

## ESTUDO DA FRIABILIDADE DA SOJA EM UNIDADE PILOTO DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO

V. S. R. OLIVEIRA<sup>1</sup>, M. L. PEREIRA<sup>1</sup>, A. R. MALAFATTI<sup>1</sup>, B.V.D. PEDRO<sup>1</sup>, V. B. PEREZ<sup>1</sup>, V.S. ROSA<sup>2</sup>, M.S. MORAES<sup>2</sup>, A.R. SANTOS<sup>2</sup>, D. MORAES JÚNIOR<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Alunos de graduação, Universidade Santa Cecília, Faculdade de Engenharia Química

<sup>2</sup> Doutores orientadores, Universidade Santa Cecília e Universidade de São Paulo,  
Departamento de Engenharia Química

E-mail para contato: victorsakai@hotmail.com

**RESUMO** - O transporte pneumático é uma operação unitária utilizada no deslocamento de material particulado como pellets de polietileno e grãos como soja, milho e feijão. O processo consiste na movimentação dos sólidos no interior de um duto, por meio de ar ou gás inerte. A friabilidade dos sólidos neste transporte é função principalmente da velocidade do gás e vazão das partículas em contato com as singularidades e dutos. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a friabilidade da soja em uma unidade piloto de transporte pneumático. O equipamento utilizado consistiu de 6,13 m de duto reto de acrílico extrudado com 117 mm de diâmetro interno, um ciclone, duas curvas de 90° e um tê saída de lado com e sem prolongamento. Foram realizados 90 ensaios para as vazões de soja de 95,1; 368,5 e 564,4 kg/h. O gás usado foi o ar e sua velocidade foi mantida em 12 m/s, mínima necessária para que o material permanecesse em suspensão ao ser transportado. Os resultados indicaram a menor quebra da soja utilizando a singularidade tê saída de lado com prolongamento de 90 mm na base do equipamento (formação de um colchão amortecedor). A menor vazão de soja apresentou maior quebra, cerca de 0,2% da massa total.

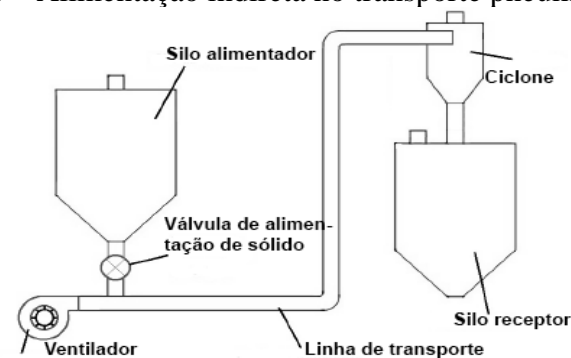
### 1. INTRODUÇÃO

O transporte de sólidos particulados (nas formas de grãos, pó ou brita), tem influenciado a economia mundial em diversos setores industriais como, na indústria química, farmacêutica, alimentícia e metalúrgica, chegando a atingir mais de 80% do custo total do processo (MORAES et. al., 2017).

A característica do transporte pneumático é deslocar material pelo interior de uma tubulação. Esses sólidos são movimentados por ar ou outro gás, através de um soprador, ventilador ou compressor (GOMIDE, 1983).

Há dois sistemas em uso: direto, quando o sólido passa através do ventilador, e indireto (Figura 1) quando o sólido é alimentado a jusante do ventilador. A alimentação do sólido pode ser realizada por meio de válvula rotativa, alimentador helicoidal ou tanque de sopragem (GOMIDE, 1983).

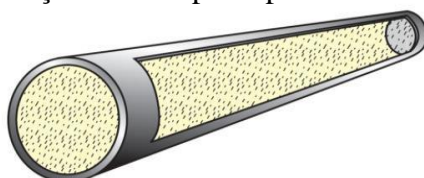
Figura 1 – Alimentação indireta no transporte pneumático.



O transporte pneumático possui como vantagens: o baixo custo inicial, a facilidade de manutenção mecânica, a higiene e segurança para os trabalhadores, a mitigação da perda do material para o meio ambiente, o trajeto de transporte único ou ramificado, tornando-o por diversas vezes mais efetivo que outros transportadores (MORAES, 2012). Entretanto, o transportador pneumático pode requerer alta potência, transporte de produtos unidirecional, possibilidade de fragmentação significativa da partícula sólida, abrasão excessiva do duto, índice de ruído elevado em alta frequência e custo elevado para transportar partícula de grande diâmetro.

