CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI ERICA REGINA BURATINI

ESTUDO DA VELOCIDADE MÍNIMA DE FLUIDIZAÇÃO ATRAVÉS DE ENSAIOS REOLÓGICOS DE MATERIAIS PARTICULADOS COM DIFERENTES PROPRIEDADES SUPERFICIAIS

São Bernardo do Campo

2017

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI ERICA REGINA BURATINI

ESTUDO DA VELOCIDADE MÍNIMA DE FLUIDIZAÇÃO ATRAVÉS DE ENSAIOS REOLÓGICOS DE MATERIAIS PARTICULADOS COM DIFERENTES PROPRIEDADES SUPERFICIAIS

Dissertação apresentada ao Centro Universitário da FEI para obtenção da qualificação em Mestre em Engenharia Química. Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Condotta

São Bernardo do Campo 2017

BURATINI, Érica Regina

Estudo da velocidade mínima de fluidização através de ensaios reológicos de materiais particulados com diferentes propriedades superficiais / Erica Buratini. São Bernardo do Campo, 2017. 180 f, : il.

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

1.Fluidização. 2. Reologia. 3. Velocidade. 4. Solido. 5. Particulado. I. Condotta, Rodrigo, orient. II. Titulo



APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO ATA DA BANCA EXAMINADORA

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Química

PGQ-10

Mestrado

Aluno: Erica Regina Buratini

Matrícula: 415106-4

Título do Trabalho: Estudo da velocidade mínima de fluidização através de ensaios reológicos de materiais particulados com diferentes propriedades superficiais.

Área de Concentração: Engenharia Química

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Condotta

Data da realização da defesa: 21/02/2017



Avaliação da Banca Examinadora:

São Bernardo do Campo, 21 / 02 / 2017.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA				
Prof. Dr. Rodrigo Condotta	Ass.:			
Prof. Dr. Roberto Nasser Júnior	Ass.:			
Ass.: Prof. Dr. Marcelo Martins Seckler				
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

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo Condotta, por acreditar no meu trabalho, por todo o apoio, direcionamento, ensinamento e paciência, sempre pronto e presente em todos os momentos na elaboração deste trabalho.

Ao Guilherme, por todo amor, companheirismo e por compreender minha ausência em diversos momentos e, principalmente, pelo estímulo constante, contribuindo para minha dedicação a este trabalho.

À minha irmã, Elaine, pelo estímulo, parceria, carinho e força nos momentos mais difíceis.

À minha mãe e meu pai que sempre me incentivaram a alcançar caminhos cada vez mais distantes.

Aos professores do Centro Universitário FEI, que serviram de inspiração pela vontade e gosto para transmitir seus conhecimentos.

"A imaginação é mais importante que a ciência, porque a ciência é limitada, ao passo que a imaginação abrange o mundo inteiro."

Albert Einstein

RESUMO

A determinação da velocidade mínima de fluidização é obtida a partir do levantamento em laboratório das curvas de perda de carga em função de ar injetado em um leito fluidizado clássico, em um reômetro de pós e através de correlações matemáticas previamente levantadas. As amostras envolvidas neste trabalho consistiram de hidróxido de alumínio e hidróxido de magnésio com e sem revestimento (9 - 12µm), aluminas fluoretada e calcinada (90 - 100µm), caulim, calcário e quartzo, com tamanho entre 40 - 60µm. O comportamento dos sólidos durante a fluidização em um leito clássico foi bem diferente: os coesivos, dado pelos hidróxidos de alumínio e magnésio, apresentaram formação de canal preferencial enquanto que os sólidos classificados como "areias", as aluminas calcinada e fluoretada, permitiram a visualização do início da fluidização, com formação de bolhas. Em paralelo, o teste de aeração foi realizado em um reômetro de pós, um equipamento que não sofre com a influencia do operador durante os testes. No reômetro de pós, foi possível a determinação da velocidade mínima de fluidização para os pós coesivos, aluminas e os compostos intermediários, com baixas variações de resultados. Para compreender os diferentes comportamentos, as propriedades das partículas, tal como diâmetro, densidade, morfologia e comportamento físico no leito de partículas (testes de energia básica de fluxo, compressibilidade, permeabilidade e teste de cisalhamento foram determinadas). Esses testes permitiram verificar que as partículas com maior tamanho, as aluminas calcinada e fluoretada, apresentam menor interação interparticular, sendo menos coesivas, fluindo mais facilmente. Para os compostos de hidróxidos de magnésio e alumínio, foram estudados o efeito de dois revestimentos e concluiu-se que revestí-los com ácido graxo gera aglomeração das partículas enquanto o revestimento de organosilicato desaglomera as partículas, permitindo a esses compostos maior fluidez ao material. Os compostos com baixo tamanho de partícula possuem maiores interações interparticulares. Dessa forma, neste trabalho concluiu-se que o leito fluidizado é recomendado para partículas de tamanho superior a 100 µm, em que existem menores interações interparticulares. Enquanto o reômetro de pós e algumas correlações matemáticas obtiveram melhores resultados para partículas de tamanhos inferiores a 40µm, de alta interação interparticular, coesivas e finas.

Palavras – chave: Sólidos. Particulados. Finos. Interação. Partículas. Fluidização. Perda de carga. Velocidade mínima de fluidização.

ABSTRACT

The determination of the minimum fluidization velocity is obtained from the laboratory survey of the pressure drop curves as a function of injected air. In addition, it is possible to determine it from mathematical correlations. In this work, the mininum fluidization velocity was determined by laboratory tests carried out in a classic fluidized bed, in a powder rheometer and through previously raised mathematical correlations. The samples involved in this work consisted of aluminum hydroxide and magnesium hydroxide with and without coating (9-12µm), fluorinated and calcined alumina (90-100µm), kaolin, limestone and quartz, with a size between 40-60µm. The behavior of the solids during the fluidization in a classic bed was very different: the cohesive ones, given by the hydroxides of aluminum and magnesium, presented preferential channel formation while the solids classified as "sand", the calcined and fluoride alumines, allowed the visualization of fluidization, with formation of bubbles. In parallel, the aeration test had done on a powder rheometer, an equipment that is not influenced by the operator during the tests. In the powder rheometer, it was possible to determine the minimum fluidization velocity for cohesive powders and for larger particles (aluminas). To understand the different behaviors, the properties of the particles, such as diameter, density, morphology and physical behavior in the particle bed (basic flow energy tests, compressibility, permeability and shear test were performed). These tests concluded that the particles with larger size, the calcined and fluoridated alumines, do not have interparticular interaction, being less cohesive, flowing easily. For the magnesium and aluminum hydroxide compounds, the effect of two coatings was studied and it was found that coating them with fatty acid generates agglomeration of the particles while the organosilicate coating deagglomerates the particles, allowing such compounds to be more fluid in the material. Compounds with low particle size have higher interparticular interactions. Thus, in this work it was concluded that the fluidized bed is recommended for particles larger than 100 µm, in which there are smaller interparticular interactions. While the rheometer of powders and some mathematical correlations obtained better results for particles of sizes smaller than 40µm, high interparticular interaction, cohesive and fine.

Keywords: solids. Particulates. Fines. Coesives, interaction, fluidization, aeration, minimum velocity powder, rheometer

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema do leito fluidizado e estático	27
Figura 2 - Etapas do regime de fluidização	30
Figura 3 - Classificação dos pós de acordo com Geldart.	33
Figura 4 – Equilíbrio de forças em uma partícula quando atingida a velocidade mínima de fluidizaç	ção.
Figura 5 - Obtenção gráfica da velocidade mínima de fluidização	35 38
Figura 6 - Evolução da perda de carga em função da velocidade superficial do fluido	30 20
Figura 7 - Curvas características de fluidização de acordo com o tipo de material (poli ou	55
monodisperso)	40
Figura 8 – Propriedades que caracterizam a partícula isoladamente	40
Figura 9 - Propriedades do conjunto de partículas que influenciam no escoamento das partículas	
Figura 10 – Modelos dos diferentes diâmetros para medição do tamanho da partícula	. 13
Figura 11 - Interação de um raio de luz com uma partícula esférica (a) ângulos difratados	
determinados pelo tamanho da partícula e (b) padrão de difração.	48
Figura 12 - Curva normal de distribuição do tamanho de partícula.	49
Figura 13 – Curva de distribuição acumulada	50
Figura 14 – Faixas de diâmetros para determinação se as partículas ficarão em suspensão	51
Figura 15 - Formas possíveis de partículas.	53
Figura 16 - Representação esquemática da rugosidade de partículas	54
Figura 17 - Esquema de funcionamento de um picnômetro a gás	56
Figura 18 - Classificação dos poros intraparticulares.	57
Figura 19 - Influência do teor de umidade na escoabilidade dos sólidos particulados	58
Figura 20 - Menisco líquido entre duas partículas esféricas idênticas.	60
Figura 21 - Representação da célula de Jenike	63
Figura 22 - Curvas da etapa de consolidação (pré-shear) de teste de cisalhamento para amostras qu	e
foram previamente (1) sobreconsolidadas, (2) consolidada criticamente e (3) subconsolidada	63
Figura 23 - Gráfico da determinação do lugar geométrico	64
Figura 24 - Gráfico de determinação do ângulo de atrito	65
Figura 25 - Classificação dos pós de acordo com o teste de Jenike	66
Figura 26 - Equipamento para determinação da distribuição do tamanho de partícula	69
Figura 27 - Equipamento para medição de tamanho de partícula via seca (Turbotrac) e via úmida	
(HydroTrac)	70
Figura 28 - Esquema do picnômetro a gás utilizado para determinação da densidade real	71
Figura 29 - Funcionamento do picnômetro para determinação de densidade	72
Figura 30 - Esquema do microscópio eletrônico de varredura utilizado	73
Figura 31 - Esquema do leito fluidizado utilizado (a) Equipamento e (b) Rotâmetro	74
Figura 32 - Curva de fluidização característica	76
Figura 33 - Esquema do equipamento da Powder Rheometer da Freeman Technology FT 4	76
Figura 34 – Ilustração da rotação da hélice do FT4	77
Figura 35 - Metodologia dinâmica empregada no FT4, o movimento das pás	78
Figura 36 - Esquema do movimento da lâmina realizado para determinação do padrão de fluxo	79
Figura 37 - Lâmina utilizada no teste de BFE	79

Figura 38 - Sequencia de etapas do teste de BFE e VRF	80
Figura 39 - Esquema das etapas do teste de aeração.	81
Figura 40 - Equipamento de Freeman durante teste de aeração	81
Figura 41 - Resultados gerados no teste de aeração para 2 materiais hipotéticos	82
Figura 42 - Esquema do pistão ventilado.	83
Figura 43 - Esquema das etapas do teste de compressibilidade	84
Figura 44 - Esquema das etapas realizadas no teste de permeabilidade no equipamento FT4	85
Figura 45 - Funcionamento do sólido durante o teste de permeabilidade	85
Figura 46 - Acessórios utilizados no teste de cisalhamento.	87
Figura 47 - Representação do gráfico gerado no reômetro de pós da Freeman FT4	87
Figura 48 - Distribuição do tamanho de partícula para as aluminas calcinada e fluoretada	91
Figura 49 - Distribuição do tamanho de partícula para os hidróxidos de alumínio	91
Figura 50 - Distribuição do tamanho de partícula para os hidróxidos de magnésio	92
Figura 51 - Distribuição do tamanho de partícula para os compostos intermediários	92
Figura 52 - Morfologia da alumina calcinada obtida via MEV	94
Figura 53 – Morfologia da alumina fluoretada obtida via MEV	94
Figura 54 - Morfologia do Hidraltex 635, obtida via MEV.	95
Figura 55 - Morfologia do Hidraltex 635 ES (revestido com ácido graxo) obtido via MEV	95
Figura 56 - Morfologia do Itasil 2250 (revestido com organosilicato) obtido via MEV	96
Figura 57 - Morfologia do Itamag 325 obtido via MEV.	96
Figura 58 - Morfologia do Itamag ES (revestido com ácido graxo) obtido via MEV	97
Figura 59 - Morfologia do Itamag 1100 (revestido com organosilicato) obtido via MEV	97
Figura 60 - Morfologia do caulim, obtido via MEV.	98
Figura 61 - Morfologia do calcário, obtido via MEV	98
Figura 62 - Morfologia do quartzo, obtido via MEV	99
Figura 63 - Resultados da Energia Básica de Fluxo Obtida no FT4 para os pós particulados estudad	dos,
com diferentes diâmetros de partícula	. 100
Figura 64 - Dados de FRI e SI obtidos no FT4.	. 101
Figura 65 - Comportamento da energia básica de fluxo para as aluminas.	. 102
Figura 66 - Comportamento da energia básica de fluxo para os compostos intermediários	. 102
Figura 67 - Comportamento da energia básica de fluxo para os hidroxidos de alumínio	. 103
Figura 68 - Comportamento da energia básica de fluxo para os hidróxidos de magnésio	. 103
Figura 69 - Círculo de Mohr resultante do teste de cisalhamento para cada sólido particulado	. 106
Figura 70 - Classificação dos hidróxidos de alumínio quanto à função fluxo	. 107
Figura 71 - Classificação dos hidróxidos de magnésio quanto à função fluxo	. 107
Figura 72 - Classificação das aluminas quanto à função fluxo.	. 108
Figura 73 - Classificação dos pós intermediários quanto à função fluxo.	. 109
Figura 74 - Resultados de coesão obtidos nos testes de cisalhamento às pressões de 3, 6 e 9 kPa	. 110
Figura 75 - Resultados médios de percentagem de compressão para os diferentes sólidos particulad	los
estudados a 15kPa	. 111
Figura 76 - Comportamento das aluminas e dos compostos intermediários quanto a compressibilid	ade.
	. 111
Figura 77 - Comportamento dos hidróxidos de alumínio no teste de compressibilidade	. 112
Figura 78 - Comportamento dos hidróxidos de magnésio no teste de compressibilidade	. 112
Figura 79 - Permeabilidade para os compostos com alta perda de carga	. 114

Figura 80 - Permeabilidade para os compostos com baixa perda de carga	114
Figura 81 - Resultados dos testes de permeabilidade médio para as aluminas	115
Figura 82 - Resultados dos testes de permeabilidade para os compostos intermediários	115
Figura 83 - Resultados do teste de permeabilidade para os hidróxidos de alumínio	116
Figura 84 - Resultados do teste de permeabilidade para os hidróxidos de alumínio	116
Figura 85 - Resultados do teste de aeração para as aluminas	118
Figura 86 - Resultados dos testes de fluidização para os compostos intermediários	119
Figura 87 - Resultados dos testes de fluidização para os hidróxidos de magnésio	119
Figura 88 - Resultados do teste de fluidização para o hidróxido de alumínio	120
Figura 89 - Curva de fluidização em estufa dos hidróxidos de magnésio	122
Figura 90 - Curva de aeração para os hidróxidos de alumínio submetidos a secagem	122
Figura 91 - Curva de aeração para a alumina calcinada e fluoretada após secagem estufa	123
Figura 92 - Velocidades mínima de fluidização dos hidróxidos de magnésio, em mm/s	130
Figura 93 - Velocidades mínima de fluidização dos hidróxidos de alumínio, em mm/s	130
Figura 94 - Velocidades mínima de fluidização das aluminas, em mm/s	131
Figura 95 - Velocidades mínima de fluidização dos compostos intermediários, em mm/s	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Correlação da fluidização com a classificação Geldart (1973)	34
Tabela 2 - Principais correlações para a determinação da velocidade mínima de fluidização	41
Tabela 3 - Classificação dos sólidos particulados quanto ao tamanho das partículas	43
Tabela 4 - Tabela granulométrica	46
Tabela 5 – Classificação de Hausner quanto à capacidade de escoamento dos sólidos particulados.	61
Tabela 6 - Classificação segundo Jenike para a coesão e fluidez dos sólidos particulados	66
Tabela 7 - Descrição dos sólidos particulados doados pela empresa Itatex/Imerys	68
Tabela 8 - Características do equipamento de determinação de tamanho de partícula	69
Tabela 9 - Detalhes do picnômetro para medição de densidade dos materiais	71
Tabela 10 - Especificações do equipamento para medição de fluidização	73
Tabela 11 - Alturas utilizadas dos sólidos particulados para realização do teste de leito fluidizado.	75
Tabela 12 - Detalhes dos testes possíveis de serem realizados no Reômetro de pós	77
Tabela 13 – Classificação dos sólidos particulados no teste de aeração	83
Tabela 14 - Características físicas das amostras estudadas	90
Tabela 15 - Obtenção da porosidade dos sólidos estudados	. 105
Tabela 16 - Classificação dos compostos quanto à função fluxo a 12 kPa e Geldart	. 109
Tabela 17 - Velocidade de fluidização de cada sólido particulado	. 121
Tabela 18 – Cálculo da razão de aeração	. 123
Tabela 19 - Características do leito fluidizado empregado	. 124
Tabela 20 - Velocidades de fluidização e defluidização para os sólidos particulados	. 125
Tabela 21 - Comparação dos resultados do Reômetro de pós e o leito fluidizado	. 127
Tabela 22 - Propriedades obtidas dos sólidos particulados estudados	. 129
Tabela 23 - Resultados obtidos no teste de BFE consolidado para os sólidos particulados estudado	S
obtidos no FT4	. 149
Tabela 24 - Dados obtidos nos testes em duplicata para os sólidos particulados estudados	. 150
Tabela 25 - Resultados obtidos no FT4 para tensão normal de 3 kPa	. 153
Tabela 26 - Resultados obtidos no FT4 para tensão normal de 6 kPa	. 154
Tabela 27 - Resultados obtidos no FT4 para tensão normal de 9 kPa	. 155
Tabela 28 - Resultados compilados para obtenção da função fluxo (FF).	. 156
Tabela 29 - Resultados obtidos a 15 kPa no grau de compressibilidade, cálculo da média e desvio	
padrão	. 163
Tabela 30 - Grau de compressão para cada pressão normal aplicada nos sólidos particulados	
estudados	. 164
Tabela 31 - Resultados de permeabilidade média obtidos à pressão normal de 15,0 kPa e desvio	
padrão	. 165
Tabela 32 - Dados coletados durante teste de aeração no reometro de pós, FT4	. 167

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	. 21
2	OBJETIVO	. 25
2.1	Organização da pesquisa	. 25
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	. 27
3.1	Fluidização	. 27
3.1.1	1 Regimes de Fluidização	. 28
3.1.2	2 Classificação Geldart	. 32
3.1.3	3 Velocidade Mínima de Fluidização	. 35
3.2	Sólidos Particulados	. 43
3.3	Características das partículas e do leito de partículas	. 43
3.3.1	1 Tamanho e distribuição de tamanho das partículas	. 45
3.3.1	1.1 Segurança no manuseio de sólidos particulados	. 50
3.3.2	2 Forma das partículas	. 52
3.3.3	3 Rugosidade ou textura superficial da partícula	. 54
3.3.4	4 Densidade da partícula	. 55
3.3.5	5 Densidade do conjunto de partículas	. 56
3.3.6	6 Porosidade intra e interparticular	. 57
3.3.7	7 Teor de umidade nas partículas	. 58
3.3.8	8 Interações físicas das partículas	. 59
3.3.8	8.1 Forças de van der Waals	. 59
3.3.8	8.2 Pontes líquidas	. 59
3.3.8	8.3 Pontes sólidas	. 60
3.3.8	8.4 Forças eletrostáticas	. 60
3.3.9	9 Compressibilidade	. 60
3.3.1	10 Coesão e adesão entre partículas	. 61
3.3.1	11 Função Fluxo – Teste de cisalhamento	. 62
4	MATERIAIS E MÉTODOS	. 67
4.1	Materiais	. 67
4.2	Métodos	. 69
4.2.1	1 Distribuição granulométrica das partículas	. 69
4.2.2	2 Densidade específica das partículas	. 71
4.2.3	3 Morfologia das partículas	. 72

4.2.4	Leito Fluidizado	73
4.2.5	Reômetro de pós	76
4.2.5.1	Energia básica de fluxo (BFE) e Energia de Fluxo variável (VRF)	78
4.2.5.2	Teste de aeração	80
4.2.5.3	Teste de Compressibilidade	83
4.2.5.4	Teste de permeabilidade	84
4.2.5.5	Teste de Cisalhamento	86
5 RES	ULTADOS E DISCUSSÃO	89
5.1 Ca	aracterização das partículas	89
5.2 M	orfologia das partículas	93
5.3 R	eômetro de pós1	00
5.3.1	Energia básica de fluxo1	00
5.3.2	Teste de cisalhamento (Shear test)1	05
5.3.3	Teste de compressibilidade1	10
5.3.4	Teste de permeabilidade1	13
5.3.5	Teste de aeração1	18
5.4 Le	eito Fluidizado1	24
5.5 C	omparativo dos resultados com a literatura1	28
6 CON	ICLUSÕES E RECOMENDAÇÕES1	35
REFERÊ	NCIAS1	37
APENDI	CE A – CURVAS DE GRANULOMETRIA1	43
APENDI PÓS	CE B – RESULTADOS DE ENERGIA BÁSICA DE FLUXO (BFE) DO REÔMETRO DI 1	<u>-</u> 49
APENDI	CE III – RESULTADOS DO TESTE DE CISALHAMENTO DO REÔMETRO DE PÓS 1	53
APENDI REÔMET	CE C – RESULTADOS DO TESTE DE COMPRESSIBILIDADE REALIZADO NO FRO DE PÓS1	63
APENDI REÔMET	CE D – RESULTADOS DO TESTE DE PERMEABILIDADE REALIZADO NO FRO DE PÓS1	65
APENDI PÓS	CE E – RESULTADOS DO TESTE DE AERAÇÃO REALIZADO NO REÔMETRO DE 	67
APENDI FLUIDIZ	CE F – RESULTADOS DO TESTE DE FLUIDIZAÇÃO REALIZADO NO LEITO ZADO1	69
APENDI UTILIZA	CE F – CÁLCULOS TEÓRICOS DE VELOCIDADE MÍNIMA DE FLUIDIZAÇÃO NDO AS CORRELAÇÕES APRESENTADAS2	15
ANEXO	I – FICHA DE DADOS DO EQUIPAMENTO BLUEWAVE 2	17
ANEXO	II – FICHA DE DADOS DO PICNÔMETRO ACCUPYC2	19

1 INTRODUÇÃO

Patil (2008) constatou que aproximadamente setenta e cinco por cento dos processos químicos envolve sólidos particulados em alguma etapa da cadeia produtiva.

Os sistemas particulados estão associados às operações de transporte, mistura, separação e modificação do tamanho de sólidos; escoamento de fluidos através de leitos fixos e móveis, dentre outros (CREMASCO, 2012).

Os sólidos particulados podem ser empregados em uma grande variedade de processos químicos e produtos, desde agrotóxicos a pigmentos, de detergentes a alimentos, de plásticos a fármacos. Podem ser utilizados como catalisadores de processos ou como os principais componentes, por exemplo nos fármacos. Os sólidos particulados podem ser pós, grânulos, pastas ou lama (SEVILLE; TUZUN; CLIFT, 1997).

Apesar de possuírem diversas aplicações na engenharia química, o comportamento dos sólidos ainda é pouco conhecido. O conhecimento do comportamento e das propriedades dos sólidos particulados permite o dimensionamento de processos mais eficientes para a produção de materiais seguros e de melhor qualidade, produzindo-se bens de consumo de maior valor agregado (CAMPOS, 2012).

A natureza de um sólido particulado torna a análise do comportamento do sólido muito mais difícil que dos fluidos. O problema principal enfrentado nos processos que envolvem os sólidos particulados é a falta de homogeneidade dos mesmos visto que é bem raro e difícil encontrar um material que apresente todas as partículas de mesmo tamanho e forma (PATIL, 2008).

De acordo com Condotta (2005), o escoamento dos sólidos particulados é um fenômeno complexo e dependente das características físico-químicas do conjunto de partículas que interferem no movimento ou deslizamento. Para as partículas sólidas escoarem, é necessário que forças de coesão e atrito sejam superadas. Tais forças são dependentes de propriedades de partículas que constituem o pó, tal como umidade, massa específica, composição, forma e rugosidade superficial

Denomina-se fluidização o processo que ocorre quando um fluido (gás ou líquido) é escoado verticalmente e ascendente em um leito de partículas e provoca a movimentação das mesmas.

A fluidização inicia quando a força de atrito é igualada ao peso das partículas e se comporta como um fluido. A velocidade em que esta condição ocorre é denominada velocidade mínima de fluidização (RIBEIRO, 2005).

Os leitos fluidizados são largamente utilizados em processos industriais tal como em sínteses e reações catalíticas, regeneração catalítica, combustão e gaseificação de carvão, em adsorção de gases, reações gás-sólido e secagem. Proporcionam uma mistura intensa entre as fases fluida e particulada, permitindo-se obter altas taxas de transferência de calor e de massa e uniformidade de distribuições de temperatura e de concentração das fases no interior do equipamento (CREMASCO, 2012).

O comportamento de cada sistema de fluidização, principalmente a obtenção da velocidade mínima de fluidização, depende das características físicas das partículas (distribuição granulométrica, tamanho médio, forma, massa específica), das características do fluido e das condições da coluna de fluidização (temperatura, vazão, compactação da fase particulada, diâmetro, altura) (CREMASCO, 2012).

A velocidade mínima de fluidização pode ser obtida a partir de experimentos ou pode ser obtida por modelos desenvolvidos em literaturas. Entretanto, muitos modelos não levam em consideração todas as propriedades dos sólidos particulados, principalmente quando tratam-se de sólidos coesivos, tamanho pequeno e, com altas interações interparticulares.

No manuseio de pós e sólidos particulados, existem altos riscos de incêndios e explosões devido à carga eletrostática. Muitas vezes, um material que não apresenta risco de explosão na forma líquida, quando em sua forma sólida, é considerado perigoso (BETENHEUSER; FERREIRA; OLIVEIRA, 2005).

Os sólidos particulados de pequenas dimensões podem permanecer em suspensão no ar e serem dispersos na atmosfera sendo considerados como poluição atmosférica. Os processos industriais que envolvem fluidização possuem problemas de emissões atmosféricas que abrangem desdes gases a materiais particulados. Para cada tipo de atividade e poluente, cabe à engenharia encontrar a forma de controle mais adequada (FURIERI; CASTILHO, 2009).

O controle adequado da poluição do ar tem início com um projeto de ventilação adequado bem como o conhecimento das propriedades da partícula que é manuseada. É necessário o conhecimento de sua curva de explosividade, que fornecerá informações para que explosões catastróficas sejam evitadas (FURIERI; CASTILHO, 2009).

