



UNIVERSIDADE DE UBERABA

**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E
EXTENSÃO**

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

FELIPE MENDES CARDOSO CARVALHO

**A SEGREGAÇÃO DE PARTÍCULAS NO CONTEXTO DAS MISTURADORAS
DE FERTILIZANTES**

UBERABA, MG

2018



FELIPE MENDES CARDOSO CARVALHO

**A SEGREGAÇÃO DE PARTÍCULAS NO CONTEXTO DAS MISTURADORAS DE
FERTILIZANTES**

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

Orientador (a):

Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer

Coorientador (a):

Profa. Dra. Elizabeth Uber Bucek

Uberaba

2018

Catálogo elaborado pelo Setor de Referência da Biblioteca Central UNIUBE

Carvalho, Felipe Mendes Cardoso.

C253s A segregação de partículas no contexto das
misturadoras de fertilizantes / Felipe Mendes Cardoso
Carvalho. – Uberaba, 2018.

125 f. : il. color.

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

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer.

Coorientadora: Profa. Dra. Elizabeth Uber Bucek.

FELIPE MENDES CARDOSO CARVALHO

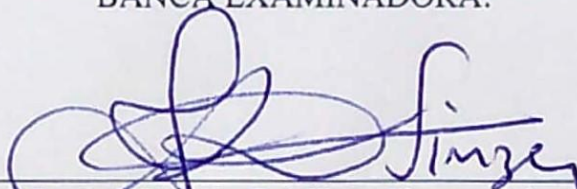
A SEGREGAÇÃO DE PARTÍCULAS NO CONTEXTO DAS MISTURADORAS DE
FERTILIZANTES

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

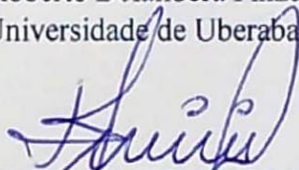
Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais

Aprovado em: 28/02/2018

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer - Orientador
Universidade de Uberaba



Prof. Dr. David Maikel Fernandes
Universidade de Uberaba



Prof. Dr. Marcelo Bacci da Silva
Universidade Federal do Triângulo Mineiro



Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoni
Universidade Federal de Uberlândia

DEDICATÓRIA

À memória de meu pai.

AGRADECIMENTOS

À Deus!

À minha mãe, Maria Paula, pelo amor.

À minha irmã, Juliana, pela amizade.

À minha namorada, Paula, pelo carinho, apoio e compreensão nos momentos mais desafiadores.

Ao meu padrinho profissional, John Sinden, pelos ensinamentos e inspiração.

À família J&H Equipment, nas figuras de Cliff Hollyfield e Jeff Hollyfield, pela confiança, pela amizade e pelas oportunidades.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer, pela compreensão, pelas aulas, pela amizade e pela parceria.

Aos meus colegas de trabalho, pelos momentos em que, quando estive ausente, fizeram minhas vezes na empresa.

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

RESUMO

Misturas a granel de fertilizantes granulados são processadas em unidades industriais que compreendem uma série de etapas de manuseio destes sólidos que promovem a segregação das partículas quanto ao seu tamanho, forma e densidade. Hoffmeister (1964) identificou que a diferença no tamanho das partículas que compõe a mistura é o fator que mais proporciona a segregação. Esse fenômeno representa um problema de qualidade física e gera transtornos de ordem técnica e comercial que podem ter origem na etapa anterior da cadeia produtiva e produzir efeitos no fim dela quando da aplicação do fertilizante no campo. A diminuição da segregação nas misturadoras é de fundamental importância num nicho de mercado cada vez mais puxado pela qualidade, mais competitivo e especializado. A formação de pilhas cônicas livres a partir de uma descarga vertical é uma das principais e mais comuns formas de ocorrência de segregação, fazendo com que as partículas sejam separadas com respeito ao seu tamanho, onde as de menor diâmetro tendem a se concentrar no centro, e as de maior diâmetro, na periferia da pilha. Várias técnicas de manuseio de sólidos a granel e engenharia estão presentes na literatura e auxiliam no tratamento do problema. A partir deste entendimento, propõe-se a aplicação de uma nova técnica que consiste na injeção de uma corrente de ar perpendicular ao escoamento descendente de material quando da descarga de um silo para formação da pilha livre, com base nos conhecimentos do comportamento das partículas num fluido. Tal técnica apresentou uma melhora nos índices de segregação da pilha de 33,65% em comparação àquela formada sem qualquer técnica de manuseio, o que permite concluir que o uso da injeção de ar para deslocamento horizontal de partículas, em experimento controlado, ajuda a diminuir os efeitos da segregação na formação de pilhas cônicas.

Palavras-chave: Segregação, Granel, Fertilizante Granulado, Partículas Sólidas, Mistura NPK, Manuseio de Sólidos, Silos, Corrente de Ar.

ABSTRACT

Granulated fertilizer bulk blends are processed in industrial units comprehending a series of solids handling steps that promote particle segregation according to size, shape and density. Hoffmeister (1964) has identified that the difference in the particle size within a mixture is the aspect that influences segregation the most. This phenomenon represents a great quality issue that generates both technical and commercial nuisance that may be originated in the previous step of the productive chain and produce effects at the end of it during fertilizer field application. Reducing segregation in blending units is of utmost importance in a market niche increasingly quality driven, more competitive and specialized. Free heap formation from vertical discharge of material is one of the most common and main forms of segregation occurrence, allowing particles to be separated with respect to size, where smaller ones in diameter will most likely be concentrated in the middle, whilst the bigger ones will tend to roll down the pile and concentrate in the peripheries. Various solids handling and engineering techniques are available in the literature and help dealing with the problem. From this understanding, a new technique based on air injection perpendicular to the descending stream of material from a silo's discharge for heap formation is proposed. This new technique showed a reduction in the segregation index of heaps of 33.65% in comparison to that of no handling technique applied, allowing one to conclude that the use of air injection to displace particles horizontally, in a controlled experiment, helps minimize the effect of segregation during a heap formation.

Key words: Segregation, bulk solids, granulated fertilizer, solid particles, NPK blend, solids handling, silos, Air Current.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Disponibilidade de água potável no mundo	7
Figura 4.2 – Projeção da entrega de fertilizantes ao consumidor final.....	9
Figura 4.3 – “Lei do mínimo” de Liebig	11
Figura 4.4 – Cadeia de produção do fertilizante.....	13
Figura 4.5 – Ilustração de uma unidade de mistura de fertilizantes NPK	16
Figura 4.6 – Fluxograma de uma unidade de mistura NPK a batelada	17
Figura 4.7 – Sistema de descarregamento em porto fluvial numa unidade de mistura NPK ...	18
Figura 4.8 – Sistema de descarregamento ferroviário numa unidade de mistura NPK.....	18
Figura 4.9 – Descarga aérea em box de matéria-prima numa unidade de mistura NPK.....	19
Figura 4.10 – Tela de sistema superviório de uma unidade misturadora NPK	19
Figura 4.11 – Exemplo do <i>layout</i> de uma misturadora vertical (batelada) ou <i>tower system</i> ...	20
Figura 4.12 – Designador de material típico de uma misturadora vertical a batelada	21
Figura 4.13 – <i>Ribbon Mixer</i>	22
Figura 4.14 – Misturador tipo betoneira.....	22
Figura 4.15 – Misturador rotativo	23
Figura 4.16 – Unidade de mistura a batelada horizontal – moegas de dosagem individuais ...	24
Figura 4.17 – Fluxograma de uma unidade de mistura NPK contínua.....	25
Figura 4.18 – Ilustração de uma unidade de mistura contínua – horizontal	26
Figura 4.19 – Foto real de uma unidade de mistura contínua – horizontal	27
Figura 4.20 – Curvas de frequência cumulativa e diferencial	29
Figura 4.21 – Higroscopicidade	34
Figura 4.22 – Tipos de segregação	37
Figura 4.23 – Segregação numa pilha como resultado da segregação por trajetória. Conteúdo percentual de finos mostrado em cada uma das 6 Seções.....	38
Figura 4.24 – Tipos de mistura.....	42
Figura 4.25 – Distribuição cumulativa de tamanho de partícula.....	47
Figura 4.26 – Segregação numa pilha	47
Figura 4.27 – Movimento de uma partícula num plano inclinado.....	50
Figura 4.28 – Movimento de partícula sobre pilha cônica de material	52
Figura 4.29 – Silo com escoamento em funil	57
Figura 4.30 – Estagnação da saída do silo por ponte por intertravamento (esquerda), por ponte coesa de produto (centro) e formação de ‘buraco de rato’ (direita)	58

Figura 4.31 – Silo danificado devido a erros no projeto	59
Figura 4.32 – Divisão entre escoamento em massa e em funil em função do ângulo de inclinação da moega e de atrito	60
Figura 4.33 – Teste de cisalhamento de Jenike	61
Figura 4.34 – Exemplos de geometrias de silos com escoamento em massa	64
Figura 4.35 – Descarga de um silo de escoamento em massa	64
Figura 4.36 – Inserção de um cone invertido próximo à saída do silo para melhorar o escoamento do material	65
Figura 4.37 – Inserte ‘cone em cone’ de Jenike	66
Figura 4.38 – Modificação da entrada do silo – deslocamento para extremidade	67
Figura 4.39 – Modificação da entrada do silo	67
Figura 4.40 – Aerador	68
Figura 4.41 – Cascata de chutes alternados	69
Figura 4.42 – Moega supressora de pó	70
Figura 4.43 – Chute telescópico	70
Figura 4.44 – Trajetória das partículas submetidas à ação de uma corrente de gás escoando em uma direção	73
Figura 4.45 – Separador Gravitacional	75
Figura 5.1 – Padrão de segregação observado em pilhas cônicas de fertilizantes	76
Figura 5.2 – Caixa de determinação do índice de segregação	77
Figura 5.3 – Modelo de bancada do experimento	79
Figura 5.4 – Distribuição granulométrica ilustrando valores d_{16} , d_{84} e d_{50}	81
Figura 5.5 – Histograma da análise granulométrica da mistura de MAP usada nos experimentos	82
Figura 5.6 – Grupo de 10 partículas de cada amostra para determinação da esfericidade média (lado esquerdo: Amostra A; lado direito: Amostra B)	83
Figura 5.7 – Determinação do ângulo de inclinação da parede da moega de descarga do silo experimental	84
Figura 5.8 – Esquema do experimento do grupo controle	86
Figura 5.9 – Caixa deitada e com a tampa frontal removida para remoção das amostras de cada região	86
Figura 5.10 – Critério de codificação das amostras	87
Figura 5.11 – Esquema do experimento com uso do soprador de ar	88
Figura 5.12 – Detalhe do sistema de injeção de ar (soprador)	88

Figura 5.13 – Caixa quantificadora de segregação funcionando como um separador gravitacional	89
Figura 5.14 – Detalhes do sistema de injeção de ar para atuar na segregação	90
Figura 6.1 – Região Z de amostragem.....	79
Figura 6.2 – Amostras da região A de um experimento do grupo controle e de um experimento do grupo teste.....	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Principais indicadores do setor de fertilizantes no Brasil.....	10
Tabela 5.1 – Interpretação dos valores do índice GSI.....	80
Tabela 5.2 – Análise granulométrica da mistura de MAP usada no experimento.....	81
Tabela 5.3 – Esfericidade das partículas das amostras A e B.....	11
Tabela 6.1 – Análise granulométrica das amostras das regiões da pilha do experimento 1 do grupo controle.....	95
Tabela 6.2 – Análise granulométrica das amostras das regiões da pilha do experimento 2 do grupo controle.....	95
Tabela 6.3 – Análise granulométrica das amostras das regiões da pilha do experimento 3 do grupo controle.....	96
Tabela 6.4 – Análise granulométrica das amostras das regiões da pilha do experimento 4 do grupo controle.....	96
Tabela 6.5 – Análise granulométrica das amostras das regiões da pilha do experimento 5 do grupo controle.....	97
Tabela 6.6 – Análise granulométrica das amostras das regiões da pilha do experimento 1 do grupo teste	97
Tabela 6.7 – Análise granulométrica das amostras das regiões da pilha do experimento 2 do grupo teste	98
Tabela 6.8 – Análise granulométrica das amostras das regiões da pilha do experimento 3 do grupo teste	98
Tabela 6.9 – Análise granulométrica das amostras das regiões da pilha do experimento 4 do grupo teste	99
Tabela 6.10 – Análise granulométrica das amostras das regiões da pilha do experimento 5 do grupo teste	99
Tabela 6.11 – Análise granulométrica ajustada com as frações mássicas de m_2 e m_4 das amostras das regiões da pilha do experimento 1 do grupo controle.	100
Tabela 6.12 – Análise granulométrica ajustada com as frações mássicas de m_2 e m_4 das amostras das regiões da pilha do experimento 2 do grupo controle.	101
Tabela 6.13 – Análise granulométrica ajustada com as frações mássicas de m_2 e m_4 das amostras das regiões da pilha do experimento 3 do grupo controle.	101
Tabela 6.14 – Análise granulométrica ajustada com as frações mássicas de m_2 e m_4 das amostras das regiões da pilha do experimento 4 do grupo controle.	102

Tabela 6.15 – Análise granulométrica ajustada com as frações mássicas de m_2 e m_4 das amostras das regiões da pilha do experimento 5 do grupo controle.....	102
Tabela 6.16 – Análise granulométrica ajustada com as frações mássicas de m_2 e m_4 das amostras das regiões da pilha do experimento 1 do grupo teste.....	102
Tabela 6.17 – Análise granulométrica ajustada com as frações mássicas de m_2 e m_4 das amostras das regiões da pilha do experimento 2 do grupo teste.....	103
Tabela 6.18 – Análise granulométrica ajustada com as frações mássicas de m_2 e m_4 das amostras das regiões da pilha do experimento 3 do grupo teste.....	103
Tabela 6.19 – Análise granulométrica ajustada com as frações mássicas de m_2 e m_4 das amostras das regiões da pilha do experimento 4 do grupo teste.....	104
Tabela 6.20 – Análise granulométrica ajustada com as frações mássicas de m_2 e m_4 das amostras das regiões da pilha do experimento 5 do grupo teste.....	104
Tabela 6.21 – Massas médias \bar{m}_2 e \bar{m}_4 e desvios padrão (σ) de cada região de amostragem dos experimentos do grupo controle	105
Tabela 6.22 – Massas médias \bar{m}_2 e \bar{m}_4 e desvios padrão (σ) de cada região de amostragem dos experimentos do grupo teste	105
Tabela 6.23 – Índices de segregação I das regiões de amostra da pilha dos experimentos do grupo teste com média e desvio padrão.....	106
Tabela 6.24 – Índices de segregação I das regiões de amostra da pilha dos experimentos do grupo controle com média e desvio padrão	106
Tabela 6.25 – Índices de segregação I_p das pilhas dos experimentos do grupo teste com média e desvio padrão	107
Tabela 6.26 – Índices de segregação I_p das pilhas dos experimentos do grupo controle com média e desvio padrão	107
Tabela 6.27 – Índices de segregação global da pilha IGP dos experimentos do grupo controle e do grupo teste.....	107
Tabela 6.28 – Média das massas totais encontradas em cada região da pilha para cada grupo de experimentos com a contribuição de cada região para a massa total	110
Tabela 6.29 – Índices de segregação corrigidos de cada região da pilha para os dois grupos e o valor total do índice de segregação global da pilha para os dois grupos	110
Tabela 6.30 – Índices de segregação das regiões das pilhas dos experimentos do grupo controle e do grupo teste e a variação percentual entre elas.....	111
Tabela 6.31 – Massas médias \bar{m}_2 e \bar{m}_4 para cada região da pilha de cada grupo com a variação percentual entre eles.....	112

Tabela 6.32 – Massas médias \bar{m}_2 e \bar{m}_4 para cada macrorregião da pilha de cada grupo com a variação percentual entre eles	113
Tabela 6.33 – Índice de segregação das macrorregiões no grupo controle e no grupo teste e a variação encontrada	113

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 4.1	32
Equação 4.2	32
Equação 4.3	32
Equação 4.4	32
Equação 4.5	39
Equação 4.6	49
Equação 4.7	50
Equação 4.9	50
Equação 4.10	51
Equação 4.11	51
Equação 4.12	51
Equação 4.13	51
Equação 4.14	51
Equação 4.15	51
Equação 4.16	52
Equação 4.17	61
Equação 4.18	61
Equação 4.19	62
Equação 4.20	62
Equação 4.21	71
Equação 4.22	72
Equação 4.23	72
Equação 4.24	72
Equação 4.25	72
Equação 4.26	72
Equação 4.27	73
Equação 4.28	73
Equação 4.29	73
Equação 4.30	74
Equação 5.1	78
Equação 5.2	80
Equação 5.3	89

Equação 5.4	90
Equação 5.5	90
Equação 5.6	90
Equação 5.7	90
Equação 5.8	90
Equação 5.9	91
Equação 5.10	92
Equação 5.11	92
Equação 5.12	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANDA	Associação Nacional Para a Difusão de Adubos
DAP	Fosfato Diamônico
EUA	Estados Unidos da América
GSi	<i>Granulation Spread Index</i>
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IFA	<i>International Fertilizer Association</i>
IFDC	Centro Internacional para o Desenvolvimento de Fertilizantes
IN46	Instrução Normativa n° 46
ISO	Organização Internacional de Normatização
MAP	Fosfato Monoamônico
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
NPK	Nitrogênio, Fósforo e Potássio
PET	Polietileno Tereftalato
PIB	Produto Interno Bruto
ROP	<i>Run-of-pile</i>
SSP	Superfosfato Simples
TSP	Superfosfato Triplo
UNIDO	Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial
WHO	Organização Mundial da Saúde
CMT	Contribuição para a Massa Total

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição, Unidade
%	Porcentagem
P ₂ O ₅	Pentóxido difósforo
K ₂ O	Óxido de potássio
kg	Quilograma
N	Nitrogênio
Zn	Zinco
®	Marca registrada
μm	Micrômetro
d_n	Diâmetro nominal da partícula, mm
Ψ	Esfericidade
H ₂ O	Água
kgf	Quilograma-força
°C	Graus Celsius
MPa	Mega Pascal
Mbar	Mega bar
cm ³ /s	Centímetro cúbico por segundo
ρ_p	Densidade da partícula, g/cm ³
U	Velocidade da partícula num fluido, m/s
ρ_M	Densidade partícula maior, g/cm ³
ρ_m	Densidade partícula menor, g/cm ³
T_S	Tempo de subida à superfície, s
x	Diâmetro da partícula, mm
μ	Viscosidade do fluido, cP
ρ_f	Densidade do fluido, g/cm ³
d_{50}	Diâmetro médio de uma amostra de partículas, mm
m	Massa da partícula, g

g	Aceleração da gravidade, m/s^2
h	Altura, mm
μ_a	Coefficiente de atrito
V_1	Velocidade da partícula na posição 1, m/s
V_2	Velocidade da partícula na posição 2, m/s
r	Raio da partícula, mm
α	Ângulo de inclinação do plano, °
l	Distância deslocada, m
f_a	Coefficiente de atrito de rolamento
ρ	Densidade, g/cm^3
G	Peso da partícula, N
R_a	Força de atrito, N
ϕ	Ângulo de atrito limitante, °
d_s	Diâmetro da partícula, mm
f	Altura da partícula fora do leito de material, mm
f'	Altura da partícula dentro do leito de material, mm
E	Energia cinética, J
E_s	Energia perdida, J
r'	Raio da partícula estacionária, mm
Q	Taxa de alimentação, m^3/s
W	Largura do silo, mm
T	Gap entre paredes do silo bidimensional, mm
R	Razão dos diâmetros das partículas da mistura binária
D_l	Diâmetro da partícula maior, mm
D_s	Diâmetro da partícula menor, mm
L	Comprimento da camada de escoamento, mm
θ_c	Ângulo do cone do silo com a vertical, °
ϕ_w	Ângulo de atrito cinético entre o silo e a parede do cone, °
F	Força de cisalhamento, N
w	Força normal, N

ϕ	Ângulo do coeficiente de atrito, °
B	Diâmetro mínimo de abertura do silo, mm
$\bar{\sigma}_1$	Estresse crítico, N/m ²
N/m ²	Newton por metro quadrado
H(θ)	Função adimensional dependente do ângulo da moega
ρ_b	Densidade do granel na pressão de acomodação, g/cm ³
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
m/s ²	Metro por segundo ao quadrado
DF	Diâmetro crítico do “buraco de rato”, mm
G(θ)	Função adimensional dependente do ângulo interno do material a granel
FR	Força resistiva devida ao movimento relativo entre sólido e fluido, N
a	Aceleração, m/s ²
\vec{b}	Vetor aceleração devido ao campo, m/s ²
w_f	Massa do fluido deslocado, kg
$\frac{dv}{dt}$	Derivada da velocidade em relação ao tempo
C_D	Coefficiente de arrasto
F'_R	Força de arrasto por unidade de tempo, N/s
Re	Número de Reynolds
a_R	Desaceleração da partícula, m/s ²
d_p	Diâmetro da partícula, mm
v_f	Velocidade final da partícula, m/s
S	Distância percorrida até o repouso, m
a_{Rt}	Desaceleração terminal da partícula, m/s ²
v_t	Velocidade terminal da partícula, m/s
v_g	Velocidade do gás dentro do separador gravitacional, m/s
\bar{D}_A	Diâmetro médio da amostra A, mm
\bar{D}_B	Diâmetro médio da amostra B, mm
mm	Milímetro
hp	<i>Horse-power</i>

d_{84}	Diâmetro maior que 84% das partículas, mm
d_{16}	Diâmetro maior que 16% das partículas, mm
$\bar{\psi}$	Média das esfericidades
g/cm^3	Grama por centímetro cúbico
δ	Ângulo interno de atrito efetivo
t	Tempo para a partícula percorrer do topo ao fundo da câmara, s
Q_a	Vazão do ar, cm^3/s
cm	Centímetro
cm/s	Centímetro por segundo
m/s	Metro por segundo
kPa	Quilo Pascal
m_2	Massa total da amostra das partículas de 1,93 mm, g
m_4	Massa total da amostra das partículas de 4,05 mm, g
I_p	Índice de segregação da pilha
IGP	Índice global de segregação da pilha
\bar{m}_2	Massas médias das amostras das partículas de 1,93 mm, g
\bar{m}_4	Massas médias das amostras das partículas de 4,05 mm, g
I	Índice de segregação de cada segmento
k	Número de segmentos
S_r	Número de repetições
σ	Desvio padrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	4
2.1	OBJETIVO GERAL.....	4
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO.....	4
3	JUSTIFICATIVAS	5
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
4.1	CONTEXTO HISTÓRICO E A IMPORTÂNCIA DA AGRICULTURA.....	6
4.2	A IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DOS FERTILIZANTES QUÍMICOS	7
4.2.1	Os setores agrícola e de fertilizantes minerais no Brasil e suas perspectivas	8
4.3	O FERTILIZANTE MINERAL	10
4.3.1	A cadeia produtiva do fertilizante mineral	12
4.4	O FERTILIZANTE QUÍMICO COMERCIAL	13
4.5	UNIDADE DE MISTURA DE FERTILIZANTES NPK GRANULADOS	14
4.5.1	Tipos de unidades de misturas de NPK granulado	15
4.5.1.1	Sistemas de mistura em batelada	16
4.5.1.2	Sistemas de mistura contínua	24
4.6	QUALIDADE FÍSICA DO FERTILIZANTE	28
4.6.1	Tamanho da partícula e sua influência no granel	28
4.6.2	Densidade	30
4.6.2.1	Densidade do granel	30
4.6.2.2	Densidade aparente.....	30
4.6.2.3	Densidade verdadeira	31
4.6.3	Ângulo de repouso	31
4.6.4	Esfericidade	32
4.6.5	Dureza	33

4.6.6	Higroscopia	33
4.6.7	Tendência ao empedramento	34
4.6.8	Formação de poeira e partículas finas	34
4.7	PROPRIEDADES DAS PARTÍCULAS	35
4.8	SEGREGAÇÃO EM GRANEIS	36
4.8.1	Mecanismos de segregação	26
4.8.1.1	Segregação por trajetória	38
4.8.1.2	Percolação.....	39
4.8.1.3	Deslocamento vertical pela vibração	40
4.8.1.4	Elutriação.....	41
4.9	MISTURAS DE SÓLIDOS A GRANEL	41
4.9.1	Fundamentos de mistura	42
4.9.1.1	Estado da mistura de sólidos em batelada	43
4.9.1.2	Equipamentos	44
4.10	SEGREGAÇÃO EM UNIDADES MISTURADORAS DE NPK	45
4.10.1	A influência das propriedades do material	46
4.10.2	A segregação durante o manuseio dos sólidos – formação de pilhas cônicas livre e no enchimento e descarregamento de silos	47
4.10.3	A geometria dos silos e o escoamento dos sólidos a granel	56
4.11	COMO DIMINUIR A SEGREGAÇÃO ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE MANUSEIO E DA ESCOLHA DOS EQUIPAMENTOS	57
4.11.1	Silos escoamento em massa	58
4.11.2	Fluidizadores	68
4.11.3	Mecanismos de descarga que previnem a segregação	69
5	MATERIAL E MÉTODOS	76
5.1	DESLOCAMENTO DE PEQUENAS PARTÍCULAS PARA ATENUAR A SEGREGAÇÃO	71

5.2	O SEPARADOR GRAVITACIONAL	74
5.3	PLANEJAMENTO E PREPARAÇÃO DO EXPERIMENTO.....	75
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	94
6.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	94
6.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE A SEGREGAÇÃO DA PILHA.....	108
6.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE A SEGREGAÇÃO DAS REGIÕES DA PILHA	111
7	CONCLUSÕES E POSSÍVEIS DESDOBRAMENTOS	115
	REFERÊNCIAS	117

1 INTRODUÇÃO

O fertilizante químico é um insumo essencial para o aumento da eficiência da resposta agronômica de culturas vegetais (*Isherwood, 2000*). Com o aumento populacional, as áreas agricultáveis são cada vez mais escassas. Além da importância técnica na agricultura, o produto tem relação com o desenvolvimento econômico dos países, principalmente aqueles subdesenvolvidos (*McArthur e McCord, 2014*).

Os diversos fertilizantes químicos compostos de macronutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio (NPK) granulados são misturados para formarem produtos cada vez mais específicos e eficazes, mas, como em qualquer processo industrial com sólidos a granel, alguns problemas relacionados com a qualidade física, em especial a segregação, destes fertilizantes podem causar problemas de manuseio que encarecem e dificultam o processo de fabricação, aumentando os custos de controle de qualidade devido ao desperdício de matéria-prima, de manutenção da fábrica, e, em alguns casos extremos, chegando a demandar grandes recondiçamentos de equipamentos e até fábricas completas. Além disso, do ponto de vista agronômico, a segregação pode impactar na aplicação do nutriente no campo, causando prejuízos e retrabalhos além de estrangular a eficiência agronômica de uma cultura.

A segregação nada mais é do que o rearranjo das partículas dentro de um leito de material a granel a partir de uma população homogênea com respeito ao tamanho, forma, densidade ou textura da superfície (*Farnish e Bradley, 2007*). Hoffmeister (1964) já havia esclarecido que o fator que mais contribui com a ocorrência de segregação é a diferença no tamanho das partículas, ou seja, a diferença da distribuição granulométrica presente no leito de material. Ela se manifesta de muitas maneiras no contexto das misturadoras de fertilizantes NPK, mais notadamente na aparência visual das sacas, na diferença de peso entre as diversas sacas produzidas em uma batelada, inconsistência na performance química do ponto de vista da resposta agronômica de uma determinada planta, excesso de particulados extravasados para o ambiente durante o manuseio destes fertilizantes e consequente poluição ambiental, e a própria dificuldade no manuseio, tanto durante o processo fabril quanto na aplicação no campo.

Este fenômeno pode acontecer sempre que houver uma perturbação mecânica numa pilha ou leito de material, portanto é baixa a possibilidade de que, em havendo partículas com diferentes diâmetros em contato umas com as outras, não haja segregação. Garantir a homogeneidade em termos granulométricos de um determinado granel é uma tarefa complexa na indústria, portanto a segregação é encarada como um problema inerente ao processo

industrial que deve ser minimizado lançando-se mão de técnicas de engenharia capazes de atenuar seus efeitos.

A etapa mais comum do processo de fabricação das formulações de fertilizantes NPK granulados e que talvez esteja associada mais fortemente com segregação seja a formação de pilha por descarga aérea. Nessa etapa, um compartimento elevado do solo despeja verticalmente o granel a partir do repouso (mesmo que este seja repouso na direção da aceleração da gravidade) até sua completa acomodação, seja no solo, num recipiente ou container, deixando formar uma pilha de material com ângulo de repouso correspondente (*Farnish e Bradley, 2007*).

Durante a dinâmica de formação da pilha, as partículas com maior diâmetro tendem a rolar para as extremidades além de deixarem espaços vazios oriundos do intertravamento com partículas de mesmo tamanho permitindo com que as menores percolem por entre estes espaços fazendo com que haja uma concentração maior destas no centro (*Rhodes, 2008*). Este problema é grave e pode ser entendido como o inverso de uma mistura, jogando por terra todo o esforço das etapas fabris anteriores que visavam justamente misturar o granel.

Técnicas de manuseio de sólidos baseadas nos conhecimentos sobre o escoamento de sólidos a granel estudados de forma pioneira por Jenike (1961) em seu *Gravity Flow of Bulk Solids* foram propostas no passado com o objetivo de diminuir os efeitos de segregação na formação de pilhas seja no dimensionamento correto dos silos de descarga como em aparatos pós-descarga com o objetivo de atingir a remistura como o arranjo de cones em cascata alternados, ou alimentadores específicos como o chute telescópico.

A revisão bibliográfica desta dissertação contextualiza o problema da segregação nas misturadoras de fertilizantes e faz um apanhado geral dos aspectos históricos e econômicos dos fertilizantes nas Seções 4.1 e 4.2, apresenta os conceitos de fertilizantes e seus aspectos técnicos e nas Seções 4.3 e 4.4, depois faz uma breve descrição dos tipos de misturadoras de fertilizantes e suas classificações na Seção 4.5. Os aspectos de qualidade física dos fertilizantes são elencados na Seção 4.6 e dão suporte para a explanação das propriedades das partículas, presente na Seção 4.7. O assunto-alvo dessa dissertação começa a ser tratado na Seção 4.8 com os aspectos da segregação em granéis e seus mecanismos, conceitos e efeitos, dentre eles, no próprio processo de mistura de sólidos a granel como trata a Seção 4.9.

A segregação no contexto das misturadoras é discutida na Seção 4.10 que também aborda aspectos de engenharia na construção de equipamentos com vistas a evitar a ocorrência da segregação, enquanto a Seção 4.11 discute métodos que os engenheiros podem aplicar para evitar a ocorrência do fenômeno.

Por fim, este trabalho propõe um novo método de manuseio de sólidos para que se diminuam os efeitos da segregação na formação de pilhas cônicas de fertilizantes granulados com o uso de injeção de uma corrente de ar perpendicular à corrente descendente de material durante o descarregamento de um silo com escoamento em massa.

Aplicando-se o conhecimento do comportamento das partículas num fluido, e fazendo uma analogia do sistema proposto com um separador gravitacional, é possível prever a velocidade do ar necessária para o deslocamento das partículas menores em diâmetro presentes numa mistura binária de maneira a mudar o posicionamento final destas na pilha descrito por Hoffmeister (1964), ou seja, que as partículas de menor diâmetro possam ocupar posições diferentes daquelas no centro da pilha.

O sistema proposto foi testado com o uso de uma caixa quantificadora de segregação (conforme explicou Hoffmeister (1964)) e comparado com o grupo controle que consistiu na formação da pilha livre de qualquer interferência.

Os índices de segregação foram calculados e comparados e o sistema proposto apresentou uma melhora de 33,65% mesmo sem qualquer otimização operacional em relação ao grupo controle.

A partir destes resultados, a investigação mais aprofundada e otimização operacional deste tipo de técnica se mostram viáveis para futuros estudos como o teste de várias velocidades de injeção de ar, a comparação com outras técnicas para avaliar a qualidade relativa do sistema e o uso deste para evitar segregação a partir de outras fontes causadoras que não as pilhas cônicas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Contextualizar a segregação no ambiente industrial das misturadoras de fertilizantes NPK como um dentre os vários problemas de qualidade física. Além disso, entender conceitos de mistura e quantificar, através de experimento, com modelo de bancada, a segregação na formação de pilhas através da descarga aérea livre e com o uso de uma nova técnica de manuseio de sólidos a granel via injeção de ar para a atenuação do efeito desse fenômeno, comparar os resultados obtidos e concluir sobre a validade do experimento.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Propor uma nova técnica de manuseio de sólidos a granel para diminuição do efeito da segregação na formação de pilhas com uso de elutriação, ou seja, do deslocamento de partículas através de corrente de ar, colocando-se uma fonte de corrente de ar (soprador) com injeção perpendicular ao escoamento descendente de material a partir do descarregamento aéreo de um silo.

3 JUSTIFICATIVAS

Por ser a segregação um problema grave tanto no processo industrial de fabricação das misturas NPK, quanto no seu uso no campo, causando prejuízos técnicos e financeiros, é necessário que se atue de modo a evitá-la ou preveni-la. Como o fenômeno da segregação é resultado da forma como o material é manuseado, faz-se necessário que, do ponto de vista da engenharia, novas técnicas sejam estudadas e testadas de maneira a observar sua efetividade no que tange a diminuição da segregação. Os resultados podem servir como ferramenta para que o engenheiro decida, dentro da sua possibilidade, se a técnica se aplica ao caso real. Além disso, novos métodos propostos podem se mostrar mais eficientes que os existentes, gerando economia e melhor uso dos recursos.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 CONTEXTO HISTÓRICO E A IMPORTÂNCIA DA AGRICULTURA

Segundo evidências arqueológicas, o início da domesticação de culturas economicamente importantes como os cereais, alguns legumes, raízes comestíveis e as espécies animais, aconteceu há cerca de 12.000 anos. Pode-se dizer, então, que foi nesse período que começou a agricultura para os seres humanos. A prática permitiu com que os aglomerados humanos se fixassem em regiões por períodos longos de tempo, sem a necessidade de migrar em decorrência de aspectos ambientais, como o clima, ou devido à falta de alimentos (advindo da vegetação nativa ou até mesmo da caça) em uma determinada época em uma determinada região, e, por consequência, esses grupos humanos tiveram a oportunidade e a necessidade de desenvolver novas tecnologias para dominar o uso da terra em seu benefício, gerando uma fonte estável de suprimento de alimentos (*Borlaug, 2003*).

É correto dizer, portanto, que a agricultura foi o estopim para o surgimento das civilizações. A fonte de alimento, uma vez assegurada, permitiu com que as populações crescessem em ritmo mais acelerado e proporcionou um aumento na expectativa de vida dos seres humanos.

Por outro lado, essa multiplicação populacional continua acentuada. Dados das Nações Unidas, através do Departamento de Relações Econômicas e Sociais, Divisão de População, estima, em seu relatório sobre a População Mundial de 2015, que os seres humanos no planeta devem chegar aos 8,5 bilhões em 2030, passando dos 9,7 bilhões em 2050, alcançando a marca dos 11 bilhões em 2100. Desse crescimento exagerado, contribuem enormemente os países subdesenvolvidos, que são os mais afetados pela fome.

Recursos essenciais à vida como comida e água se tornarão ainda mais escassos. A Organização Mundial da Saúde (*World Health Organization - WHO*) divulgou em 2014 que um terço da população mundial ainda não tem acesso ao saneamento básico e água potável (Figura 4.1).

Um fator agravante desse panorama é que, quanto maior a população, menor é a área disponível para o plantio dos alimentos. Portanto, cria-se um paradigma pois, mais pessoas precisam de mais comida, mas o espaço físico disponível para tanto, é menor. O uso de fertilizantes químicos é uma ferramenta essencial para plantios cada vez mais eficientes, ou seja, mais produção para uma mesma área, para a crescente demanda de alimentos no mundo.

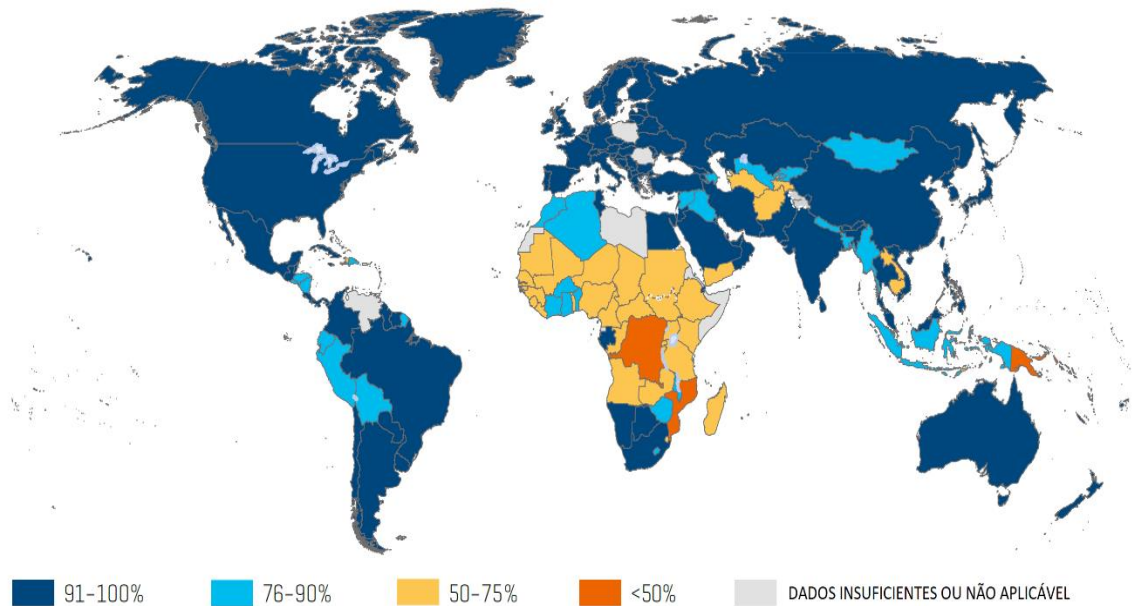


Figura 4.1 – Disponibilidade de água potável no mundo – (adaptado WHO, 2014)

4.2 A IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DOS FERTILIZANTES QUÍMICOS

Estudos já demonstraram a ligação entre o aumento do uso dos fertilizantes com a melhora em índices econômicos. McArthur e McCord (2014) atestaram que um aumento de produção de cereais (através do uso de insumos como fertilizantes, água e sementes modernas) de 1,5 tonelada por hectare para 2 toneladas por hectare, está ligado ao aumento da renda *per capita* de uma população entre 13% a 19%, a um decréscimo percentual de 3,3 a 3,9 em 5 anos na participação do trabalho no campo, e um aumento de produtividade do trabalho não relacionado à agricultura de aproximadamente 20% após, em média, uma década.

Segundo relatório do Banco Mundial *Breaking Down Barriers: Unlocking Africa's Potential through Vigorous Competition Policy*, o fertilizante desempenha um papel importante em todas as economias com setores agrícolas significantes.

Em países com baixo índice de desenvolvimento humano (IDH), como os da África subsaariana, onde a produtividade agrícola é a mais baixa do mundo, a expansão da produção e uso do fertilizante químico representariam um amparo essencial no desenvolvimento do agronegócio de larga escala e proporcionariam uma melhora nos índices de pobreza e alívio da fome.

Portanto, percebe-se a importância multifatorial do fertilizante químico no desenvolvimento econômico, na erradicação da fome e no aumento de produtividade das culturas.

4.2.1 O setor agrícola e de fertilizantes minerais no Brasil e suas perspectivas

O Brasil é o quarto maior consumidor de fertilizantes do mundo e representa 7% desse mercado. Segundo dados da *International Fertilizer Association (IFA)*, o país consumiu, em 2014, 3,9 milhões de toneladas de nitrogenados, 4,8 milhões de toneladas de fosfatados e 5,4 milhões de toneladas de potássicos (*Belon, 2018*). O consumo de NPK total em 2016 foi de 15,1 milhões de toneladas (*IFA, 2018*). O setor agrícola e o agronegócio contribuíram, em 2017, com 23,5% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil. Isoladamente, a agricultura representou, em 2016, 5,4% do PIB, 8,2% do volume de importações, 38,6% do volume de exportações e 18,1% do emprego (*Guimarães, 2018*).

