentes condições de umidade (0; 5; 8,75; 12,5; 20 e 27,5%). As amostras foram caracterizadas através de análise granulométrica, massa específica, ensaios de fluidização e mediante algumas propriedades reológicas, tais como a energia básica de fluxo (BFE) e energia de fluxo variável (VRF), aeração, compressibilidade e cisalhamento, as quais foram determinadas com auxílio do reômetro de pós FT-4. Também foram realizados testes em leito fluidizado a fim de obter a velocidade mínima de fluidização e a perda de carga. Os resultados demonstraram um aumento na coesão tanto com o incremento do teor de umidade das amostras como também com o aumento do teor de lactose. A respeito da velocidade mínima de fluidização, foi possível concluir que são necessárias maiores velocidades para fluidizar pós que apresentam maior umidade e a velocidade mínima de fluidização também é superior nas amostras com maior teor de lactose. Os resultados obtidos tanto no reômetro (BFE, FRI, SE, CBD, CPS e AE) quanto no leito fluidizado foram analisados por meio do software *Statistica*, o qual demonstrou que os testes realizados apresentaram resultados estatisticamente significativos, corroborando com as conclusões obtidas. Desta forma, obteve-se expressões polinomiais para cada propriedade de fluxo mensurada, permitindo analisar a influência de valores intermediários de umidades e porcentagem de lactose. Portanto, foi possível concluir que tanto o teor de umidade como a proporção das misturas analisadas influenciam diretamente nas propriedades de fluxo das amostras.

Palavras-chave: Propriedades de fluxo. Umidade. Lactose. Celulose.

ABSTRACT

Nowadays, most part of the chemical manufacturing processes use powders at some point in their processing, and their handling and processing are two major problems in the industry. The study of flow properties of these materials is extremely important because changes may occur in the features of the powders during processing. Thus, this work aimed to analyze the influence of the flow properties of organic materials used as excipients in the pharmaceutical industry: lactose and cellulose. The influence of humidity was evaluated based on several physical characterizations of the samples. The materials were used in 3 mixtures of different proportions: 35/65%, 50/50% and 65/35%, which were analyzed under different humidity conditions (0; 5; 8,75; 12,5; 20 e 27.5%). The samples were characterized by granulometric analysis, specific mass, fluidization tests and by some rheological properties, such as basic flowability energy (BFE) and variable flow energy (VRF), aeration, compressibility and shear, determined using the FT-4 Powder Rheometer. Tests were also carried out on the classical fluidized bed in order to obtain the minimum fluidization velocity and the pressure drop. The results showed an increase in the cohesion with the increase of the moisture content of the samples, and also in the samples with higher lactose content. Regarding the minimum fluidization velocity, it was possible to conclude that higher velocities are required to fluidize beds with high humidity rates and, likewise, the minimum fluidization velocity is also higher in samples with a higher lactose content. The results obtained in both the rheometer and the classic fluidized bed were analyzed using the Statistica software, which showed that the tests performed presented statistically recommended results, corroborating the conclusions already obtained. Thus, polynomial expressions were obtained for each measured flow property, allowing to analyze the influence of intermediate values of humidity and lactose percentage. Therefore, it was possible to conclude that both the moisture content and the ratio of the analyzed mixtures directly influence the flow properties of the samples.

Keywords: Flow properties. Moisture. Lactose. Cellulose.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Classificação de Geldart para fluidização de partículas com ar em condições ambientes 22
Figura 2 - Dimensões características de uma partícula 25
Figura 3 - Tipos dos poros de uma partícula 26
Figura 4 - Menisco líquido entre duas partículas esféricas idênticas 29
Figura 5 – Evolução das etapas de saturação dos grãos 30
Figura 6 - Aglomerados de partícula 33
Figura 7 - Trajetória da partícula 33
Figura 8 - Diferentes tipos de leito 35
Figura 9 - Molécula de lactose 42
Figura 10 - Lactose monohidratada 42
Figura 11 - Molécula de celulose 43
Figura 12 - Celulose microcristalina 43
Figura 13 - Reômetro de pós 46
Figura 14 - Movimento descendente da lâmina 47
Figura 15 - Movimento ascendente da lâmina 47
Figura 16 - Esquema de medição da compressibilidade no reômetro de pós 50
Figura 17 - Esquema de medição da aeração no reômetro de pós 50
Figura 18 - Partículas coesivas e não coesivas 51
Figura 19 - Círculos de Mohr e Yield Locus 53
Figura 20 - Esquema de resultados do teste de cisalhamento e obtenção do plano de ruptura e seus respectivos círculos de Mohr. 61
Figura 21 - Equipamento de fluidização 62
Figura 22 - Descrição esquemática dos resultados 65
Figura 23 - Análise granulométrica para amostras de celulose e lactose 66
Figura 24 - Análise granulométrica das amostras com 35% lactose e 65% celulose em diferentes umidades 67
Figura 25 - Análise granulométrica das amostras com 50% lactose e 50% celulose em diferentes umidades 68
Figura 26 - Análise granulométrica das amostras com 65% lactose e 35% celulose em diferentes umidades 68
Figura 27 – Diâmetro volumétrico pela umidade 69

Figura 28 – Porosidade do leito.....72
Figura 29 - BFE e VRF para amostras com 35% lactose e 65% celulose em diferentes umidades.....73
Figura 30 - BFE e VRF para amostras com 50% lactose e 50% celulose em diferentes umidades.....74
Figura 31 - BFE e VRF para amostras com 65% lactose e 35% celulose em diferentes umidades.....75
Figura 32 – BFE das amostras por umidade.....76
Figura 33 – Porosidade x BFE 77
Figura 34 - Compressibilidade para amostras com 35% lactose e 65% celulose em diferentes umidades.....78
Figura 35 - Compressibilidade para amostras com 50% lactose e 50% celulose em diferentes umidades.....79
Figura 36 - Compressibilidade para amostras com 65% lactose e 35% celulose em diferentes umidades.....79
Figura 37 – Compressibilidade das amostras por umidade 81
Figura 38 - Aeração para amostras com 35% lactose e 65% celulose em diferentes umidades.....82
Figura 39 - Aeração para amostras com 50% lactose e 50% celulose em diferentes umidades.....83
Figura 40 - Aeração para amostras com 65% lactose e 35% celulose em diferentes umidades.....84
Figura 41 - Aeração das amostras por umidade 85
Figura 42 - Perda de carga (linha) e velocidade (barras) de mínima fluidização 87
Figura 43 – Círculo de Mohr para as amostras com 35% de lactose e 65% de celulose – 3 kPa 89
Figura 44 – Círculo de Mohr para as amostras com 50% de lactose e 50% de celulose – 3 kPa 89
Figura 45 – Círculo de Mohr para as amostras com 65% de lactose e 35% de celulose – 3 kPa 90
Figura 46 - Cisalhamento para amostras com 35% lactose e 65% celulose em diferentes umidades.....91
Figura 47 - Cisalhamento para amostras com 50% lactose e 50% celulose em diferentes umidades.....91

Figura 48 - Cisalhamento para amostras com 65% lactose e 35% celulose em diferentes umidades 92
Figura 49 - Coesão em diferentes tensões normais 93
Figura 50 - Coesão em função da porosidade 94
Figura 51 - Coesão 95
Figura 52 – Gráficos de superfície para a densidade aparente e compressibilidade 99
Figura 53 - Gráficos comparativos dos valores observados e preditos 99
Figura 54 – Gráficos de superfície 100
Figura 55 - Gráficos comparativos dos valores preditos e observados 101
Figura 56 – Coeficientes dos polinômios 102
Figura 57 – Variabilidade para o BFE 103
Figura 58 – Variabilidade para o SE 104
Figura 59 – Variabilidade para o FRI 105
Figura 60 – Variabilidade para o CBD 106
Figura 61 – Variabilidade para o CPS 107
Figura 62 – Variabilidade para o AE 108
Figura 63 – Variabilidade para a velocidade mínima de fluidização 109
Figura 64 – Variabilidade para a coesão 110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de material particulado conforme propriedades de fluidização 21
Tabela 2 - Classificação dos sólidos quanto ao tamanho 23
Tabela 3 - Classificação da fluidez quanto ao FRI 48
Tabela 4 - Porcentagens de lactose, celulose e umidade em cada mistura.....55
Tabela 5 - Classificação dos sólidos segundo Freeman. 60
Tabela 6 – Dados para o planejamento experimental 65
Tabela 7 – Valores de umidades reais 70
Tabela 8 - Resultados do ensaio realizado no picnômetro.....71
Tabela 9 - Densidade do leito, da partícula no leito e porosidade do leito 71
Tabela 10 – Dados para o planejamento experimental 95
Tabela 11 - Modelo ajustado para o FRI 96
Tabela 12 - Modelo ajustado para o SE 97
Tabela 13 - Modelo ajustado para o CBD 97
Tabela 14 - Modelo ajustado para o CPS 98

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ρ	Densidade	[g/cm³]
dp	Diâmetro da Partícula	[μm]
ε	Porosidade	[-]
M	Massa	[g]
V	Volume	[cm³]
F_{vw}	Força de Van der Walls	[kJ/mol]
H	Constante de Hamaker	[J]
d	Diâmetro	[m]
a	Distância Entre as Superfícies de Duas partículas	[m]
F_{cap}	Força Capilar	[kJ/mol]
r	Raio da Partícula	[m]
γ	Tensão Superficial do Líquido	[m]
ΔP	Variação de Pressão	[Pa]
P	Força Peso	[kgf]
I	Força Normal Interparticular	[kJ/mol]
BFE	Energia Básica de Fluxo	[mJ]
VRF	Energia de Fluxo Variável	[mJ]
FRI	Índice de Fluxo Variável	[-]
SE	Energia Específica	[mJ/g]
CBD	Densidade bulk	[g/cm³]
CPS	Compressibilidade	[%]
AE	Aeração	[mJ]
δh	Altura Comprimida	[mm]
σ	Tensão Normal	[kPa]
MPS	Tensão Principal de Consolidação	[kPa]
UYS	Tensão Não Confinada de Deslizamento	[kPa]
FF	Função Fluxo	-
FEI	Fundação Educacional Inaciana Pe. Sabóia de Medeiros	-
SBC	São Bernardo do Campo	-
AR	Razão de Aeração	-

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 17

2. OBJETIVOS 19

2.1. OBJETIVO GERAL 19

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 19

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 20

3.1. SÓLIDOS PARTICULADOS 20

3.2. CLASSIFICAÇÃO DAS PARTÍCULAS 21

3.3. CARACTERIZAÇÃO DE PARTÍCULAS E LEITOS DE PARTÍCULAS 23

3.3.1. Tamanho e Distribuição de Tamanho das Partículas 24

3.3.2. Forma das Partículas 24

3.3.3. Rugosidade 25

3.3.4. Porosidade 26

3.3.5. Densidade (Massa Específica) 27

3.4. INTERAÇÕES INTERPARTICULARES 28

3.4.1. Forças de Van Der Waals 28

3.4.2. Pontes Líquidas 29

3.4.3. Pontes Sólidas 31

3.4.4. Forças Eletrostáticas 31

3.5. UMIDADE 32

3.6. LEITOS DE PARTÍCULAS 32

3.7. FLUIDIZAÇÃO 34

3.8. FLUIDEZ DE MATERIAIS PULVERULENTOS 36

3.9. EXCIPIENTES NA INDÚSTRIA FARMACÊUTICA 41

3.9.1. Lactose 41

3.9.2. Celulose 42

3.10. PROBLEMATICAS 44

3.11. REÔMETRO DE PÓS 45

3.11.1. Energia Básica de Fluxo (BFE) e Energia de Fluxo Variável (VRF) 46

3.11.2. Condicionamento 48
3.11.3. Compressibilidade 49
3.11.4. Aeração 50
3.11.5. Cisalhamento 51
3.11.5.1. Princípios de Funcionamento 52

4. MATERIAIS E MÉTODOS 54
4.1. MATERIAIS 54
4.2. MÉTODOS 54
4.2.1. Preparo das Amostras 54
4.2.2. Caracterização das Amostras 55
4.2.2.1. Análise Granulométrica 55
4.2.2.2. Umidade 56
4.2.2.3. Massa específica real 56
4.2.3. Testes Realizados no Reômetro de Pós FT4 56
4.2.3.1. Energia Básica de Fluxo (BFE) e Energia de Fluxo Variável (VRF) 56
4.2.3.2. Compressibilidade 58
4.2.3.3. Aeração 58
4.2.3.4. Cisalhamento 60
4.2.4. Leito Fluidizado 62
4.2.5. Planejamento Estatístico dos Experimentos 63

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 66
5.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA 66
5.2. UMIDADE 70
5.3. MASSA ESPECÍFICA 70
5.4. ENERGIA BÁSICA DE FLUXO (BFE) E ENERGIA DE FLUXO VARIÁVEL (VRF) 72
5.5. COMPRESSIBILIDADE 78
5.6. AERAÇÃO 81
5.7. LEITO FLUIDIZADO 86
5.8. CISALHAMENTO 88
5.9. TRATAMENTO ESTATISTICO DOS RESULTADOS 95

6. CONCLUSÃO 111

REFERÊNCIAS.....113

APÊNDICE A – RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA 119
APÊNDICE B – RESULTADOS DO TESTE DE UMIDADE 123
APÊNDICE C – RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS NO REÔMETRO DE PÓS FT4 125
APÊNDICE D – RESULTADOS DO LEITO FLUIDIZADO 137

1. INTRODUÇÃO

Segundo Campos (2012), em aproximadamente 75% dos processos químicos de manufatura é utilizado material particulado em alguma etapa do processamento e, quando comparados com métodos que envolvem gases e líquidos, o manuseio nos processos que utilizam pós é mais complexo e são encontradas maiores dificuldades na manipulação.

Materiais particulados são utilizados nas mais diversas aplicações industriais, como tintas e pigmentos, cerâmicos, petroquímicos, plásticos, farmacêuticos, química fina, indústria alimentícia, entre outras (KRANTZ; ZHANG; ZHU, 2009).

Dentro dessas aplicações, os pós são usados em uma ampla gama de processos e é essencial entender como um pó irá se comportar, já que o projeto adequado do processo e dos equipamentos pode aumentar o rendimento do produto e a redução de desperdícios, aumentando a lucratividade (CAMPOS, 2012).

O manuseio e processamento de pós finos é um dos grandes problemas encontrados na indústria devido à elevada coesão desenvolvida pelo material particulado. Os ingredientes farmacêuticos mais utilizados, por exemplo, exibem propriedades como fluxo difícil e alta coesão afetando diretamente operações unitárias como alimentação, mistura, granulação, entre outras (HUANG et al., 2015).

Algumas práticas comuns são utilizadas para superar os problemas de fluidez dos pós, como a adição de um agente deslizante (PINGALI et al., 2011) ou a adição de vibração (FRAIGE et al., 2008).

Porém, essas práticas podem levar à segregação do material, devido a um grande número de fatores, como a diferença no tamanho das partículas, suas formas e densidades, além de outras desvantagens econômicas da cadeia produtiva, como aumento no número de etapas do processo, inconsistências na performance e dificuldade em predizer o comportamento do fluxo (HUANG et al., 2015).

No ramo da engenharia química, o escoamento de gases e líquidos é largamente estudado. Porém, quando se trata de material particulado o assunto ainda é bastante incipiente e pouco aprofundado, o que pode ser explicado pelo fato de que os pós são matérias-primas de baixo valor agregado e baixo custo (CAMPOS, 2012).

Contudo, é relevante destacar a importância de pesquisas nessa área, pois só assim será possível desenvolver processos de produção mais eficientes, com

materiais mais seguros e de alta qualidade, resultando em bens de consumo com maior valor de mercado (CAMPOS, 2012).

Com o intuito de predizer o comportamento de um determinado pó um conjunto diversificado de técnicas de caracterizações foi desenvolvido e padronizado, o qual pode ser utilizado para testar pós sob condições amplamente variadas (KRANTZ; ZHANG; ZHU, 2009).

Alguns desses métodos são os que utilizam o reômetro de pós, sendo que é possível caracterizar, por exemplo, energia básica de fluxo (BFE), compressibilidade, densidade do leito, entre outros. Também é possível avaliar a densidade por meio de picnômetro e a velocidade mínima de fluidização, bem como perda de carga, por leito fluidizado. A umidade pode ser avaliada utilizando um medidor de umidade via infravermelho ou pelo método convencional em estufa.

Segundo Wormsbecker e Pugsley (2008), a presença de umidade pode apresentar um efeito significativo no comportamento hidrodinâmico dos leitos fluidizados. Quando as partículas estão molhadas é necessária uma velocidade de fluidização mais alta, para evitar segregação, defluidização e formação de canais preferenciais. No entanto, se a velocidade for muito alta, fenômenos indesejáveis também podem ocorrer, como o arraste de partículas. Esses comportamentos indesejáveis na fluidização podem ocasionar efeitos adversos na qualidade do produto.

O impacto da umidade na hidrodinâmica de leitos fluidizados ainda não é claramente entendido. Como resultado, muitos secadores usados na indústria farmacêutica, por exemplo, são operados manualmente, usando observações visuais coletadas pelo operador através de um visor no leito, uma técnica propensa a erros, já que cada operador operará o processo de uma forma distinta (WORMSBECKER; PUGSLEY, 2008).

Assim, estudar o papel da umidade no comportamento da fluidização é de fundamental importância para entender a hidrodinâmica dos leitos e, consequentemente, melhorar o controle dos processos que empregam materiais pulverulentos úmidos (WORMSBECKER; PUGSLEY, 2008).

Portanto, o objetivo geral deste trabalho foi analisar a influência da umidade nas propriedades de fluxo de materiais orgânicos amplamente utilizados como excipientes na indústria farmacêutica: lactose e celulose. A avaliação da influência da umidade foi realizada com base em diversas caracterizações físicas das amostras.

2. OBJETIVOS

A seguir, são apresentados objetivo geral e os objetivos específicos.

2.1. OBJETIVO GERAL

Esse trabalho teve como objetivo geral o estudo da influência de diferentes teores de umidade (0, 5, 8,75, 12,5, 20 e 27,5%) nas propriedades de fluxo de misturas com diferentes proporções de lactose e celulose (35/65%, 50/50% e 65/35%), a fim de identificar quais as características que influenciam no desempenho dos sólidos e que justifiquem seu comportamento.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos foram:

a) Caracterizar misturas de diferentes frações mássicas de lactose e celulose e com diferentes porcentagens de umidade;
b) Avaliar, por meio de um reômetro de pós, as propriedades físicas das misturas;
c) Avaliar experimentalmente as condições de mínima fluidização dessas misturas;
d) Avaliar a influência de cada característica física e da umidade na fluidização.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Essa seção apresenta um resumo sobre as principais pesquisas realizadas até o momento, nas quais o objeto principal de estudo são as propriedades de fluxo dos pós.

3.1. SÓLIDOS PARTICULADOS

Um sistema sólido particulado é constituído basicamente por partículas e grãos de diversos tamanhos (e, muitas vezes, diferentes composições químicas e massas específicas) arranjados aleatoriamente para formar um conjunto de partículas, denominado leito (*bulk*). A natureza de tal material (isto é, sua aparência, seu comportamento em diferentes situações, entre outros) depende de vários fatores, mas principalmente, do tamanho, forma e densidade das partículas isoladas que o compõe (WOODCOCK; MASON, 1987).

Quando se trata de material particulado, “fluir” significa que um sólido a granel foi deformado plasticamente devido às forças/tensões que nele atuam. A intensidade destas forças necessária para fazê-lo “fluir” é uma medida de sua aptidão ao fluxo, denominada fluidez.

A expressão “bom comportamento de fluxo” geralmente significa que um sólido flui facilmente, ou seja, não está consolidado ou aglomerado e flui sozinho para fora de um silo ou de um funil devido à força da gravidade, não sendo necessário nenhum dispositivo forçando o fluxo. Os produtos estão "fluindo mal" se experimentarem obstruções de fluxo ou consolidação durante o armazenamento ou o transporte (SCHULZE, 2011).

O fluxo de um material particulado depende principalmente de forças de atração ou coesão entre partículas. Em se tratando de extremos, o escoamento pode ser classificado desde “muito livre” (materiais não coesos e que escoam facilmente) até “muito difícil” (materiais muito coesivos) (CAMPOS, 2012).

3.2. CLASSIFICAÇÃO DAS PARTÍCULAS

As partículas, geralmente, não se comportam da mesma forma quando submetidas a operações unitárias como a fluidização gasosa e compressão. Assim, não é possível extrapolar resultados de um certo material para outro.

Devido a esse fato e com o objetivo de tornar as generalizações possíveis (ou pelo menos minimizar erros), Geldart em 1973 classificou o comportamento dos sólidos fluidizados por gases em quatro categorias: A, B, C e D, conforme Tabela 1 e Figura 1 (NITZ; GUARDANI, 2015).

Tabela 1 - Classificação de material particulado conforme propriedades de fluidização

	Grupo C	**Grupo A**	**Grupo B**	**Grupo D**
Característica	Coesivo	Aerado	Borbulhamento imediato	Espalhafatoso
Formação de caminhos preferenciais	Severo	Pequeno	Insignificante	Insignificante
Colapso	-	Lento	Rápido	Rápido
Expansão	Baixa – devido aos caminhos preferenciais	Alta – inicialmente sem bolhas	Média	Média
Formação de bolhas	Sem bolhas	Base plana, tampa esférica	Arredondado	Arredondado
Mistura de sólidos	Muito baixa	Alta	Média	Baixa
Mistura de retorno de gás	Muito baixa	Alta	Média	Baixa
Efeitos da densidade em hidrodinâmica	Desconhecido	Apreciável	Menor	Desconhecido
Efeito da distribuição do tamanho da partícula	Desconhecido	Apreciável	Insignificante	Pode causar segregação

Fonte: Autora, “adaptado de” Nitz, Guardani, 2015.

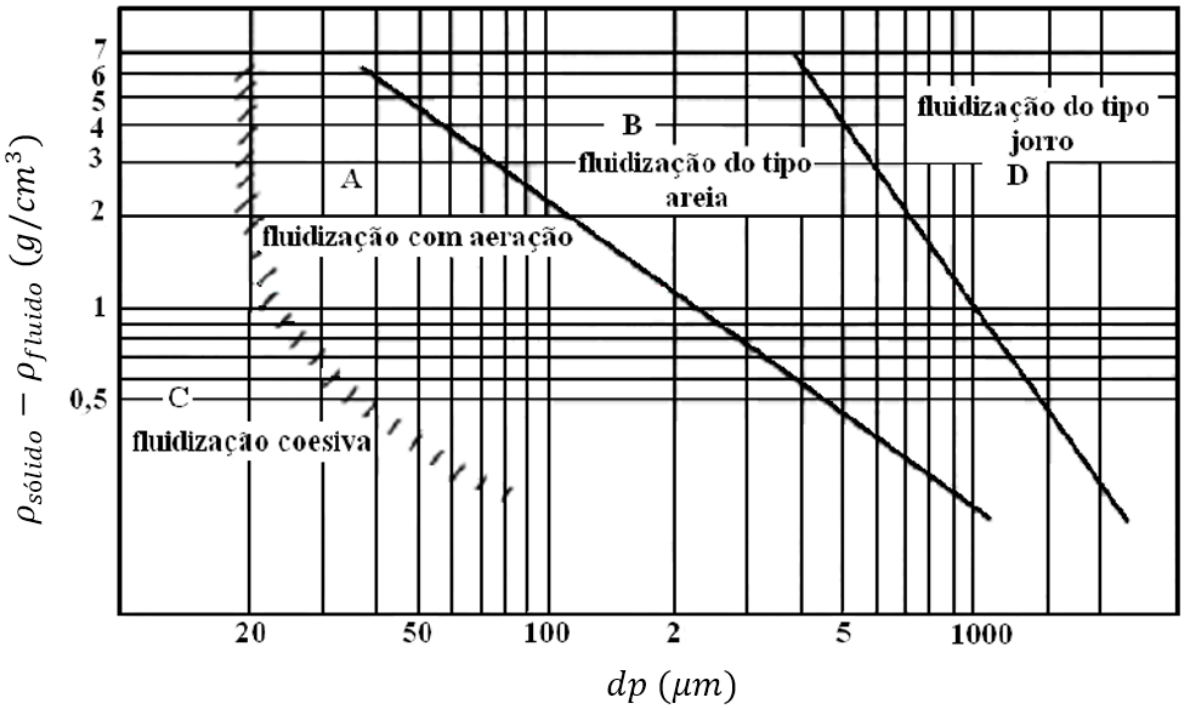
Categoria A: constituído de pequenas partículas e/ou baixas densidades, que quando submetidas a fluidização não há o surgimento de bolhas, apenas em altas velocidades.

Categoria B: apresenta diâmetro entre 40 μm e 500 μm, densidade superior a 1,4 g/cm³ e fluidização com borbulhamento desde o começo. A expansão do leito é pequena e colapsa rapidamente quando interrompido o fluxo de fluido.

Categoria C: material particulado muito fino, cuja coesão entre as partículas impede a fluidização. A medida que a vazão de fluido aumenta, aparecem caminhos preferenciais que se estendem até a superfície do leito. Para este tipo de partícula a introdução de agitação é importante para uma fluidização mais uniforme.

Categoria D: material composto por partículas muito grandes e/ou densas, a velocidade do fluido necessária para a fluidização é alta e a formação de jorro é favorecida (NITZ; GUARDANI, 2015).

Figura 1 - Classificação de Geldart para fluidização de partículas com ar em condições ambientes



Fonte: Autora, “adaptado de” Vieira, 2012

A Tabela 2, mostra os termos comumente utilizados para classificar materiais particulados levando em conta apenas o seu tamanho.

Tabela 2 - Classificação dos sólidos quanto ao tamanho

Termo	Faixa de Tamanho
Sólido Grosseiro (*coarse*)	5 - 100 mm
Sólido Granular	0,3 - 5 mm
Pó Grosseiro (*coarse*)	100 - 300 µm
Pó Fino	10 - 100 µm
Pó Superfino	1 - 10 µm
Pó Ultrafino	< 1 µm

Fonte: Autora “adaptado de” Campos, 2012

Entretanto, estas classificações só abrangem algumas propriedades específicas das partículas (densidade e tamanho), sendo que inúmeras outras características individuais e coletivas podem influenciar na forma de fluidização da amostra, tais como a forma, rugosidade e umidade, por exemplo, as quais serão explanadas mais adiante.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DE PARTÍCULAS E LEITOS DE PARTÍCULAS

Conforme mencionado, o comportamento do fluxo de um leito de material particulado é multidimensional e sua quantificação é uma tarefa complexa, pois depende de diversas características físicas individuais e coletivas das partículas que o constitui (VASILENKO et al., 2011; PRESCOTT; BARMUM, 2000). De fato, a fluidez é uma consequência da combinação de todas as propriedades físicas que influenciam o fluxo, das condições ambientais e do equipamento usado para manusear esse material (GANESAN; ROSENTRATER; MUTHUKUMARAPPAN, 2008).

O conhecimento detalhado das propriedades físicas e morfológicas das partículas, como porosidade, massa específica, esfericidade, área superficial e distribuição de poros são de extrema importância quando se pretende avaliar os fenômenos que regem uma determinada operação unitária, além de permitir avanços tecnológicos na área (CREMASCO, 2012).

Assim, para realizar a completa caracterização de um material particulado deve-se proceder de duas formas distintas, caracterizando inicialmente a partícula isolada e, posteriormente, o comportamento de um conjunto de partículas, que definem as propriedades conhecidas como *bulk* (CAMPOS, 2012).

3.3.1. Tamanho e Distribuição de Tamanho das Partículas

Em qualquer processo que envolva a tecnologia do pó, obtê-lo e classificá-lo com características adequadas a cada situação é uma das etapas mais relevantes. A distinção entre um pó adequado ou não requer caracterizações químicas e físicas precisas.

Assim, uma das etapas mais importantes da caracterização é a determinação da distribuição do tamanho da partícula, pois esta afeta diretamente nos estágios de produção e também na microestrutura do produto finalizado, impactando a resistência mecânica, densidade e as propriedades físicas e elétricas (PAPINI, 2003).

Fazer a seleção de um tamanho específico de partícula para iniciar um processo ou análise muitas vezes representa um problema, pois, na prática, as partículas que formam o pó raramente têm formato esférico.

Muitos pós são de origem mineral e foram derivados de materiais duros e submetidos a qualquer tipo de processo de redução de tamanho, neste caso, as partículas trituradas se assemelham a poliedros com faces quase planas e cantos afiados, podendo ser compactas, com comprimento, largura e espessura quase iguais, ou parecidas com placas ou agulhas.

Quanto menor a partícula, levando em conta o atrito devido ao manuseio, mais suaves suas arestas podem tornar-se e, portanto, podem ser consideradas esféricas, assim, o termo "diâmetro" é frequentemente utilizado para se referir à dimensão linear característica. Todas essas características geométricas estão relacionadas à estrutura íntima de seus elementos de formação, cujos arranjos são normalmente simétricos com formas definidas, como cubos, octaedros e assim por diante (RIVAS, 2012).

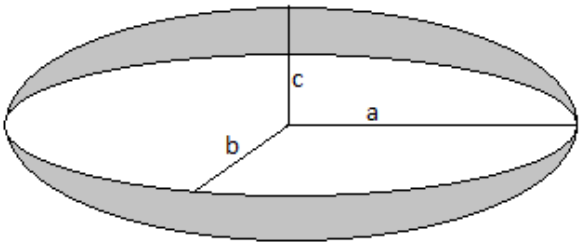
3.3.2. Forma das Partículas

A forma das partículas exerce um papel de grande importância quando se fala em sistemas particulados, influenciando aspectos como a velocidade terminal, superfície de contato das partículas, entre outros. Existem várias maneiras de representar a forma das partículas, sendo que a maioria delas baseia-se nas dimensões características de uma partícula (CREMASCO, 2012), conforme Figura 2.

Algumas características das partículas são descritas:

- Arredondamento e circularidade: são características que comparam a superfície da partícula com a superfície de um disco de mesmo perímetro. A forma da partícula pode ser obtida visualmente ou através de microscópios e comparada com formas padrões;
- Alongamento: o alongamento é o resultado da razão entre a maior e a menor dimensão da partícula, quanto mais próximo o resultado for de 1, menos alongada é a partícula, sendo que para resultados iguais a 1, a partícula é considerada circular ou quadrática;
- Esfericidade: quando são realizados estudos sobre partículas sólidas, muitas vezes essas partículas são consideradas como esféricas, a fim de simplificar cálculos. Porém, muito raramente as partículas se apresentam nesse formato, sendo necessário conceituar um índice que relacione o quanto a partícula se aproxima de uma esfera, denominado grau de esfericidade (CREMASCO, 2012).

Figura 2 - Dimensões características de uma partícula



a – maior dimensão da partícula
b – menor dimensão da partícula
c – dimensão intermediária da partícula

Fonte: Autora, “adaptado de” Cremasco, 2012

3.3.3. Rugosidade

Segundo Taylor; Carrano; Kandlikar (2006), rugosidade é definida como "as irregularidades mais finas da textura da superfície que são inerentes aos materiais ou processo de produção".

Assim, a rugosidade influencia as forças de atrito e as interações entre partículas. Ou seja, quanto mais rugosa for a superfície da partícula, maior a força de atrito, pior será a taxa de transferência de calor, enquanto que, quanto menos rugosa a superfície da partícula, menor será o atrito e mais eficiente será a transferência de calor (RIVAS, 2012).

Não é possível prever o efeito exato da rugosidade na fluidez dos sólidos particulados, porém, Dierich e Nikrityuk (2013) afirmam que há grande influência em regimes de fluidização turbulentos, fazendo com que o coeficiente de transferência de calor e o número de Reynolds sejam diretamente afetados.

3.3.4. Porosidade

Em linhas gerais, a porosidade de um material é dada pela medida dos volumes de vazios (poros) existente num sistema particulado, os quais podem ser classificados em 2 grupos: intraparticulares e interparticulares.

A porosidade intraparticular é definida como a medida dos espaços vazios de uma partícula. Frequentemente, um material é dito poroso quando é possível encontrar um “caminho” de um lado para o outro deste, sendo que esses “caminhos”, chamados de poros, podem ser totalmente abertos ou vazios, fechados em apenas uma das extremidades (poro obscuro) ou fechados em ambas as extremidades, como é possível observar na Figura 3 (CREMASCO, 2012).

Figura 3 - Tipos dos poros de uma partícula

Fonte: Cremasco, 2012

Já a porosidade interparticular consiste na porosidade do leito, ou seja, nos espaços vazios que se encontram entre as partículas.

Assim sendo, entende-se por volume de vazios a medida referente ao volume dos espaços entre as partículas de um leito (porosidade interparticular), sendo que a porosidade do leito se dá pela relação entre esse volume de vazios e o volume total da amostra e pode ser calculada através da Equação (1)

$$\epsilon_{leito} = \frac{volume\ de\ vazios}{volume\ de\ vazios + volume\ de\ sólidos} \quad (1)$$

Esta é uma importante característica para o fluxo de fluidização do sistema, pois considera os sistemas de poros os caminhos pelo qual o ar permeia o leito.

3.3.5. Densidade (Massa Específica)

Segunda Rivas (2012), quando um pó preenche um recipiente de volume conhecido *V* e a massa do pó é *m*, então a densidade aparente do leito (densidade *bulk*) é *m/V*. No entanto, se o recipiente for colidido contra uma superfície, o pó se assentará deixando um espaço vazio superior, portanto, seria necessário adicionar mais pó para completar o volume do recipiente. Se a massa agora preenchendo o vaso for *m'* então a densidade aparente será *m'/V* > *m/V*.

Claramente, a mudança na densidade foi causada pela influência da fração de volume não ocupada por uma partícula, a porosidade. A densidade aparente é, portanto, a massa de partículas que ocupa um volume unitário de um leito, enquanto a porosidade é definida como o volume dos vazios dentro do leito dividido pelo volume total do leito (RIVAS, 2012).

Estas duas propriedades estão de fato relacionadas através da densidade de partículas em que, para um volume unitário do pó a granel, deve haver o seguinte balanço de massa, conforme Equação (2).

$$\rho_b = \rho_s(1 - \epsilon) + \rho_a\epsilon \quad (2)$$

Onde ρ_b é a densidade aparente do leito, ρ_s é a densidade das partículas, ϵ é a porosidade e ρ_a é a densidade do ar. Como a densidade do ar é pequena em relação à densidade do pó, ela pode ser desprezada e a porosidade pode ser calculada simplesmente conforme Equação (3).

$$\epsilon = \frac{\rho_s - \rho_b}{\rho_s} \quad (3)$$

A Equação (3) fornece a porosidade do leito (porosidade *bulk*) e, se isso inclui ou não os poros dentro das partículas, depende da definição da densidade de partículas usada em tal avaliação (RIVAS, 2012).

3.4. INTERAÇÕES INTERPARTICULARES

As forças de atração entre partículas sólidas podem ser caracterizadas por dois parâmetros, adesão e coesão, e podem ser explicadas como a atração entre duas partículas a qual é produzida pela ação de forças intermoleculares que atuam à curta distância (BAIÃO, 2018).

Assim, a coesão é definida pelas interações entre as partículas que constituem o leito, independentemente de sua estrutura química e tamanhos similares, enquanto que a adesão, por sua vez, é definida como as interações entre as partículas do leito e diferentes estruturas sólidas, como paredes e acessórios móveis dos equipamentos de processamento (PODCZECK; NEWTON; JAMES, 1995).

Condotta (2005) afirmou que um pó coeso é um material que não escoa livremente, ou seja, as interações interparticulares são mais atuantes do que o efeito da força gravitacional na partícula e que, portanto, não flui ou apresenta grande resistência em fluir pela ação da gravidade

Os principais tipos de forças entre partículas são descritos a seguir.

3.4.1. Forças de Van der Waals

São forças de atração molecular (intermoleculares), presentes em todos os sólidos e mais fracas que as ligações primárias (covalente, metálicas e iônicas). As três forças de Van der Waals são: dipolo-dipolo induzido (moléculas apolares); dipolo-dipolo (moléculas polares); e ligações de hidrogênio (quando o hidrogênio de uma molécula se liga a outros átomos fortemente eletronegativos).

Hamacker (1937) *apud* Campos (2012) apresentou uma equação para estabelecer a força de Van der Waals entre duas partículas (Equação (4)).

$$F_{vw} = \frac{H(d_1 d_2)}{12a^2(d_1+d_2)} \qquad (4)$$

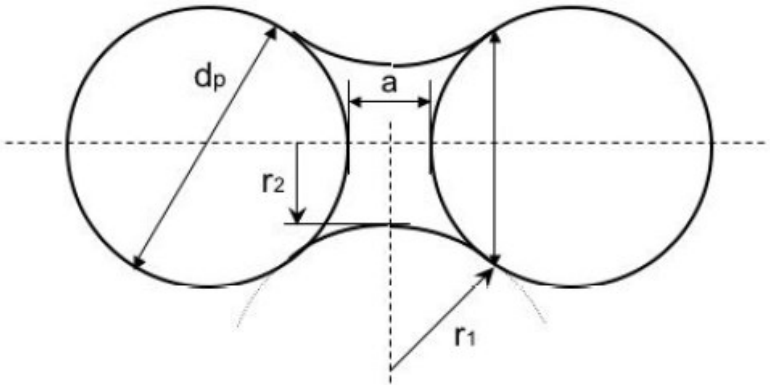
Onde H é a constante de Hamacker (que varia entre 10^{-20} e 10^{-19} Joules), d_1 e d_2 são os diâmetros das partículas e a a distância de separação efetiva entre as superfícies de duas partículas (CONDOTTA, 2005).

3.4.2. Pontes Líquidas

A presença de um líquido entre as partículas pode ser o resultado não apenas da absorção de umidade por materiais higroscópicos, mas também em dissolução das partículas, reações químicas que liberam líquido, liberação de umidade durante a cristalização e umidificação acidental de pó ou equipamento (JULIANO; BARBOSA-CÁNOVAS, 2010).

Condotta (2005) esclarece que quando a superfície das partículas é molhada por uma certa quantidade de líquido haverá um tipo de interação chamada ponte líquida (ou força capilar). Essa interação é caracterizada pela presença de um menisco que liga duas partículas promovendo a coesão, sendo que quanto mais viscoso for o líquido, mais forte serão as forças coesivas, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Menisco líquido entre duas partículas esféricas idênticas



Fonte: Condotta, 2005

A força de interação entre as partículas possui dois componentes, o componente axial da tensão superficial da interface sólido/líquido/gás e a força resultante da pressão hidrostática do menisco (SEVILLE; TUZUN; CLIFT, 1997). A força capilar é então estimada conforme Equação (5).

$$F_{cap} = 2\pi r_2 \gamma + \pi r_2^2 \Delta P \quad (5)$$

Onde γ é a tensão superficial do líquido e ΔP é o termo devido à pressão capilar negativa no interior do menisco. Para líquidos completamente umectantes, o valor máximo da força capilar é observado para partículas esféricas lisas, quando essas partículas estão em contato direto, como mostrado na Equação (6).

$$F_{cap} = \pi \gamma d_P \quad (6)$$

Quando as partículas são separadas por uma distância a, a força de adesão da ponte líquida é menor e é proporcional à quantidade de líquido e ao tamanho das partículas (CONDOTTA, 2005).

Uma pequena quantidade de líquido já altera drasticamente as propriedades físicas em meios granulares, assim, as pontes líquidas são os mecanismos mais importantes nesse processo, onde forças atrativas intensas são desenvolvidas entre as partículas.

A saturação dos grãos no líquido muda com o teor de ligante (estado de hidratação) do meio. Essa saturação ocorre em seis etapas (Figura 5), diferenciadas pela taxa de saturação (S), definida como a porcentagem do volume líquido intersticial ocupado (SEVILLE; TUZUN; CLIFT, 1997).

Figura 5 – Evolução das etapas de saturação dos grãos

Estado 1 Estado 2 Estado 3 Estado 4 Estado 5 Estado 6

Fonte: Seville; Tuzun; Clift, 1997.

- Estado 1: Estado teórico – Partículas completamente secas;
- Estado 2: Uma quantidade muito pequena de líquido é adsorvida na superfície das partículas, não há acúmulo significativo de fluido em um local específico. Este estado pode ser alcançado, por exemplo, pela condensação

atmosférica, onde uma camada de água é adsorvida na superfície das partículas;

- Estado 3: Estado Pendular – A quantidade de líquido na superfície começa a se tornar significativa e a formação de pontes líquidas está se desenvolvendo no ponto de contato entre as partículas. Esse estado é caracterizado por uma taxa de saturação S < 25%;
- Estado 4: Estado Funicular – É um estado de transição entre o estado pendular e capilar. Os meniscos de fluido podem coalescer e os espaços interparticulares são parcialmente saturados;
- Estado 5: Estado Capilar - Todos os meniscos coalescem e a totalidade do espaço intersticial é preenchida com líquido. Os grânulos são mantidos juntos por sucção na interface líquido-ar na superfície do grânulo. Esse estado é caracterizado por uma taxa de saturação S > 80%;
- Estado 6: Estado de Gota - As partículas não estão em contato umas com as outras, elas são encontradas na superfície ou no interior da gota. As gotas têm uma baixa resistência. Se o líquido não estiver molhando em direção ao pó, pode haver uma condição de pseudo-queda ou ar preso dentro.

3.4.3. Pontes Sólidas

São os tipos de interações mais fortes que existem e podem ocorrer por diferentes origens: por transferência de massa, pelo processo de fusão-recristalização ou sublimação-recristalização, que levam novamente a um transporte líquido de matéria, quando a partícula estiver próxima do seu ponto de fusão ou ainda por dissolução na umidade e recristalização (CONDOTTA, 2005).

3.4.4. Forças Eletrostáticas

Existem também as interações do tipo eletrostáticas, neste caso, as partículas podem acumular cargas elétricas, levando a interações tanto repulsivas quanto atrativas (CAMPOS, 2012).

A aplicação industrial onde esse fenômeno é verificado com maior frequência é o transporte pneumático, processo no qual temos muitas colisões partícula-partícula e partícula-parede, gerando um grande acumulo de carga elétrica. Se o pó se torna

muito carregado, pode haver risco de descarga elétrica, levando até a explosão, se o material for orgânico (CONDOTTA, 2005).

3.5. UMIDADE

Ganesan, Rosentrater e Muthukumarappan (2008) concluíram que em meio a todos os parâmetros que afetam o armazenamento e o fluxo de um material, a umidade é um dos fatores chave, pois influencia fortemente no crescimento microbiano. Além disso, a maioria dos materiais orgânicos tem natureza higroscópica, e ganham ou perdem umidade quando expostos a determinadas condições ambientais.

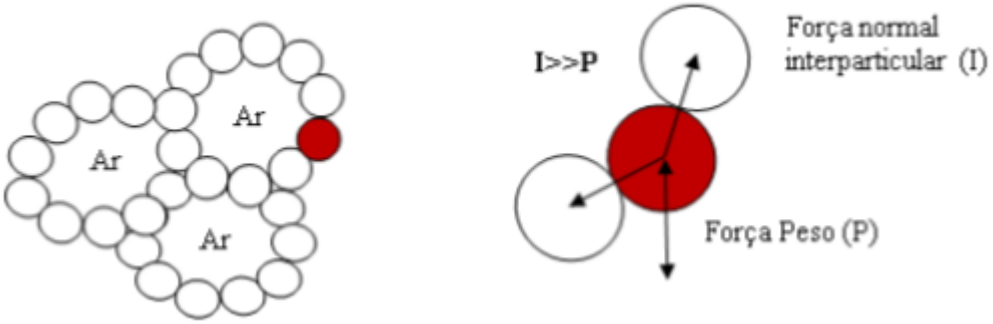
Além disso, a sorção de umidade é frequentemente associada ao aumento da coesão, principalmente pela formação de pontes líquidas. Sendo assim, à medida que o teor de umidade de um pó aumenta, mesmo sendo uma pequena mudança, a adesão e a coesão tendem a aumentar e causar mudanças substanciais nas propriedades de fricção do material (MOREYRA; PELEG, 1981).

3.6. LEITOS DE PARTÍCULAS

Uma vez apresentadas as propriedades individuais das partículas e suas interações, um leito apresentará propriedades *bulk* semelhantes as das suas partículas, assim, são apresentadas as propriedades dos leitos de partículas.

É de conhecimento geral que em leitos formados por partículas menores que 100 µm a formação de aglomerados seja mais pronunciável (LUMAY et al. 2012; KRANTZ; ZHANG; ZHU, 2009). Isso porque as forças interparticulares, quando somadas, não são superadas pela força peso (*P*) que atua na partícula. Estes aglomerados acabam apresentando espaços constituídos de ar no seu interior (Figura 6), o que confere ao leito uma menor densidade aparente.

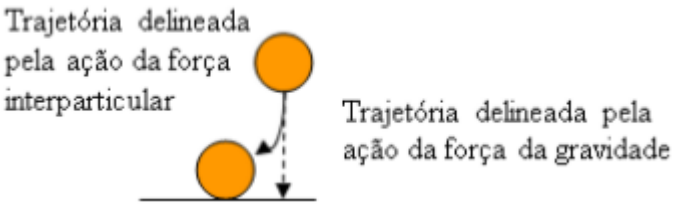
Figura 6 - Aglomerados de partícula



Fonte: Baião, 2018

Segundo Baião (2018), isso se deve ao fato de as partículas serem leves e a força gravitacional atuante em uma única partícula não consegue vencer as forças interparticulares (*I*). Assim, quando inserida num leito monodisperso, a partícula se aglomera aleatoriamente antes de completar sua trajetória, imposta pela força gravitacional (Figura 7). Porém, esse fenômeno também ocorre após qualquer alteração no estado estacionário do leito.

Figura 7 - Trajetória da partícula



Fonte: Baião, 2018

Baião (2018) afirma ainda que quando adicionamos novas partículas a um leito a formação de aglomerados é bastante provável. Com isso, dois eventos podem ocorrer: os aglomerados podem vencer as forças interparticulares, que serão formadas com sua adição, e se desfazer ou podem se realocar, construindo novas interações.