Este trabalho visa o estudo do comportamento de sólidos particulados, determinação das principais características destes sólidos por ensaios experimentais em sistemas de leitos

fluidizados no intuito de se e determinar a velocidade em que cada pó sofre fluidização e avaliar a variação da velocidade mínima de fluidização com as demais propriedades físicas estudadas.

2 OBJETIVO

Esse trabalho teve como objetivo o estudo da velocidade mínima de fluidização de diferentes sólidos particulados através da realização de experimentos clássicos em leito fluidizado, em um reômetro de pós e por correlações matemáticas já existentes. Além disso, foram determinadas as propriedades dos sólidos particulados através de experimentos com auxílio de um reômetro de pós para identificação das propriedades dos sólidos que mais influenciaram na velocidade mínima de fluidização e que justificavam seu comportamento quando submetidas à fluidização.

2.1 Organização da pesquisa

Neste trabalho, é apresentada a definição de transporte de sólidos em leito fixo, com as definições sobre fluidização, os regimes de fluidização e o comportamento da queda de pressão nestes sistemas. São apresentados também os conceitos gerais de sólidos particulados e suas propriedades individuais bem como as propriedades do conjunto de partículas e seu comportamento em um leito fluidizado (permeabilidade e escoabilidade) e um leito sob condições de armazenamento (compressibilidade e cisalhamento).

A partir das propriedades dos sólidos particulados, foi calculada a velocidade mínima de fluidização através de correlações matemáticas obtidas em literatura. E, em laboratório, foram realizados testes de fluidização em um reômetro de pós e em um leito clássico para determinação experimental da velocidade mínima de fluidização.

Foram também realizados experimentos em um reômetro de pós para compreensão do comportamento de cada sólido particulado em um leito de partículas, tais como compressibilidade, testes de cisalhamento, permeabilidade e energia necessária para fluir.

Os resultados das velocidades mínimas de fluidização do leito clássico, reômetro de pós e das correlações matemáticas foram comparados e, através das propriedades físicas de cada sólido particulado e do leito de partículas é justificado o comportamento de cada sólido particulado que mais influencia na velocidade mínima de fluidização.

Dessa forma, o trabalho foi estruturado da seguinte forma:

 a) No capítulo 3 está apresentada a revisão bibliográfica acerca dos tópicos de interesse desta pesquisa; Estão descritos os conceitos de fluidização e transporte pneumático e as propriedades dos sólidos particulados. Foram apresentadas as correlações matemáticas resumidamente de trabalhos encontrados em literatura que estudaram a determinação de velocidade mínima de fluidização;

- b) O capítulo 4 apresenta os materiais e métodos; os equipamentos utilizados e o procedimento que foi realizado em cada teste;
- c) O capítulo 5 realiza contêm a análise e discussão dos resultados experimentais obtidos;
- d) E o capítulo 6, a conclusão do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, são apresentados os conceitos de fluidização, equações teóricas para obtenção da velocidade mínima de fluidização e, também é definido o que são sólidos particulados e quais as propriedades físicas e químicas que podem influenciar em seu comportamente durante a fluidização.

3.1 Fluidização

A fluidização é uma operação unitária que envolve a interação sólido-líquido no qual as partículas sólidas entram em estado de suspensão quando submetidas à passagem vertical e ascendente de um fluido distribuído uniformemente por uma placa perfurada que sustenta o leito, como esquematizado na figura 1.





Fonte: RIBEIRO, 2005.

Os leitos fluidizados são largamente utilizados em processos industriais por proporcionarem uma mistura intensa entre as fases fluida e particulada, criando altas taxas de transferência de calor e de massa, assim como uniformidade de distribuição de temperaturas e de concentração de fases no interior do equipamento (CREMASCO, 2012). Exemplos de aplicação incluem processos catalíticos, em indústria de petróleo, reações gás-sólido, secagem de sólidos, etc (RIBEIRO, 2005).

Existem vários exemplos industriais em que a fluidização é aplicada, tal como na conversão catalítica de hidrocarbonetos, secagem, combustão, calcinação, aglomeração, entre outros.

Destaca-se como desvantagem dos leitos fluidizados a necessidade de controle de pós e poeiras no ambiente devido à carga eletrostática que pode ser gerada por estes materiais. É necessário evitar que não fiquem em suspensão e ocasionem acidentes ou explosões, tais equipamentos podem ser mais custosos que o leito fluidizado (CREMASCO, 2012).

Quando iniciada a fluidização, a força de atrito entre as partículas e o fluido equivale ao peso das partículas (RIBEIRO, 2005).

O comportamento hidrodinâmico em leitos fluidizados é complexo e deve ser compreendido para a realização desta operação unitária. Diversos parâmetros são utilizados para o entendimento do comportamento de um sólido no momento que é fluidizado. Um dos principais parâmetros utilizados é a velocidade mínima de fluidização que está relacionada à força de empuxo e atrito que entra em equilíbrio à força peso das partículas (ESCUDERO, 2010).

Os leitos fluidizados são utilizados na maioria das vezes para o resfriamento ou secagem de sólidos particulados. Quando o material manuseado for combustível, a poeira gerada é explosiva. Nessa condição, uma fonte de ignição torna o processo altamente perigoso e explosivo. Além da fonte de ignição, o próprio material aderido às paredes do leito pode sofrer auto-ignição iniciando a explosão. Dessa forma, é essencial que estes equipamentos possuam detectores de explosão e o ambiente possua ventilação forçada, evitando-se acúmulo de poeira e um possível acidente industrial (BETENHEUSER; FERREIRA; OLIVEIRA, 2005).

3.1.1 Regimes de Fluidização

Segundo Gomide (1980) e Cremasco (2012), as condições necessárias para uma boa fluidização dependem das características físicas da fase particulada (distribuição granulométrica, tamanho médio das partículas, forma, massa específica) e da fase fluida (viscosidade dinâmica, massa específica), e também das condições operacionais do sistema (vazão, temperatura, altura e diâmetro).

Gomide (1980) afirma que o contato entre sólidos e fluidos pode ser realizado por três tipos de operação denominadas:

- a) Leito Fixo
- b) Leito móvel
- c) Leito Fluidizado

Em operações de leito fixo, as partículas sólidas encontram-se no leito e ao iniciar a passagem de gás a uma velocidade baixa através do leito poroso, o gás percola o leito através dos espaços vazios entre as partículas que não se movimentam. Neste caso, há aumento na queda de pressão e a altura do leito permanece constante.

Com o contínuo aumento da velocidade do gás, as partículas adquirem o estado vibracional e se movimentam separadamente em regiões restritas, diz-se que o leito está em regime expandido. Neste estágio, continua havendo aumento da queda de pressão com consequente aumento da altura do leito (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

No ponto em que as partículas começam a ser suspensas pelo gás, há um balanço entre as forças de atrito da partícula e o gás contrabalanceia o peso aparente das partículas. Há uma brusca queda de pressão. Nesse ponto, as partículas estão soltas e livres para se movimentarem de um ponto a outro do leito, esta condição é dita como fluidização incipiente e a velocidade em que isto ocorre é denominada velocidade mínima de fluidização (GOMIDE, 1980).

Com o aumento da velocidade do fluido acima do limite mínimo de fluidização, atingese a fluidização turbulenta em que o material passa a ser arrastado. Nesta condição, a perda de carga varia de modo apreciável porque a perda por atrito nas paredes torna-se irrelevante quando comparada ao leito. Há uma expansão e depois as partículas separam-se umas das outras, começando a se movimentar. Neste ponto, a perda de carga pode até diminuir um pouco em virtude do aumento da porosidade e começa a fluidização. As partículas passam a se movimentar desordenadamente de modo vigoroso no interior do leito. Se a velocidade do fluido continuar aumentando, a expansão do leito prosseguirá com aumento de porosidade, até que chega um ponto que há arraste de partículas, chamado de transporte pneumático (GOMIDE, 1980).

Antes de atingir a condição turbulenta, leitos fundos de vasos com diâmetro reduzido geram *slugs*, que são grandes bolhas formadas pela coalescência de bolhas menores e que ocupam o leito. Neste instante, observam-se grandes flutuações na queda de pressão no leito (NITZ, 2006).

Em sistemas gás-sólido, as bolhas de gás coalescem e aumentam à medida que sobem e, em alguns casos podem tornar-se grandes o suficiente para ocupar todo o leito, sendo separadas por slugs de sólidos. Este fenômeno é denominado *slugging* e é indesejável, devido às flutuações de pressão no leito (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

A figura 2 mostra o comportamento do leito de partículas sólidas, a altura do leito e a queda de pressão, em função do aumento da velocidade superficial do fluido (gás). No início, percebe-se que a queda de pressão aumenta linearmente com a velocidade. Isto ocorre porque o gás escoa com baixa velocidade, percorrendo os espaços entre as partículas sólidas, não causando a sua movimentação. Essa é a condição de leito fixo, pois a altura não varia (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).



Fonte: Autora. "Adaptado de NITZ, 2006 e de McCabe; Harriot; Smith, 1993, p. 165".

Com o aumento da velocidade do fluido, as partículas se afastam e começam a vibrar (ponto A). A fluidização só ocorre quando as forças causadas pelo escoamento do gás no sentido ascendente se igualam ao peso das partículas. Nesta fase, a velocidade do fluido é chamada de velocidade de fluidização e corresponde ao regime de fluidização incipiente (ponto B). Nesse instante, a queda de pressão passa a ser constante e a altura do leito começa a aumentar linearmente com a velocidade. Observa-se que quando ocorre o sentido contrário, ou seja, ao diminuir a velocidade do gás, a queda de pressão permanece constante e a altura do leito diminui linearmente com a velocidade. Porém ao chegar ao ponto B, a altura do leito não retorna ao ponto A, a altura fica maior porque houve descompactação das partículas (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Logo após a fluidização incipiente, se o aumento da velocidade do gás continuar, temse a fluidização borbulhante. Nesta fase ocorre uma expansão significativa do leito, antes de surgirem as bolhas, quando as partículas do leito são de pequeno tamanho (densidade inferior a 1,4 g/cm³). Com partículas de densidade até 4 g/cm³, o leito não expande muito além daquela adquirida na condição de fluidização incipiente e as bolhas surgem com a velocidade mínima de fluidização (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

A perda de carga no leito fluidizado pode ser descrito pela equação de Ergun (Equação 1) e é o modelo mais aceito para a previsão da queda de pressão em leitos fixos. Apresenta amplo espectro de atuação, não possui restrições com relação ao número de Reynolds, tanto para leitos de partículas uniformes, quanto não uniformes e até mesmo para a mistura de diversos tamanhos de partículas (MOTTA, 2009).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150u_f \mu (1-\varepsilon)^2}{\emptyset_s^2 D_p^2 \varepsilon^3} + \frac{1.75\rho u_0^2}{\emptyset_s D_p} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3}$$
(1)

Onde: u_f = velocidade superficial do fluido (vazão pela área da seção transversal do leito) $\frac{Q}{A}$

- ε = porosidade do leito
- ϕ = esfericidade das partículas que constituem o leito
- ρ = densidade da partícula
- L = altura do leito sólido
- ΔP = perda de carga do fluido ao atravessar o leito
- D_p = tamanho médio superficial da partícula

Na prática, os tipos de fluidização podem ocorrer de acordo com a geometria do leito fluidizado e, influenciam o comportamento das partículas durante o processo de fluidização (CREMASCO, 2012).

3.1.2 Classificação Geldart

Tão importante quanto identificar os regimes de fluidização é saber quais partículas estão sujeitas a este regime e quais são as características que elas conferem a cada uma destas etapas.

Geldart (1978) *apud* Cremasco (2012) apresenta quatro tipos de regimes fluidodinâmicos nas etapas de fluidização e propôs um diagrama que relaciona as características físicas da partícula (diâmetro) com a densidade das mesmas.

Essa classificação é aplicada em pós secos de densidade e tamanho médio de partícula conhecidos, quando submetidos às condições de fluidização gasosa. São classificados em quatro grupos diferentes, caracterizados pela diferença de densidade (ρ_p - ρ_f) e pelo tamanho da partícula (d_p) e, desta forma, a propriedade de um pó pode ser aplicada a outros de mesmo grupo (RIBEIRO, 2005).

- a) Grupo A partículas de 30 a 125 μm, com baixa densidade de partícula (< 1,4 g/cm³). São sólidos que fluidizam facilmente. Sob baixas velocidades do gás, sofrem fluidização particulada e sob altas velocidades de gás apresentam pequenas bolhas. Quando são fluidizados, o leito se expande antes do aparecimento das bolhas. Sob velocidades de gás superiores às velocidades de formação de bolhas, o leito passa a borbulhar e as bolhas coalescem à medida que se elevam atráves do leito.
- b) Grupo B partículas de 40 a 500 μm e densidade de 1,4 a 4 g/cm³. São sólidos que apresentam boa fluidização, com ocorrência de borbulhamento intenso. As bolhas se formam logo que a velocidade do gás excede a velocidade mínima de fluidização.
- c) Grupo C partículas coesivas e muito finas, com tamanhos inferiores a 30 μm. A fluidização é extremamente difícil para estes pós, devido às forças interpartículas serem maiores que a resultante da ação do gás. Em leitos de diâmetro pequeno, as partículas se elevam como blocos, enquanto que, em diâmetros grandes, formam caminhos preferenciais, não havendo a fluidização do sólido.

 d) Grupo D – são partículas grandes ou densas. Leitos fundos são fáceis de fluidizar. Comportam-se de maneira imprevisível, com grandes explosões de bolhas e canais preferenciais ou comportamento de jorro se a distribuição do gás for muito desigual.

Em resumo, pode-se dizer que no grupo A tem-se os pós finos, em que o aumento da velocidade permite a mudança da hidrodinâmica do leito desde o leito fixo e começa o limiar de fluidização, passando pelo leito borbulhante, leito turbulento, fluidização rápida e transporte pneumático das partículas. O grupo B, representado tipicamente pela areia, sofre a mesma transição do grupo A, exceto que há ocorrência de bolhas antes de atingir a velocidade mínima de fluidização. As partículas do grupo C, são sólidos de menor granulometria e maior coesão que formam canais no leito e depois seguem formando o leito em fase densa, sofrem fluidização rápida e finalmente transporte pneumático. Já os particulados do grupo D, por apresentarem granulometria maior, formam jatos ou jorros de ar (bolhas), transportando as partículas em leito lento. Com o aumento da velocidade, o leito destas partículas entra em fluidização rápida e finalmente transporte pneumático (VASCONCELOS, 2011).

Os quatro grupos apresentados por Geldart são descritos graficamente através da densidade e do diâmetro da partícula, como apresentado na figura 3.



Figura 3 - Classificação dos pós de acordo com Geldart.

A tabela 1 apresenta o resumo das principais características da classificação de Geldart (1973) relacionadas às propriedades de fluidização.

Fonte: CREMASCO, 2012.

Tabela 1 - Correlação da fluidização com a classificação Geldart (1973).

Grupo	Grupo C	Grupo A	Grupo B	Grupo D
Característica mais relevante	Fluidização difícil	Ideal para fluidização	Inicia o borbulhamento	Sólidos grossos
Sólidos típicos	Farinha de trigo e cimento	Pó de crosta e fluorita	Areia e alumina	Cascalho e grãos de café
Expansão do leito	Baixa, formação de canais	Alta	Moderada	Baixa
Taxa de aeração	Inicialmente rápida, em seguida exponencial	Lenta e linear	Rápida	Rápida
Propriedades das bolhas	Sem bolhas, formação de canais	As bolhas quebram e coalescem	Sem limites de tamanho	Sem limites de tamanho
Mistura de sólidos	Muito baixo	Alto	Moderado	Baixo

Fonte: VASCONCELOS, 2011
3.1.3 Velocidade Mínima de Fluidização

A velocidade superficial de mínima fluidização (u_{mf}) é essencial no projeto e operação dos leitos fluidizados (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Corresponde à velocidade em que ocorre a iminência de fluidização e, nesta condição há um equilíbrio entre a força de arraste promovida pelo fluxo ascendente do gás em movimento e o peso da partícula, sem promover o arraste da partícula, como esquematizado na figura 4 (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Figura 4 – Equilíbrio de forças em uma partícula quando atingida a velocidade mínima de fluidização.



Fonte: Autora...a "Adaptado de" VASCONCELOS; MESQUITA, 2011

Gupta et al (2009) citam que o comportamento hidrodinâmico dos leitos fluidizados depende das propriedades dos sólidos, do gás, fatores que afetam as forças interparticulares e a forma da partícula. Devido a isso, inúmeras correlações foram desenvolvidas para prever a velocidade mínima de fluidização (umf) sob diferentes condições operacionais.

Silva (2011) apresenta a determinação teórica da velocidade mínima de fluidização obtida a partir do ponto que a pressão total iguala-se ao peso por unidade de área da coluna de sólido, por um balanço de forças, tem-se:

Força resultante = peso - empuxo

$$\Delta P_{leito,mf} A_c = V_b (\rho_p - \rho_f) g \qquad (2)$$

Isolando-se a perda de carga do leito, obtém-se a equação (3):

$$\Delta P_{leito,mf} = \frac{V_b(1-\varepsilon)(\rho_p - \rho_f)g}{A_c}$$
(3)

Sendo:
$$V_b = A_c.L$$

$$\Delta P_{leito,mf} = L.(1 - \varepsilon)(\rho_p - \rho_f)g$$
(4)

Onde:

 $\begin{aligned} \Delta P_{leito, mf} &= perda \ de \ carga \ por \ escoamento \ do \ gás \ na \ velocidade \ mínima \ de \ fluidização \\ (N/m^2) \\ L &= altura \ do \ leito \ na \ velocidade \ mínima \ de \ fluidização \ (m) \\ \varepsilon &= porosidade \ do \ leito \ (adm) \\ \rho_p &= massa \ específica \ das \ partículas \ do \ leito \ (kg/m^3) \\ \rho_f &= massa \ específica \ do \ fluido \ (kg/m^3) \\ g &= aceleração \ da \ gravidade \ (m/s^2) \\ V_b &= volume \ do \ leito \ de \ partículas \ (m^3) \end{aligned}$

Vasconcelos (2011) expõe que quando é atingida a velocidade mínima de fluidização, o leito também atinge a porosidade mínima de fluidização (ϵ_{mf}) e a perda de carga do leito se estabiliza. Desta forma, a equação (4) ficará:

$$\Delta P_{leito,mf} = L (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_p - \rho_f) g \tag{5}$$

Onde:

 $\varepsilon_{mf} = porosidade do leito na condição de mínima fluidização (adimensional)$

Rearranjando a equação (5), obtemos a equação (6):

$$\frac{\Delta P_{leito,mf}}{L} = \mathcal{C} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_f)g \tag{6}$$

Seguindo as suposições de Wen e Yu (1966) apud Silva (2011), que considera que na condição de fluidização mínima, a queda de pressão do balanço de forças é dada pela equação de Ergun, tal como apresentada na equação (7):

$$\frac{\Delta P_{leito,mf}}{L} = 150 \frac{\left(1 - \varepsilon_{mf}\right)^3}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\mu_f u_{mf}}{\left(\phi_p d_p\right)^2} + 1,75 \frac{\left(1 - \varepsilon_{mf}\right)}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\rho_f u_{mf}^2}{\phi_p D_p} = A u_{mf} + B u_{mf}^2 \tag{7}$$

Onde:

 $\mu_f = viscosidade \ dinâmica \ do \ fluido \ (Pa.s),$ $u_{mf} = velocidade \ mínima \ de \ fluidização \ (m/s)$ $D_p = diâmetro \ médio \ das \ partículas \ obtida \ por \ peneiramento \ (m)$ $\phi_p = esfericidade \ da \ partícula \ (adm)$ $A = coeficiente \ do \ fluxo \ viscoso \ da \ equação \ de \ Ergun \ (Pa.s/m^2)$ $B = coeficiente \ do \ fluxo \ inercial \ da \ equação \ de \ Ergun \ (kg/m^4)$

Em seu trabalho, Motta (2009) cita que o modelo de Ergun é um modelo físico em que densidade e viscosidade de um fluido juntamente com o diâmetro da partícula e a queda de pressão depende somente da porosidade e da velocidade do fluxo de fluido, obtidos experimentalmente.

Desta forma, é possível determinar a velocidade mínima de fluidização, igualando-se a perda de carga na mínima fluidização do balanço de forças com a perda de carga da equação de Ergun, ou seja, igualando as equações (6) e (7), tem-se:

$$C = Au_{mf} + Bu_{mf}^2 \tag{8}$$

E, isolando a velocidade mínima de fluidização (u_{mf}), obtem-se a equação (9):

$$u_{mf} = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4BC}}{2B} \tag{9}$$

Onde A e B correspondem aos fatores de viscosidade e inercia da equação de Ergun e C é o peso por unidade de volume do leito de partículas.

Desprezando-se o componente inercial da fluidização, por estar relacionada a pequenas velocidades, é possível obter a equação para cálculo de velocidade mínima, dada pela equação (8).

$$u_{mf} = \frac{c}{A} = \frac{(\rho_p - \rho_f) g \varepsilon_{mf}^3 (\emptyset_p D_p)^2}{150(1 - \varepsilon_{mf})^2 \mu_f}$$
(10)

O cálculo da velocidade mínima de fluidização pela equação (10) requer o conhecimento da esfericidade da partícula (ϕ_p) e da porosidade do leito (ϵ_{mf}). É uma equação amplamente utilizada, não possui restrições ao número de Reynolds, tanto para leito de partículas uniformes quanto não uniformes e, até mesmo para misturas de diversos tamanhos de partículas (SILVA, 2011).

É possível obter experimentalmente a velocidade mínima de fluidização (u_{mf}) , utilizando o diagrama de perda de carga em função da velocidade do gás. A velocidade mínima de fluidização é dada pela intersecção da linha da queda de pressão em leito fixo com a linha reta horizontal obtida na fluidização completa (u_{fc}) , como observado na figura 5 (SILVA, 2011).





Fonte: SILVA, 2011

Gomide (1980) apresenta que durante o aumento da velocidade do fluido no interior do leito poroso, são encontrados diferentes comportamentos ao longo do processo de fluidização, como apresentado no gráfico da figura 6, do comportamento da queda de pressão em função da velocidade superficial do gás.



Figura 6 - Evolução da perda de carga em função da velocidade superficial do fluido.

Região I: leito fixo, região II expansão do leito, região III leito fluidizado, região IV transporte pneumático. Fonte: Gomide, 1980.

É possível notar a existência de quatro regiões bem distintas. Até o ponto A, o coeficiente angular da curva é praticamente 1,0, indicando escoamento laminar do fluido através do leito estático. De A até B o leito ainda está estático e o coeficiente angular é de aproximadamente 1,8, indicando regime turbulento. No ponto B, o leito é estático, mas a perda de carga do fluido é suficiente para equilibrar o peso do sólido, neste momento, o leito se expande ligeiramente. No trecho BC a operação é instável e em C, denominado ponto de fluidização, é atingida a velocidade mínima de fluidização e as partículas passam a ficar soltas, apesar de estarem bem próximas umas às outras. Em D, tem início o movimento desordenado das partículas no interior do leito, dando origem à muita turbulência. A partir do ponto E, a turbulência e a perda de carga aumentam, com o consequente arraste de partículas, tendo início o transporte pneumático. A região de fluidização da figura 6 pode variar em função do tipo de sólido que constitui as partículas e do tipo de fluido utilizado (GOMIDE, 1980).

Silva (2011) expõe que, se o leito for composto de um material, com forças interparticulares insignificantes, a perda de carga através do leito sofre uma queda de pressão bruta no momento que atinge a velocidade mínima de fluidização, como apresentado na curva

(a) da figura 7. Entretanto, quando for um material de superfície rugosa ou irregular, espera-se um comportamento tal como a curva (b) da figura 7. Diminuindo-se a velocidade do gás através do leito, o material deve comportar-se como as curvas (c) ou (d). Se ocorrer fluidização à velocidades superiores à velocidade de fluidização, a queda de pressão deve diminuir conforme o comportamento da curva (e).





Inúmeras correlações foram desenvolvidas para prever a velocidade mínima de fluidização (u_{mf}) sob diferentes condições operacionais. Industrialmente, ainda é determinada através de experimentos e análises teóricas, visto que muitas das correlações foram desenvolvidas em condições restritivas, se comparadas às condições operacionais dos leitos fluidizados aplicados industrialmente (SUBRAMANI; BALAIYYA; MIRANDA, 2007).

A tabela 2 apresenta algumas correlações listadas pela literatura para cálculo da velocidade mínima de fluidização em uma ampla faixa de número de Reynolds. A maioria das equações é apresentada simplificadamente, utilizando-se o número de Arquimedes (Ar) e de Reynolds na condição de mínima fluidização (Re_{mf}) (VASCONCELOS & MESQUITA, 2011; SILVA, 2011).

$$Ar = \frac{D_{p}^{3}\rho_{f}(\rho_{p}-\rho_{f})g}{\mu_{f}^{2}}$$
(11)

$$Re_{mf} = \frac{D_p u_{mf} \rho_f}{\mu_f} \tag{12}$$

Modelo	Autora	Equação	
1	Wen e Yu (1966)	$Re_{mf} = \sqrt{33,7^2 + 0,0408.Ar} - 33,7$	Equação (13)
2	Pillai e Raja Rao (1971)	$Re_{mf} = 0,00701.Ar$	Equação (14)
3	Abrahansen & Geldart (1980)	$u_{mf} = 9,0x10^{-4} \cdot \left(\frac{d_p^{1,8}(\rho_p - \rho_f)g^{0,934}}{\mu_f^{0,87} \cdot \rho_f^{0,066}}\right)$	Equação (15)
4	Tannous (1993)	$Re_{mf} = 0.03.Ar^{0.63}$	Equação (16)
5	Barbosa et al. (1995)	$Re_{mf} = 0,0019.Ar^{0,87}$	Equação (17)
6	Coltter e Rivas (2004)	$u_{mf} = 3,7774x10^{-5} \cdot \left(\left(\frac{d_p^2(\rho_p - \rho_f)g}{\mu_f} \right) \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right)^{1,23} \right)^{0,6035}$	Equação (18)
7	Delebarre (2004)	$Ar = 29400. \varepsilon_{mf}^{3}. (1 - \varepsilon_{mf}). Re_{mf} + 24.5 Re_{mf}^{2}$	Equação (19)
8	Subramani, Balaiyya e Miranda (2007)	$Re_{mf} = \frac{Ar}{1650}$	Equação (20)

Tabela 2 - Principais correlações para a determinação da velocidade mínima de fluidização.

