



## **DESENVOLVIMENTO DE UM NOVO SISTEMA PARA EVITAR A SEGREGAÇÃO DE FERTILIZANTES GRANULADOS**

F. M. C. CARVALHO<sup>1,2</sup>, J. R. D. FINZER<sup>1</sup>, D. C. L. FERREIRA<sup>1</sup>, F. F. ALMEIDA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade de Uberaba, Departamento de Engenharia Química

<sup>2</sup>CASTech/Cinetica Sistemas, Distrito Industrial 1 de Uberaba

*RESUMO – Este trabalho visa apresentar os aspectos de qualidade física de fertilizantes granulados com foco na segregação de partículas, contextualizando-a com o ambiente industrial das misturadoras de fertilizantes de modo a entender a forma e a razão pelas quais o fenômeno acontece, bem como seus impactos nesta produção industrial. Inicialmente, após apresentadas as técnicas de manuseio comumente utilizadas na indústria, foi escolhida uma etapa bastante comum nas misturadoras que é a descarga aérea de fertilizantes permitindo a formação de uma pilha de fertilizantes composta de uma mistura de partículas de dois diâmetros diferentes. Descreve-se, fundamentando, um novo método de manuseio com uso de deslocamento de partículas com uso da força resistiva do ar aplicada perpendicularmente à cortina aérea de partículas na ocasião da formação da pilha. A nova técnica desenvolvida para redução da segregação de fertilizantes particulados possibilita a diminuição do índice global de segregação e o estudo com uso da força resistiva do ar possibilitou a redução do índice de 0,65 para 0,53 em uma condição não otimizada operacionalmente.*

### **1. INTRODUÇÃO**

O fertilizante químico é uma ferramenta essencial para o aumento da eficiência da resposta agrônômica de culturas vegetais. 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.

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). 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, e 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 agrônômica 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 HOFFMEISTER (1964).

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 que os menores escoem por entre estes espaços fazendo com que haja uma concentração maior destas no centro. 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.

O objetivo deste trabalho foi aplicar uma modelagem na aplicação de força de arrasto horizontal devido a escoamento de ar, sobre as partículas de ureia em descarga aérea livre usando um modelo de bancada e comparando com o resultado da descarga aérea livre sem outras influências no escoamento.

## **2. MISTURA DE FERTILIZANTES**

Para exemplificar, uma mistura NPK a granel é alcançada através de uma etapa 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, contudo a mistura é descarrega de silos, ocasião em que ocorre a segregação.

Os misturadores de fita (*ribbon mixers*), Figura 1 (*Yargus Manufacturing, Inc. website*), assim como os de tambor rotativo, o tipo betoneira, e os de pás são muito comuns em indústrias.



Figura 1. Misturador de fita (*Ribbon Mixer*).



Após a mistura, na descarga em silos existem quatro mecanismos de segregação: segregação por trajetória; percolação; deslocamento vertical por vibração; elutriação. A Figura 2 ilustra como ocorre a segregação por trajetória.

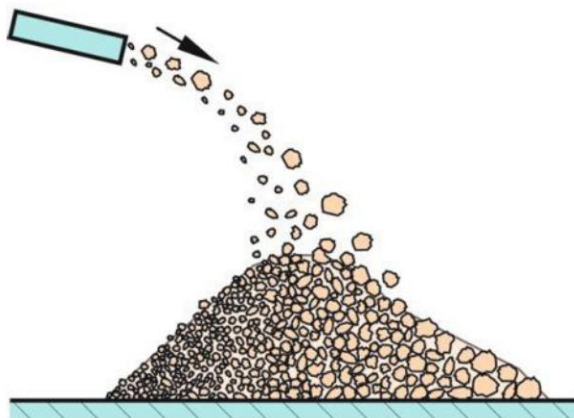


Figura 2 – Segregação por trajetória (CARSON &, PETRO, 2017)

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### **Deslocamento de pequenas partículas para atenuar a segregação**

Existem muitos métodos desenvolvidos ao longo da experiência dos engenheiros com manuseio de sólidos granulados/particulados a granel, para diminuir o impacto negativo da segregação. Muito embora alguns desses métodos se mostrem eficazes em alguns casos, é possível testar novas maneiras de atacar o mesmo problema com o intuito de verificar a eficiência do método em comparação com outros existentes.

Com essa visão em mente, é possível, com base nos conhecimentos de engenharia e da dinâmica da partícula sólida, propor um método de deslocamento de partículas com uso de corrente de ar. 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 desta, levando em conta que se trata de partículas de um mesmo produto, já que os valores de densidade real podem diferir.