Deste modo, qualquer agente externo, por menor que seja, pode modificar a configuração do leito, se vencer alguma força interparticular, com isso, a fluidização ocorre de forma descontínua, à medida que as forças são vencidas novas forças são criadas, fazendo com que a movimentação do leito se assemelhe a quebra ou avalanche.

3.7. FLUIDIZAÇÃO

A fluidização é uma operação unitária que transforma um leito de partículas sólidas em uma massa suspensa, apresentando propriedades de um líquido em ebulição. Ocorre quando um fluxo de fluido ascendente, através do leito de partículas, adquire velocidade suficiente para suportar as partículas sem arrastá-las junto com o fluido (VIEIRA, 2012).

A fluidização é empregada principalmente na secagem, mistura e revestimento de partículas, aglomeração de pós, aquecimento e resfriamento de sólidos, congelamento, entre outras aplicações.

Segundo Kunni e Levenspiel (1991), se um fluido é passado ascendentemente através de um leito de partículas finas, como mostrado na Figura 8 (a), a uma baixa taxa de fluxo, o fluido simplesmente percola através dos espaços vazios entre as partículas estacionárias, o chamado leito fixo. Com um aumento na taxa de fluxo, as partículas se afastam e algumas vibram e se movem em regiões restritas. Este é o leito expandido.

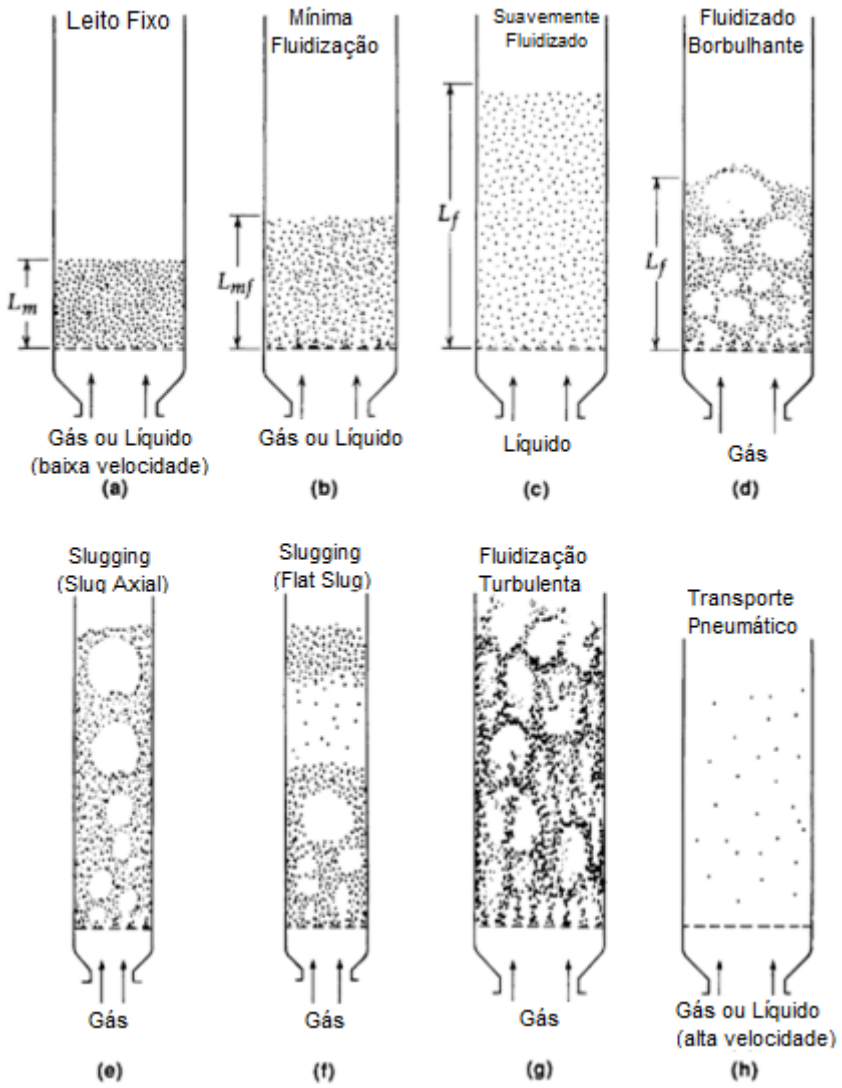
A uma velocidade ainda mais alta, é alcançado um ponto onde todas as partículas são suspensas pelo gás ou líquido que flui ascendentemente. Nesse ponto, a força de atrito entre a partícula e o fluido apenas contrabalanceia o peso das partículas, o componente vertical da força compressiva entre as partículas adjacentes desaparece e a queda de pressão através de qualquer seção do leito é igual ao peso do fluido e das partículas nessa seção, o leito é considerado apenas fluidizado e é referido como leito fluidizado incipiente ou leito em mínima fluidização, conforme mostrado na Figura 8 (b) (KUNNI; LEVENSPIEL, 1991).

Em sistemas sólido-líquidos um aumento na taxa de fluxo, acima da fluidização mínima, geralmente resulta em uma expansão suave e progressiva do leito. Instabilidades de vazão bruta são amortecidas e permanecem pequenas, e heterogeneidade, ou vazios em grande escala de líquido, não são observados sob condições normais. Um leito como este é denominado leito fluidizado particulado, leito homogeneamente fluidizado ou leito suavemente fluidizado; conforme consta na Figura 8 (c).

Em geral, os sistemas sólido-gás se comportam de maneira bastante diferente. Com um aumento na taxa de fluxo além da fluidização mínima, grandes instabilidades com borbulhamento e canalização de gás são observadas. Em taxas de fluxo mais

altas, a agitação se torna mais violenta e o movimento de sólidos se torna mais vigoroso. Além disso, o leito não se expande muito além de seu volume com mínima fluidização. Tal leito é denominado leito fluidizado agregativo, leito fluidizado heterogêneo ou leito fluidizado borbulhante, como mostra a Figura 8 (d).

Figura 8 - Diferentes tipos de leito



Fonte: Kunni e Levenspiel, 1991

Em alguns casos raros, os sistemas líquido-sólido também se comportam como leitos borbulhantes. Isso ocorre apenas com sólidos muito densos fluidizados por líquidos de baixa densidade.

Ambos os leitos fluidizados, de gás e líquido, são considerados leitos fluidizados de fase densa desde que haja um limite superior claramente definido ou superfície para o leito (KUNNI; LEVENSPIEL, 1991).

Em sistemas sólido-gás, as bolhas de gás coalescem à medida que sobem, em um leito de diâmetro pequeno o suficiente, e podem eventualmente tornar-se grandes o suficiente para se espalharem pelo vaso. No caso de partículas finas, elas fluem suavemente para baixo pela parede ao redor do vazio crescente de gás. Chamado de *slugging*, com *slugs* axiais, como mostrado na Figura 8 (e).

Para partículas com diâmetros maiores, a parte do leito acima da bolha é empurrada para cima, como um pistão. Partículas caem do *slug*, que finalmente se desintegra. Mais ou menos, ao mesmo tempo, outro *slug* se forma e esse movimento oscilatório instável é repetido. Isso é chamado de *flat slug*, mostrado na Figura 8 (f). O *slugging* é especialmente sério em leitos fluidizados estreitos e longos (KUNNI; LEVENSPIEL, 1991).

Quando partículas finas são fluidizadas a um fluxo de gás suficientemente alto, a velocidade terminal dos sólidos é excedida, a superfície superior do leito desaparece, as partículas são arrastadas e, em vez de bolhas, observa-se um movimento turbulento de aglomerados sólidos e vazios de gás de vários tamanhos e formas, chamado leito fluidizado turbulento, mostrado na Figura 8 (g).

Com um aumento adicional na velocidade do gás, os sólidos são arrastados pelo gás para fora do leito. Neste estado, temos um leito fluidizado de fase dispersa, diluída ou pobre com transporte pneumático de sólidos, como na Figura 8 (h).

3.8. FLUIDEZ DE MATERIAIS PULVERULENTOS

Segundo Campos (2012), quando estudamos a escoabilidade (ou fluidez) dos materiais particulados, usualmente, os classificamos sob três perspectivas distintas. Na primeira delas, o escoamento do pó é considerado análogo ao de um fluido, na segunda, como um corpo sólido deformado elasticamente e plasticamente e a terceira considera o escoamento como a ruptura mecânica de uma estrutura sólida.

Porém, analisar o escoamento do sólido em analogia com um fluido não é muito aplicável, pois se admite que a escoabilidade não dependa da quantidade de material ou da pressão estática gerada pelo fluido. Assim, é mais coerente considerar a escoabilidade do pó como uma deformação plástica e elástica ou uma ruptura mecânica.

Se um material particulado é submetido à uma tensão contínua, há a deformação elástica quando as partículas são pressionadas umas contra as outras e só retornarão à condição inicial se houver a liberação da tensão (CAMPOS, 2012).

Quando há o aumento da tensão, as forças interparticulares aumentam até certo ponto, e a partir daí, começa a ocorrer o deslizamento das partículas umas sobre as outras, até que o conjunto todo comece a deslizar. Quando isso ocorre, é estabelecido um plano de cisalhamento e toda a estrutura se rompe, dando início ao escoamento. A partir daí a deformação é totalmente plástica, o material se dilata e o escoamento ocorre pelo deslizamento de uma camada de partículas sobre outra (JULIANO; BARBOSA-CÁNOVAS, 2010).

Entretanto, em condições de baixa tensão ou quando as tensões são repentinamente removidas do sistema, as partículas podem se mover pelos fenômenos de rolamento e não deslizamento, o que promove um fluxo muito maior de material do que o previsto. Em processos industriais isso é chamado de efeito "*flooding*".

Assim sendo, a fluidez de um sistema particulado é função do estado de empacotamento das partículas que consistem o leito, geralmente classificando o leito em três classes, aerado, não consolidado e compactado. Ainda, conforme já mencionado, não se pode inferir sobre a fluidez de um material numa determinada condição a partir de resultados obtidos em condições diferentes, em outras palavras, os resultados das diferentes técnicas não são intercambiáveis (HUANG; ZHANG; ZHU, 2010). Os testes e caracterizações devem ser realizados sob condições que simulem com exatidão as condições sob as quais o material estará sujeito no processamento industrial.

Desta forma, encontra-se na literatura uma grande quantidade de trabalhos cujo objetivo é a caracterização das principais propriedades físico-químicas de materiais pulverulentos, no intuito de se avaliar a sua aptidão ao escoamento. Apesar disso, devido à grande diversidade da quantidade de diferentes materiais, dos diferentes tipos de processos e equipamentos industriais e das condições sob as quais os materiais estão sujeitos nestes, uma grande lacuna ainda permanece inexplorada. Entretanto, a maneira com que as propriedades físico-químicas se relacionam qualitativamente entre si acabam sendo o ponto comum destes trabalhos.

Tal afirmação pode ser verificada no estudo de Geldart et al. (1999), o qual infere que o aumento do tamanho das partículas em um leito é sempre acompanhando

do decaimento da coesão desse material, enquanto que amostras dominadas por partículas finas, as forças interparticulares se tornam preponderantes no leito de partículas. Desta forma, foram verificados que leitos constituídos por partículas de baixa granulometria, inferior a faixa de 50-100 µm, exibiram baixas valores de densidades aparentes, dado que aumento da granulometria da partícula diminui gradativamente a influência das forças de van der Waals.

Já Teunou et al. (1999) investigou as propriedades de fluxo em pós alimentares. Diversas propriedades físicas, como densidade da partícula, densidade aparente aerada e isotermas de sorção, foram estudadas para definir as características dos pós. Os efeitos da temperatura e da umidade relativa foram obtidos gerando curvas instantâneas da função fluxo. Como resultado, Teunou et al. (1999) observou que partículas de chá possuem características higroscópicas *in natura* e um menor tamanho de partícula. Assim, conclui-se que chá em pó não flui adequadamente em alta umidade relativa. Já quando o material de estudo foi a farinha de trigo, observou-se que o efeito da umidade relativa não é muito significativo pois a farinha por si só já é um material coeso.

Iqbal et al. (2004) em seu estudo, enfatizou as características das propriedades de fluxo observando o efeito em diferentes cenários de estoque, como umidade relativa, temperatura, entre outros. As amostras estudadas foram farinha (73 µm), chá em pó (25 µm) e soro de leite em pó (98 µm). Os pós foram armazenados em diferentes condições por sete dias, alguns pós se tornaram coesivos devido as características higroscópicas, enquanto que a farinha, por exemplo, manteve seu comportamento, devido a sua característica já coesiva.

Assim, estes dois últimos estudos comprovam que um material “naturalmente” coesivo devido a reduzida granulometria de suas partículas é pouco afetado por um aumento das interações interparticulares aplicadas a este sob a forma de consolidação extra, mas se acentuam no caso de um aumento de umidade.

Emery (2009) estudou o efeito da umidade na fluidez de pós farmacêuticos. O autor objetivou determinar qual teste de fluidez forneceria resultados mais precisos para determinar o efeito da umidade. Foram utilizadas 4 amostras com diferentes porcentagens de umidades. Os testes estudados foram razão de Hausner, teste de Carr Index, ângulo de repouso e cisalhamento de Jenike. Foi concluído que o teste de cisalhamento de Jenike forneceu o resultado mais preciso para avaliar o efeito da umidade em diferentes amostras mediante quantificação da coesão.

Lumay et al. (2012) mensurou as propriedades de fluxo do carbeto de silício, arroz e farinha em ensaios similares aos de Emery (2009). Como um material granular é um sistema complexo no qual ocorrem as transições de estado, que são: estático, quase-estático e estado dinâmico, os autores propuseram verificar a condição de processo que cada um destes testes é realmente representativos. Foi concluído que é possível prever as condições que o material adquirirá no estado estacionário investigando a altura do leito e o ângulo de repouso.

Já as propriedades do estado quase-estacionário podem ser mensuradas pelas condições do índice de Hausner, sendo que diferentes pós podem ter o mesmo índice de Hausner, mas diferentes dinâmicas de compactação, sendo este um ponto negligenciado em diversos estudos precedentes. Também, foi observado que propriedades que afetam a coesão de pós (granulometria, umidade, morfologia), são vitais na determinação do ângulo de repouso. E, finalmente, foi concluído, mais uma vez, que a coesão é melhor estimada por meio de testes de cisalhamento em diferentes tensões de consolidação, mas não podem ser extrapoladas.

Assim, infere-se que a escoabilidade dos pós é um fenômeno de extrema complexidade e muito influenciado pelas características físico-químicas das partículas, interferindo diretamente no processamento e manuseio destes materiais.

Desta forma, Campos (2012) propôs estudar a influência da natureza química de materiais pulverulentos, utilizando pós orgânicos e inorgânicos. Este estudo consistiu na avaliação da escoabilidade dos pós utilizando critérios quantitativos obtidos a partir de testes de cisalhamento, apontados nos trabalhos precedentes como o teste mais indicado. Como resultado, verificou-se que as propriedades físicas de fato interferem na escoabilidade dos pós, sendo que partículas com maior tamanho médio e menos aglomerados possuem escoabilidade mais fácil, independentemente de sua natureza química.

Leturia et al. (2014) também comparou os diferentes métodos já mencionados para mensurar as diferentes características físico-químicas dos pós. Os autores concluíram que não é possível prever ou classificar as características de um pó apenas com um índice, é necessário executar diferentes testes para se obter o entendimento total do comportamento do pó e, também, o impacto das diferentes condições de armazenamento.

Buratini (2017) por sua vez, estudou o comportamento dos sólidos particulados em sistemas de leito fluidizado avaliando as propriedades físicas dos pós, como

tamanho das partículas e efeito superficial (partículas com e sem revestimento). Foram avaliadas as velocidades mínimas de fluidização com duas metodologias, através do reômetro de pós e do leito fluidizado. Como conclusão verificou-se que compostos finos e com alta coesão são bastante influenciados pelas interações interparticulares. Assim, não é recomendado o uso do leito fluidizado clássico para determinação de velocidade mínima de fluidização dessas amostras, sendo satisfatória a análise de partículas de maior tamanho por essa técnica.

Ji et al. (2017) concluiu em seu trabalho que as forças adesivas são geralmente fonte de diversos problemas de fluxo para sólidos granulados secos com grãos finos. As forças adesivas mais significativas são baseadas nas interações de van der Waals e a intensidade dessas forças depende principalmente do tamanho da partícula e da distância entre as partículas. Quando as distâncias são pequenas, conclui Ji et al. (2017), ou as partículas estão em contato, as interações de Van der Waals exercem larga influência. Assim, as deformações plásticas e rearranjos que ocorrem nos pontos de contato podem aumentar a intensidade das forças adesivas. Além disso, partículas lisas e esféricas tendem a fluir melhor que as partículas rugosas e não esféricas, enfatizando o papel da morfologia e textura das partículas na coesão.

Baião (2018) em seu trabalho, estudou o efeito de agentes lubrificantes nas condições de processo, com o objetivo de desenvolver uma análise com condições de processo mais eficientes. Para tanto, foram caracterizadas experimentalmente diferentes misturas de excipientes farmacêuticos em condições estáticas e na iminência de movimento, avaliou o melhor lubrificante e sua fração mássica e a influência dos excipientes no comportamento de misturas contendo princípio ativo. Como resultado, a autora concluiu que os excipientes farmacêuticos, apesar de suas propriedades físicas diferentes, quando misturados nas corretas proporções adquirem propriedades bem distintas à dos constituintes puros e podem facilitar o processamento de medicamentos. Em outras palavras, as propriedades de uma mistura não podem ser preditas por uma combinação ponderada das propriedades das espécies puras, devendo ser investigadas e determinadas experimentalmente, novamente, nas condições que realmente representem as condições observadas no processamento industrial. Só assim uma fluidez representativa poderá ser estimada.

3.9. EXCIPIENTES NA INDÚSTRIA FARMACÊUTICA

Os excipientes farmacêuticos, também chamados de adjuvantes, são agentes, diferentes do princípio ativo, com funções específicas que viabilizam a obtenção de formas farmacêuticas estáveis e eficazes. Podem possuir diversos objetivos, como fornecer estabilidade física, química e/ou microbiológica, melhorar a disponibilidade do princípio ativo no organismo, entre outros.

Historicamente, eram vistos apenas como suportes para os fármacos, adicionados com o intuito de viabilizar a fabricação do medicamento, sendo substâncias inertes. Porém, esse conceito vem sofrendo alterações. Atualmente os excipientes são acompanhados de funcionalidades que atuam nos aspectos biofarmacêuticos e tecnológicos (PESSANHA et al., 2012).

Muitos problemas operacionais podem ser evitados com a escolha adequada dos excipientes. Para isso, são considerados fatores como propriedades do fármaco, dose, solubilidade, tamanho e forma do excipiente, tamanho da cápsula a ser utilizada, entre outros.

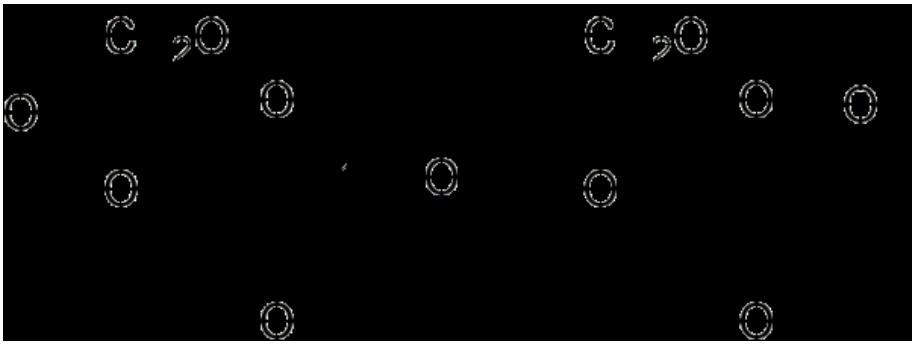
Dentre os diferentes tipos de adjuvantes, os mais comumente utilizados na indústria farmacêutica são a lactose e a celulose microcristalina (geralmente utilizados na proporção 75% de lactose e 25% de celulose). A lactose tem a função de auxiliar na dissolução de fármacos pouco solúveis; já a celulose aumenta a compactabilidade da formulação, o que em casos onde a dose de fármaco é elevada, ajuda a aumentar a densidade aparente do medicamento (VAUTIER, 2011).

Em alguns casos, estes 2 adjuvantes chegam a compreender mais de 75% da massa total do comprimido. Portanto, foram escolhidos os excipientes lactose monohidratada e celulose microcristalina como objeto de estudo desse trabalho.

3.9.1. Lactose

A lactose, também conhecida como açúcar do leite, é um carboidrato de baixa solubilidade (em comparação a outros açúcares) composto por duas moléculas de monossacarídeos, glicose e galactose, ligadas por uma ligação β-1,4-glicosídica (REZENDE, 2018), como mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Molécula de lactose

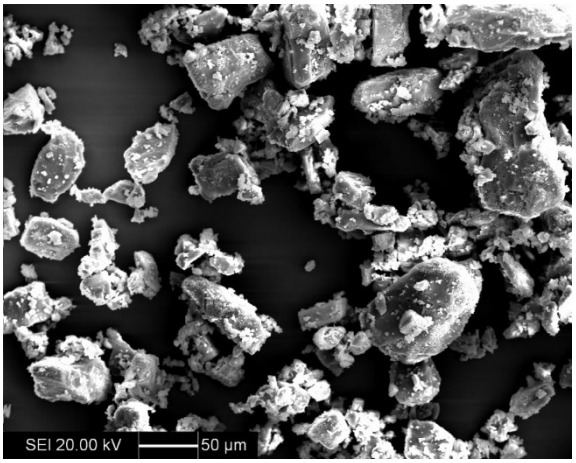


Fonte: Rezende, 2018

A lactose tem uma ampla gama de aplicações, principalmente na indústria de alimentos, por possuir boa textura, cor e doçura. Também, é comumente utilizada na indústria farmacêutica, como excipiente em medicamentos (REZENDE, 2018).

Na Figura 10, pode-se analisar as partículas de lactose monohidratada, observadas a partir de microscopia eletrônica de varredura aumentada 250 vezes.

Figura 10 - Lactose monohidratada

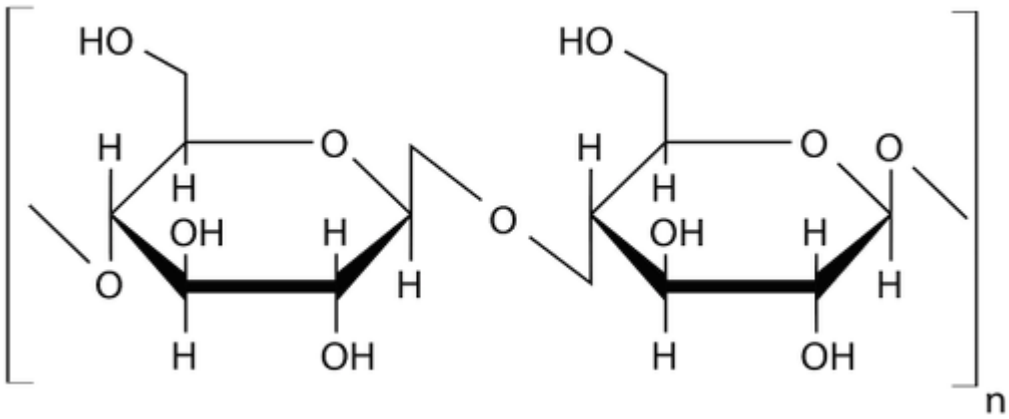


Fonte: Baião, 2018

3.9.2. Celulose

A celulose é uma molécula composta de centenas, e algumas vezes, milhares, de átomos de carbono, hidrogênio e oxigênio, como mostrado na Figura 11. É um composto orgânico que ocorre na forma de polímero natural quando encontrado nas paredes das células vegetais. É formada por duas moléculas de glicose ligadas por pontes β-1,4-glicosídicas (TOVANI BENZAQUEN INGREDIENTES, 2018).

Figura 11 - Molécula de celulose



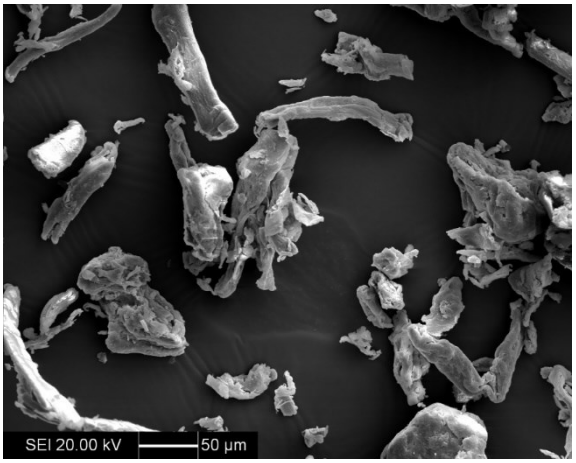
Fonte: Fjaervoll, 2016

Os seres humanos não podem digerir a celulose, mas é importante na dieta como fibra. As fibras ajudam o sistema digestivo, mantendo a comida passando pelo intestino e empurrando os resíduos para fora do corpo. Animais, como vacas, ovelhas e cavalos, podem digerir a celulose, e é por isso que eles podem obter a energia e os nutrientes de que precisam da grama.

A celulose tem muitas aplicações. No algodão, faz roupas como camisetas e jeans. Na fabricação de papel são necessárias grandes quantidades de celulose, obtidas principalmente da madeira (BBC, 2018).

Na Figura 12, pode-se analisar as partículas de celulose microcristalina, observadas a partir de microscopia eletrônica de varredura aumentada 250 vezes.

Figura 12 - Celulose microcristalina



Fonte: Baião, 2018

3.10. PROBLEMATICAS

Atualmente, a administração de fármacos é realizada majoritariamente por via oral, de modo que, os comprimidos se destacam entre as várias formas farmacêuticas devido a ampla comercialização mundial (AULTON, 2005). Considerando suas características, os comprimidos possuem ampla variedade de tamanhos e formatos, facilidade no uso e transporte, além de baixo custo (LACHMANN; LIEBERMAN; KANIG, 2001).

Assim, a indústria farmacêutica tem grande interesse em obter processos eficientes e controlados na fabricação de comprimidos, já que a produção de medicamentos sólidos demanda robustas avaliações de desenvolvimento e elevada complexidade. Além disso, a produção de fórmulas farmacêuticas sólidas é altamente influenciada pelas características físicas da matéria prima, variáveis de processo, força de compressão, entre outros (NÄRVÄNEN et al., 2008).

Com o objetivo de se obter produtos com características adequadas, os comprimidos são forçados a se aproximar através de compressão. Com isso, a coesão das partículas resulta em um material sólido, poroso e com geometria determinada. A morfologia das partículas pode ser modificando a fim de melhorar o processo (AULTON, 2005).

Um importante fator relacionado às partículas é a granulometria, se tornando fundamental para a produção de medicamentos sólidos, pois seu tamanho, forma e uniformidade determinam suas propriedades de fluxo e, consequentemente, a eficiência da mistura e compressão do medicamento, assim como, a solubilidade no organismo e o tempo de dissolução (KAERGER; EDGE; PRICE, 2004).

Um dos problemas enfrentados pela indústria farmacêutica se dá pela dificuldade em caracterizar a mistura de sólidos para a confecção de comprimidos, sendo que quando não há informações corretas sobre as matérias primas, a obtenção de produtos com características apropriadas pode ser implicada (MUZZIO et al., 2003; MATHEWS et al., 2002).

Um exemplo da importância de se conhecer as características dos materiais utilizados é no caso de duas partículas com características reológicas diferentes, porém, quando ambas escoam com facilidade, a depender dos processos de mistura utilizados, pode ocorrer o fenômeno de segregação, onde será possível observar duas

regiões com generalidade de apenas uma matéria prima, comprometendo a eficácia do medicamento (LACHMANN; LIEBERMAN; KANIG, 2001).

Uma outra falha relatada pela indústria farmacêutica que pode ter sua origem na má escolha da matéria prima é o fenômeno de *sticking*, este fenômeno ocorre quando o material a ser comprimido adere-se a matriz compressora durante a ejeção do comprimido, podendo levar a lascas no comprimido e, até mesmo, danos no equipamento. O *sticking* é, principalmente, causado quando são utilizadas matérias-primas que podem amolecer com o calor do processo de compressão, quando é utilizado excesso de lubrificante ou então quando a amostra contém muita umidade (LACHMANN; LIEBERMAN; KANIG, 2001).

A adição de algumas substâncias na formulação pode ajudar a minimizar os problemas no processamento e, principalmente, na compressão. Como por exemplo a adição de substâncias antiaderentes, deslizantes ou agentes lubrificantes, substâncias essas que melhoram o fluxo do material. Porém, é preciso tomar cuidado pois algumas dessas substâncias possuem propriedades coesivas, que as tornam passíveis de serem comprimidas via compressão direta (ALLEN; POPOVICH; ANSEL, 2010).

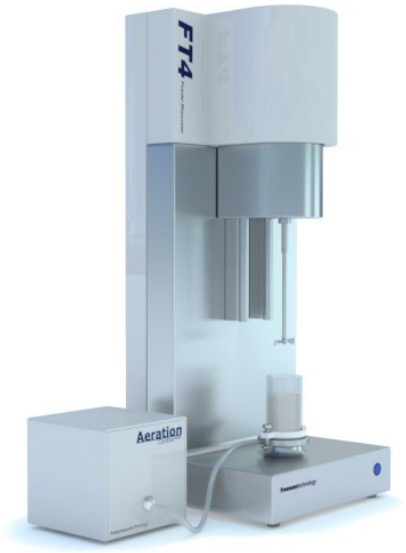
Assim, um importante fator a se considerar na produção do medicamente é a escolha dos excipientes adequados. Para obter um processo eficiente de compressão é recomendado utilizar materiais com evidentes propriedades de fluidez e compressibilidade (HARMON, 2006).

3.11. REÔMETRO DE PÓS

Segundo Freeman Technology (2014), o FT4 *Powder Rheometer*® (Figura 13) foi projetado para caracterizar a reologia, ou propriedades de fluxo, dos pós baseando-se no princípio de mensurar a resistência do pó a um certo agente externo que tenta movimentá-lo, por isso, uma lâmina de precisão, ou rotor, é girada e movida para baixo e para cima através do pó para estabelecer um padrão de fluxo preciso.

Freeman Technology (2014) relata que isso faz com que milhares de partículas interajam ou fluam em relação umas às outras e a resistência experimentada pela lâmina representa a dificuldade desse movimento relativo de partículas, ou as propriedades de fluxo em massa. Quanto mais as partículas resistirem ao movimento e quanto mais difícil for o fluxo do pó, mais difícil será mover a lâmina.

Figura 13 - Reômetro de pós



Fonte: Freeman Technology, 2014

À medida que a lâmina se move através da amostra, o FT4 mede as resistências vertical e rotacional, na forma de torque e força, respectivamente. É importante capturar os dois sinais, pois é o composto desses dois valores que quantificam a resistência total do pó ao fluxo, na forma de energia (FREEMAN TECHNOLOGY, 2014).

Conforme mencionado anteriormente, não é possível extrapolar propriedades de um estado para outro. Assim, o reômetro permite medir a energia necessária para movimentar o pó nos três estados distintos: não-consolidado, consolidado e aerado.

3.11.1. Energia Básica de Fluxo (BFE) e Energia de Fluxo Variável (VRF)

Dois tipos de padrões de fluxo são tipicamente empregados para quantificar a fluidez: Fluxo Forçado (ou confinado), uma medida da fluidez do pó quando forçado a fluir, esta propriedade é definida como energia básica de fluxo (BFE) e é medida durante o movimento descendente da lâmina. O pó é confinado pela extremidade inferior fechada do recipiente de teste (Figura 14) (FREEMAN TECHNOLOGY, 2014).

Figura 14 - Movimento descendente da lâmina

Fonte: Freeman Technology, 2014

Fluxo de baixa tensão (sem confinamento), uma medida da fluidez do pó quando não confinado, esta propriedade é definida como energia específica (SE). Nesta medição, a resistência ao fluxo é medida quando a lâmina passa do fundo do recipiente até o topo. Como não há superfície sólida na parte superior do recipiente, evitando que o pó se dilate e se mova para cima, o pó não é confinado durante este teste (Figura 15) (FREEMAN TECHNOLOGY, 2014).

Figura 15 - Movimento ascendente da lâmina

Fonte: Freeman Technology, 2014

A energia específica (SE) é medida durante o padrão de estabilidade (Rep) ou durante o padrão de estabilidade+energia de fluxo variável (Rep+VRF). É calculado a

partir da energia média necessária durante o movimento ascendente da lâmina dos ciclos de condicionamento 6 e 7, depois dividido pela massa da amostra (FREEMAN TECHNOLOGY, 2008).

Os regimes de fluxo confinado e não confinado são muito diferentes e, por isso, é importante, ao correlacionar dados com o desempenho do processo, identificar qual o regime mais representativo do processo que está sendo considerado (FREEMAN TECHNOLOGY, 2014).

Para a energia de fluxo variável (VRF) são realizados testes em diferentes velocidades da lâmina, com o resultado desses testes é calculado o FRI (Índice de Fluxo Variável), que é definido como a relação entre a energia necessária para movimentar a lâmina no ensaio de menor velocidade de rotação da lâmina e a energia no ensaio de maior velocidade de rotação da lâmina. Com isso podemos classificar os pós quanto a sua sensibilidade à variação de fluxo, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação da fluidez quanto ao FRI

FRI	Classificação	Possíveis Causas
> 3,0	Altamente sensível à variação de fluxo	Alta taxa de coesão
1,5 – 3,0	Sensível à variação de fluxo	Material pulverulento
1,0	Pouco sensível à variação de fluxo	Material com altos diâmetros médios de partículas ou recobertos
< 1,0	Material pseudoplástico ou newtoniano	Pós com aditivos (antiaglomerantes, antiumectantes, etc)

Fonte: Freeman Technology, 2008

Pós coesivos tendem a ser mais sensíveis as alterações de velocidade da lâmina, quando comparados aos materiais não coesivos ou granulares, já que a porosidade do leito é aumentada devido aos aglomerados resultantes da coesão.

3.11.2. Condicionamento

Freeman Technology (2014) reporta que qualquer um que tenha trabalhado com pós saberá com que facilidade eles mudam sua densidade, apenas como resultado de sua manipulação. Transfira-os de um béquer a outro e eles arejam ou bata o béquer numa bancada e observe uma redução no volume à medida que o pó se torna compactado.

Essas mudanças na densidade são consequência de mudanças no estresse aplicado ao pó. A variação no nível de estresse terá um grande impacto na forma como o pó se comporta, dentro de um processo ou aplicação, mas também durante uma medição. Portanto, é essencial garantir que o pó seja preparado para qualquer teste, estabelecendo primeiro uma tensão uniforme no leito do pó e eliminando bolsas de ar ou compactação localizada.

Este passo de preparação é chamado de condicionamento da amostra e é um processo mecânico simples, mas eficaz, projetado para preparar a amostra antes da análise propriamente dita. O processo de condicionamento envolve o deslocamento suave de toda a amostra para soltar e arejar levemente o pó. O objetivo é perturbar e soltar suavemente cada partícula para construir um leito de pó homogeneamente empacotado, removendo qualquer pré-compactação ou excesso de ar e garantindo que os resultados do teste sejam independentes de como o operador manuseia o pó e o coloca no vaso de teste ou das condições do teste anterior.

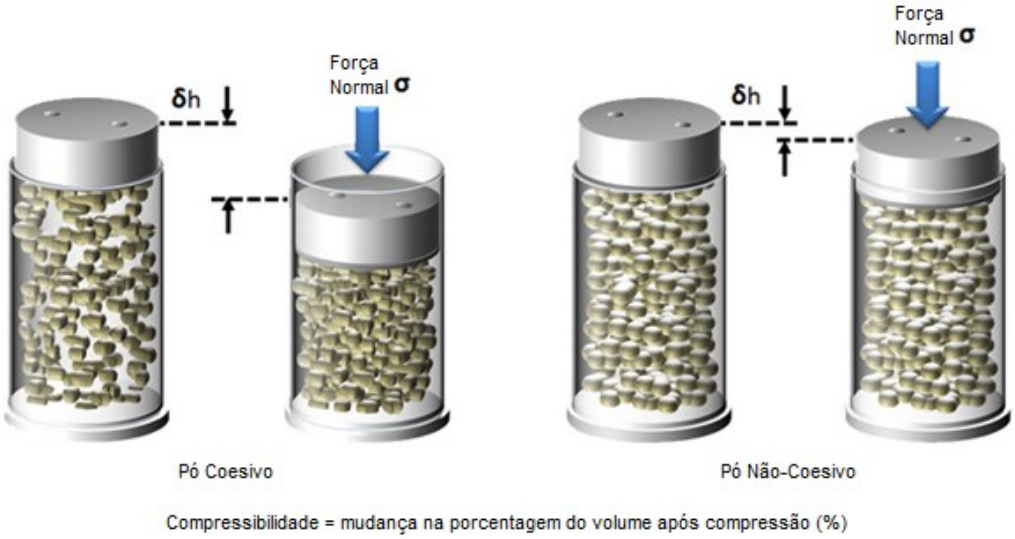
Um ciclo de condicionamento é, geralmente, concluído antes de cada teste, a fim de remover a variabilidade introduzida pelo operador durante o carregamento da amostra e qualquer compactação residual de testes anteriores. A exceção é quando uma amostra intencionalmente consolidada está sendo avaliada, assim, o condicionamento não é empregado (FREEMAN TECHNOLOGY, 2014).

3.11.3. Compressibilidade

A medida da compressibilidade é obtida aplicando-se níveis crescentes de força de compressão com um pistão a um pó condicionado e medindo a variação no volume como uma função da carga aplicada, como mostrado na Figura 16.

O pistão ventilado assegura que o ar preso dentro do pó é capaz de escapar rapidamente, e a alta exatidão do sistema de medição de posição permite uma definição precisa da compressibilidade, expressa como uma variação percentual no volume para uma dada tensão normal aplicada (FREEMAN TECHNOLOGY, 2014).

Figura 16 - Esquema de medição da compressibilidade no reômetro de pós



Fonte: Freeman Technology, 2014

3.11.4. Aeração

A fim de quantificar a influência do ar, um suprimento de ar controlado pode ser introduzido através de uma malha porosa na base da coluna de pó, como pode ser visto na Figura 17. Este método não é apenas para simular processos e aplicações onde o ar é intencionalmente introduzido no pó, como durante o transporte, secagem e em aplicações de inaladores de pó seco, mas também para explorar as forças de coesão que existem entre as partículas.

Figura 17 - Esquema de medição da aeração no reômetro de pós

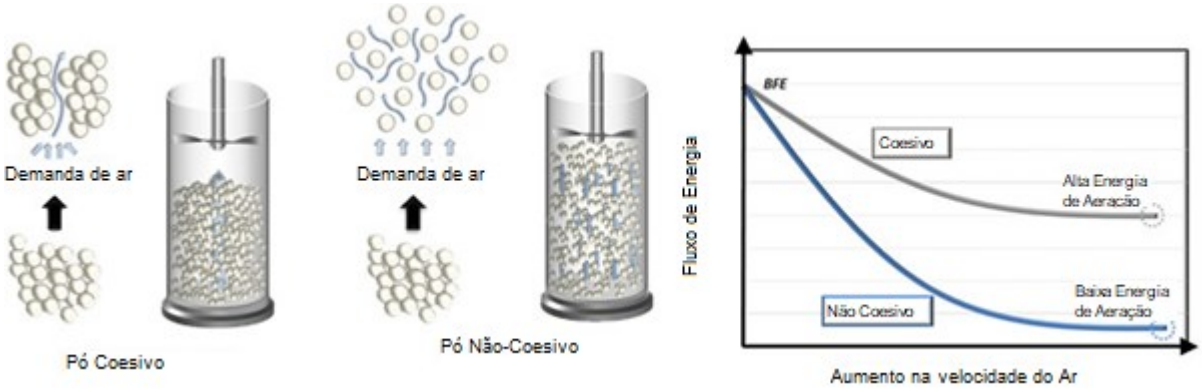
Fonte: Freeman Technology, 2014

As forças coesivas são notoriamente difíceis de medir, mas podem ser quantificadas avaliando como a aeração altera as propriedades de fluxo do pó a granel. Forças coesivas são uma combinação de Van der Waals e eletrostática, e tendem a "unir" as partículas.

A introdução de ar na coluna de pó tenta separar as partículas adjacentes e superar essas forças de coesão. Se as forças forem fracas, cada partícula será mecanicamente separada de seu vizinho e o pó ficará fluidizado. A resistência medida ao fluxo, a energia aerada, quantifica a intensidade das forças coesivas.

Para pós com forças coesivas fracas, a energia aerada tende para zero à medida que o pó se torna totalmente aerado. Os pós com coesão moderada a alta exibirão uma redução na energia de fluxo quando aerados, mas em um grau muito menor (Figura 18).

Figura 18 - Partículas coesivas e não coesivas



Fonte: Freeman Technology, 2014

Nesses pós coesivos, as forças de atração são muito fortes para o ar superar e as partículas não se separam. Em vez disso, um canal é estabelecido no pó pelo qual o ar passa e a energia aerada correspondente permanece relativamente alta, mesmo em elevadas velocidades do ar (FREEMAN TECHNOLOGY, 2014).

3.11.5. Cisalhamento

O teste de cisalhamento é uma técnica muito diferente da usada no teste dinâmico e sempre caracteriza o pó em um estado consolidado (FREEMAN TECHNOLOGY, 2014). Os testes anteriores podem ser classificados como testes

dinâmicos, mas o de cisalhamento é um teste pseudo-estático, já que mede a energia para iniciar o movimento do pó.

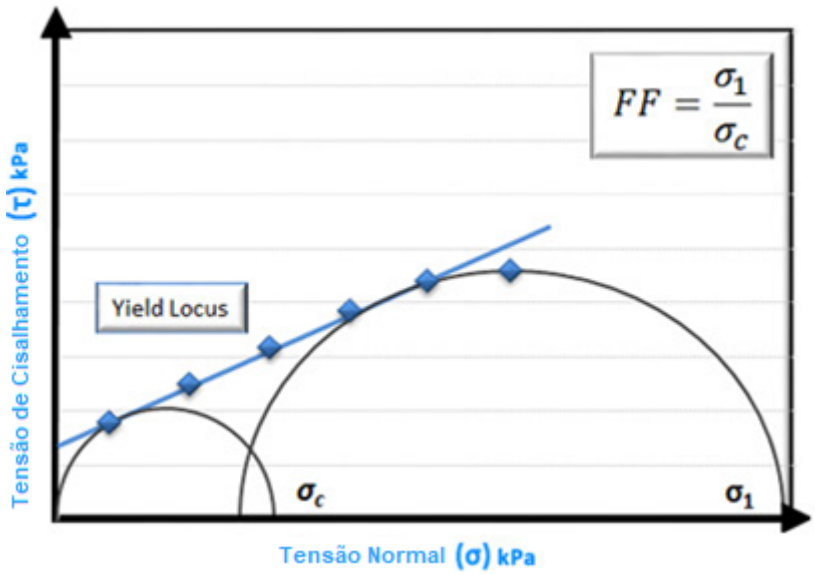
3.11.5.1. Princípios de Funcionamento

Em velocidades muito baixas, uma força de cisalhamento (ou horizontal) é aplicada a uma camada superior de pó enquanto a camada inferior adjacente é impedida de se mover (ou vice-versa). A força continua a aumentar, mas nenhum movimento relativo no plano de cisalhamento ocorre até que a força de cisalhamento seja suficientemente alta para superar a resistência ao cisalhamento do pó, ponto em que o leito de pó 'cede' e a camada superior do pó desliza contra o inferior (FREEMAN TECHNOLOGY, 2014).

Em uma sequência típica de teste de célula de cisalhamento, vários testes de cisalhamento seriam realizados em diferentes níveis de tensão normal. Os dados produzidos representam a relação entre tensão de cisalhamento e tensão normal, que pode ser plotada para definir o ponto de ruptura. Em termos simples, quanto maior a tensão de cisalhamento para uma dada tensão normal, menor a probabilidade de que o pó ceda e comece a fluir quando confinado sob uma tensão de consolidação similar em um funil ou outro vaso (FREEMAN TECHNOLOGY, 2014).

É possível aplicar vários modelos matemáticos a esses dados, mas é importante considerar que, ao fazê-lo, as tendências podem ser exageradas ou reduzidas. Colocar os círculos de tensão de Mohr no *Yield Locus* identifica a tensão principal de consolidação (MPS - *Major Principle Stress*) (σ_1 na Figura 19) a tensão não confinada de deslizamento (UYS - *Unconfined yield strenght*) (σ_c na Figura 19) e a relação entre o primeiro e o segundo chamada função de fluxo, FF. A função de fluxo é um parâmetro comumente usado para classificar a fluidez, com valores abaixo de 4 denotando fluxo ruim e acima de 10, fluxo bom (FREEMAN TECHNOLOGY, 2014).

Figura 19 - Círculos de Mohr e Yield Locus



Fonte: Freeman Technology, 2014

A grande vantagem de se realizar o teste de cisalhamento é que se pode determinar o coeficiente de atrito do material, referente a resistência do movimento das partículas devido ao fenômeno puro de fricção e o conjunto de todas as demais interações interparticulares, a coesão.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir, são apresentados os materiais, metodologias e equipamentos utilizados em cada experimento.

4.1. MATERIAIS

Os materiais utilizados neste trabalho foram disponibilizados pelo laboratório de Engenharia Química do Centro Universitário FEI *campus* SBC, são eles:

- Lactose Monohidratada P.A. – A.C.S. (Synth);
- Celulose Microcristalina P.A. (Synth).

4.2. MÉTODOS

A seguir são descritos os métodos utilizados na caracterização das amostras. Todos os experimentos foram realizados a pressão e temperatura ambiente (aproximadamente 1 atm e 25°C).