Fonte: SILVA, 2011

Gauthier, Zerguerras e Flamant (1999) correlacionam a distribuição do tamanho de partículas na determinação da velocidade mínima de fluidização. Apresentam que muitas correlações para a determinação de velocidade mínima de fluidização são realizadas considerando distribuições estreitas, porém para aplicação na indústria, as distribuições mais abundantes são as mais esparsas por questões econômicas e práticas. Estudaram cinco diferentes tipos de pós, classificados nos grupos B e D de Geldart, de diferentes distribuições de tamanho. Demonstraram que a correlação de Wen e Yu (1966) apud Gauthier, Zerguerras e Flamant (1999) é satisfatória para diâmetros grandes e é baseada na esfericidade e porosidade das partículas.

Coltter e Rivas (2004) desenvolveram uma correlação que independe da porosidade do leito e da esfericidade das partículas, que são difíceis de serem medidas experimentalmente. Pode ser utilizada para uma grande quantidade de sistemas sólidos particulados (COLTTERS; RIVAS, 2004).

Subramani, Balaiyya e Miranda (2007) apresentam em seu trabalho a influência da temperatura em sólidos particulados do grupo B de Geldart, porque muitas das correlações desenvolvidas foram obtidas nas condições ambientes. Realizaram experimentos para a determinação da porosidade e a velocidade na condição de mínima fluidização e compararam com as correlações já desenvolvidas. Desenvolveram uma correlação para o grupo B de Geldart sob influência da temperatura com erros máximos de 11,5% que mais se aproximam dos valores experimentais.

Gupta et al (2009) descreveram a determinação de velocidades mínimas de fluidização para materiais finos e sugeriram uma modificação na equação de Coltter e Rivas (2004), considerando os efeitos do tamanho da partícula e sua densidade. Esses Autoraes perceberam a necessidade de considerar as interações entre as partículas nas forças coesivas. Notaram também que, em pós finos, quando há um aumento no tamanho e na densidade da partícula, há um aumento na velocidade mínima de fluidização do material.

Jiliang, Xiaoping e Daoyin (2012) apresentam que a velocidade mínima de fluidização é fortemente influenciada pela temperatura e pela distribuição de tamanho de partículas. Existem diversos problemas encontrados quanto a isso, tal como a variação da velocidade mínima de fluidização para partículas com distribuição de tamanho de partículas larga para simular a aplicação industrial; variação da velocidade de fluidização mínima em temperaturas intermediárias (< 700°C), considerando a mesma partícula, qual o diâmetro que afetaria a determinação da velocidade mínima de fluidização. O experimento desses Autoraes verificou a dependência da velocidade mínima de fluidização em temperaturas de 30 – 600°C para quatro tipos de distribuição de tamanho de partícula: estreita, Gaussiana, binária e uniforme.

3.2 Sólidos Particulados

Os sistemas sólidos particulados consistem essencialmente de diversas partículas ou grãos de diferentes tamanhos, que se arranjam formando um conjunto. A natureza desses materiais, a maneira como se comportam em determinadas circunstâncias dependem das características da partícula isolada, como por exemplo de sua forma, tamanho, densidade e porosidade (WOODCOK; MASON, 1987).

O conhecimento da natureza das partículas e de suas características é essencial para o dimensionamento e projeto de equipamentos para seu manuseio ou armazenamento, uma vez que esses sistemas são regidos primordialmente pela interação partícula-partícula, partícula-fluido e a interação entre as fases (CREMASCO, 2012).

Campos (2012) apresenta uma classificação dos sistemas sólidos particulados de acordo com o tamanho de partícula, como apresentada na tabela 3.

Termo	Faixa de tamanho			
Sólido grosseiro	5-100 mm			
Sólido granular	0,3 – 5 mm			
Pó grosseiro	$100-300\ \mu m$			
Pó fino	10 -100 μm			
Pó superfino	$1-10\ \mu m$			
Pó ultrafino	< 1 µm			

Tabela 3 - Classificação dos sólidos particulados quanto ao tamanho das partículas.

Fonte: Campo (2012).

3.3 Características das partículas e do leito de partículas

As características físicas e morfológicas das partículas afetam desde fenômenos moleculares (como a difusão mássica) que ocorrem no interior ou entre as partículas, até os fenômenos de transferência de massa (CREMASCO, 2012). A caracterização completa de um

material particulado pode ser realizada de duas maneiras: considerando-se a partícula isolada ou através do comportamento do conjunto de partículas, denominadas propriedades bulk (CAMPOS, 2012).

McGlynchey (2008) apresenta algumas das propriedades características das partículas isoladas o tamanho da partícula, forma, rugosidade e densidade, esquematizados na figura 8.



Figura 8 – Propriedades que caracterizam a partícula isoladamente.

Fonte: Autora

As propriedades do conjunto de partículas (bulk), apresentadas na figura 9, são adesão e coesão, teor de umidade, escoabilidade e as interações interparticulares que podem ser determinadas a partir de testes em laboratório ou em escala piloto, sob condições conhecidas de processos (McGLYNCHEY, 2008).



Figura 9 - Propriedades do conjunto de partículas que influenciam no escoamento das partículas

Fonte: Autora

As características das partículas isoladas influenciam diretamente o comportamento do conjunto de partículas (*bulk*). A partir do conhecimento das propriedades do conjunto de partículas, os possíveis problemas de manuseio e escoabilidade dos sólidos particulados são amenizados (McGLYNCHEY, 2008).

Os maiores problemas confrontados pelas indústrias químicas que trabalham com sólidos particulados são devidos à ausência de informação que correlaciona o comportamento dos sólidos particulados em laboratório com equipamento de grande escala (McGLYNCHEY, 2008).

3.3.1 Tamanho e distribuição de tamanho das partículas

O tamanho da partícula e a distribuição do tamanho de partícula são pré-requisitos fundamentais para muitas operações de produção e processamento envolvendo sistemas de materiais particulado e, pode influenciar significativamente várias etapas de produção como transporte, compactação, sinterização e a resistência mecânica dos produtos acabados. A determinação da distribuição ou do tamanho das partículas é uma etapa crítica para todo processo que envolva sólidos particulados (PAPINI, 2003).

Devido à existência de irregularidades nas formas das partículas, quando submetidas a um processo de redução de tamanho, raramente apresentam formato esférico ou um único formato e, fala-se então em distribuição de tamanho de partículas, descrevendo as partículas por diversos tamanhos (RIVAS, 2012).

Rhodes (2008) cita que, quando o material é irregular, não há uma única dimensão física que descreva o tamanho da partícula. Qual dimensão será utilizada, depende de qual a propriedade é capaz de ser medida e também da aplicação que o sólido particulado será empregado.

O tamanho da partícula pode ser obtido por diversos meios: diretamente com o auxílio de um microscópio, por peneiramento, decantação, etc.

O método mais comum de determinação do tamanho das partículas é o peneiramento. Neste dispositivo, a fase sólida é colocada no topo de uma série de peneiras. Cada peneira tem aberturas menores que a anterior. Quando as peneiras são vibradas, as partículas passam através delas até que seja atingida uma peneira que tenha abertura muito pequena para as partículas passarem. O tamanho das partículas coletadas em qualquer peneira é expresso como um comprimento médio apropriado entre as aberturas da peneira imediatamente anterior e a abertura da peneira coletora (FOUST et al, 2008).

A tabela 4 apresenta a correlação entre o grau MESH com a abertura da peneira (em mm).

Tabela 4 - Tabela grai	nulometrica.	
Peneira (mesh)	Abertura (mm)	230
80	0,177	270
100	0,149	325
120	0,125	400
140	0,105	500
170	0,088	635
200	0.074	

Fonte: ANVISA, 2010.

.

1 1.

Um outro método, via microscopia, consiste em colocar uma amostra do material na lâmina de um microscópio e, cada partícula dentro do campo é medida por meio de um micrômetro. Com as partículas irregulares, pode-se usar uma grande diversidade de dimensões. Esse método é laboratorial, mas os resultados obtidos independem da perfeição das peneiras, da incerteza associada de peneiras que guardam entre si diferenças finitas nas respectivas aberturas ou de teorias sobre o movimento da partícula em um fluido (FOUST et al, 2008).

O tamanho de partícula, quando obtido por um microscópio é determinado observando a projeção da forma das partículas. Muitos diâmetros utilizados em microscopia são estatísticos e estão resumidos na figura 10.

O diâmetro de Martin corresponde à média do comprimento de duas cordas medidas em duas direções da projeção da partícula, o diâmetro de Feret corresponde à média da distância entre duas linhas paralelas tangentes à projeção da partícula e o diâmetro da área projetada corresponde ao diâmetro de um círculo com a mesma área bidimensional da partícula (RHODES, 2008; PAPINI, 2003).







Fonte: RHODES, 2008; CAETANO, 2014

Outro método bastante empregado e ilustrado na figura 11 é a determinação da distribuição do tamanho de partículas por espalhamento (ou difração) de luz. Nessa técnica, as partículas são dispersas em um fluido em movimento. As partículas de pó causam descontinuidade no fluxo do fluido, que são detectadas por uma luz incidente, e correlacionadas com o tamanho da partícula. Ao atingir uma quantidade de partículas, a luz incidente sofre uma interação através de quatro diferentes fenômenos (difração, refração, reflexão e absorção) formando um invólucro tridimensional de luz. O formato e o tamanho deste invólucro são afetados pelo índice de refração da partícula. Detectores posicionados medem a intensidade e o ângulo de luz espalhada. O sinal dos detectores é convertido para a distribuição do tamanho das partículas. Para a aplicação deste método, é necessário o conhecimento prévio do índice de refração do material e do meio em que ele se encontra (PAPINI, 2003).



Figura 11 - Interação de um raio de luz com uma partícula esférica, (a) ângulos difratados determinados pelo tamanho da partícula e (b) padrão de difração.

Fonte: PAPINI, 2003.

A decantação e a elutriação são métodos indiretos que se baseiam na medida da velocidade de decantação da partícula em um fluido (GOMIDE, 1980). O resultado obtido é o de que a velocidade de sedimentação é uma função das densidades das partículas e da área projetada da partícula (FOUST et al, 2008).

Uma população de partículas é descrita pela distribuição do tamanho de partículas. Independente da técnica utilizada, a distribuição estatística é expressa em função da frequência de partículas que detém determinado diâmetro ou pela fração cumulativa de partículas que possuem diâmetro menor e maior que um valor médio de partícula em um intervalo de 0 a 100%. Pode ser expressa em função da massa (peneiramento), área projetada (difração a laser) e número de partículas (análise de imagens) (CREMASCO, 2012).

A curva de frequência de distribuição indica o intervalo de variação dos diâmetros bem como as dimensões predominantes na amostra. Um pico acentuado na curva caracteriza a predominância de determinado tamanho de partícula. A existência de dois picos indica que a amostra é a mistura de dois materiais de origens diferentes. É mais difícil visualizar a distribuição dos diâmetros na curva acumulada do que com as curvas de frequência de distribuição como observado ao comparar os gráficos das figuras 12 e 13 (GOMIDE, 1980).





Fonte: CAETANO, 2014

Figura 13 - Curva de distribuição acumulada



Fonte: CAETANO, 2014

3.3.1.1 Segurança no manuseio de sólidos particulados

O diâmetro dos sólidos particulados é utilizado para definir se um material irá ficar suspenso no meio ambiente ou não. Partículas com diâmetro de 0,002 a 100 µm tendem a se manter em suspensão. Enquanto partículas superiores a 100 µm não permanecem por muito tempo em suspensão e tendem a sedimentar, exceto sob condições de influência de ventos (FURIERI; CASTILHO, 2009).

A figura 14 apresenta uma relação entre os materiais típicos e os diâmetros de material em suspensão. Nesta figura é também proposto equipamentos para limpeza do ar (FURIERI; CASTILHO, 2009).



Figura 14 - Faixas de diâmetros para determinação se as partículas ficarão em suspensão.

Fonte: FURIERI; CASTILHO, 2009.

De acordo com o tamanho das partículas, sua composição, concentração, período de exposição os sólidos particulados podem representar riscos à saude humana, tais como problemas respiratórios (FURIERI; CASTILHO, 2009).

Em ambientes industriais, em que há geração de poluentes, os trabalhadores permanecem em contato com os poluentes por um grande período diário e se expõem, muitas vezes, por anos. Dessa forma, a qualidade do ar ambiente e a concentração dos poluentes no meio deve ser levado em conta, porque podem causar problemas crônicos à saude. Quando o controle das emissões não é possível, recorrem-se a equipamentos de proteção individual (máscaras e óculos) (FURIERI; CASTILHO, 2009).

Para controle em ambiente industrial, sistema de ventilação, juntamente com sistemas de controle de explosividade, inflamabilidade do meio devem ser adequados para cada processo industrial. Equipamentos como ciclones, precipitadores eletrostáticos, lavadores de gás e filtros de manga podem ser utilizados para evitar riscos de explosões ou danos à saude dos operadores industriais (FURIERI; CASTILHO, 2009).

Nos filtros de mangas, o ar carregado de partículas atravessa um tecido poroso, que retém as partículas, passando ar limpo. O material particulado deve ser periodicamente removido e limpo através de vibração mecânica do tecido. Nos precipitadores eletrostáticos, aplica-se uma força eletrostática para separar partícula do gás. O ar e as partículas passam entre as placas onde se estabelece um campo eletrostático. As partículas recebem carga elétrica por uma descarga induzida e são atraídas e coletadas por uma placa de carga oposta, enquanto ar limpo passa pelo equipamento (FURIERI; CASTILHO, 2009).

Para a escolha do equipamento, deve-se considerar o tipo de material particulado e o gás, bem como os custos de eficiência de cada coletor para um dado problema (FURIERI; CASTILHO, 2009).

Para evitar o acúmulo de energia eletrostático em meios que contém sólidos particulados, é necessário o aterramento dos equipamentos e sistemas, evitando-se os riscos de explosões.

3.3.2 Forma das partículas

A forma das partículas é fundamental nos sistemas particulados e tem forte influência na porosidade e na velocidade mínima de fluidização, bem como na superfície de contato das partículas (CREMASCO, 2012).

Pode ser determinada por análise de imagens e comparada com padrões, cujas diferentes formas são apresentadas na figura 15. Existem algumas definições baseadas nas razões entre os

eixos ortogonais, no volume do sólido, na área do sólido e na área superficial (CREMASCO, 2012).



Figura 15 - Formas possíveis de partículas.

Fonte: Papini 2003.

A microscopia eletrônica de varredura é uma boa metodologia para verificar a forma das partículas.

A esfericidade (ϕ_P) é uma das maneiras mais utilizadas para descrever a forma de uma partícula individual, por ser uma propriedade independente de seu tamanho e com influência direta nas condições de transporte das partículas.

A esfericidade é definida pela equação (22) e é dada como a razão entre a área superficial de uma esfera de mesmo volume da partícula pela área superficial da partícula. Para partículas esféricas é igual a 1, para as demais formas, é inferior a 1 (CREMASCO, 2012).

Silva (2011) relata que é difícil de se obter a esfericidade para partículas irregulares, devido à dificuldade de determinação da área superficial. Uma alternativa para medição é a queda de pressão em um leito, juntamente com o uso de equações empíricas como a equação de Ergun. Porém relata que o uso deste método é empírico.

3.3.3 Rugosidade ou textura superficial da partícula

A textura superficial da partícula ou rugosidade está associada às irregularidades presentes nas superficies dos sólidos particulados e são inerentes a eles e estão esquematizadas na figura 16.



Fonte: Dierich e Nikrityuk 2013.

A rugosidade está relacionada às irregularidades presentes nas superfícies dos sólidos grau de rugosidade das partículas e influencia as forças de atrito e as interações partículapartícula. Quanto mais rugosa forem as partículas, maior a força de atrito, pior será a transferência de calor, enquanto que, quanto mais lisas as partículas, menor o atrito e maior a transferência de calor. A rugosidade das partículas pode ser observada por microscopia eletrônica (RIVAS, 2012).

Dierich e Nikrityuk (2013) reportam que o efeito exato da rugosidade na fluidez dos sólidos particulados não é completamente compreendido, mas diversos Autoraes notaram grande influência no regime de fluidização em Reynolds turbulento, afetando diretamente o coeficiente de transferência de calor e o número de Reynolds.

3.3.4 Densidade da partícula

A densidade de uma partícula (ρ_p) ou densidade real da partícula é definida como a massa total dividida pelo volume total, equivalente à massa específica e é apresentada pela equação (23). É uma propriedade importante que permite determinar outras propriedades da partícula tal como a porosidade (RIVAS, 2012).

$$\rho_{bulk} = \frac{m_{solidos}}{V_{total}} \tag{23}$$

Quando se trabalha com materiais de baixa granulometria, de difícil medição do volume, utiliza-se a técnica de determinação da densidade real por picnometria (CREMASCO, 2012).

A picnometria permite a determinação da densidade real da partícula pelo deslocamento de líquido ou gás por um picnômetro (RIVAS, 2012).

O picnômetro a gás, representado pela figura 17, determina o volume verdadeiro dos sólidos por variação de pressão do gás, em uma câmara de volume conhecido. Geralmente, o gás utilizado é o hélio, por ser leve, inerte e monoatômico, capaz de acessar poros e microestruturas não acessíveis para outros gases. Existem duas câmaras conectadas por uma válvula de expansão. Uma das câmaras permanece vazia enquanto a outra é a que recebe a amostra a ser medida. O picnômetro funciona por variação de pressão das câmaras quando a válvula que as conecta é aberta (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2010).



Figura 17 - Esquema de funcionamento de um picnômetro a gás.

Fonte: OLIVEIRA JUNIOR et al., 2010

3.3.5 Densidade do conjunto de partículas

A densidade do conjunto de partículas *(bulk)* pode ser determinada em termos de densidade real da partícula (ρ_p), densidade do fluido nos espaços vazios (ρ_f) e da porosidade do leito, conforme apresentado na equação (24):

$$\rho_{bulk} = (1 - \varepsilon)\rho_p + \varepsilon\rho_f \tag{24}$$

Para sólidos secos, o ar preenche os espaços vazios e, portanto a densidade do fluido nos espaços vazios pode ser desprezada. Reescrevendo a equação (24), obtém-se a equação (25) para a densidade do conjunto de partículas.

$$\rho_{bulk} = (\rho_p)(1-\varepsilon) \tag{25}$$

Isolando a porosidade do leito, chegamos à equação (26) a seguir:

$$\varepsilon = \frac{\rho_p - \rho_{bulk}}{\rho_p} \tag{26}$$

Campos (2012), cita que a condição de empacotamento do material é relevante, pois há duas formas de medição da densidade do leito (ρ_{bulk}), quando o material é colocado no recipiente tem-se a densidade do leito de partículas considerada "aerada". Se for compactado, forçando-se a acomodação das partículas é obtida a densidade do leito "compactada".

A relação entre as três medidas de densidade (real, aerada e compactada) permitirá calcular a porosidade e a compressibilidade dos meios granulares, pela equações (27) e (28):

$$\rho_{aerada} = \rho_{real}(1-\varepsilon) \tag{27}$$

 $\rho_{bulk} = \rho_{real} \tag{28}$

3.3.6 Porosidade intra e interparticular

A porosidade intraparticular é a fração de espaços vazios de uma partícula. Estes espaços vazios são formados porque as partículas contêm rachaduras, falhas, buracos e poros fechados que formam espaços vazios no interior das partículas (CREMASCO, 2012).

Cresmasco (2012) define que qualquer material que apresenta uma passagem contínua de um lado a outro, que permite a passagem por completo do fluido pelo material, é dito poroso. Como apresentado na figura 18, os poros podem ser fechados, fechados em apenas uma extremidade (poro obscuro) e abertos ou vazios. Os poros fechados e fechados em apenas algum ponto não favorecem o escoamento do fluido pelo material.

Figura 18 - Classificação dos poros intraparticulares.



Fonte: Cremasco, 2012.

Os poros fechados não contribuem para os fenômenos de transporte (matéria/energia). Se os poros abertos ou com extremidade fechada (poro obscuro) estiverem entre partículas, são denominados poros interparticulares. Embora os poros possam ser passagens diretas, sofrem torções em suas estruturas e tornam-se passagens sinuosas com bifurcações e interligações. O volume dos espaços entre as partículas de um leito são denominados volume de vazios. A porosidade interparticular corresponde à relação entre esse volume de espaços vazios e o volume total da amostra, que também é uma propriedade do leito. Pode ser calculada utilizando a equação (29).

$$\varepsilon = \frac{V_{vazios}}{V_{s\delta lidos} + V_{vazios}}$$
(29)

Em que V_{vazios} = volume de vazios e $V_{sólidos}$ = volume de sólidos.

3.3.7 Teor de umidade nas partículas

Campos (2012) apresenta uma definição para umidade como o teor de água correspondente à pressão de vapor da água no meio ambiente e material. Esta é uma propriedade que o leito de partículas pode ser exposto durante o armazenamento ou o manuseio.

O efeito da umidade na escoabilidade dos pós depende da quantidade de água e de sua distribuição, podendo interagir somente nas superfícies dos sólidos (adsorção) ou penetrando nas partículas (absorção). A quantidade de água é uma função da afinidade da superfície do material com as partículas de água, temperatura, umidade relativa e, em caso de adsorção, da superfície do material exposto (SANDLER et al., 2010).

Schulze (2008) afirma que a quantidade de água afeta diretamente a porosidade do leito e a densidade do leito e, na maioria das vezes, quanto maior a umidade, menor a escoabilidade dos sólidos particulados, apresentado na figura 19.



Figura 19 - Influência do teor de umidade na escoabilidade dos sólidos particulados.

Fonte: Autora "Adaptado de" Schulze, 2008

3.3.8 Interações físicas das partículas

Condotta (2005) escreve que as principais interações interparticulares são: forças de van der Waals, pontes líquidas, pontes sólidas e forças eletrostáticas, que influenciam a escoabiliade e a fluidez dos sólidos particulados.

3.3.8.1 Forças de van der Waals

As forças de van der Waals existem em todos os sólidos e correspondem à atração molecular e são mais fracas do que as ligações primárias (covalentes, iônicas e metálicas).

Hamacker (1937) *apud* Campos (2012) propôs uma equação para estimar as forças de van der Waals entre duas partículas de diâmetro d_1 e d_2 , separadas por uma distância a, descrita pela equação (30):

$$F_{vw} = \frac{H(d_1d_2)}{12 a^2(d_1+d_2)} \tag{30}$$

Onde H é denominado constante de Hamacker, que depende da característica do material e varia de 10^{-20} a 10^{-19} Joules.

3.3.8.2 Pontes líquidas

Líquido presente nos interstícios de um conjunto de partículas pode ser absorvido, dissolver as partículas ou causar reações químicas indesejáveis, com consequente formação de subprodutos.

A presença de uma camada de líquido na superfície aumenta a coesão devido à ação do menisco entre as partículas, esquematizado na figura 20. Quanto mais viscoso o líquido, mais fortes as forças coesivas (CONDOTTA, 2005).



Figura 20 - Menisco líquido entre duas partículas esféricas idênticas.

Fonte: Condotta, 2005.

3.3.8.3 Pontes sólidas

As pontes sólidas são as forças de interação mais fortes e ocorrem por transferência de massa, por processo de fusão-recristalização ou quando a partícula estiver próxima a seu ponto de fusão ou ainda por dissolução na umidade e recristalização (LEWIS et al, 2015).

3.3.8.4 Forças eletrostáticas

As forças eletrostáticas entre partículas ocorrem quando elas acumulam cargas elétricas. Podem ser tanto atrativas ou repulsivas e podem ser provenientes do atrito entre as partículas, devido à transferência de elétron entre os sólidos particulados (CAMPOS, 2012).

Essa força não requer contato, podendo agir a longas distâncias comparada com as demais forças interparticulares (LI, 2005).

3.3.9 Compressibilidade

O termo compressibilidade é definido como a habilidade do pó em reduzir seu volume sob aplicação de pressão e o termo compactar é definido como a habilidade do pó em ter seu volume reduzido por ação de uma força, normalmente corresponde ao seu próprio peso (SCHULTZE, 2006).

A compactação dos pós pode ser intencional quando se produzem aglomerados ou nãointencional, no caso de quebra no manuseio ou armazenamento (RIVAS, 2012).

A compressibilidade influi no escoamento dos sólidos particulados por causar uma aproximação das partículas e aumento das interações físicas interparticulares (RIVAS, 2012).

Um dos métodos que indicam a fluidez dos sólidos particulados é o índice de Hausner, definido como a razão da densidade do leito compactada ($\rho_{b,c}$) e a densidade do leito aerada (ρ_b), apresentado na equação (31).

$$Hausner = \frac{\rho_{b,c}}{\rho_b} \tag{31}$$

Hausner (1967) *apud* Campos (2012) após a realização de testes de consolidação mediu as densidades do leito compactado de diferentes pós com granulometrias distintas e observou que, quanto maior o desvio da partícula do formato esférico, maior a razão entre as densidades. Baseado nesse critério, Hayes (1987) *apud* Rivas (2012) classificou os pós de acordo com o índice de Hausner, permitindo a caracterização de escoabilidade dos sólidos particulados. A classificação está apresentada na tabela 5.

Tabela 5 - Classificação de Hausner quanto à capacidade de escoamento dos sólidos particulados.

Indice de Hausner	Descrição	
1,0 – 1,1	Fácil escoamento, livre	
1,1 – 1,25	Média capacidade de escoar	
1,25 – 1,40	Dificil de escoar	
>1,4	Muito difícil de escoar, coesivo	
E (D' 0010		

Fonte: Rivas, 2012

Em muitos casos na indústria, pós finos são adicionados ao conjunto de partículas para melhorar as propriedades de escoabilidade dos sólidos particulados, as partículas finas saem primeiramente evitando que as partículas de tamanhos maiores grudem umas às outras (RIVAS, 2012).

3.3.10 Coesão e adesão entre partículas

Woodcook e Mason (1987) apresentam o termo escoabilidade como um parâmetro qualitativo para descrever se o sistema sólido particulado é de fácil fluidez ou coeso. Definem coesão como a resistência das partículas do leito a cisalharem sob a aplicação da pressão normal. No entanto, quando o sólido particulado estiver em contato com uma superfície limitada, o termo adesão é mais importante e descreve a tendência das partículas sólidas a grudarem em uma superfície, tal como uma parede de uma tremonha ou nas laterais e topos de um canal.