Segundo dados do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) do Brasil, haverá uma expansão de área plantada no país passando, de 74 milhões de hectares em 2017 para 84 milhões de hectares em 2027. Somente na produção de grãos (algodão, amendoim, arroz, aveia, canola, centeio, cevada, feijão, girassol, mamona, milho, soja, sorgo, trigo e triticale), espera-se um incremento de 18,3% na área cultivada. A quantidade de fertilizante entregue ao consumidor final no Brasil cresceu, em média, 4,7% ao ano de 2000 a 2016 (ou um crescimento de 108% no período), enquanto o consumo de fertilizantes em kg/ha, no mesmo período, cresceu 40%. Há também um crescimento projetado do consumo de fertilizante considerando a entrega ao consumidor final para 2026 de 25% segundo dados da Associação Nacional Para Difusão De Adubos (ANDA) (ver na Figura 4.2) (*Guimarães, 2018*).

No que se refere à demanda de fertilizantes até 2022, projeções da ANDA indicam que os números devem aproximar-se de 37,6 milhões de toneladas e os fatores chaves que impactam no indicador são restrições de crédito, a volatilidade da moeda, dos custos de *inputs* e grãos e a lucratividade dos agricultores. Há ainda uma tendência na mudança na logística do setor no Brasil onde a região norte passa ter mais participação no escoamento e uso dos insumos agrícolas. Os custos de transporte ainda são consideravelmente altos e persiste a predominância no transporte rodoviário.

Na comercialização, estima-se um aumento no volume de transações através de distribuidores e revendedores em comparação com o cenário atual, onde há maior venda direta das misturadoras para os agricultores (*McLellan, 2018*). O Brasil ainda é um país predominantemente importador de matéria-prima, sendo que esta parcela do consumo representa 76% do total. Isso indica que ainda há muito espaço para investimentos nos primeiros elos da cadeia produtiva, aqueles ligados à fabricação de matérias-primas simples.

A Figura 4.2 apresenta a projeção de entrega de fertilizantes ao consumidor final.

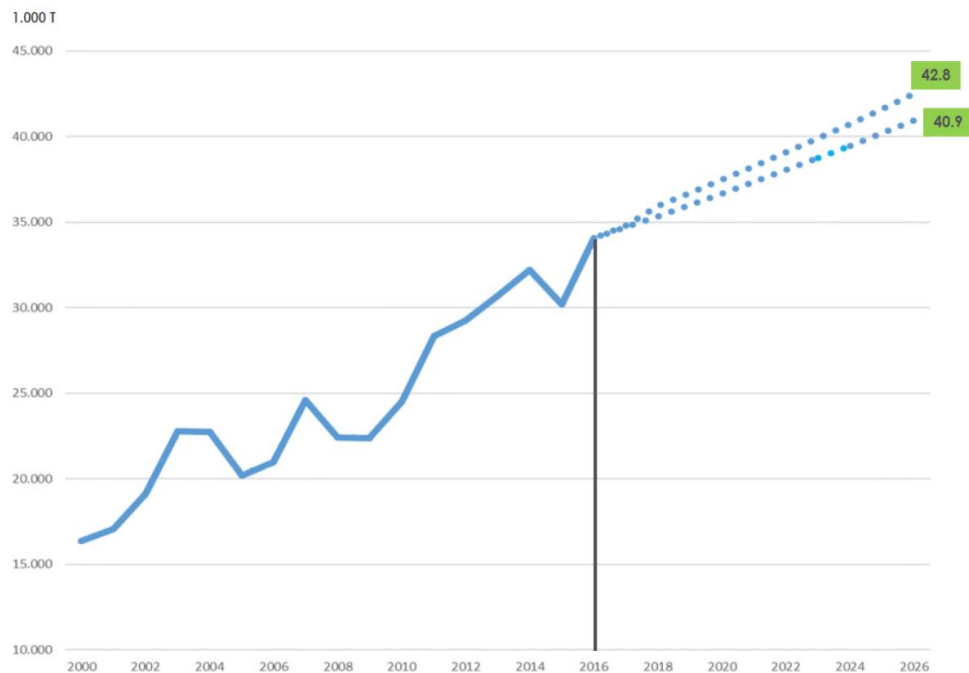


Figura 4.2 – Projeção da entrega de fertilizantes ao consumidor final (Guimarães, 2018)

Outro fator fundamental para que o país alcance os níveis de crescimento econômico no setor agrário em menor prazo que aqueles relacionados aos novos investimentos em unidades fabris é o aumento da eficiência técnica dos insumos desde a sua fabricação, o que mostra a tendência atual à produtos *premium* que produzem impacto na produtividade especialmente em solos pobres como os brasileiros, que possuem maior qualidade e eficiência, e que se traduzem em menor risco (McLellan, 2018).

Ainda segundo McLellan (2018), há dois cenários possíveis no que concerne à capacidade de utilização e margens das misturadoras: i) continuar crescendo de maneira acentuada, a taxa de utilização continuar caindo e alta pressão nas margens de comercialização, e ii) diminuição do crescimento da capacidade de mistura, aumento ou estabilização da taxa de utilização e as margens conseguem espaço para melhorar.

De qualquer maneira, o futuro do setor para 2022 projeta ser significativamente maior, mais eficiente e altamente competitivo, mostrando uma inversão na política de produção puxada pelo volume para um maior foco na qualidade e especialização dos produtos.

Essa tendência evidencia também a necessidade da busca de melhores práticas produtivas orientadas ao uso racional dos recursos para que se evite o desperdício e que se aumente a eficiência dos processos produtivos de maneira a alcançar produtos cada vez mais eficazes e com níveis de qualidades física e química cada vez maiores.

Tabela 4.1 – Principais indicadores do setor de fertilizantes no Brasil (ANDA, 2018)

FERTILIZANTES ENTREGUES AO MERCADO					
(EM TONELADAS DE PRODUTO)					
*Dados até outubro de 2018					
	2015	2016	2017	2018 *	2018x2017
Janeiro	1.994.142	2.129.366	2.609.254	2.443.088	-6,4%
Fevereiro	1.839.487	2.245.917	2.044.113	2.118.832	3,7%
Março	1.760.519	1.823.711	1.764.616	1.773.530	0,5%
Abril	1.383.331	1.642.780	1.379.777	1.721.941	24,8%
Mai	2.066.726	2.353.852	2.450.954	1.775.477	-27,6%
Junho	2.667.828	2.986.298	2.882.984	2.985.574	3,6%
Julho	3.257.788	3.346.162	3.369.869	3.964.453	17,6%
Agosto	3.569.124	3.924.053	4.058.602	4.824.693	18,9%
Setembro	3.754.797	4.021.881	4.234.427	4.247.931	0,3%
Outubro	3.384.614	3.698.403	3.998.408	4.060.667	1,6%
Novembro	2.503.545	3.235.239	3.287.855		
Dezembro	2.020.097	2.675.753	2.357.981		
Total	30.201.998	34.083.415	34.438.840	29.916.186	3,9%
PRODUÇÃO NACIONAL DE FERTILIZANTES INTERMEDIÁRIOS					
(EM TONELADAS DE PRODUTO)					
*Dados até outubro de 2018					
	2015	2016	2017	2018*	2018x2017
Total	9.115.260	9.040.747	8.184.611	6.703.060	-2,9%
IMPORTAÇÃO DE FERTILIZANTES INTERMEDIÁRIOS					
(EM TONELADAS DE PRODUTO)					
	2015	2016	2017	2018	2018x2017
Total	21.087.299	24.481.089	26.324.628	27.512.927	4,5%
PRINCIPAIS EXPORTAÇÕES DE FERTILIZANTES E FORMULAÇÕES NPK					
(EM TONELADAS DE PRODUTO)					
*Dados até outubro de 2018					
	2015	2016	2017	2018*	2018x2017
Total	526.173	549.444	331.624	287.228	4,1%

4.3 O FERTILIZANTE MINERAL

O fertilizante mineral é um material, natural ou manufaturado, que fornece um ou mais elementos químicos necessários para o correto desenvolvimento e crescimento das plantas (Isherwood, 2000). Ele pode ser aplicado diretamente ao solo, solubilizado ou aplicado em nível foliar, e seu objetivo fundamental é manter o solo fértil, suplantando perdas de nutrientes ao longo do tempo, seja para o ambiente, seja para culturas colhidas, para ajudar no desenvolvimento de plantações (IFDC, 1998).

Muitas vezes, o solo natural não dispõe de elementos suficientes para manter o equilíbrio nutricional da planta o que, somado à outras características ambientais, impede o desenvolvimento de algumas culturas. Os nutrientes para as plantas são classificados segundo a quantidade requerida por elas. Os que são necessários em grandes quantidades são chamados de macronutrientes e, além do carbono, hidrogênio e oxigênio, que são obtidos através dióxido de carbono na atmosfera, e a água, existem duas subdivisões de nutrientes.

A primeira é composta pelos nutrientes primários (nitrogênio, potássio e fósforo), e a segunda é composta pelos nutrientes secundários (cálcio, magnésio e enxofre). Por fim, os últimos sete elementos (boro, cloro, cobre, ferro, manganês, molibdênio e zinco) são chamados de micronutrientes devido à menor quantidade necessária.

Um importante conceito de nutrição de plantas foi desenvolvido pelo químico alemão Justus von Liebig em meados dos anos 1840, chamado “Lei do Mínimo” (Figura 4.3). De acordo com este conceito, o crescimento de uma planta é limitado por um fator de crescimento particular que está no menor suprimento disponível para ela. De nada adianta haver abundância na disponibilidade de um determinado nutriente se outro, em menor quantidade, limita o desenvolvimento de uma determinada muda.



Figura 4.3 – “Lei do mínimo” de Liebig (Portal da Aquaponia, acesso em 2018).

A Lei do mínimo revela uma importância adicional quando os preços dos fertilizantes estão altos (especialmente nitrogênio e fosfato), pois pode encorajar alguns agricultores a reduzir ou até mesmo eliminar a aplicação de micronutrientes ou nutrientes secundários. Mas

Liebig dizia claramente que se um solo é deficiente em um determinado nutriente, a resposta agronômica de uma determinada cultura vai decair independentemente da quantidade de macronutrientes aplicados (Mosaic Company, 2018).

O homem dominou a técnica de produzir artificialmente fertilizantes para o uso na atividade agrícola e a disponibilidade no mercado faz parte do dia a dia do agronegócio.

4.3.1 A cadeia produtiva do fertilizante mineral

A cadeia produtiva do fertilizante químico é composta, basicamente, por 6 elos. Inicialmente, há a extração mineral que promove o fornecimento das matérias-primas básicas para a indústria que são a rocha fosfática, o enxofre, o gás natural, subprodutos das refinarias de petróleo e nitrogênio, e rochas potássicas.

A próxima etapa fica à cargo da indústria de fabricação de produtos químicos inorgânicos, que produz as matérias-primas básicas e intermediárias, entre elas, o ácido sulfúrico, o ácido fosfórico e a amônia anidra.

A indústria de fabricação de fertilizantes simples (incluindo aqui as unidades de granulação), fabricam o superfosfato simples (SSP), o superfosfato triplo (TSP), o fosfato monoamônico (MAP) e o fosfato diamônio (DAP), o nitrato de amônio, o sulfato de amônio, o cloreto de potássio, a ureia, os termofosfatos, a rocha fosfática parcialmente acidulada, entre outros.

Os fertilizantes simples são então enviados para as chamadas misturadoras de fertilizantes a granel, ou simplesmente unidades de mistura, que fazem a mistura física das matérias-primas simples nas chamadas formulações NPK. Aqui encerra-se a parte fabril da cadeia produtiva.

As formulações NPK, ou misturas NPK, são então comercializadas pelo setor de distribuição (vendas no atacado, vendas no varejo e logística) para o produtor rural, considerado o consumidor final do produto.

A aquisição pelo consumidor final pode ser via atacado ou varejo, por canais de distribuição especializados ou até mesmo diretamente das misturadoras, nos casos de grandes produtores.

A Figura 4.4 mostra um esquema simplificado da cadeia de produção do fertilizante.

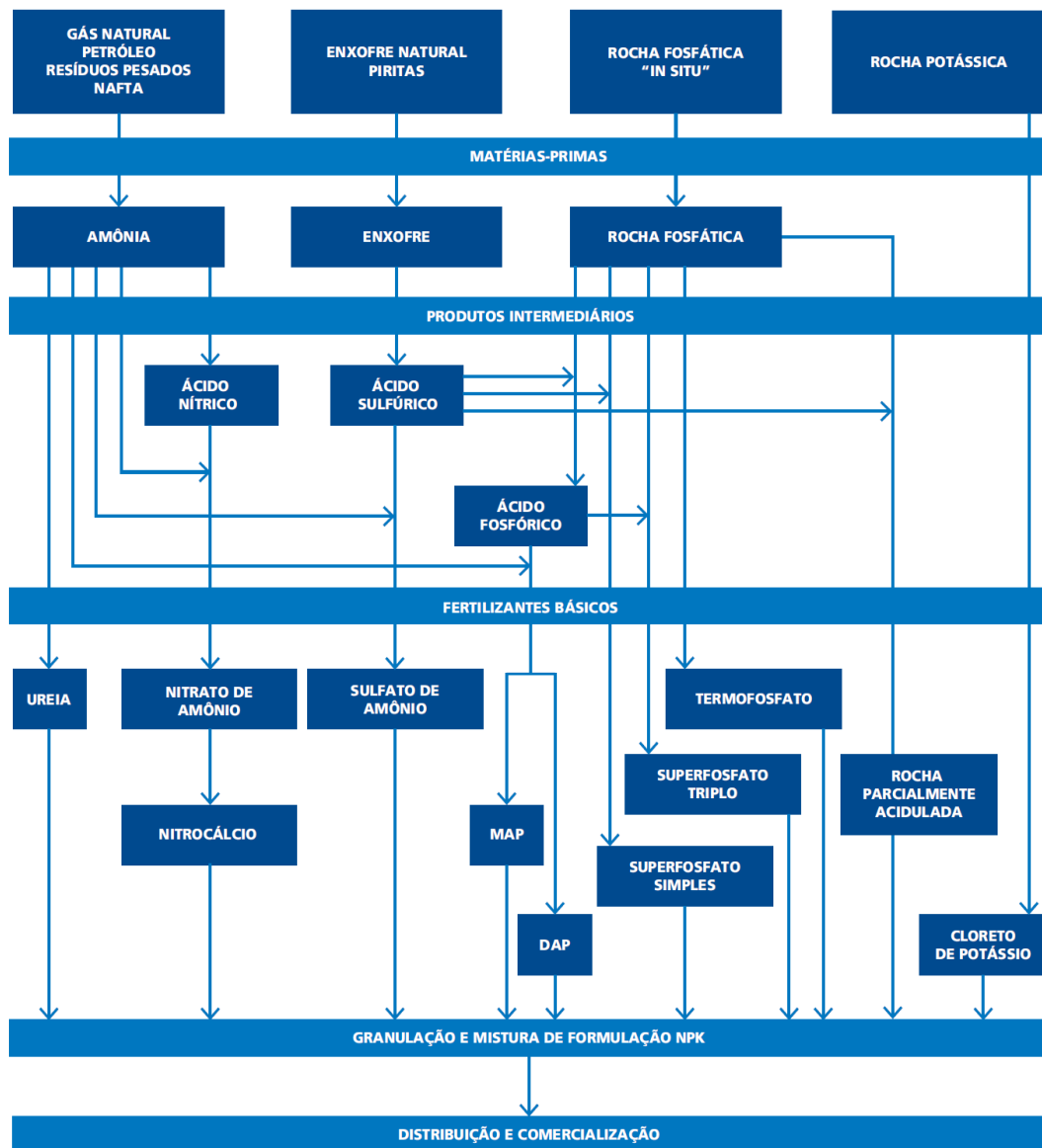


Figura 4.4 – Cadeia de produção do fertilizante (Dias e Fernandes, 2006)

4.4 O FERTILIZANTE QUÍMICO COMERCIAL

Um fertilizante comercial, segundo definição do *Fertilizer Manual*, do Centro Internacional para o Desenvolvimento de Fertilizante (IFDC) e da Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (UNIDO), é um material que contém ao menos um dos nutrientes necessários à planta de forma assimilável ou disponível em quantidades conhecidas, e é comum se referir a eles por uma série de números separados por hífens. Essa série também é conhecida como formulação e é expressa pelos símbolos dos macronutrientes primários, sempre na ordem nitrogênio, fósforo e potássio (N-P-K), e indica a quantidade mínima de cada nutriente que é garantida pelo fabricante. Essa quantidade por sua vez é a

porcentagem em massa para cada 100 kg do produto. Se houver adição de nutrientes adicionais, a representação da série ganha a proporção em massa seguido pelo símbolo do nutriente presente.

As quantidades representadas pela série correspondem não à forma elementar do nutriente específico (com exceção do nitrogênio), mas em forma do óxido do elemento, ou seja, no caso do fósforo, o P_2O_5 , e, no caso do potássio, o K_2O . Portanto, a título de exemplificação, uma formulação 04-20-20 garante que haverá, no mínimo, 4 kg de N para cada 100 kg de produto, 20 kg de P_2O_5 para cada 100 kg de produto e mais 20 kg de K_2O para cada 100 kg de produto. Supondo, entretanto, que agora a formulação indica 04-20-20-2Zn, o conteúdo para cada 100 kg de produto, além das garantias mínimas descritas anteriormente, tem adicionalmente 2 kg de Zn (zinco), um micronutriente (*IFDC, 1998*).

As formulações comerciais nada mais são do que misturas de matérias-primas granuladas anteriormente (no caso dos fertilizantes sólidos granulados) num complexo processo industrial, que posteriormente seguem para as Unidades de Mistura de Fertilizantes NPK.

4.5 UNIDADE DE MISTURA DE FERTILIZANTES NPK GRANULADOS

Misturas a granel são, simplesmente, misturas secas de dois ou mais fertilizantes granulares (*Hoffmeister, 1987*).

O conceito de mistura que se aplica à indústria de fertilizantes é o ato de combinar materiais, cuja operação acontece de maneira suave (sem geração de particulados ou finos) com múltiplos componentes (*Maynard, 2013*). Uma mistura NPK a granel é alcançada através de um processo que não envolve reações químicas, mas uma mescla de diversos tipos de fertilizantes sólidos granulares de maneira a se obter uma formulação de um conjunto de nutrientes.

Em meados dos anos 1850, *Davison, Kettlewell and Company* estabeleceram uma unidade de moagem e acidulação de ossos velhos e conchas de ostras. Pouco tempo depois, *Gustavus Ober and Sons* começaram a produzir superfosfato por acidulação de minério fosfatado. Essas duas empresas, mais tarde, vieram a formar a *Davison Chemical Company*, nas proximidades de *Baltimore, Maryland*, que foi a primeira empresa a misturar fertilizantes granulados em 1936 (*Blenkhorn, 1984*). A prática da mistura a granel de fertilizantes NPK começou nos Estados Unidos da América nos anos 50 com o objetivo de produzir grânulos de escoamento fácil, homogêneos, sem segregação, com garantia de qualidades física e química, livres de pó e razoavelmente higroscópico.

Em locais onde a indústria do fertilizante é desenvolvida e bem estabelecida, como nos EUA por exemplo, uma misturadora dificilmente fornece o fertilizante para produtores distantes mais de 40 km (*Berges, 1987*). Esse sistema de micromercados resulta em entregas rápidas e personalizadas, geralmente a granel em caminhões, desde que a legislação assim o permita, para *clusters* produtivos ou regiões dotadas de muitos agricultores. Em contrapartida, em países subdesenvolvidos, onde a infraestrutura de transporte é fraca ou onerosa, como é o caso do Brasil, é conveniente implantar misturadoras próximas aos produtores de matéria-prima.

Há ainda o caso de países e locais onde não há produtores de matérias primas, ou que o fazem em quantidades não suficientes para o abastecimento interno, fazendo com que as unidades de mistura se instalem em áreas próximas aos portos de desembarque do fertilizante a granel. Nesses dois últimos casos, é comum que o transporte final se encarregue de entregar sacos de 25 ou 50 kg, ou até mesmo *big bags* de 800 a 1.000 kg, ainda mais porque a legislação pode proibir o transporte a granel em caminhões.

Misturas NPK são comercialmente vantajosas em razão de o método de produção permitir uma combinação flexível de nutrientes em diferentes graduações e quantidades, segundo necessidade específica de um ou mais clientes finais, ou seja, produtores agrícolas. Essa versatilidade permite também à indústria se adaptar rapidamente, do ponto de vista de *set up* de fábrica, a quaisquer mudanças nas formulações, sendo necessário, somente, que estejam disponíveis as matérias primas. Tal condição ajuda a otimizar o uso do fertilizante no campo, permitindo um aumento de eficiência na ponta da cadeia produtiva. As matérias-primas mais comumente encontradas em misturadoras de fertilizantes granulados NPK são nitrato de amônio, ureia, sulfato de amônio, DAP, MAP, TSP, o SSP e o cloreto de potássio (*Hoffmeister, 1987*).

4.5.1 Tipos de unidades de misturas de NPK granulado

Existem diversos arranjos fabris no que diz respeito ao processo de mistura dos fertilizantes granulados NPK. Eles podem ser divididos quanto ao tipo de processo, em batelada ou contínuo, e quanto ao arranjo de *layout* da fábrica, vertical ou horizontal. Dentro desses subtipos industriais, ainda pode-se encontrar diferentes equipamentos específicos para mistura de partículas. Particularmente nos Estados Unidos da América (EUA), Américas Central e do Sul, e Ásia, o sistema em bateladas de 1 a 5 toneladas é o mais comum (Figura 4.5). O sistema contínuo, por sua vez, já popular na Europa, tem ganhado espaço também nas Américas. Nesse

caso, é usual encontrar produções entre 30 e 60 toneladas por hora. Dependendo da necessidade e havendo condições necessárias, sistemas de mistura podem estar presentes próximas das culturas, diretamente na fazenda.

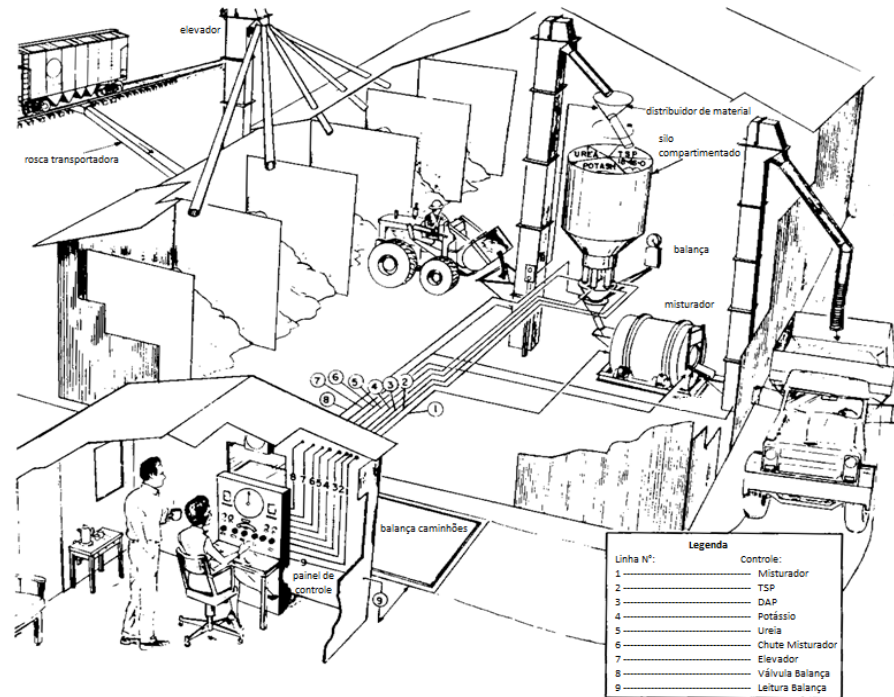


Figura 4.5 – Ilustração de uma unidade de mistura de fertilizantes NPK – adaptado (Nielsen, 1987)

4.5.1.1 Sistemas de mistura em batelada

O processo de mistura em batelada consiste, tipicamente, em três etapas sequenciais: pesagem e carregamento de matéria-prima, misturação e descarga do produto final. O tempo de retenção numa misturadora a batelada é cuidadosamente controlado, enquanto naquela contínua, isso geralmente não é o caso. Os ciclos de mistura variam muito (de segundos a vários minutos). As razões para se usar o processo em batelada leva em conta algumas situações, entre elas (Maynard, 2013):

- Quando o controle de qualidade exige controle estrito da batelada;
- Se houver mudança de matéria-prima com certa frequência;
- Quando o misturador não puder ser exclusivo da linha produtiva;
- Quantidade pequena de produção;
- Quando há variedade nas formulações das misturas.

As vantagens deste tipo de processo frente ao tipo contínuo são mais evidentes quando:

- Se comparam os custos de instalação e operação para capacidades pequenas e médias;
- Menor custo de limpeza quando da troca de matérias-primas;
- Flexibilidade produtiva;
- Controle do tempo de mistura.

As unidades de mistura que usam o sistema de bateladas são as mais comuns no Brasil. O fluxograma típico dessas unidades (Figura 4.6) começa com a recepção da matéria-prima. Ela pode ser fluvial ou marítima (Figura 4.7), rodoviária ou ferroviária (Figura 4.8). A transferência da matéria-prima para os boxes de armazenagem é chamada de recepção de matéria-prima ou descarga.

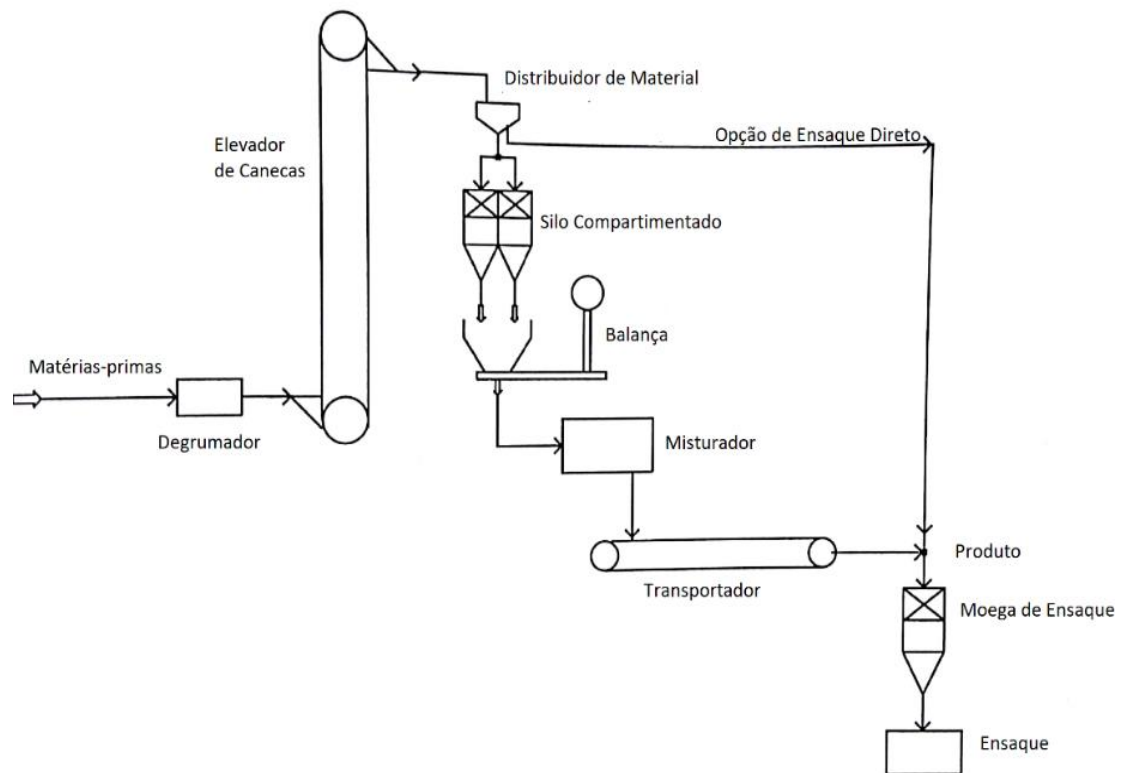


Figura 4.6 – Fluxograma de uma unidade de mistura NPK a batelada – adaptado (Fertilizer Manual, IFDC)

Após o descarregamento do fertilizante na unidade de recepção, transportadores de variados tipos conduzem o material até o box designado dentro do galpão de armazenagem.

Em geral, usa-se uma esteira móvel com um designador de material que corre sobre trilhos por cima dos boxes. Este conjunto é conhecido como sistema de descarga aérea (Figura 4.9).



Figura 4.7 – Sistema de descarregamento em porto fluvial numa unidade de mistura NPK (Yargus Manufacturing, Inc. website, acesso 2017)



Figura 4.8 – Sistema de descarregamento ferroviário numa unidade de mistura NPK (Yargus Manufacturing, Inc. website, acesso 2017)

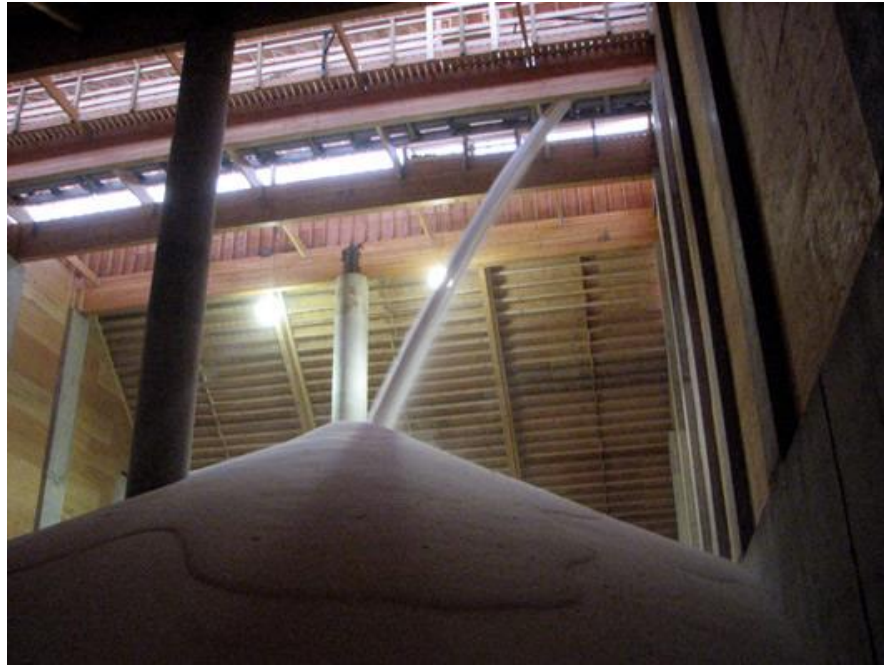


Figura 4.9 – Descarga aérea em box de matéria-prima numa unidade de mistura NPK
(Yargus Manufacturing, Inc. website, acesso 2017)

Após a recepção completa de matéria-prima, com abastecimento dos boxes, a planta está pronta para operar. A partir daí, na sala de controle, através de um sistema supervisorio da automação, conforme exemplo da Figura 4.10, o operador adiciona as informações de formulação da mistura desejada. Ele também controla o que chamam de ordem de carregamento, que nada mais é que uma ordenação dos caminhões que levarão o produto final, seja ele ensacado ou em *big bags*, ou ainda a granel, em locais onde a legislação assim o permite.

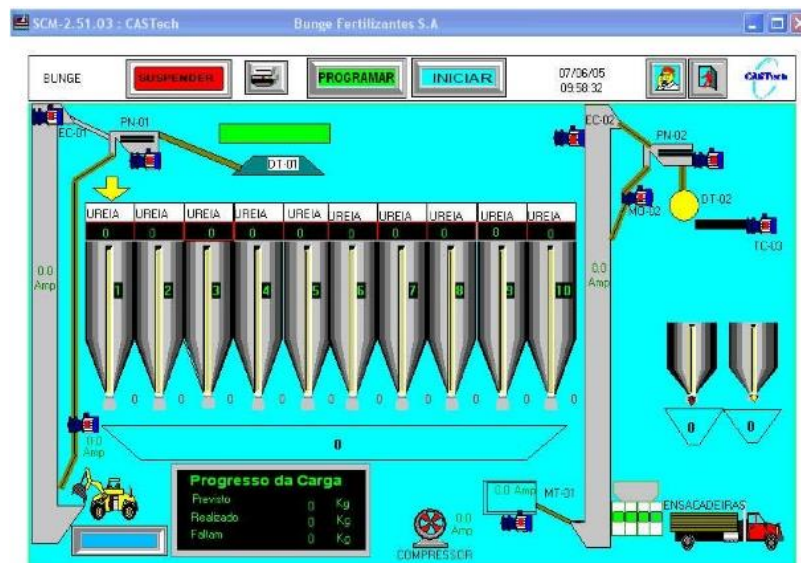


Figura 4.10 – Tela de sistema supervisorio de uma unidade misturadora NPK (CASTech Automação ®, 2005)

O operador da pá carregadeira recebe um sinal da sala de operação que informa qual matéria-prima deve ser alimentada à linha de produção.

Em plantas verticais (Figura 4.11), existe um elevador de canecas comum para todas as matérias primas (a não ser que a planta faça mistura de elementos que não podem se contaminar, e então há de existir uma forma alternativa para alimentação de um desses materiais para evitar a contaminação cruzada). O operador da pá carregadeira carrega a matéria-prima designada à moega do elevador que eleva o produto até o que é chamado de designador de material (Figura 4.12). O sistema de automação destas unidades geralmente já possui um sistema para sinalização de qual matéria-prima o operador deve buscar e em qual quantidade, geralmente medida em quantidades de pás das pás carregadeiras. Em unidades mais simples, há um sinal luminoso com o nome da matéria-prima.

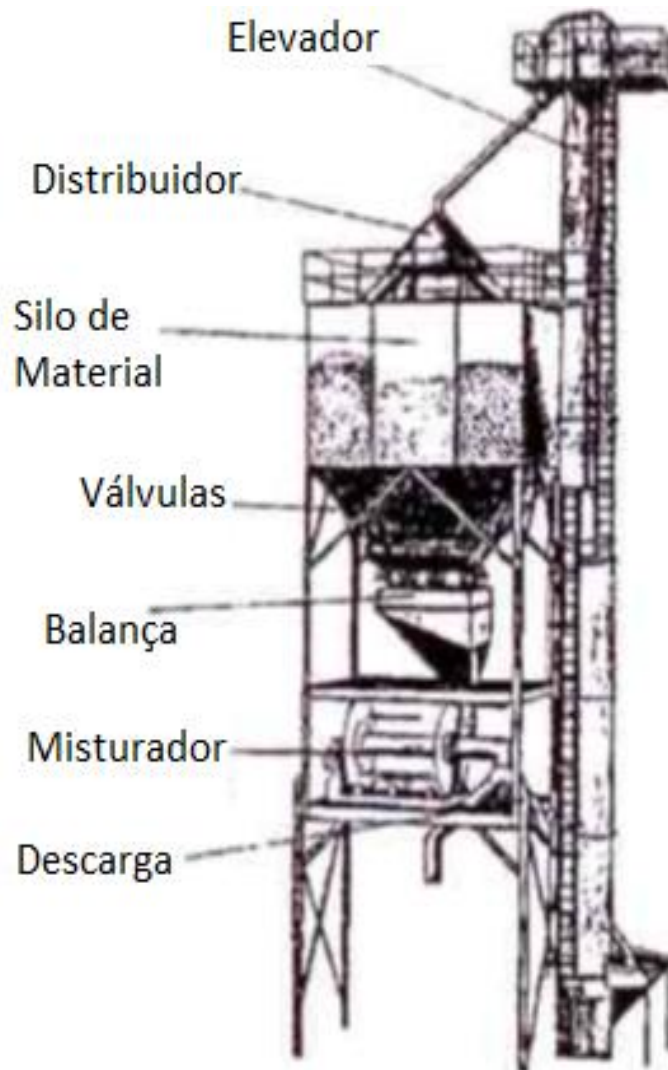


Figura 4.11 – Exemplo do layout de uma misturadora vertical (batelada) ou tower system - adaptado (Dry Fertilizer Blending, IFDC)



*Figura 4.12 – Designador de material típico de uma misturadora vertical a batelada
(CASTech Automação ®, 2005)*

O designador ou distribuidor de material, através de um sistema que pode ser automático (através de controle dedicado ou integrado no sistema de automação) ou manual, envia a matéria-prima para um compartimento no silo de armazenagem de matéria-prima. Estes silos são compartimentados na quantidade necessária para abrigar os macronutrientes e os micronutrientes que serão dosados para a formulação desejada. Os compartimentos de micronutrientes são menores que aqueles de macronutrientes.

Após o enchimento do silo compartimentado, o sistema automático ordena a abertura de cada compartimento. Uma balança estática na saída deste silo vai armazenando a informação de peso até chegar no limite pré-estabelecido pelo sistema supervisor. Cada matéria-prima é alimentada individualmente até que seja completado o ciclo de dosagem.

Reconhecido o peso final da dosagem, a balança é aberta e o seu conteúdo completo é enviado ao misturador.

Os misturadores mais comuns são os de pás, os chamados *ribbon mixers* (Figura 4.13), os do tipo betoneira (Figura 4.14) e os do tipo tambor rotativo (Figura 4.15). Além destes, pode-se citar os *Tumblers*, os misturadores tipo tubo, os planetários e as moegas misturadoras (Maynard, 2013).

Os conceitos teóricos sobre misturadores serão discutidos na Seção 4.9.



Figura 4.13 – Ribbon Mixer (Yargus Manufacturing, Inc. website, acesso 2017)



Figura 4.14 – Misturador tipo betoneira (Yargus Manufacturing, Inc. website, acesso 2017)



Figura 4.15 – Misturador rotativo (Nippon Máquinas website, acesso 2017)

Completado o ciclo de mistura, o produto final vai para o setor de ensaque.

Tem se tornado cada vez mais frequente o abandono da venda de ensacados menores em detrimento do *big bag*. O procedimento de carregamento dos caminhões com o produto final está cada vez mais sofisticado, visando eliminar o uso de mão de obra humana dada a insalubridade e a periculosidade intrínseca ao procedimento. Já existem sistemas completamente automáticos de enchimento e carregamento de *big bags*.

Dependendo da qualidade física das matérias primas, pode ser necessário que se instale um sistema de peneiramento para retirar parte do produto fora da especificação granulométrica. Esse problema é comum em países que não produzem a própria matéria-prima e a recebe via navios. Pelas próprias dinâmicas de transporte e manuseio, e pela relativa friabilidade das partículas, parte do material se degrada antes do seu uso nas misturadoras e precisa ser reclassificado para que o produto final misturado atenda à legislação no que tange a qualidade física do fertilizante NPK granulado.

Há ainda um arranjo fabril de misturas em bateladas com *layout* horizontal, como exemplifica a Figura 4.16. Nesse sistema, moegas de recepção de matérias primas são colocadas lado a lado. Cada uma delas é dotada de uma balança estática para pesagem das doses de cada componente da futura mistura. A partir deste ponto, o fluxograma de operação é similar àquele das unidades verticais.



Figura 4.16 – Unidade de mistura a batelada horizontal – moegas de dosagem individuais (Damiani Equipamentos, website)

4.5.1.2 Sistemas de mistura contínua

Numa unidade de mistura contínua, a pesagem, o carregamento, a misturação e a descarga ocorrem de maneira contínua e simultânea. Diferentemente das unidades de mistura em batelada, onde o tempo de mistura é cuidadosamente controlado, no sistema contínuo este tempo não é uniforme e pode ser diretamente afetado pela velocidade do misturador, pela taxa de alimentação, pela geometria e desenho dos equipamentos. Geralmente se escolhe este tipo de unidade devido a (Maynard, 2013):

- Altas taxas de produção;
- Não necessidade estrita de integridade da batelada;
- Combinação de várias correntes de processo;
- Necessidade de atenuação de variação no produto.