4.2.1. Preparo das Amostras

As amostras de celulose e lactose foram caracterizadas puras e, posteriormente, misturadas.

A umidificação das amostras foi realizada adicionando-se a massa de água correspondente a porcentagem desejada e acondicionando a amostras em sacos plásticos hermeticamente fechados (“zip-lock”) durante 1 semana, sendo manuseados todos os dias, de maneira a garantir uma umidade uniforme da amostra. A Tabela 4 apresenta a composição e o teor de umidade das misturas estudadas.

Para facilitar o entendimento, as misturas foram nomeadas no seguinte padrão: XXLYYCZZU, onde XX é a porcentagem de lactose (por isso é seguida da letra “L”), YY a porcentagem de celulose (por isso é seguida da letra “C”) e ZZ a porcentagem de umidade (por isso é seguida da letra “U”).

Tabela 4 - Porcentagens de lactose, celulose e umidade em cada mistura

Mistura	% Lactose	% Celulose	% Umidade
35L65C0U	35	65	0,00
50L50C0U	50	50	0,00
65L35C0U	65	35	0,00
35L65C5U	35	65	5,00
50L50C5U	50	50	5,00
65L35C5U	65	35	5,00
35L65C8,75U	35	65	8,75
50L50C8,75U	50	50	8,75
65L35C8,75U	65	35	8,75
35L65C12,5U	35	65	12,50
50L50C12,5U	50	50	12,50
65L35C12,5U	65	35	12,50
35L65C20U	35	65	20,00
50L50C20U	50	50	20,00
65L35C20U	65	35	20,00
35L65C27,5U	35	65	27,50
50L50C27,5U	50	50	27,50
65L35C27,5U	65	35	27,50

Fonte: Autora, 2019

4.2.2. Caracterização das Amostras

A seguir são apresentadas as metodologias utilizadas para a caracterização das amostras.

4.2.2.1. Análise Granulométrica

Para a análise granulométrica foi utilizado o analisador de tamanho de partículas por difração à laser MicroTrac, modelo BlueWave. As análises dos diâmetros médios das partículas de celulose e lactose foram realizadas em duplicata, utilizando via úmida com etanol anidro como dispersante, sem uso de aditivo e sem ultrassom, utilizado para evitar a formação de aglomerados de partículas. Como resultado, o equipamento forneceu as curvas de distribuição de tamanho das partículas e o valor do diâmetro médio volumétrico da amostra.

4.2.2.2. Umidade

Para os testes de umidade das misturas de celulose e lactose foi utilizado o analisador de umidade por infravermelho Gehaka, modelo IV2000. As análises foram realizadas em duplicata, a 70°C e tiveram a duração de 99 minutos. Como resultado, é mostrada a porcentagem de umidade no *display* do equipamento, em base úmida.

4.2.2.3. Massa específica real

A massa específica das amostras de lactose e celulose secas foram determinadas através do picnômetro a gás Hélio AccuPyc II 1340, marca Micromeritics. Inicialmente, o equipamento realiza 100 purgas na amostra, com o objetivo de remover todo o ar presente e não alterar os resultados devido a presença de espaços vazios na amostra. Após as purgas, o picnômetro executa um total de 10 análises de massa específica e fornece o valor médio real das partículas e o desvio padrão.

4.2.3. Testes realizados no reômetro de pós FT4

A seguir são descritos os testes de caracterização realizados utilizando o Reômetro de Pós FT4, disponível no laboratório de Engenharia Química do Centro Universitário FEI, *campus* SBC. A metodologia praticada seguiu o manual do equipamento (*User manual, FT4 Powder Rheometer*), o qual será brevemente explanado. Os testes foram realizados com todas as amostras, pelo menos em duplicata.

4.2.3.1. Energia Básica de Fluxo (BFE) e Energia de Fluxo Variável (VRF)

A energia básica de fluxo (BFE) é a energia requerida para estabilizar um padrão de fluxo específico em uma dada condição, com um volume preciso de pó. Esse padrão de fluxo se caracteriza pelo movimento descendente e anti-horário da lâmina, gerando uma compressão e uma alta taxa de tensão no sólido particulado.

A BFE é calculada a partir do trabalho executado no movimento da lâmina pelo leito de partículas do topo do vaso até a base, durante a descida. A BFE pode ser

muito útil como ferramenta para quantificar o efeito de diversas variáveis, como quantidade de aditivo de fluxo, efeito de umidade, ponto final de granulação, etc.

Já, na energia de fluxo variável (VRF), os pós são manipulados e movidos através do teste de BFE variando a velocidade de descida da lâmina ponto a ponto. Isso porque, até o mais básico sistema, irá requerer que o pó flua a reduzidas taxas em alguns casos e a altas taxas em outros (FREEMAN TECHNOLOGY, 2008).

Para a medição da BFE e VRF, foi colocada uma amostra do sólido no frasco de borossilicato (50 mm de diâmetro e capacidade de 85 mL de volume padronizado) desenvolvido pela Freeman Technology. O frasco é acomodado na base do reômetro, que é essencialmente uma célula de carga, e permite a determinação da densidade aparente das amostras.

Em seguida, a lâmina torcida de geometria específica e diâmetro de 48 mm é acoplada ao motor do equipamento. O teste inicia-se com a rotação da lâmina no sentido horário e velocidade linear de ponta de lâmina de 100 mm/s e velocidade de descida vertical ao longo do frasco de 10 mm/s, gerando compressão e alta taxa de tensão no material.

A energia básica de fluxo é calculada a partir do trabalho realizado pela lâmina para movimentar o material no sentido de descida, onde o material é confinado e obrigado a fluir, devido ao movimento da lâmina de pressiona-lo contra o fundo do recipiente.

A fim de obter um valor confiável de energia básica de fluxo, realiza-se o chamado teste de estabilidade, o qual consiste em repetir o teste de BFE algumas vezes no intuito de assegurar que as propriedades do material em escoamento não sejam devido a instabilidades da amostra: aglomerados, quebras, desaeração. Assim, são realizados sete testes de energia básica de fluxo e o resultado final da BFE é a média entre o 6º e o 7º teste, após qualquer possível instabilidade externar ser descartada.

Após a sequência de testes da BFE, é realizado o teste de energia de fluxo variável (VRF), o qual consiste na mesma lógica da BFE, porém, com quatro valores diferentes para a velocidade rotacional da lâmina, 100, 70, 40 e 10 mm/s, e para a mesma velocidade vertical de deslocamento de 10 mm/s (BURATINI, 2017).

Ressalta-se que entre cada medida de BFE, foi realizada uma etapa de condicionamento da amostra no intuito de se eliminar qualquer tensão residual ocasionada a amostras durante o teste anterior. Tal procedimento é realizado

invertendo o sentido de rotação da lâmina, a qual terá o efeito de aerar a amostra, relaxando suas tensões.

4.2.3.2. Compressibilidade

Compressibilidade é uma medida de quanto a densidade muda em função da força normal aplicada. Para pós, essa propriedade aparente é influenciada por vários fatores, como distribuição de tamanho das partículas, coesão, rigidez, forma das partículas e textura superficial.

Esta propriedade não está diretamente ligada com a fluidez, mas, mesmo assim, refere-se a muitas etapas dos processos, como armazenamento em funis ou sacos ou comportamento durante a compactação por rolos, por exemplo (FREEMAN TECHNOLOGY, 2008).

Para o teste de compressibilidade a amostra é colocada no frasco de borossilicato com capacidade de 85 mL. O frasco é acomodado no reômetro e a lâmina inserida no compartimento. Iniciado o ensaio, a amostra passa pelo pré-condicionamento, onde a lâmina rotaciona em sentido horário em movimento descendente.

Após o pré-condicionamento, a lâmina é substituída por um pistão ventilado que permite a passagem de ar por entre sua base. Posteriormente, o pistão realiza a compressão do material no frasco com diferentes valores de força aplicada (0,5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 e 15 kPa).

O resultado do teste é apresentado como um gráfico de porcentagem de compressão (%) por pressão normal aplicada (kPa).

4.2.3.3. Aeração

As propriedades aparentes de todos os pós são afetadas pela passagem de ar em certa medida, uma vez que o espaço entre as partículas esteja cheio de ar. A quantidade de ar presente influencia em como as partículas interagem umas com as outras e o impacto direto sobre as propriedades de fluxo.

Alguns pós são prontamente aeráveis e só precisam de uma pequena quantidade de ar para transformar o leito de partículas em um leito fluidizado, no qual

o pó se comporta como fluido e requer apenas uma pequena quantidade de energia para produzir fluxo.

Pós coesivos geralmente não são prontamente aeráveis, embora eles ainda possam ter propriedades de fluxo aprimoradas pelo aumento do nível de entrada do ar.

O teste de aeração introduz ar na base da coluna de pó e quantifica como isso modifica as propriedades do fluxo, mensurando a redução na energia do fluxo. O quanto a energia será reduzida depende de muitas propriedades físicas, como coesão, forma da partícula, textura e densidade.

A fluidização só é possível se as forças coesivas entre as partículas forem relativamente baixas. Outras propriedades físicas como forma da partícula, textura da superfície, distribuição de tamanho e densidade da partícula também influenciam em quão efetivamente o pó se tornará aerado, porém, a coesão é frequentemente o fator mais importante.

Uma percepção comum de "boa" fluidez é aquela exibida por um pó que, quando colocado em uma garrafa e invertendo-a, flui suavemente, partícula por partícula. A fluidez "ruim" é frequentemente um termo dado a pós que fluem em pedaços ou aglomerados e não fluem quando a garrafa é invertida (FREEMAN TECHNOLOGY, 2008).

Para o teste de aeração a amostra é colocada no frasco de borossilicato com capacidade de 160 mL, onde é acoplada uma base porosa que permite a passagem de ar pela coluna de pó. Iniciado o ensaio, a amostra passa pelo condicionamento, onde a lâmina rotaciona em sentido horário em movimento descendente. Após o condicionamento, é iniciado o teste de aeração, variando a velocidade do ar injetado na coluna. A cada variação, é medida a energia total das partículas.

Como resultado, é apresentado um gráfico da energia necessária para a lâmina movimentar o pó em função da velocidade do ar em fluxo ascendente. A partir dos resultados do gráfico é possível obter a velocidade mínima de fluidização, quando a energia se aproxima de zero ou é mantida em um valor constante, sendo que a energia tende a estabilizar devido ao equilíbrio entre as forças gravitacionais e coesivas (BURATINI, 2017).

Para classificar os pós como coesos ou não, Freeman Technology (2008) indica o cálculo da razão de aeração (AR), Equação (7), e a classificação conforme a Tabela 5.

$$AR = \frac{Energia\ no\ início\ do\ teste}{Energia\ no\ último\ ponto\ do\ teste} \quad (7)$$

Tabela 5 - Classificação dos sólidos segundo Freeman.

Razão de Aeração (AR)	Classificação
1,0	Coesos
2 < AR < 20	Típicos
AR >> 20	Não coesos

Fonte: Freeman Technology, 2008

4.2.3.4. Cisalhamento

As propriedades de cisalhamento são importantes para a compreensão da facilidade com que um pó previamente consolidado começará a fluir. Em todos os processos e ambientes de armazenamento o material particulado será submetido a tensões de consolidação, o que causa mudanças na sua densidade e forças interparticulares mecânicas.

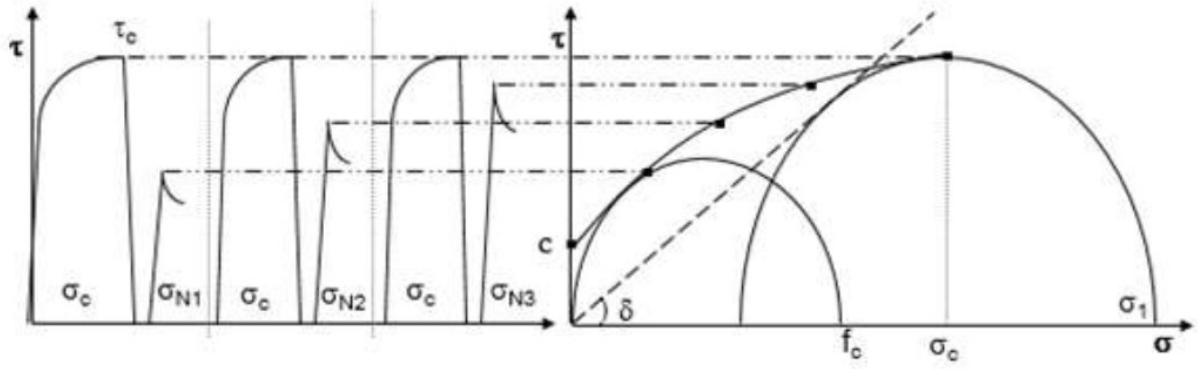
Para que o fluxo ocorra, é necessário que o ponto de ruptura (*Yield Locus*) do leito de partículas seja superado. Propriedades físicas como tamanho, forma e características da superfície geram grande influência no ponto de escoamento, assim como a umidade, que também é um dos fatores decisivos no cisalhamento.

Mensurar as propriedades de cisalhamento fornece informações importantes sobre a fluidez do pó, se este irá fluir através de dutos ou silos ao longo do processo ou se pontes, bloqueios e paradas serão ocasionados (FREEMAN TECHNOLOGY, 2008).

Na Figura 20 estão representados os parâmetros obtidos a partir da construção do plano de ruptura (CAMPOS, 2012):

a) Coesão (c);
b) Tensão confinada de cisalhamento (f_c);
c) Tensão principal de consolidação (σ_1);
d) Tensão normal de consolidação (σ_C);
e) Tensão de cisalhamento de consolidação (τ_c);
f) Ângulo de atrito efetivo (δ).

Figura 20 - Esquema de resultados do teste de cisalhamento e obtenção do plano de ruptura e seus respectivos círculos de Mohr.



Fonte: Condotta, 2005

Para o teste de cisalhamento utiliza-se o frasco de borossilicato com 85 mL de volume e 50 mm de diâmetro, o qual é inserido no reômetro. A lâmina é acoplada ao motor e inicia-se o teste realizando o pré-condicionamento da amostra.

A etapa de pré-condicionamento tem o objetivo de remover quaisquer efeitos externos ou consolidação prévia do leito de partículas e consiste em rotacionar a lâmina no sentido horário.

Em seguida, substitui-se a lâmina pelo pistão ventilado e a amostra deve ser consolidada sob certa tensão normal, equivalente ao pré-cisalhamento, semelhante ao teste de compressão, nivelando a superfície do sólido para posterior utilização da célula de cisalhamento. Assim, após o nivelamento e consolidação da amostra, substitui o pistão pela célula de cisalhamento.

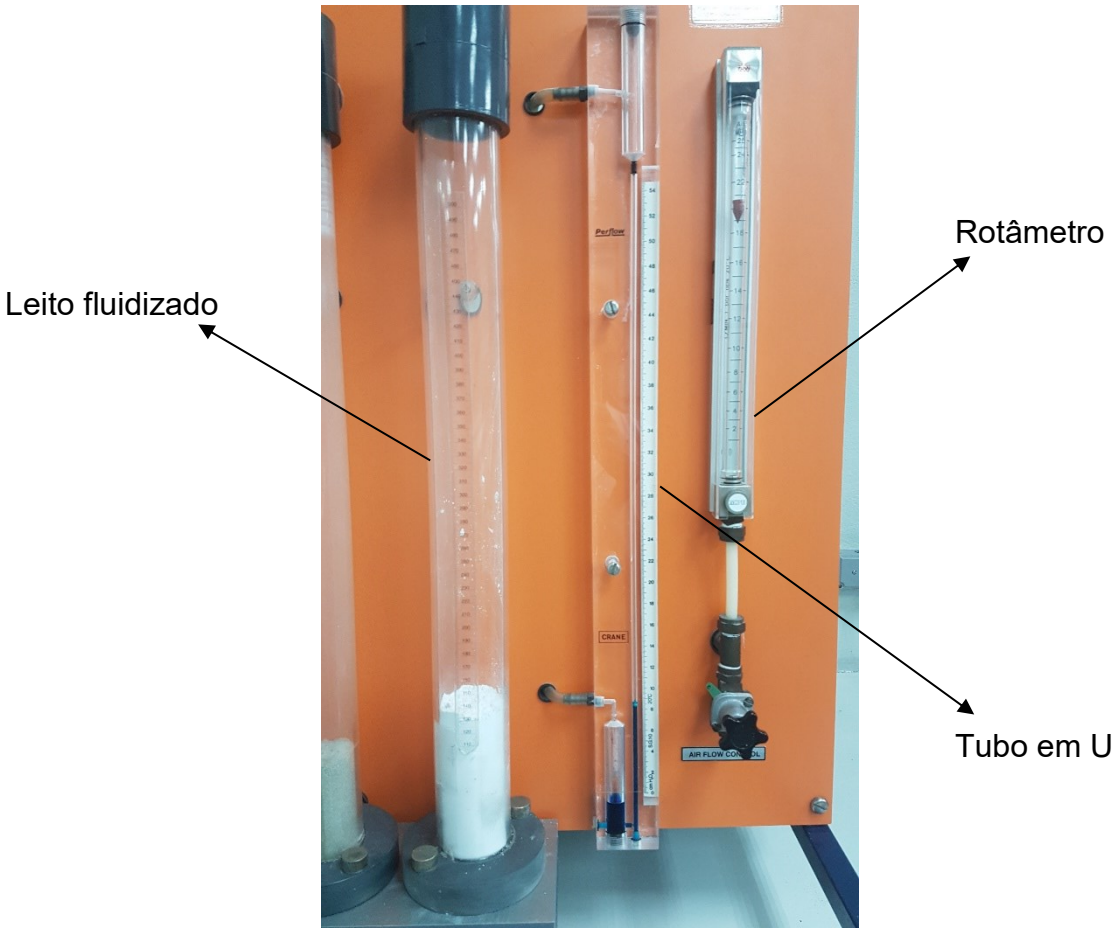
A amostra é então reconsolidada sob o mesmo estado de tensão normal e o teste de cisalhamento é então iniciado. Neste teste a célula aplica uma força normal e de cisalhamento, induzido por uma baixíssima rotação, simultaneamente.

Foram realizados testes de cisalhamento para todas as amostras, na tensão de consolidação de 3, 6, 9 e 15 kPa e com 5 valores inferiores para a determinação do plano de ruptura, referentes a 20, 35, 50, 65 e 80% da tensão de consolidação, no intuito de se obter o plano de ruptura de cada estado de consolidação das amostras.

4.2.4. Leito Fluidizado

Os ensaios de fluidização foram realizados para todas as misturas, em duplicata. Foi utilizado o equipamento didático de fluidização *Fixed and Fluidized Bed* da marca Armfield, constituído de uma coluna de acrílico com diâmetro de 65 mm e comprimento de 1000 mm, um rotâmetro para ajuste da vazão e um tubo em “U” para medição da perda de carga, o equipamento é ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Equipamento de fluidização



Fonte: Autora, 2018

Com a vazão de ar desligada, a amostra foi colocada no leito fluidizado, com o auxílio de um funil, até a altura aproximada de 9 cm. Após esse procedimento, a vazão de ar foi ligada, os dados de perda de carga e altura foram coletados sendo a válvula de controle de fluxo aberta gradativamente a cada 0,5 L/minuto, coletando os dados de perda de carga e altura a cada variação de vazão.

Esse procedimento foi realizado até 6 pontos experimentais acima da expansão visual do leito e estabilidade da perda de carga. Em seguida, a vazão foi reduzida no mesmo intervalo de vazão (0,5 L/min) até fluxo zero, anotando-se a altura e perda de carga na defluidização do leito.

4.2.5. Planejamento Estatístico dos Experimentos

É prática comum na ciência estatística utilizar grandes massas de dados e, para simplificar o seu manuseio, esses dados podem ser descritos através de variáveis dependentes ou independentes (RODRIGUES; IEMMA, 2005). As variáveis independentes (ou preditoras de níveis previamente fixados) podem ser analisadas por esquemas fatoriais, ou seja, a combinação entre os níveis de dois ou mais fatores.

> O estudo de sistemas multivariados se dá por meio de uma técnica denominada planejamento estatístico, um arranjo ortogonal que descreve o espaço experimental escolhido de modo confiável, no qual se consegue variar simultaneamente as variáveis eleitas como independentes, de tal forma que os efeitos mensurados dessas variáveis e de suas interações, numa dada variável dependente, sejam matematicamente independentes além de permitir ajustar os polinômios ortogonais que são necessários para otimizar as variáveis independentes (ALMEIDA et al., 2014, p.35).

Neste trabalho, as frações mássicas de lactose e celulose são variáveis não ortogonais, não sendo possível mantê-las independentes entre si e ao mesmo tempo respeitar a condição do balanço de massa. Com isso, foram utilizadas como variáveis independentes a fração mássica de lactose e a porcentagem de umidade.

Assim, uma metodologia para o processo foi desenvolvida a fim de se avaliar de forma eficiente os efeitos de cada um dos fatores propostos, ou seja, as variáveis independentes (fração mássica de lactose e umidade) sobre as variáveis de resposta (BFE, FRI, SE, CBD, CPS, AE e velocidade mínima de fluidização).

Para a realização deste trabalho, foi proposto um modelo experimental fatorial do tipo 3^2 (duas variáveis independentes com três níveis cada). Os valores das variáveis resposta foram obtidos em duplicata, no intuito de se determinar o erro da técnica de determinação destas grandezas.

Com esse tipo de planejamento é possível determinar os principais efeitos de cada variável independente nas variáveis resposta. Assim, após a definição das variáveis independentes, foram avaliados os efeitos de cada variável, e suas possíveis

interações, a partir da análise dos coeficientes dos polinômios ortogonais ajustados. O nível de significância de cada coeficiente polinomial foi calculado (*p-level*) e comparado com o valor de significância pré-fixado de 0,05, usando o teste de hipótese de *t-student*.

Os coeficientes do polinômio ortogonal e seus respectivos erros padrão (EP) devem ser determinados por meio do processamento dos dados experimentais, no módulo de regressão múltipla, usando o *software Statistica® (v.12)*, disponível no Centro Universitário FEI, o qual deve apresentar uma forma genérica segundo a Equação 7, onde o sub-índice *j* identifica a variável de resposta; R_1 e R_2 representam os fatores codificados; R_1 assume o valor (-1), (0) ou (+1) dependendo do nível do fator fração mássica de lactose e R_2 assume o valor (-1), (0) ou (+1) dependendo da porcentagem de umidade:

$$y_j = \beta_{00_j} + \beta_{10_j}R_1 + \beta_{01_j}R_2 + \beta_{11_j}R_1R_2 + \beta_{20_j}{R_1}^2 + \beta_{02_j}{R_2}^2 + \beta_{12_j}R_1{R_2}^2 + \beta_{21_j}{R_1}^2R_2 + \beta_{22_j}{R_1}^2{R_2}^2 \quad (8)$$

Com o objetivo de avaliar a influência da porcentagem de lactose e do teor de umidade (variáveis independentes) nas variáveis de processo – propriedades físicas das amostras (variáveis dependentes), BFE, FRI, SE, CBD, CPS, AE e velocidade mínima de fluidização, os dados foram alimentados e analisados estatisticamente com o auxílio do s*oftware Statistica (v.12)*.

Entretanto, um planejamento estatístico exige que as variáveis independentes sejam exatas e equidistantes para todas as condições dos experimentos. Entretanto, a umidade é uma variável que impacta diretamente nas propriedades de fluxo das misturas, sendo, portanto, tratada como uma variável independente. Entretanto, há uma certa dificuldade em se reproduzir valores exatos desta, entre as diferentes amostras ensaiadas.

Desta forma, no intuito de se trabalhar com 3 teores de umidade que representassem a totalidade do sistema estudados e que satisfizessem as exigências da metodologia de análise de variância (ANOVA), foram utilizados os teores de umidade teóricos 0; 12,5 e 27,5%, os quais foram alimentados segundo os valores experimentalmente obtidos cuja média seria de aproximadamente 0; 15 e 30%. Assim, a Tabela 6 apresenta a matriz do planejamento.

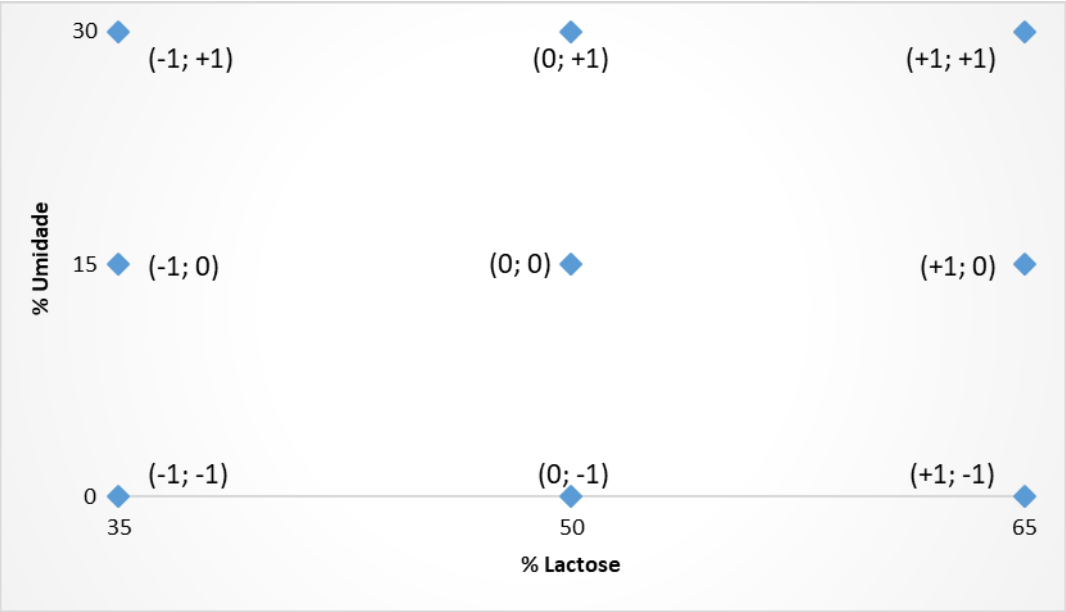
Tabela 6 – Dados para o planejamento experimental

R1	R2	% Lactose	% Umidade
- 1	- 1	35	0
0	- 1	50	0
+ 1	- 1	65	0
- 1	0	35	15
0	0	50	15
+ 1	0	65	15
- 1	+ 1	35	30
0	+ 1	50	30
+ 1	+ 1	65	30

Fonte: Autora, 2019

Nesta tabela as variáveis codificadas são R1 e R2 e representam os fatores codificados da porcentagem de lactose e o teor de umidade, respectivamente. As variáveis respostas são as médias dos ensaios realizados ao menos em duplicata. Uma descrição esquemática é apresentada na Figura 22.

Figura 22 - Descrição esquemática dos resultados



Fonte: Autora, 2019

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados obtidos experimentalmente no reômetro, leito fluidizado e na determinação das propriedades das partículas, com suas respectivas discussões.

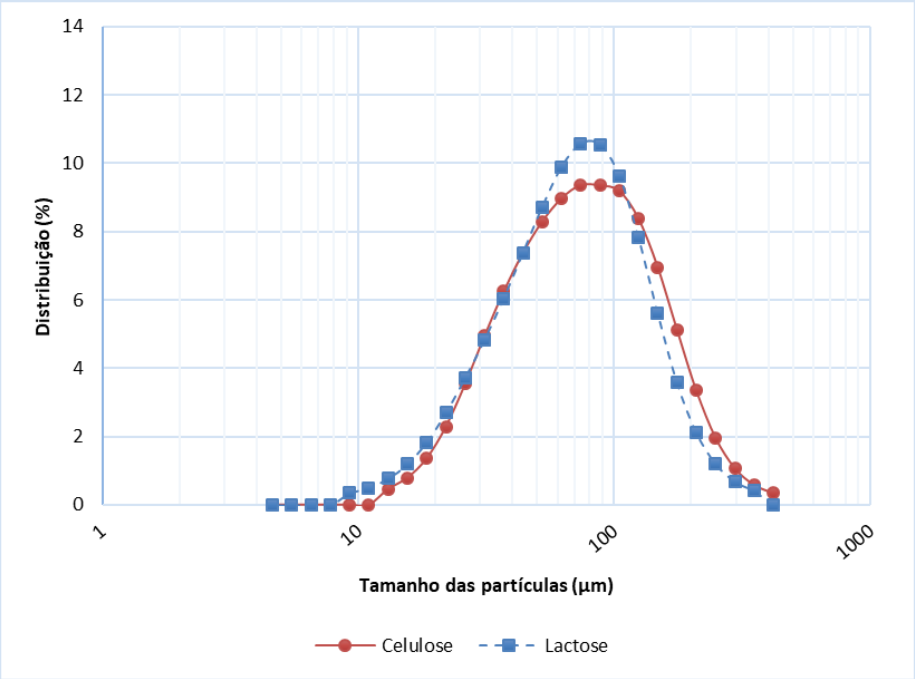
5.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A análise da distribuição granulométrica das amostras permite avaliar os efeitos das diferentes composições de cada substância (lactose e celulose) e de umidade adicionados às misturas no tamanho médio e largura da distribuição do tamanho das partículas.

Além disso, o tamanho médio das partículas, juntamente com a massa específica das partículas, permite classificar as amostras segundo o modelo de Geldart e que, no caso de fluidização com ar, a densidade do material particulado é predominante no modelo (ρ_{ar} = 1,19 kg/m³).

Na Figura 23 são apresentados os resultados para a análise granulométrica da lactose e celulose separadamente.

Figura 23 - Análise granulométrica para amostras de celulose e lactose

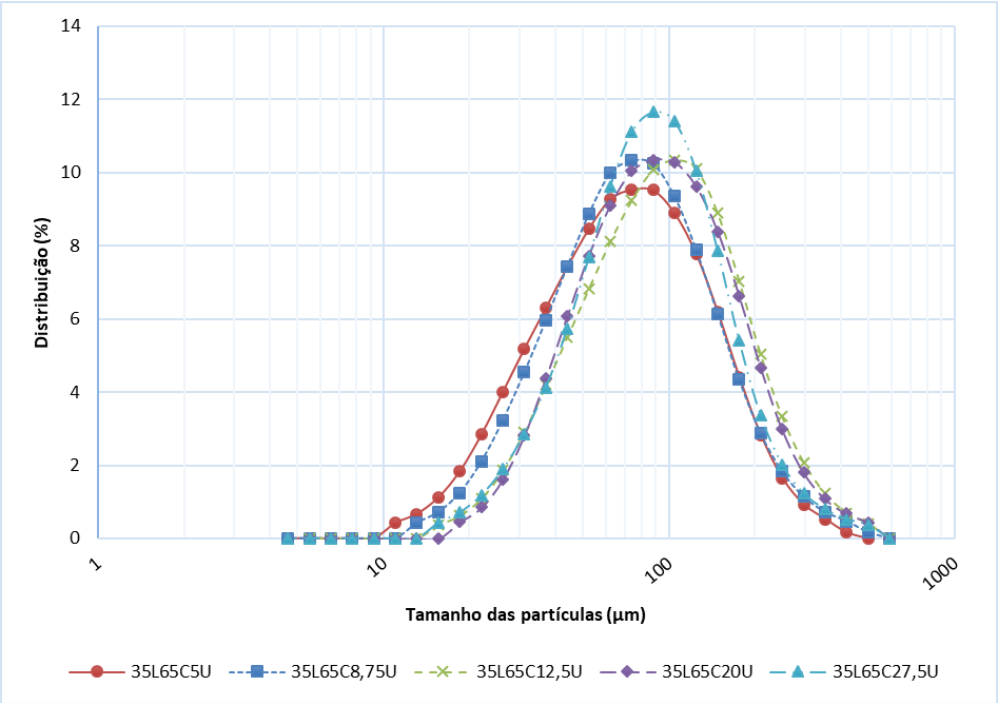


Fonte: Autora, 2019

Observa-se que a amostra de celulose pura e seca possui um diâmetro médio volumétrico maior (84,25 µm) que a amostra de lactose (75,44 µm). Desta forma, as misturas com maior teor de celulose tendem a possuir diâmetro médio nesta ordem de grandeza.

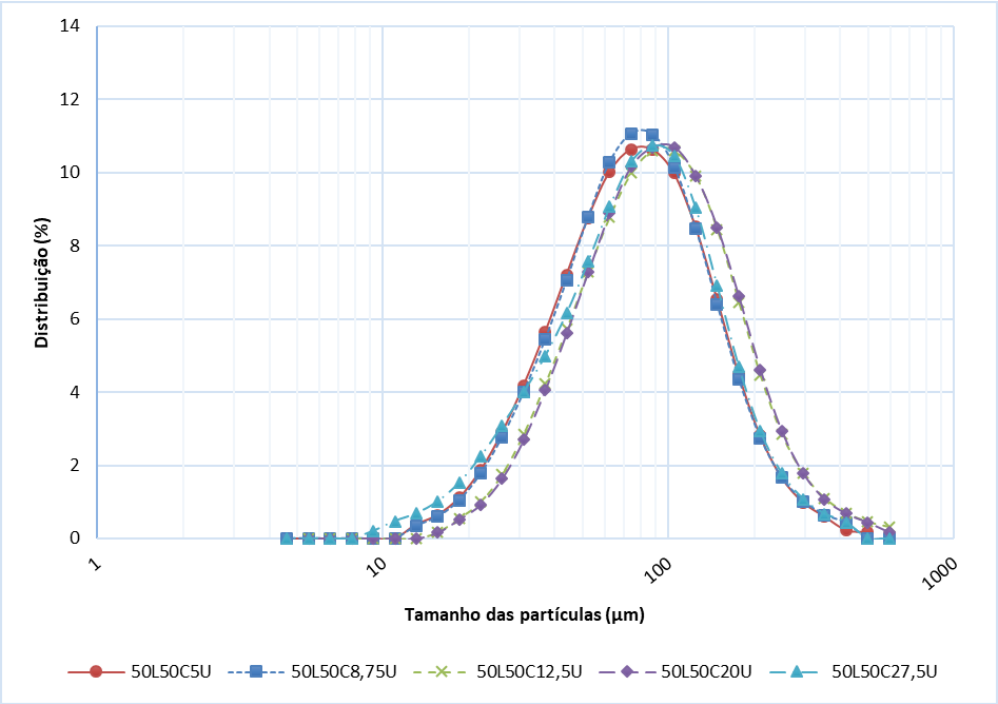
Nas Figuras 24, 25 e 26 são apresentados os resultados para a análise granulométrica das misturas com 35% de lactose e 65% de celulose, 50% de lactose e 50% de celulose e 65% de lactose e 35% de celulose nas umidades 0; 5; 8,75; 12,5; 20 e 27,5%. Os valores utilizados para construção do gráfico são apresentados no Apêndice B.

Figura 24 - Análise granulométrica das amostras com 35% lactose e 65% celulose em diferentes umidades



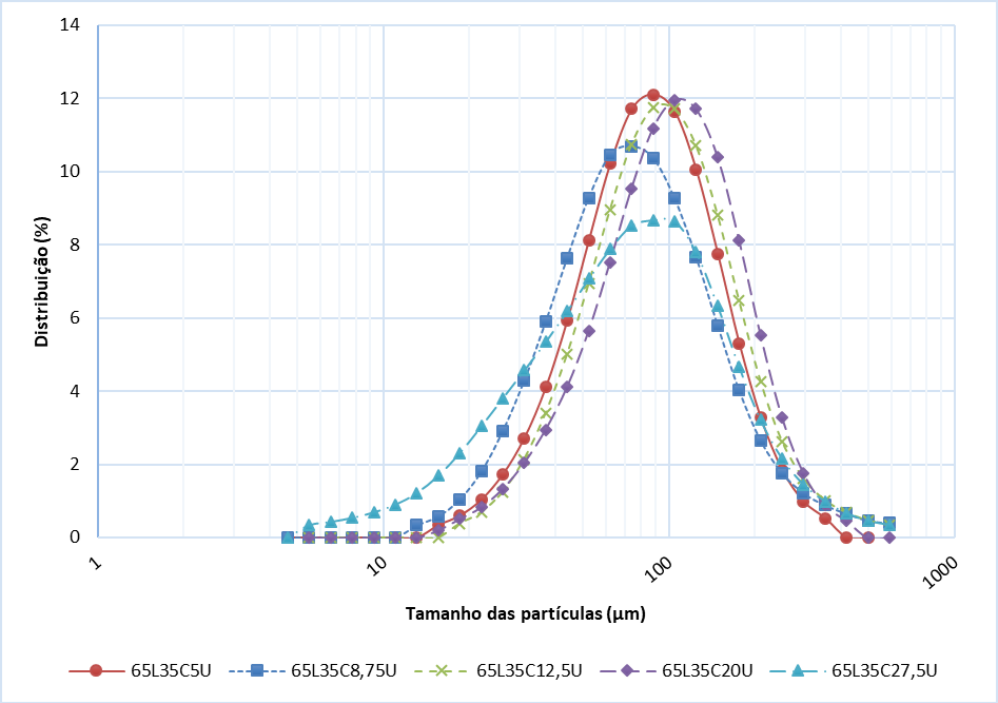
Fonte: Autora, 2019

Figura 25 - Análise granulométrica das amostras com 50% lactose e 50% celulose em diferentes umidades



Fonte: Autora, 2019

Figura 26 - Análise granulométrica das amostras com 65% lactose e 35% celulose em diferentes umidades

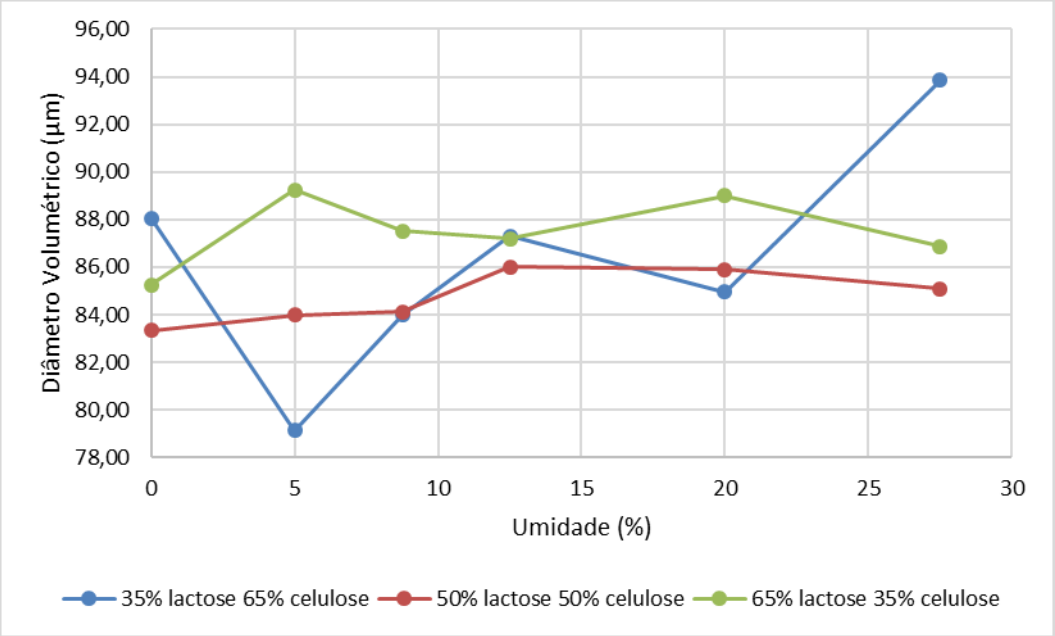


Fonte: Autora, 2019

As amostras com 65% de lactose e 35% de celulose foram as mais afetadas pela umidade no quesito diâmetro de partícula, sendo que seu histograma é o mais distinto entre as curvas de diferentes umidades.

No intuito de facilitar a interpretação do efeito da umidade na distribuição granulométrica, os tamanhos médios volumétricos em função da umidade foram plotados num gráfico de barras, ilustrado pela Figura 27.

Figura 27 – Diâmetro volumétrico pela umidade



Fonte: Autora, 2019

Analisando-se os resultados apresentados na Figura 27, é possível identificar um efeito da umidade na interação entre as partículas do leito, a qual desenvolve forças coesivas entre elas, resultando na formação de certos aglomerados, responsável pelas diferentes distribuições granulométricas obtidas.

Entretanto, os aglomerados formados são da mesma ordem de grandeza que as partículas puras de celulose, inferindo que apenas as partículas mais finas, até então livres e dispersas na população de partículas secas, aderem na superfície das partículas maiores. A realização de microscopia poderia confirmar este fenômeno.

Assim, em linhas gerais, pode-se concluir que as amostras úmidas não sofrem significativas alterações substanciais com incrementos de umidade de até 27,5%. A maior diferença foi observada entre as amostras secas e para as diferentes proporções de lactose/celulose.

Apenas chama a atenção a leve discrepância nas amostras com maior teor de lactose (65L35C). Podendo ser justificada, entre outros fatores, pela forma da partícula, esférica, que possui um comportamento diferente da celulose, com forma mais fibrosa. Nos casos com quantidades iguais de lactose e celulose, pode-se dizer que o comportamento que predomina é o da celulose.

5.2. UMIDADE

Na Tabela 7 são apresentados os valores das umidades reais das amostras com 35% de lactose e 65% de celulose, 50% de lactose e 50% de celulose e 65% de lactose e 35% de celulose nas umidades 0; 5; 8,75; 12,5; 20 e 27,5%. Os valores utilizados para construção do gráfico são apresentados no Apêndice A.

Tabela 7 – Valores de umidades reais

Umidade Teórica (%)	Umidade Real (%)			Valor Médio (%)	Desvio Padrão (%)
	35% lactose 65% celulose	50% lactose 50% celulose	65% lactose 35% celulose		
5,00	8,5	7,1	6,8	7,4	0,7
8,75	10,3	12,9	13,3	12,2	1,2
12,50	13,9	15,7	14,6	14,7	0,6
20,00	22,1	23,2	20,8	22,0	0,8
27,50	29,3	29,6	28,3	29,0	0,5

Fonte: Autora, 2019

É possível observar que todas as amostras estão com valores acima dos valores de umidades teóricas, devido ao fato de que as amostras não foram secas antes de ser adicionada a água. Assim, houve uma “soma” da umidade adicionada com a umidade intrínseca do material.

5.3. MASSA ESPECÍFICA

Na Tabela 8 são apresentados os resultados obtidos através dos experimentos realizados no picnômetro a gás para as amostras de lactose e celulose puras e secas.

Tabela 8 - Resultados do ensaio realizado no picnômetro

Amostra	d (g/cm³)	Erro (g/cm³)
Lactose Monohidratada	1,5399	0,0020
Celulose Microcristalina	1,5538	0,0055

Fonte: Autora, 2019

Pelos resultados de densidade obtidos por picnômetro a gás (Tabela 8) e dos valores de densidade do leito (teste de BFE e VRF – Apêndice C), foi possível calcular a densidade da partícula através da Equação (8) e a porosidade do leito através da Equação (3), os resultados são mostrados na Tabela 9 e Figura 28. Onde ρ_p é a densidade média da partícula na mistura lactose/celulose.

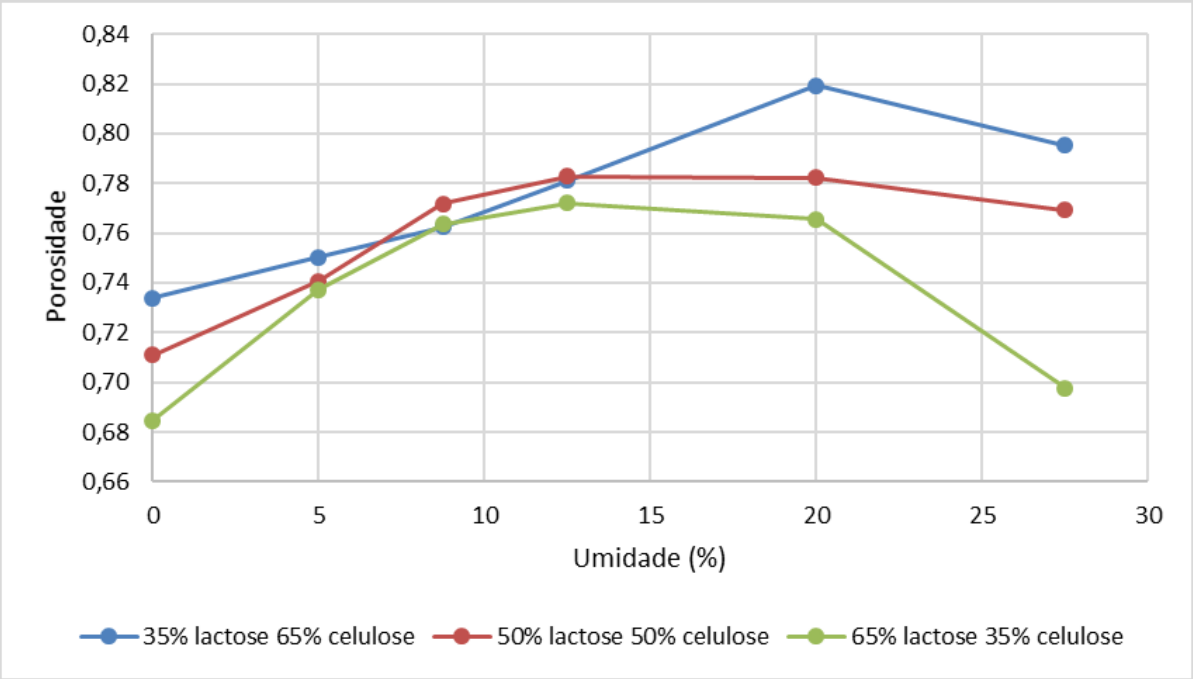
$$\rho_p = \%_{Lactose} \cdot \rho_{Lactose} + \%_{Celulose} \cdot \rho_{Celulose} \quad (8)$$

Tabela 9 - Densidade do leito, da partícula no leito e porosidade do leito

Amostra	ρ_b (g/ml)	ρ_p (g/ml)	ε
35L65C0U	0,412	1,549	0,734
50L50C0U	0,447	1,547	0,711
65L35C0U	0,487	1,545	0,685
35L65C5U	0,387	1,549	0,750
50L50C5U	0,401	1,547	0,741
65L65C5U	0,406	1,545	0,737
35L65C8,75U	0,368	1,549	0,762
50L50C8,75U	0,353	1,547	0,772
65L35C8,75U	0,365	1,545	0,764
35L65C12,5U	0,339	1,549	0,781
50L50C12,5U	0,336	1,547	0,783
65L35C12,5U	0,352	1,545	0,772
35L65C20U	0,280	1,549	0,819
50L50C20U	0,337	1,547	0,782
65L35C20U	0,362	1,545	0,766
35L65C27,5U	0,317	1,549	0,795
50L50C27,5U	0,357	1,547	0,769
65L35C27,5U	0,467	1,545	0,698

Fonte: Autora, 2019

Figura 28 – Porosidade do leito



Fonte: Autora, 2019

Analisando os resultados apresentados na Tabela 9 é possível concluir que a massa específica da lactose e celulose puras e secas quase não diferem entre si. Porém, quando se analisa a densidade *bulk*, na Figura 28, verifica-se uma tendência ao aumento da densidade com o aumento da porcentagem de lactose.