A coesão entre as partículas pode ter como origem as forças capilares, forças de van der Waals, forças eletrostáticas e possuem efeito significativo nas propriedades granulométricas do material (LI, 2005).

Quando as forças de atração ou "coesão" das partículas forem baixas, o sólido particulado é conhecido como "livre", de fácil fluidez influenciados preferencialmente pela força gravitacional, como exemplo de sólidos com boa escoabilidade tem-se a areia seca e "açúcar cristal". Quando as forças coesivas forem altas, causadas pelo teor de umidade ou pelas forças eletrostáticas, o sólido particulado é dito "coesivo". Esta característica de pós coesivos é expressiva em pós muito finos e possuem a tendência a se aglomerar e escoam em grumos. Como exemplo de pós coesivos tem-se farinha de trigo e açúcar em pó (WOODCOOK; MASON, 1987).

A característica de um pó ser coesivo ou de fácil fluidez é relativa e é dependende da aplicação. Utiliza-se o método de Jenike quando os pós são submetidos ao escoamento após serem armazenados e, quando o pó é submetido às condições de fluidização sob ar, a classificação utilizada é a de Geldart (RIVAS, 2012).

3.3.11 Função Fluxo – Teste de cisalhamento

Jenike (1964) *apud* Milani (1993) foi o pioneiro na descrição do comportamento dos sólidos sob condições de armazenamento e desenvolveu um aparelho de cisalhamento direto para determinação das condições de retomada de fluxo de materiais após armazenamento, denominado "Jenike Shear Cell", recomendado pelas normas internacionais.

O teste de cisalhamento de Jenike permite determinar os esforços desenvolvidos pelo material após ser armazenado e que devem ser superados pela força da gravidade, para que o escoamento reinicie (BATISTA, 2009).

A figura 21 apresenta o esquema da Célula de Jenike, formada por uma base, por um anel de cisalhamento colocado em cima da base e uma tampa. O material a ser avaliado é colocado na base e no anel de cisalhamento. Sobre a tampa é aplicada a força Normal (σ), sob ação de pesos. Em seguida, uma força de cisalhamento é gradativamente imposta ao anel da célula, mantendo-se a velocidade fixa. Durante o teste de cisalhamento, ou seja, quando a célula é movimentada à velocidade constante, uma superfície de cisalhamento ou ruptura é criado no material. Esta superfície tem a mesma área da célula e, portanto as forças aplicadas podem ser convertidas a tensões.



Figura 21 - Representação da célula de Jenike.

Podem-se obter três tipos de curvas de tensão de cisalhamento durante a etapa de consolidação da amostra que precede o teste propriamente dito e estão esquematizadas na figura 22.

Figura 22 – Curvas da etapa de consolidação (pré-shear) de teste de cisalhamento para amostras que foram previamente (1) sobreconsolidadas, (2) consolidada criticamente e (3) subconsolidada.



Fonte: BATISTA, 2009

Se o produto sob teste for submetido a um grau de consolidação insuficiente, a força de cisalhamento aumenta continuamente durante o cisalhamento (curva 3) e a densidade na zona de cisalhamento aumenta. Se o grau de consolidação for excessivo, a força de cisalhamento aumenta inicialmente, passando a um máximo e depois diminui (curva 1), portanto a amostra estará sobreconsolidada e a densidade diminui logo que passa pelo máximo. Existe um grau de compactação crítico quando a força de cisalhamento cresce, atinge um certo valor e permanece constante durante o resto do cisalhamento (curva 2) (MILANI, 1993).

O teste de cisalhamento de Jenike é constituído de duas partes. A primeira é a preparação da amostra para obtenção da consolidação crítica, obtendo-se um fluxo de estado estável na célula de cisalhamento, chamado de pré-shear (ou consolidação) e atinge-se o fluxo estável (τ_c , σ_c) (PALMA, 2005).

A segunda etapa consiste no teste de cisalhamento em si, reduzindo-se a tensão normal a um valor menor que o estado de pré-shear (σ_c) e, neste momento há um aumento da força de cisalhamento, alcançando um valor máximo que representa a tensão de cisalhamento. Quando há ruptura, a tensão de cisalhamento diminui. Este processo é chamado de cisalhamento e o gráfico do teste está representado na figura 23 (CONDOTTA, 2005).

Figura 23 - Gráfico da determinação do lugar geométrico.



Fonte: CONDOTTA, 2005

A partir do gráfico de tensão normal versus a tensão de cisalhamento é possível determinar as funções de fluxo como lugar geométrico do deslizamento, (apresentado na figura 24).



Figura 24 - Gráfico de determinação do ângulo de atrito.

Fonte: PALMA, 2005

A tensão de consolidação σ_1 é igual à tensão principal maior do círculo de Mohr, tangencial ao lugar geométrico do deslizamento. O círculo de Mohr representa o círculo de tensões na amostra no final do procedimento de consolidação (tensões no final do fluxo estável). A tensão inconfinada σ_c resulta do círculo de tensões que é tangente ao lugar geométrico de deslizamento e que passa através da origem (tensão principal menor $\sigma_2 = 0$) (PALMA, 2005).

O aparelho de Jenike é versátil e permite a determinação da função fluxo, ângulo de atrito interno, ângulo de atrito com a parede e o efeito da consolidação (BATISTA, 2009).

A linha que tangencia os círculos é chamada de lugar geométrico de deslizamento e o ângulo que forma com o eixo σ é chamado de ângulo de atrito interno ϕ_i . Já a linha tangente ao maior círculo de Mohr e, passando pela origem, é chamada de lugar geométrico do deslizamento e o ângulo que forma com o eixo σ é chamado de ângulo efetivo de atrito interno ϕ_e . Para produtos de fluxo livre, o lugar geométrico do deslizamento passa pela origem e tem-se $\phi_i = \phi_e$.

Palma (2005) afirma que alguns produtos consolidam com o tempo quando armazenados em repouso. Assim, torna-se necessária a determinação da função fluxo (FF).

A função fluxo quantifica a força de coesão do pó consolidado que deve ser superada para que aconteça o escoamento do material pela ação da gravidade ou de outras forças (CONDOTTA, 2005). Em projetos de sólidos particulados que serão armazenados, a função fluxo deve ser conhecida para evitar os problemas de escoamento.

A função de fluxo pode ser obtida graficamente como representada pela figura 25.



Figura 25 - Classificação dos pós de acordo com o teste de Jenike.



A partir da relação entre a tensão de consolidação σ_1 pela tensão inconfinada de ruptura σ_c , obtém-se a função de fluxo, apresentada equação (32) e representa a capacidade do produto armazenado a fluir.

$$FF = \frac{\sigma_1}{\sigma_c}$$
Equação (32)

O índice de fluidez é classificado de acordo com a tabela 6:

Classificação	Função Fluxo	Descrição
Ι	FF < 2	Produtos muito coesivos, não fluem
П	2 < FF < 4	Produtos coesivos
III	4 < FF < 10	Produto de fácil fluidez
IV	FF > 10	Produto de fluxo livre

Tabela 6 - Classificação segundo Jenike para a coesão e fluidez dos sólidos particulados

Fonte: PALMA, 2005

Quanto maior a função fluxo, melhor é o escoamento do fluido armazenado. Cada sólido particulado armazenado tem a sua função fluxo e, observa-se, no geral que pós finos tem a capacidade de fluir prejudicada com o teor de umidade e o tempo de armazenamento, podendo ocorrer obstruções durante o escoamento (PALMA, 2005).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, são apresentados os materiais e a metodologia utilizada em cada teste realizado neste trabalho.

4.1 Materiais

Os materiais particulados utilizados neste trabalho, em sua maioria, foram doados pela empresa Imerys/Itatex e consistem em onze diferentes tipos de sólidos particulados, com diferentes tratamentos superficiais. Três pós possuíam como principal componente o hidróxido de alumínio (Hidraltex[®] 635 ES, Hidraltex[®] 635 e Itasil[®] 2250), três pós eram constituídos de hidróxido de magnésio (Itamag[®] 325, Itamag[®] ES e Itamag[®] 1100), dois pós eram aluminas (calcinada e fluoretada) disponibilizados pelo laboratório de Materiais Cerâmicos do Centro Universitário FEI, três outros pós eram quartzo, calcário e caulim disponibilizados pelo laboratório de Engenharia Civil do Centro Universitário FEI. A aplicação e descrição de cada tipo de pó utilizado está apresentada na tabela 7.

A malha de 325 mesh possui abertura de 44 μ m e a malha de 635 mesh possui abertura de 20 μ m. Para os produtos fornecidos pela empresa Itatex/Imerys, o tamanho da partícula correspondente à malha 635 mesh é equivalente aos materiais que passaram pela peneira 635 (< 20 μ m), ou seja, pode-se assumir que as partículas de Hidraltex[®] 635 ES, Hidraltex[®] 635, Itasil[®] 2250^a, Itamag[®] 325, Itamag[®] ES, Itamag[®] 1100 e calcário 325 possuem tamanho inferior a 20 μ m.

As aluminas fluoretada e calcinada apresentam tamanho de partícula maior e correspondem aos sólidos particulados que ficaram retidos na malha de 100 mesh, ou seja, apresentam tamanho superior a 55 μ m. Dessa forma, as partículas desta segunda classe de material, com tamanhos de partículas maiores, apresentam tamanho entre 55 a 150 μ m.

Os materiais quartzo e calcário utilizados neste trabalho tratavam-se de frações que passaram pela malha de 200 mesh, ou seja, possuem tamanho inferior a 29 μ m. O material caulim corresponde ao material que passou pela na malha de 100 mesh e ficou retido na malha de 200 mesh, ou seja, possui tamanho entre 29 e 55 μ m.

Nome	Deserieão	Dovostimonto	Malha	A plica são	Composição (% m/m)					
Comercial	Descrição	Revestimento	мапа	Aplicação		H ₂ O	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaCO ₃
Hidraltex [®] 635 ES	Hidróxido de alumínio	Ácido graxo de cadeia longa	635	Aditivo anti-chama, revestimento, impermeabilizante	73	25				
Hidraltex [®] 635	Hidróxido de alumínio	Não	635	Aditivo anti-chama, revestimento, impermeabilizante	73	25				
Itasil [®] 2250ª	Hidróxido de alumínio	Organosilano vinílico	635	Antichama ecológico, resistente à absorção de água para composições dielétricas, supressor de fumaça, antitrilhamento	73	25				
Itamag [®] 635	Hidróxido de magnésio	Não	635	Antichama ecológico, supressor de fumaça e antitrilhamento elétrico.		30	70			
Itamag [®] 1100	Hidróxido de magnésio	organosilicato vinílico	635	Antichama ecológico, resistente à absorção de água, supressor de fumaça e antitrilhamento elétrico para isolamento de fios e cabos		30	70			
Itamag [®] ES	Hidróxido de magnésio	ácido graxo de cadeia longa	635	Antichama ecológico, resistente à absorção de água, supressor de fumaça.		30	70			
Alumina calcinada	Óxido de alumínio calcinado de alta dureza	Não	100	Fosqueante, antidesgaste.	96			3		
Alumina fluoretada	óxido de alumínio	Fluoreto de alumínio e cálcio	100	Adsorvente,	96			3		
Caulim	Grupo de silicatos de alumínio, principalmente caulinita e haloisita	Não	200	Utilizado em cerâmicas, tintas, cimento, fabricação de tintas e cosméticos	95				1,2	
Calcário	Rocha sedimentar, com predominância de carbonato de cálcio.	Não	200	Em cimentos, produção de cal e adubos químicos.						30
Quartzo	Grupo de silicatos	Não	200	Utilizado em construção civil, equipamentos eletrônicos, em esmaltes como abrasivos, ntre outros				100		

Tabela 7 - Descrição dos sólidos particulados doados pela empresa Itatex/Imerys

Fonte: Autora

4.2 Métodos

Este tópico descreve os ensaios realizados para determinação da velocidade mínima de fluidização dos sólidos particulados estudados e a determinação das propriedades que influenciam na operação unitária de fluidização.

4.2.1 Distribuição granulométrica das partículas

A análise granulométrica dos materiais foi realizada através do analisador de partículas por difração à laser modelo BlueWave da MicroTrac.

A figura 26 apresenta o equipamento utilizado em laboratório e na tabela 8 estão descritas algumas das características do equipamento. No anexo I apresenta-se a ficha com os detalhes do equipamento.



Figura 26 - Equipamento para determinação da distribuição do tamanho de partícula

Fonte: Autora

Tabela 8 -	Características	do equi	pamento de	e determinaç	cão de	tamanho de	partícula.

Equipamento	Marca	Características
BlueWave com Turbotrac	MicroTrac	Particulas de 0,01 a 2800 μm Comprimento de onda vermelho 780 nm, azul 405 nm Temperatura 10 – 35°C

Este equipamento permite a análise de distribuição granulométrica tanto em via seca, quando utilizado o acessório Turbotrac, quanto em via úmida, mediante a utilização do acessório Hydrotac que permite a dispersão da amostra de partículas no meio líquido. O esquema dos equipamentos utilizados estão apresentados na figura 27.

Figura 27 - Equipamento para medição de tamanho de partícula via seca (Turbotrac) e via úmida (HydroTrac).



(a) Turbotrac Fonte: MICROTRAC (2016).



(b) HydroTrac

Na medição via úmida, foi utilizada água destilada como meio dispersante, a qual também arrasta as partículas do acessório preparador de amostras (Hydrotrac) até o analisador propriamente dito, situado no aparelho MicroTrac.

No preparador de amostra é adicionada a quantidade necessária de partículas para a realização da medida. Esta quantidade é indicada pelo parâmetro "obscuração" que é a redução na intensidade do feixe de laser que chega ao detector, devido a absorção e/ou refração do feixe incidente pelas particulas presentes no meio dispersante.

Com o intuito de se medir precisamente toda a população de partículas das amostras, foi utilizado um auxiliar de dispersão comercial, Dispex® N40 (BASF), além da sonda de ultrasom acoplada ao acessório preparador de amostras. O uso destes artificios é recomendado para auxiliar na desaglomeração das partículas da amostra de pós que apresentem tendências a formar aglomerados devido às elevadas interações interparticulares.

A realização da análise de tamanho de partículas em via seca foi realizada para as amostras que não de dispersavam em água, mesmo mediante adição de um agente dispersante e do uso de ultrasom. Nestes casos, a medição foi realizada com auxílio do acessório Turbotrac, o qual utiliza ar como fluido de carregamento das amostras até o detector. O fluxo de ar é gerado por um aspirador de pó, o qual aspira o pó do porta-amostra e o conduz até o dectector.

A limitação deste método por via seca é a garantia da dispersão completa do material. Caso não seja possível a dispersão total do pó no meio, deve-se procurar alternativas para a
determinação da distribuição granulométrica de um pó. Outro inconveniente da técnica em via seca é que a amostra analisada é perdida.

Independente do método de preparação de amostra utilizado, o resultado fornecido pelo equipamento são as curvas de distribuição de tamanho das partículas (histograma e cumulativa) e os resultados dos cálculos dos diâmetros médios à partir destas curvas.

4.2.2 Densidade específica das partículas

A densidade específica real foi medida em laboratório por um picnômetro a gás Hélio, modelo AccuPyc II 1340, da marca Micromeritics.

A tabela 9 apresenta detalhes do equipamento, a figura 28 apresenta o equipamento e o anexo II apresenta a ficha de dados deste equipamento.

Tabela 9 - Detalhes do picnômetro para medição de densidade dos materiais.

Equipamento	Marca	Características	
AccuPyc II 3340	Micromorities	Umidade 20 – 80%	
Pycnometer	wheromenties	Temperatura 15 – 35°C	

Fonte: Autora

Figura 28 - Esquema do picnômetro a gás utilizado para determinação da densidade real.



Fonte: MICROMERITICS 2016.

Um esquema do funcionamento do equipamento é apresentado na figura 29.



Figura 29 - Funcionamento do picnômetro para determinação de densidade.

Fonte: MICROMERITICS 2016

Para a análise, a amostra é inserida em um compartimento de volume conhecido. O gás inerte entra na câmara de análises e atinge a pressão de equilíbrio (2). O gás é expandido a um outro compartimento de volume conhecido (3). A pressão observada para encher a câmara de amostra e descarregamento da mesma permite a contabilização do volume da fase sólida. Dividindo a massa da fase sólida pelo volume é possível obter a densidade do material.

Este equipamento consegue medir com precisão os volumes dos poros inter e intraparticulares de um meio granular em uma célula de medida padronizada; este valor é subtraído do volume da amostra, fornecendo a densidade (real) apenas das partículas sólidas que constituem o meio granular. A densidade real da partícula é medida pelo aparelho e o valor é apresentado no indicador digital do equipamento.

4.2.3 Morfologia das partículas

Os sólidos particulados foram revestidos com uma liga de ouro paládio e examinadas no microscópio eletrônico de varredura CamScan CS 3200 LV (Cambridge).

As análises foram realizadas sob alto vácuo (10-5 mbar), tensão de aceleração foi de 20 kV, abertura do spot 3,0 e distancia de trabalho em relação ao detector de 15 mm.

A figura 30 apresenta o microscópio eletronico de varredura utilizado neste trabalho.

Figura 30 - Esquema do microscópio eletrônico de varredura utilizado.



4.2.4 Leito Fluidizado

Foram realizados ensaios de fluidização para determinação da velocidade mínima de fluidização no aparelho didático de fluidização "Fixed and Fluidized Bed" da marca Armfield.

A figura 31 apresenta o esquema do equipamento utilizado e a tabela 10 apresenta detalhes do equipamento.

Tabela 10 - Especificações do equipamento para medição de fluidização.

Equipamento	Marca	Características		
Fixed and Fluidized Bed	Armfield	Especificações do leito: 65 mm de diâmetro e		
		1000 mm de altura		
		Vazão de ar: $0 - 20$ litros/minuto		
		Perda de carga: 0 – 10 mmH2O		



Figura 31 - Esquema do leito fluidizado utilizado (a) Equipamento e (b) Rotâmetro.

Este equipamento é dotado de um tubo transparente (leito) com 65 mm de diâmetro e 1000 mm de altura, onde a amostra de material particulada é inserida. Ar atmosférico é injetado pela base do leito por intermédio de um compressor de ar, cuja vazão é controlada por um rotâmetro. Na base do leito e próximo à abertura superior existem duas tomadas de ar que são conectadas a um tubo U cheio de água com permanganato de potássio, que confere uma coloração azul escura. Através da diferença de altura da água neste tubo U é possível determinar a perda de carga sofrida pelo ar ao atravessar o leito de sólido.

Para a determinação experimental da velocidade mínima de fluidização, U_{mf} , é necessário a construção de um gráfico de queda de pressão (ΔP) e altura (h) em função da velocidade do ar.

A construção do gráfico é realizada a partir de incrementos de 0,5 litro/minuto de velocidade do ar (U_s), registrando-se a perda de carga (ΔP) e a altura do leito em cada ponto (curva de fluidização) e, posteriormente reduz-se a velocidade do ar (U_s) até que a condição inicial seja reestabelecida (curva defluidização) que geralmente apresenta comportamento distinto.

As medidas neste equipamento são manuais e, para a realização dos testes para os sólidos particulados, padronizou-se o seguinte procedimento: as amostras foram colocadas no

leito fluidizado com o auxílio de um funil analítico de plástico. Elevou-se a vazão de ar injetada no leito ao limite máximo do equipamento (20 litros/minuto), com o intuito de consolidar os componentes, a vazão de ar foi mantida nessas condições por 30 segundos e então foi abruptamente reduzida a zero. Este procedimento foi repetido três vezes. Ao final da triplicata de consolidação, iniciaram-se os testes de fluidização em que a válvula de controle do fluxo, foi aberta gradualmente de 0,5 em 0,5 litros/minuto, até que o gás atingisse a sua vazão máxima. A cada variação de vazão, mediu-se o diferencial de pressão e a altura do leito a fim de determinar sua expansão. Ao atingir a vazão máxima, iniciou-se a redução da vazão de ar injetada em incrementos de 0,5 em 0,5 litros/minuto e, em cada ponto mediram-se os valores de perda de carga e a altura do leito. Com estas medidas, é possível obter os gráficos das curvas de fluidização (incremento de vazão de gás) e de defluidização (redução gradual de vazão de gás).

Foram realizados ensaios de fluidização com 3 alturas do leito diferentes que correspondiam à altura do reometro, o dobro e o triplo de sua altura. As condições de altura utilizadas estão apresentadas na tabela 11.

Altura (mm)	Condição
88	1
176	2
264	3

Tabela 11 - Alturas utilizadas dos sólidos particulados para realização do teste de leito fluidizado.

Fonte: Autora

A partir dos gráficos obtidos pelas curvas de fluidização e defluidização, é possível a determinação da velocidade mínima de fluidização. Para tanto, deve-se traçar uma reta ao longo da região do leito fixo na curva de defluidização e uma reta ao longo da curva de fluidização com o aumento da perda de perda. A intersecção entre essas linhas permite a obtenção da velocidade mínima de fluidização, tal como apresentado no ponto A da figura 32 ou pelo ponto de máxima queda de pressão, observado na curva de fluidização da figura 32 (GENEHR, 2015).

Figura 32 - Curva de fluidização característica.



Fonte: GENEHR, 2015.

4.2.5 Reômetro de pós

A Freeman Technology (2007) desenvolveu um reômetro de pó capaz de caracterizar amostras de materiais pulverulentos sob condições estáticas e dinâmicas, denominado "FT4 Powder Rheometer" e é apresentado na figura 33.

Figura 33 - Esquema do equipamento da Powder Rheometer da Freeman Technology FT 4.



Fonte: FREEMAN TECHNOLOGY 2007.

Os testes realizados com auxílio deste equipamento são apresentados na tabela 12.

Marca	Testes	
	Aeração	
Freeman Technology	Teste de cisalhamento	
	Permeabilidade	
	Compressibilidade	
	Freeman Technology	

Tabela 12 - Detalhes dos testes possíveis de serem realizados no Reômetro de pós

Fonte: FREEMAN, 2007.

O reômetro de pó possui uma hélice, que capta a energia (força) para manter a rotação constante ao atravessar uma amostra do material ao se deslocar na vertical.

A metodologia aplicada consiste na medição da resistência oferecida pelo pó, quando submetido ao movimento, utilizando-se uma hélice que se move axialmente pela amostra de pó, enquanto as forças rotacionais e axiais são medidas, tal como apresentado na figura 34.



a = Ângulo da hélice

Fonte: FREEMAN TECHNOLOGY 2007.

Em ambos os sentidos axiais medem-se velocidade, força e torque. Este movimento ocasiona a interação de diversas partículas ou a fluidez relativa umas às outras; a resistência da lâmina do impelidor representa a resistência da partícula ao movimento. Quanto mais as partículas resistirem ao movimento, mais dificil para o pó fluir, haverá maior resistência para movimentar as pás do impelidor.

Ao adicionar a amostra ao cilindro para medições no FT4, o modo como o operador adiciona influenciará nos dados, muitas vezes o nível não será atingido, ou o pó não estará totalmente alinhado. Para evitar que parâmetros externos influenciem nos testes no equipamento FT4, Freeman (2007) desenvolveu o método de pré-condicionamento, em que inicialmente a hélice gira no sentido horário pelo frasco para movimentar as partículas, e, em seguida, a amostra é girada no sentido anti-horário, deixando o pó uniforme, movimentando-se a amostra no todo, com o intuito de perturbá-la e suavemente soltar as partículas, de modo a possuir um leito de partículas antes de qualquer análise, homogêneo. A remoção de qualquer pré-compactação ou de excesso de ar, assegura a repetibilidade dos testes, eliminando-se a influencia de fatores externos. A figura 35 apresenta o esquema do pré-condicionamento (COOKE; FREEMAN, 2006).





Descida da lâmina no teste através do equipamento no comprimento total do copo de medição Fonte: Autora. "Adaptado de COOKE; FREEMAN, 2006".



Subida da lâmina na condição de mínima consolidação

4.2.5.1 Energia básica de fluxo (BFE) e Energia de Fluxo variável (VRF)

A energia básica de fluxo (BFE) é a energia necessária para estabelecer um padrão de fluxo em um sólido particulado imposto por uma lâmina torcida, de geometria definida (FREEMAN, 2007).

Para a medição do padrão de fluxo, a amostra de sólido particulado é inserida no frasco de borossilicato com 48 mm de diâmetro e 160 mL de volume padronizado e desenvolvido pela Freeman Technology. A lâmina é inserida no equipamento e rotacionada com velocidade de descida de 10 mm/s realizando o pré-condicionamento. Em seguida, é rotacionada no sentido

anti-horário do topo para baixo. Neste momento, gera uma compressão e uma alta taxa de tensão no sólido particulado.

A energia básica de fluxo é calculada a partir do trabalho realizado ao movimentar a lâmina através do pó do topo do frasco até o fundo. A figura 36 exemplifica o movimento realizado pela lâmina e a figura 37 apresenta a lâmina utilizada no teste.

Figura 36 - Esquema do movimento da lâmina realizado para determinação do padrão de fluxo.





Fonte: FREEMAN, 2007.

Figura 37 - Lâmina utilizada no teste de BFE.



Fonte: Autora.

Entretanto, o valor confiável da energia básica de fluxo (BFE) de um pó é determinado através do teste de estabilidade, que é um teste necessário para garantir que as propriedades obtidas através do teste de fluxo variável sejam devido à variação da velocidade de rotação da lâmina que movimenta o pó, e não dos fenômenos de instabilidade da amostra. É construído a partir de uma série de sete testes de energia básica de fluxo (BFE). A maioria dos pós estabilizam durante esta sequência, contudo, alguns pós levam um tempo maior para atingirem a estabilidade sendo necessário prolongar o programa de estabilidade para caracterizar esse material com precisão. Sendo o comportamento aceitável, ao fim das 7 medidas, o BFE é calculado pela média das 6° e 7° medidas experimentais.

Em seguida, inicia-se o teste do fluxo variável (VRF) compreendendo quatro novas medidas de energia onde a velocidade da lâmina é modificada para 100, 70, 40 e 10 mm/s, verificando com isso a energia necessária para movimentar a amostra nestas velocidades. Ao término do experimento o aparelho fornece o índice de fluxo (FRI), que é uma relação entre as energias despedidas no último ensaio de menor velocidade rotação (10mm/s) e a maior velocidade (100mm/s).

A sequência do teste para determinação da BFE e VFR é apresentada na figura 38. O material é separado após o pré-condicionamento para que o teste seja realizado em um volume de pó conhecido.