Algumas vantagens em relação à produção em batelada são:

- Facilidade de integração de equipamentos na linha de produção;
- Menor variação entre bateladas causada por erros de alimentação;
- Automação pode melhorar qualidade e reduzir custo laboral;
- Maiores taxas de produção são possíveis.

Os sistemas de mistura contínua são do tipo horizontal e são mais comuns na Europa, mas tem ganhado destaque nos EUA. Até existem misturadores contínuos em plantas verticais (*tower system*) mas, até mesmo pela própria característica da pesagem em balança estática, tais arranjos não podem ser incluídos no rol de sistemas contínuos.

Estes sistemas tem um fluxograma (Figura 4.17) bem similar aos das unidades em batelada, diferindo, basicamente, na maneira com que as matérias primas são alimentadas ao sistema e na forma com que a massa e/ou volume de cada componente de uma formulação é aferida(o).

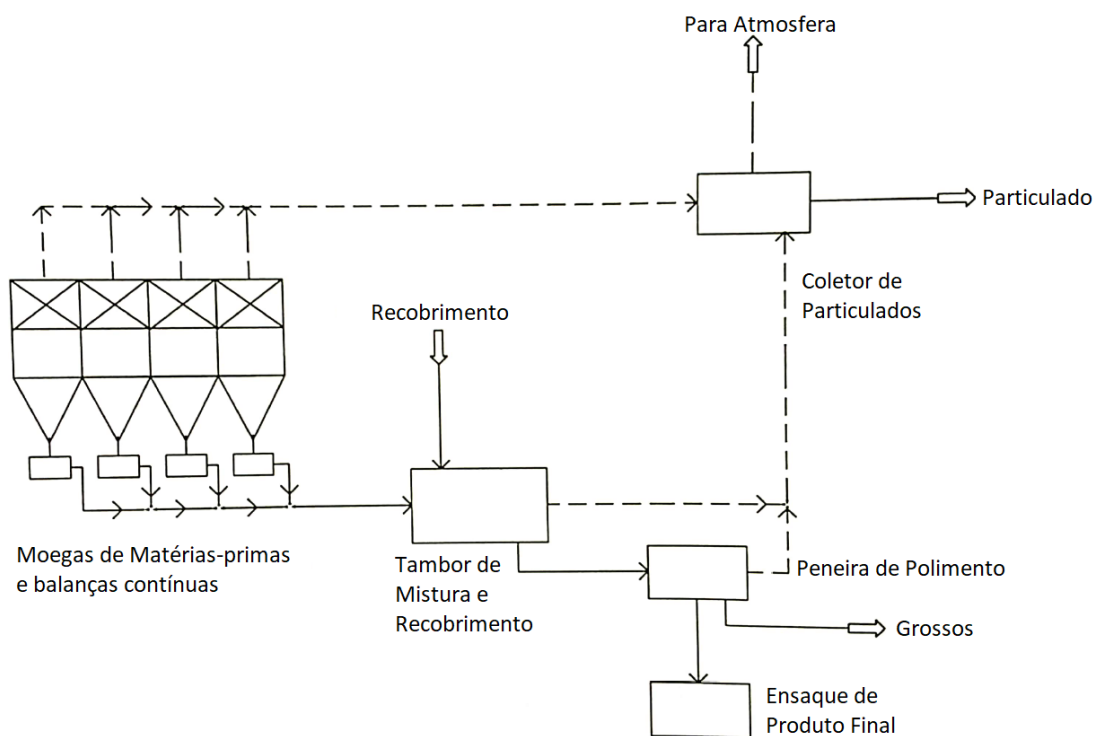


Figura 4.17 – Fluxograma de uma unidade de mistura NPK contínua (*Fertilizer Manual, IFDC*)

Do ponto de vista do arranjo dos equipamentos, as unidades contínuas são consideradas horizontais, pois são compostas de moegas paralelas para cada nutriente a ser adicionado na mistura, portanto não há, como no caso das verticais, um silo compartimentando elevado sobre

uma balança estática. Assim como nas verticais, os compartimentos dos macronutrientes são maiores que os de micronutrientes. A Figura 4.18 ilustra a *layout* de uma misturadora contínua.

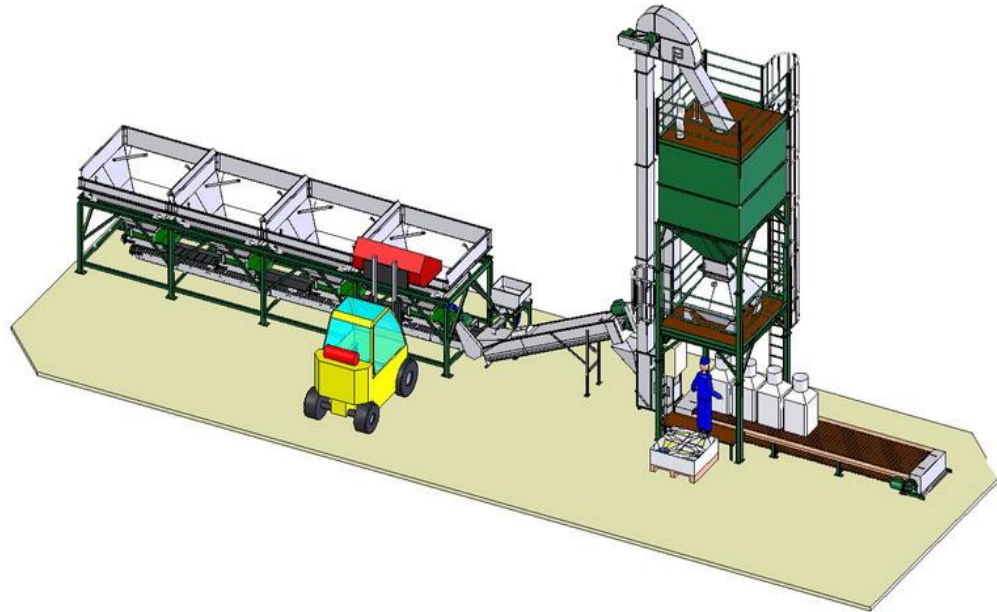


Figura 4.18 – Ilustração de uma unidade de mistura contínua – horizontal (EMT website, 2018)

O processo de abastecimento dos boxes de matéria-prima é exatamente igual ao das plantas de processo em batelada.

O operador da pá carregadeira também recebe um sinal da sala de controle, que previamente cadastrou no sistema de automação, a receita a ser produzida (tal qual qualquer outro tipo de unidade misturadora de fertilizantes), e alimenta as moegas correspondentes com o material correto.

Após esse abastecimento, o sistema está preparado para operar e a dosagem pode acontecer de duas maneiras. A primeira é por decréscimo de peso e a segunda por cálculo volumétrico.

No caso do tipo por decréscimo de peso cada moega funciona como uma balança dinâmica pois é apoiada num conjunto de células de carga que registra o peso total de produto em seu interior no sistema de automação que por sua vez controla a velocidade de dosagem para respeitar as proporções de cada componente da mistura.

Já no tipo volumétrico, sabendo-se a densidade aparente do produto, e o volume do dispositivo alimentador/dosador de cada moega (que pode ser uma válvula rotativa ou uma rosca sem fim, por exemplo) pode-se quantificar com bastante precisão a quantidade de material

dosado em razão da velocidade (no caso das válvulas rotativas, a quantidade de revoluções por unidade de tempo). A Figura 4.19 mostra uma foto real de uma mistura contínua horizontal.



Figura 4.19 – Foto real de uma unidade de mistura contínua – horizontal (EMT website, 2018)

Como as moegas são colocadas uma ao lado da outra, em sequência, este sistema está preparado para que a dosagem da moega imediatamente posterior só comece quando o produto da anterior atinge a posição do bocal de saída da moega consecutiva. No fim, haverá uma superposição de todas as matérias primas que compõe a mistura.

Essa dinâmica de dosagem permite, em alguns casos, que nem seja necessária a inserção de um misturador pois cada fatia do leito de material superposto é uma amostra com as proporções exatas respeitadas. Mas isso, quase sempre, é limitado pela uniformidade física das matérias primas (diâmetro da partícula e densidades).

A peça transportadora, que pode ser uma correia, uma rosca sem fim (*auger*), um transportador de arraste (*reddler* ou *chain paddle*) ou outro mais específico, leva o produto até o misturador, que deve ser contínuo.

Após a mistura, o elevador de canecas leva o produto final para um silo de ensaque, de *big bag* ou granel.

Independentemente do tipo ou sistema adotado, o objetivo de uma misturadora é um só, o de fornecer um produto formulado que atenda as exigências legais (Instrução Normativa nº 46, de 22 de novembro de 2016, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA) no que tange à qualidade química, ou seja, a garantia nutricional para a planta, como

também a qualidade física, que vai determinar se um fertilizante é uniforme, higroscópico, se tem tendência a aglomerar, aderir e, mais importante, de segregar.

4.6 QUALIDADE FÍSICA DO FERTILIZANTE

A qualidade física é um importante critério usado pelos consumidores na seleção de um fertilizante específico. A aceitação de um fertilizante no mercado depende não somente do conteúdo nutricional como também na qualidade física. Mesmo que a resposta agronômica das plantas ao conteúdo nutricional disponível seja a maior razão para justificar o uso dos fertilizantes, a qualidade física é, corriqueiramente, a razão de seleção de um produto em detrimento de outro (*IFDC, 1998*).

As propriedades físicas de um fertilizante vão determinar e influenciar não somente na resposta agronômica como no manuseio, transporte, estocagem e, finalmente na aplicação no campo.

A maioria dos problemas encontrados com fertilizante provavelmente são aqueles resultantes de deficiências nas propriedades físicas: aglomeração, empoeiramento, escoamento deficitário, segregação e higroscopia excessiva.

Este assunto é tratado com extrema cautela pelos produtores de fertilizantes e muitas empresas desenvolveram aditivos para ajudar a controlar e a garantir a qualidade física, como evitar a higroscopia excessiva, a formação de pó, diminuir a friabilidade e a aglomeração.

4.6.1 Tamanho da partícula e sua influência no granel

Conhecimento sobre o tamanho das partículas e a distribuição (perfil granulométrico) de um sistema a granel é um pré-requisito para a maioria dos processos produtivos e tem efeito significativo na força mecânica, densidade, propriedades elétricas e térmicas do produto final. Perdas consideráveis na produção podem acontecer em decorrência do descontrole no tamanho das partículas de um granel (*Jillavenkatesa et al., 2001*).

Descrever a distribuição granulométrica das partículas que compõe um granel é um fator central na caracterização do granel. Uma população de partículas é descrita pela distribuição granulométrica, que pode ser expressa com curvas de distribuição de frequência ou curvas cumulativas como mostra a Figura 4.20 (*Rhodes, 2008*).

A distribuição granulométrica de um fertilizante é definida pelo diâmetro médio das partículas que compõem uma determinada amostra.

Existem algumas maneiras de se determinar a distribuição granulométrica de uma amostra (cuja seleção depende de um mínimo conhecimento sobre a ordem de grandeza do diâmetro das partículas envolvidas), entre elas: peneiramento, sedimentação gravitacional, microscopia e difração por luz de laser (*Jillavenkatesa et al., 2001*). A mais comum das técnicas, e também uma das mais antigas e baratas, é a de separação em peneiras com aberturas pré-definidas (série Tyler ou ABNT).

No caso de partículas sólidas, este método se mostra confiável o bastante para um espectro de partículas maiores que $45\ \mu\text{m}$ (*Rhodes, 2008*). Obviamente este sistema não está imune a erros e podem advir do próprio processo de peneiramento (cegamento das telas por partículas de tamanho aproximado ao da abertura, alguma aglomeração que ocorra nas partículas mais finas), e mau uso que cause danos nas telas e alteração nas aberturas originais das peneiras.

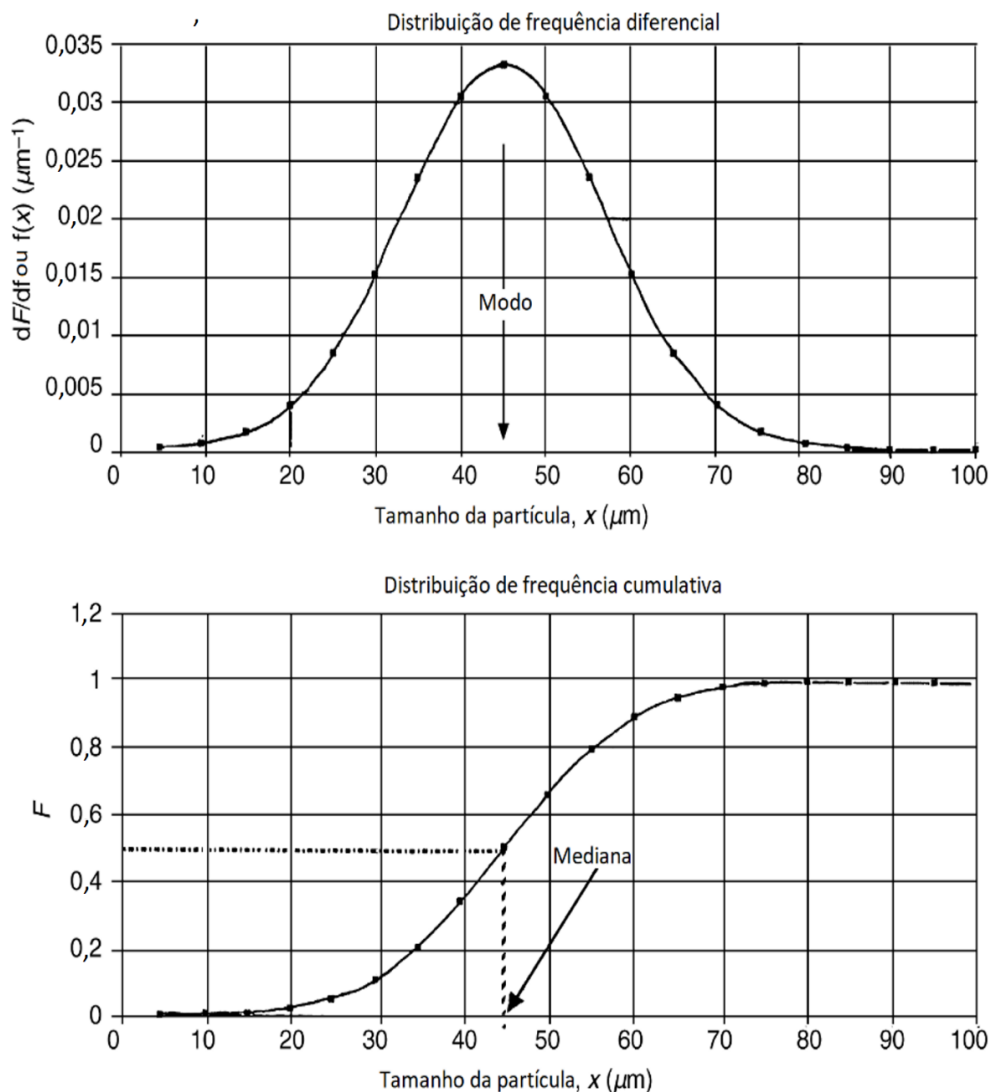


Figura 4.20 – Curvas de frequência cumulativa e diferencial – adaptado (*Rhodes, 2008*)

O tamanho das partículas pode afetar os efeitos da resposta agrônômica do fertilizante, como, por exemplo, na entrega dos nutrientes e na solubilidade, que é proporcional ao tamanho da partícula (*IFDC, 1998*).

O processo de granulação nada mais é que um processo de aglomeração, e, por consequência, o tamanho das partículas envolvidas influencia o resultado final. Mas não é só na granulação que a distribuição granulométrica tem importante papel, mas também é fator de preocupação no manuseio das partículas nas unidades de mistura.

A mais importante influência é, sem dúvida, a segregação, que nada mais é que a capacidade de partículas de diferentes tamanhos se moverem de uma determinada maneira quando grandes quantidades de partículas desuniformes juntas sofrem alguma perturbação mecânica.

A segregação impacta na qualidade final do produto entregue e pode ser um verdadeiro problema para quem precisa manusear partículas propensas a segregar.

4.6.2 Densidade

4.6.2.1 Densidade do granel

É a massa por unidade de volume incluindo os espaços vazios entre as partículas, e é medido através da pesagem de um recipiente de volume conhecido enchido com material até o topo. Este método ainda pode definir valores mínimos e máximos, sendo, respectivamente, enchendo-se o recipiente de forma livre, sem aplicação de força que ajude no arranjo das partículas, e enchendo-se o mesmo recipiente, mas com um processo claramente especificado de compactação. A diferença entre o máximo e o mínimo, para fertilizantes granulados, é de aproximadamente 12% (*IFDC, 2008*).

É um conceito de fundamental importância na indústria química, principalmente para o dimensionamento dos equipamentos.

4.6.2.2 Densidade aparente

A densidade aparente é aquela obtida através da divisão da massa de uma partícula (por exemplo, um fertilizante) a granel por unidade de volume, descontando-se os espaços vazios entre as partículas. Não é uma grandeza medida sempre, mas tem relação com o estudo da segregação e no desenvolvimento de processos de granulação.

Uma variação na densidade aparente pode resultar na variação da dureza, na capacidade de retenção de umidade e nas propriedades de armazenagem (*IFDC, 1998*).

A determinação da densidade aparente de uma partícula é feita através da submersão de uma massa conhecida dessas partículas e medindo-se o volume de mercúrio deslocado num aparato específico para esse fim.

4.6.2.3 Densidade verdadeira

É a massa por unidade de volume, excluindo-se os espaços entre as partículas aglomeradas e o volume da porosidade das partículas. É uma variável de interesse no controle de processos.

4.6.3 Ângulo de repouso

Materiais granulares tem uma variedade de comportamentos que os distinguem de outras formas de matéria. Esses materiais se conformam na geometria do recipiente em que são inseridos e, diferentemente dos líquidos, não escoam imediatamente após a inclinação deste, desde que esta mesma inclinação não exceda um ângulo máximo de estabilidade. No caso de a inclinação superar este ângulo máximo de estabilidade, os grãos começarão a fluir e uma avalanche de partículas começa a acontecer. Este ângulo depende, dentre outras coisas, da esfericidade das partículas, coesão entre elas (principalmente na presença de umidade) (*Albert et al., 1997*).

O ângulo de repouso tem relação com a escoabilidade do fertilizante. O ângulo de repouso depende de fatores intrínsecos ao material, como densidade, forma das partículas, granulometria e umidade. A definição da Organização Internacional de Normatização (ISO) de ângulo de repouso de uma pilha nada mais é que o ângulo na base de um cone de fertilizante (ou outras partículas) obtido através do despejamento livre de uma amostra sobre uma superfície plana sob condições previamente estabelecidas.

O ângulo de repouso é aquele formado quando o fertilizante é despejado desde um ponto fixo numa pilha de mesmo material (*Hoffmeister, 1979*). Esta é uma variável importante para o dimensionamento de recipientes de estocagem como silos, moegas, chutes, transportadores, e também para o cálculo civil do armazém de matéria-prima.

Essa grandeza, no caso dos fertilizantes, varia entre 25° a 40°, e existe uma relação inversamente proporcional entre a esfericidade com o ângulo de repouso.

4.6.4 Esfericidade

Esfericidade é a medida de forma de partículas incluindo os fertilizantes granulados. É útil na estimativa da eficiência de processamento e recobrimento, manuseio e estocagem de um fertilizante.

Para se determinar a esfericidade, uma amostra dos grânulos é distribuída sobre uma correia inclinada em movimento. As partículas mais “redondas” rolam correia abaixo e são coletadas, enquanto as partículas irregulares são carregadas pela correia (*IFDC, 1998*).

Vários outros métodos são baseados na medição de comprimento dos três eixos que representam a geometria da partícula: a (comprimento do eixo maior), b (comprimento do eixo médio) e c (comprimento do eixo menor).

A Equação (4.1) é um índice de esfericidade simplificado proposto por Wadell (1933), onde d_n é o diâmetro nominal da partícula (diâmetro da esfera com mesmo volume que a partícula em análise).

O índice dado pela Equação (4.2) e chamado de esfericidade de volume elíptico.

O índice da Equação (4.3) fornece mais precisão para a computação de outros índices comportamentais.

A Equação (4.4) mostra um índice mais amplamente aceito, uma vez que se correlaciona muito com a velocidade de sedimentação das partículas (*Cruz-Matías, 2013*).

As equações de (4.1) a (4.4) são usadas com frequência na literatura:

$$\psi = \frac{d_n}{a} \quad (4.1)$$

$$\psi = \left(\frac{bc}{a^2}\right)^{1/3} \quad (4.2)$$

$$\psi = \frac{c}{(ab)^{1/2}} \quad (4.3)$$

$$\psi = \left(\frac{c^2}{ab}\right)^{1/3} \quad (4.4)$$

4.6.5 Dureza

O fertilizante deve ter dureza suficiente para suportar os estresses mecânicos causados pelo seu manuseio, evitando a criação de finos e pós e consequente alteração da distribuição granulométrica que causa todos os problemas já citados.

A dureza é o resultado do processo químico ao qual foi submetido o fertilizante, que vai determinar a composição química, porosidade, umidade, forma e cristais na superfície.

O fertilizante deve resistir à certa força de compressão, em geral aceita-se um mínimo de 1,5 kgf. Se o material não resistir a forças de compressão mínimas que ocorrem nas pilhas de produto, comuns durante os processos industriais, ocorrerá a formação de pós durante o manuseio. Ele também deve ser resistente a abrasão pois o atrito entre as próprias partículas também pode formar finos indesejáveis, além de alterar a forma do grão (*IFDC, 2008*).

Por fim, as partículas devem resistir à impactos moderados, que ocorrem quando do descarregamento e transferência entre recipientes, durante seu manuseio.

4.6.6 Higroscopia

A higroscopia é a capacidade de absorver água de um fertilizante em determinadas condições de temperatura e umidade.

A pressão do vapor na superfície de um NPK pode ser a 25°C, 15,7 MPa. Nesta temperatura a água em forma de vapor que possui uma pressão parcial de 31,7 Mbar (ar saturado) será absorvido pelo fertilizante até igualdade das pressões de vapor.

Todos os fertilizantes são mais ou menos higroscópicos, o que significa que começam a absorver umidade a uma certa umidade relativa do ar. Alguns fertilizantes muito higroscópicos absorvem umidade com mais facilidade.

A absorção de água ocorre se a pressão parcial do vapor d'água do ar exceder a pressão do vapor d'água do fertilizante.

A higroscopia excessiva durante o armazenamento e o manuseio irá reduzir a qualidade física e possui consequências indesejáveis para produtos fertilizantes (*Yara Brasil Fertilizantes, 20--*):

- As partículas ficam, aos poucos, moles e pegajosas;
- O volume das partículas aumenta e as partículas começam a rachar;
- Diminuição da força de atração com componentes da partícula;
- Aumento da tendência ao empedramento;

- Entupimento de equipamento;
- Aumento da desconformidade às especificações.

Nesta situação, a umidade final do fertilizante será a umidade de equilíbrio com o ar ambiente (Figura 4.21).

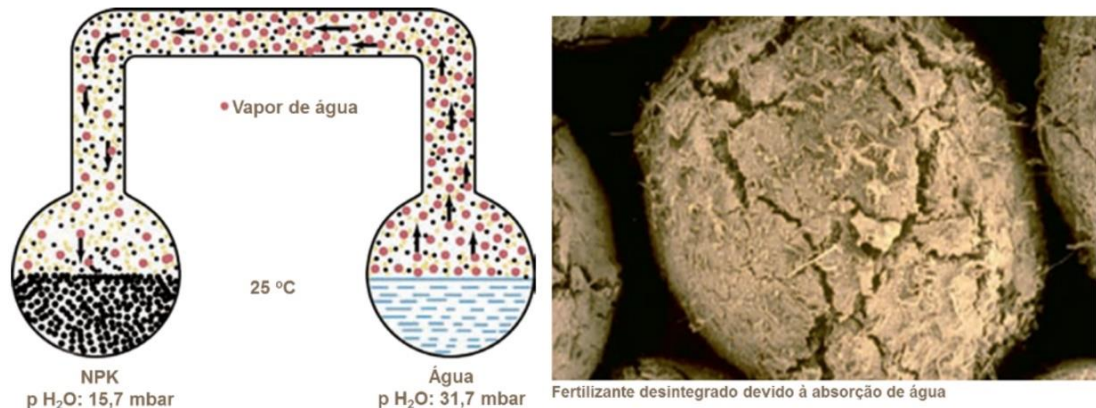


Figura 4.21 – Higroscopicidade (Yara Brasil Fertilizantes, website)

4.6.7 Tendência ao empedramento

O empedramento nada mais é que a formação de massa coesiva de muitas partículas individuais e ocorre por causa da formação de fortes pontes cristalinas e forças coesivas entre as partículas. Entre os mecanismos que favorecem o empedramento, os de maior repercussão são algumas reações químicas que ainda podem ocorrer com o produto final, a dissolução e recristalização de sais fertilizantes na superfície da partícula e a ocorrência de forças adesivas e capilares entre superfícies. Também é devido às condições ambientais tais como umidades do ar e do produto, temperatura e pressão ambiente, força de atração e formato da partícula, composição química e o tempo de armazenagem, e a diminuição desse fenômeno depende do controle destes fatores, ainda mais com a ajuda de agentes antiempedramento, que diminuem a taxa de absorção de água dos produtos (Yara Brasil Fertilizantes website, 2017).

4.6.8 Formação de poeira e partículas finas

A formação de partículas finas é um transtorno significativo para a indústria de fertilizantes. Primeiro porque gera um problema ambiental e segundo porque significa perda de material para o ambiente. As causas comuns de presença de finos nos produtos estão presentes

no manuseio do granel e pode-se citar o peneiramento deficitário, grãos excessivamente friáveis, falha nos aditivos antiempedramento, abrasão excessiva, entre outros (*IFDC, 1998*).

A formação de partículas finas ainda ajuda a piorar um problema que merece destaque, que já foi comentado anteriormente e é o foco deste trabalho, a segregação. Para entendê-la, é necessário que se compreenda como as partículas se comportam quando acumuladas em grandes quantidades, tanto entre elas, quanto em relação às paredes dos recipientes de manuseio.

4.7 PROPRIEDADES DAS PARTÍCULAS

Pós e particulados, dependendo de suas características físicas, podem ser relacionados com sistemas bifásicos – sólido-líquido – ou trifásicos – sólido-líquido-gasoso – que, às vezes, podem ser tratados como um contínuo simples. Pelo fato de haver uma quantidade variada de propriedades destes sólidos a granel nesses arranjos, há que se entender as propriedades físico-mecânicas de partículas sólidas discretas assim como as interações físico-químicas dos contornos sólido-líquido absorvidos nas partículas (*Rhodes, 2008*).

Há uma compreensão em relação à fase de fluido contínuo (geralmente um gás) de ser não somente uma fase auxiliar, mas também como uma contribuição adicional relevante à fase de sólido particulado provocando os pós a agirem como sistemas sólidos-fluidos.

Partículas finas como os pós, na prática, não são somente unidades sólidas de matéria, que podem suportar cisalhamento e deformação sob estresse leve, mas podem, em alguns casos, se comportarem como fluidos. Com um grau de estresse ou perturbação mecânica aplicada, partículas podem escoar por moegas e silos e, sob aeração excessiva, por exemplo, podem até transbordar do recipiente tal qual líquidos (*Stanley-Wood, 2008*).

Sabe-se que partículas podem ser compactadas, granuladas, peletizadas, e, apesar disso, essas partículas não se comportam como gases e não possuem propriedades semelhantes às fases gasosas.

O fenômeno de escoamento das partículas por orifícios ou em algum ponto do processo (uma transferência de uma correia para um recipiente, por exemplo) é diferente para cada granel e pode ser medido quanto à dificuldade ou facilidade de escoamento do granel pelo que é conhecido como a taxa de escoamento. Por outro lado, a escoabilidade é a habilidade das partículas de escoarem de um ponto a outro do processo, e pode ser classificada/quantificada de não-escoável até escoamento livre. Partículas em granéis podem ser descritas como sendo

escoáveis, coesivas e não-escoáveis, e assim a escoabilidade das partículas tende a se tornar uma parte integrante da descrição da medida das propriedades do granel (*Stanley-Wood, 2008*).

Muito frequentemente, problemas de manuseio desses sólidos na indústria de fertilizantes se devem em grande medida à falta de informação associada às propriedades do sistema particulado a granel, seja a nível de partícula, seja a nível de granel.

Não somente a densidade (já discutida na Seção 4.6.2 e que pode adotar várias nomenclaturas e formas de se quantificar) é uma propriedade importante, mas as ligações entre partículas, que tem a ver com a coesão entre elas e na aderência com as paredes com as quais estão em contato, a compactação, ou a relação entre a quantidade de sólidos maiores e menores, e a escoabilidade.

Estes conceitos são importantes para que se compreenda o fenômeno da segregação de partículas sólidas.

4.8 SEGREGAÇÃO EM GRANEIS

Processos que dependem de partículas a granel, como é o caso de vários processos químicos, incluindo a mistura de fertilizantes, a homogeneidade do material tratado é fundamental não para a eficiência global da produção, mas, como no caso específico de misturadoras NPK, para o atendimento às legislações vigentes. Conseguir com que pilhas de sólidos a granel se mantenham homogêneas não é uma tarefa trivial, já que é sabido que diferenças de propriedades físicas de partículas propiciam a segregação.

As principais características que influenciam a segregação de uma mistura sólido-sólido são a distribuição granulométrica, o tamanho nominal do grão, a densidade aparente, o ângulo de repouso, a capacidade de escoamento, a resistência a aglomeração, a forma da partícula e a lubricidade (*Fischer, 1960*). Mas Hoffmeister (1962) conseguiu comprovar através de experimentos que a característica individual que mais contribui para a segregação é o tamanho da partícula, ou a distribuição granulométrica presente.

É por isso que numa pilha de fertilizantes no armazém de uma unidade misturadora, os grânulos de diâmetro maiores tendem a se concentrar acima daqueles de diâmetro menor, que, por sua vez, se concentram no meio e no fundo da pilha. A explicação básica para este fenômeno é que as partículas maiores em contato criam espaços vazios que são ocupados pelas partículas menores, ou seja, ocorre percolação (*Rhodes, 2008*).

4.8.1 Mecanismos de segregação

Sob determinadas condições, como perturbações mecânicas e procedimentos de manuseio desses sólidos, a segregação pode se intensificar. Segundo Williams (1990), 4 mecanismos de segregação que relacionados ao tamanho da partícula podem ser identificados, e da combinação deles, muitos fenômenos que facilitam a segregação durante o manuseio de sólidos são formados (Figura 4.22).

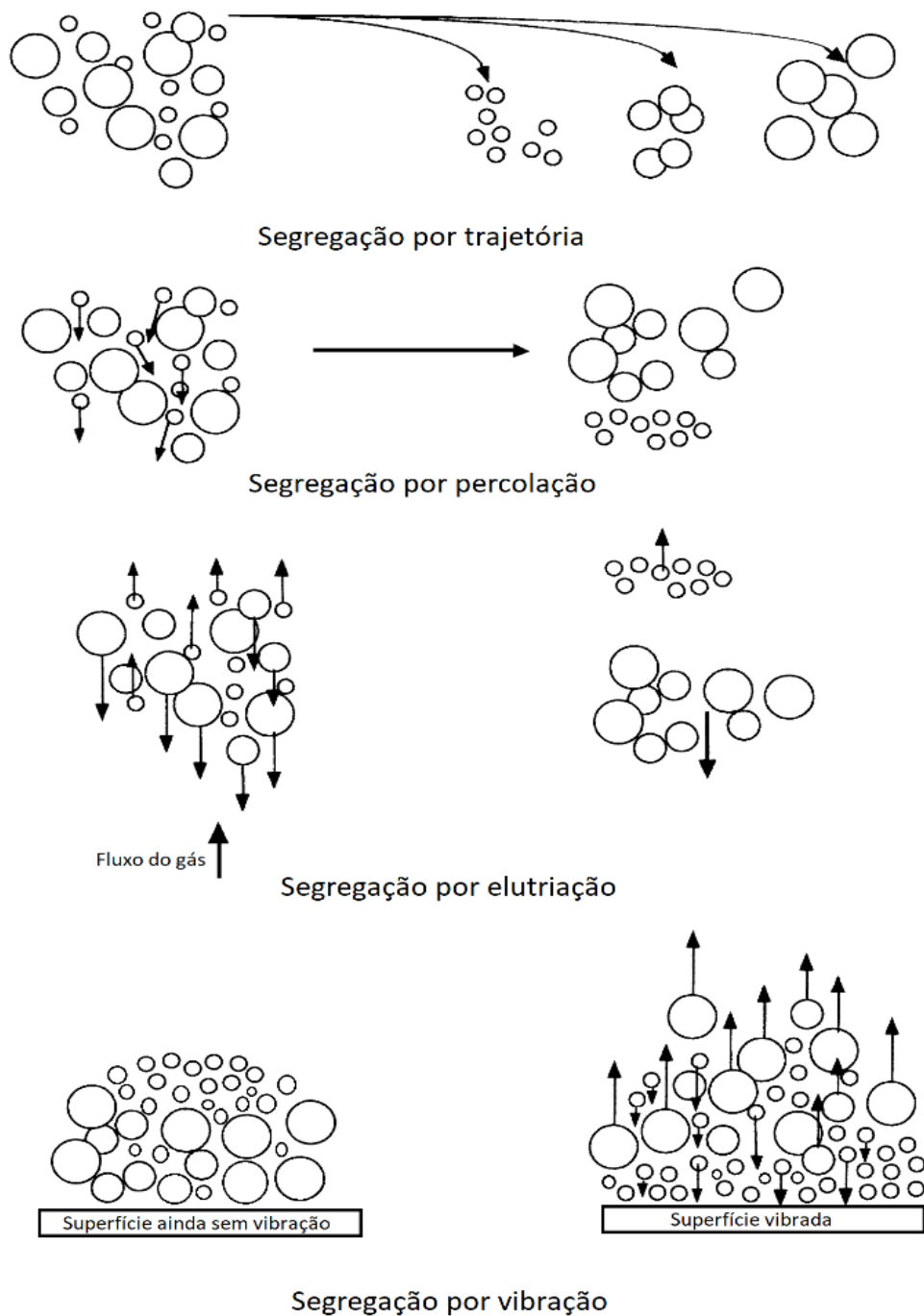


Figura 4.22 – Tipos de segregação – adaptado (Rhodes, 2008).

4.8.1.1 Segregação por trajetória

Taggart (1927) salientou que partículas maiores que se movem por uma superfície inclinada vão ser descarregadas em pontos mais distantes a partir do fim desta superfície que partículas menores. Muitas vezes, se o material já tem tendência a segregar, esse fenômeno já ocorreu durante a movimentação do material pela superfície inclinada por influência de outros mecanismos (Fayed *et al.*, 1984).

Se um silo é alimentado por esteira horizontal ou inclinada, haverá uma tendência de, em razão das diferentes inércias de partículas de variados tamanhos, acúmulo de material mais grosso nos pontos do silo mais afastados do ponto de descarga.

Experimentos no sentido de estudar o fenômeno da segregação por trajetória estão presentes na literatura há muitos anos. Um destes estudos visou observar o comportamento das partículas na formação de uma pilha a partir do descarregamento de um silo com saída inclinada. Após a formação completa da pilha cônica, esta foi dividida em 6 Seções como mostra a Figura 4.23. Houve preponderância de finos no lado da pilha mais próximo à descarga do silo (Holmes, 1939).

Bicking (1967) conduziu estudo semelhante e obteve os mesmos resultados de Holmes (1939) quando da análise com chute inclinado. Já Mitchell (1938), quando do estudo do comportamento das partículas durante o enchimento de correias transportadoras e alimentadores, também percebeu a discrepância no acúmulo de partículas finas em regiões próximas ao ponto de descarga.

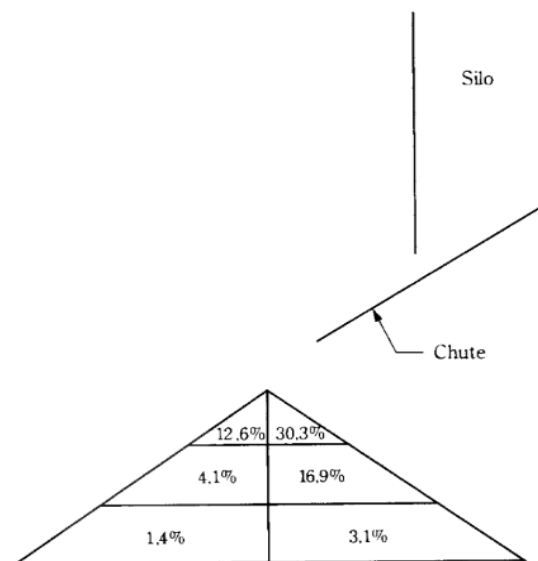


Figura 4.23 – Segregação numa pilha de partículas como resultado da segregação por trajetória. Conteúdo percentual de finos mostrado em cada uma das 6 Seções (Holmes, 1934)

Se uma partícula de diâmetro pequeno x e densidade ρ_p , cujo arraste é governado pela Lei de Stokes, é projetada horizontalmente com uma velocidade U num fluido de viscosidade μ e densidade ρ_f , a distância limitante que ela percorrerá é dada por (Rhodes, 2008):

$$\frac{U \rho_p x^2}{18\mu} \quad (4.5)$$

Segregação por trajetória é comumente composto por outros efeitos como a percolação ou efeitos de fricção/atrito (Mosby et al., 1996).

4.8.1.2 Percolação

Se uma massa de partículas sofre uma perturbação mecânica (por exemplo a vibração) de forma a permitir que partículas individuais se movam, haverá um rearranjo na condição de equilíbrio entre as partículas criando espaços vazios na massa que permitem com que partículas mais finas ocupem estes espaços se deslocando para baixo pela gravidade, como se ocorresse uma filtração de partículas menores através da massa em movimento (Lawrence e Beddow, 1969).

A percolação pressupõe movimentação, provocada pela aceleração da gravidade, de partículas pequenas em comparação com as maiores na vizinhança. Bridgwater e Ingram (1971) revelaram que a percolação causada somente pela ação da aceleração da gravidade ocorre com razão de diâmetros em uma mistura binária (composta de 2 elementos diferentes, neste caso, em diâmetro) menor que 0,11547, enquanto Scott e Bridgwater (1975) indicaram que a percolação depende da deformação total do concentrado de partículas de diferentes tamanhos, da razão dos diâmetros e a taxa de deformação (causada por pressão exercida nas partículas). Setphens e Bridgwater (1978) constataram que a velocidade de percolação é alterada pelo diâmetro da partícula.

Fayed e Otten (1984) compararam a percolação de partículas com o mecanismo de peneiramento de partículas, sendo a diferença que a percolação não requer movimentação da camada de material para acontecer.

Um exemplo prático de percolação durante a movimentação de granéis é o carregamento e o descarregamento de silos. A depender de suas geometrias (cuja influência é discutida nesse trabalho na Seção 4.10.3), a percolação pode agravar a segregação durante descarregamentos.

Durante a formação de pilha em superfícies livres, a percolação é uma das explicações da concentração das partículas mais finas no centro da pilha.

4.8.1.3 Deslocamento vertical pela vibração

Meios granulares diferem de outros materiais na forma com que respondem à distúrbios mecânicos (Mobius *et al.*, 2001). Se uma mistura de sólidos sofre um distúrbio vibracional, as partículas de diâmetro maior subirão, o que a literatura também chama de “Efeito Castanha do Brasil”. O fato pode ser explicado pela criação de vazios no meio da mistura que são ocupados pelas partículas menores, que, por consequência, deslocam as maiores para cima. Rhodes *et al.* (2008) sugeriram que este fenômeno pode ser causado por uma flutuabilidade criada pela pressão gerada no leito vibrado. Outra contribuição é o movimento convectivo das partículas que tem relação com o atrito com as paredes (Janssen, 1895).