Assim, como quando se analisa a porosidade *bulk*, a tendência geral é o contrário, quanto maior a porcentagem de celulose, maior a porosidade, isso quando se analisa as amostras com as mesmas porcentagens de umidade.

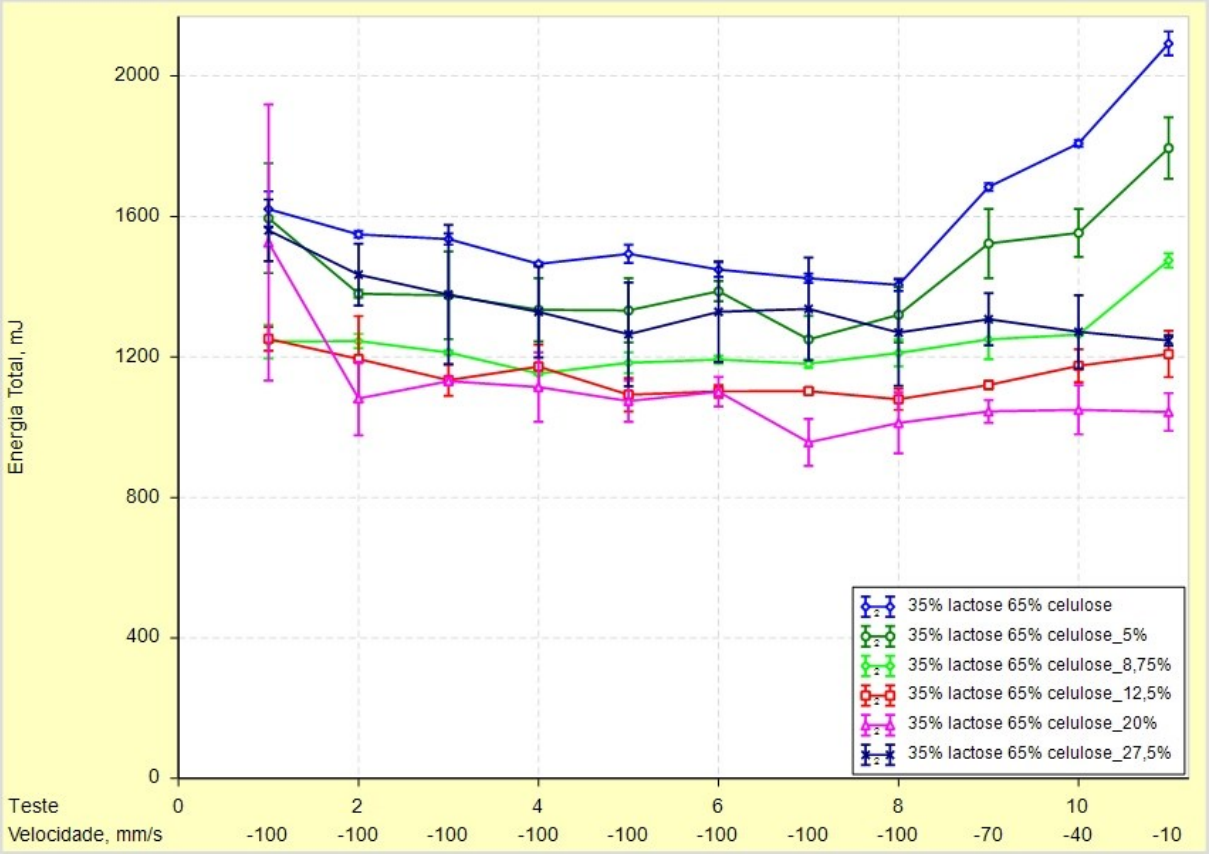
Quando se analisa a influência da umidade nas amostras, observa-se que a densidade *bulk* diminui com o aumento da umidade e volta a aumentar na amostra com porcentagens mais altas de umidade. O mesmo comportamento é observado na porosidade, um aumento nas amostras com umidades intermediárias (8,75 e 12,5%) e uma redução nos extremos (0; 5; 20 e 27,5%).

5.4. ENERGIA BÁSICA DE FLUXO (BFE) E ENERGIA DE FLUXO VARIÁVEL (VRF)

Na Figura 29 são apresentados os resultados para os testes de BFE (velocidade constante) e VRF (velocidade variável) nas misturas com 35% de lactose

e 65% de celulose, nas umidades 0; 5; 8,75; 12,5; 20 e 27,5%. Os valores utilizados para construção do gráfico são apresentados no Apêndice C.

Figura 29 - BFE e VRF para amostras com 35% lactose e 65% celulose em diferentes umidades



Fonte: Autora, 2019

É possível observar que as misturas com baixas taxas de umidade (0; 5 e 8,75%) apresentam comportamento estável e constante quando a velocidade da lâmina é mantida a mesma (BFE). Já, quando a velocidade da lâmina é variável (VRF), a energia total necessária para o material fluir aumenta conforme reduzimos a velocidade.

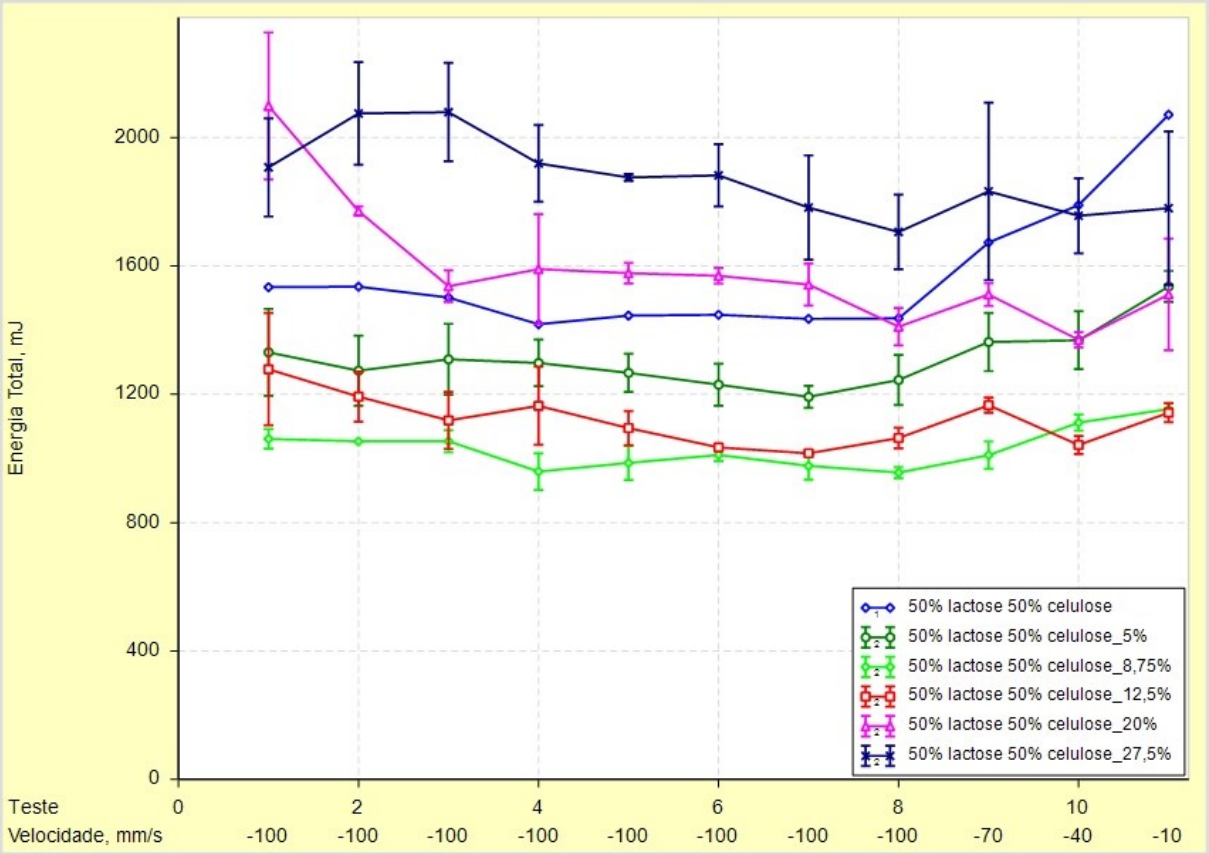
Nas amostras com taxas de umidade mais elevadas (12,5; 20 e 27,5%) o comportamento do material particulado é bastante semelhante, sendo constante e estável durante toda a faixa de velocidades estudadas.

Todos os valores de BFE das amostras úmidas estão abaixo dos valores da amostra seca, situados entre a faixa de 1000 e 1600 mJ, e a estabilização da VRF é

uma função da umidade da amostra, sendo que quanto maior a porcentagem de umidade, menos influente é a velocidade da lâmina.

Na Figura 30 são apresentados os resultados para os testes de BFE (velocidade constante) e VRF (velocidade variável) nas misturas com 50% de lactose e 50% de celulose, nas umidades 0; 5; 8,75; 12,5; 20 e 27,5%. Os valores utilizados para construção do gráfico são apresentados no Apêndice D.

Figura 30 - BFE e VRF para amostras com 50% lactose e 50% celulose em diferentes umidades



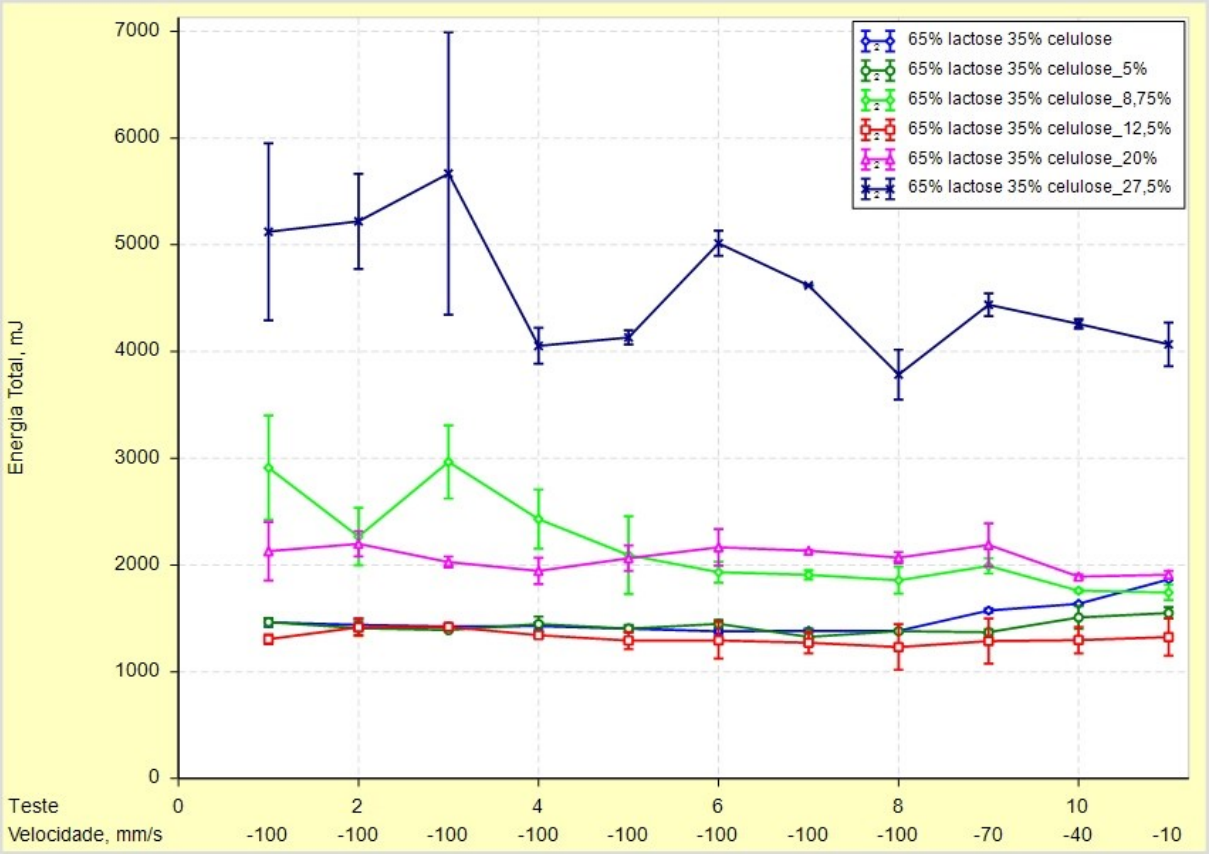
Fonte: Autora, 2019

Quando se analisa as amostras com quantidades iguais de lactose e celulose, podemos observar que apenas a amostra com 0% de umidade tem um comportamento acentuado quando medimos a VRF, sendo necessário maiores valores de energia para menores valores de velocidade.

Para as outras amostras o comportamento tanto na BFE como na VRF permanece constante e estável, o que difere das amostras 35L65C com umidades 5 e 8,75%.

Na Figura 31 são apresentados os resultados para os testes de BFE (velocidade constante) e VRF (velocidade variável) nas misturas com 65% de lactose e 35% de celulose, nas umidades 0; 5; 8,75; 12,5; 20 e 27,5%. Os valores utilizados para construção do gráfico são apresentados no Apêndice E.

Figura 31 - BFE e VRF para amostras com 65% lactose e 35% celulose em diferentes umidades



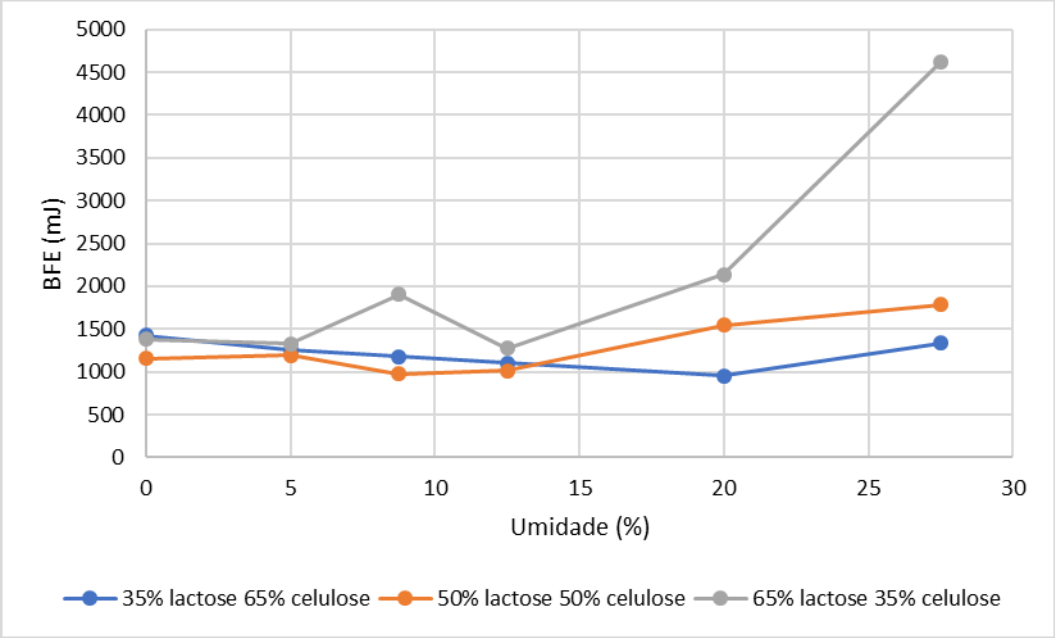
Fonte: Autora, 2019

Quando se analisa os resultados para as misturas 65L35C vemos um comportamento estável e constante para todas as umidades estudadas. Concluindo que, para essa proporção, a velocidade de descida da lâmina não influencia na energia necessária para estabilizar um padrão de fluxo.

No processamento destes materiais, 65L35C, o aumento do teor de umidade reduz a energia necessária para movimentar as amostras até uma certa quantidade; a partir da qual a movimentação é dificultada pela umidade presente, principalmente para maiores teores de lactose.

Na Figura 32 e no Apêndice C são apresentados os resultados para os testes de BFE (velocidade constante) e VRF (velocidade variável) para todas as proporções lactose/celulose, separados pela porcentagem de umidades, sendo 0 (A); 5 (B); 8,75 (C); 12,5 (D); 20 (E) e 27,5% (F).

Figura 32 – BFE das amostras por umidade



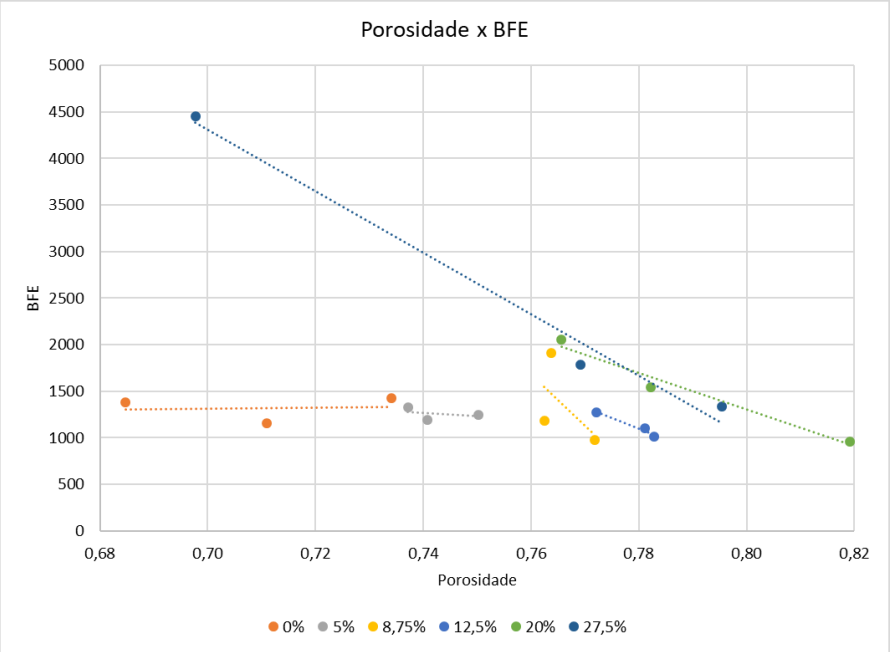
Fonte: Autora, 2019

Quando se analisa as misturas separadas pela umidade, observa-se que as amostras com 0 e 5% de umidade são bastante influenciadas pela velocidade de descida da lâmina (VRF), sendo que a energia necessária para estabelecer um padrão de fluxo no material aumenta com a diminuição da velocidade da lâmina.

Já para os valores de 8,75 e 12,5% verifica-se uma influência menos acentuada da velocidade de descida da lâmina. E quando se analisa valores mais altos de umidade, 20 e 27,5%, constata-se que a energia não é afetada pela velocidade da lâmina, já que se mantem estável e constante.

Conforme constatado anteriormente, a composição das misturas afeta a porosidade do leito, assim como a umidade nele presente (Figura 27). No intuito de se avaliar a dependência destas duas variáveis na energia básica de fluxo (BFE), construiu-se o gráfico ilustrado na Figura 33.

Figura 33 – Porosidade x BFE



Fonte: Autora, 2019

Analisando a Figura 33 é possível concluir que as amostras com 0% de umidade possuem os valores de BFE constantes, independente da composição e umidade presente no leito, apesar destas influenciarem na porosidade do leito.

Para as amostras úmidas, os valores da porosidade são similares para baixos teores de umidade, conforme também verificado na Figura 27, apresentando, porém, leve redução nos valores de BFE. Já, para maiores teores de umidade, uma maior divergência nos valores da porosidade e da energia básica de fluxo é observada.

De maneira geral, os teores de umidade até 20% têm baixa influência na energia de fluxo das amostras, atuando inclusive como uma espécie da agente de estabilidade, principalmente para as misturas contendo mais celulose, reduzindo a energia em baixa rotações da lâmina.

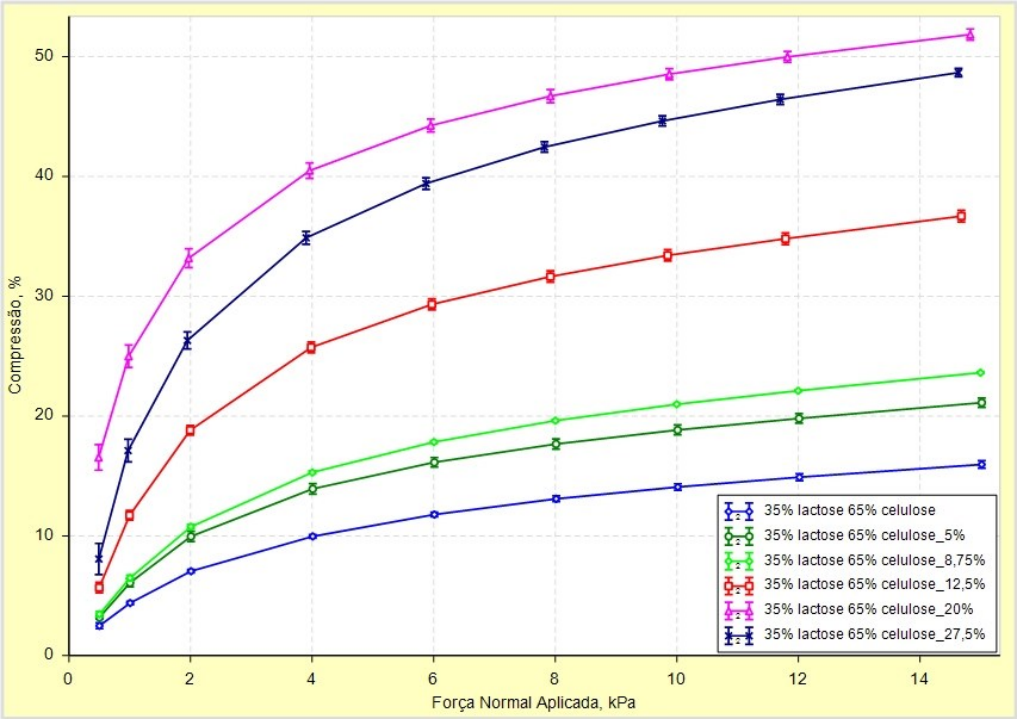
A diminuição da BFE com o aumento da porosidade se deve ao fato de que uma redução na porosidade significa que as partículas se encontram mais juntas no leito, dificultando a passagem da lâmina e, consequentemente, necessita de uma maior a energia necessária para o permear o material.

Comportamento distintos são observados para o teor de umidade de 27,5% e maiores quantidades de lactose na composição das misturas.

5.5. COMPRESSIBILIDADE

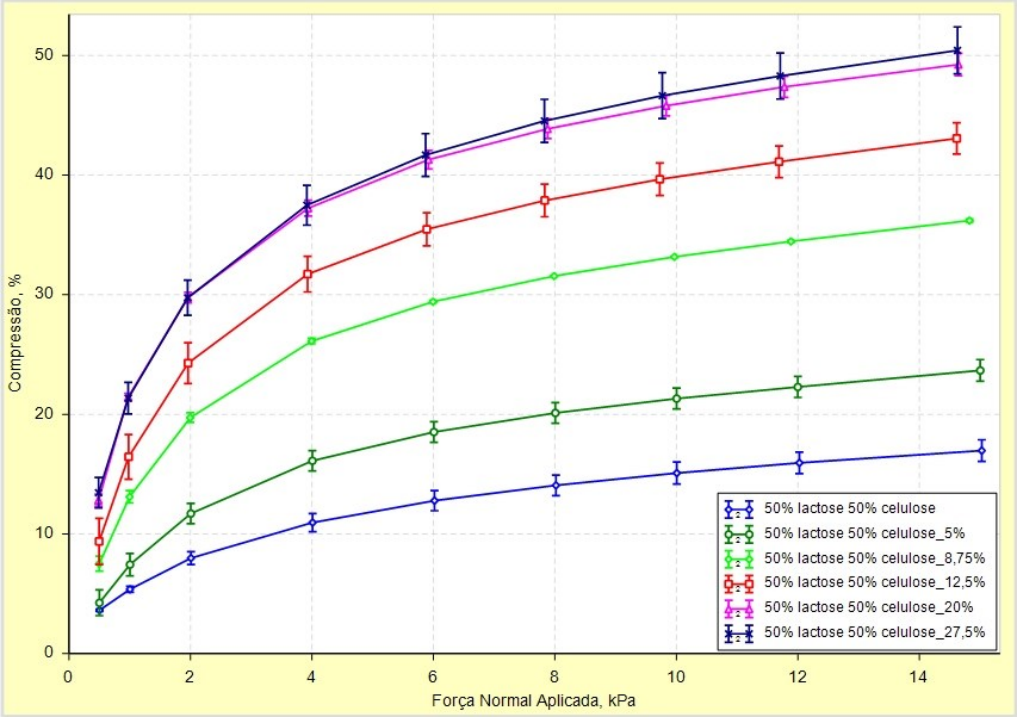
Nas Figuras 34, 35 e 36 são apresentados os resultados para os testes de compressibilidade nas misturas com 35% de lactose e 65% de celulose, 50% de lactose e 50% de celulose e 65% de lactose e 35% de celulose nas umidades 0; 5; 8,75; 12,5; 20 e 27,5%. Os valores utilizados para construção do gráfico são apresentados no Apêndice C.

Figura 34 - Compressibilidade para amostras com 35% lactose e 65% celulose em diferentes umidades



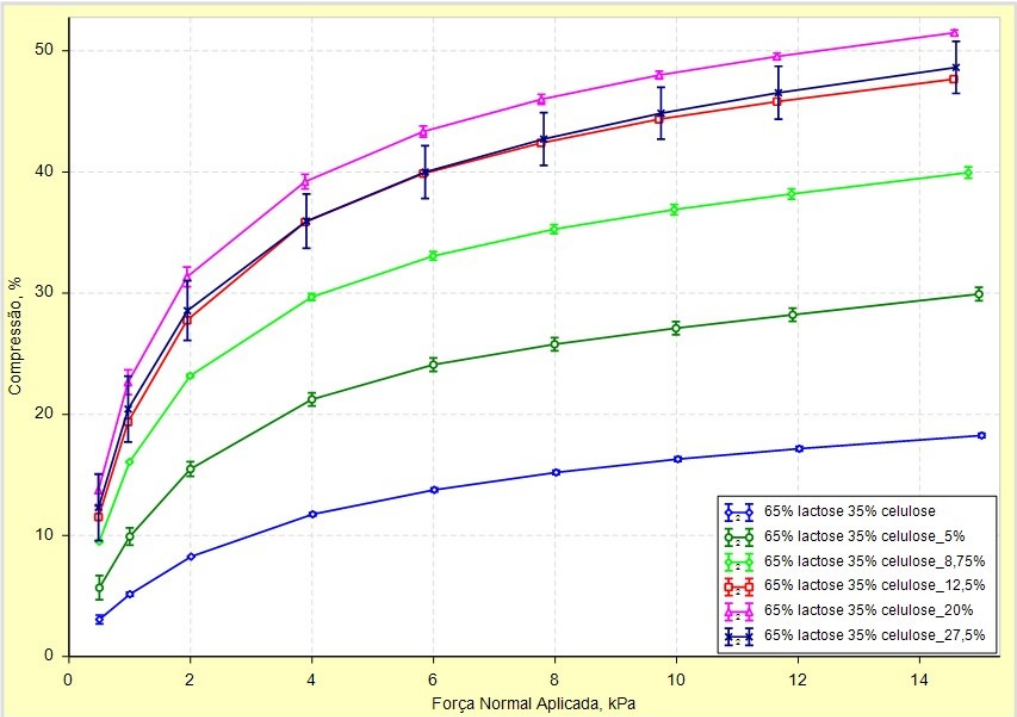
Fonte: Autora, 2019

Figura 35 - Compressibilidade para amostras com 50% lactose e 50% celulose em diferentes umidades



Fonte: Autora, 2019

Figura 36 - Compressibilidade para amostras com 65% lactose e 35% celulose em diferentes umidades



Fonte: Autora, 2019

Inicialmente, verifica-se a influência da composição e do tamanho médio das partículas que consistem as misturas e, consequentemente a porosidade, nos resultados dos testes de compressão. A porcentagem de compressão é levemente influenciada pelo teor de lactose presente na mistura até o teor de 20% de umidade, a partir do qual se torna constante.

Entretanto, as amostras contendo mais lactose apresentam menor porosidade, indicando que essa maior compressibilidade não se deve predominantemente a orientações ou deformação das partículas de celulose (fibras) no leito de partículas.

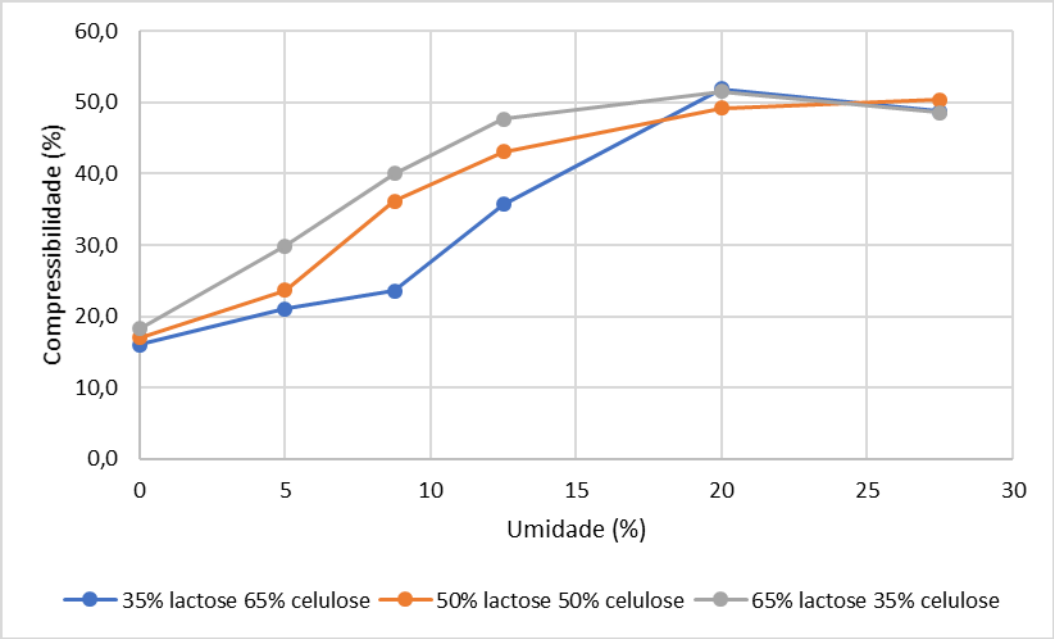
Pode-se observar que as amostras com umidades mais elevadas possuem maior porcentagem de compressão, ou seja, aumento na densidade *bulk* do material e maior volume de vazios entre as partículas.

Como a padronização do equipamento é feita através do volume e não da massa, o fato de as amostras mais úmidas terem compressibilidades maiores pode ser explicado pelos aglomerados formados nessas amostras que se desfazem quando aplicada a força normal no material, confirmado pelo aumento do tamanho médio das partículas.

Outra observação é que a umidade deixa de ter influência significativa a partir de um certo teor, que é diferente de amostra para amostra. Assim, observa-se que as amostras 35L65C atingem um patamar de compressibilidade no teor de 20% e 12,5%. Para as demais amostras, estes teores são os mesmos nas quais as demais propriedades, BFE, porosidade.

Na Figura 37 e no Apêndice C são apresentados os resultados para os testes de compressibilidade para todas as proporções lactose/celulose, separados pela porcentagem de umidades, sendo 0 (A); 5 (B); 8,75 (C); 12,5 (D); 20 (E) e 27,5% (F).

Figura 37 – Compressibilidade das amostras por umidade



Fonte: Autora, 2019

Podemos confirmar o que foi observado nos gráficos anteriores, a relação lactose/celulose não influencia significativamente nos resultados de compressibilidade. Em alguns casos, como 20% e 27,5%, as curvas de compressão entre as diferentes composições se sobrepõe.

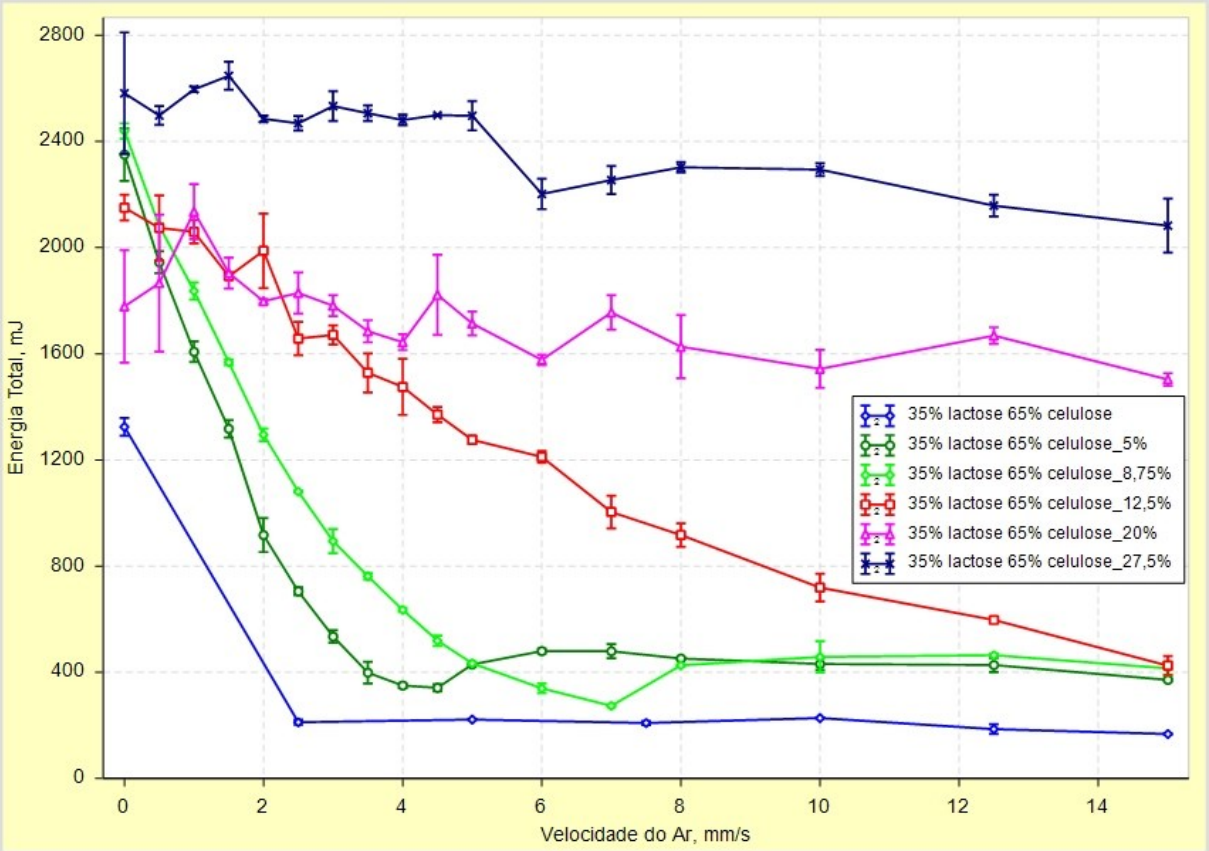
Para o caso com 8,75% de umidade vemos a maior diferença entre as composições, sendo que esse fato pode ser justificado por erros operacionais e fatores climáticos, já que o teste com a amostra composta por 35% de lactose e 65% de celulose foi realizado em dias diferentes das outras amostras.

5.6. AERAÇÃO

Nos testes de aeração, os valores de BFE (energia total quando não há passagem de ar) são distintos entre si, pois não foram utilizadas massas iguais entre os testes. Foram empregadas as mesmas alturas para todas as amostras, inclusive para as que foram utilizadas no leito fluidizado.

Na Figura 38 são apresentados os resultados para os testes de aeração nas misturas com 35% de lactose e 65% de celulose, nas umidades 0; 5; 8,75; 12,5; 20 e 27,5%. Os valores utilizados para construção do gráfico são apresentados no Apêndice C.

Figura 38 - Aeração para amostras com 35% lactose e 65% celulose em diferentes umidades



Fonte: Autora, 2019

Analisando as amostras 35L65C nos testes de aeração, pode-se inferir que aquelas com baixas umidades, 0, 5 e 8,75%, são prontamente aeráveis. Com uma pequena quantidade de ar o leito se torna fluidizado e passa a ter comportamento de fluido, pois atendem um patamar constante de energia.

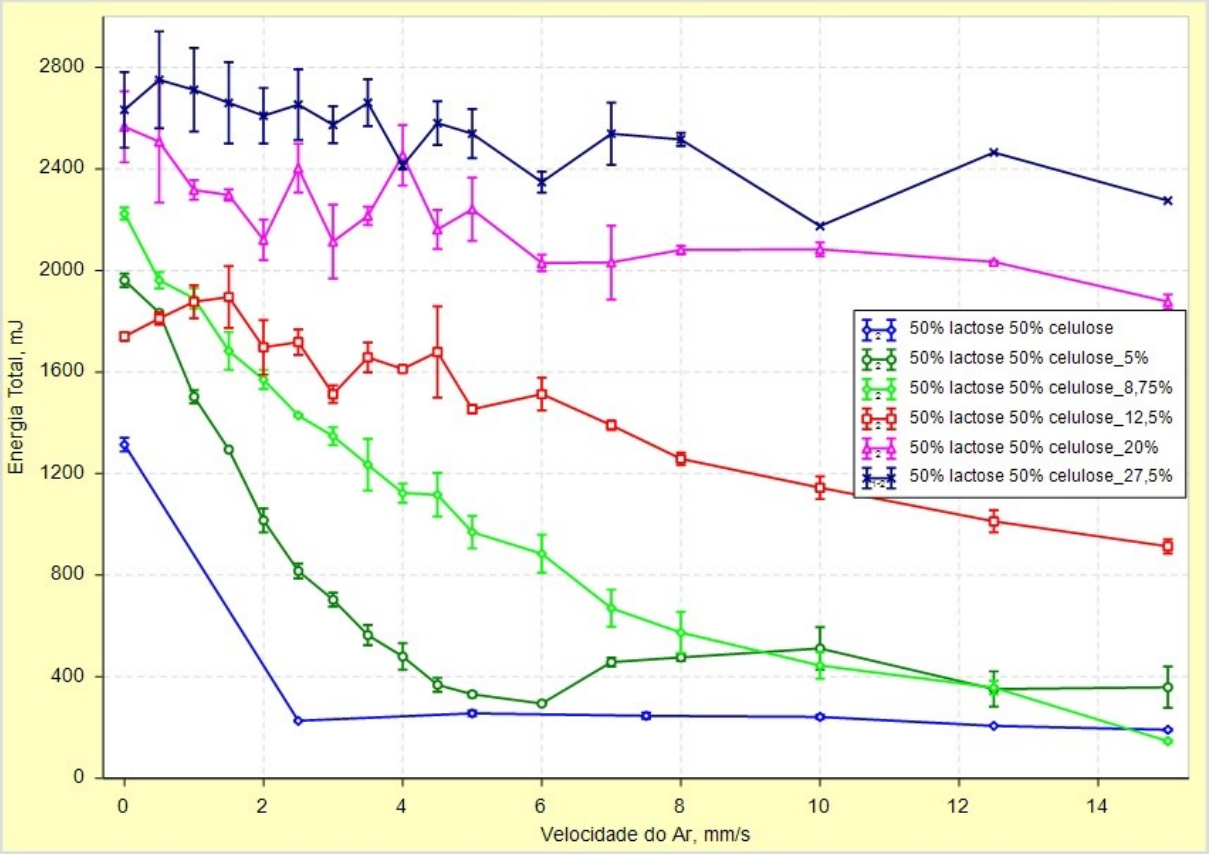
Já para níveis mais elevados de umidade, 20 e 27,5%, não se observa a fluidização do leito, nem mesmo com altas velocidade do ar, indicando que são amostras de pós coesivos, devido à redução insignificante de energia.

Para a amostra de 12,5% verifica-se uma região intermediária entre os pós facilmente aeráveis e os pós coesivos, pois a amostra apresenta propriedades de fluxo, a qual aumenta conforme o aumento da velocidade do ar, porém, inicialmente não há fluidização, como nos pós prontamente aeráveis.

Na Figura 39 são apresentados os resultados para os testes de aeração nas misturas com 50% de lactose e 50% de celulose, nas umidades 0; 5; 8,75; 12,5; 20 e

27,5%. Os valores utilizados para construção do gráfico são apresentados no Apêndice D.

Figura 39 - Aeração para amostras com 50% lactose e 50% celulose em diferentes umidades



Fonte: Autora, 2019

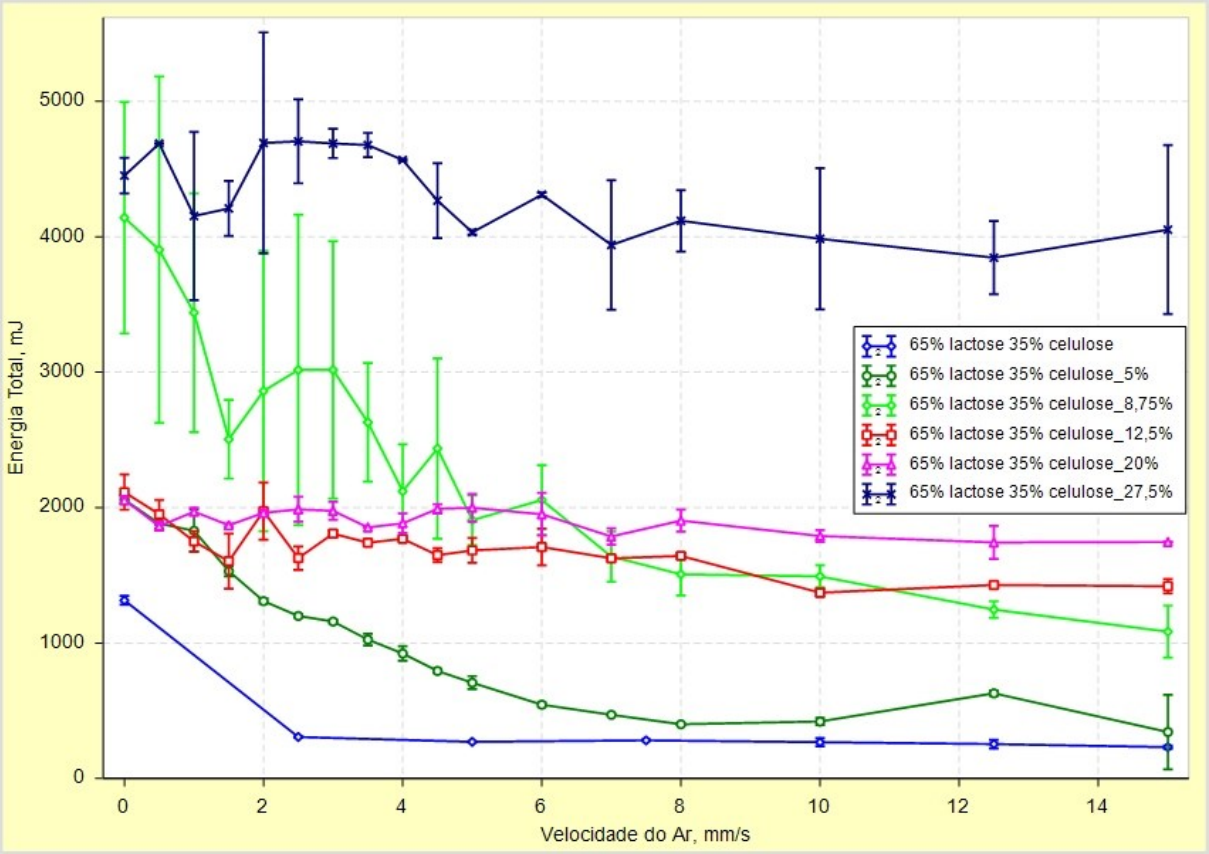
Para as amostras 50L50C, Figura 39, é possível observar que a tendência à fluidização vai diminuindo, sendo necessário valores mais altos de velocidade do ar para iniciar a fluidização dos pós de mesma umidade, uma vez que a amostra 35L65C12,5U atinge o patamar de energia enquanto que a amostra 50L50C12,5U ainda não.

A amostra com 12,5% de umidade necessita de maiores valores de velocidade do ar para iniciar a fluidização, mas ainda apresenta fluxo. As amostras com 20 e 27,5% de umidade continuam sem fluxo, mesmo com velocidades mais elevadas.

As amostras com 0, 5 e 8,75% de umidade se mantêm prontamente aeráveis, porém, com velocidades iniciais de fluidização um pouco maiores que nas amostras 35L65C.

Na Figura 40 são apresentados os resultados para os testes de aeração nas misturas com 65% de lactose e 35% de celulose, nas umidades 0; 5; 8,75; 12,5; 20 e 27,5%. Os valores utilizados para construção do gráfico são apresentados no Apêndice E.