Figura 38 - Sequencia de etapas do teste de BFE e VRF

Fonte: Autora

4.2.5.2 Teste de aeração

O teste de aeração/fluidez no equipamento FT4 Powder Rheometer é realizado adicionando o sólido particulado de interesse no frasco de borosilicato do reometro de 160 mL e 50 mm de diâmetro, a base do equipamento permite a entrada de ar por toda a massa. É acoplada a mangueira para injeção de ar à massa particulada. Em seguida, o sólido sofre pré-

condicionamento através do movimento rotacional da lâmina do FT4 no sentido horário. Após o pré-condicionamento, inicia-se o teste de aeração, variando-se a vazão de ar injetado, a qual é indicada pela velocidade do mesmo, de 0,5 a 5,0 mm/s com passo de 0,5 mm/s. A cada velocidade de ar, mede-se a variação de energia total das partículas. A sequência de testes está apresentada na figura 39. A figura 40 apresenta o equipamento utilizado durante o teste de aeração.





Fonte: Autora

Figura 40 - Equipamento de Freeman durante teste de aeração.



Fonte: Autora

Com o teste de aeração são construídos gráficos da força necessária da lâmina para movimentar os pó em função da velocidade de ar, sob os diferentes níveis (velocidades) de aeração, um exemplo hipotético é apresentado na figura 41.





Fonte: Freeman 2007.

A partir deste gráfico, é possível a obtenção da velocidade mínima de fluidização ao considerar que a fluidização ocorre quando a energia aproxima-se de zero ou é estabilizada em um valor baixo e mantém-se constante.

Foi adotado como critério para determinação da velocidade mínima de fluidização neste trabalho como a condição em que é atingida a menor energia e manteve-se estável. O valor de energia tende a ficar constante devido ao equilíbrio entre as forças coesivas e a força gravitacional.

A figura 41 apresenta de maneira esquemática um sólido particulado que atinge a velocidade mínima de fluidização em 4 mm/s e o outro em 8 mm/s, e, a partir deste momento, a energia mantém-se constante e próxima a zero.

Para caracterizar os pós como coesos ou não, Freeman (2007) sugere o cálculo da razão de aeração, equação (33) e a caracterização dos sólidos particulados conforme a tabela 13.

$$Razão \ de \ aeração, AR = \frac{Energia (velocidade \ do \ ar \ no \ inicio \ do \ teste)}{Energia (velocidade \ do \ ar \ na \ última \ medida \ do \ teste)}$$
(33)

Razão de aeração, AR	Classificação	
1,0	Coesos	
2 < AR < 20	Típico	
AR >> 20	Não coesos	

Tabela 13 - Classificação dos sólidos particulados no teste de aeração.

Fonte: Freeman 2007.

4.2.5.3 Teste de Compressibilidade

O teste de compressibilidade é realizado adicionando o sólido particulado de interesse no frasco de borosilicato do equipamento FT4 de 80 mL e 48 mm de diâmetro, a base do equipamento permite a entrada de ar por toda a massa. Em seguida, o sólido sofre précondicionamento através do movimento rotacional das pás no sentido horário, utilizando a lâmina (a) da figura 42. Após o pré-condicionamento, troca-se a pá do equipamento por uma que permita a saída de ar, denominada pistão ventilado apresentada no item (b) figura 42 e, simultaneamente realiza a compressão do sólido particulado. São aplicadas diferentes forças normais no sólido particulado e são mantidas por um período até atingirem o equilíbrio. A distância comprimida do material é automaticamente calculada como uma porcentagem na variação do volume inicial. As pressões utilizadas foram 0,5, 1,0, 2,0, 4, 6, 8, 10, 12 e 15 kP e as etapas para análise são apresentadas na figura 43.





Fonte: Autora

(b)

Pistão ventilado

Figura 43 - Esquema das etapas do teste de compressibilidade.



Fonte: Autora

O resultado do teste de compressibilidade é dado como a porcentagem de variação do volume do sólido particulado versus a pressão Normal (kPa) aplicada.

4.2.5.4 Teste de permeabilidade

O teste de permeabilidade é realizado adicionando o sólido particulado de interesse no frasco de borosilicato do equipamento de 50 mm de diâmetro e 62 mm de altura, tendo como volume útil 85 mL. A base do equipamento permite a entrada de ar por toda a massa. Em seguida, o sólido sofre pré-condicionamento através do movimento rotacional no sentido horário das pás, lâmina (a), figura 42. Após o pré-condicionamento, troca-se a pá do equipamento por um pistão ventilado, que permite a saída de ar e comprime o sólido particulado, como apresentado na lâmina (b) da figura 42. Neste instante, o equipamento ajusta a vazão de ar de 2 mm/s e variam-se as forças normal aplicadas sobre o sólido particulado de 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 e 15 kPa. A cada pressão, mede-se a variação de perda de carga dos sólidos particulados.

A figura 44 apresenta o esquema de realização do teste e a figura 45 um diagrama esquemático da compressão do sólido particulado durante a injeção de ar durante o teste.



Figura 44 - Esquema das etapas realizadas no teste de permeabilidade no equipamento FT4.

Figura 45 - Funcionamento do sólido durante o teste de permeabilidade.



Entrada de ar Entrada de ar Fonte: Autora, "Adaptado de FREEMAN TECHNOLOGY 2016".

4.2.5.5 Teste de Cisalhamento

O reômetro de pós desenvolvido por Freeman (2007) permite a realização do teste de cisalhamento definido por Jenike (1964) apud Lopes Neto, Silva e Nascimento (2009). O cisalhamento é uma propriedade intrínseca de cada material particulado e permite o entendimento de como será a transição do pó do estado estacionário, quando consolidado, ao estado dinâmico, quando é imposta a condição de fluir.

O teste de cisalhamento é realizado no equipamento FT4 em três etapas. Inicialmente, adiciona-se o material a ser estudado no frasco de borossilicato padronizado do equipamento de 85 mL e 50 mm de diâmetro. A base acoplada deste material não permite a entrada de ar, mas possui ranhuras similar ao equipamento de Jenike (1964).

As etapas do teste são descritas em detalhes abaixo:

- a) Etapa 1: Pré-condicionamento O primeiro teste é realizado com a lâmina (a) indicada na figura 46 e consiste no teste de pré-condicionamento da amostra e, para tanto, ocorre o movimento rotacional da lâmina no sentido horário. O intuito desta etapa é a remoção de efeitos externos e histórico de armazenamento da amostra;
- b) Etapa 2: Início da compactação nesta etapa, troca-se a lâmina pelo pistao ventilado
 (b) da figura 46. O material sofre compactação com uma força equivalente ao préshear (pré-cisalhamento);
- c) Etapa 3: Inicio da consolidação crítica neste momento, o material será preparado para o teste de cisalhamento e então remove-se o funil, troca-se a lâmina por um pistão dentado (c) da figura 46 e ajusta-se o material para conhecimento do volume exato a ser submetido ao teste. Nesta etapa, é atingida uma condição de consolidação crítica em estado estacionário e há redução da tensão normal. Ocorre o teste de cisalhamento em dois momentos:
 - Pré-shear (pré-cisalhamento): Com o propósito de atingir um estágio de consolidação crítico em uma tensão normal de pré-shear. O teste é realizado até uma condição estacionária ser atingida, quando o estado de fluxo estável é alcançado (τ_{pre}, σ_{pre});
 - Teste de cisalhamento: a tensão normal aplicada é reduzida a um valor menor ao estado de pré-shear. Nota-se que a força de cisalhamento aumenta rapidamente, alcançando um valor máximo, representando a tensão de cisalhamento e depois

diminui. Este processo é chamado de cisalhamento. No ponto de quebra incipiente o cisalhamento é medido.

Os pós estudados neste trabalho foram submetido ao teste de cisalhamento de Freeman (2007) nas condições de tensão de 3, 6 e 9 kPa. Os testes foram realizados em duplicatas.

Figura 46 - Acessórios utilizados no teste de cisalhamento.



Fonte: Autora

O teste gera como resultado um gráfico de tensão normal versus a tensão de cisalhamento (figura 48) e nos permite o cálculo de todos os parâmetros do teste de cisalhamento de Jenike, tal como círculos de Mohr, a coesão, o ângulo de atrito interno (AIF), a tensão não confinada de deslizamento (UYS - Unconfined yield strenght), a tensão principal de consolidação (MPS - Major Principle Stress).



Figura 47 - Representação do gráfico gerado no reômetro de pós da Freeman FT4.

Fonte: Adaptado de FREEMAN 2015.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos experimentalmente nos ensaios realizados no leito de fluidização, no reômetro de pós FT4 e na determinação das propriedades físicas das partículas (densidade e granulometria), no Centro Universitário FEI.

5.1 Caracterização das partículas

Os resultados da caracterização das partículas, realizados a partir dos testes de distribuição granulométrica e de densidade aparente das partículas são apresentados na tabela 14.

A partir da distribuição do tamanho e da densidade das partículas é possível classificálas segundo o modelo de Geldart, visto que a densidade do sólido particulado é muito maior que a do fluido (ar, $\rho_{ar} = 1,19 \text{ kg/m}^3$). Estes resultados correspondem ao primeiro passo para avaliação e previsão do comportamento fluidodinâmico das partículas.

Os hidróxidos de alumínio e magnésio com revestimento foram analisados via seca, devido à insolubilidade em água.

No apêndice I são apresentados os gráficos de distribuição de tamanho de partículas obtidos experimentalmente.

As figuras 48, 49, 50 e 51 apresentam a distribuição de tamanho de partícula para as aluminas calcinada e fluoretada, hidróxidos de alumínio, hidróxidos de magnésio e compostos intermediários, respectivamente.

Amostras	Tipo Recobrimento	Método de análise do tamanho de partícula	d _p (D _{4,3}) (μm)	Densidade real da partícula ρ _p (g/cm³)	Tipo DTP	Classificação Geldart
Itamag 325		Via úmida	10,93	2,3461	Bimodal	Grupo C - Coesas
Itamag ES	Ácido graxo	Via seca	11,77	2,3205	Monomodal	Grupo C - Coesas
Itamag 1100	Silano	Via seca	9,49	2,3905	Bimodal	Grupo C - Coesas
Hidraltex 635		Via úmida	7,36	2,4148	Bimodal	Grupo C - Coesas
Hidraltex 635 ES	Ácido graxo	Via seca	9,2	2,3449	Monomodal	Grupo C - Coesas
Itasil 2250A	Silano	Via seca	7,14	2,4017	Bimodal	Grupo C - Coesas
Alumina Calcinada		Via úmida	91,81	2,2644	Monomodal	Grupo B – Tipo areia
Alumina Fluoretada		Via úmida	100,7	2,4004	Monomodal	Grupo B – Tipo areia
Quartzo		Via úmida	23,88	2,6089	Polidispersa larga	Grupo A – Fácil fluidização
Calcário		Via úmida	25,89	2,7545	Polidispersa estreita	Grupo A – Fácil fluidização
Caulim		Via úmida	36,45	2,6817	Polidispersa larga	Grupo A – Fácil fluidização



Figura 48 - Distribuição do tamanho de partícula para as aluminas calcinada e fluoretada.



Figura 49 - Distribuição do tamanho de partícula para os hidróxidos de alumínio.



Figura 50 - Distribuição do tamanho de partícula para os hidróxidos de magnésio.



Figura 51 - Distribuição do tamanho de partícula para os compostos intermediários

É possível observar que a distribuição do tamanho de partículas para as aluminas calcinada e fluoretada é mais estreita que os demais sólidos particulados e apresenta-se na faixa de 100 μm.

Para os hidróxidos de alumínio e hidróxidos de magnésio pode-se observar que o revestimento de organosilicato (Itamag 1100 e Itasil 2250) diminui o tamanho da partícula enquanto que o revestimento de ácido graxo de cadeia longa aumenta o tamanho das partículas (Hidraltex 635 ES e Itamag ES), quando comparado com as partículas sem revestimento (Hidraltex 635 e Itamag 325).

É possível observar nos gráficos apresentados nas figuras 49 e 50 que compreendem os compostos revestidos com ácido graxo, verifica-se um comportamento monomodal, característico de composição bem definida. Para os compostos sem revestimento e revestidos com organosilicato foram observados distribuição do tipo bimodal, o que pode ser atribuido à presença de pequenas partículas aderidas na superfície das maiores e que foram removidas durante a análise granulométrica, devido ao uso da sonda de ultrassom para dispersar a amostra.

Os compostos caulim, quartzo e calcário apresentam uma distribuição de tamanho de partículas larga, mas de acordo com a densidade e o tamanho de partícula, são compostos classificados como de fácil fluidização segundo Geldart.

5.2 Morfologia das partículas

Neste tópico, são apresentados os resultados obtidos a partir de microscopia eletrônica de varredura para os sólidos particulados estudados.

As figuras 52 e 53 apresentam os resultados das aluminas calcinada e fluoretada.

Figura 52 - Morfologia da alumina calcinada obtida via MEV.



Fonte: Autora

Figura 53 - Morfologia da alumina fluoretada obtida via MEV.



Fonte: Autora

As figuras 54, 55 e 56 apresentam a morfologia dos hidróxidos de alumínio sem revestimento (Hidraltex 635), revestido com organosilicato (Itasil 2250) e revestido com ácido graxo (Hidraltex 635 ES), respectivamente.



Figura 54 - Morfologia do Hidraltex 635, obtida via MEV.

Fonte: Autora



Figura 55 - Morfologia do Hidraltex 635 ES (revestido com ácido graxo) obtido via MEV.



Figura 56 - Morfologia do Itasil 2250 (revestido com organosilicato) obtido via MEV.

Fonte: Autora

As figuras 57, 58 e 59 apresentam a morfologia dos hidróxidos de magnésio sem revestimento (Itamag 325), revestido com organosilicato (Itamag 1100) e revestido com ácido graxo (Itamag ES), respectivamente.



Figura 57 - Morfologia do Itamag 325 obtido via MEV.



Figura 58 - Morfologia do Itamag ES (revestido com ácido graxo) obtido via MEV.

Fonte: Autora.

Figura 59 - Morfologia do Itamag 1100 (revestido com organosilicato) obtido via MEV.



Fonte: Autora.

As figuras 60, 61 e 62 apresentam a morfologia dos compostos intermediários, caulim, calcário e quartzo, respectivamente.

Figura 60 - Morfologia do caulim, obtido via MEV.



Figura 61 - Morfologia do calcário, obtido via MEV.



Fonte: Autora.

Figura 62 - Morfologia do quartzo, obtido via MEV



Observa-se que as aluminas, calcinada e fluoretada, apresentam um tamanho de partícula bem definido, de tamanho esférico, com poucas rugosidades e partículas pequenas.

Para os hidróxidos de alumínio e hidróxido de magnésio sem revestimento, observamse partículas dispersas, de formato irregular. O revestimento de ácido graxo permite uma maior aglomeração das partículas, de forma que as micropartículas existentes nos compostos sem revestimento não são mais observadas na amostra, porque estão aderidas na superfície das partículas maiores. Tal fato também explica o ligeiro aumento no tamanho das partículas.

Quando o material é revestido com organosilicato, as micropartículas estão dispersas no material. Pode-se afirmar que este revestimento auxilia na dispersão do material. Tal fato condiz com o gráfico de tamanho de partícula, em que é possível observar dois picos para os compostos revestidos com organosilicato.

Pode-se observar uma distribuição de partículas para os compostos caulim, calcário e quartzo, tal como observado no gráfico da figura 50. Existem partículas pequenas dispersas em partículas irregulares. O calcário é o que apresenta uma distribuição mais uniforme de partículas do que os demais compostos.Não são observadas compostos aderidas às superfícies das partículas maiores.

5.3 Reômetro de pós

Neste tópico, são apresentados os resultados obtidos no equipamento FT4 para medição de propriedades e características de sólidos particulados.

5.3.1 Energia básica de fluxo

O apêndice II mostra os resultados da energia básica de fluxo para os materiais estudados. São apresentados os valores obtidos em cada teste, realizado em duplicata. Foram calculados os valores médios e os desvios padrões, obtendo-se o gráfico da figura 63.



Figura 63 - Resultados da Energia Básica de Fluxo Obtida no FT4 para os pós particulados estudados, com diferentes diâmetros de partícula

Fonte: Autora.

A partir do gráfico da figura 63, observa-se que os compostos particulados com maior tamanho de partícula apresentam maior energia necessária para fluir. Este fato é esperado porque a energia que deve ser vencida para iniciar a fluidez do sólido é maior, porque as partículas fornecem uma barreira a este movimento e afeta as forças intermoleculares.

Na tabela 23 do apendice II estão apresentados também resultados dos índices de fluxo variável (FRI) que caracteriza a sensibilidade, que é a razão da energia necessária para movimentar o material pela lâmina ao variar de 10 para 100 mm/s, e o SI, que é o valor de BFE dividido pela massa de pó. O gráfico da figura 64 apresenta os resultados para diferentes tamanhos de partícula e, observa-se que são necessárias maiores energias para fluir para os

compostos com menores índices de fricção (alumina calcinada, alumina fluoretada, calcário, quartzo e caulim).

Observa-se também na figura 64 que quanto maior o diâmetro da partícula, menor a energia necessária para o sólido fluir, sendo mais fácil a sua movimentação. Os compostos que apresentam pequeno diêmetro de partícula sofrem um aumento do FRI, tornando-as mais sensíveis à fluidez.





Fonte: Autora.

No apêndice II são apresentados os dados de energia básica de fluxo obtidos ponto a ponto durante a realização do teste, obtendo-se os gráficos das figuras 65, 66, 67 e 68 que permitem avaliar a resistência de cada material ao movimento do impelidor do equipamento durante o teste.

Deve-se lembrar que os testes de 1 a 7 correspondem ao teste de BFE em que é realizado à velocidade constante e igual a 100 mm/s. Nos testes de 8 a 11, a velocidade é variada de 100, 70, 40 e 10 mm/s, respectivamente em que é obtido a energia de fluxo variável.



Figura 65 - Comportamento da energia básica de fluxo para as aluminas.



Figura 66 - Comportamento da energia básica de fluxo para os compostos intermediários.



Fonte: Autora.



Figura 67 - Comportamento da energia básica de fluxo para os hidroxidos de alumínio.



Figura 68 - Comportamento da energia básica de fluxo para os hidróxidos de magnésio.

É possível observar que os compostos com maior tamanho de partícula (alumina fluoretada e alumina calcinada), apresentam alta energia básica de fluxo. Calcário, quartzo e

Fonte: Autora.

caulim apresentam valores de energia básica de fluxo intermediários e, devido ao tamanho da partícula, apresentam certo grau de interação interparticular, superior às aluminas, porém inferior ao hidróxido de alumínio e magnésio.

Os hidróxidos de magnésio (Itamag 325, Itamag ES e Itamag 1100), indepentemente do revestimento aplicado, apresentam comportamento de fluidez similar, com energia básica de fluxo similar.

Para os hidróxidos de alumínio, (Hidraltex 635, Hidraltex 635 ES e Itasil 2250), o tipo de revestimento e tamanho de partícula influenciam na energia necessária para fluir. Os compostos Hidraltex 635 ES e Itasil 2250, (ambos revestidos) apresentam menor energia básica de fluxo, quando comparado ao Hidraltex 635, que não apresenta revestimento. Este comportamento pode ser justificado porque cada revestimento interfere na fluidez da partícula. O revestimento de organosilicato (Itasil 2250) tem efeito dispersante, as partículas finas livres acabam funcionando como "rolamentos" entre as partículas maiores, facilitando o movimento da lâmina. O revestimento de ácido graxo (Hidraltex 635 ES), aglomera as partículas que formam espaços vazios que não geram resistência à fluidez, diminuindo a energia necessária para o pó fluir. A formação destes aglomerados reduz também a densidade aparente da amostra, e acaba sendo necessária uma menor quantidade de massa para preecher o recipiente de 160 mL. Por isso, apesar de apresentarem valores próximos de BFE, o Hidraltex 635 ES apresenta SI menor que o Itasil 2250 e similar ao Hidraltex 635, sem revestimento, como apresentado na figura 64 anteriormente.

Os testes de VRF permitem verificar que, com exceção das aluminas calcinada e fluoretada, os demais compostos necessitam de altas energias para atingir maiores velocidades, visto que nesses compostos, a partir do ponto 8, houve aumento da energia. Tal fenômeno pode indicar maior interação interparticular, verificado pela micrografia (MEV) dos sólidos particulados, devido a irregularidades da partícula.

O teste de BFE também fornece a densidade do leito que, juntamente com a densidade real, obtidas por picnometria, permite o cálculo da porosidade dos leitos, cujos resultados estão apresentados na tabela 15.

Baixas porosidades indicam que existem baixo número de poros disponíveis para o ar fluir enquanto que altas porosidades, mais fácil será para que o fluido permeie o material.

Sólido Particulado	Densidade do leito, g/cm³	Densidade das partículas, g/cm³	Porosidade
Alumina Calcinada	1,040	3,264	0,682
Alumina Fluoretada	1,358	2,400	0,434
Calcário	0,975	2,755	0,646
Caulim	0,550	2,682	0,795
Quartzo	1,041	2,609	0,601
Hidraltex 635	0,691	2,415	0,714
Hidraltex 635 ES	0,835	2,345	0,644
Itasil 2250	0,868	2,402	0,639
Itamag 1100	0,889	2,391	0,628
Itamag 325	0,685	2,346	0,708
Itamag ES	0,766	2,321	0,670

Tabela 15 - Obtenção da porosidade dos sólidos estudados.

5.3.2 Teste de cisalhamento (Shear test)

O teste de cisalhamento mede a tensão necessária para cisalhar o material, ou seja, ocasionar o movimento das partículas umas contras as outras em função da tensão normal aplicada.

Os resultados do teste de cisalhamento estão apresentados nas tabelas 25, 26 e 27 do apêndice III, variando-se a pressão normal aplicada de 3, 6 e 9kPa. Para cada teste, foi obtido um gráfico similar ao apresentado na figura 69 e, a partir deste gráfico, os 4 principais valores foram obtidos:

- a) Unconfined Yield Strenght, UYS (tensão não confinada de cisalhamento) que corresponde ao estresse causado para que o material se mova;
- b) Major Principal Stress (MPS maior tensão de cisalhamento): É a maior de todas as tensões normais aplicadas durante o regime permanente;
- c) Ângulo interno de fricção: coeficiente da curva de yield locus;
- d) Coesão: corresponde ao grau de coesão dos sólido particulados.



Figura 69 - Círculo de Mohr resultante do teste de cisalhamento para cada sólido particulado.

Fonte: Autora. "Adaptado de Freeman, 2016".

Com os dados de UYS e MPS de todos os testes de cisalhamento para cada material, foi possível obter a função de fluxo (FF) para cada material. No apendice III, mostram-se os gráficos construídos a partir dos dados da tabela 28, que contém a tensão não confinada de deslizamento média (UYS - Unconfined yield strenght) e da tensão principal de consolidação média (MPS - Major Principle Stress) para cada sólido particulado, com coordenadas de tensões principais e tensão de não confinamento, obtendo-se uma reta, cuja inclinação corresponde à função de fluxo, e indica se é possível um sólido particulado fluir, segundo a classificação apresentada na figura 25 e na tabela 6.

A figura 70 apresenta os dados de função fluxo para os hidróxidos de alumínio.


Figura 70 - Classificação dos hidróxidos de alumínio quanto à função fluxo.

Analisando-se os dados da figura 70, comparativamente no ponto de pressão equivalente a 12 kPa, pode-se observar que o composto sem revestimento (Hidraltex 635) apresenta menor fluidez que os compostos revestidos, sendo classificados como produtos coesivos. O Itasil 2250 apresenta a mesma inclinação que a reta de Função de Fluxo = 10, podendo ser classificado como um composto de fluxo livre. Os resultados da função fluxo são coerentes com a Energia Básica de Fluxo, em que os compostos revestidos apresentam menores energias para fluir do que o composto sem revestimento.

A figura 71 apresenta os dados de função de fluxo para os hidróxidos de magnésio.



Figura 71 - Classificação dos hidróxidos de magnésio quanto à função fluxo.

Analisando-se os dados do gráfico da figura 71, comparativamente no ponto de pressão equivalente a 12 kPa, observa-se que o hidróxido de magnésio revestido com organosilicato (Itamag 1100) apresenta maior fluidez, enquanto o hidróxido de magnésio revestido com ácido graxo apresenta fluidez similar ao material não revestido. A partir da observação das inclinações das retas, nas condições avaliadas, os hidróxidos de magnésio podem ser classificados como compostos sem fluxo e, dentre eles, o Itamag 1100 é o que apresenta maior facilidade para fluir e, em uma dada tensão, irá se comportar como composto de fluxo livre, visto pela inclinação da reta. Os resultados para os hidróxidos de magnésio condizem com a Energia Básica de Fluxo, em que estes compostos apresentaram comportamento similar.

A figura 72 apresenta os dados de fluidez para as aluminas calcinadas e fluoretadas.



Figura 72 - Classificação das aluminas quanto à função fluxo.

Fonte: Autora.

Ambas aluminas podem ser classificadas como compostos de fluxo livre, por terem inclinações superiores à FF = 10, mas dentre elas, a alumina calcinada apresenta maior mobilidade, visto que a inclinação é menor.

A figura 73 apresenta os dados de fluidez para os compostos intermediários, caulim, calcário e quartzo.



Figura 73 - Classificação dos pós intermediários quanto à função fluxo.

O caulim e o calcário podem ser classificados como compostos de baixo fluxo, enquanto o quartzo apresenta fácil fluidez. É notável pelas curvas destes pós, que mudam de comportamento de acordo com a pressão aplicada, sendo mais acentuado para o calcário.

A tabela 16 apresenta resumidamente a classificação dos compostos, na pressão aplicada de 12 kPa, quanto à função fluxo segundo a classificação apresentada na tabela 25. Deve-se ressaltar que, quando alterado o sólido particulado ou as condições de aplicação, o comportamento será diferente da apresentada anteriormente.

Material	Função fluxo	Classificação Geldart			
Itamag 325	Coesivo	Grupo C – Coesas			
Itamag ES	Coesivo	Grupo C – Coesas			
Itamag 1100	Coesivo	Grupo C – Coesas			
Hidraltex 635	Coesivo	Grupo C – Coesas			
Hidraltex 635 ES	Coesivo	Grupo C – Coesas			
Itasil 2250	Fluxo livre	Grupo C – Coesas			
Quartzo	Fácil fluidez	Grupo A – Fácil fluidização			
Calcario 325	Fácil fluidez	Grupo A – Fácil fluidização			
Caulim	Coesivo	Grupo A – Fácil fluidização			
Alumina fluoretada	Fluxo livre	Grupo B – Tipo Areia			
Alumina calcinada	Fluxo livre	Grupo B – Tipo Areia			
Fonte: Autora.					