Mobius *et al.* (2001) mostraram que partículas maiores ascendem à superfície num leito de partículas menores com pouca influência da densidade da partícula maior. Variando-se a densidade ρ_M da partícula maior (partícula intrusa) e mantendo-se a densidade ρ_m das partículas menores, percebeu-se que o tempo de subida à superfície T_s da partícula maior é semelhante para valores pequenos e grandes da razão ρ_M / ρ_m mas com pronunciada diferença deste mesmo tempo T_s para valores próximos de $\rho_M / \rho_m = 0,5$.

Os resultados deste estudo indicaram influência recíproca entre convecção induzida pela vibração e fluidização (mudança do comportamento do conjunto de partículas em decorrência da excitação vibracional que passam a se comportar como um fluido contínuo), arrasto por ar intersticial e movimentação da partícula intrusa. Deste modo, o tempo de emersão das partículas maiores num leito de partículas menores se mostra como um exame sensível dessas interações.

Ahmad e Smalley (1973) estudaram o movimento de uma esfera de chumbo de 12.700 μm num leito vibrado de partículas de areia seca de tamanho entre 500 e 600 μm e reportaram que para uma frequência de vibração constante, a segregação aumentou com o aumento da aceleração, mas, para uma aceleração constante, a segregação foi reduzida à medida em que a frequência de vibração aumentava.

Se há força coesiva suficiente nas partículas que compõe um leito de material, a vibração precisa ter intensidade maior para ser capaz de fluidizá-lo para que, então, ocorra segregação.

Silos geralmente não apresentam vibração suficiente para sofrer este tipo de efeito com intensidade suficiente para que haja segregação causada pela vibração, mas pequenas moegas e chutes podem (Fayed *et al.*, 1984).

4.8.1.4 Elutriação

Quando uma mistura contém partículas com diâmetro menor que 50 μm em quantidade razoável, e é despejada em um silo ou outro compartimento, ar é deslocado no sentido ascendente. Se a velocidade desse ar deslocado exceder a velocidade terminal dessas partículas finas, então haverá reversão do sentido de deslocamento delas, ocasionando, assim, a elutriação. Após as partículas se depositarem no recipiente, essa quantidade de finos que sofreu a elutriação se depositará por cima da pilha (*Rhodes, 2008*).

4.9 MISTURAS DE SÓLIDOS A GRANEL

Segregação pode ser descrita como o oposto de mistura (*Engblon et al., 2012*). Para entender o fenômeno da segregação como um de desmisturação, ou seja, a quebra da homogeneidade, pode-se lançar mão de uma simplificação. Nesse caso, pede-se considerar uma mistura de apenas dois tipos de partículas em relação ao diâmetro, um menor e outro maior.

A mistura perfeita destes dois tamanhos de partículas é aquela em que um grupo de partículas amostrado em qualquer posição da mistura contém as mesmas proporções de cada partícula que a mistura toda (*Rhodes, 2008*).

Quando se trata de uma mistura de partículas de igual diâmetro, ou seja, não sujeitas a segregação, tem-se a condição ideal. Todavia, nos processos industriais onde há inúmeros tamanhos de partículas num dado conjunto, como no caso das misturadoras de NPK, a mistura deve diminuir ou até mesmo reverter o fenômeno da segregação.

Segundo Rhodes (2008), existem três possibilidades de misturas (Figura 4.24). A primeira situação seria aquela aleatória, em que a posição de cada partícula da população total seria definida ao acaso. Seria como se as posições da partícula menor e da partícula maior da mistura fictícia tomada como exemplo nesta Seção fossem determinadas pelo lançamento de uma moeda, onde “cara” determinaria a alocação de uma partícula menor e, “coroa”, a de uma maior. A segunda situação seria a de uma mistura perfeita, onde as partículas fossem ordenadas uma a uma, alternadamente, em cada posição física do conjunto. Por fim, a terceira situação seria aquela em que a posição ocupada por cada tipo de partícula fosse definida segundo um critério enviesado, por exemplo uma moeda viciada.

No caso da segregação, esse critério é justamente o tamanho, onde a probabilidade, por exemplo, de uma partícula menor ocupar a parte central inferior de uma mistura é maior que aquela da partícula maior.

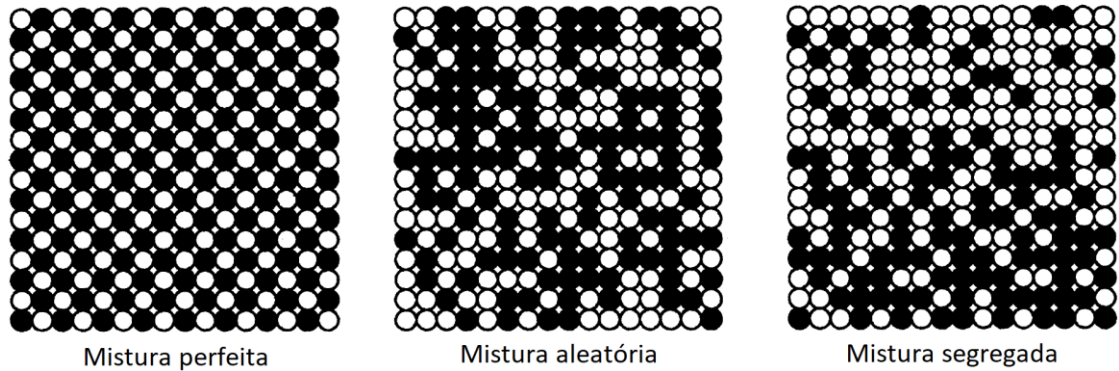


Figura 4.24 – Tipos de mistura (Rhodes, 2008)

Nos processos de mistura forçada (uso de misturadores), as partículas com mesmas dimensões tendem a ocupar locais semelhantes através da segregação causada nas etapas subsequentes de manuseio e armazenagem, e isso traz uma série de problemas de qualidade física desde a variação da densidade aparente até o não cumprimento da legislação.

É possível que se obtenham misturas melhores que as aleatórias em processos industriais utilizando de técnicas corretas de manuseio dos sólidos a granel e da construção correta dos elementos mecânicos que fazem o transporte e armazenamento dessas partículas.

4.9.1 Fundamentos de mistura

Equipamentos nos quais materiais sólidos são misturados podem ser usados em inúmeras operações, entre elas nas misturadoras de fertilizantes. O objetivo principal destes equipamentos é promover a homogeneização de dois ou mais componentes de uma mistura.

Outros objetivos secundários podem incluir o resfriamento ou o aquecimento, o recobrimento por algum líquido ou pó das partículas envolvidas. Em outras aplicações, pode também haver a aglomeração de conjunto de partículas.

Uma vasta diferença nas propriedades como a distribuição do tamanho das partículas, densidade, forma e característica da superfície (como carga eletrostática) pode dificultar a operação de mistura nos equipamentos. Outras propriedades que podem interferir na facilidade de se misturar sólidos são a densidade do granel, propriedades de escoamento, friabilidade, estado de aglomeração, umidade e fase líquida presente e temperatura (Lacey, 1954).

A não ser em casos onde o recobrimento de uma partícula é necessária, o resultado final teórico de mistura será aquela aleatória (Figura 4.24). A variação entre pontos de amostragem de um tamanho de partícula conhecido pode ser teoricamente prevista para uma mistura aleatória e usada como um guia para determinar o grau de mistura alcançado.

Alguns métodos para determinação da uniformidade de uma batelada são os raios-x fluorescentes, espectrometria com chama, polarografia e espectroscópio de emissão (Weidenbaum, 1958).

4.9.1.1 Estado da mistura de sólidos em batelada

Saber em que ponto uma batelada está bem misturada é uma questão que pode ter diferentes significados dependendo do tipo de processo, seja ele comercial ou para pesquisa. Uma expressão quantitativa para o grau de mistura dá uma ideia melhor da composição da batelada.

Para que seja experimentalmente útil, há que se fazer uma análise criteriosa das amostras de inúmeras regiões da mistura. Dessa maneira, o problema acaba se tornando um no qual a matéria de análise é o quão eficiente é o processo de amostragem.

Os aspectos mais importantes de se levar em conta para que a amostragem possa ser representativa o suficiente para determinar o grau de mistura de uma batelada são (Weidenbaum, 1958):

1. Método e localização:
 - a. Remover as amostras sem causar muito distúrbio mecânico na pilha, uma vez que isso pode ocasionar segregação;
 - b. Remover as amostras dentro do misturador e após o descarregamento de seu conteúdo, especialmente em misturas com tendência a segregação;
 - c. Remover as amostras por todo o volume da mistura, e não somente em uma região específica;
 - d. Confecção de um amostrador específico para cada tipo de processo de modo a evitar distúrbios mecânicos excessivos;
2. Tamanho do ponto de amostragem:
 - a. Depende do uso que vai se fazer da mistura, mas uma regra grosseira seria remover até 5% da mistura;
3. Número de pontos de amostragem: não há regra geral, mas quanto mais pontos variados de amostragem espalhados pelo volume da mistura, melhor;
4. Análise das amostras:
 - a. Quantitativo;
 - b. Qualitativo.

Após a correta amostragem, os dados precisam ser tratados estatisticamente para melhor interpretação.

Uma grande sorte de métodos para expressar matematicamente o grau de mistura está presente na literatura, entre eles *Oyama*, *Beaudry* (ou B3), *Lacey* (L1), *Buslik* (B10), *Bonilla and Crownover*, e *Bonilla e Goldsmith, Brothan, Wollan, e Feldman* (B5), *Coulson e Maitra* (C3, M2), *Visman e Van Krevelen* (V1), *Sange* (S5), *Stange* (S4), *Danckwerts* (D2, D3), *Herdan* (H2), *Lexis, Charlier, Kramers, Lacey* (L2), *Oyama e Ayaki* (O9), *Weidenbaum e Bonilla* (W2), *Blumber e Maritz* (B4), *Michaels e Puzinauskas* (M4), *Adams e Baker* (A1), *Smith* (S3), *Gray* (G2), *Yano, Kanise e Tanaka* (Y2) e *Sakaino* (S1).

4.9.1.2 Equipamentos

Uma variedade de equipamentos está disponível para satisfazer os variados requisitos de mistura, e podem ser classificados, basicamente, em dois tipos: i) misturadores rotativos e ii) agitadores rotativos (*Lynch e Ho, 1972*), ou ainda, pode-se classificá-los quanto ao método de misturação. Alguns tem a carcaça que se move (tambores rotativos) para promover a agitação interna do leito de material, enquanto outros possuem carcaças estáticas, mas agitadores internos móveis como pás, hélices e outros dispositivos, como é o caso do *ribbon mixer*, que, inclusive, é usado em misturas a batelada e, em alguns casos, em misturas contínuas. Os misturadores contínuos geralmente são conjuntos de equipamentos que promovem dosagem, mistura e transporte, como é o caso de roscas sem fim e outros transportadores. A aplicação em misturadoras de fertilizantes já foi discutida nas Seções 4.5.1.1 e 4.5.1.2.

Existem inúmeros mecanismos pelos quais partículas são misturadas. Entre eles podem ser citados a difusão, a convecção e o cisalhamento.

Movimentos que aumentam a mobilidade de partículas individuais promoverão misturação difusiva. Se não houver contraponto por segregação, a misturação difusiva vai, com o tempo, levar a um alto grau de homogeneidade. Essa misturação difusiva acontece quando as partículas são perturbadas em uma superfície que acabou de se formar, e/ou quando uma partícula individual ganha mobilidade interna. Geralmente misturadores tipo *tumblers* dão este tipo de resultado.

Para que se diminua o tempo de mistura, há a necessidade de incluir o tipo convectivo de misturação, que é aquele que ocorre quando grandes grupos de partículas são misturados. Ação de cisalhamento também causa esse tipo de padrão de misturação. O equipamento mais comum que promove movimentação difusiva e cisalhamento é o *ribbon mixer*.

Os variados equipamentos misturadores devem ser avaliados antes que uma seleção do tipo mais conveniente para uma determinada aplicação ocorra. As características de performance que devem ser levadas em consideração são (Hogg, 2006):

1. Uniformidade da mistura;
2. Tempo para obtenção da mistura;
3. Carregamento e descarregamento;
4. Potência;
5. Facilidade de limpeza;
6. Quebra de aglomerados e abrasão;
 - a. Por impacto;
 - b. Por ação de cisalhamento e compressão;
7. Formação de pó;
8. Geração de carga eletrostática;
9. Desgaste do equipamento;
10. Contaminação do produto;
 - a. Resquícios de materiais de construção do próprio misturador desprendidos por abrasão
11. Aquecimento ou resfriamento;
12. Flexibilidade;
13. Vácuo ou pressão;
14. Método para adição de líquidos.

A tendência à segregação afeta de maneira direta a performance de misturadores. Há que se considerar, nestes casos, a localização do misturador no leiaute e fluxograma de uma unidade de mistura. Se um equipamento específico não reunir todas as características necessárias para que se alcance uma mistura homogênea nos casos onde a segregação é um fator presente, a modificação deste equipamento pode se mostrar uma alternativa viável.

A segregação representa uma dificuldade no cálculo do tempo ótimo de mistura uma vez que a falta ou excesso de tempo pode resultar numa mistura final segregada. O tempo ótimo de mistura geralmente é determinado com testes pilotos em laboratórios e replicados às unidades fabris através de *scale up* (Lynch, 1972).

4.10 SEGREGAÇÃO EM UNIDADES MISTURADORAS DE NPK

A perda de consistência de um granel de partículas pode gerar transtornos financeiros e operacionais. A performance dos fertilizantes é afetada enormemente pela homogeneidade do tamanho das partículas da mistura a granel. No contexto da prática industrial, o granel pode ser considerado a quantidade de material variando desde um saco de 50 kg até o conteúdo completo de um silo. A perda da homogeneidade em qualquer etapa do processo, desde a recepção da matéria-prima até a aplicação em campo irá piorar os efeitos da segregação (*Farnish e Bradley, 2007*).

A segregação pode ser entendida como a redistribuição das partículas dentro de um recipiente (seja ele um silo, um *big bag*, etc.) cheio delas de acordo com o tamanho, forma, densidade ou textura da superfície desde a condição de homogeneidade. Isso pode se manifestar de várias maneiras (como descrito na Seção 5 que trata das propriedades físicas), como o aspecto visual do fertilizante, variação no peso de sacos consecutivos (durante a fase de ensaque), inconsistência na performance química durante a aplicação em plantações, aumento na geração de finos e pós, e dificuldade no manuseio. A segregação pode acontecer em qualquer etapa do processo industrial da fabricação da mistura NPK, desde que haja uma perturbação mecânica durante o manuseio, seja na transferência do material na descarga aérea até a fase de ensaque do produto final.

4.10.1 A influência das propriedades do material

Segundo relatório número 300 da *International Fertilizer Society – IFA*, quando a razão da distribuição granulométrica é maior que 1,2:1, a segregação tem mais propensão a ocorrer.

A Figura 4.25 evidencia uma linha de tendência cumulativa que separa as regiões de níveis de escoamento. O diâmetro médio das duas partículas é o mesmo, d_{50} . Pode-se perceber que o material que tem uma faixa de distribuição granulométrica mais curta é menos propenso a segregar, enquanto que a segunda amostra, com faixa mais larga, é menos escoável, portanto, com maior tendência a segregar. A mudança inadvertida no tamanho das partículas da população, como a quebra dos grãos, é o primeiro elemento que leva à segregação (*Farnish e Bradley, 2007*).

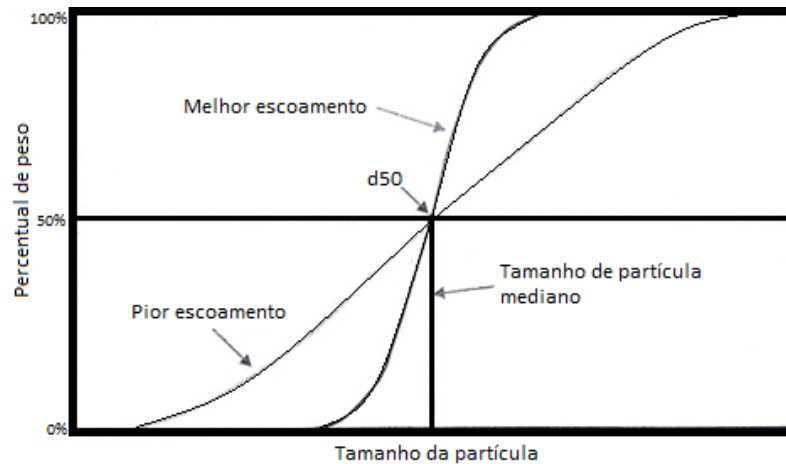


Figura 4.25 – Distribuição cumulativa de tamanho de partícula – adaptado (FARNISH E BRADLEY, 2007)

4.10.2 A segregação durante o manuseio dos sólidos – formação de pilhas cônicas livre e no enchimento e descarregamento de silos

Um das mais comuns fontes de ocorrência de segregação é a formação de pilhas cônicas de material. Toda vez em que se permite que o material forme pilhas cônicas, a segregação ocorrerá, via de regra, com as partículas menores se concentrando no centro e as maiores rolando para as extremidades (Figura 4.26). Este tipo de segregação acontece, por exemplo, durante o abastecimento dos boxes com matéria-prima pela descarga aérea.



Figura 4.26 – Segregação numa pilha (Website Jenike.com, 2017)

Este fenômeno é bastante conhecido e foi estudado por diversos pesquisadores como Hoffmeister (1964), Jenike (1961), Mosby *et al.* (1996), Engblon *et al.* (2012), Fan *et al.* (2012),

Drahun *et al.* (1983), e é amplamente aceito que a diferença no tamanho das partículas permite a segregação quando da formação de pilhas cônicas, mas a interação de outros mecanismos pode amplificar ou diminuir o efeito (*McGlinchey, 2004*).

Drahun *et al.* (1983) propuseram o mecanismo de percolação das partículas de menor diâmetro por entre os espaços vazios criados pelo intertravamento das partículas maiores fazendo com que a concentração das menores seja maior no centro da pilha enquanto as maiores se concentram nas extremidades.

Williams (1963) forneceu uma explicação para a segregação em superfície livre (sem contenções/silo) durante a formação de pilhas de material, na qual menciona que as partículas rolam pelo plano inclinado formado pela pilha e este plano contém orifícios de tamanhos aproximados ao diâmetro das partículas maiores. Por essa razão, as partículas menores teriam a capacidade de passar pelos orifícios preferencialmente. Por outro lado, as partículas de maior diâmetro não seriam capazes de encontrarem orifícios para se alojarem e tenderiam a rolar pilha abaixo. Pode-se perceber que Williams (1963) entende que a superfície, em regime permanente, tem agitação suficiente para funcionar como uma peneira de partículas menores. Esta ideia se aproxima da definição de percolação de Lawrence e Beddow (1969).

Um ponto de vista oposto foi apresentado por Syskov e Lyan (1960), os quais descrevem que as partículas rolam pelo plano inclinado e que as de pequeno diâmetro seriam rapidamente impedidas por protuberâncias na superfície e colhidas pelas cavidades presentes. Assim, para estes autores, a segregação é causada pela rugosidade da superfície, e, mesmo que partículas muito densas podem ser capazes de romper o plano e descenderem, desconsideraram a percolação por partículas menores.

O efeito da densidade na segregação em planos inclinados de pilhas foi amplamente estudado e, alguns autores além de Syskov e Lyan (1960) encontraram algum grau de influência da deste fator. Holmes (1939) efetuou um experimento que consistiu na formação de uma pilha a partir de uma mistura de antracite (gravidade específica de 1,4) e fluorita (gravidade específica de 3,1), ambas com mesma granulometria, e observou uma predominância das partículas mais densas no centro da pilha e das menos densas nas periferias. Já Harris e Hildon (1970) consideraram haver pouca influência da densidade na segregação em pilhas.

De fato, a literatura sugere que ambos tamanho e densidade são fatores significativos na ocorrência de segregação em superfície livre, porém esta última é frequentemente negligenciada, e outros fatores que podem causar segregação, como a forma das partículas, recebem pouca atenção dos estudiosos de segregação (*Drahun et al., 1983*).

Lawrence e Beddow (1969) investigaram segregação de partículas esféricas, em forma de flocos e partículas irregulares e concluíram que a forma influi pouco no resultado final da homogeneidade de uma pilha. Mesmo resultado foi obtido por Harris e Hildon (1970) em estudo com grânulos com formas distintas.

Aumentando-se a altura de queda livre diminui-se a extensão da segregação a não ser que as partículas tenham diâmetro menor que 250 μm (Lawrence *et al.*, 1969), e também diminui a segregação quando da presença de partículas de densidade diferentes (Syskov *et al.*, 1960). Esta diminuição da segregação é explicada, em parte, pelo aumento da energia que causa um espalhamento originado a partir do rebatimento das partículas atingindo outras. Estes mesmos autores sugerem que há uma diminuição da segregação quanto menor for o tempo de despejamento de material na pilha.

Tendo em consideração o comportamento da partícula durante a descarga de material a granel, Jenike (1964) descreveu o fenômeno da segregação numa corrente em queda livre. Nesta situação, em cada partícula atuam duas forças, seu peso e a resistência do ar. No caso da queda livre, ambas são verticais, e, enquanto as velocidades terminais das variadas partículas podem variar, suas trajetórias não variam, e, então, não há segregação significativa. Tudo isso muda quando se tem início uma componente horizontal da velocidade.

Matthée (1967) se preocupou em tentar descrever o comportamento de uma partícula quando de sua descarga sobre uma pilha inclinada. No estudo, o autor evidenciou que existem dois tipos distintos de movimento a serem distinguidos, o de escorregamento e o de rolamento. Como a pilha teórica é constituída de mesmo material, mas com tamanhos diferentes, assume-se que o coeficiente de atrito μ_a é o mesmo (Figura 4.27).

A seguir, apresenta-se o desenvolvimento matemático feito pelo autor em seu trabalho *Segregation Phenomena Relating to Bunkering of Bulk Materials: Theoretical Considerations and Experimental Investigations*.

Pela conservação da energia, a velocidade final no pé do plano é dada por (Matthée, 1967):

$$m \cdot g \cdot h - m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \mu_a \cdot \frac{h}{\sin \alpha} = \frac{m}{2} \cdot V_1^2 \quad (4.6)$$

sendo que: m é a massa da partícula, g é a aceleração da gravidade, h é a altura da partícula na Posição 1, e V_1 é a velocidade da partícula atingindo a Posição 2.

A primeira parcela do lado esquerdo da igualdade se refere à energia potencial na Posição 1, enquanto a segunda parcela se refere ao trabalho efetuado contra o atrito em

movendo uma distância $h/\text{sen}\alpha$. Por fim, a parcela à direita da igualdade se refere à energia cinética na Posição 2.

Da Equação (4.6), tem-se:

$$V_1 = \left[2 \cdot g \cdot h \left(1 - \frac{\mu_a}{\tan \alpha} \right) \right]^{1/2} \quad (4.7)$$

e

$$V_2 = V_1 \cdot \cos \alpha \quad (4.8)$$

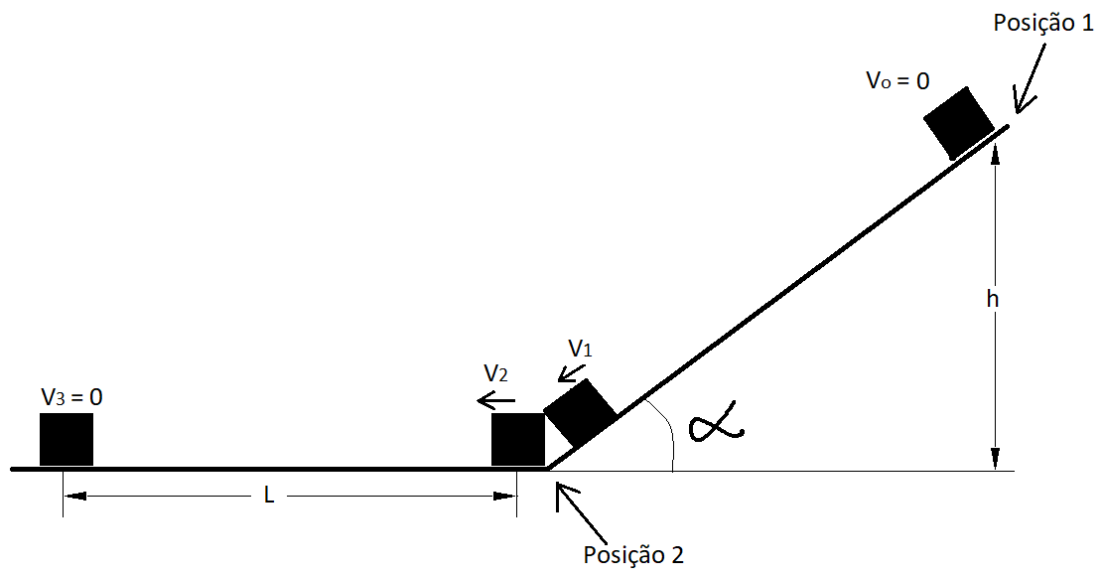


Figura 4.27 – Movimento de uma partícula num plano inclinado – adaptado (Matthée, 1967)

Na Posição 2 a partícula passa a possuir somente energia cinética, e vai deslocar uma distância l até o repouso em função do atrito. A distância l é obtida pela Equação (4.9):

$$l = \frac{h \cdot \cos^2 \alpha \left(1 - \frac{\mu_a}{\tan \alpha} \right)}{\mu_a} \quad (4.9)$$

Pois, pela Equação de balanço de energia:

$$\frac{m}{2} \cdot V_2^2 = m \cdot g \cdot \mu_a \cdot l \quad (4.10)$$

Quando há apenas atrito por escorregamento, partículas de qualquer tamanho percorrerão a mesma distância horizontal já que a Equação (4.9) mostra que l é independente do tamanho e da massa da partícula.

A segregação somente aconteceria para um material consistido de dois componentes com coeficientes de atrito distintos. No caso do atrito por rolamento, no entanto, a distância l é dependente do diâmetro da partícula.

Uma esfera de raio r numa superfície inclinada está em equilíbrio instável se o ângulo de inclinação α da superfície satisfaz a Equação do momento:

$$G \cdot \sin \alpha \cdot r = G \cdot \cos \alpha \cdot f_a \quad (4.11)$$

$$\tan \alpha = \tan o = \frac{f_a}{r} \quad (4.12)$$

Onde f_a é o coeficiente de atrito por rolamento, o o ângulo limitante do atrito e G é o peso. A força de atrito R_a é dada por:

$$R_a = N \cdot \frac{f_a}{r} = G \cdot \cos \alpha \cdot \frac{f_a}{r} \quad (4.13)$$

Usando-se a conservação de energia, obtém-se l :

$$l = \frac{r \cdot h \cdot \cos^2 \alpha \left(1 - \frac{f_a}{r \cdot \tan \alpha}\right)}{f_a} \quad (4.14)$$

De acordo com a Equação (4.14) l partículas maiores tem mais capacidade de percorrer maiores distâncias horizontais que as partículas menores, caso estas se movam, pelo menos em parte, por rolamento. Um segundo tipo de segregação é possível numa superfície inclinada se as seguintes condições são satisfeitas (aplicadas às duas condições de movimento, por deslizamento e por rolamento) de acordo com a Equação 4.15 onde o é o ângulo limitante de atrito (Matthée, 1967):

$$\tan o_{partículas grandes} < \tan \alpha < \tan o_{partículas menores} \quad (4.15)$$

As partículas menores permanecerão paradas enquanto as maiores acelerarão pilha abaixo. Este efeito da segregação é muito maior pois uma separação local extrema irá acontecer.

A segregação numa pilha é um fenômeno puramente ligado à superfície que é plana e rugosa, com grau de rugosidade que deve ser menor que o diâmetro da maior partícula (*Brown, 1939*). Diante dessa afirmação, *Matthée (1967)* descreveu que, nesse caso, a rugosidade tem papel de resistência por atrito ao movimento das partículas rolantes, é expressa por f e tem a dimensão de comprimento.

A partícula pode passar por cima da projeção da superfície somente se existir momento “positivo”, ou seja, se a linha do centro de gravidade da partícula em movimento não tocar a projeção da superfície (*Figura 4.28*).

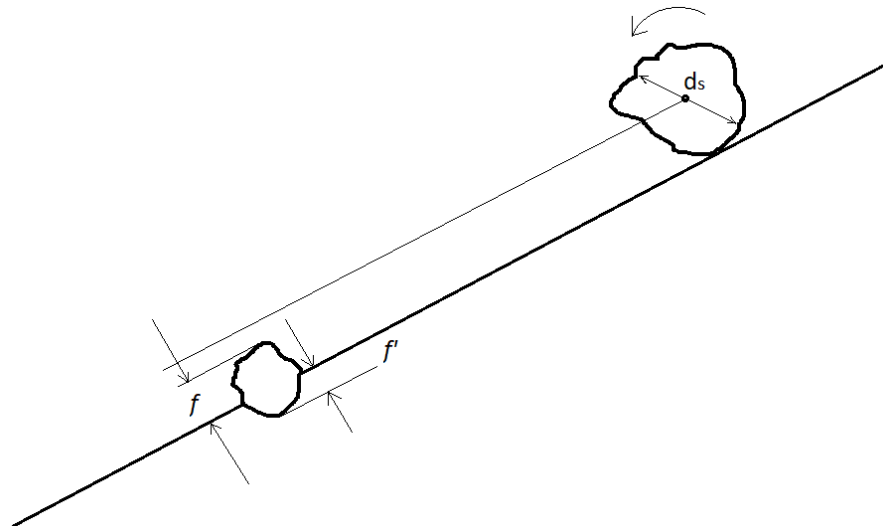


Figura 4.28 – Movimento de partícula sobre pilha cônica de material.

A expressão $\left(\frac{1}{2}d_s - f\right)$ deve ser positiva. Assim sendo, a energia cinética E deve ser igual a Equação (4.16) se a partícula conseguir ultrapassar o obstáculo (*Matthée, 1967*):

$$E = m \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha + E_s \quad (4.16)$$

E_s é a energia perdida quando a partícula sofre impacto do obstáculo. Por analogia ao atrito de rolamento, segue *Matthée (1967)*, pode-se dizer que a resistência é proporcional à razão f/r_r , onde r_r é o raio de uma esfera rolando plano inclinado abaixo.

Uma partícula que parou na parte inclinada da pilha está em equilíbrio estável e pode ser removida de sua posição por um impacto somente se $(r' - f') > 0$, onde r' é o raio da partícula estacionária. A profundidade da cavidade em que esta partícula está inserida f' é uma medida

da dificuldade de se movimentar a partícula estacionária por impacto. A resistência ao deslocamento é proporcional à razão f'/r' . Se f/r_r é igual a 1, a partícula não se move; se f'/r' é igual a 1 então a partícula não pode ser movida por impacto. Já que f e f' são independentes do tamanho da partícula, a resistência ao movimento é inversamente proporcional ao tamanho da partícula. Estatisticamente, a probabilidade de uma partícula parar é menor para aquela maior, e se ela parar, a chance de ser removida é maior que para uma partícula menor.

Pilhas também são comumente formadas em recipientes como silos, contêineres e até mesmo nos boxes de descarregamento aéreo de produto em fábricas. Estes tipos de despejamento de produto têm em comum o fato de promover um confinamento na formação de pilhas. Nestes casos, o comportamento das partículas, quanto à segregação, pode se diferenciar em relação àquele durante a formação de pilhas em superfícies livres.

Em alguns casos, pode haver uma outra forma de segregação que alguns autores chamam de estratificação, que é a deposição das partículas em camadas de conteúdo diferentes, seja em razão da forma, tamanho ou densidade. Neste sentido, a estratificação é um padrão de deposição das partículas imposto pela restrição das paredes de um silo, por exemplo. Gray *et al.* (1997, 2009) propuseram um mecanismo envolvendo avalanches das superfícies e propagação de ondas de choque mecânico pilha acima, enquanto Makse *et al.* (1997) atribuíram a formação de camadas de estratificação de material como uma competição entre segregação provocada pela diferença nos tamanhos das partículas e aquela provocada pela diferença na forma das partículas, e propôs que a estratificação só acontece para misturas de partículas grandes e irregulares com partículas pequenas e regulares. Por outro lado, Baxter *et al.* (1998) concluiu que a estratificação pode ocorrer também para partículas com superfícies regulares de tamanhos diferentes.

Os autores anteriormente citados nesta Seção, aparentemente não investigaram a dependência da distribuição final das partículas relacionada a uma variada gama de parâmetros de controle, incluindo taxa de alimentação Q , largura do silo W , o *gap* entre as paredes do silo bidimensional para fins de teste T , a razão dos diâmetros das partículas da mistura binária $R = D_l/D_s$ (onde D_l e D_s são os diâmetros das partículas maiores e menores, respectivamente). Fan *et al.* (2012) conduziram um experimento que consistiu no enchimento de um silo *quasi*-2D com uma mistura binária de partículas esféricas controlando todas as variáveis supracitadas para observar a influência destes na característica final das pilhas relacionada às três configurações (estratificadas, segregadas e mistas) possíveis de escoamento de pilhas e então perceberam que elas podem ser obtidas através do controle das propriedades do escoamento e da razão dos tamanhos das partículas.

A estratificação está associada com a formação de dobras na inclinação da pilha, longes das paredes dos silos (região de contorno), durante discretas avalanches com baixa taxa de escoamento (q menores que $10 \text{ cm}^3/\text{s}$) na maioria das razões de tamanho das partículas ($R > 1,4$). A largura do silo W , ou alternativamente, o comprimento L da camada escoando, deve ser grande o suficiente para que uma dobra possa se forma ao longo da inclinação da pilha durante uma avalanche. A transição entre os estados estratificados e não estratificados é governada pela taxa de escoamento Q . Quando Q é maior que um valor transicional dependente de R , o escoamento da pilha muda de um regime de avalanche discreta para um regime de escoamento contínuo com segregação no qual nem as dobras nem a estratificação são observadas. O grau de segregação é determinado pela competição entre o escoamento médio e a percolação por entre a camada escoante. Esta competição, ainda de acordo com Fan *et al.* (2012), pode ser caracterizada pela razão da velocidade de subida da pilha e da velocidade de percolação, que, principalmente, depende de R .

Este estudo levantou uma conclusão importante quanto à segregação na formação de pilhas, que foi a de outros mecanismos além da percolação espontânea (R com altos valores) desempenham importante papel na segregação como difusão (para $R > 1,5$), a velocidade de impacto e o silo ou recipiente no qual a pilha é formada. No caso da velocidade de impacto, as partículas podem quicar na pilha e provocar uma segregação oposta ao usual.

A transferência de material entre silos e moegas e o transporte em correias e na descarga nos boxes são fontes importantes de segregação (Farnish *et al.*, 2007).

Durante o transporte em correias, o leito de material sofre vibração natural da própria operação do equipamento, favorecendo a segregação por percolação e, conseqüentemente, por leito vibrado. É muito comum o uso de elevadores de caneca ou correias transportadoras para fazer a transferência do material para silos, por exemplo, e a forma com que este material é conduzido até o confinamento no recipiente influencia na ocorrência da segregação.

Se o silo é alimentado pela parte superior através da queda livre, uma pilha se formará com as partículas maiores rolando para as extremidades deixando espaço para as menores se concentrarem no centro. Se a alimentação ao silo é feita de forma ocorrer velocidade horizontal, partículas maiores tendem a se deslocar mais que as menores, se concentrando nas periferias do silo. É a segregação por trajetória, já comentada na Seção 4.8.1.1 deste trabalho (Figura 4.22).

Por outro lado, se o silo é alimentado por uma entrada tangencial, partículas tendem a se deslocar pelas paredes e formarem um ângulo de repouso a partir delas e terminando no centro do silo, com as partículas maiores rolando para o fundo da pilha, e as menores se

concentrando na periferia (Fayed, 1984). A segregação por estratificação é uma outra possibilidade e advém da deposição de partículas finas em suspensão pelo deslocamento de ar na vertical, sobre de partículas maiores. Se a alimentação do silo é feita pela lateral, de forma adjacente à parede, formar-se-á uma pilha inclinada a partir da parede com as partículas maiores se concentrando na periferia desta pilha.

O problema pode se agravar ainda mais dependendo da geometria dos silos. Dois padrões de escoamento podem se desenvolver quando sólidos são descarregados de um silo: escoamento em funil (errático) e escoamento em massa (Carson, 2008). Jenike (1964) definiu que o escoamento em funil é aquele em que parte do material se move e parte permanece estagnada. Rotter (2005) ainda expandiu a definição de escoamento em funil e trouxe dois conceitos mais específicos para este tipo, o *pipe flow* (escoamento em tubo em tradução livre) e *mixed flow* (escoamento misto em tradução livre).

A distinção dos dois subtipos se dá pela identificação do padrão que o material estagnado obedece, ou ainda, se a porção de material que se move pelo silo tem contato com as paredes do recipiente, então o escoamento em funil é do tipo misto, e, caso contrário, ou seja, o material que se move não interage com a parede do silo mas somente com o leito de material estagnado, então o escoamento em funil é do tipo em tubo.

O problema de segregação na formação de pilhas pode mudar, como explicitado acima, quando esta acontece em espaços confinados como num silo, por exemplo. Em muitas aplicações industriais, e como é o caso nas misturadoras de fertilizantes, a etapa mais crítica da geração de segregação está na armazenagem de produto final misturado imediatamente antes do ensaque. Neste caso, ela se manifesta no aumento da concentração de partículas menores à medida em que o silo é esvaziado. Isso acontece devido ao fato de estas partículas não estarem uniformemente distribuídas pela seção do silo durante seu enchimento (chamada de segregação lateral – tradução livre de *side-to-side segregation*) e a descarga acontecer com escoamento em funil (Engblon, 2012).

A distribuição não uniforme das partículas é resultado do enchimento dos silos por queda livre que proporciona os mecanismos de fluidização e segregação provocada por correntes de ar (particulados), presentes neste tipo de manuseio.

Se houver uma distribuição uniforme de material durante o enchimento, a segregação não ocorrerá, mostrando que a percolação ou efeito de peneiramento não acontece mesmo que haja escoamento em funil em detrimento do escoamento em massa.

O estudo realizado por Engblon *et al.* (2012) mostrou que concentração de partículas finas nas paredes dos silos aumenta proporcionalmente com o aumento da fração mássica de

partículas finas (pequenas), da razão do tamanho das partículas (grossos/finos), razão da altura de queda livre e do diâmetro do silo, razão do diâmetro do silo e do diâmetro da entrada. Por outro lado, a taxa de alimentação não mostrou efeito na distribuição das partículas durante o enchimento. Surpreendentemente, notou-se que a segregação na descarga de silos é determinada majoritariamente pela distribuição do material durante seu prévio enchimento, isto é, pouca segregação resulta de percolação mesmo que haja escoamento em funil.

Além disso, ainda mais interessante, o trabalho salientou que mesmo que os silos sejam dimensionados para escoamento em massa, eles não se mostram capazes de promover uma remistura do conteúdo interno em sua saída se uma quantidade considerável de segregação lateral ocorreu no momento do enchimento.

Apesar disso, o padrão da descarga afeta a ordem de esvaziamento do conteúdo do silo e, conseqüentemente, silos de escoamento em massa reduzem segregação como resultado de uma menor altura de queda para porções de conteúdo do silo que são descarregadas por último. Isso permite concluir que controlar a altura de queda da corrente de material que formará a pilha pode se mostrar uma estratégia interessante para evitar segregação, especialmente a provocada por correntes de ar e as que aumentam proporcionalmente à energia cinética.

4.10.3 A geometria dos silos e o escoamento dos sólidos a granel

Os recipientes de armazenagem de sólidos a granel foram classificados por Andrew Jenike (1964) quanto a sua geometria e conseqüente escoamento do material em seu interior, sendo silos de escoamento em massa, e silos de escoamento em funil.

Silos de escoamento em funil (Figura 4.29) são os mais comuns na indústria e geralmente apresentam paredes com ângulos menores que 50° , o que aumenta a pressão interna na pilha de material. O padrão de escoamento da pilha em seu interior durante o descarregamento é o pior possível e, dependendo das propriedades destes materiais, podendo nem haver escoamento, devido a formação de pontes de produto acima da saída (Figura 4.30).