Figura 40 - Aeração para amostras com 65% lactose e 35% celulose em diferentes umidades



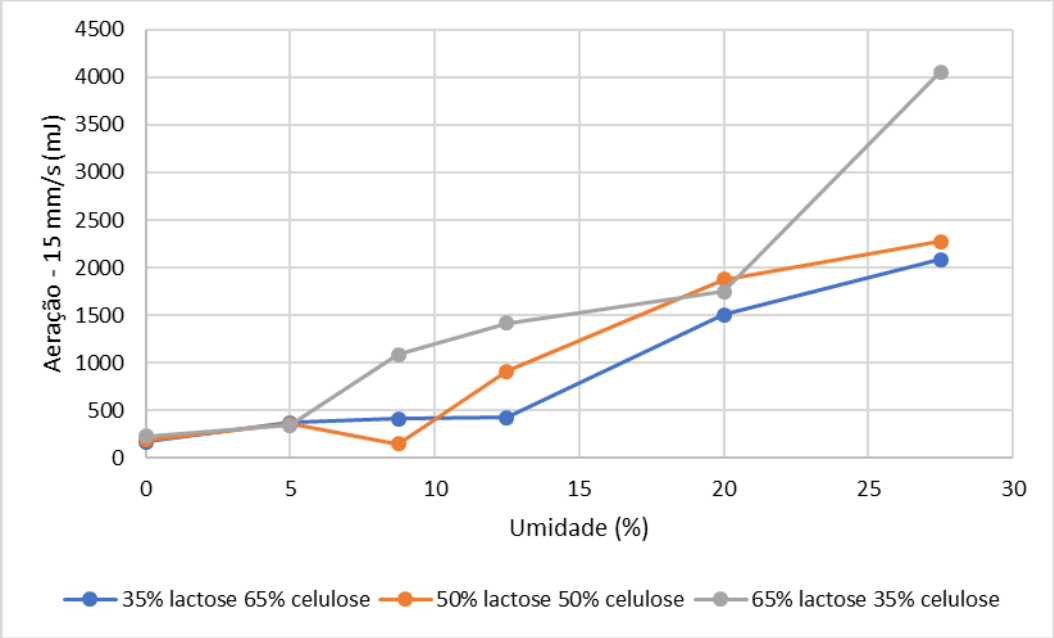
Fonte: Autora, 2019

Pelos resultados das amostras 65L35C, é possível concluir que a fluidização se torna ainda mais difícil e instável, onde apenas as amostras com 0 e 5% de umidade são fluidizáveis.

As amostras com 8,75, 12,5 e 20% não apresentam fluxo, nem com velocidades elevadas de ar. A amostra com 27,5% de umidade também não apresenta fluxo, porém, notoriamente a faixa de energia necessária é mais elevada, fato esse devido aos aglomerados que se formaram e que requerem maior energia para serem rompidos.

Na Figura 41 e no Apêndice C são apresentados os resultados para os testes de aeração para todas as proporções lactose/celulose, separados pela porcentagem de umidades, sendo 0 (A); 5 (B); 8,75 (C); 12,5 (D); 20 (E) e 27,5% (F).

Figura 41 - Aeração das amostras por umidade



Fonte: Autora, 2019

Analisando as amostras separadas pelas taxas de umidade, é possível separa-las em 3 grupos. O grupo das amostras prontamente aeráveis, independentemente da velocidade do ar ou da relação lactose/celulose, onde se enquadram as amostras com 0 e 5% de umidade.

O grupo das amostras que não apresentam fluidização, independente da velocidade ou da relação lactose/celulose, como nos casos com 20 e 27,5% de umidade.

E o grupo das amostras intermediárias, como 8,75 e 12,5% de umidade. No caso das amostras com 8,75% de umidade, foi constatado que a relação lactose/celulose não tem muita influência na fluidização, porém, ela só acontece com velocidades mais elevadas.

Quando se analisa a amostra com 12,5%, observa-se que tanto a relação lactose/celulose como a velocidade do ar são componentes de fundamental importância na fluidez, sendo que a amostra 65L35C não fluidiza nem com altas

velocidades e as amostras 35L65C e 50L50C fluidizam com velocidades bastante elevadas de ar.

5.7. LEITO FLUIDIZADO

Os ensaios de aeração forneceram um perfil de perda de carga e altura do leito em função da velocidade de ar inflado na base do leito de cada amostra, cujos dados estão apresentados no Apêndice D. Estes dados foram utilizados para a determinação da velocidade mínima de fluidização através do ponto obtido pela intersecção da linha crescente de perda de carga como o patamar de pressão constante.

Uma vez que a perda de carga de um leito granular pode ser descrita pela equação de Ergun, uma relação entre a perda de carga, velocidade mínima e o tamanho das partículas é então estabelecida. Assim, a Figura 38 relaciona estas grandezas para as amostras estudadas.

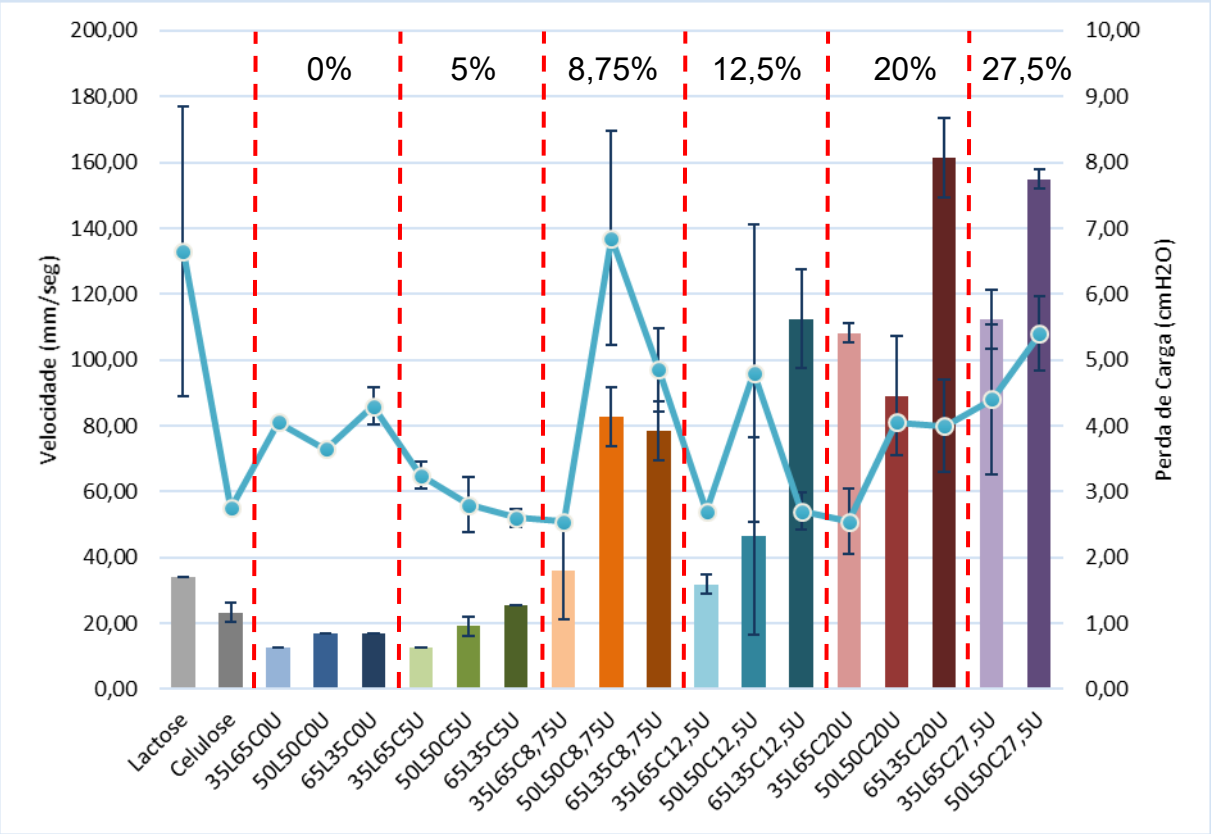
A seguir são apresentados os resultados de perda de carga (na velocidade mínima de fluidização) e velocidade de mínima fluidização nas misturas com 35% de lactose e 65% de celulose, 50% de lactose e 50% de celulose e 65% de lactose e 35% de celulose nas umidades 0; 5; 8,75; 12,5; 20 e 27,5%. Os valores utilizados para construção do gráfico são apresentados no Apêndice D.

Para a amostra com 65% de lactose e 35% de celulose com 27,5% os dados não são apresentados pois não houve fluidização até a maior vazão de ar suportada pelo equipamento (20 L/min – 169,77 mm/seg).

Pela análise da Figura 42, verifica-se que para uma mesma proporção lactose/celulose a velocidade mínima de fluidização aumenta conforme o aumento da umidade, exceto para o caso 50L50C8,75U onde a velocidade está menor do que na amostras 50L50C12,5U, justificado por alguma inconsistência no sistema ou erro operacional.

Já quando são analisadas uma mesma porcentagem de umidade, porém, para proporções lactose/celulose diferentes, observamos que a velocidade mínima de fluidização aumenta com o aumento da porcentagem de lactose na amostra.

Figura 42 - Perda de carga (linha) e velocidade (barras) de mínima fluidização



Fonte: Autora, 2019

Durante a realização do experimento foram observados alguns comportamentos inesperados, nas amostras 35L65C0U, 50L50C0U, 65L35C0U, 35L65C5U, 50L50C5U, 65L35C12,5U e 35L65C20U houve a formação de caminhos preferenciais no leito, dificultando a leitura da velocidade mínima de fluidização e da perda de carga.

Já nas amostras 65L35C5U, 35L65C8,75U, 50L50C8,75U, 65L35C8,75U, 35L65C12,5U, 50L50C12,5U, 50L50C20U, 65L35C20U, 35L65C27,5U e 50L50C27,5U houve o colapso do leito. Sendo que em determinado momento um bloco de partículas separou-se do restante, foi quando houve uma queda da perda de carga e aumento na vazão de ar.

Na amostra 65L35C27,5U não houve fluidização, houve aumento da perda de carga conforme o aumento da velocidade do ar, porém o leito não expandiu, não ocorreu formação de caminho preferencial e, também, não foi observado o colapso do leito até a vazão máxima alcançada pelo equipamento.

5.8. CISALHAMENTO

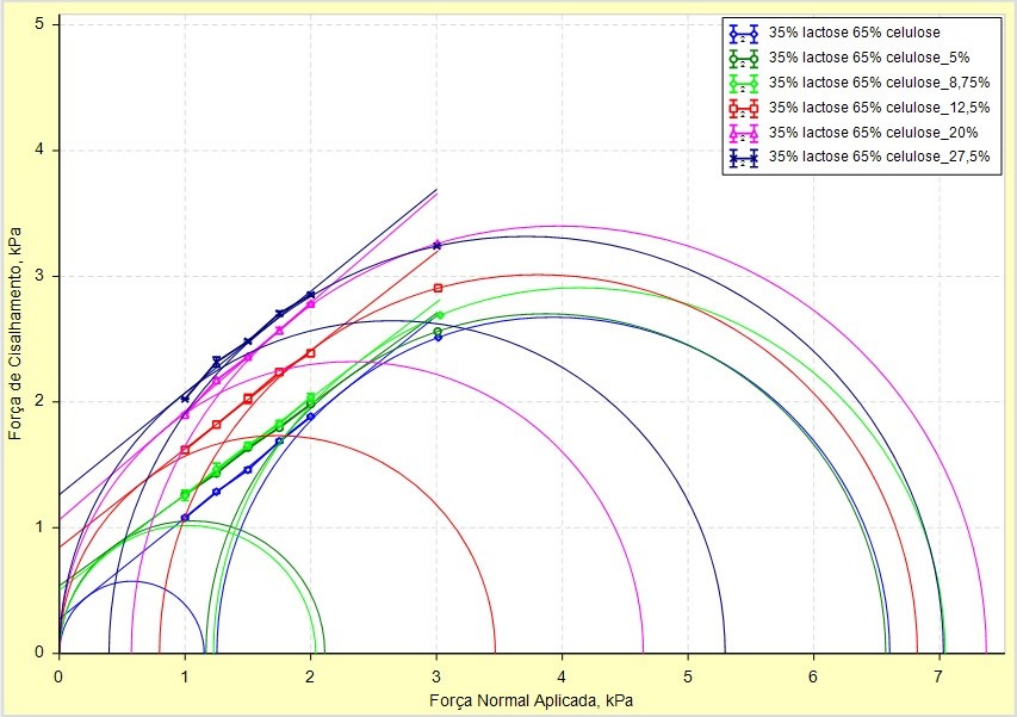
Os testes de cisalhamento permitiram a determinação do chamado plano de ruptura (“yield locus”) em 4 tensões de consolidação diferentes (3, 6, 9 e 15 kPa) para todas as amostras estudadas. A partir da análise de cada plano de ruptura, pode-se estimar 4 parâmetros de suma importância na aptidão ao escoamento de materiais particulados:

a) *Unconfined Yield Strenght* (tensão não confinada de cisalhamento) – UYS: o estresse causado para que o material se mova quando uma face não apresenta qualquer tensão normal;
b) *Major Principal Stress* (maior tensão normal de cisalhamento) – MPS: a maior tensão normal existente num plano infinitesimal do material.
c) Ângulo interno de fricção: coeficiente da curva de *Yield Locus*;
d) Coesão.

Posteriormente, um gráfico contendo todo o conjunto de pontos experimentais da tensão não confinada de cisalhamento (UYS) em função da maior tensão normal (MPS) fornece a chamada função de fluxo e pode ser utilizada para caracterizar a capacidade de fluxo do material.

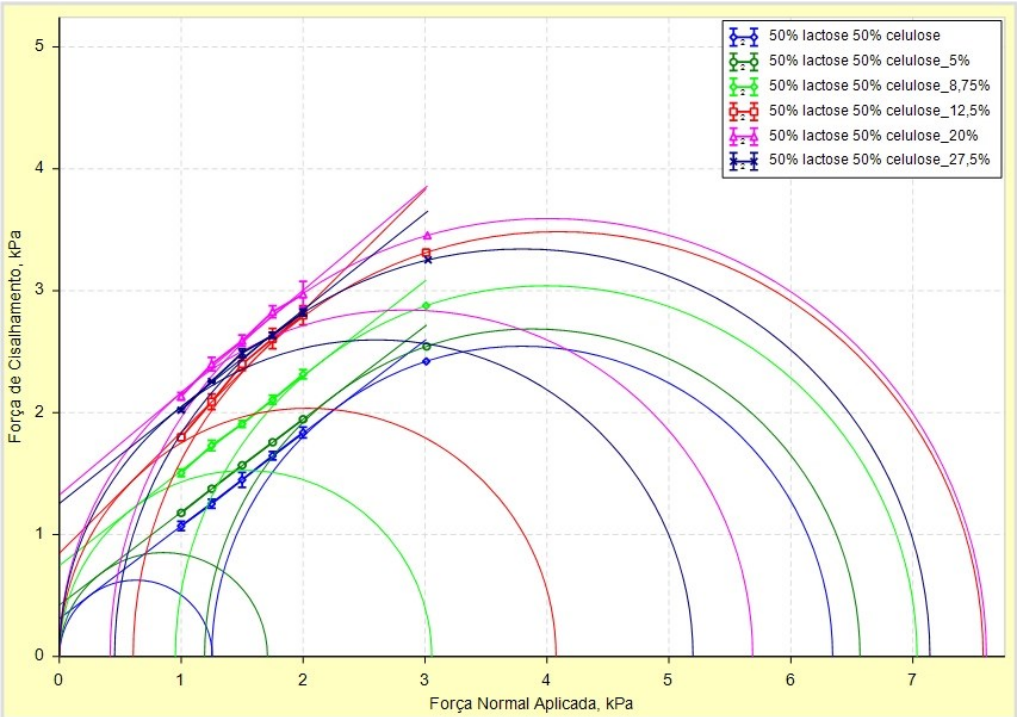
As representações gráficas que permitem estimar os parâmetros mencionados são apresentadas nas Figuras 43, 44 e 45 para todas as amostras na tensão de consolidação de 3 kPa.

Figura 43 – Círculo de Mohr para as amostras com 35% de lactose e 65% de celulose – 3 kPa



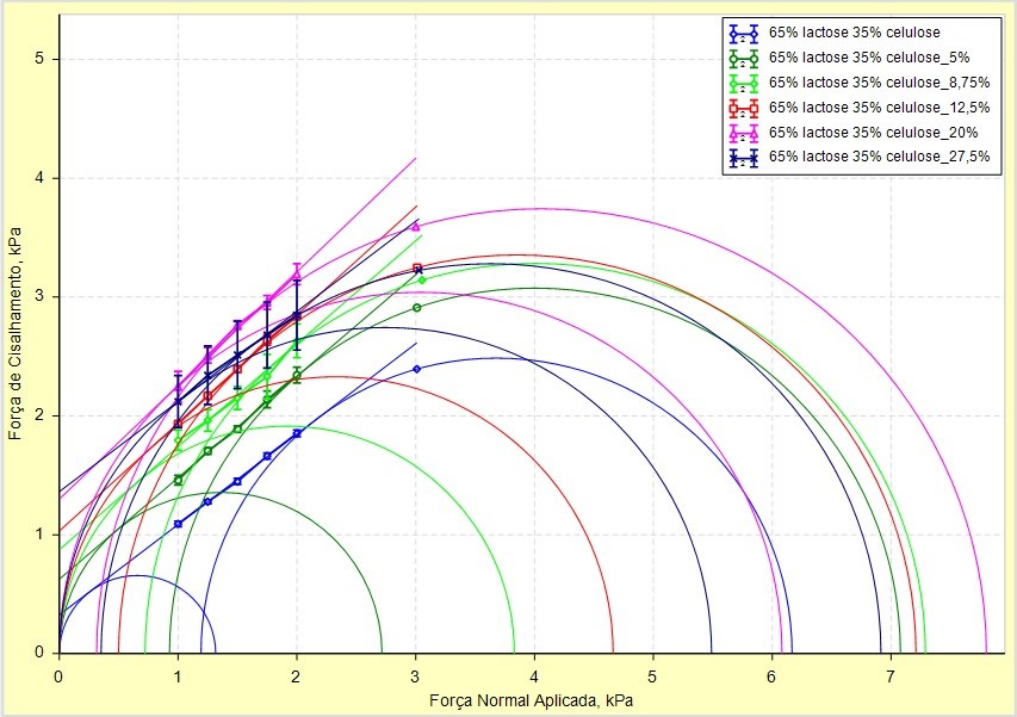
Fonte: Autora, 2019

Figura 44 – Círculo de Mohr para as amostras com 50% de lactose e 50% de celulose – 3 kPa



Fonte: Autora, 2019

Figura 45 – Círculo de Mohr para as amostras com 65% de lactose e 35% de celulose – 3 kPa

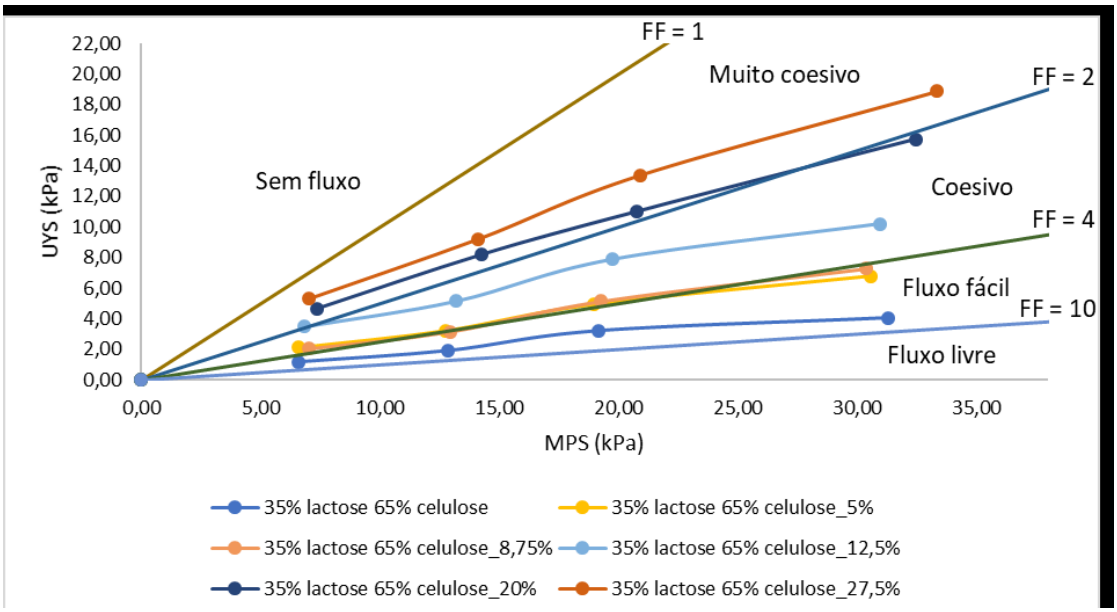


Fonte: Autora, 2019

Em linha gerais, observa-se que os planos de ruptura se deslocam verticalmente com o aumento da umidade em todas as misturas estudadas. Entretanto, o maior teor de umidade não resultou no maior deslocamento nem na maior coesão das misturas contendo 50% e 65% de lactose.

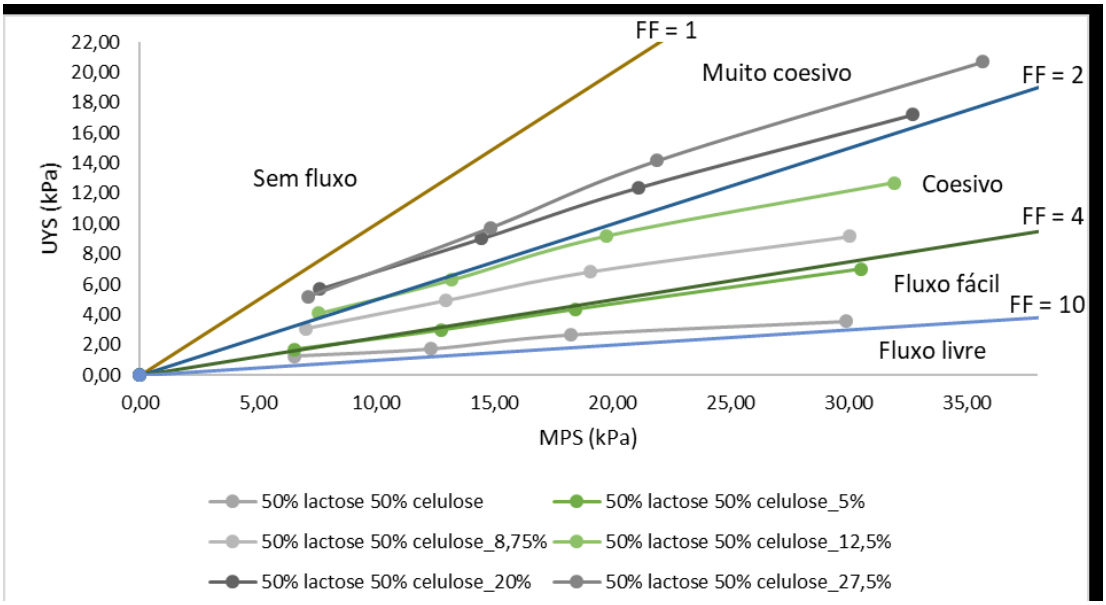
Nas Figuras 46, 47 e 48 são apresentados os gráficos das funções de fluxo (FF) para os testes de cisalhamento das misturas estudadas. Os valores utilizados para construção dos gráficos são apresentados no Apêndice C.

Figura 46 - Cisalhamento para amostras com 35% lactose e 65% celulose em diferentes umidades



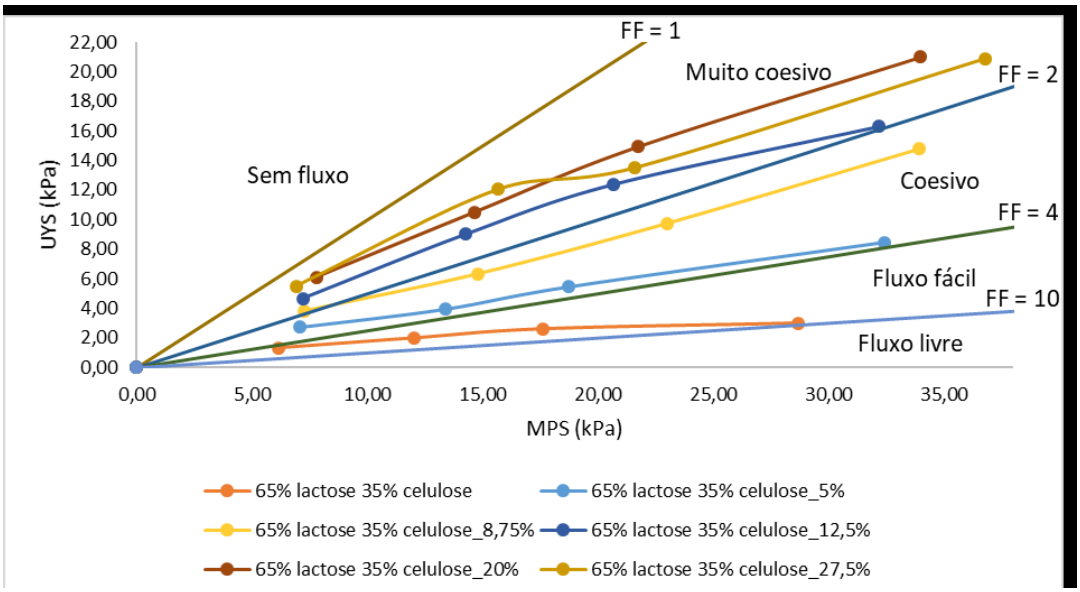
Fonte: Autora, 2019

Figura 47 - Cisalhamento para amostras com 50% lactose e 50% celulose em diferentes umidades



Fonte: Autora, 2019

Figura 48 - Cisalhamento para amostras com 65% lactose e 35% celulose em diferentes umidades



Fonte: Autora, 2019

Analisando os dados, utilizando como referência o ponto de pressão equivalente a 12 kPa, é possível observar uma tendência na fluidez das misturas, sendo que, quanto maior a umidade, maior a coesão, ou seja, menor a fluidez do material. Assim, o composto com 0% de umidade é considerado de fluxo fácil e o composto com 27,5% de umidade considerado muito coesivo.

Os resultados são coerentes com os apresentados nos testes de Energia Básica de Fluxo, onde os materiais com maior umidade necessitam de maiores energias para fluir, sendo que o contrário também é verdadeiro, quanto menor a umidade, menor a energia necessária para fluir.

No Apêndice C são apresentados os resultados para os testes de compressibilidade para todas as proporções lactose/celulose, separados pela porcentagem de umidades, sendo 0 (A); 5 (B); 8,75 (C); 12,5 (D); 20 (E) e 27,5% (F).

Comparando as amostras em relação a porcentagem lactose/celulose é possível concluir que quando se tratam dos extremos (0% e 27,5% de umidade) essa relação não tem influência significativa na coesão, já que as amostras permanecem na mesma faixa de fluidez (fluxo fácil e muito coesivo, respectivamente) e a inclinação das retas é praticamente a mesma.

No caso das amostras com 0% de umidade, podemos justificar esse fato analisando a geometria das partículas, já que lactose e celulose são semelhantes em

sua forma, pós finos e não aglomerados, assim, independentemente da quantidade de lactose ou celulose, a amostra terá fluxo fácil.

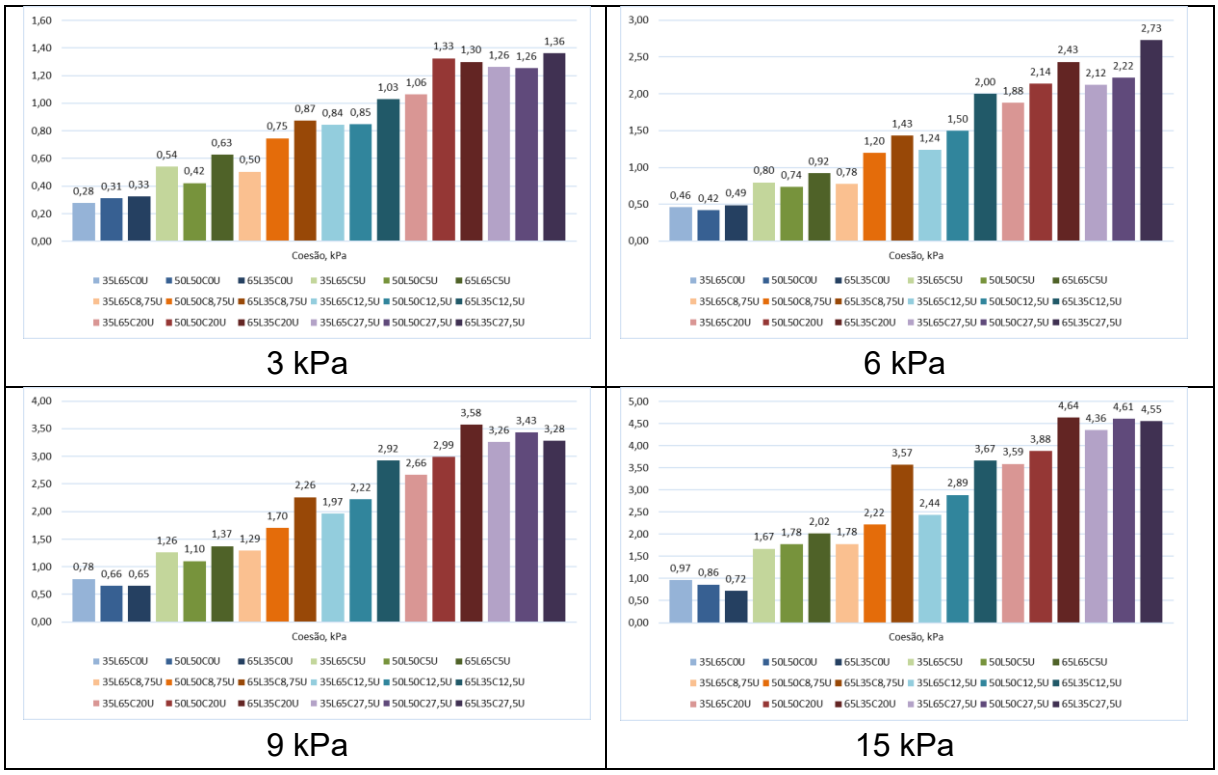
Já, quando observamos as amostras com 27,5% de umidade, é possível concluir que há uma saturação nesses casos. A umidade é tão alta que a composição já não tem influência significativa na fluidez, tornando todas as amostras muito coesivas.

Para os casos de umidade intermediária, as amostras seguem outro padrão. Aquelas onde a porcentagem de lactose é maior apresentam comportamento mais coesivo, sendo que as amostras com porcentagem de celulose maior apresentam comportamento mais fluido.

Isso se deve ao fato de a Lactose, possuir ligações interparticulares mais difíceis de serem rompidas, consequentemente, demandando maior energia para fluir. Já a Celulose, gera menos atrito para fluir, facilitando o fluxo da amostra.

Na Figura 49 são apresentados os resultados de coesão nas misturas com 35% de lactose e 65% de celulose, 50% de lactose e 50% de celulose e 65% de lactose e 35% de celulose nas umidades 0; 5; 8,75; 12,5; 20 e 27,5% e forças normais 3 kPa (A), 6 kPa (B), 9 kPa (C) e 15 kPa (D).

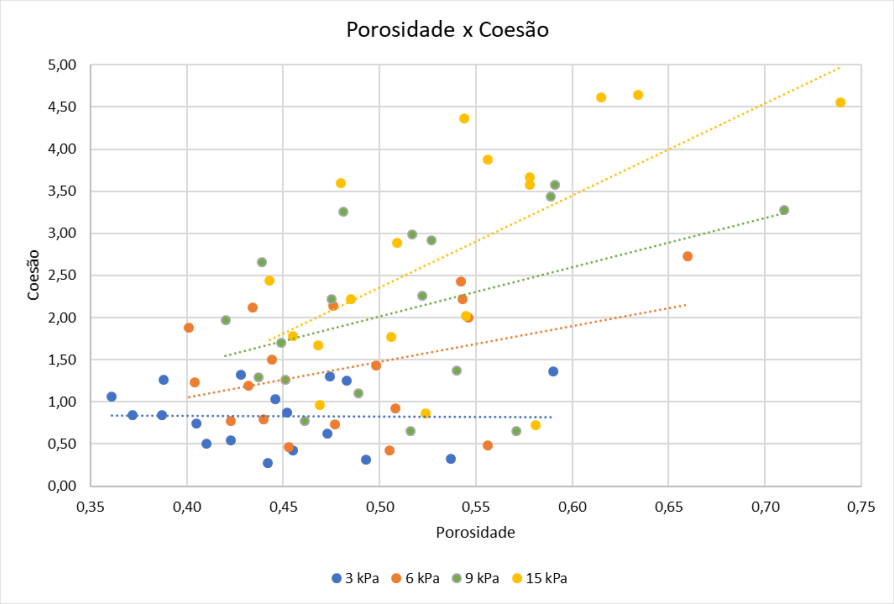
Figura 49 - Coesão em diferentes tensões normais



Fonte: Autora, 2019

Como já mostrado nos resultados, na Figura 49 podemos observar a tendência à maior coesão para amostras com maior umidade e maior porcentagem de Lactose, isso se repete em todas as tensões normais aplicadas. Na Figura 50 é mostrado a relação entre a porosidade e a coesão das amostras.

Figura 50 - Coesão em função da porosidade



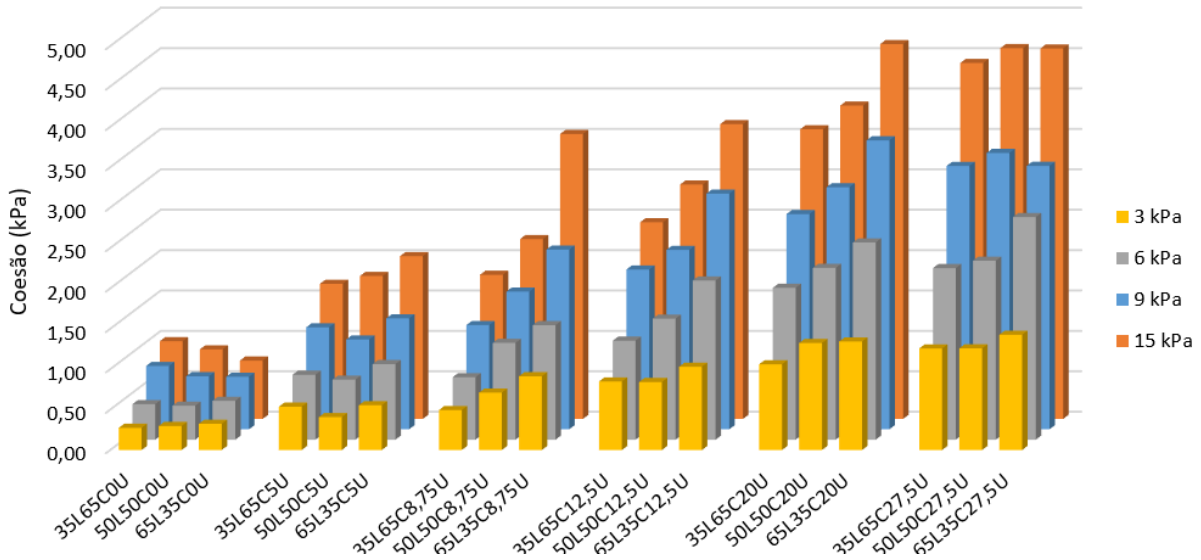
Fonte: Autora, 2019

Conforme observado na Figura 50 a tendência é de aumento na coesão com o aumento da porosidade, sendo que esse aumento se evidencia conforme o incremento na tensão normal aplicada. Fato esse devido à etapa de consolidação, onde o material é comprimido antes do cisalhamento, assim, com as partículas mais unidas as interações interparticulares são mais fortes.

Tais interações já são observadas mesmo antes da consolidação, visto que o elevado valor da porosidade se deve a coesão das partículas e a formação de aglomerados. O aumento da consolidação resultada na quebra destes aglomerados, gerando maior compressibilidade das amostras, principalmente das mais úmidas.

Um maior número de contatos interparticulares é adquirido nas amostras mais compactadas, aumentando assim a sua coesão. Finalmente, no intuito de se verificar a influência da composição, umidade e tensão normal aplicada na coesão, construiu-se o gráfico da Figura 51. É notável que as variáveis estudas influenciam de maneira distinta na coesão adquirida pelas diferentes amostras ensaiadas. Uma maneira de quantificar essas influências é apresentada na Seção 5.9 deste trabalho.

Figura 51 - Coesão



Fonte: Autora, 2019

5.9. TRATAMENTO ESTATISTICO DOS RESULTADOS

A Tabela 10 apresenta as correspondentes variáveis respostas médias utilizadas no planejamento experimental.

Tabela 10 – Dados para o planejamento experimental

R1	R2	BFE (mJ)	FRI	SE (mJ/g)	CBD (g/mL)	CPS (%)	AE (mJ)
- 1	+ 1	1337 (±146)	0,995 (±0,107)	13,5 (±2,04)	0,317 (±0,00616)	48,7 (±0,344)	2083 (±101)
0	+ 1	1782 (±162)	1,04 (±0,0691)	13,8 (±0,0621)	0,357 (±0,00925)	50,4 (±1,96)	2274,782
+ 1	+ 1	4619 (±6,69)	1,08 (±0,0123)	22,0 (±0,995)	0,467 (±0,00506)	48,6 (±2,15)	4052 (±624)
- 1	0	1103 (±9,32)	1,12 (±0,0925)	10,1 (±0,417)	0,339 (±0,00234)	36,7 (±0,481)	425 (±35,7)
0	0	1016 (±2,00)	1,08 (±0,0602)	10,8 (±0,291)	0,336 (±0,000844)	43,1 (±1,31)	914 (±28,0)
+ 1	0	1272 (±99,2)	1,08 (±0,0457)	11,7 (±0,399)	0,352 (±0,0143)	47,7 (±0,0463)	1420 (±51,6)
- 1	- 1	1424 (±12,9)	1,49 (±0,00594)	10,8 (±0,145)	0,412 (±0,000938)	16,0 (±0,307)	168,0 (±1,414)
0	- 1	1152 (±283)	1,34 (±0,0983)	8,7 (±1,65)	0,447 (±0,0101)	17,0 (±0,902)	191,5 (±6,364)
+ 1	- 1	1383 (±13,9)	1,35 (±0,0133)	10,0 (±0,0220)	0,487 (±0,000156)	18,3 (±0,184)	232,0 (±15,556)

Fonte: Autora, 2019

Os resultados dos modelos ajustados para o FRI, SE, CBD e CPS, obtidos pelo software *Statistica*, são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 11, 12, 13 e 14. Nestas referidas tabelas, o parâmetro o *Std. Err.* é o erro padrão do efeito de cada coeficiente composicional do ajuste polinomial proposto ; t(9) é o coeficiente de *t-student* com seu respectivo grau de liberdade; o *p* é o nível de significância do coeficiente (o qual foi fixado em 5% para o planejamento proposto); *Coeff* é o valor

numérico do coeficiente do modelo matemático ajustado e, finalmente, o R^2 é o coeficiente de correlação múltiplo do modelo proposto. Quanto mais próximo este coeficiente for de 1, melhor é o ajuste do polinômio ortogonal em relação aos pontos experimentais. Assim, as referidas tabelas apresentam estes coeficientes próximos à 1, indicando que os modelos matemáticos propostos são satisfatórios.

O nível de significância da porcentagem de lactose (R2) e do teor de umidade (R1) para cada variável de resposta é apresentado na coluna *p* das tabelas. Para *p* menor ou igual a 0,05, a variável independente é estatisticamente significante, e os coeficientes numéricos do modelo matemático proposto é apresentado na última coluna.

Finalmente, observa-se que o erro padrão (Std Err.) de alguns efeitos (Effect) foram maiores que os próprios valores do efeito, mas em todos os casos estes efeitos foram considerados estatisticamente insignificante e, portanto, os modelos obtidos são realmente representativos.

Tabela 11 - Modelo ajustado para o FRI

Factor	**Var.:FRI; R^2=0,85485; Adj:0,72583 MS Residual=0,0090137**				
	Effect	**Std.Err.**	**t(9)**	**p**	**Coeff.**
Intercept	1,174783	0,022378	52,49806	0,000000	1,174783
R1	-0,032336	0,054814	-0,58992	0,569754	-0,016168
$R1^2$	-0,033075	0,047470	-0,69674	0,503560	-0,016537
R2	-0,357295	0,054814	-6,51835	0,000109	-0,178648
$R2^2$	-0,121007	0,047470	-2,54912	0,031240	-0,060504
R1.R2	0,110548	0,067133	1,64670	0,134026	0,055274
$R1.R2^2$	-0,003780	0,058139	-0,06501	0,949587	-0,001890
$R1^2.R2$	0,039464	0,058139	0,67879	0,514344	0,019732
$R1^2.R2^2$	0,004417	0,050350	0,08773	0,932010	0,002209

Fonte: Autora, 2019

Analisando-se a Tabela 11, verifica-se que apenas os efeitos das variáveis R2 e $R2^2$ são significantes para o parâmetro FRI, ou seja, apenas a umidade influencia na energia básica de fluxo sob velocidade variável.

Tabela 12 - Modelo ajustado para o SE

Factor	Var.:SE; R^2=0,93791; Adj:0,88271 MS Residual=1,851716				
	Effect	Std.Err.	t(9)	p	Coeff.
Intercept	12,37425	0,320738	38,58052	0,000000	12,37425
R1	3,12058	0,785645	3,97200	0,003245	1,56029
$R1^2$	-1,94294	0,680389	-2,85563	0,018915	-0,97147
R2	6,59891	0,785645	8,39934	0,000015	3,29945
$R2^2$	-2,24133	0,680389	-3,29419	0,009316	-1,12067
R1.R2	4,64742	0,962215	4,82991	0,000934	2,32371
$R1.R2^2$	-1,16343	0,833303	-1,39617	0,196142	-0,58172
$R1^2.R2$	-1,14995	0,833303	-1,37998	0,200903	-0,57497
$R1^2.R2^2$	1,33586	0,721661	1,85108	0,097183	0,66793

Fonte: Autora, 2019

Os dados apresentados na Tabela 12 indicam que os efeitos combinados $R1.R2^2$, $R1^2.R2$ e $R1^2.R2^2$ não são significantes no índice de estabilidade (SE).

Tabela 13 - Modelo ajustado para o CBD

Factor	Var.:CBD; R^2=0,98593; Adj:0,97343 MS Residual=0,0001029				
	Effect	Std.Err.	t(9)	p	Coeff.
Intercept	0,390372	0,002391	163,2443	0,000000	0,390372
R1	0,079229	0,005858	13,5260	0,000000	0,039615
$R1^2$	-0,015667	0,005073	-3,0884	0,012963	-0,007833
R2	-0,068438	0,005858	-11,6836	0,000001	-0,034219
$R2^2$	-0,072198	0,005073	-14,2324	0,000000	-0,036099
R1.R2	0,037875	0,007174	5,2795	0,000507	0,018938
$R1.R2^2$	-0,049578	0,006213	-7,9799	0,000023	-0,024789
$R1^2.R2$	-0,016359	0,006213	-2,6331	0,027218	-0,008180
$R1^2.R2^2$	0,004625	0,005380	0,8596	0,412328	0,002313

Fonte: Autora, 2019

Enquanto que a densidade aparente da mistura, se mostrou dependente de todos os tipos de efeito, a exceção do efeito $R1^2.R2^2$, conforme os dados apresentados na Tabela 13.

Tabela 14 - Modelo ajustado para o CPS

Factor	Var.:CPS; R^2=0,99365; Adj:0,988 MS Residual=2,546154				
	Effect	Std.Err.	t(9)	p	Coeff.
Intercept	36,26113	0,376102	96,41293	0,000000	36,26113
R1	4,40548	0,921259	4,78202	0,000998	2,20274
$R1^2$	0,83669	0,797834	1,04871	0,321658	0,41835
R2	32,18216	0,921259	34,93281	0,000000	16,09108
$R2^2$	9,32355	0,797834	11,68609	0,000001	4,66178
R1.R2	-1,16919	1,128307	-1,03623	0,327134	-0,58459
$R1.R2^2$	4,92221	0,977143	5,03735	0,000702	2,46110
$R1^2.R2$	0,95021	0,977143	0,97244	0,356240	0,47511
$R1^2.R2^2$	0,03472	0,846230	0,04103	0,968170	0,01736

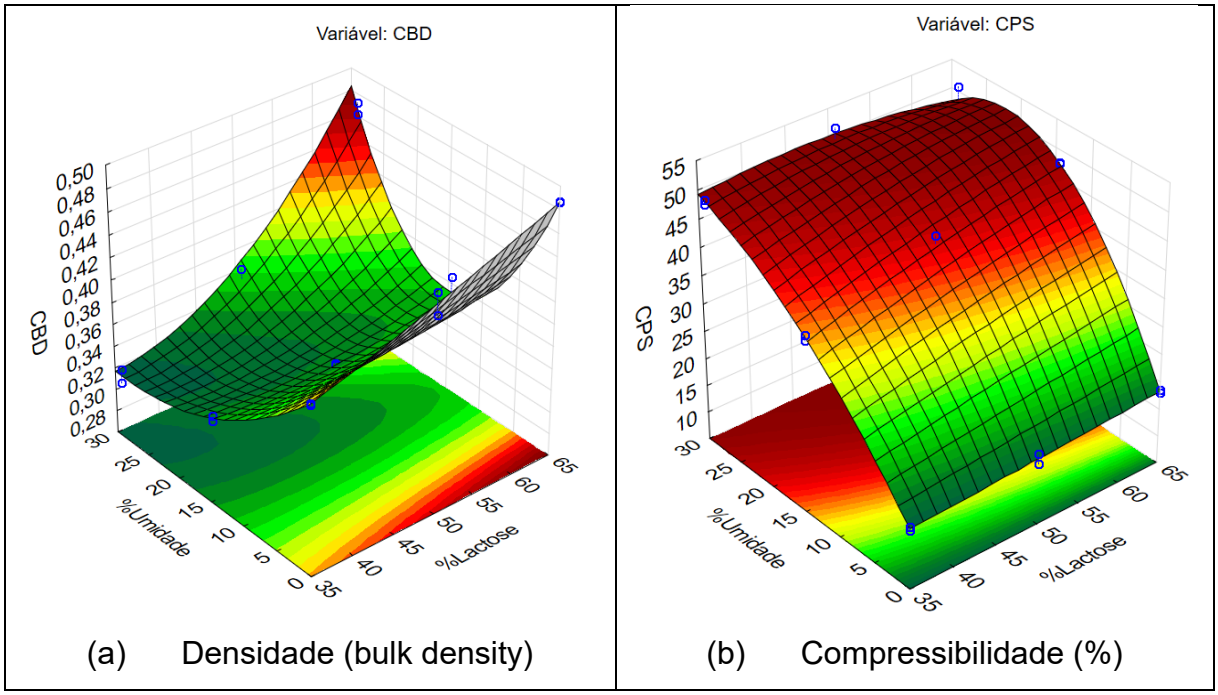
Fonte: Autora, 2019

Já, a compressibilidade das misturas se mostrou depende dos fatores R1, R2, $R2^2$ e $R1.R2^2$, conforme dos dados apresentados na Tabela 14.