Quando da atuação de uma corrente de ar com certa velocidade normal ao fluxo 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 massa em 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 aqui aplicada sobre a dinâmica das partículas, com escoamento de um fluido e partículas sólidas, 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 (1):

$$F_R = m \cdot a \quad (1)$$

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

$$m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt} = m \cdot \vec{b} - w \cdot \vec{b} - F_R \quad (2)$$

sendo: “b” é aceleração devido ao campo (por exemplo a aceleração da gravidade); w 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, “CD” é definido como (WELTY et al., 1984):

$$C_D = \frac{F_R'}{\frac{1}{2} \rho_f U^2} \quad (3)$$

sendo:  $F_R'$  a força de arrasto por unidade de área projetada da partícula; U a velocidade da partícula (que possui a mesma velocidade do fluido). Portanto a força de retardamento da partícula é:

$$F_R = \frac{1}{2} C_D \rho_f U^2 (\pi d_p^2 / 4) \quad (4)$$

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

$$C_D = \frac{24}{R_e} \quad (5)$$

A desaceleração da partícula ( $a_R$  é expressa por: (força de retardamento)/massa da partícula), portanto (RHODES, 2008):

$$a_R = \frac{\frac{24}{R_e} \frac{1}{2} \rho_f U^2 (\pi d_p^2 / 4)}{\rho_p \pi d_p^3 / 6} = \frac{18U\mu}{\rho_p d_p^2} \quad (6)$$



Recorrendo a equação do movimento da partícula expresso pela equação de Torricelli:

$$U_f^2 = U^2 + 2a_R S \quad (7)$$

sendo:  $U_f$  a velocidade final da partícula e  $S$  a distância percorrida após iniciar o movimento em uma direção até o final do percurso, no caso igual a zero, destacando-se que a aceleração é negativa pois trata-se de desaceleração devido ao atrito com o fluido, combinado com a Equação (6) tem-se:

$$S = \frac{U \rho_p d_p^2}{36\mu} \quad (8)$$

Tem-se que destacar o fato 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, que corresponde à distância que a partícula irá deslocar-se até alcançar o repouso, ver na Figura 3, fisicamente o que ocorreria quando partícula de diversos tamanhos dispersas no fluido ficassem submetidas a ação de um fluido (como um jato) 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.

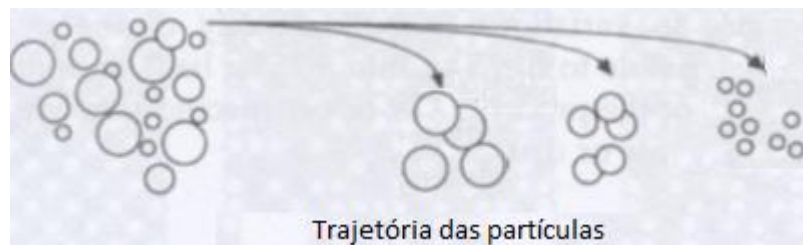


Figura 3. Trajetória das partículas subitamente submetidas à ação de uma corrente de gás escoando em uma direção “adaptado de RHODES (2008)”.

Na situação em que o regime de escoamento é turbulento:  $C_D = 0,44$  (RHODES, 2008; (McCABE et al., 1993), substituindo na Equação (5), tem-se:

$$a_{Rt} = \frac{0,33\rho_f U^2}{\rho_p d_p} \quad (9)$$

Ao substituir na Equação de Torricelli:



$$S = \frac{\rho_p d_p}{0,66 \rho_f} \quad (10)$$

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 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 modelo da caixa construída para medida da segregação pode ser visto na Figura 4.

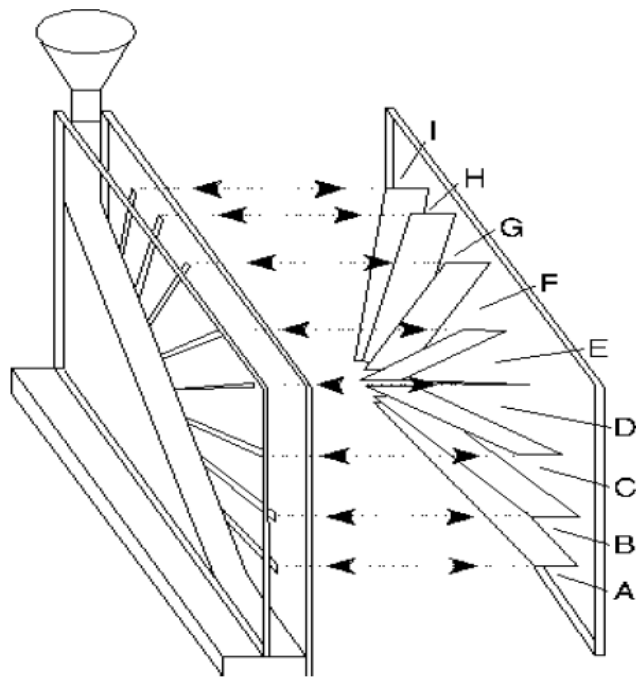


Figura 4 – Caixa de determinação do índice de segregação.