Tabela 16 - Classificação dos compostos quanto à função fluxo a 12 kPa e Geldart.

Entretanto, o comportamento do material sofre variação com o estado de compactação, conforme verificado nos gráficos de função de fluxo. No intuito de comparar todas as amostras, contriu-se o gráfico da figura 74, que apresenta a evolução quantitativa da coesão com o tempo de compactação.





Fonte: Autora.

No geral, pode-se observar que as aluminas calcinada, fluoretada e o Itasil 2250 são os compostos menos coesivos enquanto os compostos sem revestimento (Hidraltex 635 e Itamag 325) apresentam maior coesão.

5.3.3 Teste de compressibilidade

O teste de compressibilidade permite avaliar qual a alteração do volume da amostra, quando ar é removido por ação de uma força de compressão, não é uma medida direta de fluidez, mas é um bom indicador de coesão e fluidez dos sólidos particulados.

Os testes de compressibilidade para cada sólido particulado foram obtidos em duplicatas e os resultados são apresentados no apêndice IV. O gráfico da figura 75 apresenta os dados médios da percentagem de compressão para cada sólido na pressão normal aplicada de 15 kPa.



Figura 75 - Resultados médios de percentagem de compressão para os diferentes sólidos particulados estudados a 15kPa.

A tabela 30 do apendice IV apresenta a percentagem de compressão para as forças normais aplicadas de 0,5 - 15 kPa para todos os sólidos particulados e estão esquematizados nos gráficos das figuras 76, 77 e 78.



Figura 76 - Comportamento das aluminas e dos compostos intermediários quanto a compressibilidade.

Fonte: Autora.



Figura 77 - Comportamento dos hidróxidos de alumínio no teste de compressibilidade.



Figura 78 - Comportamento dos hidróxidos de magnésio no teste de compressibilidade

Fonte: Autora.

As aluminas fluoretadas e calcinadas apresentam menor porcentagem de compressão, isto é devido ao tamanho de suas partículas com forças interparticulares desprezíveis.

Os compostos caulim, calcário e quartzo apresentam comportamento intermediário e o caulim apresenta maior grau de compressão, atingindo valores próximos a 30%. Por estes compostos não apresentarem revestimentos, tal fato pode ser justificado pelo tamanho da partícula, permitindo-se que haja menos coesão entre as mesmas, existindo espaços vazios, que permitem maior compressibilidade do material particulado. É possível observar que os sólidos particulados com menores tamanho de partícula apresentam maior compressibilidade, este fato é justificado porque, quanto menor o tamanho da partícula, mais coeso é o pó.

O hidróxido de magnésio revestido com ácido graxo (Itamag ES), apresenta maior taxa de compressão, quando comparado ao composto tal qual e revestido com organosilicato (Itamag 325 e Itamag 1100), podendo-se verificar que o revestimento de ácido graxo forma aglomerados e espaços vazios, quando submetido a compressão, se quebram e reduzem o volume de maneira mais centrada. Já os hidróxidos de magnésio revestido com organosilicato, os finos já estão dispersos, resultando em menos espaços vazios nas amostras para acomodar as partículas maiores sob compressão.

Para os hidróxidos de alumínio, os compostos revestidos com ácido graxo (Hidraltex 635 ES) e organosilicato (Itasil 2250) apresentam compressão inferior, quando comparado aos compostos tal qual (Hidraltex 635). Também é verificado o mesmo fenômeno para os compostos com organosilicato. Talvez seja devido à natureza química.

5.3.4 Teste de permeabilidade

O teste de permeabilidade é uma medida de quão fácil o material pode transmitir um fluido que, no caso do teste, é o ar. Para tanto, o material é submetido à compressão juntamente com injeção de uma dada vazão de ar conhecida. Para verificar quão permeável é o material, é avaliada a perda de carga oferecida ao ar, quando permeia a amostra. O ar atravessa os vazios não confinados da amostra. Quanto maior a perda de carga, maior a resistência que o material oferece e, portanto, será mais difícil de permeá-lo, quanto menor a perda de carga, menor resistência e, portanto, mais permeável é o pó.

O apêndice V apresenta os dados coletados no equipamento FT4. A tabela 31 do apendice V apresenta a permeabilidade à pressão total de 15 kPa e o desvio padrão da análise.

O gráfico apresentado nas figuras 79 a 81 apresentam os resultados de perda de carga para cada um dos sólidos particulados estudados, à pressão aplicada de 1, 6, 10 e 15 kPa.

Na figura 79 apresentam-se os sólidos particulados com maiores perdas de carga e na figura 80, os sólidos particulados com baixos valores de perda de carga por pressão aplicada.





Fonte: Autora



Figura 80 - Permeabilidade para os compostos com baixa perda de carga

Fonte: Autora.

A figura 81 apresenta os resultados dos testes de permeabilidade para as aluminas calcinada e fluoretadas, que apresentam baixas perdas de carga.



Figura 81 - Resultados dos testes de permeabilidade médio para as aluminas.

A figura 81 apresenta os resultados dos testes de permeabilidade para os compostos classificados como intermediários.



Figura 82 - Resultados dos testes de permeabilidade para os compostos intermediários.

Fonte: Autora.

Os compostos caulim, quartzo e calcário com tamanho de partícula de 23 a 37 μ m apresentam perda de carga crescente à medida que a pressão aplicada é aumentada, podendo ser devida a uma quantidade maior de vazios presentes nessas amostras, elevando a perda de carga nas mesmas, sendo sólidos de difícil permeabilidade. Tal fato é justificado pela

distribuição de tamanho de partículas, que é polidispersa, facilitando a passagem de ar pelo material, porque os poros estão livres.

As figuras 83 e 84 apresentam o comportamento nos testes de permeabilidade para os hidróxidos de alumínio e hidróxido de magnésio, respectivamente.





Fonte: Autora.



Figura 84 - Resultados do teste de permeabilidade para os hidróxidos de alumínio.

Fonte: Autora.

Para os hidróxidos de alumínio e magnésio revestidos com organosilicato, em que foi visualizado um maior número de compostos dispersos, ou desagregados, é observado que a

perda de carga é inferior ao composto tal qual e revestido com ácido graxo. Esse comportamento é esperado, porque as partículas pequenas formam poros livres, que permitem maior fluidez do ar pelo composto. Para os compostos revestidos com ácido graxo (Hidraltex 635 ES e Itamag ES), a permeabilidade é inferior ao composto tal qual, porém superior ao composto revestido com organosilicato. Este comportamento é esperado porque esse recobrimento aglomera os materiais e formam poros confinados, que não permitem a passagem de ar. Os compostos tal qual apresentam perda de carga crescente devido aos diversos tamanhos de partículas disponíveis para o ar permear.

A perda de carga é correlacionada à permeabilidade do meio, visto que, durante esses testes, é inejtado ar no fundo do equipamento e, simultaneamente, é aplicada uma força de compressão normal sobre o sólido particulado. A permeabilidade corresponde à energia que o ar tem que vencer para permear os poros do material particulado. Dessa forma, quanto maior a energia do ar a ser vencida, maior a perda de carga, ou seja, é um pó que contém poros de dificil acesso ao fluido.

Sendo assim, é possível dizer que os compostos ditos intermediários (calcário, caulim e quartzo) apresentam elevadas perdas de carga e crescente, que pode ser devida à quebra do material com a força de compressão aplicada, permitindo que o ar permeasse a amostra. Entretanto, é um material de baixa permeabilidade. As aluminas e os compostos de hidróxido de alumínio e magnésio revestidos com ácido graxo e organosilicato apresentam baixas perdas de carga, ou seja, a resistência oferecida pelo material para o ar fluir por ele é pequena e, tal fato está correlacionado à morfologia destes materiais. O revestimento de organosilicato (Itasil 2250 e Itamag 1100) desagrega os sólidos particulados e, as pequenas partículas permitem a formação de poros livres para o ar fluir. O revestimento de ácido graxo (Hidraltex 635 ES e Itamag ES) agrega as partículas, porém, dentre elas, formam poros livres que permitem a passagem do ar.

Finalmente, vale ressaltar que o comportamento geral das curvas de permeabilidade são linhas horizontais ou levemente crescentes, diferentes do comportamento curvilíneo das curvas de compressão, de modo que existe outro fator envolvido na permeabilidade das amostras além da compressão propriamente dita: tamanho, forma, rugosidade. Estas outras interações serão avaliadas no teste de aeração, que mede a interação residual do leito de partículas fluidizado. Para verificar como os sólidos particulados em estudo se comportam sob condições de aeração, foram submetidos a essas condições em reômetro de pós com injeção de vazões diferentes de ar e, a partir da determinação da energia, verifica-se qual a velocidade mínima de fluidização.

O apêndice VI apresenta a tabela dos resultados realizados em duplicata com a energia em cada vazão de ar aplicada, apresentada na tabela 32.

Para as aluminas calcinada, fluoretada, caulim, calcário e quartzo, não foi possível a observação da queda da energia, utilizando a velocidade do ar de 0-5 mm/s. Dessa forma, o teste foi repetido utilizando a velocidade do ar de 0-10 mm/s.

O gráfico da figura 85 apresenta o comportamento de fluidização para as aluminas.

Figura 85 - Resultados do teste de aeração para as aluminas.



Fonte: Autora.

Ambas as aluminas apresentam o mesmo comportamento. A alumina calcinada, de menor tamanho, menor coesão, maior permeabilidade apresenta velocidade de fluidização de 5 mm/s. A alumina fluoretada, de maior tamanho, fluidiza-se em 6 mm/s. A curva das aluminas é típica de um material não coesivo.

O gráfico da figura 86 apresenta o comportamento de aeração para os compostos intermediários.



Figura 86 - Resultados dos testes de fluidização para os compostos intermediários.

É possível observar que o caulim apresenta um equílibrio de forças constante em 2,0 mm/s, podendo-se considerar esta a condição de mínima fluidização. Para o calcário e o quartzo, este equilíbrio de forças é alcançado em 4 mm/s. Comportam-se como sensíveis à fluidização, mas não se comportam como as aluminas.

O gráfico da figura 87 apresenta o comportamento de fluidização para os hidróxidos de magnésio.



Figura 87 - Resultados dos testes de fluidização para os hidróxidos de magnésio.

O Itamag 1100 fluidiza-se mais fácil que os demais compostos, com velocidade de fluidização de 1,5 mm/s, percebida pela estabilização na perda de carga, correspondente ao equílibrio de forças das partículas. Para os compostos Itamag 325 e Itamag ES, a velocidade de fluidização foi de 2,0 e 2,5 mm/s, respectivamente.

Para os hidróxidos de alumínio, representados na figura 88, é observado que o composto revestido com organosilicato, Itasil 2250 obtém sua estabilidade no balanço de forças em 0,5 mm/s, enquanto que o Hidraltex 635 ES, em 3,5 mm/s e o composto Hidraltex 635 fluidiza-se em 5 mm/s.



Figura 88 - Resultados do teste de fluidização para o hidróxido de alumínio.

Fonte: Autora.

A tabela 17 apresenta os valores de velocidade de fluidização compilados para os sólidos particulados estudados, adotando-se como critério para a determinação da velocidade mínima de fluidização, a condição em que a energia total aplicada sobre o pó aproximou-se de zero ou permaneceu constante e com baixos valores, indicando o equílibrio no balanço de forças nas partículas.

Amostra	Velocidade de fluidização (mm/s)	Energia na fluidização (mJ)
Alumina calcinada	$5,0 \pm 0,01$	126,36
Alumina fluoretada	$6,0 \pm 0,01$	204,05
Itamag 325	$2,0 \pm 0,40$	119,5
Itamag ES	$2,5 \pm 0,51$	79,6
Itamag 1100	$1,5 \pm 0,58$	35,1
Hidraltex 635	$3,5 \pm 0,43$	267,9
Hidraltex 635 ES	$4,0\pm0,74$	31,1
Itasil 2250	$0,5 \pm 0,23$	39,2
Caulim	$2,0 \pm 0,44$	152,3
Quartzo	$4,0 \pm 0,34$	178,7
Calcário	5,0 ± 0,36	151,1

Tabela 17 - Velocidade de fluidização de cada sólido particulado.

Dentre os hidróxidos de alumínio e magnésio é possível observar que os hidróxidos revestidos com organosilicato (Itasil 2250 e Itamag 1100), apresentam as menores velocidades de fluidização, isto pode ser justificado porque o organosilicato nos compostos inorgânicos desaglomera as partículas, formando compostos de menor tamanho e permite a passagem de ar pelas partículas do sólido, diminuindo a velocidade necessária para o pó fluidizar.

Os compostos de hidróxido de alumínio e magnésio sem revestimento, Hidraltex 635 e Itamag 325 apresentam as maiores velocidades de fluidização, podendo-se inferir que a ausência de revestimento dificulta a passagem do ar e as partículas apresentam poros confinados, que dificultam a passagem do ar.

Os compostos hidróxido de aluminio e hidróxido de magnésio revestidos com ácido graxo, aglomeram os compostos e formam poros confinados que, tal como observado no teste de permeabilidade, dificultam a passagem de ar e fluidizam-se em velocidades maiores.

Para o caulim, quartzo e calcário, observa-se que o composto com menor tamanho de partícula, o quartzo, apresenta maior velocidade de fluidização, enquanto o calcário, com maior tamanho de partícula apresenta a menor velocidade de fluidização. A partir destes dados, podese inferir que o calcário apresenta partículas com maior coesão quando comparada às demais, devido à formação de partículas que permitem que o ar flua pelo material.

Para as aluminas e os pós intermediários, nota-se que a velocidade para estes sólidos particulados fluidizarem é maior, apresentando maior dificuldade perante aos outros. Tal fato

pode ser justificado, devido ao tamanho das partículas e da interação entre as mesmas, dificultando a movimentação do ar nos espaços vazios presentes.

Para os hidróxidos de alumínio, magnésio e as aluminas, foi avaliado também o efeito da umidade na velocidade de fluidização. Para tanto, os pós foram submetidos à secagem em estufa por 24h a 80°C.

Os gráficos são apresentados nas figuras 89, 90 e 91 e é possível observar que houve diminuição das velocidades mínimas de fluidização, favorecendo-se a fluidização, provavelmente devido à quebra de ligações fortes como as ligações de hidrogênio entre as moléculas.



Figura 89 - Curva de fluidização em estufa dos hidróxidos de magnésio.

Fonte: Autora.



Figura 90 - Curva de aeração para os hidróxidos de alumínio submetidos a secagem.

Fonte: Autora.



Figura 91 - Curva de aeração para a alumina calcinada e fluoretada após secagem estufa.

Os resultados obtidos para todos os materiais estudados estão em acordo com as observações feitas por Freeman (2007), que definiu a razão de aeração (AR) para avaliar a sensibilidade do pó aos diferentes níveis de aeração. Freeman (2007) ainda afirma que este parâmetro AR (razão de aeração) é inversamente proporcional à coesão do material. Em outras palavras, pós que apresentam um elevado valor de AR, não apresentam comportamento coesivo.

Tabela 18 - Cálculo da razão de aeração.

Amostra	Razão de aeração (AR)	Classificação ¹
Alumina calcinada	263,63	Altamente sensível
Alumina fluoretada	169,78	Altamente sensível
Itamag 325	5,12	Mediano à fluidização
Itamag ES	6,67	Mediano à fluidização
Itamag 1100	9,13	Mediano à fluidização
Hidraltex 635	2,43	Mediano à fluidização
Hidraltex 635 ES	10,04	Mediano à fluidização
Itasil 2250	27,73	Altamente sensível
Caulim	5,12	Mediano à fluidização
Quartzo	4,08	Mediano à fluidização
Calcário	6,67	Mediano à fluidização

¹Freeman define AR = 1 não são sensíveis, entre 2 e 20 são medianos quanto à fluidização e superiores a 20 são altamente sensíveis. Fonte: Autora.

De acordo com a definição de Freeman (2007) e analisando a tabela 18, pode-se dizer que a alumina fluoretada, alumina calcinada e o Itasil 2250 são sensíveis à fluidização, podendo classificá-los como pós não coesivos e que fluidizam-se devido às baixas forças coesivas.

5.4 Leito Fluidizado

Os testes fluidinâmicos foram realizados em triplicatas observando-se razoável reprodutibilidade dos dados. As características do leito e das alturas utilizadas nos pós estão apresentadas na tabela 19.

Diâmetro (mm)	D	51,40
Altura do leito inicio (mm)	H_{LTQ}	88,10
Altura do leito dobro (mm)	H_{LD}	176,20
Altura do leito triplo (mm)	H_{LT}	264,30
Correlação inicio	$\mathrm{H}_{\mathrm{LTQ}}/\mathrm{D}$	1,714
Correlação dobro	H_{LD}/D	3,428
Correlação triplo	H _{LT} /D	5,142

Tabela 19 - Características do leito fluidizado empregado.

Fonte: Autora.

No apêndice VII são apresentados os gráficos de todos os ensaios realizados no leito fluidizado para cada sólido particulado estudado neste trabalho.

Como apresentado no apendice VII, para o gráfico da alumina fluoretada, a velocidade mínima de fluidização foi obtida pela intersecção da curva ajustada correspondente ao regime de leito fixo com a reta horizontal ajustada, correspondente ao regime totalmente fluidizado, considerando os dados obtidos no regime de defluidização da curva de queda de pressão versus a velocidade. Esse procedimento foi repetido para todos os pós, nas condições de início, dobro e triplo da altura do leito e foi calculado o valor médio da velocidade mínima de fluidização, cujos valores resumidos estão apresentados na tabela 20.

Amostra	Velocidade mínima de fluidização, mm/s
Alumina Fluoretada	48 ± 0.2
Alumina calcinada	24 ± 0.4
Itamag 325	56 ± 4
Itamag ES	5 ± 1
Itamag 1100	35 ± 2
Hidraltex 635	12 ± 0.5
Hidraltex 635 ES	12 ± 2
Itasil 2250	23 ± 3
Caulim	18 ± 2
Calcário	26 ± 2
Quartzo	37 ± 4

Tabela 20 - Velocidades de fluidização e defluidização para os sólidos particulados.

A partir dos resultados apresentados na tabela 20, os sólidos particulados de maior granulometria apresentam maiores valores de velocidade mínima de fluidização, tal fato foi também observado no teste de aeração do reômetro de pós. Isso acontece porque a energia necessária do fluido (neste caso, o ar) para vencer a altura do sólido particulado é maior que para os sólidos de menor tamanho. A maior energia gasta para os sólidos de maior granulometria é na etapa de leito fixo e, após este período, o sólido está na iminencia de fluidização.

A alumina calcinada apresentou a menor velocidade de fluidização e, é dentre as duas aluminas, a que apresenta o menor tamanho.

Para os hidróxidos de alumínio, observa-se que o composto Hidraltex 635 ES, revestido com ácido graxo, apresenta menor velocidade de fluidização enquanto Itasil 2250 apresenta velocidade intermediária. O resultado é distinto do obtido no teste de Freeman e diverge do resultado esperado ao observar a morfologia destas partículas.

Era esperado para o composto com maior tamanho de partícula (Hidraltex 635 ES – hidróxido de magnésio revestido com ácido graxo), maior velocidade de fluidização do que o composto com menor tamanho de partícula, visto que a energia que deve ser vencida para movimentar estes materiais é maior. Além disso, quando o hidróxido de alumínio foi revestido com organosilicato (Itasil 2250) houve desaglomeração e a formação de inúmeras partículas pequenas, sendo necessária uma menor energia do fluido (ar) para fluidizar este material, apresentando menor velocidade de fluidização.

Para os hidróxidos de magnésio, o composto revestido com ácido graxo apresenta a menor velocidade (Itamag ES) e o composto tal qual apresenta a maior velocidade (Itamag 325). O resultado é distinto do obtido no teste de Freeman e diverge do resultado esperado ao observar a morfologia destas partículas. Era esperado para o composto com maior tamanho de partícula, maior velocidade de fluidização do que o composto com menor tamanho de partícula. Além disso, o revestimento de organosilicato (Itamag 1100) favorece a formação de inúmeras partículas pequenas, o que torna o material mais fácil de permear e, consequentente, apresentaria menor velocidade de fluidização.

Para o caulim, quartzo e calcário é observado que o quartzo, de menor tamanho de partícula, apresenta a maior velocidade de fluidização, enquanto que o caulim, com maior tamanho de partícula apresenta menor velocidade de fluidização. Isto pode ser justificado pela morfologia das partículas. O caulim apresenta maior poros livres para o ar permear enquanto que o quartzo, por haver irregularidade no tamanho, impede a passagem do ar por dentre as partículas, formando poros confinados.

Os resultados obtidos no ensaio do leito fluidizado foram bem distintos, em termos de ordem de grandeza, dos resultados de velocidade obtidos no equipamento de reômetro de pós. Para facilitar esta comparação, ambos resultados experimentais das velocidades mínimas de fluidização estão compilados na tabela 21.

Amostra	Velocidade de fluidização (mm/s)	Velocidade de fluidização (mm/s)	Energia na fluidização (mJ) Reômetro (FT4)	Relação entre $V_{mf \ leito}/V_{mf \ FT4}$	
	Leito fluidizado	Reometro (FT4)			
Alumina calcinada	$48 \pm 0,2$	$5,0\pm0,01$	126,36	9,6	
Alumina fluoretada	$24 \pm 0,4$	$6,0 \pm 0,01$	204,05	4,0	
Itamag 325	56 ± 4	$2,0 \pm 0,40$	119,5	28,0	
Itamag ES	5 ± 1	$2,5 \pm 0,51$	79,6	2,0	
Itamag 1100	35 ± 2	$1,5 \pm 0,58$	35,1	23,3	
Hidraltex 635	$12\pm0,5$	$3,5 \pm 0,43$	267,9	3,4	
Hidraltex 635 ES	12 ± 2	$4,0\pm0,74$	31,1	3,0	
Itasil 2250	23 ± 3	0,5 ± 0,23	39,2	46,0	
Caulim	18 ± 2	$2,0 \pm 0,44$	152,3	9,0	
Quartzo	26 ± 2	$4,0 \pm 0,34$	178,7	6,5	
Calcário	37 ± 4	$5,0 \pm 0,36$	151,1	7,4	

Tabela 21 - Comparação dos resultados do Reômetro de pós e o leito fluidizado.

A partir da observação dos dados da tabela 21, é verificado que quanto maior a relação entre a velocidade do leito e velocidade obtida no FT4, menor a energia obtida na fluidização no reômetro de pós. Isto ocorreu porque nesses sólidos particulados, a energia que foi necessária vencer a barreira de leito fixo foi muito maior que nos demais, considerados de fácil fluidização. O reômetro de pós não considera a barreira de leito fixo, porque o teste é feito sob agitação e injeção simultânea de ar. Dessa forma, nos compostos de alta granulometria e de difícil permeabilidade, como caulim, quartzo, calcário, hidroxido de magnésio sem revestimento (Itamag 325) e hidróxido de alumínio sem revestimento (Hidraltex 635), a energia necessária para vencer a barreira de leito fixo é muito maior e, a velocidade de fluidização obtida no reômetro de pós seria maior quando considerada essa condição. O leito fluidizado não elimina esta condição e, por isso, altos valores da velocidade mínima de fluidização.

Para os compostos revestidos com organosilicato, Itasil 2250 e Itamag 1100, obteve-se a maior relação entre as velocidades, mostrando-se que houve grande diferença entre os dados do leito fluidizado e do reômetro de pós.

Para os hidróxidos de aluminio e magnésio revestidos com ácido graxo, a relação mostra que houve disparidade entre os dados do leito fluidizado e do reômetro de pós, entretanto a diferença de dados é de 2 a 3 vezes maior.

5.5 Comparativo dos resultados com a literatura

A tabela 22 apresenta todos os parâmetros obtidos de cada sólido particulado estudado.

A partir do diâmetro das partículas, da densidade do fluido (ar = ρ_f = 1,201 kg/m³), da viscosidade dinâmica do ar ($\mu_f = \mu_{ar} = 1x10^{-6}Pa.s$), densidade da partícula, aplicou-se a equação (9) e calculou-se o número de Arquimedes para cada sólido particulado.

O número de Arquimedes foi substituído nas equações de (11) a (18) apresentadas na tabela 2, obteve-se o número de Reynolds e, rearranjando a equação (10), calculou-se a velocidade mínima de fluidização teórica para cada sóldio particulado.

Estas velocidades mínimas de fluidização teóricas, juntamente com os resultados experimentais do leito fluidizado e do reômetro de pós, são apresentados graficamente pelas figuras 92 a 95.