Entretanto, os resultados obtidos anteriormente para as misturas secas mostraram que a compressibilidade é dependente do teor de lactose presente na mistura. Isto significa que para as misturas úmidas, a umidade passa a ter um efeito predominante.

Uma melhor compreensão da dependência das variáveis umidade e composição das misturas pode ser realizada através da visualização das curvas de superfícies, apresentadas na Figura 52, e a adequação do modelo mediante uma comparação entre os valores preditos e os observados experimentalmente, segundo Figura 53.

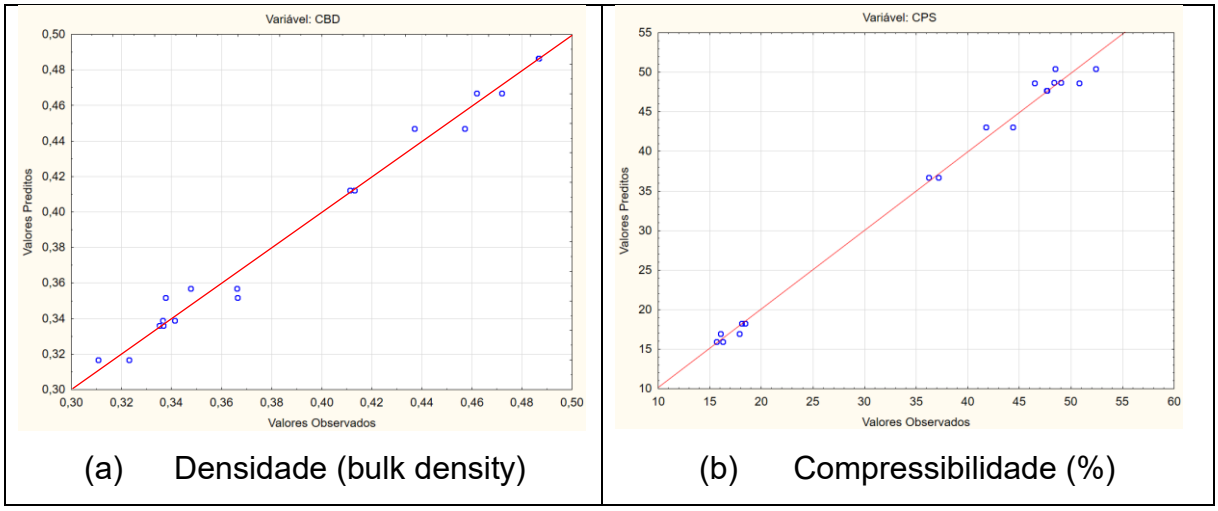
Figura 52 – Gráficos de superfície para a densidade aparente e compressibilidade



(a) Densidade (bulk density) (b) Compressibilidade (%)

Fonte: Autora, 2019

Figura 53 - Gráficos comparativos dos valores observados e preditos para CDB e Compressibilidade (CPS)



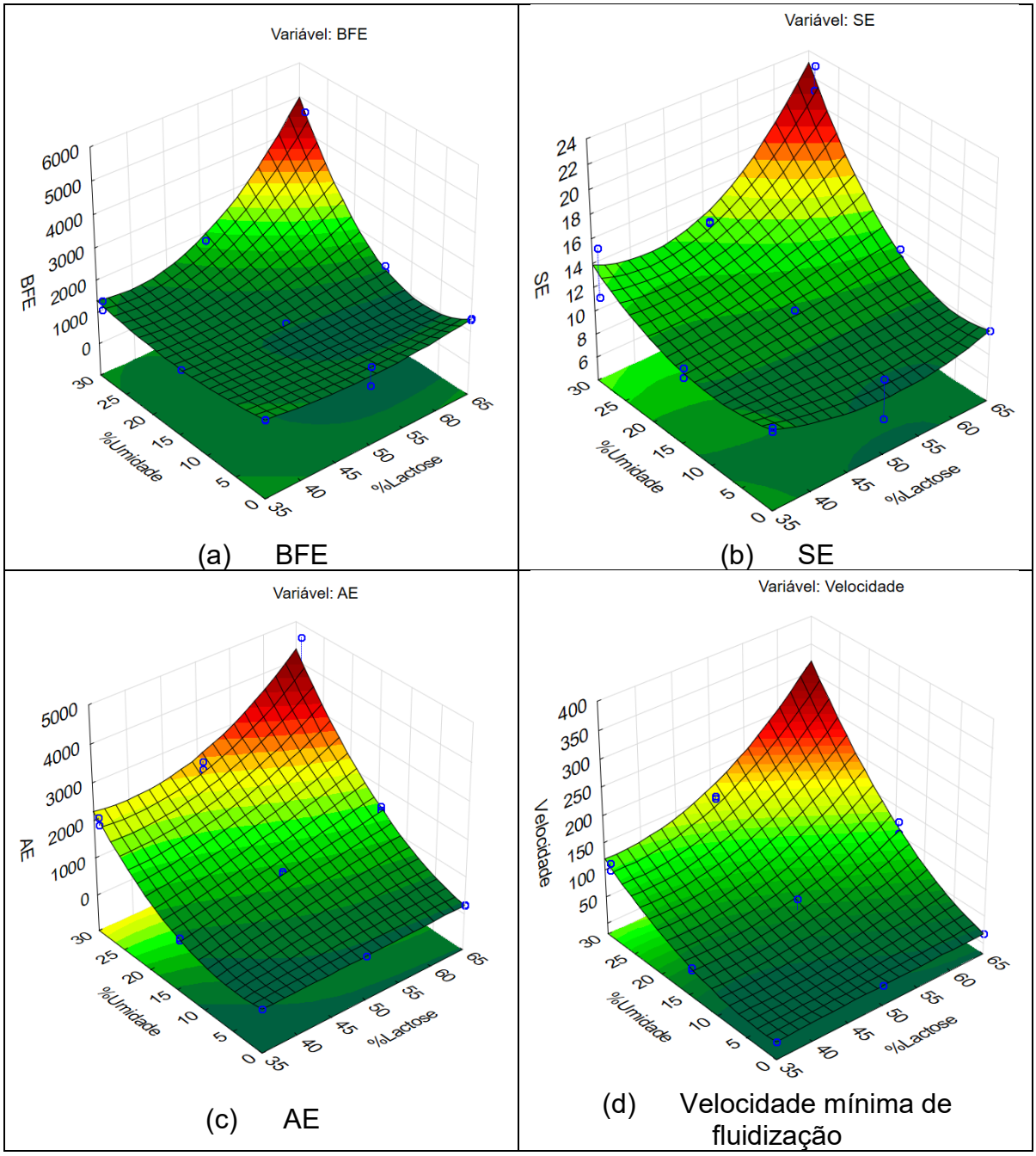
(a) Densidade (bulk density) (b) Compressibilidade (%)

Fonte: Autora, 2019

Pela Figura 53, observa-se uma boa concordância entre os valores preditos e os experimentais, confirmando, mais uma vez, que os modelos matemáticos propostos para inferir o efeito da umidade e composição das amostras nas suas características físicas avaliadas foram satisfatórios.

Outras variáveis dependentes, cujos erros experimentais são mais expressivos, também foram analisados estatisticamente, porém a melhor forma de compará-los é através das curvas de superfícies. Desta forma, o comportamento da energia básica de fluxo (BFE), a velocidade mínima de fluidização, o índice de estabilidade (SE) e a energia de aeração (AE) em função do teor de umidade e de lactose presente nas misturas estão graficamente representados na Figura 54.

Figura 54 – Gráficos de superfície para as variáveis dependentes BFE, AE, SE e velocidade mínima de fluidização .

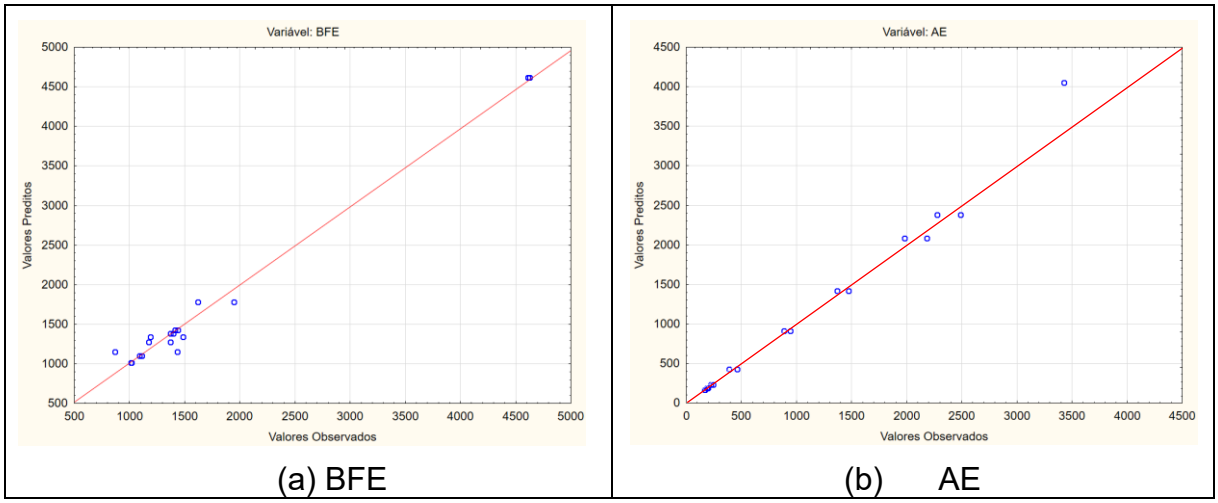


Fonte: Autora, 2019

Analisando a Figura 54 vemos que os gráficos de superfície do BFE, SE, AE e velocidade mínima de fluidização possuem, em geral, o mesmo comportamento, com valores mais elevados para as amostras contendo os maiores teores de lactose e de umidade. Desta forma, é possível afirmar que a resistência ao movimento oferecida pelas amostras é concisa, independente do mecanismo gerador do fluxo (aeração ou agitação) e da condição da amostra (aerada ou consolidada). Assim, pode-se afirmar que a pior condição de fluxo (energia ou velocidade de aeração) é observada para a amostras contendo maior teor de umidade e de lactose e a melhor, para as amostras secas, independente da sua composição.

Finalmente, a Figura 55 apresenta uma comparação entre os valores experimentais com os valores preditos pelos modelos matemáticos propostos para a Energia Básica de Fluxo do material não aerado (BFE) e aerado (AE), respectivamente. A partir delas, é possível afirmar que o modelo matemático obtido para prever estas grandezas a partir da umidade e composição da mistura é satisfatório.

Figura 55 - Gráficos comparativos dos valores preditos e observados para BFE e AE.



(a) BFE (b) AE

Fonte: Autora, 2019

Com o intuito de estimar as variáveis resposta para outros valores de umidade, foram geradas equações com variáveis codificadas. Assim, os valores intermediários de umidade (8,75 e 20%, por exemplo) podem ser codificados e utilizados nas equações.

Os coeficientes dos polinômios para o BFE, SE, CBD, CPS, AE e velocidade mínima de fluidização são apresentados na Figura 56, onde x_1 é a variável codificada

do teor de umidade (R1) e x_2 a variável codificada da porcentagem de lactose (R2). Sendo que foram considerados apenas os coeficientes dos efeitos significativos.

Figura 56 – Coeficientes dos polinômios

Y	β00	β10	β20	β01	β02	β11	β12	β21	β22	R^2
BFE	1676,535	568,567	-269,914	629,691	-409,617	830,716	-362,758	-236,189	138,115	0,987
FRI	1,175	0	0	-0,179	-0,061	0,000	0	0	0	0,855
SE	12,374	1,560	-0,971	3,299	-1,121	2,324	0	0	0	0,938
CBD	0,390	0,040	-0,008	-0,034	-0,036	0,019	-0,025	-0,008	0	0,986
CPS	36,261	2,203	0	16,091	4,662	0	2,461	0	0	0,994
AE	1318,641	504,719	0	1321,010	-299,303	476,417	0	0	0	0,971
Vel	89,835	45,980	-12,733	87,358	-19,630	46,685	0	0	0	0,972

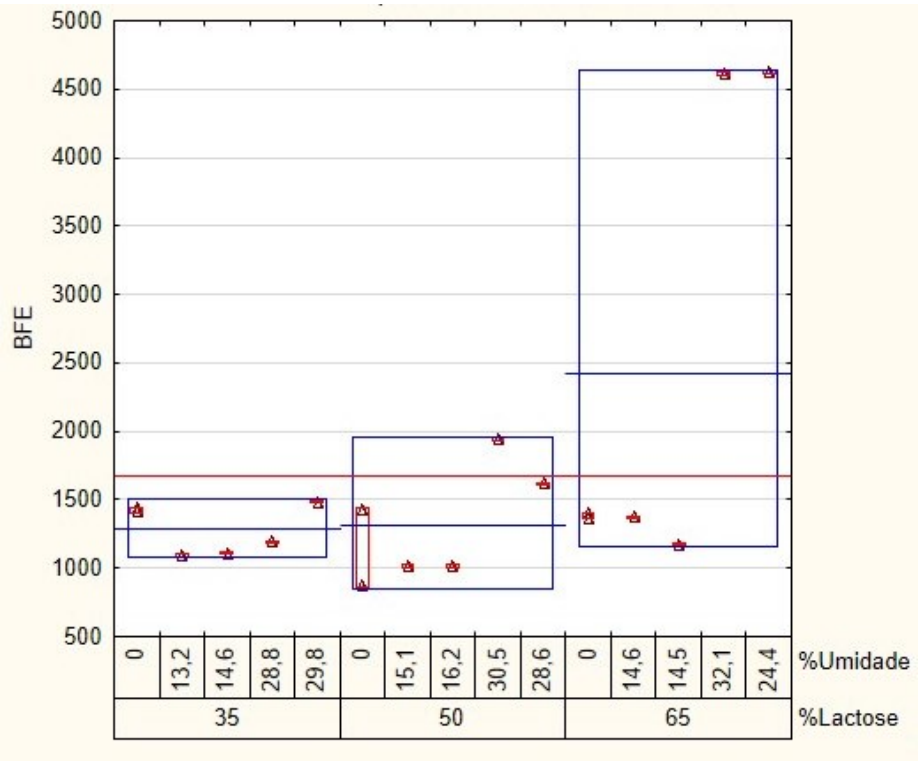
Fonte: Autora, 2019

Com o intuito de se poder inferir na confiabilidade das expressões matemáticas obtidas pelo ajuste dos polinômios ortogonais através da análise de variância (ANOVA), uma vez que a variável independente umidade (R2) não era necessariamente constante e igual em todos os ensaios de mesmo teor pretendido, procedeu-se com a análise de variabilidade deste parâmetro. Esta análise consistiu na representação gráfica dos valores experimentais da variável dependente em função da variação dos valores das variáveis independentes.

Os respectivos gráficos representam uma região suscetível ao efeito de um parâmetro variável isolado, neste caso a umidade, bem com seu valor médio nesta região demarcada como também o valor médio global do ensaio. Desta forma, é possível verificar se a variação real do valor numérico da variável independente não constante é representativa ou não para sistema como um todo.

Os gráficos de variabilidade para o BFE, SE, CBD, CPS, AE, velocidade mínima de fluidização e coesão são apresentados nas Figuras de 57 a 64.

Figura 57 – Variabilidade para o BFE

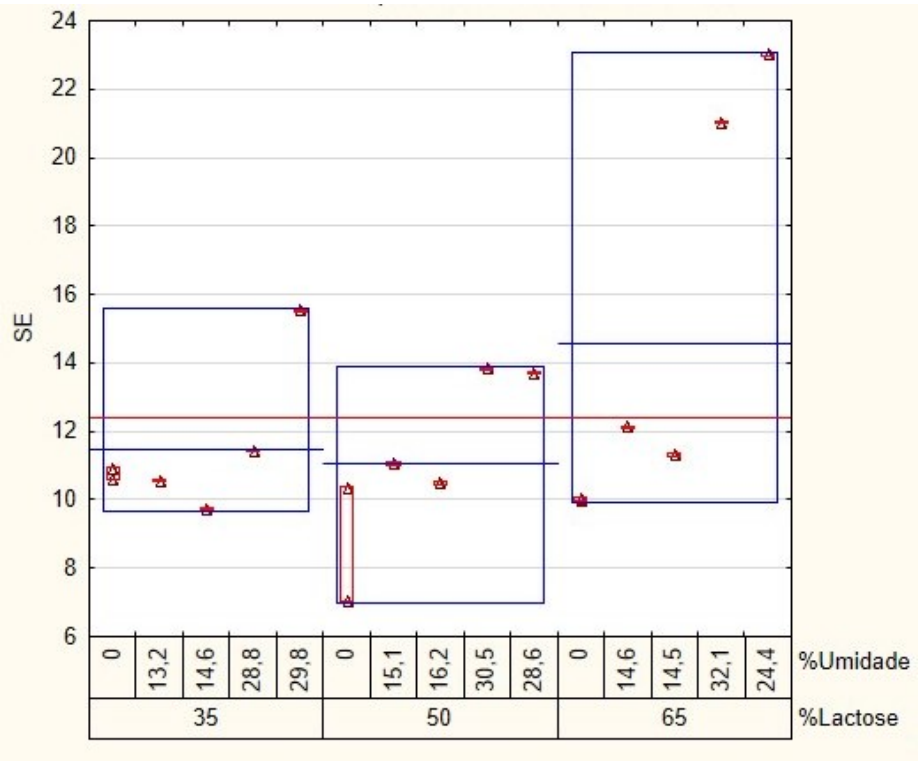


Fonte: Autora, 2019

Analisando a Figura 57, praticamente não se detecta variações na energia básica de fluxo para as variações dos valores reais de umidade para uma mesma composição, indicando que o valor médio utilizado para a determinação do modelo estatístico é aceitável. Pode-se verificar também uma independência do valor de BFE com a composição para as amostras secas e uma acentuada tendência ao aumento deste com o teor de umidade, corroborando com os dados dos gráficos apresentados anteriormente.

Com isso, conclui-se, mais uma vez, que a aproximação utilizada na análise de variância (ANOVA – Statistica) empregando-se os valores de umidade médios de forma a garantir intervalos equidistantes para os níveis de umidade do modelo foram representativos.

Figura 58 – Variabilidade para o SE

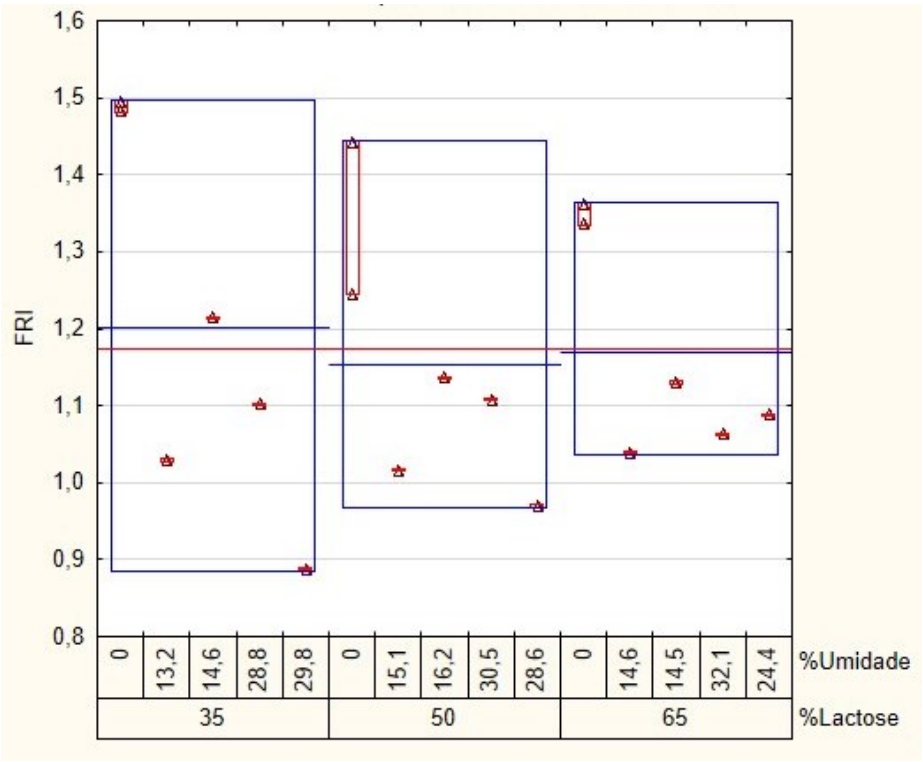


Fonte: Autora, 2019

Analisando a Figura 58, observa-se que a média decresce para porcentagens de lactose intermediária, principalmente, quando são analisadas as amostras com 0% de umidade, o que pode indicar alguma inconsistência no sistema, pois, quando analisado o gráfico de superfícies, seu comportamento se mostra satisfatório quando comparado com os outros resultados da mesma amostra.

Quando analisados os resultados para uma mesma composição de lactose, conclui-se que o SE aumenta para teores de umidade maiores, mais uma vez corroborando com os resultados dos gráficos de superfície mostrados anteriormente, já que o SE é a energia necessária para o material fluir quando não confinado, e possui o mesmo comportamento quando analisado o material confinado (BFE).

Figura 59 – Variabilidade para o FRI

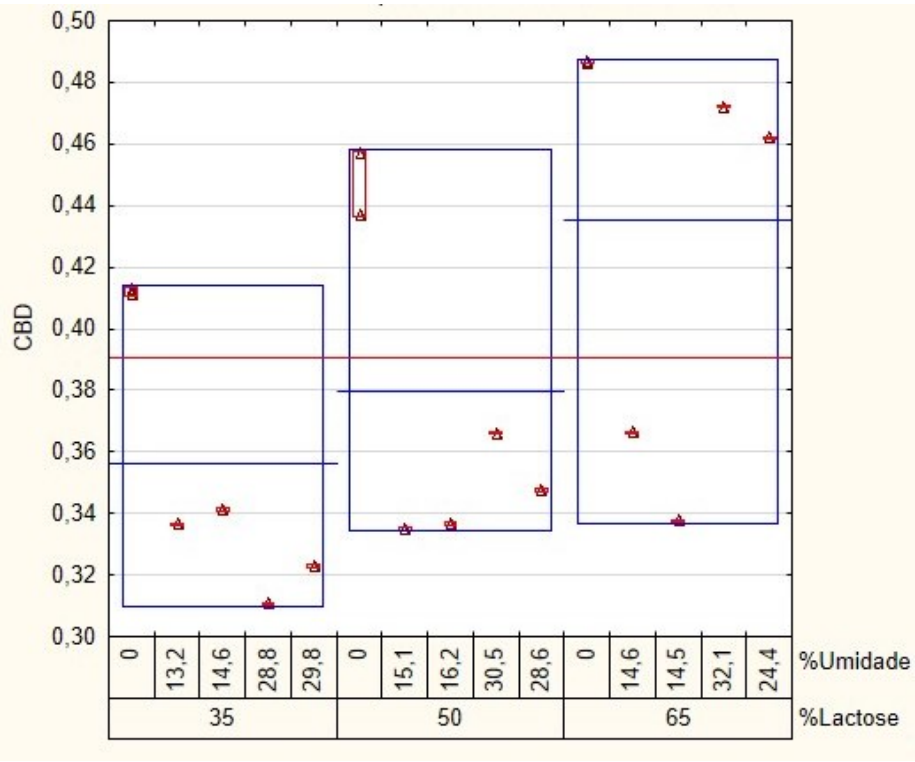


Fonte: Autora, 2019

Analisando a Figura 59, conclui-se que as maiores variações de valores de FRI são com as menores quantidades de lactose, numa faixa de 0,9 a 1,5, indicando que o material é pouco sensível a variação de fluxo, pulverulento e coeso.

Quando analisamos apenas as amostras com a mesma porcentagem de lactose, conclui-se que os valores de FRI são inversamente proporcionais à porcentagem de lactose, ou seja, quanto maior a porcentagem de lactose, menor o valor do FRI.

Figura 60 – Variabilidade para o CBD

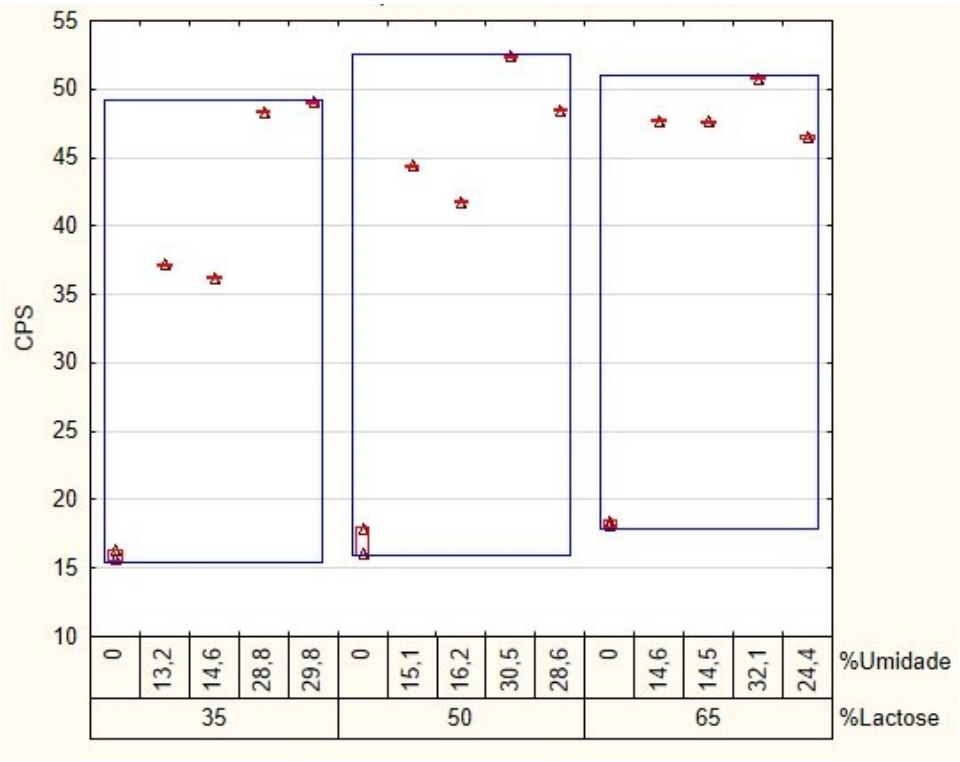


Fonte: Autora, 2019

Analisando a Figura 60, conclui-se que os valores de CBD são decrescentes para a amostra com 35% de lactose, sendo que o menor valor se encontra por volta de 30. Na amostra com 50% de lactose observa-se um mínimo passando por 15% e para a mostras com 65% de lactose, não há diferença significativa entre 0 e 30%, novamente passando pelo mínimo em 15%.

Porém, quando analisado o gráfico como um todo, vemos uma tendência ao aumento da densidade com o aumento da umidade e porcentagem de lactose. Esse resultado se deve ao fato de que as partículas com maiores teores de umidade se aglomeram, formando partículas maiores e com maiores volumes de vazios entre elas, quando aplicamos uma força através do pistão, já que essa medida de densidade é feita no estado consolidado do leito, esses aglomerados se desmancham e o volume total do leito diminui, espontaneamente, aumentando a densidade.

Figura 61 – Variabilidade para o CPS

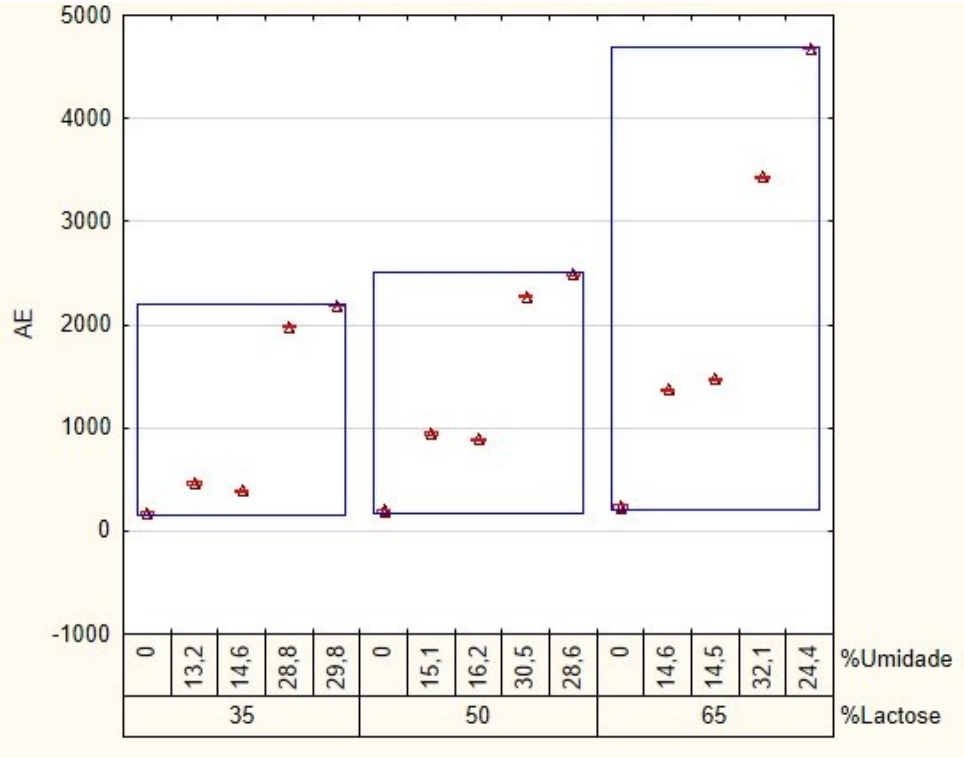


Fonte: Autora, 2019

Já na Figura 61, conclui-se que todas as amostras atingem o máximo valor de CPS em 30% de umidade independente da composição. Porém de forma mais acentuada com a composição de lactose, sendo que para a máxima composição, já se observa a saturação por volta de 15% de umidade.

Quando observadas as amostras secas, os valores de compressibilidade são mais baixos, já que as mesmas não são aglomeradas como nos casos com maiores teores de umidades, onde há a formação de aglomerados e maior volume de vazios, que se desmancham ao serem comprimidos, aumentando as taxas de compressibilidade do material, mais uma vez, corroborando com os resultados obtidos anteriormente nos gráficos de superfície e nos próprios testes de compressibilidade.

Figura 62 – Variabilidade para o AE



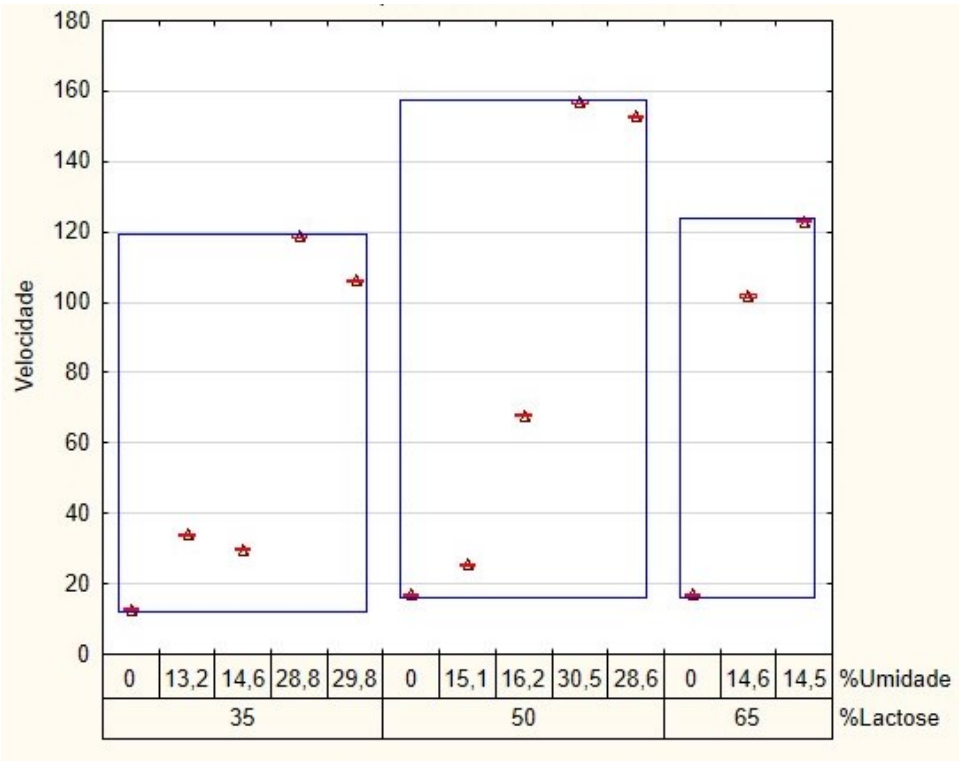
Fonte: Autora, 2019

Na Figura 62, observa-se que para todas as amostras, o comportamento do AE se repete, sendo crescente para maiores quantidades de umidade e lactose, assim como já mostrado no gráfico de superfície. Este resultado indica uma maior dificuldade do material fluir em amostras com altos teores de umidade e lactose.

Quando analisamos amostras com os mesmos teores de umidade e diferentes teores de lactose, também é possível observar um comportamento crescente, ou seja, quando aumentamos o teor de lactose, aumentamos também a energia necessária para o material fluir quando há a passagem de fluido.

A exceção é para as amostras com 0% de umidade, onde não há crescimento significativo quando são analisadas amostras com diferentes teores de lactose, sendo possível concluir que não há influência significativa da porcentagem de lactose para esse material.

Figura 63 – Variabilidade para a velocidade mínima de fluidização

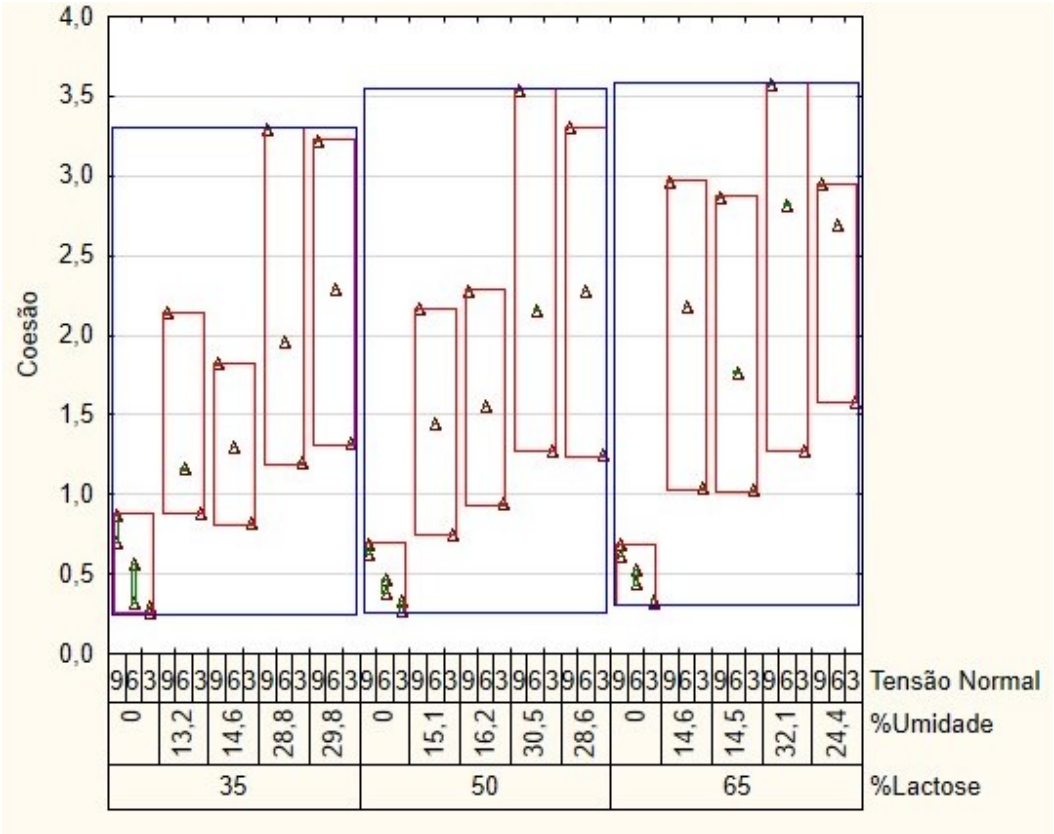


Fonte: Autora, 2019

Analisando a Figura 63, conclui-se que quanto maior o teor de lactose e umidade maior a velocidade mínima necessária para o material fluidizar, o comportamento aqui é semelhante ao do AE, indicando que tanto o teste no reômetro como o teste no leito fluidizado se assemelham, o que já era esperado.

A Figura 64 representa uma região suscetível ao efeito de dois parâmetros, neste caso a umidade e a força de consolidação, na coesão, tornando possível verificar se a variação real do valor numérico da variável independente não constante é representativa ou não para sistema como um todo, bem como analisar em conjunto os efeitos da força de consolidação no sistema.

Figura 64 – Variabilidade para a coesão



Fonte: Autora, 2019

Na Figura 64 para todos os casos verifica-se a queda na coesão com a diminuição da força de consolidação, já que um maior número de contatos interparticulares é adquirido nas amostras mais compactadas, aumentando assim a sua coesão. Porém, é possível observar uma tendência ao aumento da coesão com o aumento da umidade e um aumento menos acentuado com a porcentagem de lactose.

Conforme foi estudado nos capítulos anteriores, o aumento no teor de umidade torna o material mais coeso, já que as forças entre partículas são mais fortes, porém, quando temos valores acima de 20~27,5% de umidade é possível observar uma saturação no sistema, onde não há mais variações significativas de coesão quando aumentada a umidade acima desse valor.

A lactose, conforme já mencionado anteriormente, torna o material menos susceptível a fluidez e também mais coeso, como a umidade. Porém, neste caso é possível observar uma tendência mais discreta na influência desse parâmetro no sistema.

6. CONCLUSÃO

A análise granulométrica mostrou um efeito predominante da composição no diâmetro volumétrico médio das partículas, o qual se torna posteriormente independente do teor de umidade presente na amostra.

Foi observada uma tendência ao aumento da densidade aparente da mistura com o aumento da quantidade de lactose na mistura. Já a porosidade do leito das misturas tende a aumentar com o teor de celulose presente na composição da mistura, analisando amostras com o mesmo teor de umidade. Para diferentes teores de umidades, todas as misturas, independentemente de sua composição, sofrem um aumento da porosidade e, consequentemente, uma redução da densidade aparente, com o aumento da umidade.

Através da análise dos testes de BFE e VRF, foi observado que as amostras secas seguem a tendência de um sutil aumento na BFE com o aumento da porosidade. Porém, analisando as amostras úmidas, temos uma tendência a diminuição da BFE com o aumento da porosidade.

Os testes de compressibilidade, mostram que a porcentagem de compressão é sutilmente influenciada pelo teor de lactose presente na mistura. Contudo, as amostras contendo maior teor de lactose apresentam menor porosidade, indicando que essa maior compressibilidade não se deve exclusivamente às orientações ou deformações das partículas fibrosas de celulose no leito.

Pelos testes de aeração, podemos classificar as amostras em 3 grupos: prontamente aeráveis: amostras com 0 e 5% de umidade; não apresentam fluidização: amostras com 20 e 27,5% de umidade; intermediárias: amostras com 8,75 e 12,5% de umidade.

Pelos resultados de cisalhamento, pode-se observar a tendência à maior coesão para amostras com maior umidade, maior porosidade e maior porcentagem de lactose, o que foi observado para todas as tensões normais aplicadas.

Analisando os gráficos do leito fluidizado clássico, vemos que para uma mesma proporção lactose/celulose a velocidade mínima de fluidização aumenta conforme o aumento da umidade.

Após a realização dos testes no reômetro e no leito fluidizado, os resultados foram analisados através do software *Statistica*, o qual nos mostrou que os resultados foram satisfatórios e o modelo ajustado, considerando as variáveis independentes,

estimou os parâmetros estudados bastante próximo dos valores mensurados experimentalmente, sendo possível analisar teores de umidade e lactose intermediários com boa precisão no resultado final.

Além disso, a contribuição quantitativa de cada parâmetro, segundo o modelo matemático proposto pelo *Statistica*, foi capaz de estimar cada caraterística ensaiada após ponderar de forma distinta cada uma das variáveis independentes analisadas. Como por exemplo a FRI que só depende da umidade e o CBD que depende de todos os tipos de interações entre umidade e composição.

REFERÊNCIAS

ABDULLAH, E.; GELDART, D. The use of bulk density measurements as flowability indicators. **Powder Technology**, [s.l.], v. 102, n. 2, p.151-165, mar. 1999. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/s0032-5910(98)00208-3.

ALLEN, L.; POPOVICH, N.; ANSEL, H. **Ansel's Pharmaceutical Dosage Forms and Drug Delivery Systems.** 9. ed. Philadelphia, 2010. 720 p.

AULTON, M. **Delineamento de Formas Farmacêuticas.** 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2005. 678 p.

BAIÃO, D. **Estudo das Propriedades de Pré-Misturas Farmacêuticas e suas Possíveis Influências no Processo Produtivo.** 2018. 205 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2018.

BBC. **What is cellulose?** Disponível em: <http://www.bbc.co.uk/guides/z2d2gdm>. Acesso em: 24 jul. 2018.

BURATINI, E. **Estudo da Velocidade Mínima de Fluidização Através de Ensaios Reológicos de Materiais Particulados com Diferentes Propriedades Superficiais.** 2017. 221 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2017.

CAMPOS, M. **Análise da Escoabilidade de Pós.** 2012. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

CREMASCO, M. Caracterização de Partículas. Fluidodinâmica de uma Partícula Isolada. Fluidização. In: CREMASCO, M. A. **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos.** São Paulo: Blucher, 2012. p. 127-179, 265-293.

CONDOTTA, R. **Coulabilite de Poudres Cohesives: Measures aux Faibles Contraintes, Granulaires Humides et Apllication a une Poudre Industrielle.** 2005. 257f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Química, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, 2005.

COOKE, J.; FREEMAN, R. The Flowability of Powders and the Effect of Flow Additives. **World Congress on Particle Technology**, Orlando, p.1-12, 2006. Disponível em: <https://www.freemantech.co.uk/literature/conference%20papers/The_flowability_of_Powders_and_the_effect_of_flow_additives_WCPT_2006_2.pdf>. Acesso em: 06 maio 2019.

DIERICH, F.; NIKRITYUK, P. **A numerical study of the impact of surface roughness on heat and fluid flow past a cylindrical particle**. In International Journal of Thermal Sciences, 2013. p. 92-103.

ECONOMIA - IG. **Leia sete frases marcantes de Steve Jobs.** Disponível em: <http://economia.ig.com.br/leia-sete-frases-marcantes-de-steve-jobs/n1597258812940.html>. Acesso em: 21 fev. 2018.

ELEMENTS, American. **Aluminum oxide**. Disponível em: <http://www.panadyne.com/aluminumoxide.html>. Acesso em: 28 mar. 2018.

EMERY, E. **Flow Properties of Selected Pharmaceutical Powders.** 2009. 107 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, University Of Saskatchewan, Saskatoon, 2009.

FITZPATRICK, J.; BARRINGER, S.; IQBAL, T. Flow property measurement of food powders and sensitivity of Jenike's hopper design methodology to the measured values. **Journal of Food Engineering**, v. 61, n. 3, p.399-405, fev. 2004. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/s0260-8774(03)00147-x.

FJAERVOLL, K. **De Spinner Textilfiber av Svensk Skog.** 2016. Disponível em: <https://www.skog-supply.se/article/view/237256/de_spinner_textilfiber_av_svensk_skog>. Acesso em: 24 jul. 2018.

FRAIGE, F.; LANGSTON, P.; MATCHETT, A.; DODDS, J. Vibration induced flow in hoppers: DEM 2D polygon model. **Particuology**, [s.l.], v. 6, n. 6, p.455-466, dez. 2008. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.partic.2008.07.019.

FREEMAN TECHNOLOGY. **Conditioning.** 2014. Disponível em: <http://www.freemantech.co.uk/_powders/powder-testing-conditioning>. Acesso em: 14 jun. 2018.

FREEMAN TECHNOLOGY. **Powder Testing with the FT4 Powder Rheometer.** 2014. Disponível em: <http://www.freemantech.co.uk/_powders/ft4-powder-rheometer-universal-powder-tester>. Acesso em: 14 jun. 2018.

FREEMAN TECHNOLOGY (Org.). **User manual:** FT4 Powder Rheometer Manuals. 2008.