Essas pontes, ou arcos, ocorrem quando uma obstrução na forma de um arco ou ponte se forma acima da saída do silo e impede a descarga de material. Essas pontes podem se dar pelo intertravamento mecânico entre as partículas criando obstruções, geralmente quando as partículas são relativamente grandes comparadas ao tamanho da abertura de saída de um silo. Estes arcos também podem ser de origem coesiva, quando as partículas se aglomeram e proporcionam interação coesiva entre elas (geralmente partículas finas, presença de umidade ou qualquer outro fator que aumente a interação entre as partículas) (*Purutyan, 2001*).

Outro problema comum em silos desse tipo, é a criação de um caminho preferencial central com conseqüente estagnação de material junto às paredes do silo. Alguns autores, entre eles Jenike e Johansson, chamam esse fenômeno de “buraco de rato” (Figura 4.30). Do ponto de vista do processo industrial, uma série de problemas está associada a este tipo de recipiente. Silos com escoamento em funil apresentam escoamentos erráticos de material, onde a taxa de descarga não é constante, tornando este tipo de contenedor muito ruim em operações de dosagem de produto.

Pelo fato de haver a estagnação de partículas contra as paredes, este material compactado e repousado por longos períodos pode sofrer processos de “cura” (principalmente em operações em que as partículas sofrem transformações químicas ainda durante o processo, como, por exemplo, em granulações de fosfatados ROP) alterando suas propriedades físico-químicas e atrapalhar o restante do processo industrial. Esta formação de grumos geralmente gera perdas de produto, necessidade de acondicionamento e até mesmo falha das operações unitárias envolvidas.

Como o escoamento é problemático nesses silos, é comum que a manutenção tenha dificuldade de limpar ou reestabelecer o escoamento da saída. Para tanto, às vezes suas paredes sofrem uma intervenção pouco ortodoxa, na qual os mantenedores/operários, por vezes usam martelos para causar impactos nas paredes dos silos para provocar um distúrbio mecânico suficiente para que o material escoe. É fácil perceber que tal prática configura um erro de procedimento e que danifica demasiada e desnecessariamente o equipamento.

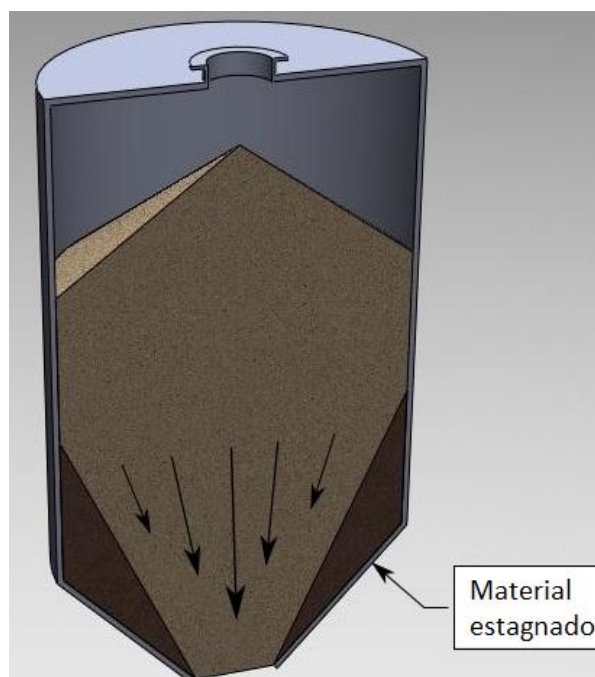


Figura 4.29 –Silo com escoamento em funil (Jenike & Johanson, website)

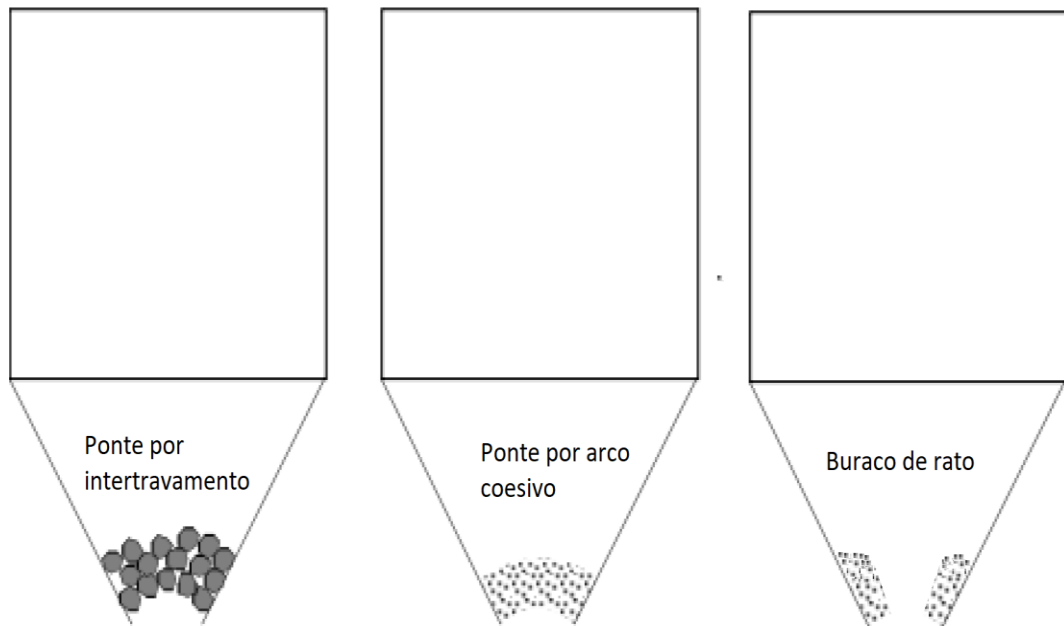


Figura 4.30 – Estagnação da saída do silo por ponte por intertravamento (esquerda), por ponte coesa de produto (centro) e formação de ‘buraco de rato’ (direita) – adaptado de (Purutyanyan, 2001)

Com esse comportamento errático no interior do silo, as partículas tendem a se mover de forma desuniforme, de maneira onde a partícula que entra primeiro pode ser a última a sair. Essa grande perturbação pode proporcionar remistura e segregação.

Além de segregação, em casos mais graves, o escoamento errático de material no interior dos silos pode ocasionar criação de zonas de pressão negativa ou até mesmo vácuo durante o colapso de produto que antes estava estagnado em contato com as paredes dos silos. A pressão atmosférica exterior ao silo pode fazer com que as paredes da estrutura sejam “sugadas” para dentro, ocasionando sérios acidentes (Figura 4.31) (Purutyanyan et al., 1999).

Como foi visto na Seção anterior, se o silo foi alimentado pela parte superior, houve a formação de uma pilha em forma de cone onde o material segregou, e as partículas finas ficaram concentradas no centro. Pela dinâmica do escoamento de material destes silos durante a descarga, a parte central escoou primeiro, ou seja, a extração dos finos é mais evidente no começo da operação de descarga, e o perfil granulométrico da saída vai engrossando com o passar do tempo. Se o nível do silo é abaixado e começa-se um novo enchimento, um aumento da fração de grossos no curto prazo acontece na descarga até que mais material entre e reestabeleça o escoamento da parte central. Em tempo, se o silo não é esvaziado, partículas finas percolam pela fração grossa de produto na região de estagnação e ajudam a formar os buracos de rato (Fayed et al., 1987).

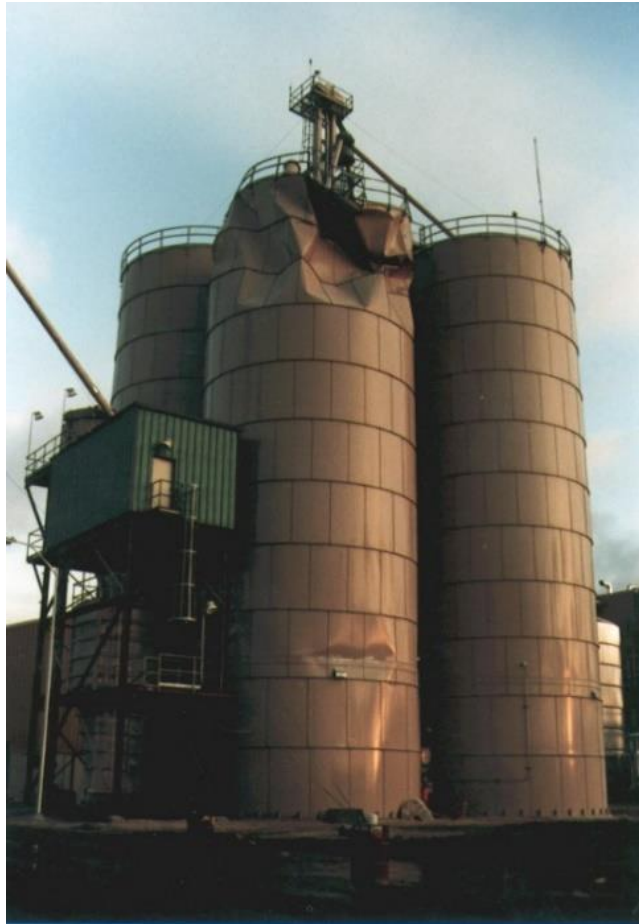


Figura 4.31 – Silo danificado devido a erros no projeto (Purutyan et al., 1999)

4.11 Como diminuir a segregação através de técnicas de manuseio e a escolha dos equipamentos

O rearranjo das partículas e conseqüente segregação, como visto, ocorre toda vez em que o material é despejado em um transportador, chute ou em pontos de carregamento ou descarregamento. Conhecer os mecanismos de segregação que estarão presentes, a provável distribuição das partículas maiores (grossas) e menores (finas) ao longo da extensão do transportador e transversalmente a ele para o silo pode ser prevista (*Fayed e Otten, 1984*).

4.11.1 Silos escoamento em massa

Muitos dos problemas associados ao projeto nas moegas e silos podem ser evitados projetando-os para operar com escoamento em massa. O ângulo da moega de saída do silo com o eixo vertical para o escoamento em massa ocorre na faixa entre 40° e 0°.

Se todas as partículas estão em movimento em qualquer momento da descarga, então trata-se de um silo escoamento em massa. A divisão entre escoamento em massa e escoamento em funil é mostrada na Figura 4.32 para moegas cônicas, onde θ_c é o ângulo do cone com a vertical, ϕ_w é o ângulo de atrito cinético entre o sólido e a parede do cone. Quando o cone é suficientemente inclinado e liso (pequenos valores de θ_c e ϕ_w), o canal expande da saída para cima ao longo das paredes e escoamento em massa acontece. Se o cone não for suficientemente inclinado e liso, escoamento em funil acontece (Jenike, 1964).

O projeto deste tipo de silo requer conhecimento das propriedades dos materiais envolvidos no processo como o coeficiente de atrito interno, o coeficiente de atrito nas paredes, a permeabilidade e compressibilidade. Além destas, dependendo da aplicação, faz-se necessário conhecer temperatura e umidade, principalmente se houver tendência ao empedramento. Jenike (1967), em seu artigo *Quantitative Design of Mass-Flow Bins*, introduziu as técnicas de projeto de silos e testes a serem feitos para determinar as variáveis de atrito do material com ele próprio e com a parede dos silos para o correto dimensionamento destas peças mecânicas.

O valor do coeficiente de atrito da parede muda com a pressão, geralmente decrescendo com o aumento da pressão. Para que haja escoamento em massa numa moega, é importante determinar o ângulo de atrito da parede e o nível de pressão esperado próximo à saída de material (ponto de descarga), já que esta é a região com pressão mínima durante o escoamento.

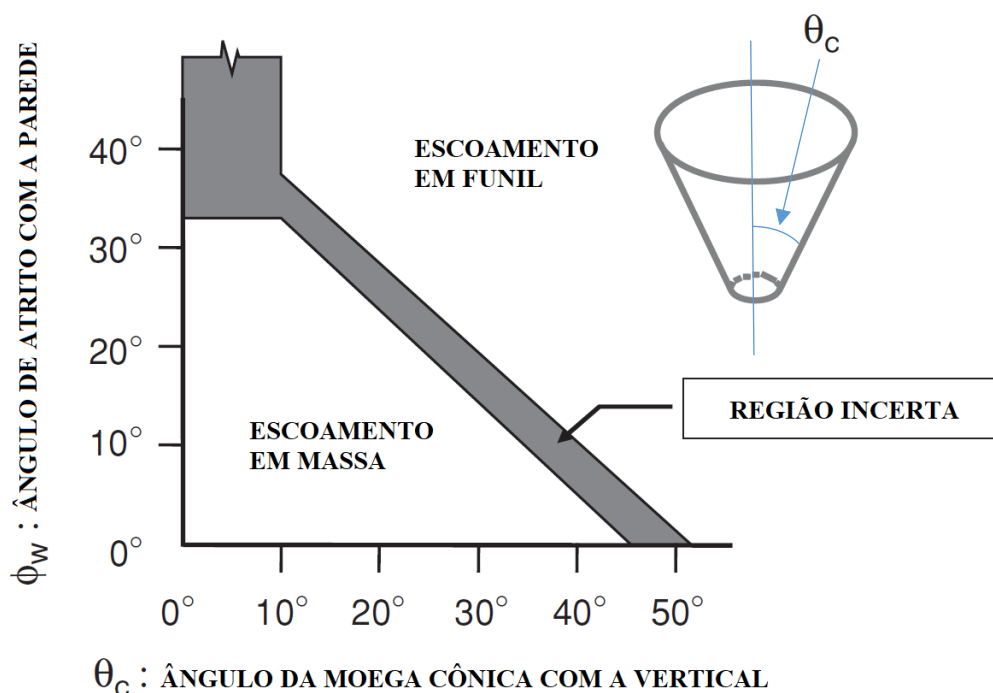


Figura 4.32 – Divisão entre escoamento em massa e em funil em função do ângulo de inclinação da moega e de atrito – adaptado (Carson, 2008)

Jenike (1964) propôs um teste de medição de cisalhamento (*The Jenike Shear Test*), que é constituído de um aparato para medir o atrito do material em teste com as paredes do silo e o atrito interno ao próprio material. Este teste é feito através da colocação de uma amostra do material a ser escoado dentro de um anel. O material é então compactado e colocado no aparato conforme a Figura 4.33.

Os testes de atrito são simples aplicação da física para determinar o coeficiente de atrito onde a força de cisalhamento F é relacionada à força normal N por um coeficiente μ_a na Equação (4.17):

$$F = \mu_a N \quad (4.17)$$

A força de cisalhamento aplicada no teste aumenta até o ponto que o disco começa a deslizar. Essa força registrada é usada para determinar μ_a , que representa o coeficiente de atrito expresso como o ângulo do coeficiente de atrito da parede dado por ϕ como:

$$\phi = \arctan(\mu_a) \quad (4.18)$$

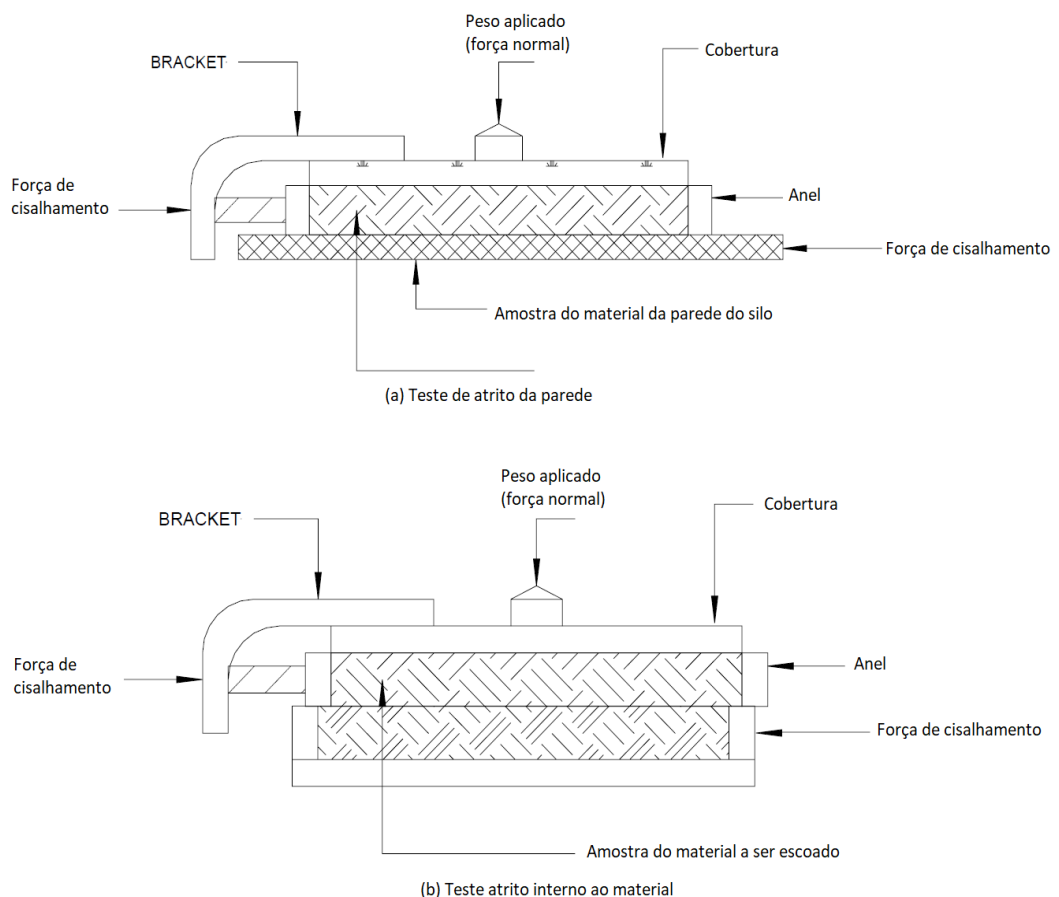


Figura 4.33 – Teste de Cisalhamento de Jenike – adaptado (Chase, 20--)

Existem outros métodos para se testar o coeficiente de atrito como *Peschl, Freeman, Ring e Brookfield*.

Para que se evite a formação de pontes/arcos de material impedindo o escoamento dos silos, faz-se necessário que a saída circular da moega seja no mínimo 6 vezes o tamanho da partícula maior presente no silo, ou ainda 8 vezes o tamanho a partícula média, enquanto que as saídas retangulares devem ter tamanho 3 vezes maior que a maior partícula na largura e que o comprimento deve ser no mínimo 3 vezes maior que a largura. Essas considerações são especialmente importantes quando o diâmetro médio das partículas excede 6 mm, há pouca presença de partículas finas e o material tem pouca umidade superficial ou outra condição que cause coesão (*Carson, 2008*).

Quando há presença de material coesivo nos silos, há que se considerar a função de escoamento, que é a relação entre a força coesiva e a pressão de acomodação do granel. Com a função descrita e determinada, o fator de escoamento da moega precisa ser determinado. Dessa maneira, a abertura da saída da moega deve ser calculada por:

$$B = \frac{\bar{\sigma}_1 H(\theta)}{g \rho_b} \quad (4.19)$$

Onde, para moegas cônicas, B é o diâmetro mínimo da abertura de descarga em metros da moega, $\bar{\sigma}_1$ é o estresse crítico requerido para causar a destruição do arco em N/m^2 , $H(\theta)$ é a função adimensional dependente do ângulo da moega, ρ_b é a densidade do granel na pressão de acomodação na saída da moega em kg/m^3 e g é a aceleração da gravidade em m/s^2 (*Jenike, 1964*).

A função de escoamento de um material pode ser determinada pelos testes de cisalhamento mencionados anteriormente e é fortemente influenciada pela temperatura, tempo de repouso no silo, umidade e distribuição granulométrica.

Em relação ao buraco de rato, o fenômeno pode ser evitado fazendo com que o tamanho do canal de escoamento exceda o diâmetro crítico do buraco de rato, DF , que é calculado conforme a Equação (4.20):

$$DF = \frac{\bar{\sigma}_1 G(\phi)}{g \rho_b} \quad (4.20)$$

Onde $G(\phi)$ é a função adimensional dependente do ângulo de atrito interno do material a granel (calculado com o teste de cisalhamento).

Diferentemente dos silos de escoamento em funil, os de escoamento em massa são construídos com paredes mais inclinadas (Figura 4.34). Estes silos ficam maiores por esse motivo, mas trazem algumas características positivas no que diz respeito ao manuseio de sólidos. Não há estagnação de material nas paredes pois a pressão das paredes é menor, gerando menor atrito lateral. A saída de produto é constante (Figura 4.35), e a primeira partícula que entra, tem maior chance de sair primeiro (*Jenike, 1961*).

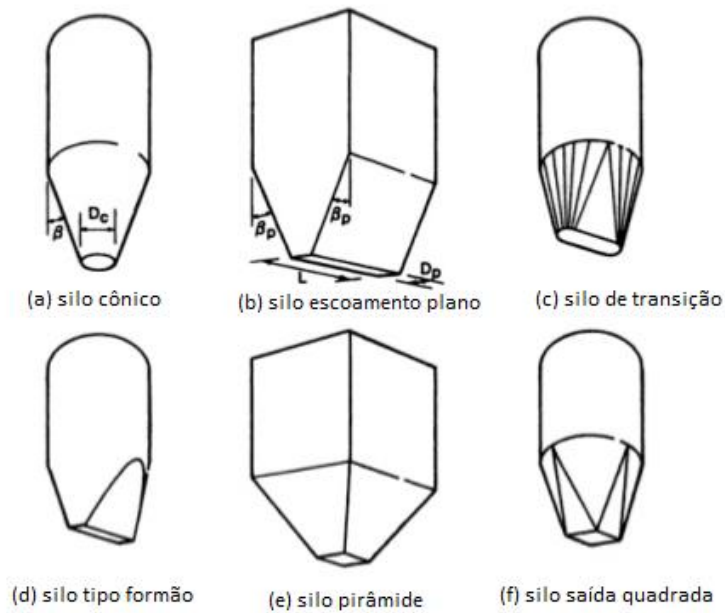


Figura 4.34 – Exemplos de geometrias de silos com escoamento em massa – adaptado (*Woodcock et.al, 1987*)

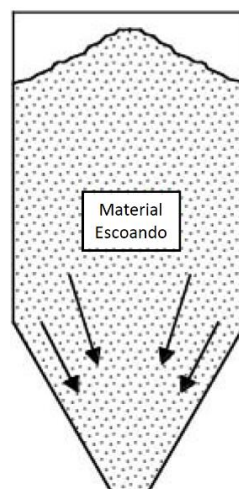


Figura 4.35 – Descarga de um silo de escoamento em massa – adaptado (*Purutyan et. al, 2001*)

A definição de Jenike não exige que todas as partículas numa dada Seção transversal do leito de material em movimento estejam com velocidade igual. De fato, esta condição é quase impossível de ser alcançada já que as partículas próximas à linha média do silo possuem quase nenhuma resistência de cisalhamento, enquanto as partículas que escoam em contato com as paredes convergentes do silo sofrem com ela, movendo-se, portanto, de maneira mais lenta (Carson, 2008).

Este arranjo não deixa gerar mais segregação e, controlando-se esta ocorrência na entrada do silo, pode-se garantir uma descarga homogênea, principalmente porque a altura de queda livre do material a ser descarregado por último é menor (Engblon, 2012).

Apesar de todas as vantagens dos silos de escoamento em massa em relação aos de escoamento em funil, muitas vezes é impraticável optar pelo melhor modelo. Eles são mais caros e usam mais materiais, além de ocupar um espaço maior e serem mais altos. Se a distribuição granulométrica é tal que a segregação não é um problema, então dispensa-se o uso dos silos em escoamento de massa. Algumas técnicas construtivas podem auxiliar silos existentes a operar com escoamento em massa e corrigir uma série de problemas de manuseio.

Lançando-se mão de técnicas de engenharia para modificar silos preexistentes que proporcionam escoamento em funil permite que haja uma correção ou diminuição dos efeitos adversos deste tipo de escoamento. Sendo assim, Carson (2008) elenca um terceiro tipo de padrão de escoamento, chamado escoamento expandido. Este terceiro padrão nada mais é que a combinação dos dois primeiros padrões já definidos por Jenike (1964). Normalmente, alcança-se este padrão através da colocação de um pequeno silo de escoamento em massa embaixo de um silo em escoamento em funil.

Algumas opções de modificações dos silos problemáticos vão depender do tipo de defeito que ocorre no escoamento do material. Pode-se mudar a geometria interna desses silos, colocar inserções (*inserts*), modificar a alimentação, adicionar aparatos de auxílio de escoamento, aeradores e vibradores.

Em casos onde o volume do silo disponível não está próximo do limite necessário, estas modificações são maneiras fáceis de melhorar o escoamento interno, apesar de não resolverem definitivamente o problema da segregação. Em teoria, sob condições corretas, estas inserções de aparatos podem forçar escoamento na região das paredes dos silos, mas, na prática, raramente alcançam escoamento nessas porções. No entanto, se posicionados de maneira correta, podem aumentar o tamanho do canal de escoamento e, por consequência, ativar mais conteúdo do silo. Há que se ter em mente que, uma vez mal colocado, este aparato pode piorar o problema de escoamento interno ao silo (Purutyan et. al, 2001).

Ao se inserir um cone invertido próximo à saída do silo, pode-se alterar o padrão de escoamento interno (Figura 4.36).

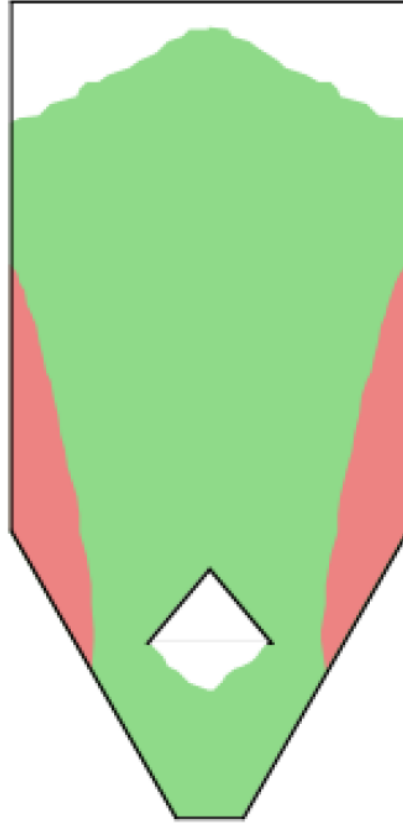


Figura 4.36 – Inserção de um cone invertido próximo à saída do silo para melhorar o escoamento de material (Purutyán et. al, 2001)

Há vezes em que é inviável a substituição de um silo com escoamento em funil por outro com escoamento em massa e o uso do cone dentro de um cone se mostra uma alternativa econômica razoável para evitar a segregação, já que, com essa adaptação, a porção do silo com o cone irá proporcionar que todo o conteúdo do silo se mova de maneira uniforme, desfazendo o problema de escoamento errático onde o centro do leito escoava primeiro para depois escoar as porções próximas às paredes (Purutyán et. al, 2001).

Uma maneira mais sofisticada e mais efetiva de se modificar um silo para alcançar um escoamento adequado é o de se colocar inserções específicas para alterar o padrão completo do escoamento interno. Chamado de “cone-em-cone”, estes aparatos fazem uma grande diferença no escoamento das partículas pois forçam o escoamento de material pelas paredes de silos que, sem eles, apresentem escoamento em funil, que, como dito anteriormente, apresentam paredes

próximas à descarga com ângulos pouco inclinados que geram pressões de atrito grandes e dificultam o escoamento das partículas (Figura 4.37).

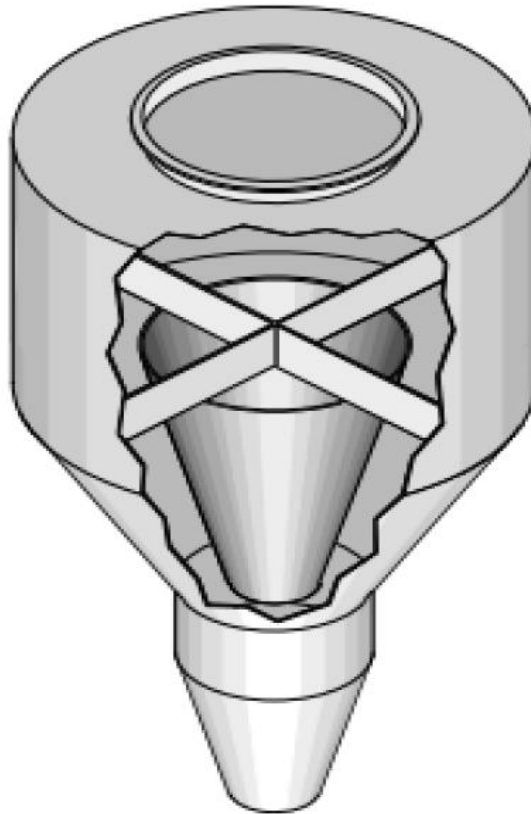


Figura 4.37 – Inserto ‘cone em cone’ de Jenike (Purutyán et al., 1998)

Os engenheiros têm outras ferramentas que podem ser usadas para tentar corrigir a segregação em silos.

Caso as alterações anteriormente citadas não sejam possíveis, uma tentativa, para um silo de descarga central, seria deslocar a entrada de material para a extremidade do silo. Isso faz com que haja uma mistura do material pela própria dinâmica interna da pilha formada e a saída seja mais homogênea ao longo do tempo.

Outra modificação no padrão de entrada de silos com característica de escoamento em funil pode, inclusive, se valer da característica desse escoamento para provocar uma remistura e homogeneizar seu conteúdo novamente.

A Figura 4.38 mostra a modificação da posição de entrada de material em um silo para a extremidade.

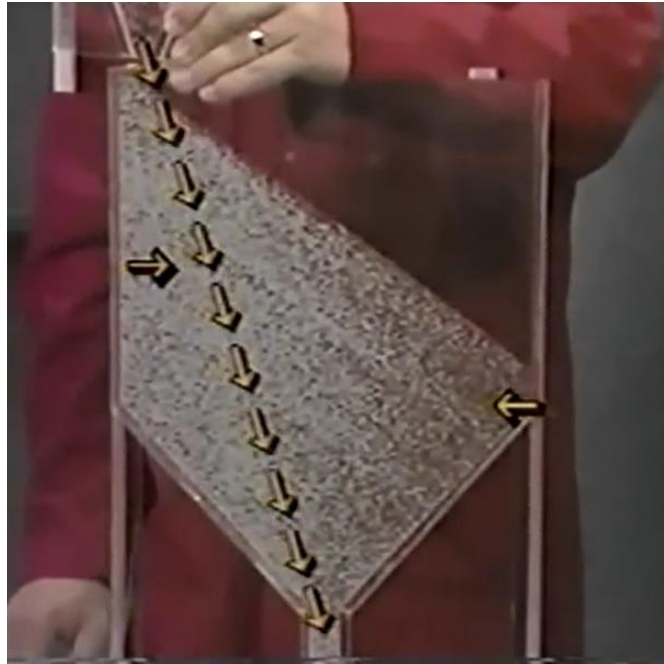


Figura 4.38 – Modificação da entrada do silo – deslocamento para extremidade (3M Industrial Mineral Products Division - Segregation in Roofing Granules educational vídeo, 2012)

Pela Figura 4.39 pode-se perceber que houve a inserção de um defletor na entrada formando duas correntes de produtos que formam, dessa maneira, duas pilhas de material. Pela diferença na cor das partículas, é possível ver que há uma concentração de finos nos centros de cada pilha individual.

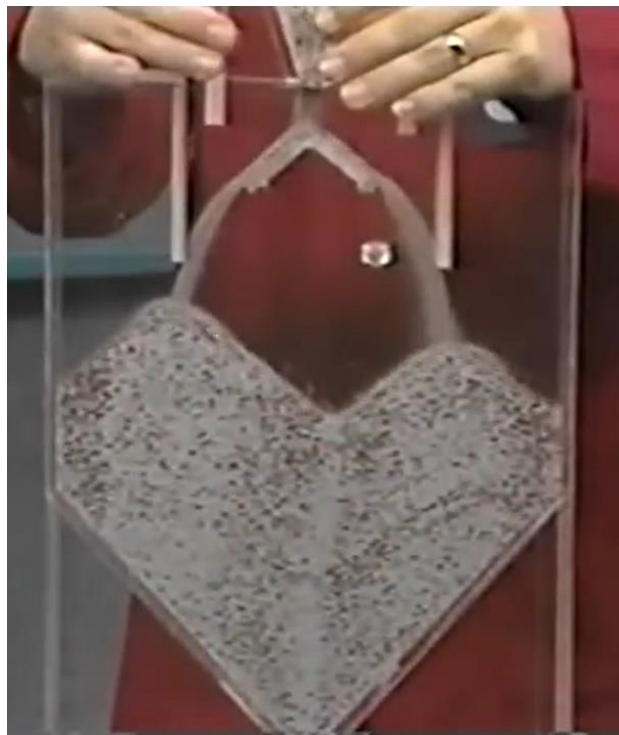


Figura 4.39 – Modificação da entrada do silo (3M Industrial Mineral Products Division - Segregation in Roofing Granules educational vídeo, 2012)

Durante a descarga, pelo próprio escoamento em funil, a tendência é que as pilhas se misturem e a segregação seja diminuída. Algumas propriedades dos fertilizantes, mais notadamente, a granulometria, a densidade e a umidade, têm de ser analisadas antes de se proceder com tais mudanças, e existem técnicas de engenharia para isso como as propostas por Jenike (1961).

4.11.2 Fluidizadores

Quando um silo apresenta atrito lateral excessivo com o material, pode-se colocar aeradores (Figura 4.40) ao longo da parede para que haja a fluidização do material nas proximidades da parede para que o material escoe.

Outra ferramenta para fluidizar as partículas na região das paredes é o vibrador eletromecânico, que é muito versátil em razão da facilidade de instalação e modificações futuras. A vibração produzida é transmitida às paredes do silo de maneira perpendicular (no caso de um vibrador linear) ou perpendicular e paralela concomitantemente (caso dos vibradores rotativos/eixo excêntrico).

Estes mecanismos de ação fluidizadora também são usados para que haja a destruição de pontes coesivas ou de intertravamento e os “buracos de rato” (Bates *et. al*, 2007). Por mais que haja uma melhora no escoamento interno dos silos, pode-se dizer que há pouca influência na diminuição da segregação por não conseguir eliminar, por completo, o escoamento errático.

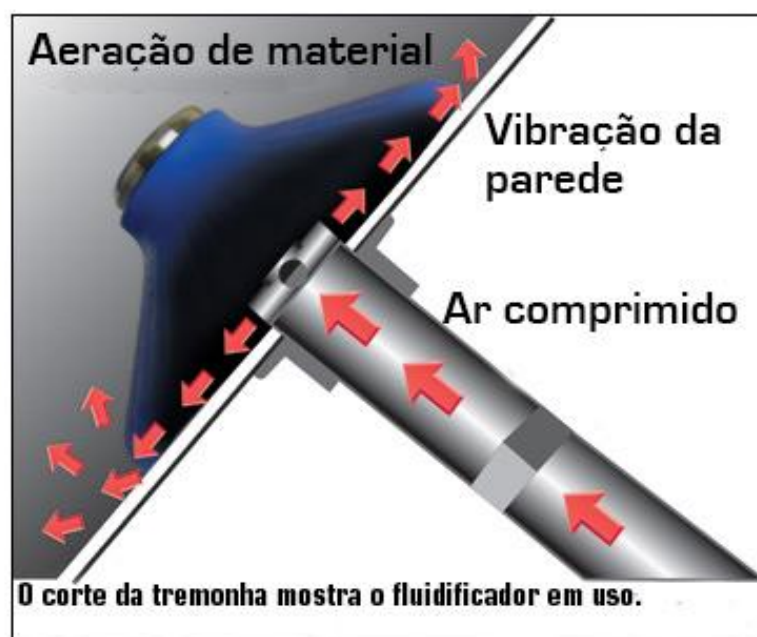


Figura 4.40 – Aerador (Solimar Pneumatics Website, acesso em 2017)

4.11.3 Mecanismos de descarga que previnem a segregação

Agora que algumas ferramentas para correção da segregação em alimentação e descarga de silos foram elencadas, podem ser mencionadas algumas técnicas de manuseio de sólidos para evitar a segregação na formação de pilhas de material.

As alturas de queda de descargas aéreas geralmente permitem a geração de uma contracorrente de ar no sentido oposto ao sentido da gravidade, permitindo que haja elutriação e consequente separação de finos do resto das partículas.

Existem maneiras de se controlar a velocidade de queda das partículas como, por exemplo, usando-se uma série de chutes em cascata deslocados lateralmente e alternadamente. Este arranjo permite que o material seja misturado ao longo das chicanas formadas pelos funis e gera uma saída com menor grau de segregação (*Farnish et. al, 2007*) (Figura 4.41).



Figura 4.41 – Cascata de chutes alternados (*Cleveland Cascades Ltd. Website, 2017*)

Caso a elutriação ocorra, haverá também o problema da perda de particulado para o ambiente. Para solucionar este problema, existe a moega supressora de pós, sendo essa um funil

desenhado especificamente para impedir que haja escoamento de ar dentro do leito descendente que, conseqüentemente, desloque partículas para o ambiente (Figura 4.42).



Figura 4.42 – Moega supressora de pó (DSH Systems Ltd., website)

O mecanismo mais comum de segregação é quando as partículas rolam pela pilha, e controlar a altura de queda delas evita que o problema aconteça. Uma alternativa para lidar com isso é a instalação de chutes telescópicos, cujo princípio operacional é o de no início da descarga o mecanismo se encher até que se acione o sensor de nível alto para que a parte inferior dele seja erguida para permitir que o material escoe, formando a pilha (Figura 4.43). Quando o nível for baixo o suficiente para acionar o sensor de nível baixo, o tubo começa a ser enchido novamente e o ciclo se repete. Esse sistema permite uma altura de queda efetivamente menor e consistentemente mantida (Farnish et. al, 2007).



Figura 4.43 – Chute telescópico (Cleveland Cascades Ltd. Website, 2017)

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 DESLOCAMENTO DE PEQUENAS PARTÍCULAS PARA ATENUAR A SEGREGAÇÃO

Como pode ser observado ao longo da revisão bibliográfica, existem muitos métodos desenvolvidos através da experiência dos engenheiros com manuseio de sólidos a granel (partículas), com especial reverência aos estudos de Andrew Jenike (1961), para diminuir o impacto negativo da segregação. Muito embora alguns desses métodos se mostrem eficazes em alguns casos, é possível que se teste novas maneiras de minimizar o mesmo problema com o intuito de verificar a eficiência de um novo método em comparação com outros existentes.

Dessa forma, é possível, com base nos conhecimentos de engenharia e física como a elutrição e a teoria da dinâmica das partículas, propor um método de deslocamento de partículas com uso de corrente de ar levando em consideração um princípio simples. Quando da descarga de material para formação da pilha, encontram-se em queda livre partículas de variadas granulometrias. Quanto maior o diâmetro da partícula, maior será a inércia dela, levando em conta que se trata de partículas de um mesmo produto, já que, como visto anteriormente, os valores de densidade real podem diferir.

Quando da atuação de uma corrente de ar com vetor velocidade perpendicular ao escoamento descendente de material, o arrasto das partículas horizontalmente será tanto maior quanto menor for o diâmetro da partícula dentro de uma população com mesma densidade real. Dessa maneira, é possível esperar que partículas menores sejam deslocadas do centro da corrente de escoamento, permitindo, em tese, que elas ocupem um local diferente na pilha, quando de sua acomodação, daquela que ocuparia sem nenhuma interferência externa.

A abordagem matemática sobre dinâmica das partículas, com escoamento de um fluido e partículas sólidas, a seguir, considera que: i) o sólido é uma partícula esférica, não-porosa e incompressível; ii) o fluido é incompressível e encontra-se em quantidade suficiente para que sejam eliminados os efeitos das paredes que o contém; iii) a aceleração é resultante do campo gravitacional; iv) as partículas deslocam-se livre da interferência do movimento de outras partículas.