Amostras	d _p (μm)	ρ _p (g/cm³)	Class. Gerdart	Energia básica de fluxo (mJ)	Indice de estabilidade , SI	Indice de Fluidez, FRI	Densidade consolidada (g/cm³)	Compressibilidade a 15 kPa (%)	Permeabilidade a 15 kPa, mBar	Razão de Aeração, AR	Porosidade
Itamag 325	10,93	2,3461 ± 5,00E-04	С	$507,74\pm5$	$1,\!44 \pm 0,\!02$	$2,\!46\pm0,\!01$	$0,\!68\pm0,\!09$	$21,8 \pm 1,00$	4,03 ± 1,31	9,13	0,708
Itamag ES	11,77	$2,3205 \pm 9,00\text{E-}04$	С	$495{,}04\pm4$	$1,\!60\pm0,\!09$	$2{,}29\pm0{,}01$	$0,\!77\pm0,\!01$	25,3 ± 1,20	8,66 ± 1,84	6,67	0,67
Itamag 1100	9,49	$2,3905 \pm 5,00\text{E-}04$	С	517,96 ± 29	$2,\!23\pm0,\!04$	$2,\!23\pm0,\!03$	$0,\!89\pm0,\!02$	$17,9\pm0,50$	$1,\!08\pm0,\!03$	5,12	0,628
Hidraltex 635	7,36	$2,4148 \pm 1,40\text{E-03}$	С	$686,22 \pm 5$	$1,\!27\pm0,\!03$	$2,\!19\pm0,\!04$	$0,\!69\pm0,\!01$	$26,8 \pm 1,28$	$104,71 \pm 2,30$	27,73	0,714
Hidraltex 635 ES	9,20	$2,3449 \pm 7,00\text{E-}04$	С	$390,42 \pm 19$	$1,\!35\pm0,\!01$	$2,21 \pm 0,14$	$0,\!83\pm0,\!01$	$22,\!2\pm0,\!09$	$3,33\pm0,35$	10,04	0,644
Itasil 2250A	7,14	$2,4017 \pm 1,20\text{E-}03$	С	400,64 ± 3	$1,\!83\pm0,\!02$	$1,\!92\pm0,\!01$	$0,\!87\pm0,\!02$	$19,70\pm0,8$	$0{,}44\pm0{,}07$	2,43	0,639
Alumina Calcinada	91,81	3,2644 ± 4,00E-04	В	2251,74 ± 76	$1,17 \pm 0,12$	1,04± 0,07	$1,04 \pm 0,01$	$1,88 \pm 0,07$	$5,14 \pm 0,15$	263,6	0,682
Alumina Fluoretada	100,7	2,4004 ± 4,00E-04	В	$2983,78 \pm 58$	1,11 ± 0,04	1,00 ± 0,03	1,36 ± 0,09	$2,\!38\pm0,\!07$	3,71 ± 0,16	169,78	0,434
Quartzo	23,88	$2,6089 \pm 4,00\text{E-}04$	А	$971,24 \pm 3$	$1,\!17\pm0,\!02$	$2{,}30\pm0{,}00$	$1,\!04\pm0,\!03$	$17,89 \pm 0,9$	97,62 ± 1,19	4,08	0,601
Calcário	25,89	$2,7545 \pm 1,00\text{E-}04$	А	927,68 ± 26	$1,\!22\pm0,\!01$	$2,31 \pm 0,02$	$0,\!98\pm0,\!03$	$19,69 \pm 0,8$	89,81 ± 2,43	6,67	0,646
Caulim	3645	2,6817 ± 2,50E-04	А	$662,6\pm7$	$1{,}29\pm0{,}03$	$2,\!42\pm0,\!02$	$0,55\pm0,02$	$27,26 \pm 0,5$	96,4 ± 0,62	5,12	0,795

Tabela 22 - Propriedades obtidas dos sólidos particulados estudados.

Fonte: Autora.



Figura 92 - Velocidades mínima de fluidização dos hidróxidos de magnésio, em mm/s

Fonte: Autora.



Figura 93 - Velocidades mínima de fluidização dos hidróxidos de alumínio, em mm/s



Figura 94 - Velocidades mínima de fluidização das aluminas, em mm/s

Fonte: Autora.



Figura 95 - Velocidades mínima de fluidização dos compostos intermediários, em mm/s.

Pode-se observar que as correlações das equações de Pillai e Raja Rao, de Tannous e de Barbosa et al, apresentaram resultados bem distintos para os hidróxidos de aluminio e magnésio quanto comparados aos resultados do leito fluidizado e do reômetro de pós. Para as aluminas calcinada, fluoretada, caulim, calcário e quartzo, apenas a equação de Pillai e Raja Rao apresentou resultado de velocidade mínima de fluidização divergentes dos demais.

A correlação de Tannous (1993) apud Campos (2012) foi desenvolvida para sólidos particulados do Grupo D de Geldart, ou seja, compostos grandes e de fácil fluidização. E, ao verificarmos os gráficos, observa-se que esta correlação não apresenta resultados satisfatórios para as partículas finas estudadas neste trabalho, tal como hidróxidos de alumínio, hidróxidos de magnésios e compostos com tamanho de partícula inferior a 50 μ m e representa uma boa correlação para as aluminas (partículas > 100 μ m).

Segundo Campos (2012), a correlação de Pillai e Raja Rao, foi desenvolvida para sólidos binários de partículas de diâmetro superior a 450 µm. Isto justifica o porquê desta correlação não ser satisfatória para nenhum dos sólidos estudados neste trabalho.

De acordo com Silva (2011) a correlação de Barbosa foi desenvolvida para misturas de sólidos de tamanhos de partículas grandes. Dessa forma, não se demonstrou como uma boa correlação para os sólidos de pequenos tamanhos estudados neste trabalho (hidróxidos de alumínio e magnésio), porém é uma correlação que atende aos compostos de tamanho intermediário e aluminas.

A correlação de Coltter e Rivas (2004) que não leva em consideração a porosidade do leito, não é uma boa correlação para os sólidos particulados estudados neste trabalho, porque as interações particulares e a porosidade influenciam nas interações interparticulares e, de certa forma, na velocidade de fluidização.

A correlação de Delebarre (2004), que considera a porosidade do leito particulado é que a mais se aproxima dos valores obtidos de velocidade de fluidização no reômetro de pós para os sólidos particulados de tamanho de partícula inferior a 50 μ m. Entretanto, não é uma boa correlação para partículas como as aluminas, de diâmetro entre 90 – 100 μ m.

O leito fluidizado não é o melhor equipamento para a obtenção da velocidade mínima de fluidização para partículas pequenas com tendência a aglomerar. Porque durante os experimentos, foi observado que o regime estabelecido era to tipo caminho preferencial, borbulhante e/ou slug.

Entretanto, o método tradicional é eficiente para partículas de tamanho grande, e o regime de fluidização estável foi perfeitamente observado durante os experimentos. Nesse caso, os efeitos das interações interparticulares podem ser desprezados, pois a força peso das partículas grandes é superior a qualquer outra natureza de interação que possa existir no leito.

Tal fato é comprovado ao avaliarmos os resultados obtidos para as aluminas calcinada e fluoretada.

Assim, podemos concluir que os valores das velocidades mínimas de fluidização obtidos experimentalmente, a partir do leito fluidizado e do reômetro de pós são diferentes, pois os regimes e condições de fluidização obtidos para cada experimento foi diferente. O leito fluidizado considera todas as etapas do regime de fluidização, enquanto no reômetro de pós, a lâmina movimenta as partículas, desconsiderando a etapa de leito fixo e que é a energia necessária para o ar vencer a barreira do sólido particulado. Devido a isso, são observadas grandes diferenças nas velocidades mínimas de fluidização obtidas entre estes equipamentos.

No caso do reômetro de pós, a lâmina tende a movimentar as partículas durante a fluidização, homogeneizando a distribuição do ar, resultando em valores de velocidades mínimas de fluidização, inferiores. No leito fluidizado, o ar injetado deveria vencer a barreira de leito fixo, para então iniciar o processo de fluidização, tal fato não ocorre no reômetro de pós e é esse o maior motivo da diferença de resultados entre os equipamentos.

Pode-se comprovar a existência de interações interparticulados também pelo fato de que, a fundamentação teórica nos diz que, no momento em que é atingido a velocidade mínima de fluidização, a energia diminui, tendendo a zero o que corresponde à ausência de interações interparticulados. Entretanto, os resultados experimentais obtidos no reômetro de pós mostram que, quando atingida a velocidade mínima de fluidização para os sólidos particulados considerados coesivos, ainda existiam interações particulares, visto que a energia obtida não estabilizou em zero, sendo necessária maior velocidade para fluidizar o leito fixo.

Dessa forma, a existência de interações interparticulares e das condições de testes de fluidização entre os equipamentos, justifica-se a diferença nos resultados obtidos de velocidade mínima de fluidização para os sólidos particulados estudados neste trabalho.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foi possível realizar uma ampla caracterização das amostras estudadas. A medida que as características eram medidas, novas conclusões e observações condizentes com as anteriores foram posturladas. Entretanto, observar uma variação ou efeitos proporcionais com todas as propriedades listadas a um dado comportamento mostrou não ser uma tarefa fácil, devido ao grande número de propriedades exploradas. Mas as principais observações são apresentadas a seguir.

Os compostos com maior tamanho de partícula, apresentaram boa permeabilidade, altas taxas de compressão, pequena coesão, sendo possível a determinação da velocidade mínima de fluidização por correlações matemáticas, tal como Barbosa et al e Tannous, bem como pelo leito fluidizado clássico. Esses compostos apresentam baixa interação interparticular, com morfologia bem definida.

Os compostos de hidróxido de magnésio e alumínio, de tamanho entre 9 e 11µm, ao serem revestidos com ácido graxo, formam aglomerados, observado no MEV, porém, tal recobrimento, não permite maior permeabilidade e fluidez do material, podendo-se considerar o poro como confinado.

Ao revestir os hidróxidos de magnésio e alumínio com organosilicato é observado uma desaglomeração das partículas, havendo um maior número de partículas de tamanho pequeno e irregulares. Permite maiores taxas de compressibilidade, de permeabilidade, podendo-se dizer que são compostos de fácil fluidez, tornando-os de fácil fluidez.

Os hidróxidos de alumínio e magnésio sem recobrimento (Hidraltex 635 e Itamag 325) apresentam inúmeras partículas irregulares. A ausência de revestimento dificulta a fluidez do material tal como observado em baixas taxas de permeabilidade e compressibilidade.

As aluminas calcinada e fluoretada apresentam tamanhos bem definidos, enquanto caulim, calcario e quartzo apresentam pequenas partículas e de tamanho intermediário entre as aluminas e os hidróxidos de aluminio e magnésio.

Os compostos intermediários em tamanho apresentam altas taxas de compressão, permeabilidade crescente com a pressão aplicada e são considerados coesivos. Tal fato é obtido devido ao grande número de partículas pequenas, que permite com que o ar permeie o material, comprimindo-os e permeando-os facilmente. Apresentam certo grau de interação interparticular, comprovado pela não obtenção da energia igual a zero quando dos testes de aeração via reometro de pós.

Exceto para as aluminas calcinada e fluoretada, nos gráficos de aeração gerados no reômetro, é observado que a energia, quando do atingimento da condição de leito fluidizado, não é zero, como previsto teoricamente e, isso é devido às interações entre as partículas.

Dessa forma, pode-se concluir que os compostos de baixo tamanho de partícula, (inferiores a 50 µm) apresentam forte influência das interações interparticulares, que afetam diretamente o comportamento do material quando submetidos aos testes de fluidização.

Além da existência de interações interparticulares nos compostos estudados neste trabalho, houve diferença na metodologia para a detrminação da velocidade mínima de fluidização. O teste realizado no reômetro de pós não considera a etapa de leito fixo, que é essencial para iniciar a fluidização. O leito fluidizado, apesar de ser totalmente manual, realiza todas as etapas do regime de fluidização.

É possível dizer que o leito fluidizado é satisfatório para descrever o comportamento das partículas de maior tamanho, como visualizado neste trabalho. Entretanto, para partículas de forte interação interparticular, o reômetro de pós descreve satisfatoriamente o comportamento dessas partículas.

As correlações matemáticas estudadas neste trabalho não consideraram os efeitos das partículas e isto é percebido, visto que nenhuma dentre todas as correlações descreveram bem os sólidos particulados de tamanho de partícula inferior a 50µm.

Para melhor comparação entre os métodos do leito fluidizado clássico e do reômetro de pós, seria necessária a realização do teste de aeração no reômetro (FT4) sem a agitação do impelidor. Tal metodologia iria gerar velocidades superiores, porque seria necessário o vencimento da barreira de leito fixo.

Pode-se dizer que compostos de alta coesão e finos sofrem influências das interações interparticulares, que devem ser consideradas, quando realizados testes de fluidização. O leito fluidizado clássico não é a metodologia mais recomendada para a determinação da velocidade mínima de fluidização.

REFERÊNCIAS

ALCOA. **Alumina Calcinada.** Disponível em: https://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/download/alumina_calcinada/APC.pdf. Acesso em: 20 set. 2016.

ANVISA. Tabela de equivalência de abertura de malha e tamis. 2010. Disponível em: <<u>http://www.anvisa.gov.br/hotsite/farmacopeiabrasileira/arquivos/cp38_2010_anexos/tabela_</u>equivalencia_abertura_malha_tamis.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2016.

BATISTA, C. S.. Estudo teórico e experimental do fluxo de sólidos particulados em silos verticais. 2009. 99 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Processos, Area de Desenvolvimento de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009. Disponível em: http://www.prodep.cct.ufcg.edu.br/teses/Claudia_SB_2010.pdf>. Acesso em: 30 maio 2016.

BETENHEUSER, C.; FERREIRA, C. R.; OLIVEIRA, O. T. C.. **Explosão de pó em unidades armazenadores e processadoras de produtos agrículas e seus derivados** – Estudo de caso. 2005. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Segurança no Trabalho, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2005.

CAETANO, M.. Tamanho das Partículas e sua distribuição. 2014. Disponível em: http://ctborracha.com/?page_id=3592>. Acesso em: 20 jun. 2016.

CAMPOS, M. Análise de escoabilidade de pós. 2012. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012. Disponível em: http://www.bdtd.ufscar.br/htdocs/tedeSimplificado//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=50 31>. Acesso em: 05 maio 2016.

COLTTERS, R.; RIVAS, A.I. Minimum fluidation velocity correlations in particulate systems. **Powder Technology**, [s.l.], v. 147, n. 1-3, p.34-48, out. 2004. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2004.06.013.

CONDOTTA, R.. **Coulabilité des poudres cohésives:** mesures aux faible contraintes, granulaires humides et application a une poudre industrielle. 2005. 200 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Processos Químicos, Inp Toulose, Toulose, 2005.

COOKE, J.; FREEMAN, R.; **The Flowability of powders and the effect of flow additives**. In: WORLD CONGRESS ON PARTICLE TECHNOLOGY, 5., 2006, Orlando. Anais. Orlando: Freeman Technology, 2006. p. 1 - 12. Disponível em: <http://www.freemantech.co.uk/literature/conference

papers/The_flowability_of_Powders_and_the_effect_of_flow_additives_WCPT_2006_2.pdf> . Acesso em: 06 jul. 2016.

CREMASCO, M. A.; **Operações Unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos.** São Paulo: Blucher, 2012.

DELEBARRE, A. Revisiting the WEN e YU equations for minimum fluidization velocity prediction. Chemical Engineering Research And Design, Nantes, v. 5, n. 82, p.587-590, maio 2004.

DIERICH, F.; NIKRITYUK, P.A.; A numerical study of the impact of surface roughness on heat and fluid flow past a cylindrical particle. International Journal Of Thermal Sciences, [s.l.], v. 65, p.92-103, mar. 2013. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.08.009.

ESCUDERO, D. R. **Bed height and material density effects on fluidized bed hydrodynamics.** 2010. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Graduate Theses And Dissertations, Iowa State University, Iowa, 2010. Disponível em: http://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2653&context=etd. Acesso em: 12 nov. 2016.

FOUST, A. S. et al. **Princípios das Operações Unitárias.** 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008. 670 p.

FREEMAN, T.. An introduction to uniaxial shear testing. 2015. Disponível em: http://www.freemantech.co.uk/literature/articles/An Introduction to Uniaxial Shear Testing_PBE_Dec 2015.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2016.

FREEMAN, T.; Process relevant powder characterization: a powerful tool for development and troubleshooting. 2007. Disponível em: http://www.freemantech.co.uk/literature/articles/Process_Relevant_powder_characterisation _a_powerful_tool_for_development_and_troubleshooting-LAF200A-E.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2016.

FURIERI, B.; CASTILHO, L. B.; Elaboração de projetos de aperfeiçoamento do sistema de controle de material particulado em uma unidade industrial: processamento final do cimento Portland. 2009. 147 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.

GARCIA, H. L.. Formulação matemática dos fenômenos de segregação e mistura de partículas sólidas polidispersas em leito fluidizado gasoso. 1996. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Processos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

GAUTHIER, D.; ZERGUERRAS, S.; FLAMANT, G;. Influence of the particle size distribution of powders on the velocities of minimum and complete fluidization. Chemical Engineering Journal, [s.l.], v. 74, n. 3, p.181-196, jul. 1999. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/s1385-8947(99)00075-3. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894799000753>. Acesso em: 12 jun. 2016.

GENEHR, G. A.; Caracterização da fluidização de biomassas de casca de madeiras em leitos polidispersos. 2015. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2015.

GOMIDE, R.. **Operações Unitárias:** 1º volume: operações com sistemas sólidos granulares. São Paulo, 1980.

GUPTA, S.k. et al. **Prediction of minimum fluidization velocity for fine tailings materials**. Powder Technology, [s.l.], v. 196, n. 3, p.263-271, dez. 2009. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2009.08.003.

HORIBA. **A Guidebook to particle size analysis.** Disponível em: https://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/eMag/PSA/Guidebook/pdf/PSA_Guidebook.pdf>. Acesso em: 03 maio 2016.

JILIANG, M.; XIAOPING, C.; DAOYIN, L.. Minimum fluidization velocity of particles with wide size distribution at high temperatures. Powder Technology, [s.l.], v. 235, p.271-278, fev. 2013. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2012.10.016.

KRANTZ, M.; ZHANG, H.; ZHU, J.; Characterization of powder flow: Static and dynamic testing. Powder Technology, [s.l.], 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. 2. ed. Stoneham: Butterworth-
heineman, 1991. 491 p. Disponível em:
<https://books.google.com.br/books?id=sGkvBQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-
BR#v=onepage&q&f;=false>. Acesso em: 26 abr. 2016.

LEWIS, A. et al; Industrial Crystallization: Fundamentals and Applications. United Kingdom: Cambridge, 2015.

LI, H.; **Impact of cohesion forces on particle mixing and segregation.** 2005. 125 f. Tese (Doutorado) - Curso de School Of Engineering, University Of Pittsburg, Pittsburg, 2005.

LOPES NETO, J.P.; SILVA, V. R. da; NASCIMENTO, J. W. B. do. **Propriedades de fluxo de produtos pulverulentos alimentícios.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 13, n. 5, p.639-644, out. 2009. UNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662009000500018.

LOPES NETO, J.P. et al; **Propriedade de fluxo e característica de escoabilidade de rações avícolas para dimensionamento de silos**. Ciência e Agrotecnologia, [s.l.], v. 31, n. 3, p.851-859, jun. 2007. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s1413-70542007000300035. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-70542007000300035>. Acesso em: 05 maio 2016.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P.. Unit Operations of Chemical Engineering. 5. ed. New York: Mcgraw Hill, 1993.

MCGLYNCHEY, D.; **Bulk Solids Handling:** Equipment Selection and Operation. Glasgow: Blackwell Publishing, 2008. 303 p.

MICROMETRICS (Org.). Accupyc 1340. Disponível em: http://micrometics.com.br/site/produtos/densidade/accupyc-ii-1340/. Acesso em: 27 jun. 2016.

MILANI, A. P.;Determinação das propriedades de produtos armazenados para o projeto de pressões e fluxo em silos. 1993. 272 f. Tese (Doutorado) - EESC, Usp, São Carlos, 1993.

MOTTA, E. P.; **Queda de pressão em um leito de partículas de xisto:** avaliação de modelos para distribuição granulométrica e diâmetros médios equivalentes, estudo do efeito da altura do leito e da avaliação de modelos para predição da queda de pressão. 2009. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Quimica, Engenharia Química, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2009. Disponível em: http://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/22634/Relatorio Dissertação - Eder v5.3x.pdf?sequence=1>. Acesso em: 09 jun. 2016.

NITZ, M.; Fluidodinâmica, Secagem e recobrimento em leito pulso-fluidizado. 2006. 212 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Processos, Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

OLIVEIRA JUNIOR, J. M. et al; **Projeto e construção de um picnômetro a ar para caracterização de insumos e produtos farmacêuticos**. Química Nova, [s.l.], v. 33, n. 6, p.1384-1388, 2010. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422010000600029

PALMA, G.; **Pressões e fluxos em silos esbeltos.** 2005. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Engenharia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

PAPINI, C. J.; Estudo comparativo de métodos de determinação do tamanho da partícula. 2003. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências na Área de Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2003.

PAPINI, C. J.; LEAL NETO, R. M.; Análise granulométrica de pós metálicos por difração de laser via secas. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. 17. 2006, Foz do Iguaçu. **Anais.** São Paulo: Ipen, 2006. p. 5024 - 5035. Disponível em: https://www.ipen.br/biblioteca/2006/cbecimat/12576.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2016.

PATIL, K. D.; Mechanical Operations: Fundamental Principles and Applications. 2nd. ed. Mumbai: Pragati Book Corner, 2008.

PRESCOTT, J. K.; BARNUM, R. A.; On powder flowability. **Pharmaceutical Technology**, Westford, v. 60, p.60-85, out. 2000.

QUANTACHROME (Comp.). Autotap and Dual Autotap. Disponível em: http://www.quantachrome.com/density/autotap.html. Acesso em: 27 jun. 2016.

RHODES, M.; Introduction to particle technology. 2nd. ed. Chippenham: Wiley, 2008. 450 p.

RIBEIRO, M. S.. Estudo fluidinamico de um leito fluidizado pulsado rotativo com partículas secas e úmidas. 2005. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Quimica, Engenharia de Processos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

RIVAS, E. O.; Unit Operations of particulate solids: theory and practice. Boca Raton: Crc Press, 2012. 492 p.

SANDLER, N. et al.; Effect of Moisture on Powder Flow Properties of Theophylline. **Pharmaceutics**, [s.l.], v. 2, n. 3, p.275-290, 2 jul. 2010. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/pharmaceutics2030275.

SANTOS, E. S. dos. **Estudo dos fenômenos de mistura e segragação em leitos fluidizados de partículas polidispersas.** 1997. 185 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Quimica, Engenharia de Processos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

SANTOS, T. M. dos. **Estudo da defluidização, segregação e caos de misturas binárias areia-serragem em leito fluidizado borbulhante.** 2015. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecanica, Universidade Tecnologica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015.

SAU, D.C.; MOHANTY, S.; BISWAL, K.C.; Minimum fluidization velocities and maximum bed pressure drops for gas–solid tapered fluidized beds. **Chemical Engineering Journal**, [s.l.], v. 132, n. 1-3, p.151-157, ago. 2007. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2007.01.036.

SCHULTZE, D.; Flow Properties of Powder and Bulk Solids. Braunschweig/wolfenbu["]ttel: University Of Applied Sciences, 2006. Disponível em: http://www.dietmar-schulze.de/grdle1.pdf>. Acesso em: 08 maio 2016.

SCHULZE, D.; **Powders and Bulk Solids:** Behavior, Characterization, Storage and Flow. Nova Iorque: Springer, 2008. 473 p.

SEVILLE, J.; TUZUN, U.; CLIFT, R.; **Processing of particulate solids.** London: Chapman & Hall, 1997.

SILVA, J. B. da; Hidrodinâmica da fluidização de biomassa e inertes em leito fluidizado. 2011. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Engenharia Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011. Disponível em: <http://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/27646/R - D - SILVA, JULIANA BISCAIA DA.pdf?sequence=1>. Acesso em: 10 jun. 2016.

SILVA, S. P. da. **Caulim.** Disponível em: http://www.dnpm.gov.br/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001-caulim. Acesso em: 20 set. 2016.

STASIAK, M.; MOLENDA, M.; Direct Shear testing of flowability of foof powders. **Institute** of Agrophysics: Polish Academy of Scientes. Lublin, p. 6-10. jan. 2004.

SUBRAMANI, H. J.; BALAIYYA, M.B.; MIRANDA, L. R.. Minimum fluidization velocity at elevated temperatures for Geldart's group-B powders. **Experimental Thermal And Fluid Science,** [s.l.], v. 32, n. 1, p.166-173, out. 2007. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2007.03.003.

TANNOUS, K.; HEMATI, M.; LAGUERIE, C. Hydrodynamic characteristics of fluidezbeds containing large polydispersed particles.Brazilian Journal Of Chemical Engineering,[s.l.], v. 15, n. 1, p.1-12, mar. 1998.FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s0104-66321998000100007.Disponível<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-66321998000100007>.Acesso em: 07 jun. 2016.

VASCONCELOS, P. D. S. de. **Transporte pneumático fluidizado:** Estudos de casos aplicados à industria do alumínio primário. 2011. 215 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Recursos Naturais, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011. Disponível em: <<u>http://proderna.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/teses/Paulo.pdf</u>>. Acesso em: 10 maio 2016.

VASCONCELOS, P. D. S de; MESQUITA, A. L. A.; Gas-Solid Flow Applications for Powder Handling in Industrial Furnaces Operations. **Heat Analysis And Thermodynamic Effects**, [s.l.], p.211-234, 22 set. 2011. InTech. <u>http://dx.doi.org/10.5772/22393</u>.

WOODCOOK, C. R.; MASON, J.S.;. **Bulk Solids Handling:** An introduction to the practice and technology. Glasgow: Chapman & Hall, 1987.
APENDICE A – CURVAS DE GRANULOMETRIA

Gráficos da distribuição do tamanho de partícula



Itamag 325 – Hidróxido de Magnésio sem revestimento



Itamag ES - Hidróxido de Magnésio revestido com ácido graxo de cadeia longa

Summary Data MV(um): 11,77



Itamag 1100 - Hidróxido de Magnésio revestido com organosilicato

Summary DataMV(um):9,49

Hidraltex 635 - Hidróxido de Alumínio sem revestimento



Fonte: Autora

MV(um): 7,36



Hidraltex 635 ES - Hidróxido de Alumínio revestido com ácido graxo de cadeia longa

Summary Data 9,20 MV(um):



Itasil 2250 - Hidróxido de Alumínio revestido com organosilicato







Fonte: Autora











Summary DataMV(um):25,89



Summary DataMV(um):23,88







APENDICE B – RESULTADOS DE ENERGIA BÁSICA DE FLUXO (BFE) DO REÔMETRO DE PÓS

A seguir são apresentados os resultados da energia básica de fluxo para todos os materiais estudados. Foram realizados testes em duplicata (teste 1 e 2) e, a partir dos resultados obtidos no software FT4, foi calculado o valor médio de BFE para cada sólido particulado, o desvio padrão e o erro a incerteza da medida. No teste de BFE é obtida o índice de friccção (FRI), que caracteriza a resistencia ao movimento de cada partícula devido à fricção. Observa-se que são necessárias maiores energias para fluir para os compostos com menores índices de friccção (alumina calcinada, alumina fluoretada, calcário, quartzo e caulim).

Teste	Alumina Calcinada	Alumina Fluoretada	Calcário 325	Caulim	Quartzo
1	2327,24	2926,17	902,01	655,93	967,81
2	2176,24	3041,39	953,36	669,27	974,66
Média	2251,74	2983,78	927,68	662,60	971,24
Estufa	1865,79	2052,72	NC	NC	NC
Desvio padrão	75,50	57,61	25,68	6,67	3,42
Erro	0,03	0,02	0,03	0,01	0,00
1	0,97	1,03	2,33	2,45	2,30
2	1,11	0,97	2,29	2,41	2,31
media	1,04	1,00	2,31	2,43	2,30
Desvio padrão	0,07	0,03	0,02	0,02	0,00

Tabela 23 - Resultados obtidos no teste de BFE consolidado para os sólidos particulados estudados obtidos no FT4.