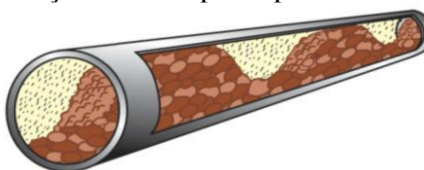
Pode-se classificar o transporte pneumático em fase densa e diluída. O transporte em fase diluída (Figura 2), mais empregado nas indústrias por não requerer mão de obra especializada para montagem e de menor custo inicial, caracteriza-se pelo transporte de baixa concentração de sólido em suspensão com o gás inerte, em velocidade acima de 10 m/s e pressão menor que 15 psig.

Figura 2 – Tubulação de transporte pneumático em fase diluída.



O transporte em fase densa (Figura 3) é caracterizado pela baixa quantidade de gás inerte para movimentar uma grande quantidade de sólidos particulados de forma pulsante, com concentração de partículas acima de 30% em volume, pressão acima de 15 psig e velocidade de gás em geral entre 1 e 5 m/s para não causar danos à tubulação ou as partículas (MORAES, 2012).

Figura 3 – Tubulação de transporte pneumático em fase densa.



O estudo da friabilidade é de grande importância, pois o mesmo permite avaliar a resistência do material a ser transportado antes de incluí-lo no processo industrial.

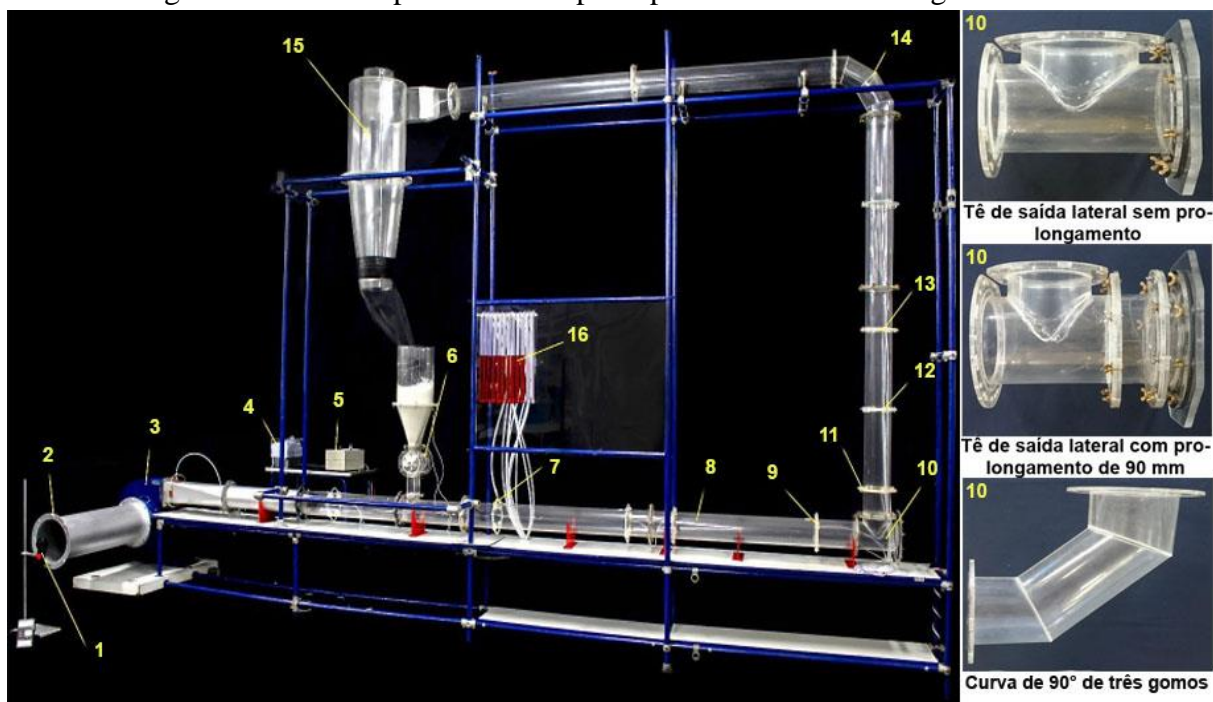
## 2. OBJETIVO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a friabilidade da soja em uma unidade piloto de transporte pneumático em fase diluída, utilizando as singularidades “tê” saída lateral sem prolongamento, com prolongamento de 90 mm, e curva com gomos para determinadas vazões de soja e com uma velocidade definida de ar.