O balanço de forças é expresso pela Equação (5.1):

$$F_R = m \cdot a \quad (5.1)$$

sendo: F_R a força resultante que atua sobre o corpo de massa m e a é a aceleração da partícula (*Massarani, 1997*).

$$m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt} = m \cdot \vec{b} - w_f \cdot \vec{b} - F_R \quad (5.2)$$

sendo: \vec{b} é o vetor aceleração devido ao campo (por exemplo a aceleração da gravidade); w_f é a massa do fluido deslocado (gera o empuxo); F_R é a força resistiva proveniente do movimento relativo entre o sólido e o fluido.

Um coeficiente de arrasto, C_D é definido como (*Welty et al., 1984*):

$$C_D = \frac{F'_R}{\frac{1}{2} \rho_f U^2} \quad (5.3)$$

sendo F'_R a força de arrasto por unidade de área projetada da partícula; U a velocidade da partícula ou do fluido.

Portanto a força de retardamento da partícula é:

$$F_R = \frac{1}{2} C_D \cdot \rho_f \cdot U^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_p^2}{4} \right) \quad (5.4)$$

Para escoamento em regime laminar, validade da lei de Stokes, tem-se:

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (5.5)$$

Se a partícula escoar em um fluido na direção horizontal, então a desaceleração da partícula (a_R é expressa por: (força de retardamento) / massa da partícula), portanto (*Rhodes, 2008*):

$$a_R = \frac{\frac{24}{Re} \frac{1}{2} \rho_f \cdot U^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_p^2}{4} \right)}{\frac{\rho_p \cdot \pi \cdot d_p^3}{6}} = \frac{18U\mu}{\rho_p \cdot d_p^2} \quad (5.6)$$

Recorrendo à equação do movimento da partícula na direção horizontal expresso pela Equação de Torricelli:

$$U_f^2 = U^2 + 2 \cdot a_R \cdot S \quad (5.7)$$

sendo: U_f a velocidade final da partícula (neste caso igual a zero) e S a distância percorrida após iniciar o movimento em uma direção até o final do percurso, destacando-se que a aceleração é negativa pois trata-se de desaceleração devido ao atrito com o fluido, combinado com a Equação (5.6) tem-se:

$$S = \frac{U \cdot \rho_p \cdot d_p^2}{36\mu} \quad (5.8)$$

Há que se destacar o fato de que essa distância se refere à partícula que adquiriu a mesma velocidade do jato do fluido: partículas menores se deslocarão a maiores distâncias e as maiores a menores distâncias.

O valor S corresponde à distância que a partícula irá deslocar-se até alcançar o repouso (Figura 5.1), e quando partícula de diversos tamanhos dispersas no fluido ficam submetidas a ação de um fluido (como um jato de ar) escoando em torno das mesmas em uma direção, não se considerando influências em outras direções. Deve-se observar que ao receber o jato, as pequenas partículas irão se movimentar com maior velocidade do que as maiores partículas, portanto o U adquirido depende do tamanho da partícula.

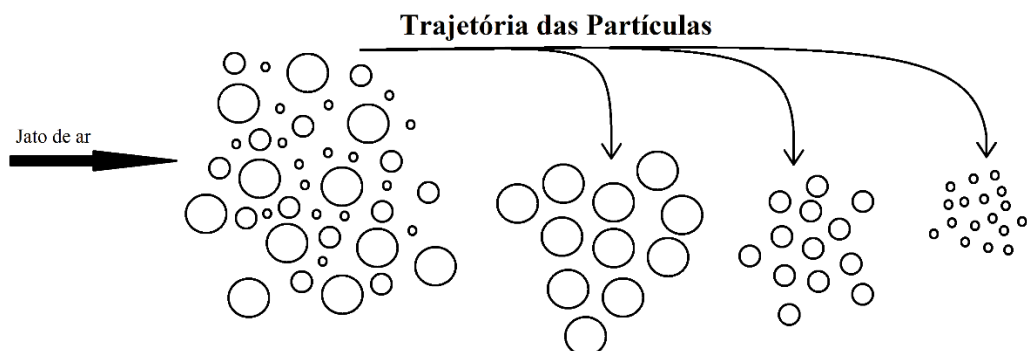


Figura 5.1 – Trajetória das partículas subitamente submetidas à ação de uma corrente de gás escoando em uma direção

Na situação em que o regime de escoamento é turbulento: $C_D = 0,44$ (Rhodes, 2008); (McCabe et al., 1993), substituindo na Equação (5.4), tem-se:

$$\alpha_{Rt} = \frac{0,33 \cdot \rho_f \cdot U^2}{\rho_p \cdot d_p} \quad (5.9)$$

Ao substituir na Equação de Torricelli:

$$S = \frac{\rho_p \cdot d_p}{0,66 \cdot \rho_f} \quad (5.10)$$

O que representa o espaço percorrido pela partícula que alcançou a mesma velocidade do jato do fluido, portanto partículas menores irão se deslocar a maiores distâncias, destacando que a Equação (5.10) possibilita o cálculo de uma partícula particular.

Além dessas considerações, existe ainda a influência da população de partículas que pode ser modelada com inclusão da porosidade do meio com as partículas em escoamento.

O deslocamento de partículas não deixa de ser um causador de segregação, mas encontra aplicações úteis na indústria em métodos de separação. Em alguns casos, o objetivo é remover partículas de uma corrente de maneira a segregar contaminantes do fluido ou até mesmo recuperar partículas de determinados tamanhos.

Se uma partícula está em repouso em relação ao fluido no qual está imerso e começa a se mover neste sob efeito de uma força externa, seu movimento pode ser dividido em dois estágios. O primeiro, é um período curto de aceleração, durante o qual a velocidade da partícula aumenta de 0 até a terminal. O segundo, é o período no qual a partícula se move com velocidade terminal.

O separador gravitacional é um exemplo de equipamento que faz uso do deslocamento de partículas para separação destas quanto ao seu tamanho.

5.2 O separador gravitacional

O separador gravitacional usa o princípio da segregação por trajetória induzida pela elutriação ou deslocamento de partícula num fluido.

Partículas de diferentes tamanhos possuem diferentes inércias e, conforme visto anteriormente na revisão bibliográfica e na Figura 4.42, quanto menor a partícula, maior será seu deslocamento horizontal sob atuação de uma força. Desta maneira, partículas mais pesadas que o fluido de suspensão podem ser removidas de um fluido numa câmara de sedimentação.

Estas câmaras possuem uma área transversal suficiente para que os gases possam escoar em baixa velocidade permitindo com que as partículas sedimentem em moegas localizadas ao

fundo na base do equipamento com respeito ao seu tamanho. Apesar de ser um equipamento simples e antigo, ainda encontra aplicação e tem seu uso bastante difundido em algumas indústrias. A Figura 5.2 mostra um separador gravitacional de câmara de altura a , largura b e comprimento L , com v_t sendo a velocidade terminal das partículas, e v_g sendo a velocidade do gás (por vezes, o ar).

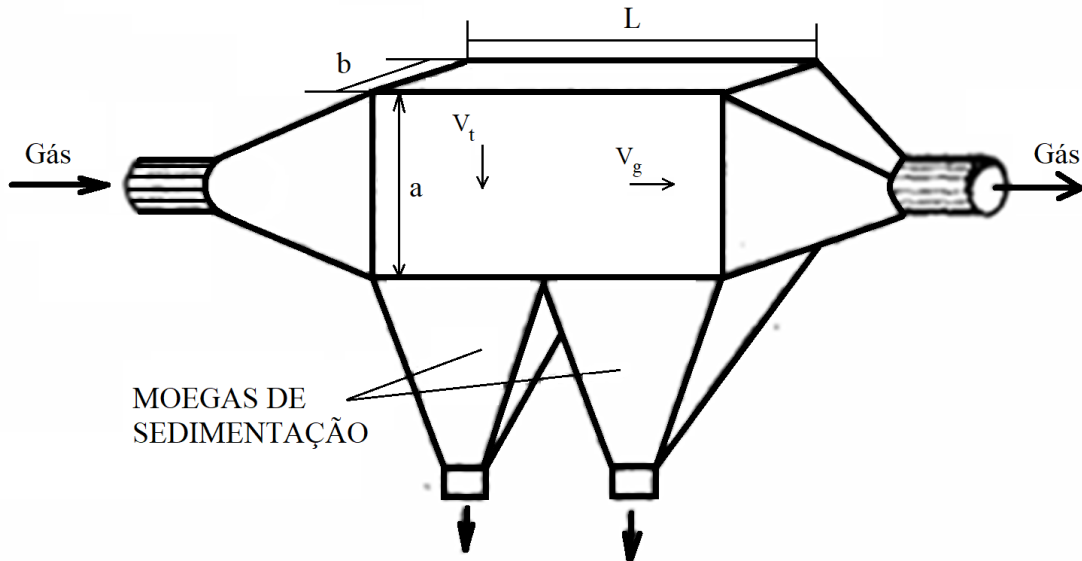


Figura 5.2 – Separador Gravitacional (adaptado de Gordon e Peishakov, 1972)

5.3 PLANEJAMENTO E PREPARAÇÃO DO EXPERIMENTO

Foram planejados experimentos em bancada com o intuito de avaliar a segregação na formação de pilha cônica durante a descarga a partir do repouso de uma mistura binária de partículas de fertilizante fosfato monoamônico (MAP). A seleção pelo MAP se deu pela maior facilidade no manuseio, higroscopia moderada (diferentemente de ureia, por exemplo, que é altamente higroscópica), menor friabilidade para garantir granulometria durante o manuseio, e a não inclusão de outra matéria-prima foi para evitar a influência da forma e da densidade nos resultados de índice de segregação, já que, conforme literatura apresentada, a diferença dos tamanhos da partícula é o fator que mais contribui para a segregação.

Como forma de se quantificar a segregação, foi necessário selecionar uma metodologia ou teste capaz de comportar a pilha formada e, conseqüentemente, permitir a amostragem das suas posições geométricas para avaliar as composições no que diz respeito ao tamanho das partículas. Para tal, escolheu-se a caixa de Hoffmeister (1964), que baseou a construção deste aparato no padrão de segregação observado na medição quantitativa de segregação em pilhas

cônicas. As composições na pilha parecem ser constantes radialmente como mostra a Figura 5.3, evidenciando uma predominância de material fino nos segmentos G, H e I e de material grosso nos segmentos A, B e C (Hoffmeister, 1964).

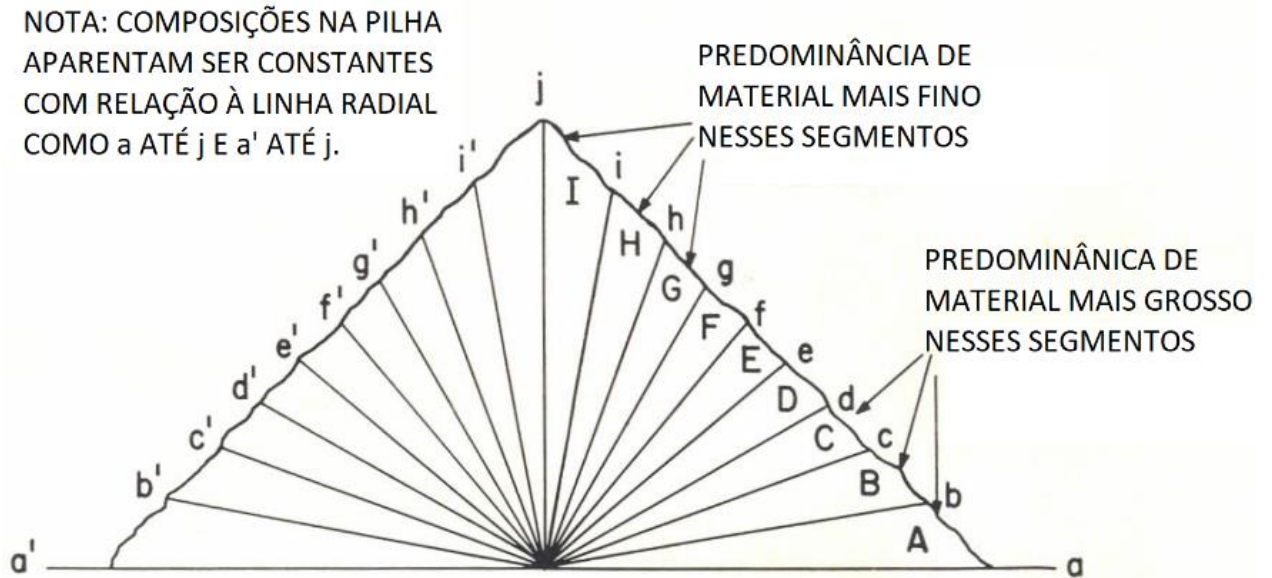


Figura 5.3 – Padrão de segregação observado em pilhas cônicas de fertilizantes - adaptado (Hoffmeister, 1964)

O modelo da caixa construída pode ser visto na Figura 5.4.

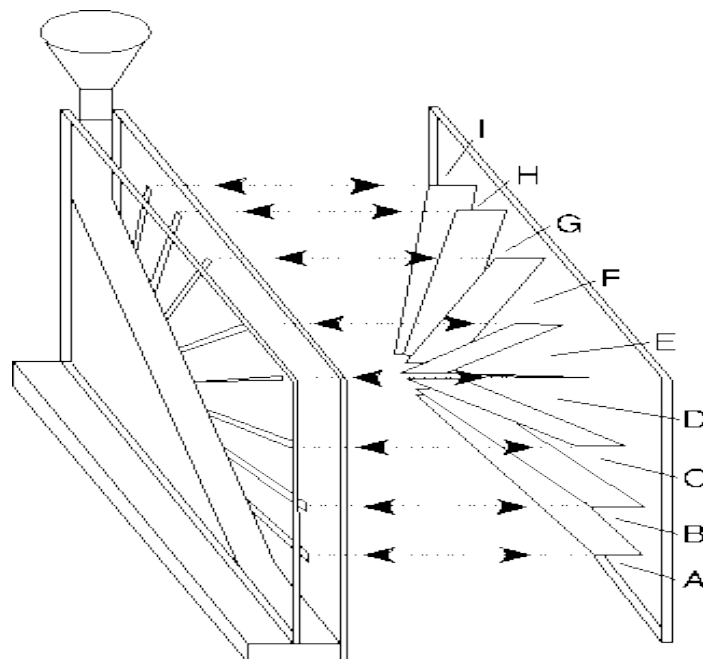


Figura 5.4 – Dispositivo de determinação do índice de segregação – Caixa de Hoffmeister (Da Silva, 1997)

Uma caixa de determinação de segregação compartimentada (Hoffmeister, 1964) foi construída com as seguintes características (Figura 5.5):

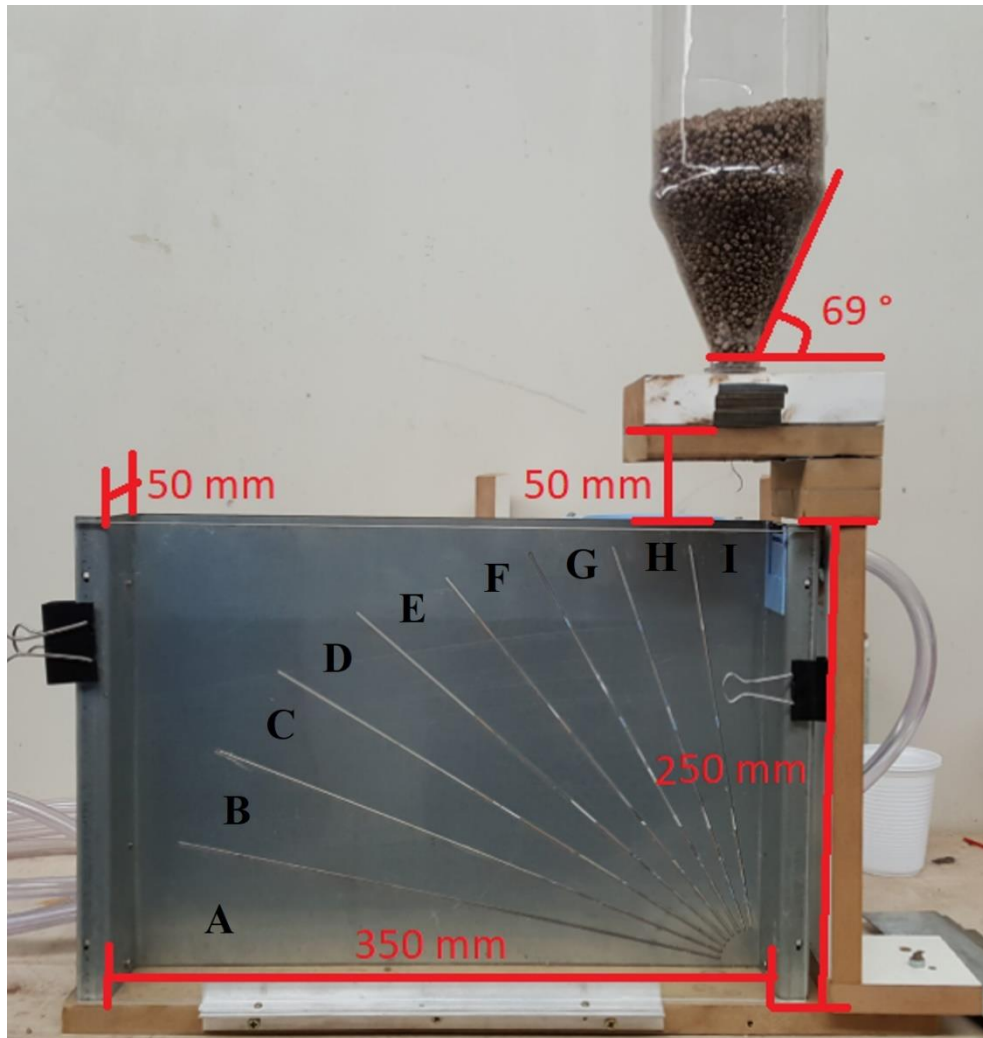


Figura 5.5 – Modelo de bancada do experimento

- Caixa de 250 mm de altura, 350 mm de comprimento e 50 mm de largura;
 - Material: acrílico e aço galvanizado;
 - Parede frontal removível;
 - Parede traseira com *slots* de 10° de intervalo, possibilitando 9 divisões angulares na caixa (A – I).

Além da caixa, foram utilizados os seguintes materiais:

- Béquer;
- Paquímetro;

- MAP granulado - tamanhos médios de 1,93 mm e 4,05 mm;
- Silo escoamento em massa;
 - Medidas da moega de descarga
 - Inclinação: $\sim 69^\circ$
 - Altura: 84 mm;
 - Diâmetro: 89 mm;
 - Abertura: 22 mm.
- Peneiras;
 - Aberturas: 4,75 mm, 3,35 mm, 2,45 mm e 1,4 mm;
- Balança de precisão;
 - Modelo AG200, marca Gehaka ($e = 0,01\text{g} - d = 0,0001\text{g}$);
- Soprador de ar composto de:
 - Compressor de ar marca Schulz, modelo Air Pluz, MSI 8,5/25 – 2 HP;
 - Bocal de saída de ar de 3 mm x 30 mm.
 - Mangueiras flexíveis de ar de 1/8”;
 - Válvula de controle de pressão de ar;
- Anemômetro;
 - Modelo THDLA-500, Marca Highmed.
- Pincel.

Uma mistura da MAP com partículas de 2 granulometrias distintas foi selecionada, cuja obtenção dos tamanhos de partícula aproximados é feita por determinação diâmetro médio com a média aritmética das aberturas das malhas das peneiras (4,75 mm, 3,35 mm, 2,45 mm e 1,40 mm). Assim, a amostra A foi definida como sendo aquela cujas partículas passaram pela malha de 4,75 mm e ficaram retidas na peneira de malha de 3,35 mm. O diâmetro médio \bar{D}_A foi calculado em 4,05 mm. A amostra B foi definida como sendo aquela cujas partículas passaram pela malha de 2,45 mm e ficaram retidas na peneira de malha de 1,40 mm. O diâmetro médio \bar{D}_B foi calculado em 1,93 mm.

A mistura da amostra A com a amostra B foi escolhida para que houvesse uma tendência a segregação significativa, mas que estivesse dentro dos padrões de granulometria determinados pela legislação (*Instrução Normativa n° 46, de 22 de novembro de 2016, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA*) tendo em consideração a comercialização de fertilizantes granulados no Brasil. De maneira a quantificar a tendência à segregação, escolheu-

se o método *GSI* (*Granulation Spread Index*, ou ainda, *Índice de Dispersão de Partículas em Português*) que é calculado pela Equação (5.11):

$$GSI = \frac{d_{84} - d_{16}}{2 \cdot d_{50}} \times 100 \quad (5.11)$$

sendo que 84% das partículas da amostra tem diâmetro menor d_{84} , 16% das partículas da amostra tem diâmetro menor que d_{16} , e 50% das partículas da amostra tem diâmetro menor que d_{50} (Figura 5.6).

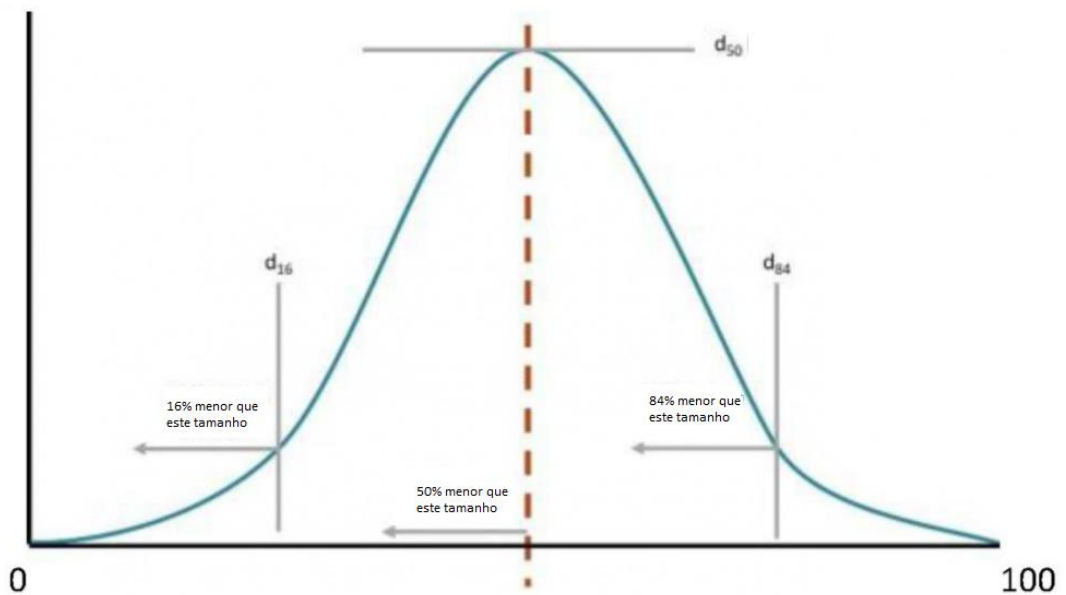


Figura 5.6 – Distribuição granulométrica ilustrando valores d_{16} , d_{84} e d_{50}

Sobre a interpretação do índice, é sabido que valores de *GSI* maiores que 25 são caracterizados por excessiva segregação pelo tamanho das partículas (Miresque et al., 2004).

Outra fonte importante de informação acerca do índice *GSI* é a própria legislação brasileira. Na já citada *Instrução Normativa número 46, de 22 de novembro de 2016 (IN46)*, fica explícito pelo parágrafo 1º do inciso II do Artigo 3º:

“Para os fertilizantes minerais sólidos com especificação de natureza definida conforme (...) artigo, pode ser declarado no rótulo, na nota fiscal e em documento auxiliar, o Índice de Dispersão de Partículas (*GSI*), sempre acompanhado de sua interpretação (...)”

A interpretação segundo a *IN46* está descrita na Tabela 5.1:

Tabela 5.1 – Interpretação dos valores do índice GSI (IN46 de 2016 – MAPA)

Valor de GSI	Interpretação
Até 20	Baixa segregação: indica que o produto tem alta uniformidade de aplicação.
Maior que 20 até 25	Média segregação: indica que o produto tem média uniformidade de aplicação.
Maior que 25	Alta segregação: indica que o produto tem baixa uniformidade de aplicação.

As amostras A e B contribuem em 50%, cada, com a massa total da mistura. Dessa maneira, apresenta-se sua análise granulométrica na Tabela 5.2 e seu histograma na Figura 5.7.

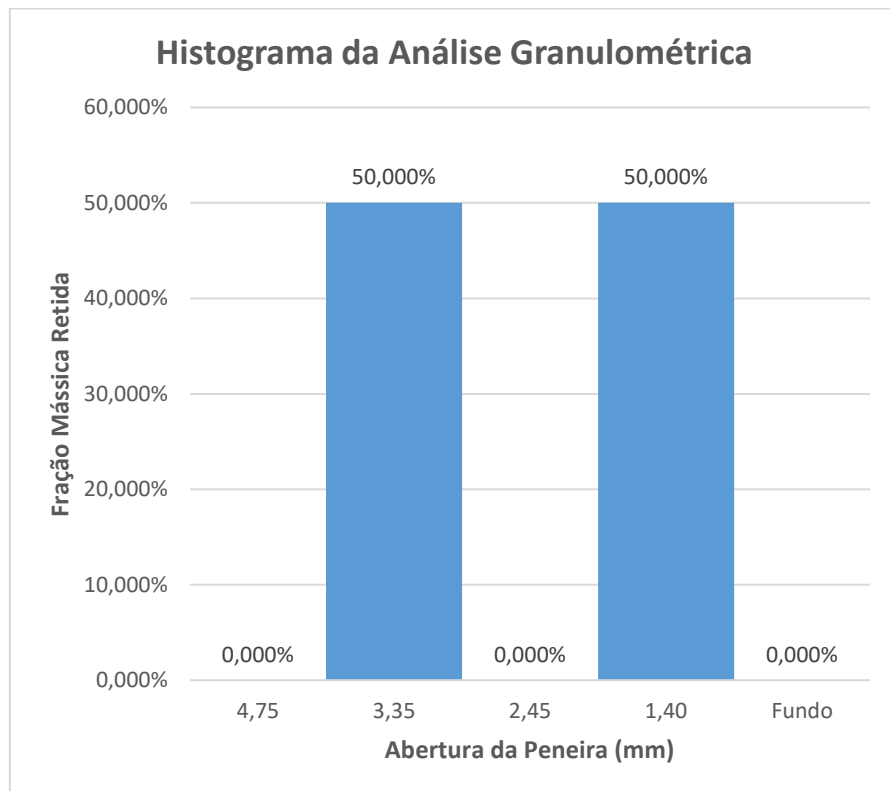


Figura 5.7 – Histograma da análise granulométrica da mistura de MAP usada nos experimentos

O valor de d_{50} pode ser obtido a partir da Tabela 5.2 e é igual a 2,45 mm. Já para a determinação de d_{84} e d_{16} da mistura completa, pode-se utilizar a regressão linear no gráfico em escala logarítmica, pois partículas sólidas tendem a seguir este comportamento com base nos dados disponíveis a partir da equação de graduação da escala logarítmica:

$$X_i = L \cdot \log(z) \quad (5.12)$$

Foram encontrados os valores de 4,03 mm para d_{84} e 0,94 mm para d_{16} . De posse desses valores, pode-se calcular o índice GSI que é igual a 63.

Comparando o valor encontrado com o valor de referência na bibliografia relativamente à tendência a segregação por tamanho de partícula, o valor encontrado está bem acima àquele citado por Miresque *et al.* (2004), o que indica que a mistura tem muita tendência a segregar pelo tamanho de partícula. Ou ainda, como GSI é maior que 25, pela Tabela 5.1, sabe-se que a mistura se encaixa na seguinte descrição: “*alta segregação: indica que o produto tem baixa uniformidade de aplicação*” (IN46, MAPA). Esse parâmetro justifica a escolha das faixas granulométricas para ambas as amostras e, portanto, espera-se que, a pilha formada a partir do descarregamento de um silo da mistura, terá, em sua composição, partículas distribuídas seguindo o padrão de segregação onde partículas de menor diâmetro tenderão a se localizar no centro, enquanto as de maior diâmetro tenderão a rolar para a extremidade.

Tabela 5.2 – Análise granulométrica da mistura de MAP usada no experimento

Ord. Peneira	Abertura (mm)	Massa de MAP Retida (g)	Fração de MAP retida na peneira	Fração Retida Acumulada	Fração o pass.	Diâm. Médio de cada Faixa (mm)	Diâm. de Sauter (mm)
1	4,75	0	0	0	1		
2	3,35	250	0,5	0,5	0,5	4,05	
3	2,45	0	0	0,5	0,5	2,9	2,610
4	1,40	250	0,5	1	0	1,93	
5	Fundo	0	0	1			
TOTAL		500					

Fez-se também a caracterização da esfericidade das partículas de cada amostra. Como as medidas manuais da área da superfície da partícula são muito difíceis de se obter, outros índices foram definidos.

A metodologia escolhida para a determinação das esfericidades de cada amostra foi aquela descrita pela Equação (4.4). Foram colhidas 10 partículas da amostra A e 10 partículas da amostra B através de quarteamento (Figura 5.8).



Figura 5.8 – Grupo de 10 partículas de cada amostra para determinação da esfericidade média (lado esquerdo: Amostra A; lado direito: Amostra B)

Foram medidos os três diâmetros (maior, menor e mediano) em 3 direções e aplicados na Equação (4.4). Foi extraída a média das medidas de Ψ ($\bar{\psi}$) para cada amostra e indicado o desvio padrão. Os resultados foram elencados na Tabela 5.3 incluindo média ($\bar{\psi}$) e desvio padrão (σ).

Tabela 5.3 – Esfericidade das partículas das amostras A e B

AMOSTRA A										
Partícula	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a (mm)	4,14	5,26	5,15	4,69	6,15	6,59	4,40	4,89	4,44	5,07
b (mm)	4,03	4,72	4,91	4,43	4,51	5,01	4,08	4,68	4,12	4,68
c (mm)	3,80	4,28	3,18	3,89	3,97	4,05	3,87	3,18	3,01	3,46
Ψ	0,95	0,90	0,74	0,90	0,83	0,79	0,94	0,86	0,79	0,80
$\bar{\psi}$	0,85									
σ	0,07									
AMOSTRA B										
Partícula	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a (mm)	2,59	2,64	3,81	2,73	2,22	3,05	2,35	2,62	2,63	2,60
b (mm)	2,21	2,34	2,61	2,03	1,81	2,90	2,19	2,13	2,06	2,34
c (mm)	1,85	2,22	2,02	1,91	1,70	2,43	2,10	1,93	2,00	1,71
Ψ	0,95	0,93	0,74	0,87	0,90	0,87	0,95	0,87	0,90	0,78
$\bar{\psi}$	0,88									
σ	0,07									

A densidade aparente das partículas de MAP é 1,73 g/cm³ (IFDC, 1998).

O silo escolhido para o modelo de bancada foi um recipiente polietileno tereftalato (PET) adaptado com dimensões da moega cônica de descarga de 89 mm de diâmetro e 100 mm de altura, seguindo os preceitos de Jenike (1964) quanto ao dimensional para que se evitasse o

escoamento em funil, a formação de “buracos de rato” e arcos coesivos e/ou de intertravamentos mecânicos. Além do aspecto construtivo da moega de descarga, é necessário que se avalie o produto que será manuseado para obter informações que influenciam na construção da moega para correto escoamento em massa.

Geralmente, sólidos que não contém particular menores que 0,3 mm são de escoamento livre (Jenike, 1964). A distribuição granulométrica não influencia na capacidade de escoar de sólidos a granel. O fator limitante, neste caso, é a presença das partículas finas. Partículas maiores escoam melhor por não apresentarem tensões de cisalhamento elevadas, diminuindo o atrito interno e aquele com às paredes dos silos. A mistura de MAP é de bom escoamento por ser não-coesivo (ausência de umidade ou característica coesiva de outra natureza) e possuir granulometria na ordem de milímetro (não há presença de pó fino).

Dessa maneira, o atrito com as paredes do silo é, supostamente, baixo, assim como o atrito interno ao produto. Tais características facilitam o dimensionamento do silo no que se refere ao ângulo da moega de descarga.

Com a finalidade de evitar a formação de arcos de intertravamento e cegamento do bocal de saída, adotou-se um parâmetro mínimo de abertura da saída onde o diâmetro é em torno de 8 vezes o tamanho médio da partícula. Para tal, usou-se o diâmetro de Sauter mostrado na Tabela 5.2, com valor de 2,61 mm. Assim, o diâmetro mínimo é de 20,88 mm. O silo usado possuía abertura de 21,5 mm.

Jenike (1964) apresentou uma série de gráficos, entre eles o que pode ser visto na Figura 5.9, para cones simétricos com relação ao eixo definindo limites dos ângulos das moegas dentro dos quais ocorreria escoamento em massa, cujas variáveis que ajudam a determinar esses limites são (Carson, 2008):

- ϕ_w – Arco tangente do coeficiente de atrito por escorregamento entre os sólidos e o material da parede da moega. Esta variável é obtida somente através de testes de cisalhamentos como aquele já descrito na Seção 4.11.1 deste trabalho;
- Ângulo interno de atrito efetivo, δ ;
- Geometria da moega, i.e., cônica, trapezoidal.

Partindo-se para a determinação do ângulo da parede da moega, θ_c , necessário para que se garanta o escoamento em massa, é suficiente, a priori, conhecer o ângulo de atrito do material com a parede da moega ϕ_w . Como dito anteriormente, esta variável é somente obtida com testes

de cisalhamento. Na indisponibilidade de tal teste, pode-se adotar uma estratégia de direcionamento para determinação empírica.

A Figura 5.9 mostra o gráfico da relação do ângulo da parede do silo com o ângulo de atrito da parede com o material proposto por Jenike (1964) apresentando os locais de escoamento em massa e escoamento em funil, assim como uma região de incerteza que funciona como um fator de segurança. O silo em questão apresentava ângulo com a vertical de 69° , o que significa um ângulo θ_c de 21° . Sua representação na Figura 5.7 está em vermelho. Plotando este valor no gráfico da Figura 5.9, pode-se perceber os valores de ϕ_w para os quais haverá escoamento em massa no silo usado no experimento, ou seja, aqueles inferiores a 23° . Estes valores são meramente informativos, uma vez que testes de escoamento diretos podem avaliar se os parâmetros de construção são suficientes para que se garanta o escoamento em massa.

Para que se validasse, portanto, o uso do silo com tal inclinação, foram feitos 10 testes visuais de escoamento com a mistura de MAP. Durante os testes, observou-se sempre o padrão de escoamento em massa sem presença de “buraco de rato” ou arcos de intertravamento. Dessa forma, pôde-se concluir que as dimensões do silo escolhido não afetariam, de maneira significativa, a distribuição interna das partículas na mistura nem proporcionaria segregação prévia à formação da pilha.

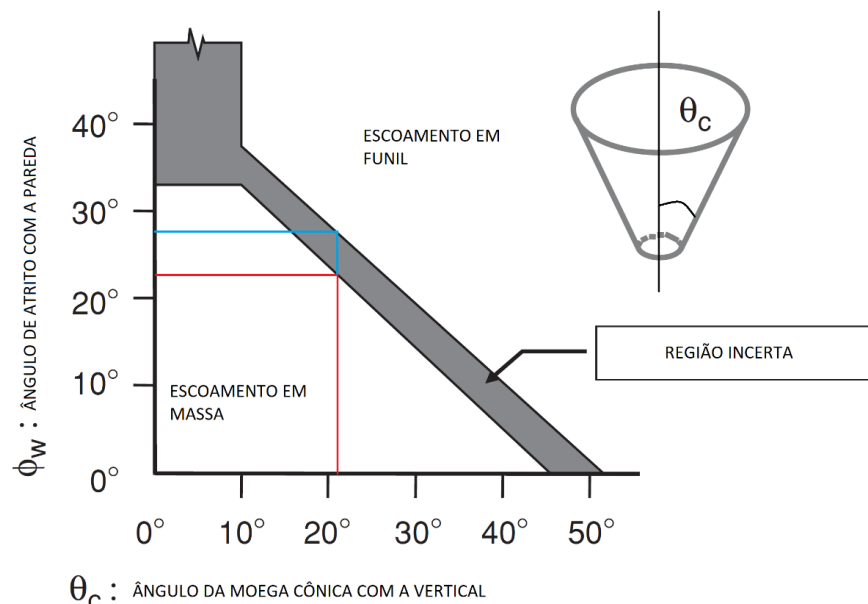


Figura 5.9 – Determinação do ângulo de inclinação da parede da moega de descarga do silo experimental – (adaptado de Rhodes, 2008)

Validada a escolha da moega de teste, parte-se para o planejamento do experimento de fato.

Os testes foram planejados para que houvesse despejamento da mistura das amostras A e B (a de tamanho médio de partícula 4,05 mm e a de tamanho médio de partícula de 1,93 mm) de MAP granulado misturadas a partir de um funil/silo com geometria escoamento em massa dentro da caixa de Hoffmeister inicialmente sem uso de qualquer técnica de manuseio, depois com uso do soprador de ar. Foram usados 250 g de MAP de cada amostra de partículas (diâmetros aproximados de 1,93 mm e 4,05 mm). A escolha dessa parte da metodologia se baseou no estudo de Hoffmeister (1964) e corroborado tanto no experimento de Da Silva (1997) quanto de Miresque e Pirad (2004). Foram planejados 5 experimentos para cada grupo.

Dois grupos seriam comparados, i) o grupo controle, em que é a pilha de MAP formada a partir da descarga de um silo escoamento em massa sem qualquer interferência, e ii) o grupo teste, em que é pilha de MAP formada a partir da descarga de um silo escoamento em massa com o uso da injeção de ar perpendicular à corrente de ar descendente.

Arbitrar-se-ia uma altura total de descarga de 300 mm a partir do ponto de descarga. Esta altura seria fixada ser usada em todos os experimentos para que não houvesse interferência desta variável no resultado da segregação. Esta altura significa que o silo estaria suspenso de 50 mm da caixa, espaço suficiente para o encaixe de quaisquer peças acessórias e para manuseio do experimento.

O primeiro conjunto de experimentos, aqueles sem qualquer aparato, tem seu esquema representado na Figura 5.10. Primeiramente, 250 g de cada uma das amostras (A e B) são separadas. Após isso, misturam-se as amostras A e B diretamente no silo de escoamento em massa colocando na horizontal e fechando a parte superior para que não haja vazamento de partículas. Esse procedimento seria adotado para que se evitasse segregação já no enchimento do silo, uma vez que, como foi visto na revisão bibliográfica deste trabalho, a segregação na descarga de silos é determinada majoritariamente pela distribuição do material durante seu prévio enchimento (*Engblon et al., 2012*). Evitando-se, portanto, a necessidade de transferência para silo após a mistura, acredita-se que a formação da pilha estará livre de qualquer segregação prévia.

Após a mistura das amostras A e B, o silo seria conectado na estrutura de descarga montada no experimento e uma guilhotina metálica removida da sua parte inferior para que houvesse alimentação do conteúdo à caixa de teste.

Após o completo descarregamento do silo e conseqüente formação da pilha cônica, as lâminas de aço galvanizado deveriam ser inseridas pelas aberturas da parede traseira da caixa de teste começando na região I até a região A (Figura 5.5). Depois, a caixa deveria ser disposta

horizontalmente de maneira a permitir a remoção da parede frontal em acrílico para então possibilitar a coleta do conteúdo de cada região (Figura 5.11).

O próximo passo seria colher o conteúdo de cada uma das regiões de A até I e separá-las em sacos plásticos perfazendo, portanto, 9 amostras por teste. Estas 9 amostras seriam nomeadas de maneira a facilitar a sua identificação via um número de identificação/código.

Por se tratar do experimento do grupo controle, este código se inicia com a letra C, seguida do número do experimento, seguido da letra que corresponde à região amostrada (de A até I) (Figura 5.12). Portanto, exemplificando, a amostra colhida da região A no primeiro teste do grupo controle foi nomeada de C1A. Ou ainda, a amostra da região G do quinto experimento do grupo controle foi nomeada de C5G. Assim, a soma dos experimentos do grupo controle geraria um número de 45 amostras totais.

As 45 amostras seriam enviadas para um laboratório de análises (Labfert, Uberaba – MG) para a obtenção das granulometrias e frações mássicas para conseqüente análise estatística dos dados e cálculo dos índices de segregação que serão mencionados mais adiante neste trabalho.