Teste	Hidraltex 635	Hidraltex 635 ES	Itasil 2250	Itamag 1100	Itamag 325	Itamag ES
1	691,11	371,80	403,85	546,70	512,59	490,94
2	681,34	409,05	397,43	489,22	502,89	499,14
Média	686,22	390,42	400,64	517,96	507,74	495,04
Estufa	513,93	321,46	297,20	329,69	459,67	393,55
Desvio padrão	4,88	18,62	3,21	28,74	4,85	4,10
Erro	0,01	0,05	0,01	0,06	0,01	0,01
1	2,22	2,35	1,93	2,27	2,45	2,30
2	2,15	2,07	1,91	2,19	2,46	2,29
media	2,19	2,21	1,92	2,23	2,46	2,29

	Alumina	Calcinada	Alumina	Fluoretada	Calc	cário	Cai	ılim	Qua	rtzo
Teste	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1,00	1798,0	2088,1	2543,5	2821,3	818,7	845,4	737,9	788,0	495,4	458,3
2,00	1940,3	2209,6	2678,7	2895,5	880,8	944,5	848,3	909,7	579,8	526,3
3,00	2185,9	2317,8	2667,7	3076,5	921,0	978,6	878,2	937,0	612,3	553,3
4,00	2318,3	2220,6	2777,2	3068,1	938,7	981,5	907,3	948,2	628,3	564,7
5,00	2257,2	2391,2	2831,8	2948,0	949,5	985,3	901,5	937,5	637,6	569,8
6,00	2277,7	2276,2	2760,6	3151,5	972,3	962,4	918,3	951,9	643,6	583,4
7,00	2327,2	2176,2	2926,2	3041,4	967,8	974,7	902,0	953,4	655,9	579,3
8,00	2394,2	2244,4	2871,4	3165,7	982,6	977,7	902,4	945,4	666,9	587,4
9,00	2173,3	2112,7	2749,3	2883,5	1140,1	1146,4	1068,2	1121,8	761,5	683,4
10,00	2407,5	2450,8	3038,8	3166,5	1501,0	1501,6	1370,7	1454,9	996,2	874,6
11,00	2322,8	2497,5	2948,3	3061,8	2260,8	2254,6	2099,6	2166,8	1634,5	1417,8

Tabela 24 - Dados obtidos nos testes em duplicata para os sólidos particulados estudados.

	Hidral	tex 635	Hidralte	ex 635 ES	Itasil	2250	Itama	ng 325	Itama	ag ES
Teste	1	2	1	1	2	1	2	1	2	2
1,00	593,8	503,4	272,7	363,8	395,2	383,0	343,5	346,3	348,9	305,1
2,00	655,4	568,2	321,8	436,2	497,0	431,8	421,2	412,8	412,8	362,3
3,00	660,1	595,5	349,8	466,7	549,7	459,1	447,4	469,1	451,0	379,7
4,00	687,4	596,3	360,6	489,9	553,4	479,5	489,4	509,7	487,8	388,1
5,00	687,0	610,6	369,5	518,9	578,6	489,4	500,5	518,4	467,5	398,0
6,00	685,6	628,7	368,7	504,4	574,4	493,6	522,8	546,7	490,7	401,4
7,00	691,1	625,3	371,8	512,6	577,5	490,9	517,3	546,7	489,2	409,0
8,00	689,8	627,5	381,9	521,6	599,4	485,8	512,7	554,5	506,4	402,8
9,00	794,0	733,3	429,8	590,9	652,2	548,3	586,6	641,7	559,1	459,0
10,00	961,4	882,4	508,8	717,2	780,3	655,9	689,1	760,6	658,4	523,8
11,00	1534,3	1351,0	897,1	1276,8	1353,5	1110,0	1178,7	1261,2	1110,1	833,1

	Itama	ng 325	Itama	ng ES	Itama	g 1100
Teste	1	2	1	2	1	2
1,00	363,8	395,2	383,0	343,5	346,3	348,9
2,00	436,2	497,0	431,8	421,2	412,8	412,8
3,00	466,7	549,7	459,1	447,4	469,1	451,0
4,00	489,9	553,4	479,5	489,4	509,7	487,8
5,00	518,9	578,6	489,4	500,5	518,4	467,5
6,00	504,4	574,4	493,6	522,8	546,7	490,7
7,00	512,6	577,5	490,9	517,3	546,7	489,2
8,00	521,6	599,4	485,8	512,7	554,5	506,4
9,00	590,9	652,2	548,3	586,6	641,7	559,1
10,00	717,2	780,3	655,9	689,1	760,6	658,4
11,00	1276,8	1353,5	1110,0	1178,7	1261,2	1110,1

APENDICE C – RESULTADOS DO TESTE DE CISALHAMENTO DO REÔMETRO DE PÓS

O teste de cisalhamento mede a tensão necessária para o material cisalhar, ou seja, quando as partículas movimentarem-se umas contra as outras como função da tensão normal aplicada. Este teste foi realizado para cada sólido particulado em tensões de 3, 6 e 9kPa. Para cada teste, obtem-se 5 pontos a partir do gráfico de tensão normal versus a tensão de cisalhamento:

- a) Unconfined Yield Strenght, UYS que corresponde ao estresse causado para que o material se mova;
- b) Major Principle Stress (MPS): É a maior de todas as tensões normais aplicadas durante o regime permanente
- c) Fator de fluxo, FF: que corresponde à capacidade do material em fluir;
- d) Ângulo interno de fricção: coeficiente da curva de yield locus.
- e) Coesão: corresponde ao grau de coesão dos sólido particulados

Tabela 25 - Resultados obtidos no FT4 para tensão normal de 3 kPa.

				3 kPa							
Material	Alumina calcinada	Alumina fluoretada	Calcario 325	Caulim	Hidraltex 635	Hidraltex 635 ES	Itamag 1100	Itamag 325	Itamag ES	Itasil 2250	Quartzo
Coesão, kPa	0,040	0,076	0,475	0,593	0,735	0,416	0,477	0,618	0,541	0,255	0,534
Unconfined Yield Strengh, UYS (kPa	0,130	0,248	1,877	2,217	2,777	1,498	1,738	2,118	2,071	0,925	2,018
Major Principle Stress (MPS), kPa	4,070	4,205	5,824	5,695	6,184	4,959	5,325	5,280	5,533	8,487	5,823
MCS, kPa	1,478	1,487	1,009	0,996	0,954	1,066	1,081	1,077	0,944	2,290	1,063
Fator de Fluxo	31,748	16,988	3,110	2,569	2,228	3,315	3,064	2,493	2,711	8,540	2,887
Ângulo interno de fricção (°C)	27,032	26,986	36,358	33,691	34,242	31,928	32,468	29,475	34,855	32,243	34,277
Fonte: Autora											

Tabela 26 - Resultados obtidos no FT4 para tensão normal de 6 kPa.

6 kPa											
Material	Alumina calcinada	Alumina fluoretada	Calcario 325	Caulim	Hidraltex 635	Hidraltex 635 ES	Itamag 1100	Itamag 325	Itamag ES	Itasil 2250	Quartzo
Coesão, kPa	0,051	0,182	0,640	0,962	1,087	0,891	0,747	1,018	0,945	0,279	0,747
Unconfined Yield Strengh, UYS (kPa	0,168	0,602	2,505	3,608	4,119	3,028	2,695	3,508	3,613	1,003	2,851
Major Principle Stress (MPS), kPa	8,157	8,601	10,870	11,161	11,670	9,689	10,235	10,180	10,686	10,062	11,118
MCS, kPa	2,952	2,910	2,179	2,149	2,102	2,300	2,319	2,241	1,934	2,805	2,269
Fator de Fluxo	51,692	14,395	4,364	3,093	2,835	3,222	3,802	2,916	2,966	10,059	3,900
Ãngulo interno de fricção (°C)	27,413	27,806	35,914	33,844	34,364	29,145	31,976	29,794	34,793	31,811	34,702

Tabela 27 - Resultados obtidos no FT4 para tensão normal de 9 kPa.

				9 kPa							
Material	Alumina calcinada	Alumina fluoretada	Calcario 325	Caulim	Hidraltex 635	Hidraltex 635 ES	Itamag 1100	Itamag 325	Itamag ES	Itasil 2250	Quartzo
Coesão, kPa	0,039	0,155	0,883	1,422	1,527	1,280	1,065	1,487	1,301	0,442	1,044
Unconfined Yield Strengh, UYS (kPa	0,196	1,201	3,353	5,213	5,718	4,277	3,822	5,103	4,864	1,588	3,937
Major Principle Stress (MPS), kPa	12,029	12,346	16,119	16,568	17,711	14,321	15,312	15,322	15,744	15,306	16,540
MCS, kPa	4,532	4,526	3,542	3,386	3,422	3,603	3,573	3,467	3,106	4,240	3,547
Fator de Fluxo	63,513	25,161	4,808	3,196	3,099	3,351	4,020	3,006	3,250	9,827	4,201
Ãngulo interno de fricção (°C)	26,644	26,558	34,442	32,729	33,776	28,158	31,714	29,548	33,757	31,855	34,108

1 abera 26 - Resultados compliados para obtenção da função huxo (11	Tabela 28 - Resultados com	pilados para	obtenção	da func	cão fluxo	(FF).
---	----------------------------	--------------	----------	---------	-----------	-------

		alumina calcinada	alumina fluoretada	calcario 325	Caulim	Hidraltex 635	Hidraltex 635 ES	Itamag 1100	Itamag 325	Itamag ES	Itasil 2250	quartzo
3 kPa	Unconfined Yield Strengh, UYS (kPa	0,130	0,248	1,877	2,217	2,777	1,498	1,738	2,118	2,071	0,925	2,018
	MPS, kPa	4,070	4,205	5,824	5,695	6,184	4,959	5,325	5,280	5,533	8,487	5,823
6 kPa	Unconfined Yield Strengh, UYS (kPa	0,168	0,602	2,505	3,608	4,119	3,028	2,695	3,508	3,613	1,003	2,851
	MPS, kPa	8,157	8,601	10,870	11,161	11,670	9,689	10,235	10,180	10,686	10,062	11,118
9 kPa	Unconfined Yield Strengh, UYS (kPa	0,196	1,201	3,353	5,213	5,718	4,277	3,822	5,103	4,864	1,588	3,937
	MPS, kPa	12,029	12,346	16,119	16,568	17,711	14,321	15,312	15,322	15,744	15,306	16,540



Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora





Fonte: Autora





Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora

APENDICE D – RESULTADOS DO TESTE DE COMPRESSIBILIDADE REALIZADO NO REÔMETRO DE PÓS

Nos testes de compressibilidade, são aplicadas diferentes forças normais de compressão e, para caa medida, mede-se o grau de compressão a amostra, em % p/p.

Material	Teste 1	Teste 2	Média Testes	Desvio padrão	% erro na análise
Alumina calcinada	1,83	1,93	1,880	0,071	3,76%
Alumina Fluoretada	2,43	2,33	2,383	0,070	2,95%
Calcario	20,28	19,09	19,685	0,835	4,24%
Caulim	27,64	26,88	27,262	0,534	1,96%
Hidraltex 635	25,88	27,68	26,780	1,279	4,78%
Hidraltex 635 ES	22,22	22,08	22,151	0,094	0,42%
Itamag 1100	18,30	17,58	17,939	0,507	2,83%
Itamag 325	21,06	22,49	21,773	1,008	4,63%
Itamag ES	24,49	26,14	25,315	1,170	4,62%
Itasil 2250	19,16	20,23	19,697	0,759	3,85%
Quartzo	17,03	18,35	17,686	0,934	5,28%

Tabela 29 - Resultados obtidos a 15 kPa no grau de compressibilidade, cálculo da média e desvio padrão.

Pressão normal, kPa		% Compressibilidade										
	Itamag	Alumina	Alumina calcinada	Caulim	Calcário	Quartzo	Hidraltex	Hidraltex	Itasil	Itamag	Itamag	
	1100	Fluoretada					635 ES	635	2250	325	ES	
0,50	1,72	0,45	1,53	2,30	2,48	1,64	4,47	2,43	4,69	2,75	3,18	
1,00	3,83	0,61	1,73	5,30	4,37	3,11	7,74	5,21	7,21	4,91	6,04	
2,01	7,19	0,96	2,05	10,66	7,90	6,23	11,40	9,78	10,18	8,73	10,35	
4,02	10,89	1,26	2,29	16,81	12,29	10,29	15,21	15,53	13,10	13,22	15,11	
6,02	13,13	1,51	2,48	20,31	14,90	12,70	17,70	18,99	14,79	15,90	18,31	
8,03	14,68	1,71	2,64	22,65	16,69	14,38	18,85	21,40	15,94	17,76	20,76	
10,04	15,85	1,90	2,80	24,30	18,03	15,58	20,05	23,17	16,71	19,16	22,52	
12,03	16,74	2,09	2,95	25,64	19,09	16,54	20,95	24,57	17,37	20,37	23,82	
15,05	17,94	2,33	3,15	27,26	20,34	17,69	22,15	26,28	18,19	21,77	25,32	

Tabela 30 - Grau de compressão para cada pressão normal aplicada nos sólidos particulados estudados.

APENDICE E – RESULTADOS DO TESTE DE PERMEABILIDADE REALIZADO NO REÔMETRO DE PÓS

Nos testes de permeabilidade, são aplicadas diferentes forças normais de compressão juntamente com a injeção de uma vazão conhecida de ar e, para cada condição, mede-se o grau de permeabilidade da amostra, em mBar, através da perda de carga. A permeabilidade se refere à uma vazão, por unidade de área, espessura do leito e perda de carga, para uma dada pressão de alimentação.

Material	Permeabilidade, mBar a 15,0 kPa	Desv.Pad
Alumina Calcinada	5,14	0,154
Alumina Fluoretada	3,71	0,160
Itamag 1100	1,08	0,029
Itamag ES	8,66	1,844
Itamag 325	4,03	1,308
Itasil 2250	0,44	0,074
Hidraltex 635 ES	3,33	0,350
Hidraltex 635	104,71	2,295
Calcário 325	89,81	2,432
Quartzo	97,62	1,188
Caulim	96,40	0,624

Tabela 31 - Resultados de permeabilidade média obtidos à pressão normal de 15,0 kPa e desvio padrão.MaterialPermeabilidade, mBar a 15,0 kPaDesv.Pad

	Alum Calci	ina nada	Alum Fluor	ina etada	Calcái	rio 325	Caulim		Quart	ZO	Hidra 635	ltex	Hidral 635 ES	ltex S	Itasi 225(il)	Itam	ag 325	Itama	ig ES	Itama	g 1100
	Teste		Teste		Teste		Teste		Teste		Teste		Teste		Test	e	Teste		Teste		Teste	
Pressão,	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
kPa																						
0,99	4,93	4,93	3,47	3,47	18,33	18,56	16,14	14,74	5,03	-0,07	4,85	2,47	12,00	3,73	9,41	9,65	4,30	1,27	19,91	17,89	12,03	14,89
1,98	4,92	4,92	3,47	3,47	19,44	19,12	20,35	18,09	8,73	-0,06	6,12	3,56	8,42	8,30	7,94	6,03	3,00	0,52	20,46	18,63	16,72	15,97
3,95	4,95	4,95	3,49	3,49	32,58	30,89	33,89	28,58	7,53	-0,08	11,31	10,32	9,24	2,89	4,37	5,59	2,96	0,07	34,02	35,30	28,39	29,06
5,92	4,98	4,98	3,54	3,54	46,22	44,65	46,70	43,32	8,87	48,35	2,49	15,59	4,27	0,40	3,04	4,12	2,98	0,11	45,13	44,63	40,84	41,46
7,90	4,98	4,98	3,53	3,53	58,81	56,55	58,51	57,63	12,08	48,41	4,12	14,00	6,80	0,50	2,69	4,99	2,78	0,16	58,20	56,66	53,94	52,60
9,87	5,00	5,00	3,55	3,55	69,91	69,47	70,13	71,64	14,42	48,97	5,35	9,36	0,94	0,88	3,13	7,49	2,75	0,04	69,95	68,37	65,82	66,23
11,84	5,21	5,21	3,55	3,55	80,61	80,94	83,24	85,28	13,88	49,55	6,08	2,53	1,21	0,63	2,74	5,15	3,23	0,10	80,94	78,30	77,99	77,68
14,86	5,04	5,04	3,55	3,55	96,78	98,46	103,08	106,33	16,76	50,50	9,97	4,75	1,06	1,10	3,09	3,58	2,80	0,19	91,53	88,09	96,84	95,95

APENDICE F – RESULTADOS DO TESTE DE AERAÇÃO REALIZADO NO REÔMETRO DE PÓS

Os testes de aeração no reômetro de pós, FT4, foi realizado alterando a vazão de ar injetada e, a cada ponto, mediu-se a energia total necessária para o sólido particulado fluir. Os testes foram realizados em duplicatas, como apresentado na tabela abaixo.

	Alumina Calcinada		Alumina		Calcário 325		Quartzo		Caulim		Hidraltex 635 ES	
			Fluoreta	da								
	Energia total, mJ		Energia total, mJ		Energia total, mJ		Energia total, mJ		Energia total, mJ		Energia total, mJ	
Velocidade	Teste 1	Teste 2										
do ar, mm/s												
0,00	2858,79	2858,79	808,38	772,22	1237,48	573,27	568,91	843,32	475,08	441,29	3972,98	3972,98
2,00	2303,92	2303,92	219,15	204,23	559,12	542,17	535,74	236,83	146,36	158,16	2310,21	2310,21
4,00	859,86	859,86	194,81	168,36	162,31	440,20	428,35	195,16	110,04	106,47	903,21	903,21
5,00	126,36	126,36	144,23	157,89	143,57	380,88	370,10	149,11	80,33	103,50	424,33	424,33
6,00	59,37	59,37	141,22	141,58	140,74	333,16	317,68	135,52	69,64	70,44	204,05	204,05
7,00	29,45	29,45	133,32	135,28	125,81	314,35	292,69	124,25	56,60	64,72	142,79	142,79
8,00	13,52	13,52	127,21	136,00	114,02	299,24	281,31	117,77	54,10	58,21	70,51	70,51
10,00	12,84	12,84	123,89	125,20	99,10	271,95	263,90	100,20	62,23	52,32	22,07	22,07

Tabela 32 - Dados coletados durante teste de aeração no reometro de pós, FT4.

	Itasil 2250 Energia total, mJ		Hidralte	ex 635	Itamag	1100	Itamag (325	Itamag ES		
			Energia	total, mJ	Energia	total, mJ	Energia	total, mJ	Energia total, mJ		
Velocidade do ar, mm/s	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	
0,00	196,04	331,47	260,30	440,50	436,08	366,17	348,91	113,38	292,49	262,55	
2,00	46,51	133,47	96,91	241,71	250,51	207,71	202,88	31,96	105,41	105,65	
4,00	19,28	50,67	39,15	161,89	173,14	129,71	138,10	15,18	60,64	72,58	
5,00	16,16	38,31	31,98	131,41	129,76	99,32	106,48	12,83	46,46	53,77	
6,00	13,62	34,15	30,70	124,70	114,24	81,83	91,45	11,68	39,63	42,17	
7,00	12,69	32,78	33,94	109,81	110,36	81,46	77,71	10,63	33,88	38,34	
8,00	10,48	33,89	32,15	105,62	104,53	67,16	73,24	10,11	33,27	34,13	
10,00	9,20	40,04	31,53	94,61	97,20	68,75	67,73	8,95	31,19	33,95	

APENDICE G – RESULTADOS DO TESTE DE FLUIDIZAÇÃO REALIZADO NO LEITO FLUIDIZADO

Dados coletados no leito fluidizado

Dados do leito

Diâmetro (mm)	D	51,40
Altura (mm)	L	
Altura do leito tal qual	H_{LTQ}	88,10
(mm)		
Altura do leito dobro (mm)	H _{LD}	176,20
Altura do leito triplo (mm)	H_{LT}	264,30
Correlação tal qual	$\mathrm{H}_{\mathrm{LTQ}}/\mathrm{D}$	1,714
Correlação dobro	$\mathrm{H}_{\mathrm{LD}}/\mathrm{D}$	3,428
Correlação triplo	H_{LT}/D	5,142

Velocidade mínima de fluidização média e desvio padrão nas condições tal qual, dobro e triplo

Amostra	Tal Qual	Dobro	Triplo
Alumina Fluoretada	62 ± 6	58 ± 2	54 ± 0,2
Alumina calcinada	29 ± 1	26 ± 6	$24 \pm 0,3$
Itamag 325	51 ± 4	$56 \pm 0,5$	77 ± 1,78
Itamag ES	5 ± 1	$41,33 \pm 1,78$	70 ± 6
Itamag 1100	26,7 ± 4	$72 \pm 0,3$	36 ± 12
Hidraltex 635	68 ± 3	86 ± 2	35 ± 2
Hidraltex 635 ES	48 ± 3	36 ± 2	12 ± 2
Itasil 2250	23 ± 3	63 ± 4	$25\pm0,5$
Caulim	18 ± 2	61 ± 18	
Calcário	26 ± 2	88 ± 8	
Quartzo	44 ± 4	37 ± 4	

Gráfico de dados Tal Qual

Ensaio 1





Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora











Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora


Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora





Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora





Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora

Gráfico de dados Dobro







Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora





Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora

Ensaio 2









Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora







Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora





Fonte: Autora







Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora







Fonte: Autora



Fonte: Autora





Tabela de dados Triplo

Ensaio 1





Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora









Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora









Fonte: Autora



Fonte: Autora



Ensaio 3





Fonte: Autora



Fonte: Autora







Fonte: Autora



Fonte: Autora



Fonte: Autora





Fonte: Autora
	diâmetro	densidade	densidade	Esfericidade	Porosidade	Arquimedes
	(micron)	(g/cm ³)	(kg/m³)			
Itamag 325	10,93	2,3461	2346,1	1	0,708	36,04
Itamag ES	11,77	2,3205	2320,5	1	0,67	44,51
Itamag	9,49	2,3905	2390,5	1	0,628	24,04
1100						
Hidraltex	7,36	2,4148	2414,8	1	0,714	11,33
635						
Hidraltex	9,2	2,3449	2344,9	1	0,644	21,48
635 ES						
Itasil	7,14	2,4017	2401,7	1	0,639	10,29
2250A						
Alumina	91,81	3,2644	3264,4	1	0,682	29725,35
Calcinada						
Alumina	100,7	2,4004	2400,4	1	0,434	28838,20
Fluoretada						
Quartzo	23,88	2,6089	2608,9	1	0,601	418,00
Calcário	25,89	2,7545	2754,5	1	0,646	562,42
Caulim	36,45	2,6817	2681,7	1	0,795	1527,99

APENDICE H – CÁLCULOS TEÓRICOS DE VELOCIDADE MÍNIMA DE FLUIDIZAÇÃO UTILIZANDO AS CORRELAÇÕES APRESENTADAS

ANEXO I – FICHA DE DADOS DO EQUIPAMENTO BLUEWAVE

Meauring Banger	0.01 to 2800 Micros				
Lapers	Wavelength Red 780 cm, Rise 405 cm				
Power:	3 mW nominal				
Detection System;	Two fixed photo-electric detectors with logarithmically spaced segments placed at correct angles for optimal scattered light detectors. 0.02 to 163 degrees using 151 detector segments.				
Data Handlingi	Volume, Number and Area distributions as well as percentile and other summary data. Data is stored in ODBC format in encrypted Microsoft Access Databases to ensure compatibility with external statistical software applications. Data integrity may be ensured using FDA 21 CFR Part 11 compliant security features including password protection, electronic signatures and assignable permissions.				
Typical Analysis Time:	10 to 90 seconds				
Electrical:	AC input: 90 – 132 VAC, 47 – 63 Hz, single phase 200 to 265 VAC, 47 – 63 Hz, single phase				
Power Consumption:	25 VA maximum				
Environmental	Temperatum: 10 to 35 Degrees C. (50 to 95 Degrees F)				
Humidity:	00% RH, non condensing maximum				
Storage Temperature:	+10 to 50 Degrees C (Dry only) (14 to 122 Degrees F)				
Pollution:	Degree 2				
Physical Specifications					
Finishes:	Case Material S teel and impact resistant plastic Exterior Surfaces tinished with corrosion resistant point or plating				
Dimensions:	14H x 22W x 18D in (360H x 560W x 460D mm)				
Weight:	60 lbs (27 kg)				
Dry Operation:	Case Material: Steel and impact resistant plastic Extendor Surfaces finished with corrosion resistant paint or plating 14H x 22W x 18D in (360H x 560W x 460D mm) 00 lbs (27 kg)				
Eductor Air Supply:	100 psi (689 kPa) maximum prosum 5 CPM at 50 psi (345 kPa) minimum flow rate Free of dry contaminants, moisture and oil.				
Vaouum:	Vacuum must exceed 50 CFM				
	For more information on the unique benefits of the Bluewave, su MAC29 USVR a software demo, or to request a quote, please scan this QR code with your smartphone or tablet or				
Complex Particles. Clea	r Data. SL-PS-03 Rev. G				

ANEXO II – FICHA DE DADOS DO PICNÔMETRO ACCUPYC SPECIFICATIONS 100 1111 (MICCAR) 114 11 100 12 * AccuPyc[®] II 1340 -Due autoromerision --100 Pycnometer ENVIRONMENT Stable between 15 to 35 °C (59 to 96 °F) Temperature Temperature-controlled AccuPyc: temperature stability is dependent upon specifications of the installed circulator. Recommended range: 15 to 50 °C (59 to 122 °F) Humidity 20 to 80% relative, non-condensing PHYSICAL 17.9 cm (7.0 in.), analysis modules for 1-, 10-, and 100-cm³ units, and control module Height 25.9 cm (10.2 in.), 350-cm3 analysis module 43.0 cm (17.0 in.), 2000-cm3 analysis module 27.3 cm (10.7 in.), control module Width 27.3 cm (10.7 in.) control module 27.0 cm (10.6 in.), 2000-cm3 analysis module Depth 36.2 cm (14.3 in.) 9.3 kg (20.5 lbs), control/analysis unit (1-, 10-, and 100-cm³ units) 7.9 kg (17.4 lbs), analysis module (1-, 10-, and 100 cm² units) Weight 10.5 kg (23.2 lbs) analysis module (350-cm³ unit) 3.6 kg (8.0 lbs), control module 26.0 kg (57.0 lbs), 2000-cm3 analysis module

ELECTRICAL

Voltage	90 to 264 VAC
Power	30 VA
Frequency	50 to 60 Hz