Foi construída a caixa de determinação de segregação compartimentada (HOFFMEISTER, 1964) com as seguintes características: parede posterior com *slots* de 10° de intervalo, possibilitando 9 divisões angulares na caixa; ureia granulada – granulometrias de 2,1 e 3,7 mm; anemômetro de fio quente e soprador de ar.

O primeiro teste, aquele sem qualquer aparato, tem seu esquema representado na Figura 5.



O segundo teste foi feito testando-se o uso do soprador de ar para deslocamento vertical de partículas menores. Um tubo perfurado foi instalado na lateral da caixa (como mostra a Figura 6) e a velocidade do ar de 2 m/s foi suficiente para ter a capacidade de deslocar preferencialmente as partículas de 2,1 mm de diâmetro.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos testes operacionais são indicados nas Tabelas 1 e 2, para as duas sistemáticas relatadas.

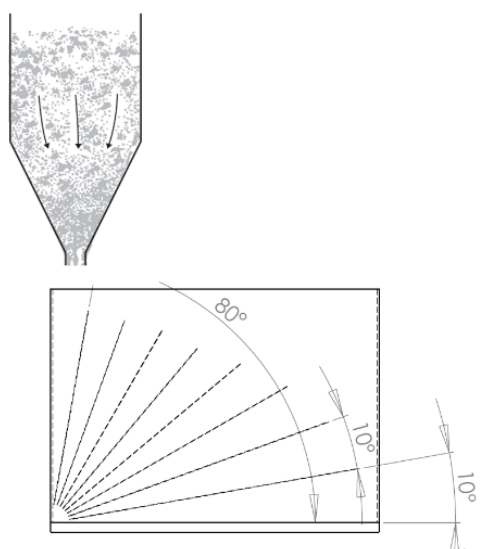


Figura 5 – Teste de formação de pilha sem auxílio de aparatos.



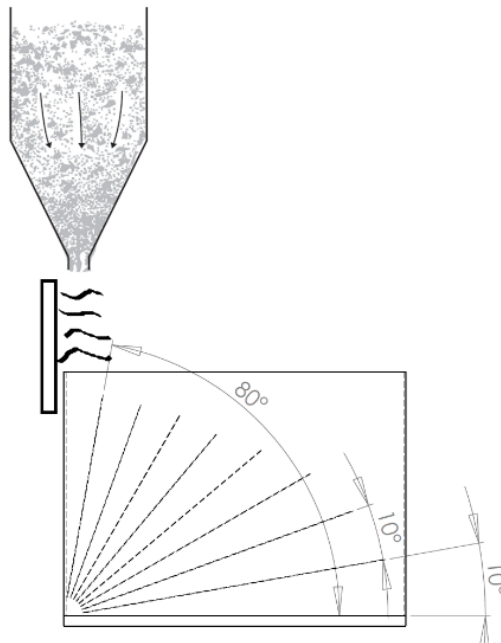


Figura 6 – Teste com uso do soprador de ar.

Após a formação da pilha no interior da caixa, esta foi seccionada com uso de 8 lâminas de aço galvanizado de modo a facilitar a amostragem de cada região da pilha. Após esta etapa, a caixa é disposta na horizontal de maneira a permitir a remoção da parede frontal em acrílico para então remover o conteúdo de cada região.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a formação da pilha no interior da caixa, esta foi seccionada com uso de 8 lâminas de aço galvanizado de modo a facilitar a amostragem de cada região da pilha. Após esta etapa, a caixa é disposta na horizontal de maneira a permitir a remoção da parede frontal em acrílico para então remover o conteúdo de cada região.

Por fim, cada uma das regiões tem seu conteúdo peneirado de modo a separar as partículas de 2,1 mm das de 3,7 mm para se calcular as massas totais de cada amostra bem como as massas de cada grupo de partículas. Feito isso, obtém-se os índices 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 ou em fração mássica ver a Equação (11), índice de segregação.

$$I = \frac{|m_2 - m_4|}{m_4 + m_4} \times 100 \quad (11)$$





sendo: **m<sub>2</sub>** é a massa total das partículas em torno de 2 mm de diâmetro e **m<sub>4</sub>** é a massa total das partículas em torno de 4 mm de diâmetro.

A soma dos termos dá a massa total da amostra. Além desse índice de segregação 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), Equação (12).

$$I_p = \frac{\sum_i^k I_i}{k} \quad (12)$$

A Figura 7 consiste em uma vista da caixa de quantificação de segregação onde se verifica que as maiores partículas se concentram na extremidade esquerda da pilha devido à segregação.