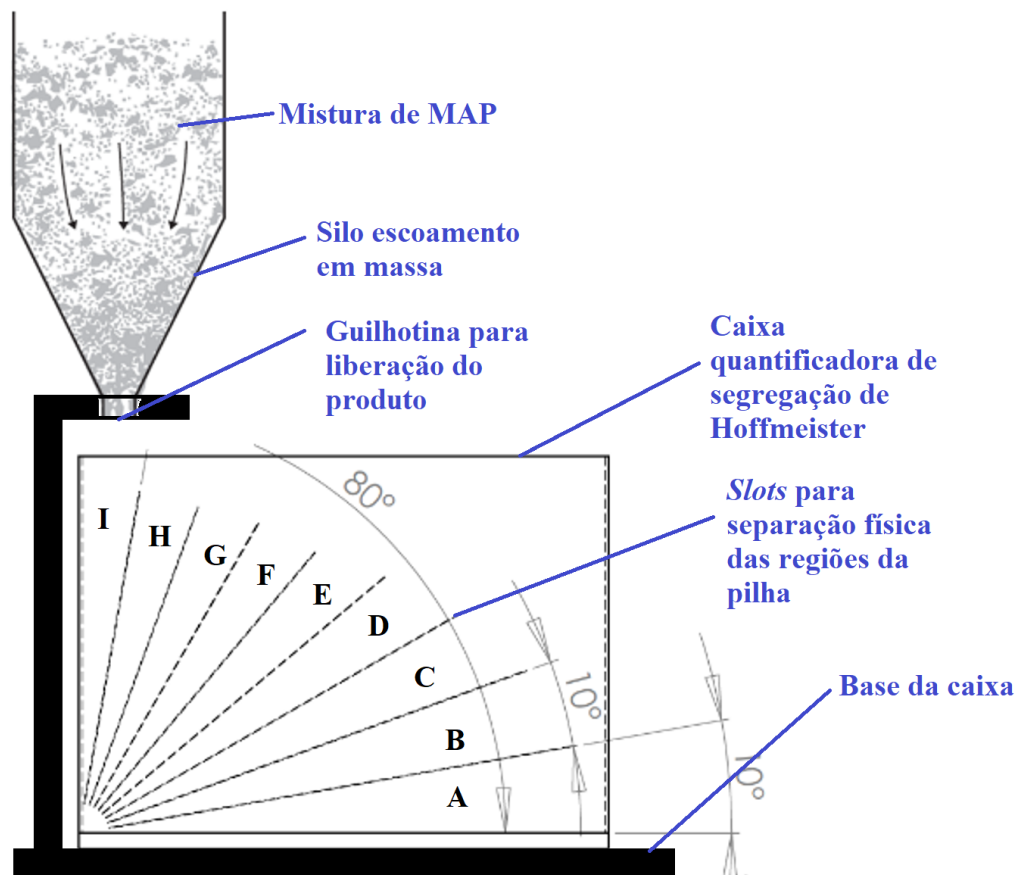


Figura 5.10 – Esquema do experimento do grupo controle (Figura do autor)



Figura 5.11 – Caixa deitada e com a tampa frontal removida para remoção das amostras de cada região

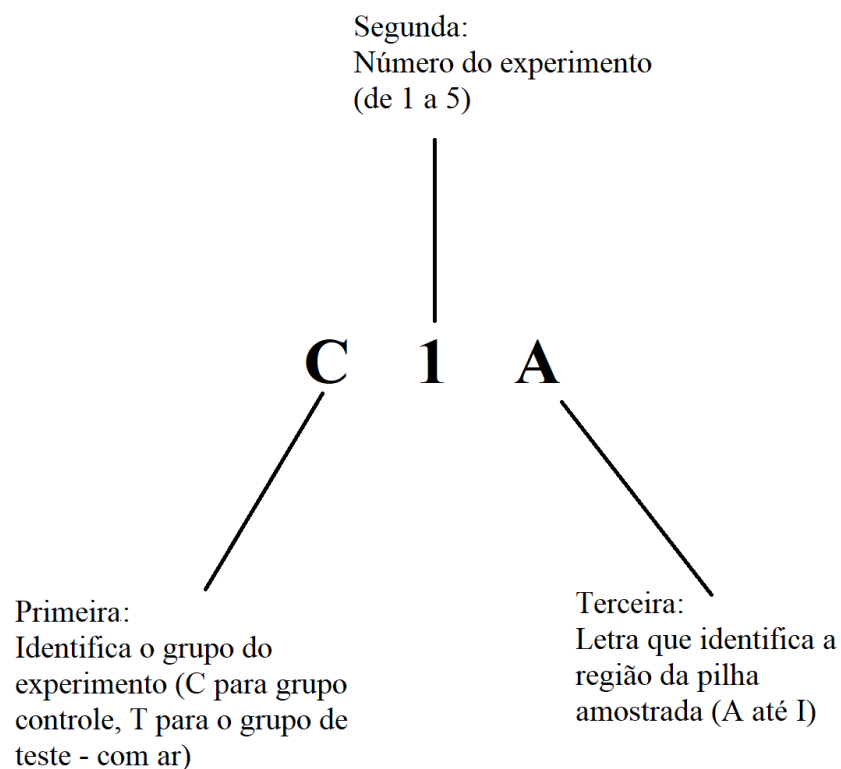


Figura 5.12 – Critério de codificação das amostras

O segundo experimento seria feito testando-se o uso do soprador de ar para deslocamento horizontal de partículas menores (Figura 5.13). Com esse deslocamento, espera-se uma alteração no padrão de formação da pilha possibilitando que parte das partículas mais finas ocupem uma posição diferente daquelas que ocuparia se a pilha se formasse livremente.

Como a tendência é o acúmulo destas no centro da pilha, deslocando-as horizontalmente para fora da corrente de material descendente, espera-se que ocupem posições mais afastadas do meio e, conseqüentemente, que a segregação seja menor se comparada àquela obtida no grupo controle.

A velocidade do ar é calculada de modo a ter a capacidade de deslocar somente as partículas da amostra B (no caso prático, parte delas), ou seja, as de diâmetro médio igual a 1,93 mm. O controle da velocidade do ar foi feito com uso de uma válvula mecânica para limitar a velocidade do soprador de ar. O detalhe do sistema de injeção de ar está na Figura 5.14.

O critério adotado para se estabelecer a velocidade do ar perpendicular a cortina de partículas foi inspirado na mecânica do separador gravitacional. Ora, se o objetivo da injeção de ar é separar as partículas menores do leito em escoamento descendente, o princípio do separador pode ser usado para se obter os parâmetros necessários para ajuste da velocidade do ar. A caixa produzida para quantificar a segregação funciona como o separador completo onde a região de deposição da pilha de material pode ser interpretada como a região das moegas de deposição das partículas com respeito ao seu tamanho (Figura 5.2).

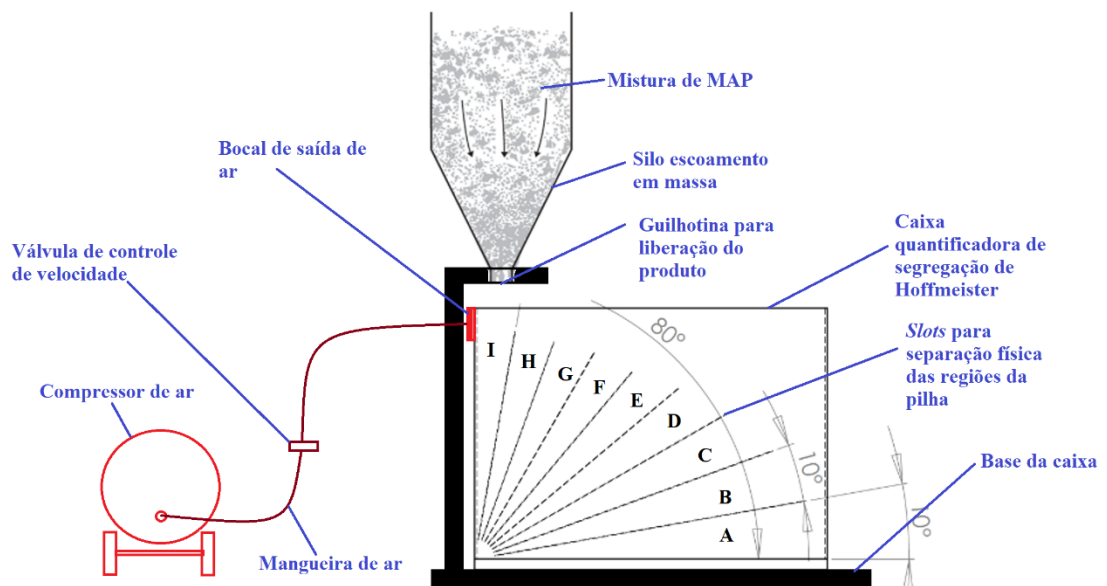


Figura 5.13 – Esquema do experimento com uso do soprador de ar (Figura do autor)

A Figura 5.15 mostra como é a interpretação da caixa quantificadora de segregação como um separador gravitacional. A região azul é a câmara com a injeção de ar com comprimento L (17 cm), largura b (5 cm) e altura a (13 cm). A câmara de sedimentação ao fundo tem comprimento L e altura h' (12 cm).

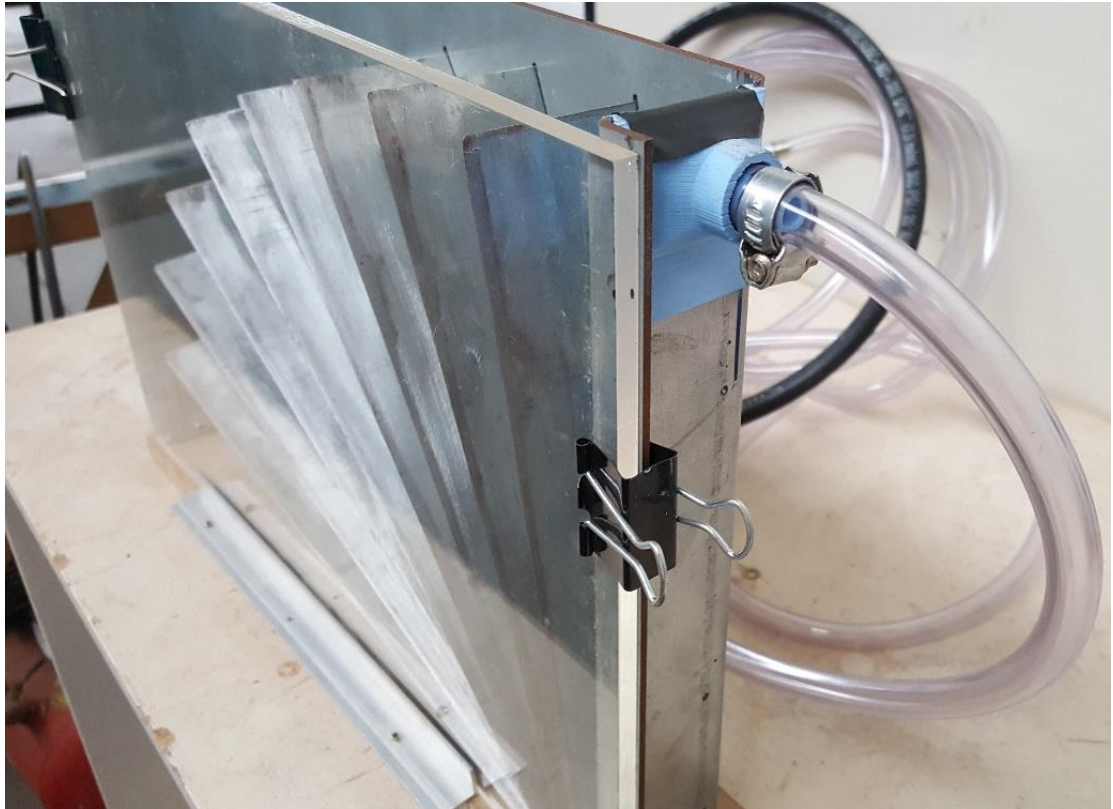


Figura 5.14 – Detalhe do sistema de injeção de ar (soprador)

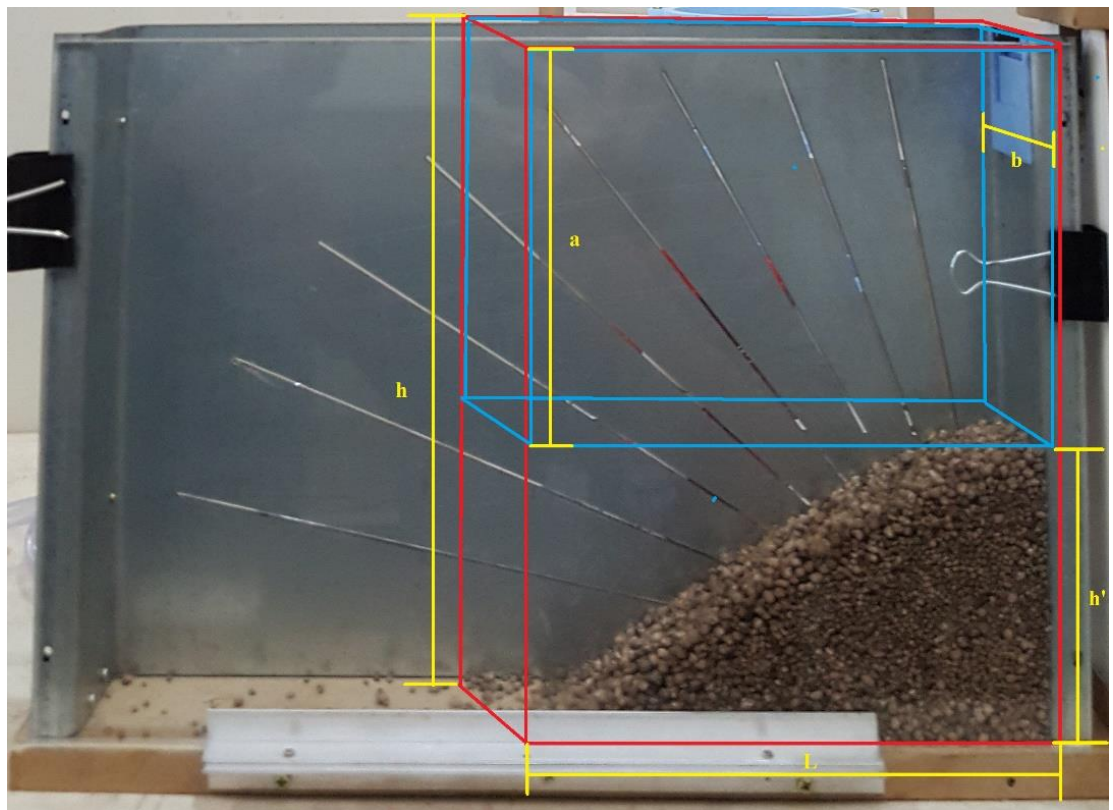


Figura 5.15 – Caixa quantificadora de segregação funcionando como um separador gravitacional

A corrente de ar deve ocorrer em escoamento cruzado (perpendicular) à cortina de partículas que se deslocam no sentido vertical na formação da pilha. A Figura 5.16 mostra um esquema simplificado do sistema da câmara de ar.

Esta abordagem considera uma única partícula, o que não corresponde ao escoamento em fase densa, porém, estabelece um limite inferior para servir de ponto de partida na seleção da velocidade de operação para escoamento do ar (Gordon e Peishakov, 1972).

Para uma câmara de altura a o tempo requerido para a partícula percorrer do topo ao fundo da câmara (v_t é a velocidade terminal das partículas):

$$t = a/v_t \quad (5.13)$$

sendo: L o comprimento da câmara e a velocidade do gás v_g , o tempo de residência do gás na câmara é:

$$t = L/v_g \quad (5.14)$$

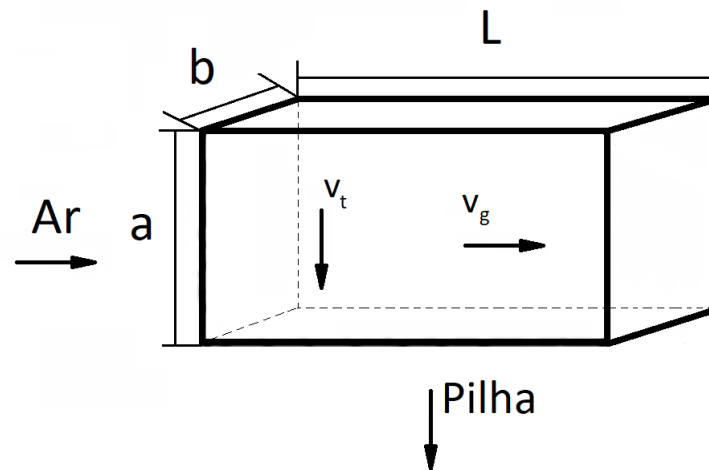


Figura 5.16 – Detalhes do sistema de injeção de ar para atuar na segregação.

Então, uma partícula, inicialmente localizada no topo da câmara será depositada se o tempo de queda não exceder o tempo de residência do gás na câmara, isto é:

$$a/v_t = L/v_g \quad (5.15)$$

Sendo Q_a a vazão do ar e b a largura da cortina de partículas, a velocidade horizontal média do ar no espaço de descarga de partículas é:

$$v_g = \frac{Q_a}{a.b} \quad (5.16)$$

Substituindo na Equação (5.5), tem-se:

$$L.b = \frac{Q_a}{v_t} = S \quad (5.17)$$

Para escoamento turbulento a velocidade terminal da partícula é expressa pela lei de Newton (*McCabe et al., 1993*).

$$v_t = 1,75 \cdot \left[\frac{g \cdot d_p \cdot (\rho_p - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{0,5} \quad (5.18)$$

Substituindo na Equação (5.17), tem-se:

$$Q_a = S \cdot 1,75 \cdot \left[\frac{g \cdot d_p \cdot (\rho_p - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{0,5} \quad (5.19)$$

As partículas de diâmetro médio de 1,93 mm são as que devem ser deslocadas para atenuar a segregação. A área transversal é de 85 cm² (b x L = 5 cm x 17 cm). A densidade aparente da partícula de MAP é 1,73 g/cm³ e a densidade do ar para a temperatura do experimento (27°C) e pressão de 90,4 kPa em Uberaba – MG no Brasil, é de 1,07 x 10⁻³ g/cm³. A aceleração da gravidade g é admitida como sendo 980 cm/s². Calcula-se a vazão de ar suprida pelo soprador:

$$Q_a = 85 \cdot 1,75 \cdot \left[\frac{980 \cdot 0,193 \cdot (1,73 - 0,00107)}{0,00107} \right]^{1/2} = 26.004,32 \text{ cm}^3/\text{s}$$

Como a área transversal ao escoamento de ar (b x a) é de 65 cm², pode-se usar a Equação (5.16) para determinar a velocidade do ar.

O valor encontrado é de 400,1 cm/s ou 4 m/s, e corresponde à velocidade de referência de arraste das partículas com a mesma velocidade do ar. Como o escoamento é em fase densa, a melhor condição de escoamento do ar para atenuação da segregação deve ser experimental, contudo a velocidade obtida consiste em um limite, possivelmente, inferior.

Com o uso de um anemômetro, calibrou-se a velocidade do ar encontrada teoricamente no ponto central do escoamento descendente das partículas liberadas a partir do silo com uso de uma válvula de controle de alívio de pressão.

Com esse ajuste pré-teste, far-se-ia o manuseio das partículas. O próximo passo seria fazer a mistura das amostras A e B da mesma maneira que planejado para o experimento com o grupo controle, seguindo os mesmos critérios já apresentados. A descarga do silo seria atuada de maneira idêntica à do experimento com o grupo controle.

Após o completo descarregamento do silo e conseqüente formação da pilha cônica, as lâminas de aço galvanizado seriam inseridas pelas aberturas da parede traseira da caixa de teste começando na região I até a região A (Figura 5.5). Depois, a caixa deveria ser disposta horizontalmente de maneira a permitir a remoção da parede frontal em acrílico para então remover o conteúdo de cada região.

O próximo passo seria colher o conteúdo das regiões A até I e separá-las em sacos plásticos perfazendo, portanto, 9 amostras por procedimento. Estas 9 amostras também deveriam ser nomeadas através de um número de identificação/código.

Como se trata do experimento do grupo teste, este código se inicia com a letra T, seguida do número do experimento, seguido da letra que corresponde à região amostrada (de A até I). Portanto, exemplificando, a amostra colhida da região A no primeiro procedimento com o grupo controle foi nomeada de T1A. Ou ainda, a amostra da região G do quinto experimento do grupo teste foi nomeada de T5G. Assim, a soma dos experimentos do grupo controle geraria um número de 45 amostras totais.

Essas 45 amostras também seriam enviadas para um laboratório de análises (Labfert, Uberaba – MG) para a obtenção das granulometrias e frações mássicas para conseqüente análise estatística dos dados e cálculo dos índices de segregação que serão mencionados mais adiante neste trabalho.

Em resumo, nos dois casos (controle e teste), as amostras de cada uma das regiões teriam seu conteúdo peneirado (série Tyler) de modo a separar as partículas de tamanho médio 1,93 mm das de 4,05 mm para se calcular as massas totais de cada amostra bem como as massas de cada grupo de partículas. Feito isso, partir-se-ia para a obtenção do índice de segregação que tem por objetivo calcular a homogeneidade da mistura como quociente das massas de cada segmento pela massa total da amostra daquele mesmo segmento, expresso em percentual:

$$I = \frac{|m_2 - m_4|}{m_2 + m_4} \times 100 \quad (5.20)$$

Onde:

m_2 é a massa total das partículas de 1,93 mm de diâmetro médio e m_4 é a massa total das partículas de 4,05 mm de diâmetro médio. A soma dos termos dá a massa total da amostra.

Além desse índice de segregação expresso na Equação (5.21), é possível saber o índice de segregação da própria pilha, que é dado pela média aritmética dos índices de segregação de cada um dos segmentos (de A até I).

$$Ip = \frac{\sum_i^k I_i}{k} \quad (5.21)$$

Onde:

Ip é o índice de segregação da pilha, I é o índice de segregação de cada segmento e k é o número de segmentos.

Por fim, pode-se obter também o índice global de segregação da pilha como mostra a Equação (5.22).

$$IGP = \frac{\sum_i^S Ip_i}{S_r} \quad (5.22)$$

Onde:

IGP é o índice global de segregação da pilha, Ip é o índice de segregação da pilha e S_r é o número de repetições.

Após os experimentos e análises feitos, os resultados seriam elencados em tabelas de frações mássicas por região de pilha e também tabelas com os índices de segregação. Seria feita uma comparação dos resultados do grupo controle e do grupo teste para verificação da efetividade ou não, do uso do soprador de ar para atenuação da segregação na formação de pilhas cônicas.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A primeira observação importante se refere ao padrão de escoamento do silo, realmente houve padrão de escoamento em massa. Percebeu-se também uma dificuldade em calibrar a velocidade do soprador uma vez que ocorreram variações de pressão no compressor. Essas variações não foram significativas. Como o experimento foi feito em janeiro, a umidade relativa do ar estava elevada o suficiente para que o compressor acumulasse uma quantidade pequena água nas tubulações. O MAP é solúvel em água mas isso não alterou a granulometria.

Durante o processo de coleta das amostras das regiões da pilha, percebeu-se que uma parcela mínima de produto não podia ser colhida em nenhuma das 9 regiões angulares e permanecia na parte mais interna da pilha (Figura 6.1). A partir dessa observação, decidiu-se por adicionar ao conjunto de regiões propostas por Hoffmeister, uma décima, que foi chamada de região Z. Da mesma maneira como foi feita para as nove demais regiões, o conteúdo da região Z foi separado. A quantidade total de amostras, portanto, subiu de 45 para cada grupo para 50. A análise granulométrica das 100 amostras (50 para os experimentos do grupo controle e 50 para os experimentos do grupo teste) foi feita na empresa Labfert, localizada em Uberaba – MG, usando-se as mesmas peneiras utilizadas para a seleção das partículas que compuseram as amostras iniciais A e B que, mais tarde, foram usadas para compor a mistura.

Os resultados das frações mássicas estão apresentados nas Tabelas 6.1 a 6.10 e mostram a massa de partícula retida em cada uma das peneiras 4, 6, 8, 12 e fundo para cada região da pilha de A até I e com a adição da região Z, seguindo o padrão de nomenclatura proposto na metodologia conforme Figura 5.12.



Figura 6.1 – Região Z de amostragem

Tabela 6.1 – Análise granulométrica das amostras das regiões da pilha do experimento 1 do grupo controle

MASSA RETIDA						
NA PENEIRA (g)						
AMOSTRA	#4	#6	#8	#12	FUNDO	TOTAL (g)
C1A	0,00	77,14	13,99	44,10	1,25	136,48
C1B	0,00	26,20	5,10	33,14	0,81	65,25
C1C	0,00	14,51	4,92	31,50	1,20	52,13
C1D	0,00	13,44	3,35	25,38	1,00	43,17
C1E	0,00	11,24	4,62	21,56	0,98	38,40
C1F	0,00	11,32	2,73	16,83	0,65	31,53
C1G	0,00	12,36	3,39	16,30	0,58	32,63
C1H	0,00	15,61	3,24	15,25	0,48	34,58
C1I	0,00	19,16	5,15	24,00	0,87	49,18
C1Z	0,00	6,81	1,88	7,06	0,36	16,11
TOTAL	0,00	207,79	48,37	235,12	8,18	499,46
%	0,00%	41,60%	9,68%	47,07%	1,64%	100,00%

Tabela 6.2 – Análise granulométrica das amostras das regiões da pilha do experimento 2 do grupo controle

MASSA RETIDA						
NA PENEIRA (g)						
AMOSTRA	#4	#6	#8	#12	FUNDO	TOTAL (g)
C2A	0,00	75,53	12,99	43,68	2,10	134,30
C2B	0,00	30,61	3,86	32,49	1,49	68,45
C2C	0,14	19,60	4,05	33,04	1,62	58,45
C2D	0,00	12,94	3,78	25,00	1,30	43,02
C2E	0,00	11,61	3,70	21,08	1,17	37,56
C2F	0,00	11,74	3,82	20,09	0,82	36,47
C2G	0,12	11,49	0,97	17,71	0,08	30,37
C2H	0,00	13,52	3,35	13,71	0,06	30,64
C2I	0,00	16,70	4,27	18,19	0,05	39,21
C2Z	0,00	8,73	2,33	5,70	0,08	16,84
TOTAL	0,26	212,47	43,12	230,69	8,77	495,31
%	0,05%	42,90%	8,71%	46,57%	1,77%	100,00%

Tabela 6.3 – Análise granulométrica das amostras das regiões da pilha do experimento 3 do grupo controle

MASSA RETIDA						
NA PENEIRA (g)						
AMOSTRA	#4	#6	#8	#12	FUNDO	TOTAL (g)
C3A	0,00	76,07	11,87	47,51	0,18	135,63
C3B	0,00	24,27	7,01	35,15	0,13	66,56
C3C	0,00	15,88	4,08	29,06	0,13	49,15
C3D	0,00	14,17	3,39	27,49	0,14	45,19
C3E	0,00	14,19	2,86	24,34	0,14	41,53
C3F	0,00	14,64	2,59	22,41	0,12	39,76
C3G	0,00	12,32	3,66	19,36	0,10	35,44
C3H	0,00	13,83	4,57	14,23	0,09	32,72
C3I	0,00	16,41	5,29	18,50	0,07	40,27
C3Z	0,00	5,27	1,43	6,88	0,06	13,64
TOTAL	0,00	207,05	46,75	244,93	1,16	499,89
%	0,00%	41,42%	9,35%	49,00%	0,23%	100,00%

Tabela 6.4 – Análise granulométrica das amostras das regiões da pilha do experimento 4 do grupo controle

MASSA RETIDA						
NA PENEIRA (g)						
AMOSTRA	#4	#6	#8	#12	FUNDO	TOTAL (g)
C4A	0,00	70,13	21,63	44,54	0,23	136,53
C4B	0,00	26,68	5,98	32,67	0,08	65,41
C4C	0,00	15,69	7,11	33,97	0,11	56,88
C4D	0,00	13,32	2,81	27,38	0,17	43,68
C4E	0,00	9,66	3,19	22,95	0,10	35,90
C4F	0,00	11,34	2,47	18,17	0,10	32,08
C4G	0,00	15,69	3,59	19,41	0,06	38,75
C4H	0,00	11,99	2,38	16,12	0,06	30,55
C4I	0,00	16,97	3,98	21,87	0,10	42,92
C4Z	0,00	7,09	1,39	8,17	0,06	16,71
TOTAL	0,00	198,56	54,53	245,25	1,07	499,41
%	0,00%	39,76%	10,92%	49,11%	0,21%	100,00%

Tabela 6.5 – Análise granulométrica das amostras das regiões da pilha do experimento 5 do grupo controle

MASSA RETIDA						
NA PENEIRA (g)						
AMOSTRA	#4	#6	#8	#12	FUNDO	TOTAL (g)
C5A	0,00	77,91	11,04	44,41	0,15	133,51
C5B	0,00	13,93	3,42	26,73	0,08	44,16
C5C	0,00	29,69	5,83	33,07	0,08	68,67
C5D	0,00	15,31	3,64	26,03	0,08	45,06
C5E	0,00	12,83	3,20	23,65	0,07	39,75
C5F	0,00	12,12	2,74	19,74	0,07	34,67
C5G	0,00	14,50	3,56	19,13	0,08	37,27
C5H	0,00	14,45	3,06	18,83	0,04	36,38
C5I	0,00	17,85	3,23	23,13	0,05	44,26
C5Z	0,00	3,00	0,39	9,30	0,05	12,74
TOTAL	0,00	211,59	40,11	244,02	0,75	496,47
%	0,00%	42,62%	8,08%	49,15%	0,15%	100,00%

Tabela 6.6 – Análise granulométrica das amostras das regiões da pilha do experimento 1 do grupo teste

MASSA RETIDA						
NA PENEIRA (g)						
AMOSTRA	#4	#6	#8	#12	FUNDO	TOTAL (g)
T1A	0,00	63,04	13,61	63,77	0,29	140,71
T1B	0,00	24,87	8,23	40,00	0,20	73,30
T1C	0,00	18,27	3,47	33,07	0,16	54,97
T1D	0,00	17,44	3,03	26,60	0,09	47,16
T1E	0,00	13,86	2,30	16,98	0,07	33,21
T1F	0,00	13,63	2,99	14,70	0,08	31,40
T1G	0,00	14,61	3,80	13,91	0,05	32,37
T1H	0,00	17,67	4,72	14,46	0,06	36,91
T1I	0,00	18,88	4,05	14,77	0,01	37,71
T1Z	0,00	5,03	1,09	6,00	0,06	12,18
TOTAL	0,00	207,30	47,29	244,26	1,07	499,92
%	0,00%	41,47%	9,46%	48,86%	0,21%	100,00%

Tabela 6.7 – Análise granulométrica das amostras das regiões da pilha do experimento 2 do grupo teste

MASSA RETIDA						
NA PENEIRA (g)						
AMOSTRA	#4	#6	#8	#12	FUNDO	TOTAL (g)
T2A	0,00	55,26	17,88	59,10	0,21	132,45
T2B	0,00	23,71	6,60	32,52	0,13	62,96
T2C	0,00	19,18	5,13	32,61	0,09	57,01
T2D	0,00	16,89	4,48	30,17	0,15	51,69
T2E	0,00	15,04	3,62	21,13	0,09	39,88
T2F	0,00	13,40	4,92	16,27	0,05	34,64
T2G	0,00	15,60	3,97	15,80	0,06	35,43
T2H	0,00	15,09	4,10	13,01	0,01	32,21
T2I	0,00	19,35	4,66	20,48	0,06	44,55
T2Z	0,00	3,09	0,90	5,49	0,04	9,52
TOTAL	0,00	196,61	56,26	246,58	0,89	500,34
%	0,00%	39,30%	11,24%	49,28%	0,18%	100,00%

Tabela 6.8 – Análise granulométrica das amostras das regiões da pilha do experimento 3 do grupo teste

MASSA RETIDA						
NA PENEIRA (g)						
AMOSTRA	#4	#6	#8	#12	FUNDO	TOTAL (g)
T3A	0,00	53,48	13,58	63,74	0,18	130,98
T3B	0,00	25,51	6,44	40,54	0,07	72,56
T3C	0,00	14,31	4,79	30,03	0,10	49,23
T3D	0,00	15,40	3,77	25,65	0,12	44,94
T3E	0,00	16,84	3,62	20,78	0,10	41,34
T3F	0,00	16,06	4,33	16,31	0,07	36,77
T3G	0,00	16,25	4,00	13,76	0,00	34,01
T3H	0,00	16,19	3,67	11,36	0,04	31,26
T3I	0,00	23,19	6,23	19,34	0,03	48,79
T3Z	0,00	4,74	0,64	4,04	0,00	9,42
TOTAL	0,00	201,97	51,07	245,55	0,71	499,30
%	0,00%	40,45%	10,23%	49,18%	0,14%	100,00%

Tabela 6.9 – Análise granulométrica das amostras das regiões da pilha do experimento 4 do grupo teste

MASSA RETIDA						
NA PENEIRA (g)						
AMOSTRA	#4	#6	#8	#12	FUNDO	TOTAL (g)
T4A	0,12	59,68	13,75	64,56	0,34	138,45
T4B	0,00	25,03	5,50	35,82	0,13	66,48
T4C	0,00	17,26	4,14	34,15	0,16	55,71
T4D	0,00	17,09	2,66	26,33	0,14	46,22
T4E	0,00	19,25	4,35	23,21	0,11	46,92
T4F	0,00	17,64	3,38	17,37	0,07	38,46
T4G	0,00	18,34	2,58	12,80	0,08	33,80
T4H	0,00	15,91	3,50	10,21	0,06	29,68
T4I	0,00	15,76	3,50	12,70	0,08	32,04
T4Z	0,00	5,28	0,96	6,17	0,00	12,41
TOTAL	0,12	211,24	44,32	243,32	1,17	500,17
%	0,02%	42,23%	8,86%	48,65%	0,23%	100,00%

Tabela 6.10 – Análise granulométrica das amostras das regiões da pilha do experimento 5 do grupo teste

MASSA RETIDA						
NA PENEIRA (g)						
AMOSTRA	#4	#6	#8	#12	FUNDO	TOTAL (g)
T5A	0,00	65,51	8,77	57,68	0,18	132,14
T5B	0,00	26,05	6,21	38,80	0,14	71,20
T5C	0,00	18,50	3,82	35,90	0,10	58,32
T5D	0,00	14,70	3,89	25,92	0,15	44,66
T5E	0,00	13,97	2,80	21,07	0,10	37,94
T5F	0,00	13,49	2,79	13,69	0,10	30,07
T5G	0,00	18,02	3,08	16,38	0,09	37,57
T5H	0,00	18,99	3,09	12,40	0,08	34,56
T5I	0,00	24,03	3,45	17,88	0,07	45,43
T5Z	0,00	5,04	0,93	5,11	0,05	11,13
TOTAL	0,00	218,30	38,83	244,83	1,06	503,02
%	0,00%	43,40%	7,72%	48,67%	0,21%	100,00%

Percebeu-se, após as análises, que uma pequena parcela da massa total ficou retida nas malhas 4, 8 e na peneira de fundo, o que não havia ocorrido na fase de seleção das partículas para composição das amostras A e B da mistura. Essa quantidade não se mostrou significativa.

Tal situação encontra possível explicação i) no fato de mesmas partículas possuírem diâmetros variados em diferentes direções de medição, o que faria com que a cada peneiramento, um resultado fosse encontrado, ii) na relativa friabilidade das próprias partículas de MAP que, durante o manuseio podem ter diminuído de tamanho (a exemplo da própria característica de operação da caixa de quantificação de segregação quando da inserção das lâminas nos *slots* que pressionam um grupo de partículas contra a parede de acrílico fazendo com que elas se fragmentem) e iii) na própria característica de peneiramento das amostras.

Já que o trabalho visa quantificar a segregação de uma mistura binária, com partículas de 2 diâmetros médios \bar{D}_A e \bar{D}_B , fez-se necessário elaborar uma estratégia de correção da análise para que se obtivesse resultados granulométricos com as massas retidas somente nas malhas 6 e 12.

A sistemática adotada baseou-se na informação prévia de que 50% da massa total pertencia ao grupo de partículas retidas na malha 6 e 50% retida na malha 12. Dessa maneira, as massas retidas na malha 4 foram adicionadas às massas retidas na malha 6, as massas retidas no fundo foram adicionadas às massas retidas na malha 12 e as massas retidas na malha 8 foram distribuídas às malhas 6 e 12 de modo a complementar proporcionalmente a massa total restante de modo que cada fração da amostra tivesse 50% da massa total da mistura conforme explicado na metodologia. As Tabelas 6.11 até 6.20 mostram os resultados das análises granulométricas ajustadas já com a nomenclatura proposta na metodologia onde m_2 se refere à massa das partículas de tamanho médio 1,93 mm – pertencentes à amostra A, e m_4 se refere à massa das partículas de tamanho médio 4,05 mm – pertencentes à amostra B.