FREEMAN TECHNOLOGY. **Using Dynamic Methods to Quantify the Effects of External Variables.** 2014. Disponível em: <http://www.freemantech.co.uk/_powders/powder-testing-external-variables>. Acesso em: 14 jun. 2018.

GANESAN, V.; ROSENTRATER, K.; MUTHUKUMARAPPAN, K. Flowability and handling characteristics of bulk solids and powders – a review with implications for DDGS. **Biosystems Engineering,** v. 101, n. 4, p.425-435, dez. 2008. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.09.008.

GELDART, D.; ABDULLAH, E. The use of bulk density measurements as flowability indicators. **Powder Technology**, v. 102, n. 2, p.151-165, mar. 1999. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/s0032-5910(98)00208-3.

HARMON, T. Beyond the first generation of orally disintegrating tablets. **Tablets & Capsules**, Minessota, v. 4, n. 6, p.1-6, jan. 2006.

HUANG, Q.; ZHANG, H.; ZHU, J. Flow properties of fine powders in powder coating. **Particuology**. v. 8, p. 19-27. 2010.

HUANG, Z.; SCICOLONE, J.; GURUMUTHY, L.; DAVÉ, R. Flow and bulk density enhancements of pharmaceutical powders using a conical screen mill: A continuous dry coating device. **Chemical Engineering Science**, v. 125, p.209-224, mar. 2015. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2014.05.038.

IQBAL, T.; FITZPATRICK, J.; LANEY, C.; OGH, M. Effect of powder properties and storage conditions on the flowability of milk powders with different fat contents. **Journal of Food Engineering**, v. 64, n. 4, p.435-444, out. 2004. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.11.011.

JI, J.; FITZPATRICK, J.; CRONIN, K.; FENELON, M.; MIAO, S. The effects of fluidised bed and high shear mixer granulation processes on water adsorption and flow properties of milk protein isolate powder. **Journal of Food Engineering**, v. 192, p.19-27, jan. 2017. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.07.018.

JULIANO, P.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. Food Powders Flowability Characterization: Theory, Methods, and Applications. **Annual Review Of Food Science And Technology**, v. 1, n. 1, p.211-239, abr. 2010. Annual Reviews. http://dx.doi.org/10.1146/annurev.food.102308.124155.

KAERGER, J.; EDGE, S.; PRICE, R. Influence of particle size and shape on flowability and compactibility of binary mixtures of paracetamol and microcrystalline cellulose. **European Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 22, n. 2-3, p.173-179, jun. 2004. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ejps.2004.03.005

KRANTZ, M.; ZHANG, H.; ZHU, J. Characterization of powder flow: Static and dynamic testing. **Powder Technology**, v. 194, n. 3, p.239-245, set. 2009. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2009.05.001.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2nd ed. EUA: Butterworth-Heinemann, 1991.

LACHMAN, L.; LIEBERMAN, H.; KANIG, J. **Teoria e Prática na Indústria Farmacêutica.** 2. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2001. 1517 p.

LETURIA, M.; LETURIA, M.; BENALI, M.; LAGARDE, S.; RONGA, I.; SALEH, K. Characterization of flow properties of cohesive powders: A comparative study of traditional and new testing methods. **Powder Technology**, v. 253, p.406-423, fev. 2014. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2013.11.045.

LUMAY, G.; BOSCHINI, F.; TRAINA, K.; BONTEMPI, S.; VANDEWALLE, N. Measuring the flowing properties of powders and grains. **Powder Technology,** v. 224, p.19-27, jul. 2012. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2012.02.015.

MATHEWS, L.; CHANDLER, C.; DIPALI, S.; ADUSUMILLI, P.; LECH, S.; DASKALAKIS, S.; MATHIS, N. Monitoring Blend Uniformity with Effusivity. **Pharmaceutical Technology**, New Brunswick, v. 26, n. 4, p.80-84, abr. 2002. Mensal. Disponível em:

<http://files.alfresco.mjh.group/alfresco_images/pharma//2014/08/22/7c454fac-f43c-4e90-b7a6-0d64f2d297ef/article-14109.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2019.

MORE: Mecanismo online para referências, versão 2.0. Florianópolis: UFSC Rexlab, 2013. Disponível em: <http://www.more.ufsc.br/>. Acesso em: 21 fev. 2018.

MOREYRA, R.; PELEG, M. Effect of Equilibrium Water Activity on the Bulk Properties of Selected Food Powders. **Journal of Food Science,** v. 46, n. 6, p.1918-1922, nov. 1981. Wiley. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1981.tb04519.x.

MUZZIO, F.; GOODRIDGE, C.; ALEXANDER, A.; ARRATIA, P.; YANG, H.; SUDAH, O.; MERGEN, G. Sampling and characterization of pharmaceutical powders and granular blends. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 250, n. 1, p.51-64, jan. 2003. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/s0378-5173(02)00481-7.

NÄRVÄNEN, T.; LIPSANEN, T.; ANTIKAINEN, O.; RÄIKKÖNEN, H.; YLIRUUSI, J. Controlling granule size by granulation liquid feed pulsing. **International Journal of Pharmaceutics,** v. 357, n. 1-2, p.132-138, 5 jun. 2008. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpharm.2008.01.060.

NITZ, M.; GUARDANI, R. **Fluidização Gás-Sólido – Fundamentos e Avanços**. 2015. 13f. Disponível em: <http://maua.br/files/artigos/artigo-fluidizacao-gas-solido-prof-nitz.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2018.

ORANGE DEER STUDIO. **Aluminium Oxide (Corundum).** Disponível em: <https://www.shutterstock.com/es/image-illustration/aluminium-oxide-aluminum-al2o3-commonly-called-687846868>. Acesso em: 28 ago. 2018.

ORANGE DEER STUDIO. **Silicon Dioxide.** Disponível em: <https://www.shutterstock.com/pt/image-illustration/silicon-dioxide-known-silica-chemical-compound-677591869>. Acesso em: 28 ago. 2018.

PAPINI, C.; NETO, R. Análise Granulométrica de Pós Metálicos por Difração de Laser Via Seca. In: 17° CBECIMAT - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17., 2006, Foz do Iguaçu. **Anais.** São Paulo: CBECIMat, 2006. p. 5024 - 5035. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/2006/cbecimat/12576.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2018.

PESSANHA, A.; ROLIM, L.; PEIXOTO, M.; SILVA, R.; NETO, P. Influência dos excipientes multifuncionais no desempenho dos fármacos em formas farmacêuticas. **Revista Brasileira de Farmácia**, Recife, v. 93, n. 2, p.136-145, abr. 2012. Disponível em: <http://rbfarma.org.br/files/rbf-2012-93-2-2.pdf>. Acesso em: 15 maio 2019.

PINGALI, K.; MENDEZ, R.; LEWIS, D.; MICHNIAK-KOHN, B.; CUITINO, A.; MUZZIO, F. Mixing order of glidant and lubricant – Influence on powder and tablet properties. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 409, n. 1-2, p.269-277, maio 2011. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpharm.2011.02.032.

PODCZECK, F.; NEWTON, J.; JAMES, M. Assessment of adhesion and autoadhesion forces between particles and surfaces. Part II. The investigation of

adhesion phenomena of Salmeterol Xinafoate and lactose monohydrate particles in particle-on-particle and particle-on-surface contact. **Journal of Adhesion Science and Technology.** 1995. p. 475–486.

PRESCOTT, J.; BARMUM, R. On Powder Flowability, **Phamaceutical Technology**, v. 24, p. 60-84, 2000.

QUINTEIRO, I. **Quartzo.** 2012. Disponível em: <http://entendendoageologiaufba.blogspot.com.br/2012/03/quartzo.html>. Acesso em: 28 mar. 2018.

REZENDE, R. **Lactose.** Disponível em: <https://www.infoescola.com/bioquimica/lactose/>. Acesso em: 03 jul. 2018.

RIVAS, E. Characterization of Particulate Systems and Relation to Storage and Conveying. In: ORTEGA-RIVAS, Enrique. **Unit Operations of Particulate Solids:** Theory and Practice. Boca Raton: CRC Press, 2012. p. 3-30.

RODRIGUES, M.; IEMMA, A. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos**. Campinas, Brasil. Casa do Pão, 2005.

SCHULZE, D. **Flow Properties of Powders and Bulk Solids (fundamentals).** Germany, 2011. Disponível em: <http://www.dietmar-schulze.de/grdle1.pdf> Acesso em: 03 out. 2018.

SEVILLE, J.; TÜZÜN, U.; CLIFT R. **Processing of Particulate Solids, Powder Technology Series.** Blackie Academic & Professional. 1997.

TAYLOR, J.; CARRANO, A.; KANDLIKAR, S. **Characterization of the effect of surface roughness and texture on fluid flow - past, present, and future**. In International Journal of Thermal Sciences, 2006. p. 962-968.

TEUNOU, E.; FITZPATRICK, J.; SYNNOTT, E. Characterisation of food powder flowability. **Journal of Food Engineering**, v. 39, n. 1, p.31-37, jan. 1999. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/s0260-8774(98)00140-x.

TOVANI BENZAQUEN INGREDIENTES. **Celulose Microcristalina e Suas Aplicações.** Disponível em <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwin1pK-uLLXAhXKHpAKHTFRBvEQFghKMAY&url=http%3A%2F%2Ffuncionaisnutraceuticos.com.br%2Fupload_arquivos%2F201608%2F20160805432490014710235 01.docx&usg=AOvVaw036A3WtpLKuqGiSVjFJ8rc> Acesso em: 03 jul. 2018.

VAUTIER, P. **Desenvolvimento Farmacotécnico de Cápsulas Contendo Mistura de Extratos Tipificados de Própolis Vermelha e Verde.** 2011. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Farmácia, Universidade Bandeirantes de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <http://pgsskroton-dissertacoes.s3.amazonaws.com/0d769ae54216760532396ed3cad486d4.pdf>. Acesso em: 15 maio 2019.

VALISENKO, A.; BENJAMIN J. ; MUZZIO, F. Shear and flow behavior of pharmaceutical blends — method comparison study. **Powder Technology**, v. 208p. 628-636. 2011.

VIEIRA, G. **Caracterização e Secagem de Grãos de Linhaça Marrom (*Linum usitatissimum L.*) em Leito Fixo e Fluidizado.** 2012. 67 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

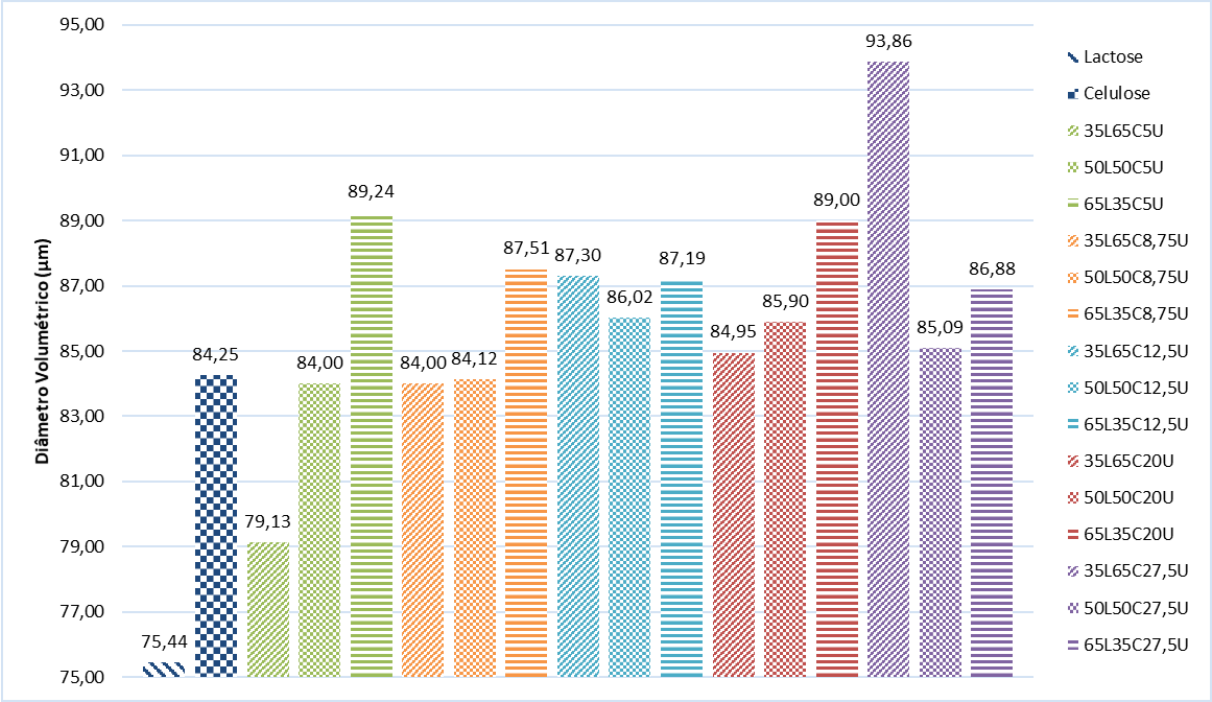
WOODCOCK, C.; MASON, J. The nature of bulk solids. In: WOODCOCK, C. R.; MASON, J. S. **Bulk Solids Handling:** An Introduction to the Practice and Technology. Glasgow: Springer Netherlands, 1987. p. 1-46. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=Mp_sCAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 21 fev. 2018.

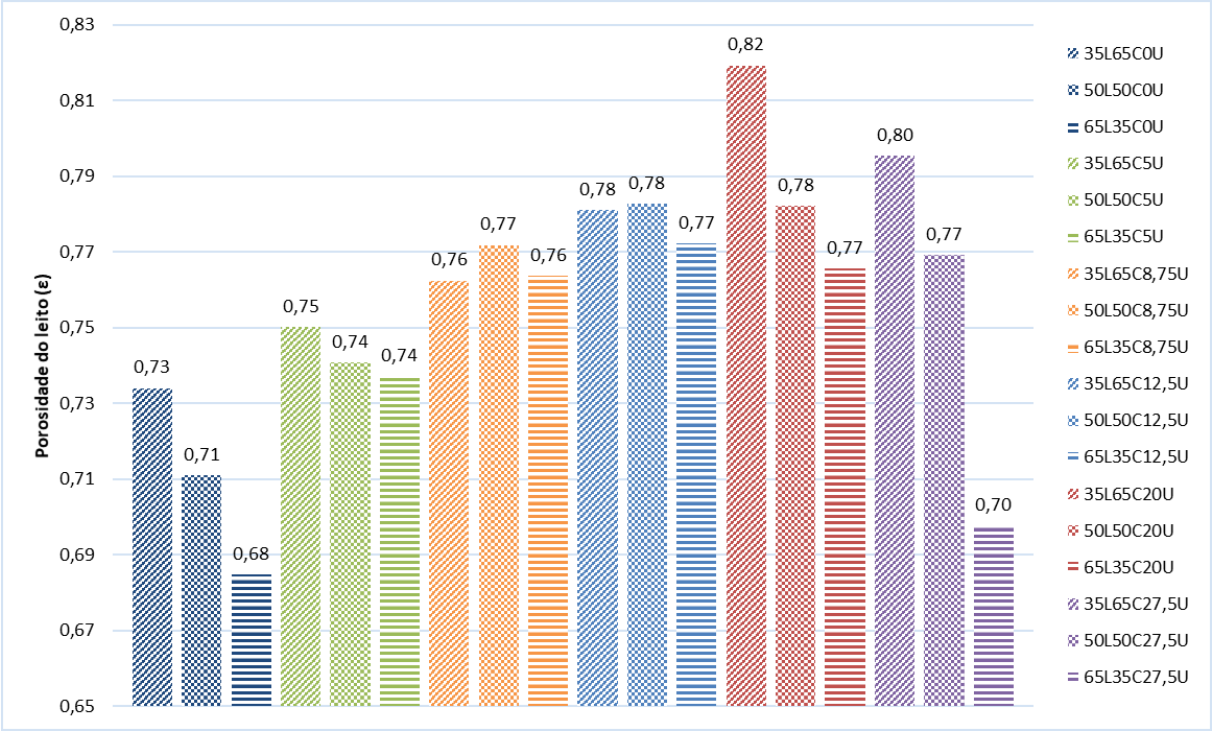
WORMSBECKER, M.; PUGSLEY, T. The influence of moisture on the fluidization behaviour of porous pharmaceutical granule. **Chemical Engineering Science**, v. 63, n. 16, p.4063-4069, ago. 2008. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2008.05.023.

APÊNDICE A – RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Diâmetro (µm)	Distribuição (%)							
	Lactose	Celulose	35L65C5U	50L50C5U	65L35C5U	35L65C8,75U	65L35C8,75U	35L65C12,5U
591,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,39	0,00
497,80	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,17	0,46	0,00
418,60	0,00	0,34	0,16	0,23	0,00	0,47	0,65	0,41
352,00	0,41	0,58	0,53	0,60	0,53	0,72	0,88	0,70
296,00	0,69	1,07	0,93	0,99	0,98	1,14	1,21	1,23
248,90	1,21	1,96	1,65	1,67	1,84	1,83	1,76	2,08
209,30	2,12	3,35	2,83	2,82	3,27	2,87	2,65	3,33
176,00	3,58	5,13	4,41	4,50	5,30	4,34	4,02	5,03
148,00	5,60	6,96	6,19	6,55	7,75	6,13	5,79	7,04
124,40	7,82	8,39	7,77	8,53	10,05	7,90	7,66	8,89
104,60	9,63	9,20	8,89	9,98	11,64	9,35	9,26	10,10
87,99	10,53	9,36	9,52	10,63	12,11	10,24	10,36	10,35
73,99	10,56	9,37	9,54	10,64	11,71	10,33	10,69	10,09
62,22	9,88	8,98	9,28	10,02	10,22	9,98	10,45	9,25
52,32	8,71	8,30	8,47	8,76	8,12	8,87	9,28	8,12
44,00	7,37	7,38	7,43	7,21	5,94	7,44	7,64	6,83
37,00	6,04	6,25	6,31	5,63	4,11	5,96	5,90	5,51
31,11	4,82	4,94	5,19	4,18	2,72	4,54	4,29	4,19
26,16	3,71	3,54	4,01	2,90	1,73	3,23	2,91	2,92
22,00	2,69	2,29	2,84	1,86	1,04	2,10	1,80	1,86
18,50	1,83	1,36	1,84	1,11	0,60	1,25	1,04	1,09
15,55	1,19	0,79	1,12	0,64	0,34	0,72	0,58	0,62
13,08	0,77	0,46	0,67	0,38	0,00	0,42	0,33	0,36
11,00	0,50	0,00	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9,25	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Diâmetro (µm)	Distribuição (%)							
	50L50C12,5U	65L35C12,5U	35L65C20U	50L50C20U	65L35C20U	35L65C27,5U	50L50C27,5U	65L35C27,5U
591,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35
497,80	0,32	0,33	0,00	0,17	0,00	0,36	0,00	0,46
418,60	0,46	0,47	0,44	0,44	0,00	0,53	0,43	0,67
352,00	0,70	0,68	0,68	0,68	0,46	0,80	0,67	0,99
296,00	1,10	1,02	1,08	1,07	0,89	1,23	1,07	1,45
248,90	1,77	1,61	1,80	1,77	1,76	2,02	1,77	2,16
209,30	2,85	2,63	2,98	2,93	3,29	3,36	2,93	3,21
176,00	4,46	4,27	4,67	4,61	5,54	5,40	4,69	4,67
148,00	6,46	6,48	6,63	6,61	8,13	7,86	6,90	6,34
124,40	8,43	8,82	8,39	8,49	10,40	10,05	9,03	7,80
104,60	9,90	10,72	9,62	9,90	11,71	11,40	10,46	8,65
87,99	10,59	11,71	10,28	10,69	11,95	11,65	10,75	8,68
73,99	10,60	11,74	10,34	10,69	11,18	11,11	10,30	8,53
62,22	9,98	10,75	10,04	10,16	9,54	9,63	9,07	7,89
52,32	8,79	8,97	9,11	8,89	7,53	7,68	7,57	7,07
44,00	7,30	6,93	7,73	7,28	5,64	5,74	6,16	6,19
37,00	5,73	5,01	6,09	5,62	4,12	4,12	4,99	5,35
31,11	4,22	3,40	4,38	4,05	2,95	2,86	4,00	4,57
26,16	2,86	2,14	2,82	2,70	2,04	1,89	3,09	3,81
22,00	1,76	1,25	1,62	1,64	1,33	1,18	2,24	3,04
18,50	1,00	0,69	0,85	0,93	0,83	0,71	1,52	2,31
15,55	0,55	0,38	0,45	0,52	0,51	0,42	1,01	1,69
13,08	0,17	0,00	0,00	0,16	0,20	0,00	0,68	1,22
11,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,47	0,90
9,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,69
7,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,54
6,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43
5,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34
4,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00


Diâmetro Volumétrico (µm)
95,00
93,00
91,00
89,00
87,00
85,00
83,00
81,00
79,00
77,00
75,00
75,44
84,25
79,13
84,00
89,24
84,00
84,12
87,51
87,30
86,02
87,19
84,95
85,90
89,00
93,86
85,09
86,88
Lactose
Celulose
35L65C5U
50L50C5U
65L35C5U
35L65C8,75U
50L50C8,75U
65L35C8,75U
35L65C12,5U
50L50C12,5U
65L35C12,5U
35L65C20U
50L50C20U
65L35C20U
35L65C27,5U
50L50C27,5U
65L35C27,5U


Porosidade do leito (ε)
0,83
0,81
0,79
0,77
0,75
0,73
0,71
0,69
0,67
0,65
0,73
0,71
0,68
0,75
0,74
0,74
0,76
0,77
0,76
0,78
0,78
0,77
0,82
0,78
0,77
0,80
0,77
0,70
35L65C0U
50L50C0U
65L35C0U
35L65C5U
50L50C5U
65L35C5U
35L65C8,75U
50L50C8,75U
65L35C8,75U
35L65C12,5U
50L50C12,5U
65L35C12,5U
35L65C20U
50L50C20U
65L35C20U
35L65C27,5U
50L50C27,5U
65L35C27,5U

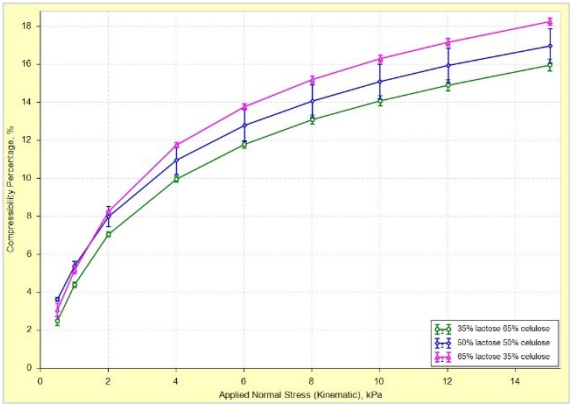
APÊNDICE B – RESULTADOS DO TESTE DE UMIDADE

	Umidade (%)	35% lactose 65% celulose	50% lactose 50% celulose	65% lactose 35% celulose
Teste 1 (%)	5	8,8	7,0	6,7
Teste 2 (%)		8,1	7,1	6,9
Média (%)		8,5	7,1	6,8
Desvio Padrão (%)		0,5	0,1	0,1
Teste 1 (%)	8,75	11,2	13,8	12,9
Teste 2 (%)		9,4	11,9	13,7
Média (%)		10,3	12,9	13,3
Desvio Padrão (%)		1,3	1,3	0,6
Teste 1 (%)	12,5	13,2	15,1	14,6
Teste 2 (%)		14,6	16,2	14,5
Média (%)		13,9	15,7	14,6
Desvio Padrão (%)		1,0	0,8	0,1
Teste 1 (%)	20	21,7	24,5	20,9
Teste 2 (%)		22,5	21,9	20,6
Média (%)		22,1	23,2	20,8
Desvio Padrão (%)		0,6	1,8	0,2
Teste 1 (%)	27,5	28,8	30,5	32,1
Teste 2 (%)		29,8	28,6	24,4
Média (%)		29,3	29,6	28,3
Desvio Padrão (%)		0,7	1,3	5,4

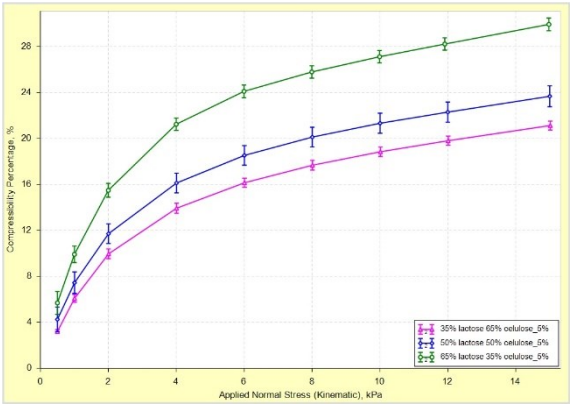
APÊNDICE C – RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS NO REÔMETRO DE PÓS FT4

Compressibilidade:

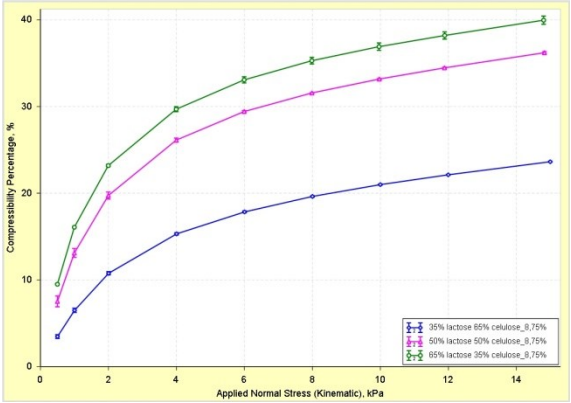
Amostra	CBD, g/ml	CPS, % @ 15,0kPa
35% lactose 65% celulose	0,40	15,65
35% lactose 65% celulose	0,42	16,27
50% lactose 50% celulose	0,46	16,07
50% lactose 50% celulose	0,57	17,87
65% lactose 35% celulose	0,50	18,07
65% lactose 35% celulose	0,50	18,44
35% lactose 65% celulose_5%	0,38	20,74
35% lactose 65% celulose_5%	0,37	21,51
50% lactose 50% celulose_5%	0,41	22,76
50% lactose 50% celulose_5%	0,41	24,58
65% lactose 35% celulose_5%	0,41	29,38
65% lactose 35% celulose_5%	0,41	30,47
35% lactose 65% celulose_8,75%	0,36	23,56
35% lactose 65% celulose_8,75%	0,37	23,69
50% lactose 50% celulose_8,75%	0,33	36,32
50% lactose 50% celulose_8,75%	0,34	36,08
65% lactose 35% celulose_8,75%	0,37	39,48
65% lactose 35% celulose_8,75%	0,35	40,42
35% lactose 65% celulose_12,5%	0,30	37,18
35% lactose 65% celulose_12,5%	0,31	36,22
50% lactose 50% celulose_12,5%	0,32	44,37
50% lactose 50% celulose_12,5%	0,31	41,76
65% lactose 35% celulose_12,5%	0,34	47,71
65% lactose 35% celulose_12,5%	0,33	47,62
35% lactose 65% celulose_20%	0,25	52,33
35% lactose 65% celulose_20%	0,26	51,39
50% lactose 50% celulose_20%	0,31	50,18
50% lactose 50% celulose_20%	0,32	48,30
65% lactose 35% celulose_20%	0,33	51,73
65% lactose 35% celulose_20%	0,33	51,26
35% lactose 65% celulose_27,5%	0,31	48,33
35% lactose 65% celulose_27,5%	0,30	49,02
50% lactose 50% celulose_27,5%	0,36	52,38
50% lactose 50% celulose_27,5%	0,36	48,46
65% lactose 35% celulose_27,5%	0,46	50,78
65% lactose 35% celulose_27,5%	0,43	46,49



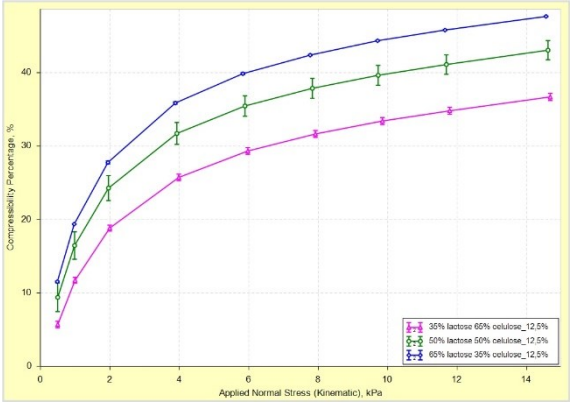
(A) Amostra seca



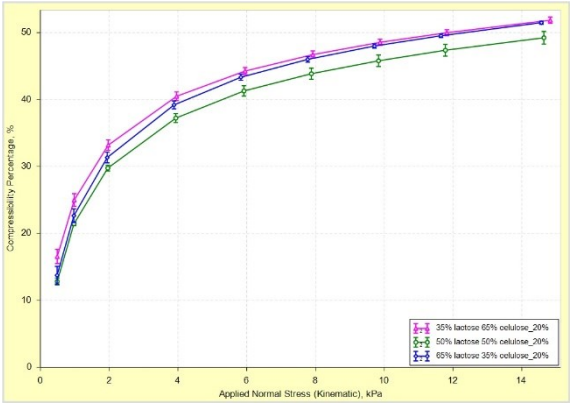
(B) Amostra com 5% de umidade



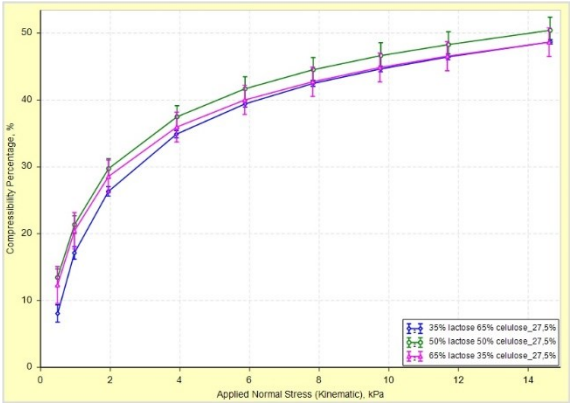
(C) Amostra com 8,75% de umidade



(D) Amostra com 12,5% de umidade



(E) Amostra com 20% de umidade



(F) Amostra com 27,5% de umidade

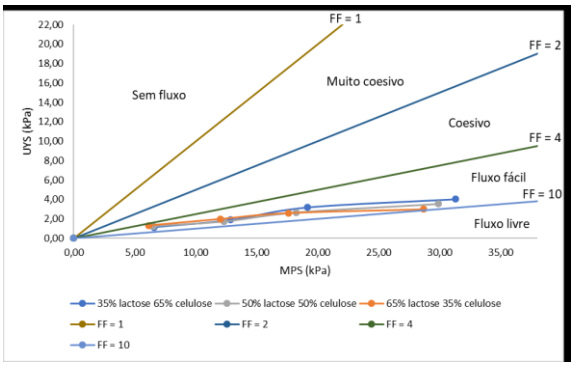
Cisalhamento:

	Material	Coesão, kPa	UYS, kPa	MPS, kPa	MCS, kPa	FF	Rel (p)	AIF, º	AIF (E), º	AIF (SS), º	PSS, kPa	BD, g/ml	NSi, kPa @ 9,00kPa	NSi, kPa @ 8,00kPa	NSi, kPa @ 7,00kPa	NSi, kPa @ 6,00kPa	NSi, kPa @ 5,00kPa	NSi, kPa @ 15,0kPa	SSi, kPa @ 9,00kPa	SSi, kPa @ 8,00kPa	SSi, kPa @ 7,00kPa	SSi, kPa @ 6,00kPa	SSi, kPa @ 5,00kPa	SSi, kPa @ 15,0kPa
15 kPa	35L65C0U	1,01	4,23	31,33	6,25	7,41	5,93	38,70	41,87	38,54	11,96	0,46	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	15,01	8,29	7,33	6,64	5,83	5,03	11,96
	35L65C0U	0,91	3,82	31,28	6,24	8,19	6,56	39,04	41,87	38,46	11,96	0,47	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	15,06	8,20	7,37	6,62	5,81	4,92	11,96
	50L50C0U	0,85	3,53	29,82	6,06	8,44	6,73	38,71	41,48	37,49	11,51	0,52	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	15,01	8,05	7,29	6,43	5,65	4,86	11,51
	50L50C0U	0,87	3,58	29,97	6,29	8,37	6,61	37,96	40,78	37,26	11,43	0,53	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	15,02	7,95	7,05	6,33	5,56	4,79	11,43
	65L35C0U	0,65	2,73	28,55	5,94	10,46	8,28	38,75	40,96	36,43	11,08	0,58	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	15,02	7,89	7,06	6,28	5,45	4,69	11,08
	65L35C0U	0,79	3,25	28,78	6,02	8,85	7,00	38,19	40,84	36,52	11,13	0,58	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	15,03	7,89	7,09	6,26	5,52	4,74	11,13
	35L65C5U	1,63	6,64	30,41	5,73	4,58	3,72	37,69	43,06	38,57	11,94	0,47	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	14,98	8,58	7,79	7,09	6,23	5,50	11,94
	35L65C5U	1,71	6,93	30,74	5,83	4,44	3,59	37,34	42,93	38,69	12,01	0,47	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	15,00	8,54	7,85	7,07	6,34	5,48	12,01
	50L50C5U	1,84	7,32	31,04	5,98	4,24	3,42	36,66	42,58	38,73	12,02	0,51	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	14,99	8,51	7,77	7,14	6,28	5,53	12,02
	50L50C5U	1,70	6,67	30,00	6,07	4,50	3,59	35,95	41,56	37,66	11,57	0,51	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	15,00	8,19	7,55	6,78	6,06	5,31	11,57
	65L35C5U	2,16	9,21	33,29	5,28	3,61	3,04	39,82	46,57	41,58	13,35	0,54	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	15,05	9,64	8,87	7,98	7,13	6,34	13,35
	65L35C5U	1,87	7,67	31,58	5,70	4,12	3,38	37,94	43,95	39,61	12,41	0,55	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	15,00	8,88	8,17	7,23	6,59	5,77	12,41
	35L65C8,75U	1,74	7,18	30,73	5,54	4,28	3,51	38,25	43,99	39,21	12,18	0,46	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	14,93	8,84	8,00	7,32	6,48	5,66	12,18
	35L65C8,75U	1,83	7,38	30,04	5,56	4,07	3,32	37,31	43,45	38,50	11,91	0,45	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	14,98	8,63	7,97	7,20	6,41	5,60	11,91
	50L50C8,75U	2,12	8,89	30,32	4,87	3,41	2,86	39,03	46,32	39,74	12,45	0,48	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	14,98	9,40	8,58	7,83	7,03	6,12	12,45
	50L50C8,75U	2,33	9,48	29,79	4,92	3,14	2,62	37,58	45,76	39,16	12,21	0,49	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	14,99	9,23	8,49	7,77	6,99	6,12	12,21
	65L35C8,75U	2,85	12,36	32,61	4,32	2,64	2,29	40,44	50,02	42,39	13,73	0,58	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	15,03	10,53	9,57	8,93	8,00	7,06	13,73
	65L35C8,75U	4,20	16,77	35,45	4,69	2,11	1,83	36,77	50,01	44,00	14,54	0,58	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	15,05	10,87	10,09	9,69	8,70	7,81	14,54
	35L65C12,5U	2,49	10,51	31,40	4,68	2,99	2,54	39,34	47,78	41,17	12,97	0,44	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	14,83	9,86	9,04	8,27	7,37	6,60	12,97
	35L65C12,5U	2,38	9,83	30,50	4,85	3,10	2,61	38,31	46,52	39,93	12,54	0,44	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	14,98	9,46	8,71	7,90	7,24	6,24	12,54
	50L50C12,5U	2,73	12,22	32,07	3,97	2,62	2,30	41,81	51,23	42,61	13,70	0,51	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	14,89	10,84	9,85	8,93	8,14	7,22	13,70
	50L50C12,5U	3,07	13,19	31,76	4,03	2,41	2,10	40,05	50,80	42,31	13,53	0,51	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	14,87	10,61	9,81	8,99	8,13	7,25	13,53
	65L35C12,5U	3,60	16,29	32,17	3,10	1,97	1,78	42,30	55,49	43,94	14,25	0,58	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	14,79	11,75	10,92	10,01	9,04	8,14	14,25
	65L35C12,5U	3,70	16,17	32,15	3,34	1,99	1,78	40,86	54,26	43,58	14,10	0,58	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	14,82	11,56	10,58	9,65	8,89	8,07	14,10
	35L65C20U	3,74	16,29	32,52	3,42	2,00	1,79	40,69	54,06	43,80	14,20	0,48	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	14,81	11,47	10,52	9,86	8,98	7,94	14,20
	35L65C20U	3,43	15,11	32,39	3,56	2,14	1,91	41,14	53,29	43,39	14,08	0,48	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	14,90	11,22	10,45	9,61	8,74	7,71	14,08
	50L50C20U	3,83	17,38	32,93	3,02	1,90	1,72	42,44	56,30	44,71	14,60	0,57	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	14,75	12,06	11,17	10,20	9,29	8,42	14,60
	50L50C20U	3,93	17,07	32,54	3,27	1,91	1,71	40,59	54,80	43,80	14,33	0,54	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	14,94	11,54	10,91	9,98	8,98	8,20	14,33
	65L35C20U	4,62	20,80	33,39	2,48	1,61	1,49	42,10	59,49	45,75	15,12	0,64	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	14,73	12,77	11,76	11,01	10,13	9,06	15,12
	65L35C20U	4,66	21,19	34,57	2,59	1,63	1,51	42,51	59,38	46,35	15,54	0,62	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	14,83	12,94	11,91	11,10	10,26	9,18	15,54
	35L65C27,5U	4,23	18,08	32,52	3,17	1,80	1,62	39,81	55,33	43,86	14,39	0,54	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	14,98	11,68	10,92	10,17	9,20	8,37	14,39
	35L65C27,5U	4,58	19,93	34,26	3,03	1,72	1,57	40,65	56,90	45,38	15,18	0,54	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	14,98	12,32	11,35	10,69	9,78	8,81	15,18
	50L50C27,5U	4,84	21,50	36,11	2,95	1,68	1,54	41,56	58,07	46,69	15,96	0,59	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	15,04	12,76	11,93	11,14	10,17	9,21	15,96
	50L50C27,5U	4,34	19,78	35,24	2,98	1,78	1,63	42,59	57,57	46,09	15,60	0,64	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	15,02	12,57	11,69	10,83	9,96	8,83	15,60
	65L35C27,5U	4,83	22,20	38,56	3,10	1,74	1,60	42,97	58,35	48,09	16,76	0,71	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	15,04	13,21	12,24	11,40	10,45	9,45	16,76
	65L35C27,5U	4,34	19,72	35,12	2,98	1,78	1,63	42,49	57,50	45,93	15,57	0,77	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	15,07	12,51	11,66	10,85	9,96	8,78	15,57

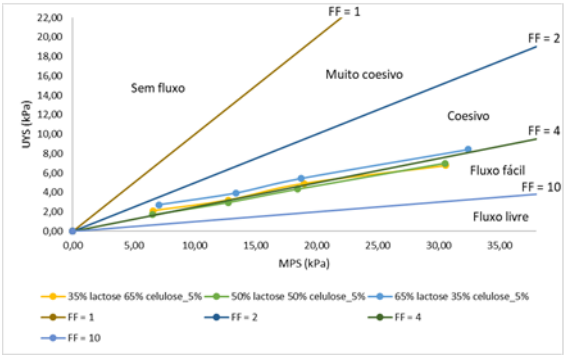
	Material	Coesão, kPa	UYS, kPa	MPS, kPa	MCS, kPa	FF	Rel (p)	AIF, º	AIF (E), º	AIF (SS), º	PSS, kPa	BD, g/ml	NSi, kPa @ 9,00kPa	NSi, kPa @ 8,00kPa	NSi, kPa @ 7,00kPa	NSi, kPa @ 6,00kPa	NSi, kPa @ 5,00kPa	NSi, kPa @ 15,0kPa	SSi, kPa @ 9,00kPa	SSi, kPa @ 8,00kPa	SSi, kPa @ 7,00kPa	SSi, kPa @ 6,00kPa	SSi, kPa @ 5,00kPa	SSi, kPa @ 15,0kPa
9 kPa	35L65C0U	0,87	3,57	19,39	3,76	5,43	4,37	38,02	42,48	39,34	7,38	0,46	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,00	6,35	5,57	4,76	4,00	3,23	7,38
	35L65C0U	0,70	2,85	18,91	3,83	6,63	5,29	37,93	41,54	38,51	7,15	0,46	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	8,99	6,15	5,36	4,63	3,80	3,03	7,15
	50L50C0U	0,62	2,54	18,18	3,74	7,15	5,68	37,85	41,18	37,63	6,95	0,51	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,02	6,07	5,29	4,48	3,74	2,96	6,95
	50L50C0U	0,69	2,79	18,33	3,83	6,58	5,21	37,22	40,89	37,66	6,95	0,52	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,00	6,00	5,26	4,48	3,75	2,96	6,95
	65L35C0U	0,62	2,48	17,62	3,73	7,11	5,60	37,17	40,56	36,80	6,74	0,57	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,01	5,91	5,18	4,40	3,67	2,88	6,74
	65L35C0U	0,69	2,71	17,63	3,82	6,50	5,10	36,35	40,11	36,61	6,69	0,57	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,01	5,84	5,09	4,38	3,63	2,89	6,69
	35L65C5U	1,22	4,85	19,11	3,63	3,94	3,19	36,45	42,91	39,31	7,37	0,45	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,00	6,36	5,66	4,96	4,25	3,37	7,37
	35L65C5U	1,30	5,01	18,84	3,71	3,76	3,02	35,22	42,13	38,74	7,21	0,45	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	8,99	6,19	5,57	4,89	4,14	3,36	7,21
	50L50C5U	1,12	4,45	18,66	3,62	4,20	3,38	36,48	42,49	38,69	7,22	0,49	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,01	6,30	5,60	4,74	4,09	3,36	7,22
	50L50C5U	1,10	4,30	18,25	3,66	4,25	3,40	35,75	41,74	37,98	7,03	0,49	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,00	6,13	5,41	4,72	4,03	3,21	7,03
	65L35C5U	1,34	5,32	18,70	3,41	3,51	2,87	36,40	43,73	39,32	7,35	0,53	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	8,98	6,48	5,77	5,08	4,30	3,52	7,35
	65L35C5U	1,40	5,55	18,78	3,38	3,38	2,78	36,36	44,01	39,46	7,41	0,55	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,01	6,50	5,86	5,14	4,33	3,58	7,41
	35L65C8,75U	1,36	5,44	19,61	3,55	3,60	2,95	36,82	43,91	40,19	7,61	0,43	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,00	6,58	5,90	5,08	4,39	3,59	7,61
	35L65C8,75U	1,22	4,83	18,93	3,57	3,92	3,18	36,55	43,03	39,18	7,34	0,44	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,01	6,36	5,70	4,95	4,21	3,40	7,34
	50L50C8,75U	1,70	6,82	19,04	3,03	2,79	2,35	37,03	46,48	40,68	7,74	0,45	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,01	6,91	6,25	5,55	4,75	3,89	7,74
	50L50C8,75U	1,71	6,82	19,14	3,09	2,80	2,35	36,79	46,23	40,70	7,74	0,45	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,00	6,88	6,26	5,52	4,66	3,93	7,74
	65L35C8,75U	1,97	8,24	22,31	3,22	2,71	2,32	38,86	48,38	44,22	8,78	0,51	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,02	7,66	6,69	6,03	5,32	4,29	8,78
	65L35C8,75U	2,48	11,15	23,69	12,5	2,12	1,90	42,08	54,17	47,33	9,80	0,53	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,04	8,75	8,05	6,96	5,89	5,31	9,80
	35L65C12,5U	2,14	8,53	20,21	2,93	2,37	2,03	36,79	48,30	42,51	8,25	0,42	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,00	7,34	6,61	5,93	5,16	4,32	8,25
	35L65C12,5U	1,82	7,28	19,29	3,00	2,65	2,24	36,86	46,93	41,13	7,85	0,42	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	8,99	7,00	6,34	5,66	4,85	3,99	7,85
	50L50C12,5U	2,16	8,95	19,70	2,51	2,20	1,92	38,43	50,72	42,80	8,33	0,48	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,00	7,66	6,98	6,16	5,36	4,49	8,33
	50L50C12,5U	2,28	9,37	19,81	2,47	2,11	1,85	38,13	51,11	43,03	8,40	0,47	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,00	7,68	7,03	6,29	5,49	4,52	8,40
	65L35C12,5U	2,97	12,71	21,00	1,81	1,65	1,51	39,97	57,31	45,89	9,29	0,53	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,01	8,76	8,07	7,17	6,34	5,44	9,29
	65L35C12,5U	2,87	12,04	20,39	1,89	1,69	1,54	39,06	56,10	44,97	9,00	0,53	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,01	8,51	7,74	7,00	6,10	5,27	9,00
	35L65C20U	2,73	11,15	20,94	2,35	1,88	1,67	37,76	52,93	44,69	8,91	0,44	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,01	8,12	7,44	6,56	5,90	5,02	8,91
	35L65C20U	2,59	10,85	20,63	2,23	1,90	1,70	38,90	53,57	44,58	8,87	0,44	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,00	8,15	7,46	6,73	5,89	4,90	8,87
	50L50C20U	3,11	12,84	21,33	1,99	1,66	1,51	38,36	56,06	45,85	9,31	0,51	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,04	8,59	7,87	7,16	6,29	5,41	9,31
	50L50C20U	2,89	11,99	20,88	2,06	1,74	1,57	38,57	55,11	45,23	9,08	0,52	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,01	8,40	7,68	6,98	6,11	5,20	9,08
	65L35C20U	3,71	15,45	22,25	1,57	1,44	1,34	38,71	60,28	47,79	9,93	0,59	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,00	9,27	8,49	7,78	7,05	5,98	9,93
	65L35C20U	3,44	14,39	21,26	1,57	1,48	1,37	38,85	59,56	46,67	9,54	0,59	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,00	9,02	8,31	7,53	6,70	5,79	9,54
	35L65C27,5U	3,30	13,57	20,83	1,72	1,54	1,41	38,16	57,97	45,89	9,28	0,48	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,00	8,70	8,06	7,34	6,48	5,56	9,28
	35L65C27,5U	3,22	13,20	20,96	1,85	1,59	1,45	37,96	56,92	45,77	9,25	0,48	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,00	8,65	7,88	7,16	6,47	5,45	9,25
	50L50C27,5U	3,54	14,68	21,90	1,68	1,49	1,38	38,51	59,04	47,20	9,72	0,59	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,00	8,98	8,42	7,57	6,81	5,81	9,72
	50L50C27,5U	3,30	13,62	21,90	1,94	1,61	1,46	38,29	56,82	46,55	9,56	0,59	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,05	8,73	8,08	7,29	6,62	5,52	9,56
	65L35C27,5U	3,58	15,62	22,99	1,55	1,47	1,37	40,78	60,92	48,47	10,23	0,71	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,06	9,69	8,63	7,84	7,22	6,08	10,23
	65L35C27,5U	2,94	11,40	20,37	2,39	1,79	1,58	35,40	52,20	43,77	8,69	0,71	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	9,07	7,85	7,30	6,47	5,86	5,02	8,69