Os resultados dos testes operacionais são indicados nas Tabelas 1 e 2, para as duas sistemáticas relatadas. Foram homogeneizados 500g de uma mistura de partículas (2,1 e 3,7 mm de diâmetro médio) e efetuados os experimentos.

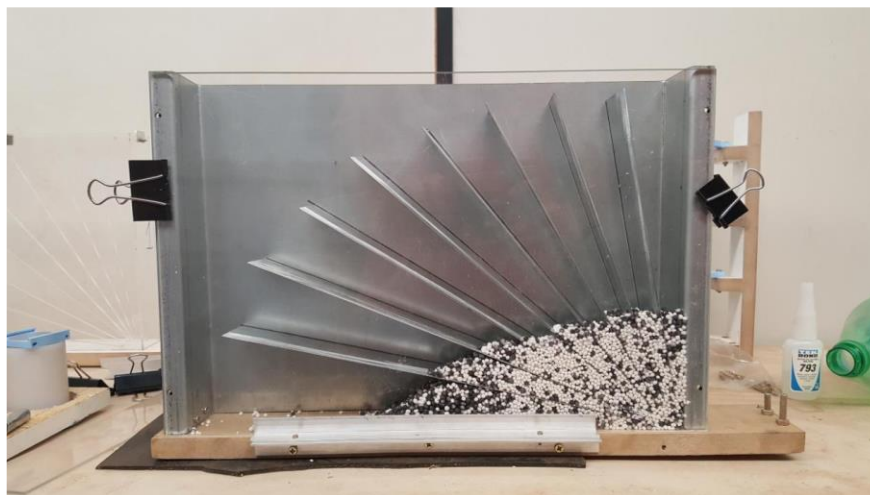


Figura 7. Vista da caixa de quantificação da segregação sem uso do escoamento de ar.

Tabela 1. Frações mássica de partículas, 2,1 e 3,7 mm, nos compartimentos A até I: descarga sem interferências.

	A		B		C		D		E		F		G		H		I	
F (g)	7,4	31,6	5,5	27,0	8,8	29,1	5,8	26,4	5,9	25,7	10,9	40,8	12,8	49,6	13,9	58,7	19,2	120
Índices segregação	0,62		0,66		0,77		0,64		0,63		0,58		0,59		0,62		0,72	



$I_{GS} = 0,65$

Tabela 2. Frações mássica de partículas, 2,1 e 3,7 mm, nos compartimentos de A até I. Descarga sob escoamento transversal do ar.

	A		B		C		D		E		F		G		H		I	
F (g)	11,3	31,7	10,8	27,8	9,0	25,7	8,1	24,6	8,9	27,5	9,4	30,9	10,5	35,4	13,9	56,7	20,4	116
Índices segregação	0,47		0,44		0,48		0,50		0,51		0,53		0,54		0,63		0,70	

$I_{GS} = 0,53$

Verifica-se que o Índice Global de Segregação que é a média de todos os compartimentos consiste-se em uma sistemática poderosa para evitar a segregação de partículas devendo-se, apenas, otimizar operacionalmente, a velocidade de escoamento do ar de arrasto. Além disso, cabe salientar que, durante os testes, dada a característica da caixa e de sua operação, por volta de 6% do conteúdo da mistura completa testada fica numa região fora de qualquer região angular segmentada, impossibilitando que sejam considerados na soma das frações mássicas.

## 5. CONCLUSÃO

A nova técnica desenvolvida para redução da segregação de fertilizantes particulados possibilita a diminuição do índice global de segregação e o estudo com uso da força resistiva do ar possibilitou a redução do índice de 0,65 para 0,53 em uma condição não otimizada operacionalmente. Outras medidas irão ampliar a aplicabilidade do novo método redução de segregação de partículas.

## 6. REFERÊNCIAS

CARSON, J. W., PETRO, G. How to design efficient and reliable feeders for bulk solids. In: Jenike & Johanson. Toronto. [www.jenike.com](http://www.jenike.com). 2017.

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

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



MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. Rio de Janeiro. Editora UFRJ. 1997. 189p.

McCABE, W.L.; SMITH, J.C.; HARRIOTT, P. **Unit operations of chemical engineering**. 5 ed. New York: McGraw-Hill. 1993. 1130p.

RHODES, M. **Introduction to Particle Technology**. 2 ed. Chichester: John Wiley & Sons. 2008. 450 p.

WELTY, R. J.; WICKS, C. E.; WILSON, R. E. **Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer**. 3. ed. New York: John Wiley. 1984. 803p.

YARGUS MANUFACTURING, Inc. Marshall, IL, U.S.A. Website da Empresa. Acesso em [www.yargus.com](http://www.yargus.com). 2017.