Tabela 6.11 – Análise granulométrica ajustada com as frações mássicas de m_2 e m_4 das amostras das regiões da pilha do experimento 1 do grupo controle

AMOSTRA	m_4 (g)	m_2 (g)	TOTAL (g)
C1A	89,27	47,21	136,48
C1B	30,62	34,63	65,25
C1C	18,78	33,35	52,13
C1D	16,34	26,83	43,17
C1E	15,25	23,15	38,40
C1F	13,69	17,84	31,53

C1G	15,30	17,33	32,63
C1H	18,42	16,16	34,58
C1I	23,63	25,55	49,18
C1Z	8,44	7,67	16,11
TOTAL	249,73	249,73	499,46

Tabela 6.12 – Análise granulométrica ajustada com as frações mássicas de m_2 e m_4 das amostras das regiões da pilha do experimento 2 do grupo controle

AMOSTRA	m_4 (g)	m_2 (g)	TOTAL (g)
C2A	86,05	48,25	134,30
C2B	33,74	34,71	68,45
C2C	23,02	35,43	58,45
C2D	16,00	27,02	43,02
C2E	14,61	22,95	37,56
C2F	14,83	21,64	36,47
C2G	12,40	17,97	30,37
C2H	16,23	14,41	30,64
C2I	20,16	19,05	39,21
C2Z	10,62	6,22	16,84
TOTAL	247,66	247,65	495,31

Tabela 6.13 – Análise granulométrica ajustada com as frações mássicas de m_2 e m_4 das amostras das regiões da pilha do experimento 3 do grupo controle

AMOSTRA	m_4 (g)	m_2 (g)	TOTAL (g)
C3A	86,96	48,67	135,63
C3B	30,70	35,86	66,56
C3C	19,62	29,53	49,15
C3D	17,28	27,91	45,19
C3E	16,81	24,72	41,53
C3F	17,02	22,74	39,76
C3G	15,68	19,76	35,44
C3H	18,02	14,70	32,72
C3I	21,26	19,01	40,27
C3Z	6,58	7,06	13,64
TOTAL	249,94	249,95	499,89

Tabela 6.14 – Análise granulométrica ajustada com as frações mássicas de m_2 e m_4 das amostras das regiões da pilha do experimento 4 do grupo controle

AMOSTRA	m_4 (g)	m_2 (g)	TOTAL (g)
C4A	90,42	46,11	136,53
C4B	32,29	33,12	65,41
C4C	22,36	34,52	56,88
C4D	15,96	27,72	43,68
C4E	12,65	23,25	35,90
C4F	13,66	18,42	32,08
C4G	19,06	19,69	38,75
C4H	14,22	16,33	30,55
C4I	20,70	22,22	42,92
C4Z	8,39	8,32	16,71
TOTAL	249,70	249,71	499,41

Tabela 6.15 – Análise granulométrica ajustada com as frações mássicas de m_2 e m_4 das amostras das regiões da pilha do experimento 5 do grupo controle

AMOSTRA	m_4 (g)	m_2 (g)	TOTAL (g)
C5A	88,00	45,51	133,51
C5B	17,05	27,11	44,16
C5C	35,02	33,65	68,67
C5D	18,64	26,42	45,06
C5E	15,75	24,00	39,75
C5F	14,62	20,05	34,67
C5G	17,75	19,52	37,27
C5H	17,25	19,13	36,38
C5I	20,80	23,46	44,26
C5Z	3,36	9,38	12,74
TOTAL	248,24	248,23	496,47

Tabela 6.16 – Análise granulométrica ajustada com as frações mássicas de m_2 e m_4 das amostras das regiões da pilha do experimento 1 do grupo teste

AMOSTRA	m_4 (g)	m_2 (g)	TOTAL (g)
T1A	75,32	65,39	140,71
T1B	32,29	41,01	73,30

T1C	21,40	33,57	54,97
T1D	20,17	26,99	47,16
T1E	15,93	17,28	33,21
T1F	16,33	15,07	31,40
T1G	18,04	14,33	32,37
T1H	21,93	14,98	36,91
T1I	22,53	15,18	37,71
T1Z	6,01	6,17	12,18
TOTAL	249,96	249,96	499,92

Tabela 6.17 – Análise granulométrica ajustada com as frações mássicas de m_2 e m_4 das amostras das regiões da pilha do experimento 2 do grupo teste

AMOSTRA	m_4 (g)	m_2 (g)	TOTAL (g)
T2A	72,28	60,17	132,45
T2B	29,99	32,97	62,96
T2C	24,06	32,95	57,01
T2D	21,16	30,53	51,69
T2E	18,49	21,39	39,88
T2F	18,08	16,56	34,64
T2G	19,38	16,05	35,43
T2H	18,99	13,22	32,21
T2I	23,79	20,76	44,55
T2Z	3,95	5,57	9,52
TOTAL	250,17	250,17	500,34

Tabela 6.18 – Análise granulométrica ajustada com as frações mássicas de m_2 e m_4 das amostras das regiões da pilha do experimento 3 do grupo teste

AMOSTRA	m_4 (g)	m_2 (g)	TOTAL (g)
T3A	66,16	64,82	130,98
T3B	31,52	41,04	72,56
T3C	18,78	30,45	49,23
T3D	18,92	26,02	44,94
T3E	20,22	21,12	41,34
T3F	20,10	16,67	36,77
T3G	19,98	14,03	34,01

T3H	19,62	11,64	31,26
T3I	29,01	19,78	48,79
T3Z	5,34	4,08	9,42
	249,65	249,65	499,30

Tabela 6.19 – Análise granulométrica ajustada com as frações mássicas de m_2 e m_4 das amostras das regiões da pilha do experimento 4 do grupo teste

AMOSTRA	m_4 (g)	m_2 (g)	TOTAL (g)
T4A	71,81	66,64	138,45
T4B	29,84	36,64	66,48
T4C	20,88	34,83	55,71
T4D	19,41	26,81	46,22
T4E	23,05	23,87	46,92
T4F	20,59	17,87	38,46
T4G	20,59	13,21	33,80
T4H	18,97	10,71	29,68
T4I	18,82	13,22	32,04
T4Z	6,12	6,29	12,41
	250,08	250,09	500,17

Tabela 6.20 – Análise granulométrica ajustada com as frações mássicas de m_2 e m_4 das amostras das regiões da pilha do experimento 5 do grupo teste

AMOSTRA	m_4 (g)	m_2 (g)	TOTAL (g)
T5A	73,01	59,13	132,14
T5B	31,36	39,84	71,20
T5C	21,77	36,55	58,32
T5D	18,03	26,63	44,66
T5E	16,36	21,58	37,94
T5F	15,88	14,19	30,07
T5G	20,65	16,92	37,57
T5H	21,63	12,93	34,56
T5I	26,98	18,45	45,43
T5Z	5,84	5,29	11,13
TOTAL	251,51	251,51	503,02

De posse dos dados apresentados nas Tabelas 6.11 a 6.20, pode-se calcular as massas médias \bar{m}_2 e \bar{m}_4 e desvios padrão (σ) de cada região de amostragem tanto para o grupo controle (Tabela 6.21) quanto para o grupo teste (Tabela 6.22).

Tabela 6.21 – Massas médias \bar{m}_2 e \bar{m}_4 e desvios padrão (σ) de cada região de amostragem dos experimentos do grupo controle

Região	\bar{m}_4 (g)	σ	\bar{m}_2 (g)	σ
A	88,14	1,75	47,15	1,35
B	28,88	6,73	33,09	3,48
C	23,76	6,54	33,30	2,26
D	16,84	1,13	27,18	0,62
E	15,01	1,55	23,61	0,73
F	14,76	1,37	20,14	2,08
G	16,04	2,55	18,86	1,12
H	16,83	1,68	16,15	1,88
I	21,31	1,35	21,86	2,84
Z	7,48	2,71	7,73	1,20

Tabela 6.22 – Massas médias \bar{m}_2 e \bar{m}_4 e desvios padrão (σ) de cada região de amostragem dos experimentos do grupo teste

Região	\bar{m}_4 (g)	σ	\bar{m}_2 (g)	σ
A	71,72	3,39	63,23	3,35
B	31,00	1,05	38,30	3,48
C	21,38	1,89	33,67	2,27
D	19,54	1,19	27,40	1,79
E	18,81	2,93	21,05	2,38
F	18,20	2,14	16,07	1,44
G	19,73	1,08	14,91	1,53
H	20,23	1,44	12,70	1,63
I	24,23	3,96	17,48	3,18
Z	5,45	0,89	5,48	0,88

Os índices de segregação de cada região foram calculados conforme a Equação 5.12 para cada experimento de cada grupo e são apresentados, em valores percentuais, na Tabela 6.23 e 6.24, assim como suas médias e desvio padrão.

Tabela 6.23 – Índices de segregação I das regiões de amostra da pilha dos experimentos do grupo teste com média e desvio padrão

ÍNDICES DE SEGREGAÇÃO DAS REGIÕES DO GRUPO TESTE							
EXPERIMENTO	1	2	3	4	5	MÉDIA	σ
REGIÃO							
A	7,05%	9,15%	1,02%	3,74%	10,51%	6,29%	3,90%
B	11,88%	4,72%	13,11%	10,24%	11,91%	10,37%	3,32%
C	22,14%	15,58%	23,70%	25,05%	25,35%	22,36%	4,00%
D	14,45%	18,15%	15,80%	15,99%	19,27%	16,73%	1,94%
E	4,04%	7,29%	2,18%	1,74%	13,73%	5,80%	4,95%
F	4,00%	4,41%	9,34%	7,09%	5,59%	6,09%	2,18%
G	11,45%	9,40%	17,52%	21,86%	9,95%	14,04%	5,44%
H	18,82%	17,93%	25,50%	27,82%	25,19%	23,05%	4,40%
I	19,51%	6,79%	18,90%	17,47%	18,78%	16,29%	5,36%
Z	1,26%	17,08%	13,32%	1,39%	4,86%	7,58%	7,23%

Tabela 6.24 – Índices de segregação I das regiões de amostra da pilha dos experimentos do grupo controle com média e desvio padrão

ÍNDICES DE SEGREGAÇÃO DAS REGIÕES GRUPO CONTROLE							
EXPERIMENTO	1	2	3	4	5	MÉDIA	σ
REGIÃO							
A	30,82%	28,15%	28,23%	32,45%	31,82%	30,29%	2,01%
B	6,14%	1,43%	7,75%	1,27%	22,76%	7,87%	8,80%
C	27,96%	21,23%	20,15%	21,38%	1,98%	18,54%	9,76%
D	24,28%	25,61%	23,52%	26,94%	17,29%	23,53%	3,73%
E	20,59%	22,22%	19,03%	29,52%	20,74%	22,42%	4,13%
F	13,18%	18,65%	14,40%	14,86%	15,64%	15,35%	2,05%
G	6,23%	18,37%	11,52%	1,64%	4,74%	8,50%	6,58%
H	6,53%	5,96%	10,17%	6,89%	5,19%	6,95%	1,91%
I	3,92%	2,82%	5,61%	3,53%	6,01%	4,38%	1,37%
Z	4,78%	26,09%	3,49%	0,46%	47,31%	16,43%	20,03%

Após os cálculos dos índices de segregação de cada região da pilha, é possível calcular o índice de segregação da própria pilha inteira (I_p) que é dado pela média aritmética dos índices de segregação de cada região, conforme Equação 5.11. Estes resultados são apresentados pelas Tabelas 6.25 e 6.26.

Tabela 6.25 – Índices de segregação I_p das pilhas dos experimentos do grupo teste com média e desvio padrão

ÍNDICES DE SEGREGAÇÃO DA PILHA DO GRUPO TESTE							
EXPERIMENTO	1	2	3	4	5	MÉDIA	σ
I_p	11,46%	11,05%	14,04%	13,24%	14,51%	12,86%	1,54%

Tabela 6.26 – Índices de segregação I_p das pilhas dos experimentos do grupo controle com média e desvio padrão

ÍNDICES DE SEGREGAÇÃO DA PILHA DO GRUPO CONTROLE							
EXPERIMENTO	1	2	3	4	5	MÉDIA	σ
I_p	14,44%	17,05%	14,39%	13,89%	17,35%	15,43%	1,64%

De posse dos valores do I_p de cada experimento, parte-se para o cálculo do índice de segregação global da pilha IGP que é dado pela média aritmética dos índices I_p de cada grupo de experimentos.

Ambos os valores de IGP estão presentes na Tabela 6.27.

Tabela 6.27 – Índices de segregação global da pilha IGP dos experimentos do grupo controle e do grupo teste

IGP	
GRUPO TESTE	12,86%
GRUPO CONTROLE	15,43%

6.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A SEGREGAÇÃO DA PILHA

Com relação à segregação, comparando-se os valores da Tabela 6.27 referentes ao grupo controle e ao grupo teste, percebe-se que o grupo controle apresentou um índice de segregação 16,63% menor que aquele apresentado pelo grupo teste.

Se a região Z for desconsiderada, ainda assim há melhora no índice de segregação na comparação dos dois grupos (13,45% contra 15,31%) de 12,19%.

Visualmente, é possível notar melhora na mistura das partículas, principalmente nas regiões da pilha que concentram maior massa total, como é o caso da região A.

A Figura 6.2 apresenta a comparação de duas amostras da região A, uma de um experimento do grupo teste e outra de um experimento do grupo controle. É possível notar claramente uma presença mais heterogênea de partículas dos dois diâmetros médios (1,93 mm e 4,05 mm) na amostra do grupo teste. Ora, o índice de segregação calculado conforme metodologia não prestigia a contribuição para o índice total de segregação da pilha das regiões com mais massa presente em relação àquelas que possuem menor massa. É intuitivo pensar que quanto maior a quantidade de partículas, maior será a chance de acontecer segregação por percolação, um tipo muito comum durante a formação da pilha. Desta maneira, uma outra forma de se interpretar os resultados é apresentada.

De posse destes dados, pode-se atribuir “pesos” diferentes aos índices de segregação de cada região da pilha de acordo com a proporção da massa total da região com a massa total da pilha. Este “peso” foi chamado de “Contribuição para a Massa Total” ou CMT.

A Tabela 6.28 mostra a média das massas totais encontradas em cada região da pilha para cada grupo de experimentos com a contribuição para a massa total de cada região, que serve de parâmetro também da contribuição do índice de segregação de cada uma das regiões para o índice de segregação total da pilha. Em outras palavras, ao invés de obter o índice de segregação da pilha através da média aritmética da soma dos índices de cada região, agora este índice é calculado pela soma dos índices de segregação das regiões prestigiando-se a massa.

Um exemplo prático pode ser o caso da região A dos experimentos do grupo controle. A massa média total das regiões A é 135,29 gramas, o que representa uma fração (ou CMT) de 0,27 a massa média total das pilhas do grupo controle que é de 498,11 gramas. Conseqüentemente, o índice de segregação médio dessa região corresponderá a 27% do índice global de segregação da pilha. Já a região Z, com apenas 15,21 g, tem uma contribuição proporcional (ou CMT) de 0,03, participando o seu índice de segregação, portanto, com apenas 3% no valor do índice global de segregação da pilha.



Figura 6.2 – Amostras da região A de um experimento do grupo controle e de um experimento do grupo teste

Tabela 6.28 – Média das massas totais encontradas em cada região da pilha para cada grupo de experimentos com a contribuição de cada região para a massa total (CMT)

MASSA TOTAL POR				
REGIÃO (g)				
Região	Grupo controle	CMT	Grupo Teste	CMT
A	135,29	0,27	134,95	0,27
B	61,97	0,12	69,30	0,14
C	57,06	0,11	55,05	0,11
D	44,02	0,09	46,93	0,09
E	38,63	0,08	39,86	0,08
F	34,90	0,07	34,27	0,07
G	34,89	0,07	34,64	0,07
H	32,97	0,07	32,92	0,07
I	43,17	0,09	41,71	0,08
Z	15,21	0,03	10,93	0,02
TOTAL	498,11		500,55	

Adotando-se a nova sistemática apresentada para o cálculo do índice de segregação global da pilha, pode-se perceber, através da Tabela 6.29, que há uma notável diferença na segregação, onde o grupo teste apresentou índice 33,65% menor que o grupo controle.

Tabela 6.29 – Índices de segregação corrigidos de cada região da pilha para os dois grupos e o valor total do índice de segregação global da pilha para os dois grupos

REGIÃO	GRUPO CONTROLE	GRUPO TESTE
A	8,23%	1,70%
B	0,98%	1,44%
C	2,12%	2,46%
D	2,08%	1,57%
E	1,74%	0,46%
F	1,08%	0,42%
G	0,60%	0,97%
H	0,46%	1,52%
I	0,38%	1,36%
Z	0,50%	0,17%
TOTAL	18,16%	12,05%

Comparando-se os dois resultados da variação percentual da segregação adotando-se as duas sistemáticas, a da metodologia apresentada e a proposta por este trabalho, verifica-se que a segunda corresponde melhor às observações visuais do conteúdo das amostras.

De qualquer maneira, a variação no índice global de segregação somando-se todos os experimentos (em ambas as formas de cálculo do índice de segregação) permite concluir que o uso do recurso de injeção de ar melhora a segregação na formação de pilhas cônicas quando da descarga de silos suspensos, mesmo que o sistema proposto não esteja operacionalmente otimizado.

6.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A SEGREGAÇÃO POR REGIÃO DA PILHA

Aprofundando-se a análise dos resultados, é possível entender o que houve com o comportamento das partículas durante a formação da pilha em cada posição com a injeção de ar.

A Tabela 6.30 apresenta os índices de segregação I_p para cada região de cada grupo e a variação encontrada.

Tabela 6.30 – Índices de segregação das regiões das pilhas dos experimentos do grupo controle e do grupo teste e a variação percentual entre elas

REGIÕES	ÍNDICE DE SEGREGAÇÃO POR REGIÃO		
	GRUPO TESTE	GRUPO CONTROLE	VARIAÇÃO
REGIÃO A	6,29%	30,29%	-79,23%
REGIÃO B	10,37%	7,87%	31,83%
REGIÃO C	22,36%	18,54%	20,61%
REGIÃO D	16,73%	23,53%	-28,89%
REGIÃO E	5,80%	22,42%	-74,14%
REGIÃO F	6,09%	15,35%	-60,34%
REGIÃO G	14,04%	8,50%	65,15%
REGIÃO H	23,05%	6,95%	231,77%
REGIÃO I	16,29%	4,38%	272,14%
REGIÃO Z	7,58%	16,43%	-53,84%

É possível afirmar que houve uma mudança radical na distribuição das posições das partículas quanto ao seu tamanho entre os dois grupos. As regiões que tiveram variação negativa

no índice de segregação, ou seja, melhora na segregação, foram as regiões A, D, E, F e Z, enquanto as que tiveram variação positiva no índice de segregação, ou seja, piora na segregação, foram as regiões B, C, G, H e I.

Fazendo-se uma análise da variação da massa média \bar{m}_2 e \bar{m}_4 em cada uma das regiões da pilha comparando-se o grupo controle e o grupo teste, pode-se entender se houve mudança na alocação das partículas durante a formação da pilha com o uso da injeção de ar. A Tabela 6.31 apresenta as massas médias \bar{m}_2 e \bar{m}_4 para cada região da pilha de cada grupo com a variação percentual entre cada um.

Tabela 6.31 – Massas médias \bar{m}_2 e \bar{m}_4 para cada região da pilha de cada grupo com a variação percentual entre eles

REGIÃO	\bar{m}_4 (g) CONTROLE	\bar{m}_4 (g) TESTE	VARIAÇÃO	\bar{m}_2 (g) CONTROLE	\bar{m}_2 (g) TESTE	VARIAÇÃO
A	88,14	71,72	-18,63%	47,15	63,23	34,10%
B	28,88	31,00	7,34%	33,09	38,30	15,76%
C	23,76	21,38	-10,02%	33,30	33,67	1,12%
D	16,84	19,54	16,00%	27,18	27,40	0,79%
E	15,01	18,81	25,29%	23,61	21,05	-10,87%
F	14,76	18,20	23,25%	20,14	16,07	-20,20%
G	16,04	19,73	23,03%	18,86	14,91	-20,95%
H	16,83	20,23	20,20%	16,15	12,70	-21,36%
I	21,31	24,23	13,68%	21,86	17,48	-20,03%
Z	7,48	5,45	-27,11%	7,73	5,48	-29,09%

As partículas maiores (diâmetro médio \bar{m}_4) diminuiram sua concentração nas regiões A, C e Z, enquanto aumentaram em concentração nas demais regiões. As partículas menores (diâmetro médio \bar{m}_2) diminuiram sua concentração nas regiões E, F, G, H, I e Z, quase não variaram na região D, e aumentaram em concentração nas regiões A, B e C.

Esta mudança na dinâmica de deposição na pilha era esperada uma vez que o jato de ar deslocou parte das partículas menores para as regiões mais afastadas do ponto de descarga.

Dessa maneira, as regiões mais verticais (F, G, H e I) perderam conteúdo fino e ganharam conteúdo grosso.

Hoffmeister (1964) já havia indicado que para uma pilha formada sem interferência, há uma predominância de material fino (\bar{m}_2) nos segmentos G, H e I e de material grosso (\bar{m}_4) nos segmentos A, B e C o que é corroborado pelos dados do grupo controle.

Nomeando-se o grupo de regiões A, B e C de macrorregião R, o grupo das regiões D, E e F de macrorregião S, e o grupo das regiões G, H e I de macrorregião T, é possível verificar se as condições observadas por Hoffmeister foram replicadas e, conseqüentemente, avaliar se a injeção de ar mudou este padrão de posicionamento das partículas quanto o seu tamanho. A Tabela 6.32 apresenta os dados.

Tabela 6.32 – Massas médias \bar{m}_2 e \bar{m}_4 para cada macrorregião da pilha de cada grupo com a variação percentual entre eles

MACROR- REGIÃO	\bar{m}_4 (g) CONTRO- LE	\bar{m}_4 (g) TESTE	VARIA- ÇÃO	\bar{m}_2 (g) CONTRO- LE	\bar{m}_2 (g) TESTE	VARIA- ÇÃO
R	140,78	124,10	-11,85%	113,53	135,20	19,08%
S	46,62	56,55	21,29%	70,93	64,51	-9,05%
T	54,18	64,18	18,47%	56,86	45,08	-20,71%

Verifica-se que, no grupo controle, realmente houve uma presença maior de material grosso na macrorregião R (\bar{m}_4 igual a 140,78 g e \bar{m}_2 igual a 113,53 g) e uma presença maior de material fino nas macrorregiões S (\bar{m}_4 igual a 42,62 g e \bar{m}_2 igual a 70,93 g) e T (\bar{m}_4 igual a 54,18 g e \bar{m}_2 igual a 56,86 g).

Com a aplicação do jato de ar, houve uma inversão na concentração de material grosso e fino na macrorregião R, com maior presença de material fino (\bar{m}_4 igual a 127,10 g e \bar{m}_2 igual a 135,20 g). A macrorregião S continuou a apresentar concentração maior de finos (\bar{m}_4 igual a 56,55 g e \bar{m}_2 igual a 64,51 g) e a macrorregião T também apresentou inversão nas concentrações e passou a apresentar mais grossos que finos (\bar{m}_4 igual a 64,18 g e \bar{m}_2 igual a 45,08 g).

Avaliando o índice de segregação das macrorregiões (Tabela 6.33), percebe-se uma melhora nas macrorregiões R e S e uma piora na região T.

Tabela 6.33 – Índice de segregação das macrorregiões no grupo controle e no grupo teste e a variação encontrada

ÍNDICE DE SEGREGAÇÃO			
MACRORREGIÃO	CONTROLE	TESTE	VARIAÇÃO
R	10,71%	4,28%	-60,0%
S	20,68%	6,58%	-68,2%
T	2,42%	17,48%	623,5%

7 CONCLUSÕES E POSSÍVEIS DESDOBRAMENTOS

A presente dissertação demonstrou que há um efeito positivo sobre a segregação na formação de pilhas cônicas de material quando da injeção de ar no leito descendente de material. Mesmo que os parâmetros utilizados para a determinação da velocidade do ar encontrem fundamentação na literatura, pode-se dizer que os experimentos em bancada podem passar por outros testes com o objetivo de se otimizar operacionalmente o método.

A viabilidade do método no que diz respeito à melhoria na segregação em pilhas permite que haja uma investigação mais aprofundada dos efeitos das variadas velocidades do ar e a forma com que é feita a injeção (se em pulsos ou contínua, por exemplo) para que se determine o melhor efeito na segregação.

Também é factível que se teste outras formas de se calcular a segregação e até mesmo usar outros tipos de instrumentos para que haja uma comparação com o método empregado neste trabalho.

Pode-se avaliar também a eficiência do método proposto em comparação com outras técnicas de manuseio de sólidos para identificar ou até mesmo ranquear as mais eficazes.

Um ponto que suscitou curiosidade no curso dos experimentos foi a exata influência da disposição das partículas no silo de descarga, deixando a possibilidade de se estudar formas de se garantir a homogeneidade da mistura das amostras antes da descarga. Nesse sentido, é possível também que se avalie diferentes formas de descarga para observar os efeitos da injeção de ar quando da presença de segregação por trajetória no momento da descarga, através de esteiras transportadoras ou chutes inclinados.

Aumentar a complexidade da mistura também pode ser de interesse dos usuários de misturadoras de fertilizantes, portanto pode-se testar os efeitos da injeção de ar para misturas com mais de dois tamanhos médios de partículas, com mais de um tipo de partícula, ou seja, avaliar a melhoria ou não na segregação na formação de pilhas com relação ao tamanho, forma e densidade.

Outros aspectos construtivos concernentes ao experimento podem ser estudados para que tenha uma ideia melhor dos efeitos da injeção de ar para as mais variadas aplicações. Pode-se comparar os resultados da segregação com o uso de um silo com escoamento em funil, testar variadas alturas de quedas e variar as dimensões do silo de descarga.

Como mostra a literatura, a taxa de escoamento de material pode influenciar no resultado da segregação em casos específicos e o seu efeito sob influência da injeção de ar pode ser de interesse técnico.

Por fim, para que se valide o sistema proposto em escala industrial, faz-se necessário que ocorram testes pilotos em maior escala para que se avalie a viabilidade técnica e econômica. Para tanto, é necessário que se encontrem métodos de amostragens e estatísticos mais robustos para embasar um pretensão *scale up* do sistema.

O teste final e mais importante seria buscar a parceria de alguma empresa misturadora de fertilizantes granulados NPK para a instalação do sistema em escala industrial para observar a real viabilidade e possíveis efeitos colaterais como o espalhamento de particulados e consequente poluição atmosférica (e como lidar com o problema em caso de ocorrência), o custo-benefício do sistema e sua real utilidade.

REFERÊNCIAS

3M INDUSTRIAL MINERAL PRODUCTS DIVISION. **Segregation in Roofing Granules educational video**. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=MUr3H-M-nRk>, publicado em 2012, acesso em 23 de setembro de 2017.

AHMAD, K.; SMALLEY, I. J. Observation of particle segregation in vibrated granular system, **Powder Technology**, v. 8, n. 1-2, pp. 69-75, 1973.

ALBERT, R.; ALBERT, I; HORNBAKER, D.; SCHIFFER, P.; BARABÁSI, A. Maximum angle of stability in wet and dry spherical granular media, Departamento de Física da Universidade de Notre-Dame, Notre-Dame, Indiana. **Physical Review E**, v. 56, n. 6, 1997.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. Estatísticas, Indicadores, **Principais Indicadores do Setor de Fertilizantes**, acesso em <http://www.anda.org.br/index.php?mpg=03.00.00&ver=por>, 2018.

BATES, L.; DHODAPKAR, S.; KLINZING, G. **Discharge Aids**, SHAPA Technical Bulletin, N°12, 2007.

BAXTER, J.; TUZUN, U.; HEYES, D.; HAYATI, I.; FREDLUND, P. **Stratification in poured granular heaps**, Nature, v. 391, p. 136-, 1998.

BELON, M. **Novidades sobre o mercado brasileiro: Fontes de suprimentos, mercado de importação e expectativas para produção regional**. Trabalho apresentado na FERTILIZER LATINOAMERICANO 2018, Argus Media, São Paulo, 2018.

BERGES, G. Dry Bulk Blending in the Americas, In: Nielsen, F. T. (Org.) **Manual of fertilizer processing**, v. 5, Boca Raton: Taylor & Francis Group, 1987, cap. 14, p. 373-391.

BICKING, C. A. The Sampling of Powders and Granular Materials. **Fuel Society**, v. 14. 1963.

BLENKHORN, H. D. Opening Remarks. **Proceedings of the 34th Annual Meeting of the Fertilizer Industry Round Table**. 1984.

BORLAUG, N. E. **Feeding a world of 10 billion people: the TVA/IFDC legacy**. Tennessee Valley Authority; International Center for Soil Fertility and Agricultural Development, Muscle Shoals, Al. USA, 2003.

BRIDGWATER, J.; INGRAM, N. D. Rate of Spontaneous Interparticle Percolation. **Transactions of the Institution of Chemical Engineers**, v. 49, p. 163-169. 1971.

BROWN, R. L. The fundamental principles of segregation, **Journal of The Institute of Fuel**. v. 13, n. 15. 1939.

CASTECH AUTOMAÇÃO ® C. A. S Tecnologia Ltda. **Manual de operação do sistema supervisorio para unidades de mistura de fertilizantes NPK**, Uberaba, 2005, 1 CD-ROM.

CARSON, J. W. Hopper/Bin Design, In: McClinchey, D. (Org.) **Bulk Solids Handling, Equipment Selection and Operation**, Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2008, cap. 2, p. 68-98.

CHASE, G. G. **Solids Note 10**, The University of Akron, 20--.

CLEVELAND CASCADES Ltd. **The cascade concept**, website da empresa, disponível em <http://clevelandcascades.co.uk/products/the-cascade-concept/>, acesso em 1º de agosto 2017.

DA SILVA, G.A. The Effect of the Physical Properties of Particles of Bulk-blended Fertilizers on Segregation by Coning. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 14, n. 3, p. 00, 1997.

DIAS, V. P.; FERNANDES, E. **Fertilizantes: uma visão global sintética**. BNDES Setorial, n. 24, p. 97-138, Rio de Janeiro, 2006.

DRAHUN, J. A.; BRIDGWATER, J. The Mechanism of Free Surface Segregation, **Powder Technology**, v. 36, n. 1, p. 39-53, 1983.

DUST SUPPRESSION HOPPER. **DSH System dust control products**, website da empresa, disponível em <https://dshsystems.com/dsh-products/>, acesso em 1º de agosto de 2017.

EMT. **Weighcont**. disponível em <https://emt.tech/products/blending/weighcont/#photo>, acesso em 14 de janeiro de 2018.

ENGBLON, N.; SÁXEN, H.; ZEVENHOVEN, R.; NYLANDER, H.; ENSTAD, G. G. Segregation of powder mixtures at filling and complete discharge of silos, **Powder Technology**, v. 215-216, p. 104-116. 2012.

FAN, Y.; BOUKERKOUR, Y.; BLANC, T.; UMBANHOWAR, P. B.; OTTINO, J. M.; LUEPTOW, R. M. Stratification, segregation and mixing of granular materials in quasi-two-dimensional bounded heaps, **Physical Review E**, v. 86, n. 5, p. 1-12. 2012.

FARNISH, R. J.; BRADLEY, M. S. A. Segregation During Fertilizer Handling: Occurrence, Assessment and Control, **Proceedings n° 600, The International Fertilizer Society**, York, UK, p. 1-29. 2007.

FAYED, M. E.; OTTEN, L. **Handbook of Powder Science and Technology**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, Inc. 1984.

FISCHER, R. B. Effect of form of reagent on particle sizes of precipitates, **Analytica Chimica Acta**, v. 22, p. 508-514, 1960.

GORDON, G.; PEISHAKOV, L. **Dust collection and gas cleaning**. Moscou: Mir Plubishers. 1972.

GRAY, J. M. N. T.; HUTTER, K. Pattern formation in granular avalanches. **Continuum Mechanics and Thermodynamics**, v. 9, n. 6, p. 341-345, 1997.

GRAY, J. M. N. T.; ANCEY, C. Segregation, recirculation and deposition of coarse particles near two-dimensional avalanche fronts, **Journal Fluid Mechanics**, v. 652, p. 387-423, 2009.

GUIMARÃES, M. F. **Tendências agrícolas e consumo de fertilizantes no Brasil**, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Política Agrícola, Departamento de Crédito e Estudos Econômicos, Fertilizer Latino Americano 2018, São Paulo, 2018.

HARRIS, J. F. G.; HILDON, A. M. Verhinderung von entmischungen in pulvermischungen aus zwei komponenten unter besonderer beruecksichtigung perborathaltiger waschmittel, **Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development**, v. 9, n. 3, p. 363, 1970.

HOFFMEISTER, G., Bulk Blending, In: Nielsen, F. T. (Org.) **Manual of fertilizer processing**, v. 5, Boca Raton: Taylor & Francis Group, 1987, cap. 13, p. 349-371.

HOFFMEISTER, G. Physical Properties of Fertilizers and Methods for Measuring Them, **TVA Bulletin Y-147**, Tennessee Valley Authority, Environmental Research Center, Muscle Shoals, AL, U.S.A, 1979.

HOFFMEISTER, G.; WATKINS, S. C.; SILVERGER, J. Bulk Blending of Fertilizer Material: Effect of Size, Shape, and Density on Segregation, **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 12, p. 64-69, 1964.

HOGG, R. Solid-Solid System - Mixing. In: Green, D. W.; Perry, R. H. (Org.) **Perry's Chemical Engineers' Handbook**, 8 ed. New York: McGraw-Hill, 2006, sec. 19-11.

HOLMES, C. W. H., **Colliery Engineering**, 11. v. 40. 1939.

INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION - IFA. **IFA DATA**. disponível em <http://ifadata.fertilizer.org/ucSearch.aspx>, acesso em 14 de janeiro de 2018.

ISHERWOOD, K. F., **Fertilizer Use and the Environment**. Paris: International Fertilizer Industry Association (IFA). 2000.

JANSSEN, A. W., Versuche uber Getreidedruck in Silozellen. Z. **Vereines Deutscher Ingenieure**, v. 29, p. 1045-1049, 1895.

JENIKE, A. W. Gravity Flow of Bulk Solids, **Bulletin of the University of Utah** 108, v. 52, n. 29, p. 307-309 1961.

JENIKE, A. W. Quantitative design of mass-flow bins, **Powder Technology**, v. 1, n. 4, p. 237-244, 1967.

JENIKE, A. W. Storage and Flow of Solids, **Bulletin of the University of Utah** **123**, v. 53, n. 26, p. 194-198, 1964.

JILLAVENKATESA, A.; DAPKUNAS, S. J.; LUM, L. H. **Particle Size Characterization**, National Institute of Standards and Technology – Technology Administration, U.S. Department of Commerce. Special Publication 960-1, Washington, 2001.

JOHANSON, J. R. Solids Segregation – Causes and Solution. **Powder and Bulk Engineering**, p. 13-19, 1988.

LACEY, P. M. C. Developments in the theory of particle mixing. **Journal of Applied Chem**, v. 4, n. 5, p. 257-268, 1954.

LAWRENCE, L. R.; BEDDOW, J. K. Some effects of vibration upon powder segregation during die filling, **Powder Technology**, v. 2, n. 2, p. 125-130, 1968.

LYNCH, D. N.; HO, F. C. Choosing powder blender can be tricky, **Canadian Chemical Processing**, 1972.

MAKSE, H. A.; CIZEAU, P.; STANLEY, H. E. Possible stratification mechanism in granular mixtures, **Physics Review Letter**, v. 78, n. 17, p. 3298-3301, 1997.

MAKSE, H. A.; HAVLIN, S.; KING, P. R.; STANLEY, H. E. Spontaneous stratification in granular mixtures, **Nature**, n. 386, p. 379-382, 1997.

MALAVOLTA, E.; PEMENTEL-GOMES, F.; ALCARDE, J.C. **Adubos e adubações**. São Paulo: Nobel. 2000.

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ. 1997.

MATTHÉE, H. Segregation Phenomena Relating to Bunkering of Bulk Materials: Theoretical considerations and Experimental Investigations, **Powder Technology**, v. 1, n. 5, p. 265-271, 1967.

MAYNARD, E. Fundamentals of Bulk Solids Mixings and Blending: learn about mixing technology, types of blending equipment and key sampling practices to meet today's requirements for robust processes, **Chemical Engineering Journal**, v. 120, n. 9, p. 66-71, 2013.

MARTHUR, J. W.; MCCORD, G. C. Fertilizing Growth. Agricultural Inputs and Their Effects in Economic Development, **Journal of Development Economics**, v. 127, p. 133-152, 2017.

MCCABE, W.L.; SMITH, J.C.; HARRIOTT, P. **Unit operations of chemical engineering**. 5 ed. New York: McGraw-Hill, 1993.

MCGLINCHEY, D. Quantifying segregation in heap: an experimental study, **Powder Technology**, v. 145, n. 2, p. 106-112, 2004.

MCLELLAN, R., **Trends in the Brazil fertilizer market**, Mosaic Fertilizantes, Fertilizer Latino Americano 2018, São Paulo, 2018, 2018.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL, Instrução Normativa nº 46, 22 de novembro de 2016. **Diário Oficial da União**, Brasília, Seção 1, 7 de dezembro de 2016.

MISERQUE O.; PIRARD, E. Segregation of the bulk blend fertilizers. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 74, n. 1, p. 215– 224, 2004.

MITCHELL, D. R. Segregation in the Handling of Coal. **American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers**. Trans. AIME, v. 130, p. 107-142, 1938.

MOBIUS, M. E; LAUDERDALE, B. E; NAGEL, S. R.; JAEGER, H. M. Brazil-nut Effect. Size Separation of Granular Particles, **Nature**, v. 414, p. 270, 2001.

MOSAIC COMPANY, **The Law of the Minimum, Crop Nutrition**, disponível em <http://www.cropnutrition.com/the-law-of-the-minimum>, acesso em 12 de janeiro de 2018.

MOSBY, J.; DE SILVA, S. R.; ENSTAD, G. G. Segregation of Particulate Materials – Mechanisms and Testers, Review. **KONA Powder and Particle Journal**, v. 14, p. 31-43, 1996.

NIELSSON, F. T. Granulation, In: **Manual of fertilizer processing**, v. 5, Boca Raton: Taylor & Francis Group, 19787, cap. 14, p. 159-225.

NIPPON INDÚSTRIA DE MÁQUINAS LTDA, **Misturador**, disponível em <http://nippon-maquinas.hospedagemdesites.ws/filtros-e-equipamentos/>, acesso em 13 de janeiro de 2018.

POPP, T.; ULRICCH, K.H. Aplicación y calidad de los abonos complejos. **BASF Reportes Agrícolas**, v.3, p.14-23, 1985.

PORTAL DA AQUAPONIA, **Diagrama**, disponível em: <http://portaldaaquaponia.com.br/diagramas/>, acesso em 1 de fevereiro de 2018.

PURUTYAN, H.; Pittenger, B. H.; Carson, J. W. Six Steps to Designing a Storage Vessel that Really Works, **Powder and Bulk Engineering**, v. 13, v. 11, p. 56-58, 1999.

PURUTYAN, H.; Pittenger, B. H.; Carson, J. W. Solve Solids Handling by Retrofitting, **Chemical Engineering Progress**, v. 94, p. 27-39, 1998.

RHODES, M. **Introduction to Particle Technology**. 2 ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2008.

ROTTER, M. J. Silo design loads from stored bulk solids: the provisions of the new Eurocode EN 1991-4. **Proceedings of the IMechE Seminar on Specifying and Designing Safe Storage Silos**, IMechE, 2005.

SCOTT, A. M.; BRIDGWATER, J.; Self-diffusion of spherical particles in a simple shear apparatus. **Powder Technology**, v. 14, n. 1, p. 177-183, 1976.

SMITH, G.E. Bulk blended. In: ANNUAL MEETING OF THE FERTILIZER INDUSTRY ROUND TABLE, 11., 1960, Washington. **Proceedings of the Annual Meeting of The Fertilizer Industry Round Table**. Maumee: Andersons, 1960. v.9. p.90-97.

SOLIMAR PNEUMATICS, **Fluidificador de silo com disco detectável de metal**. Disponível em http://www.solimarpneumatics.com/PT/elert/1011_eblast.html, acesso em 23 de junho de 2017.

STANLEY-WOOD, N. Bulk powder properties: instrumentation and techniques, In: McClinchey, D. (Org.) **Bulk Solids Handling, Equipment Selection and Operation**, Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2008, cap. 2, p. 68-98.

STEPHENS, D. J.; BRIDGWATER, J.; The Mixing and Segregation of Cohesionless Particulate Materials, Part II: Microscopic Mechanisms for Particles Differing in Size. **Powder Technology**, v. 21, n. 1, p. 29-44. 1978.

SYSKOV, K. I., LYAN, T, Investigation of the process of segregation in ore-coal mixtures, **Coke and Chemistry, USSR**, v. 2, n. 5, 1960.

TAGGART, A. F., **Handbook of Ore Dressing**. ed 1. New York: John Wiley & Sons, 1927.

THE WORLD BANK GROUP, **Breaking Down Barriers: Unlocking Africa's Potential through Vigorous Competition Policy**. Washington, DC: World Bank Group, 2016.

UNITED NATIONS, DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS, POPULATION DIVISION, **World Population Prospects: The 2015 Revision, World Population 2015 Wallchart**. 2015.

UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION (UNIDO) and INTERNATIONAL FERTILIZER DEVELOPMENT CENTER (IFDC). **Fertilizer manual**. 1. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998.

WADELL, H. Sphericity and roundness of rock particles. **The Journal of Geology**, v. 41, n. 3, p. 310-331, 1933.

WELTY, R. J.; WICKS, C. E.; WILSON, R. E. **Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer**. 3. ed. New York: John Wiley. 1984.

WEIDENBAUM, S. S. Mixing of Solids, **Advances in Chemical Engineering**, v. 2, p. 209-324, 1958.

WILLIAMS, J. C., Mixing and Segregation in Powders, In: Rhodes, M. J. (Org.) **Principles of Powder Technology**, New York: John Wiley & Sons, Ltd, 1990, cap. 4, p. 71-90.

WILLIAMS, J. C. The Segregation of Powders and Granular Materials. **Fuel Society Journal**, v. 14, n. 29, 1963.

WOODCOCK, C. R.; MASON, J. S., **Bulk Solids Handling – An Introduction to the Practice and Technology**, 1 ed., Glasgow: Blackie Academic & Professional, Chapman & Hall, 1987.

WORLD HEALTH ORGANISATION (WHO), UNICEF. **Progress on sanitation and drinking-water, Program evaluation**, 2014.

YARA BRASIL FERTILIZANTES. **Seção Propriedades Físicas dos Fertilizante**. Disponível em <http://www.yarabrasil.com.br/nutricao-plantas/manuseio-seguro-fertilizantes/propriedades-fisicas-fertilizantes/>, acesso em 2 de setembro de 2017.

YARGUS MANUFACTURING, INC. **Products**. disponível em: <http://www.yargus.com>, acesso em 2 de setembro de 2017.