	Material	Coesão, kPa	UYS, kPa	MPS, kPa	MCS, kPa	FF	Rel (p)	AIF, º	AIF (E), º	AIF (SS), º	PSS, kPa	BD, g/ml	NSi, kPa @ 9,00kPa	NSi, kPa @ 8,00kPa	NSi, kPa @ 7,00kPa	NSi, kPa @ 6,00kPa	NSi, kPa @ 5,00kPa	NSi, kPa @ 15,0kPa	SSi, kPa @ 9,00kPa	SSi, kPa @ 8,00kPa	SSi, kPa @ 7,00kPa	SSi, kPa @ 6,00kPa	SSi, kPa @ 5,00kPa	SSi, kPa @ 15,0kPa
6 kPa	35L65C0U	0,56	2,27	13,16	2,62	5,79	4,64	37,76	41,93	39,22	4,94	0,46	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,06	3,72	3,16	2,91	2,51	2,10	4,94
	35L65C0U	0,32	1,34	12,50	2,55	9,31	7,41	38,85	41,34	38,12	4,75	0,45	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,05	3,55	3,13	2,77	2,32	1,93	4,75
	50L50C0U	0,38	1,57	12,31	2,48	7,85	6,27	38,71	41,69	37,98	4,74	0,50	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,06	3,59	3,18	2,77	2,38	1,99	4,74
	50L50C0U	0,47	1,88	12,31	2,57	6,56	5,19	37,25	40,93	37,63	4,67	0,51	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,06	3,50	3,13	2,78	2,33	1,99	4,67
	65L35C0U	0,53	2,15	12,28	2,43	5,71	4,58	37,81	42,04	38,20	4,74	0,56	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,02	3,64	3,25	2,81	2,50	2,07	4,74
	65L35C0U	0,44	1,78	11,80	2,41	6,63	5,28	37,79	41,40	37,19	4,57	0,56	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,02	3,55	3,16	2,72	2,40	1,99	4,57
	35L65C5U	0,80	3,14	12,46	2,39	3,97	3,21	36,32	42,73	38,74	4,84	0,44	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,04	3,71	3,44	2,95	2,62	2,28	4,84
	35L65C5U	0,81	3,36	13,10	2,28	3,90	3,22	38,39	44,73	40,53	5,15	0,44	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,02	3,96	3,64	3,21	2,74	2,40	5,15
	50L50C5U	0,71	2,88	12,46	2,35	4,33	3,51	37,30	43,04	38,97	4,86	0,48	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,00	3,76	3,39	3,01	2,59	2,25	4,86
	50L50C5U	0,77	3,12	13,09	2,46	4,20	3,41	37,21	43,15	39,81	5,02	0,48	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,03	3,81	3,39	3,12	2,68	2,26	5,02
	65L35C5U	0,80	3,39	13,04	2,12	3,84	3,22	39,72	46,04	41,02	5,23	0,52	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,01	4,12	3,72	3,29	2,82	2,49	5,23
	65L35C5U	1,07	4,54	13,72	2,06	3,02	2,57	39,35	47,68	42,50	5,53	0,50	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,04	4,31	3,98	3,59	3,12	2,68	5,53
	35L65C8,75U	0,74	3,01	12,87	2,38	4,28	3,49	37,67	43,46	39,60	5,00	0,42	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,05	3,84	3,42	3,07	2,67	2,28	5,00
	35L65C8,75U	0,81	3,28	13,03	2,36	3,97	3,25	37,64	43,92	40,09	5,07	0,42	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,02	3,88	3,49	3,15	2,77	2,31	5,07
	50L50C8,75U	1,22	4,98	12,97	1,91	2,60	2,22	37,87	48,00	41,65	5,34	0,43	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,00	4,32	3,94	3,58	3,16	2,76	5,34
	50L50C8,75U	1,18	4,86	12,97	1,91	2,67	2,28	38,28	48,05	41,66	5,34	0,43	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,01	4,31	3,95	3,56	3,19	2,72	5,34
	65L35C8,75U	1,52	6,44	14,70	1,85	2,28	2,00	39,38	50,96	44,96	6,02	0,51	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,03	4,88	4,35	3,97	3,50	3,23	6,02
	65L35C8,75U	1,31	6,12	14,90	1,61	2,43	2,17	43,61	53,59	46,00	6,27	0,49	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,05	5,13	4,68	4,12	3,67	3,26	6,27
	35L65C12,5U	1,16	4,95	13,32	1,82	2,69	2,32	39,94	49,39	42,65	5,53	0,41	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,00	4,48	4,10	3,70	3,25	2,81	5,53
	35L65C12,5U	1,29	5,24	13,11	1,92	2,50	2,13	37,47	48,16	41,90	5,39	0,40	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,01	4,31	4,02	3,64	3,19	2,81	5,39
	50L50C12,5U	1,44	6,14	13,22	1,56	2,15	1,90	39,67	52,05	43,31	5,66	0,43	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,00	4,72	4,35	3,98	3,56	3,05	5,66
	50L50C12,5U	1,55	6,41	13,17	1,59	2,05	1,81	38,28	51,70	43,13	5,62	0,46	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,00	4,69	4,32	3,94	3,56	3,09	5,62
	65L35C12,5U	2,18	9,39	13,88	0,96	1,48	1,38	40,27	60,46	46,39	6,30	0,60	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,00	5,46	5,24	4,77	4,29	3,82	6,30
	65L35C12,5U	1,77	8,38	14,69	1,12	1,75	1,62	44,31	59,13	47,44	6,50	0,49	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	5,97	5,62	5,31	4,64	4,17	3,74	6,50
	35L65C20U	1,85	8,21	14,46	1,28	1,76	1,61	41,38	56,91	46,41	6,33	0,40	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,03	5,39	4,89	4,52	4,10	3,58	6,33
	35L65C20U	1,90	8,16	14,09	1,29	1,73	1,57	39,93	56,28	45,81	6,17	0,40	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,00	5,22	4,86	4,44	4,00	3,55	6,17
	50L50C20U	2,02	8,51	14,41	1,32	1,69	1,54	39,30	56,26	46,09	6,28	0,49	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,05	5,28	4,79	4,61	4,09	3,58	6,28
	50L50C20U	2,24	9,50	14,50	1,11	1,53	1,41	39,55	59,07	46,92	6,46	0,46	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,04	5,49	5,19	4,71	4,31	3,87	6,46
	65L35C20U	2,49	10,83	14,85	0,85	1,37	1,29	40,69	63,15	48,36	6,75	0,53	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,01	5,90	5,51	5,10	4,68	4,15	6,75
	65L35C20U	2,39	10,15	14,45	0,96	1,42	1,33	39,48	61,14	47,38	6,53	0,55	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,01	5,66	5,34	4,83	4,47	4,03	6,53
	35L65C27,5U	1,96	8,82	14,19	1,06	1,61	1,49	42,11	59,44	46,64	6,36	0,43	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,01	5,48	5,22	4,72	4,21	3,71	6,36
	35L65C27,5U	2,29	9,57	14,09	1,04	1,47	1,36	38,88	59,67	46,56	6,34	0,43	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,00	5,45	5,17	4,76	4,28	3,88	6,34
	50L50C27,5U	2,16	9,62	15,00	1,08	1,56	1,45	41,70	59,94	47,76	6,67	0,54	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,06	5,68	5,30	4,87	4,41	3,90	6,67
	50L50C27,5U	2,27	9,82	14,65	1,03	1,49	1,39	40,34	60,25	47,45	6,56	0,54	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,02	5,63	5,25	4,88	4,44	3,90	6,56
	65L35C27,5U	2,82	12,81	16,03	0,62	1,25	1,20	42,51	67,69	50,51	7,37	0,64	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,07	6,39	6,03	5,62	5,39	4,40	7,37
	65L35C27,5U	2,69	11,36	15,33	0,89	1,35	1,27	39,27	62,86	48,98	6,91	0,68	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	6,01	5,96	5,54	5,10	4,86	4,26	6,91

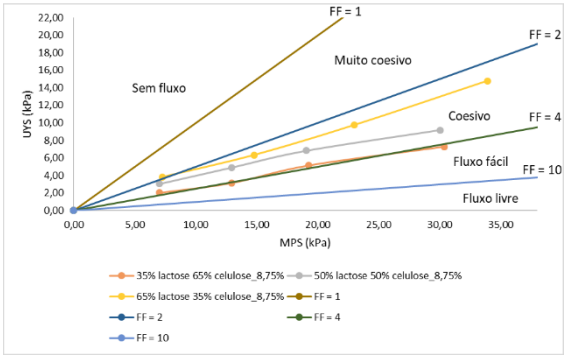
	Material	Coesão, kPa	UYS, kPa	MPS, kPa	MCS, kPa	FF	Rel (p)	AIF, º	AIF (E), º	AIF (SS), º	PSS, kPa	BD, g/ml	NSi, kPa @ 9,00kPa	NSi, kPa @ 8,00kPa	NSi, kPa @ 7,00kPa	NSi, kPa @ 6,00kPa	NSi, kPa @ 5,00kPa	NSi, kPa @ 15,0kPa	SSi, kPa @ 9,00kPa	SSi, kPa @ 8,00kPa	SSi, kPa @ 7,00kPa	SSi, kPa @ 6,00kPa	SSi, kPa @ 5,00kPa	SSi, kPa @ 15,0kPa
3 kPa	35L65C0U	0,29	1,22	6,65	1,26	5,46	4,43	38,54	42,92	39,93	2,52	0,44	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,01	1,89	1,70	1,45	1,30	1,10	2,52
	35L65C0U	0,26	1,08	6,56	1,24	6,08	4,93	39,04	42,93	39,73	2,50	0,44	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,01	1,88	1,68	1,48	1,27	1,07	2,50
	50L50C0U	0,33	1,35	6,41	1,22	4,75	3,85	37,78	42,93	39,40	2,47	0,49	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,00	1,88	1,68	1,51	1,29	1,11	2,47
	50L50C0U	0,27	1,07	6,25	1,27	5,82	4,64	37,32	41,49	38,23	2,38	0,49	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,02	1,79	1,61	1,39	1,22	1,03	2,38
	65L35C0U	0,31	1,26	6,05	1,19	4,80	3,85	37,00	42,16	37,98	2,35	0,54	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,01	1,83	1,64	1,43	1,26	1,07	2,35
	65L35C0U	0,34	1,36	6,28	1,19	4,62	3,74	37,58	42,91	39,05	2,44	0,54	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,01	1,88	1,69	1,47	1,29	1,11	2,44
	35L65C5U	0,51	2,04	6,57	1,15	3,22	2,66	36,49	44,56	40,53	2,57	0,42	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,01	1,99	1,81	1,64	1,44	1,25	2,57
	35L65C5U	0,56	2,16	6,57	1,18	3,04	2,49	35,28	44,07	40,31	2,55	0,42	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,01	1,98	1,79	1,64	1,43	1,27	2,55
	50L50C5U	0,46	1,82	6,60	1,21	3,62	2,95	36,52	43,60	40,17	2,54	0,46	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,01	1,94	1,75	1,58	1,39	1,19	2,54
	50L50C5U	0,36	1,48	6,53	1,17	4,40	3,62	38,66	44,19	40,20	2,55	0,45	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,02	1,95	1,76	1,55	1,36	1,15	2,55
	65L35C5U	0,60	2,58	6,96	0,95	2,70	2,33	40,14	49,51	43,46	2,86	0,48	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,01	2,28	2,07	1,87	1,68	1,42	2,86
	65L35C5U	0,51	2,38	7,15	0,88	3,01	2,64	43,49	51,31	44,63	2,97	0,47	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,00	2,41	2,20	1,90	1,70	1,47	2,97
	35L65C8,75U	0,57	2,27	7,25	1,26	3,20	2,64	36,64	44,76	42,08	2,73	0,41	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,03	2,07	1,86	1,68	1,52	1,30	2,73
	35L65C8,75U	0,42	1,74	6,85	1,19	3,93	3,25	38,41	44,70	41,14	2,65	0,41	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,03	2,01	1,80	1,62	1,41	1,21	2,65
	50L50C8,75U	0,67	2,79	6,75	0,91	2,42	2,10	38,75	49,63	43,01	2,80	0,41	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,00	2,27	2,07	1,87	1,68	1,47	2,80
	50L50C8,75U	0,75	3,12	7,28	0,97	2,33	2,02	38,52	49,96	44,42	2,96	0,40	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,02	2,35	2,14	1,93	1,77	1,53	2,96
	65L35C8,75U	0,85	3,95	7,44	0,64	1,88	1,72	43,61	57,29	46,91	3,25	0,45	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,04	2,77	2,51	2,23	2,03	1,84	3,25
	65L35C8,75U	0,98	3,85	7,35	0,91	1,91	1,67	35,95	51,21	44,71	3,04	0,45	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,07	2,50	2,17	2,07	1,89	1,72	3,04
	35L65C12,5U	0,88	3,59	6,83	0,78	1,90	1,68	37,66	52,60	44,07	2,92	0,37	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,02	2,40	2,26	2,06	1,84	1,64	2,92
	35L65C12,5U	0,82	3,36	6,82	0,81	2,03	1,79	38,26	51,91	43,88	2,89	0,37	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,01	2,38	2,22	1,99	1,81	1,60	2,89
	50L50C12,5U	0,75	3,82	7,87	0,62	2,06	1,90	47,35	58,71	48,61	3,41	0,38	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,00	2,87	2,68	2,43	2,13	1,76	3,41
	50L50C12,5U	0,94	4,24	7,30	0,60	1,72	1,58	42,24	57,98	46,88	3,22	0,39	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,01	2,73	2,53	2,36	2,05	1,82	3,22
	65L35C12,5U	1,04	4,66	7,17	0,50	1,54	1,43	42,02	60,51	47,16	3,23	0,45	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,00	2,85	2,60	2,38	2,18	1,93	3,23
	65L35C12,5U	1,03	4,66	7,25	0,50	1,55	1,45	42,51	60,56	47,15	3,27	0,45	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,03	2,82	2,68	2,40	2,16	1,94	3,27
	35L65C20U	1,07	4,67	7,41	0,57	1,59	1,46	40,96	59,00	47,51	3,27	0,37	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,00	2,79	2,59	2,36	2,19	1,91	3,27
	35L65C20U	1,06	4,61	7,33	0,57	1,59	1,47	40,68	58,74	47,11	3,25	0,35	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,02	2,78	2,55	2,36	2,16	1,89	3,25
	50L50C20U	1,28	5,76	7,92	0,43	1,38	1,30	42,09	63,85	49,77	3,56	0,43	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,01	3,07	2,87	2,63	2,44	2,16	3,56
	50L50C20U	1,37	5,60	7,30	0,41	1,30	1,23	37,86	63,43	47,88	3,34	0,43	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,02	2,87	2,79	2,55	2,35	2,12	3,34
	65L35C20U	1,19	5,66	7,55	0,33	1,33	1,27	44,30	66,21	49,25	3,48	0,48	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,00	3,10	2,90	2,73	2,44	2,11	3,48
	65L35C20U	1,49	6,64	8,05	0,28	1,21	1,17	41,55	68,70	50,94	3,70	0,46	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,00	3,29	3,02	2,81	2,61	2,39	3,70
	35L65C27,5U	1,20	5,17	7,06	0,41	1,37	1,29	40,29	63,01	47,25	3,25	0,39	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,00	2,86	2,72	2,47	2,28	2,02	3,25
	35L65C27,5U	1,32	5,39	7,00	0,39	1,30	1,23	37,86	63,58	47,12	3,23	0,38	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,00	2,84	2,69	2,50	2,36	2,03	3,23
	50L50C27,5U	1,27	5,17	6,81	0,40	1,32	1,24	37,62	62,87	46,29	3,15	0,49	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,01	2,80	2,61	2,46	2,26	2,01	3,15
	50L50C27,5U	1,24	5,23	7,49	0,51	1,43	1,34	39,06	60,64	47,85	3,35	0,47	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,03	2,85	2,66	2,52	2,25	2,03	3,35
	65L35C27,5U	1,28	4,69	6,26	0,47	1,34	1,24	32,92	59,52	43,36	2,88	0,58	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,05	2,57	2,42	2,24	2,10	1,91	2,88
	65L35C27,5U	1,58	6,51	7,66	0,27	1,18	1,14	38,25	68,66	49,91	3,57	0,60	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00	3,00	3,14	2,95	2,79	2,58	2,33	3,57



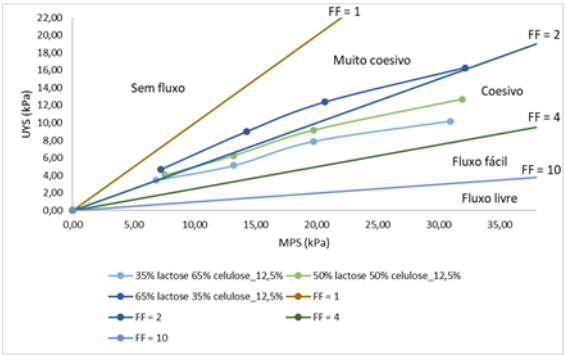
(A) Amostra seca



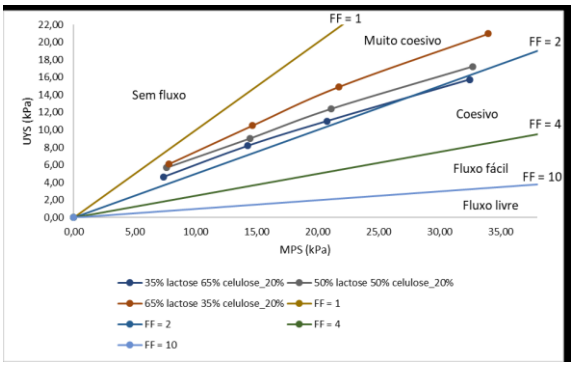
(B) Amostra com 5% de umidade



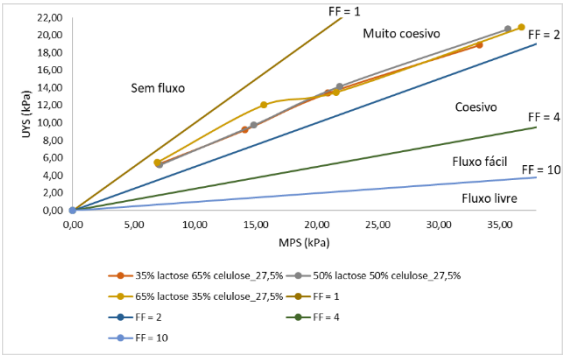
(C) Amostra com 8,75% de umidade



(D) Amostra com 12,5% de umidade



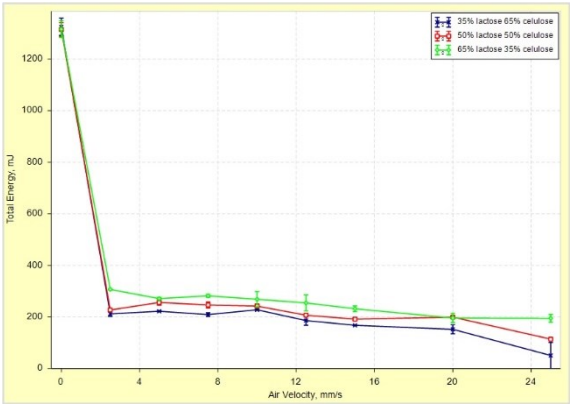
(E) Amostra com 20% de umidade



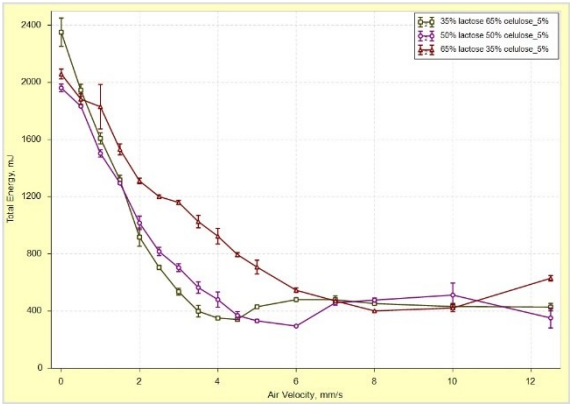
(F) Amostra com 27,5% de umidade

Aeração:

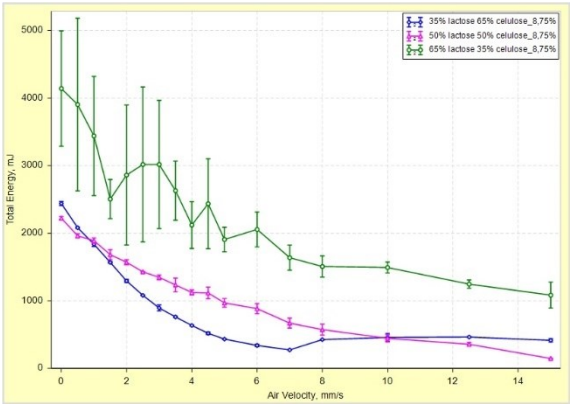
Material	BFE, mJ	AE, mJ	AR	NAS, s/mm	AE_12,5, mJ	AR_12,5	AE_20, mJ	AR_20	AE_30, mJ	AR_30	AE_25, mJ	AR_25	AE_3,5, mJ	AR_3,5	AE_15, mJ	AR_15	AE_8, mJ	AR_8
35% lactose 65% celulose	1358,60		8,01	0,33			169,57	8,01			101,63	13,37						
35% lactose 65% celulose	1291,64		9,58	0,34			134,76	9,58										
50% lactose 50% celulose	1341,36		6,92	0,33			193,95	6,92	102,19	13,13								
50% lactose 50% celulose	1287,40		6,28	0,33			204,91	6,28			115,67	11,13						
65% lactose 35% celulose	1348,37		7,56	0,31			178,40	7,56			179,56	7,51						
65% lactose 35% celulose	1282,98		6,01	0,31			213,65	6,01			209,75	6,12						
35% lactose 65% celulose_5%	2449,69		5,57	0,38									439,54	5,57	366,75	6,68		
35% lactose 65% celulose_5%	2251,65		6,28	0,38									358,34	6,28	376,75	5,98		
50% lactose 50% celulose_5%	1987,62		3,29	0,35									603,79	3,29	439,85	4,52		
50% lactose 50% celulose_5%	1934,53		3,69	0,33									524,91	3,69	278,59	6,94		
65% lactose 35% celulose_5%	2024,34		1,89	0,41									1069,51	1,89	619,12	3,27		
65% lactose 35% celulose_5%	2092,85		2,13	0,24									982,26	2,13	68,63	30,49		
35% lactose 65% celulose_8,75%	2468,59		3,19	0,32									774,51	3,19	439,57	5,62		
35% lactose 65% celulose_8,75%	2410,46		3,22	0,26									749,60	3,22	390,81	6,17		
50% lactose 50% celulose_8,75%	2199,94		1,65	0,25									1337,17	1,65	152,38	14,44		
50% lactose 50% celulose_8,75%	2247,07		1,98	0,29									1132,54	1,98	141,40	15,89		
65% lactose 35% celulose_8,75%	4994,83		1,63	0,61									3067,96	1,63	1277,05	3,91		
65% lactose 35% celulose_8,75%	3286,76		1,50	0,40									2192,39	1,50	892,25	3,68		
35% lactose 65% celulose_12,5%	2198,94		1,37	0,37									1602,01	1,37	460,97	4,77		
35% lactose 65% celulose_12,5%	2102,40		1,45	0,24									1454,80	1,45	389,58	5,40		
50% lactose 50% celulose_12,5%	1722,46		1,08	0,45									1599,10	1,08	941,53	1,83		
50% lactose 50% celulose_12,5%	1757,40		1,02	0,33									1716,34	1,02	885,50	1,98		
65% lactose 35% celulose_12,5%	2244,18		1,30	0,42									1720,81	1,30	1368,32	1,64		
65% lactose 35% celulose_12,5%	1984,45		1,13	0,28									1761,97	1,13	1471,52	1,35		
35% lactose 65% celulose_20%	1566,42		0,95	0,39									1643,71	0,95	1479,17	1,06		
35% lactose 65% celulose_20%	1990,97		1,15	0,38									1726,60	1,15	1527,31	1,30		
50% lactose 50% celulose_20%	2705,13		1,20	0,39									2250,13	1,20	1848,97	1,46		
50% lactose 50% celulose_20%	2426,06		1,11	0,13									2179,53	1,11	1904,81	1,27		
65% lactose 35% celulose_20%	2032,88		1,10	0,20									1854,89	1,10	1747,62	1,16		
65% lactose 35% celulose_20%	2080,25		1,12	0,18									1853,94	1,12	1745,88	1,19		
35% lactose 65% celulose_27,5%	2810,79		1,13	0,25									2476,97	1,13	1981,73	1,42		
35% lactose 65% celulose_27,5%	2352,32		0,93	0,19									2535,54	0,93	2183,84	1,08		
50% lactose 50% celulose_27,5%	2781,07		1,01	0,23									2752,28	1,01	2274,78	1,22		
50% lactose 50% celulose_27,5%	2483,35		0,97	0,18									2567,80	0,97			2489,88	1,00
65% lactose 35% celulose_27,5%	4582,15		0,96	0,50									4767,13	0,96	3428,75	1,34		
65% lactose 35% celulose_27,5%	4321,12		0,94	0,52									4587,87	0,94	4676,15	0,92		



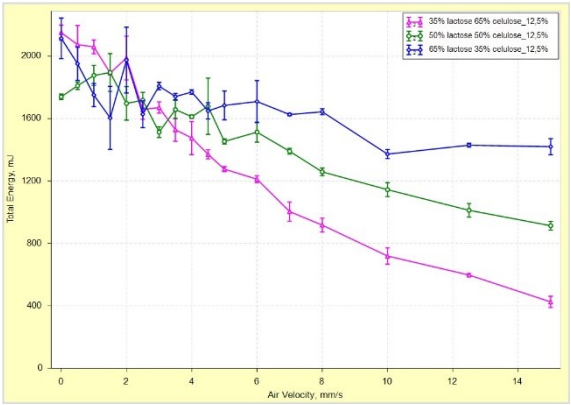
(A) Amostra seca



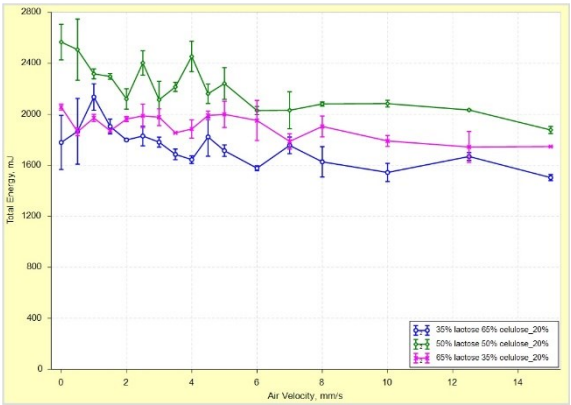
(B) Amostra com 5% de umidade



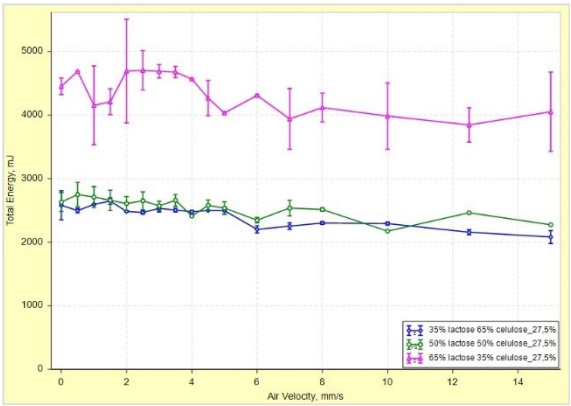
(C) Amostra com 8,75% de umidade



(D) Amostra com 12,5% de umidade



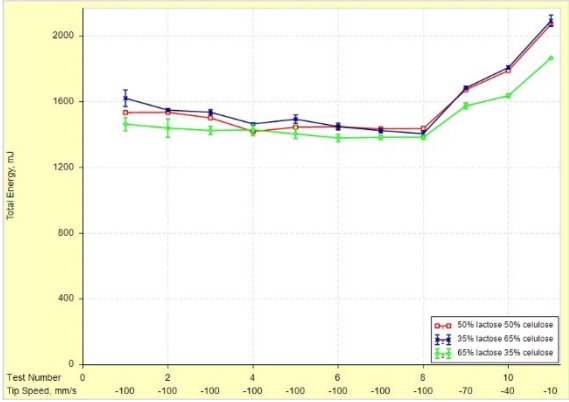
(E) Amostra com 20% de umidade



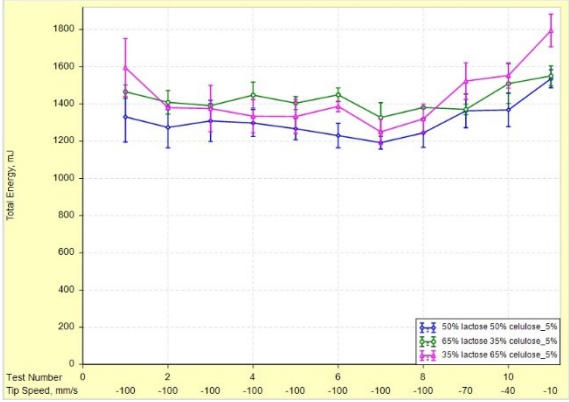
(F) Amostra com 27,5% de umidade

BFE e VRF:

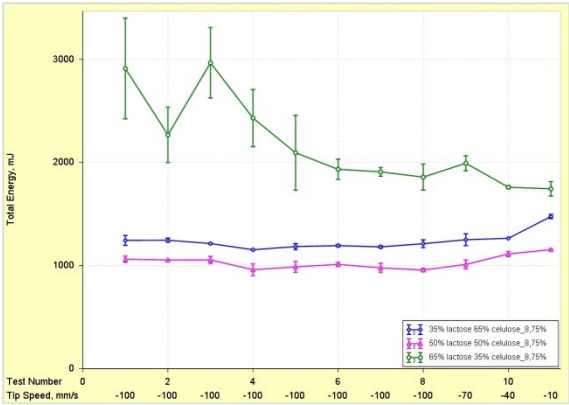
Material	BFE, mJ	SI	FRI	SE, mJ/g	CBD, g/ml
35% lactose 65% celulose	1437,01	0,86	1,48	10,61	0,41
35% lactose 65% celulose	1411,19	0,90	1,50	10,90	0,41
50% lactose 50% celulose	869,38	1,07	1,25	7,05	0,44
50% lactose 50% celulose	1435,00	0,94	1,44	10,35	0,46
65% lactose 35% celulose	1397,35	0,93	1,36	9,99	0,49
65% lactose 35% celulose	1369,61	0,96	1,34	10,03	0,49
35% lactose 65% celulose_5%	1317,04	0,75	1,35	11,87	0,39
35% lactose 65% celulose_5%	1182,94	0,82	1,38	11,23	0,38
50% lactose 50% celulose_5%	1157,77	0,97	1,27	9,87	0,40
50% lactose 50% celulose_5%	1226,30	0,84	1,20	10,19	0,40
65% lactose 35% celulose_5%	1406,63	0,94	1,08	13,44	0,41
65% lactose 35% celulose_5%	1247,42	0,87	1,16	9,76	0,40
35% lactose 65% celulose_8,75%	1168,86	0,90	1,20	9,71	0,37
35% lactose 65% celulose_8,75%	1192,40	1,00	1,24	9,94	0,37
50% lactose 50% celulose_8,75%	933,84	0,91	1,23	9,82	0,35
50% lactose 50% celulose_8,75%	1020,45	0,93	1,19	9,15	0,36
65% lactose 35% celulose_8,75%	1865,74	0,77	1,05	11,40	0,36
65% lactose 35% celulose_8,75%	1951,11	0,57	0,84	11,58	0,37
35% lactose 65% celulose_12,5%	1093,35	0,90	1,03	10,57	0,34
35% lactose 65% celulose_12,5%	1111,98	0,87	1,21	9,73	0,34
50% lactose 50% celulose_12,5%	1014,03	0,70	1,02	11,06	0,34
50% lactose 50% celulose_12,5%	1018,04	0,92	1,14	10,48	0,34
65% lactose 35% celulose_12,5%	1371,65	1,02	1,04	12,12	0,37
65% lactose 35% celulose_12,5%	1173,23	0,93	1,13	11,32	0,34
35% lactose 65% celulose_20%	890,42	0,79	1,07	10,93	0,27
35% lactose 65% celulose_20%	1023,53	0,53	1,00	10,81	0,29
50% lactose 50% celulose_20%	1607,10	0,86	1,15	11,74	0,34
50% lactose 50% celulose_20%	1476,90	0,63	0,99	12,40	0,34
65% lactose 35% celulose_20%	2129,63	1,15	0,96	15,93	0,37
65% lactose 35% celulose_20%	2139,20	0,89	0,88	14,46	0,36
35% lactose 65% celulose_27,5%	1190,66	0,81	1,10	11,44	0,31
35% lactose 65% celulose_27,5%	1483,28	0,90	0,89	15,52	0,32
50% lactose 50% celulose_27,5%	1944,15	0,94	1,11	13,83	0,37
50% lactose 50% celulose_27,5%	1619,31	0,92	0,97	13,70	0,35
65% lactose 35% celulose_27,5%	4612,52	1,07	1,06	21,03	0,47
65% lactose 35% celulose_27,5%	4625,90	0,78	1,09	23,02	0,46



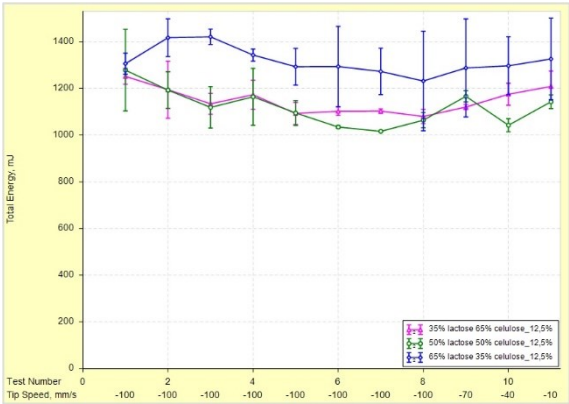
(A) Amostra seca



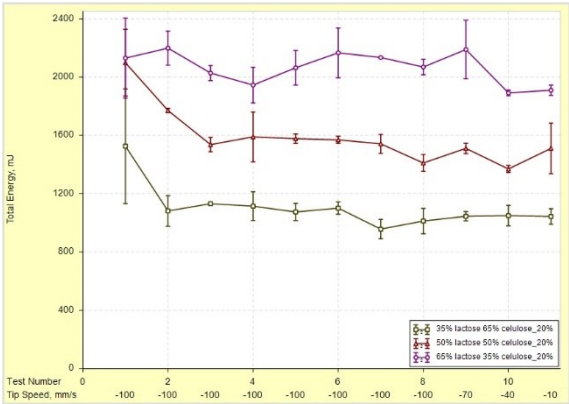
(B) Amostra com 5% de umidade



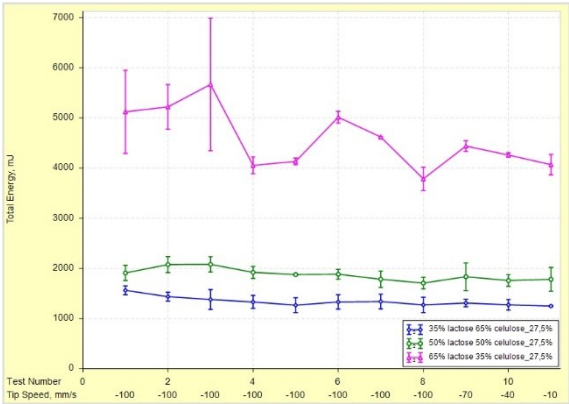
(C) Amostra com 8,75% de umidade



(D) Amostra com 12,5% de umidade



(E) Amostra com 20% de umidade



(F) Amostra com 27,5% de umidade

APÊNDICE D – RESULTADOS DO LEITO FLUIDIZADO

		0,00	4,24	8,49	12,73	16,98	21,22	25,46	29,71	33,95	38,20	42,44	46,69	50,93	55,17	59,42	63,66	67,91	72,15	76,39	80,64	84,88	89,13	93,37	97,62	101,86
35L65C0U	Altura (cm)	9,5	9,5	9,5	10,5									10,5												
	Perda de Carga (cmH2O)	1,0	2,3	3,0	4,0									0,5												
	Altura (cm)	9,5	9,5	9,5	11,5									11,5												
	Perda de Carga (cmH2O)	0,9	2,0	3,0	4,1									0,3												
50L50C0U	Altura (cm)		9,5	9,5	9,5	10,5									10,5											
	Perda de Carga (cmH2O)		1,2	2,0	2,7	3,7									0,4											
	Altura (cm)		9,5	9,5	9,5	10,0									10,0											
	Perda de Carga (cmH2O)		1,1	2,0	2,5	3,6									1,5											
65L35C0U	Altura (cm)		9,5	9,5	9,5	11,0							11,0													
	Perda de Carga (cmH2O)		1,4	2,1	3,0	4,5							1,1													
	Altura (cm)		9,5	9,5	9,5	10,5								10,5												
	Perda de Carga (cmH2O)		2,1	2,8	3,7	4,1								1,1												
35L65C5U	Altura (cm)		9,5	9,5	10,0		10,0																			
	Perda de Carga (cmH2O)		1,5	2,3	3,1		3,0																			
	Altura (cm)		9,5	9,5	10,5								10,5													
	Perda de Carga (cmH2O)		1,7	2,4	3,4								0,9													
50L50C5U	Altura (cm)			9,5	9,5	9,5	9,5		9,5																	
	Perda de Carga (cmH2O)			1,2	1,9	2,8	3,1		2,5																	
	Altura (cm)			9,5	9,5	9,5				9,5																
	Perda de Carga (cmH2O)			1,3	1,9	2,5				1,7																
65L35C5U	Altura (cm)			9,5	9,5	9,5	9,5	10,0			10,0															
	Perda de Carga (cmH2O)			1,1	1,4	2,0	2,5	2,7			2,0															
	Altura (cm)			9,5	9,5	9,5	9,5	9,5		9,5																
	Perda de Carga (cmH2O)			1,0	1,8	1,9	2,2	2,5		2,1																
35L65C8,75U	Altura (cm)				9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	11,0	11,5	10,0	10,0													
	Perda de Carga (cmH2O)				0,7	1,5	1,9	2,3	2,7	2,7	2,7	2,7	2,6													
	Altura (cm)			9,0	9,0	9,0	10,5	10,0																		
	Perda de Carga (cmH2O)			0,8	1,5	2,3	3,0	2,5																		
50L50C8,75U	Altura (cm)					9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	11,0			11,0
	Perda de Carga (cmH2O)					0,6	0,9	1,1	1,4	1,7	2,0	2,2	2,5	2,7	3,0	3,4	3,6	3,9	4,2	4,6	5,0	5,4	5,7			2,2
	Altura (cm)				9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	15,0				11,5		
	Perda de Carga (cmH2O)				0,7	1,3	1,5	2,0	2,3	2,7	3,1	3,6	4,0	4,5	4,9	5,4	5,8	6,3	6,8	8,0				3,3		
65L35C8,75U	Altura (cm)					9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,5		10,5	11,0				
	Perda de Carga (cmH2O)					0,6	1,0	1,2	1,4	1,7	2,0	2,3	2,5	2,9	3,1	3,5	3,9	4,2	4,5		4,8	4,4				
	Altura (cm)					9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,5		10,0		
	Perda de Carga (cmH2O)					0,7	0,9	1,1	1,4	1,6	2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,4	3,6	3,9	4,2	4,6	5,0	5,3		3,6		
35L65C12,5U	Altura (cm)			9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	11,5		10,0														
	Perda de Carga (cmH2O)			0,5	0,7	1,1	1,4	1,9	2,2	2,7		2,2														
	Altura (cm)			9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	11,0	10,0																
	Perda de Carga (cmH2O)			0,5	1,0	1,4	1,8	2,3	2,7	2,1																
50L50C12,5U	Altura (cm)			9,0	9,0	9,0	9,0	11,0		10,0																
	Perda de Carga (cmH2O)			1,0	1,4	2,3	2,8	3,2		2,6																
	Altura (cm)				9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,5	13,0			10,5					
	Perda de Carga (cmH2O)				0,8	1,1	1,5	1,9	2,2	2,7	3,0	3,5	3,8	4,3	4,8	5,2	5,8	6,4			3,0					

		16,98	21,22	25,46	29,71	33,95	38,20	42,44	46,69	50,93	55,17	59,42	63,66	67,91	72,15	76,39	80,64	84,88	89,13	93,37	97,62	101,86	106,10	110,35	114,59	118,84	123,08	127,32	131,57	135,81	140,06	144,30	148,54	152,79	157,03	161,28	165,52	169,77	174,01
65L35C12,5U	Altura (cm)		9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	10,5	9,5											
	Perda de Carga (cmH2O)		0,3	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	1,9	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	2,5	2,6	2,7	2,5	2,5	2,9	2,0											
	Altura (cm)	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0																
	Perda de Carga (cmH2O)	0,3	0,5	0,6	0,8	0,9	1,1	1,3	1,4	1,6	1,8	2,0	2,1	2,3	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,3																
35L65C20U	Altura (cm)		9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0															
	Perda de Carga (cmH2O)		0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,5	1,6	1,7	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,2	1,8															
	Altura (cm)			9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	10,0	10,5	11,0	11,0	11,0														
	Perda de Carga (cmH2O)			0,4	0,4	0,6	0,7	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7	1,9	2,0	2,0	2,2	2,6	2,7	2,8	2,9	2,9	2,0														
50L50C20U	Altura (cm)	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,5	9,5	10,5	10,0																
	Perda de Carga (cmH2O)	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4	1,5	1,7	1,9	2,0	2,1	2,3	2,5	2,5	2,7	3,0	3,3	3,7	3,9	4,1	3,5																
	Altura (cm)	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	11,0	10,0																						
	Perda de Carga (cmH2O)	0,5	0,7	1,0	1,2	1,5	1,7	2,0	2,1	2,4	2,6	3,0	3,1	3,4	3,7	4,0	3,6																						
65L35C20U	Altura (cm)		9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,9	9,9	10,0	10,0				
	Perda de Carga (cmH2O)		0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	2,0	2,1	2,2	2,4	2,5	2,7	2,9	3,0	3,0	3,1	3,3	3,3	3,5	3,6	3,7	4,0	4,0	4,3	4,3	4,5	2,9				
	Altura (cm)		9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,5	10,5
	Perda de Carga (cmH2O)		0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,0	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,9	2,0	2,1	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5	2,7	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,2	3,2	3,3	3,3	3,4	3,4	3,5	2,6
35L65C27,5U	Altura (cm)	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,3		11,0											
	Perda de Carga (cmH2O)	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0	2,1	2,3	2,5	2,7	3,0	3,1	3,4	3,6	3,8	4,0	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2		3,2											
	Altura (cm)	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	10,0	10,0		12,0														
	Perda de Carga (cmH2O)	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,2	1,3	1,5	1,7	1,9	2,0	2,1	2,4	2,5	2,7	2,8	3,0	3,3	3,5	3,5	3,6		3,0														
50L50C27,5U	Altura (cm)		9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	11,0			
	Perda de Carga (cmH2O)		0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,2	1,5	1,6	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,7	3,0	3,0	3,2	3,3	3,3	3,4	3,5	3,6	3,8	4,0	4,1	4,2	4,3	4,6	5,0	5,0	3,8			
	Altura (cm)		9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	10,0	10,5				
	Perda de Carga (cmH2O)		0,4	0,6	0,7	0,9	1,1	1,3	1,4	1,6	1,8	2,0	2,1	2,4	2,5	2,7	2,9	3,1	3,4	3,6	3,7	3,9	4,0	4,1	4,1	4,3	4,5	4,7	4,9	5,0	5,1	5,3	5,5	5,8	4,4				
65L35C27,5U	Altura (cm)		9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
	Perda de Carga (cmH2O)		0,2	0,3	0,5	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	1,9	2,0	2,1	2,3	2,4	2,5	2,5	2,5	2,7	2,8	3,0	3,1	3,2	3,2	3,3	3,5	3,5	3,6	3,8	3,9	4,0	4,1
	Altura (cm)		9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
	Perda de Carga (cmH2O)		0,3	0,5	0,6	0,7	0,7	1,0	1,1	1,3	1,4	1,6	1,7	1,9	2,0	2,2	2,4	2,5	2,8	3,1	3,1	3,2	3,4	3,5	3,5	3,6	3,8	4,0	4,1	4,2	4,5	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5	5,5	5,6