## 3. MATERIAL E MÉTODO

Foi utilizada no presente estudo, uma unidade experimental de transporte pneumático (Figura 4) disponível no Laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília. O mesmo possuía um comprimento de duto reto de 6,13 m, um ciclone de 0,32 m de diâmetro interno, uma curva de 90° de quatro gomos fixa na parte superior do equipamento e uma intercalação das singularidades “tê” saída de lado e curva de três gomos (Figura 4, ponto 10). A soja empregada para o desenvolvimento do estudo foi da marca CAMIL.

Figura 4 – Unidade piloto de transporte pneumático e suas singularidades.



Os componentes da unidade piloto da Figura 4 são: 1- anemômetro (medidor de velocidade); 2- tubo de diâmetro interno de 217 mm; 3- ventilador centrífugo; 4- inversor de frequência; 5- potenciômetro; 6- alimentação de sólido pelo silo; 7- tomadas piezométricas após a alimentação de sólido; 8- tubulação de acrílico de 117 mm de diâmetro interno; 9- tomadas piezométricas a montante da singularidade; 10- singularidades removíveis; 11, 12 e 13- tomadas piezométricas a jusante da singularidade; 14- curva de 90° de quatro gomos; 15- ciclone; 16- banco de manômetros de tubo em “U”. A unidade não era automatizada, exigiu vários operadores para: a) controle da rotação do ventilador; b) controle da vazão de sólido; c) medida da velocidade do ar; d) acompanhamento das pressões; e) verificação da estanqueidade e f)

troca das singularidades. O estudo exigiu a contagem manual dos grãos danificados em cada volta da unidade.

### 3.1 Condições Operacionais

A calibração da válvula rotativa para a determinação das vazões de soja, foi feita pelo método da massa por unidade de tempo. As vazões empregadas para o transporte da soja foram 95,092; 368,470 e 564,383 kg/h, com uma velocidade fixa de 12 m/s na descarga do soprador, mínima necessária para que o material transportado permanecesse em suspensão.

Fixou-se as vazões mássicas de soja e realizou-se testes experimentais utilizando um anemômetro (Figura 4, item 1), para a medida da velocidade de sucção de ar. Após a determinação da área da sucção (0,0370 m<sup>2</sup>), recalque (0,0104 m<sup>2</sup>) e a velocidade de sucção (3,5 m/s), foi obtida a velocidade de descarga pela Equação da Continuidade:

$$v_{suc} \times A_{suc} = v_{des} \times A_{des} \quad (1)$$

$$3,5 \frac{m}{s} \times 0,0370 m^2 = v_{des} \times 0,0108 m^2 \quad (2)$$

$$v_{des} = 12,04 \frac{m}{s} \quad (3)$$

### 3.2 Ensaios

Com uma massa inicial de soja seca de 7781,2 g, foram realizados 90 ensaios conforme as Tabelas 1, 2 e 3. Ao término de cada ensaio, coletou-se num recipiente a massa de soja que foi transportada, verificando-a numa balança com fundo de escala de 8kg para determinar a quantidade de acúmulo que a singularidade “tê” saída de lado forneceu. Esse acúmulo foi o grande responsável pela redução da quebra do material ao deslocar por todo equipamento (efeito colchão amortecedor). O acúmulo foi quantificado por meio da diferença entre a massa inicial depositada no silo e a massa do recipiente que continha soja ao término de cada ensaio.

Após a coleta de massa e identificada a quantidade de acúmulo que os “tês” forneceram, foi distribuído todo o material do recipiente numa tela com suporte para fotografia, a fim de separar os grãos fragmentadas dos resistentes.

## 4. RESULTADOS

A partir das Tabelas 1,2 e 3, nota-se que a quebra da soja não agiu de uma maneira padronizada a cada ensaio. Houve uma oscilação de quebra, independente da singularidade trocada. Percebeu-se também que, com o aumento do prolongamento do tê saída de lado, houve um aumento de seu acúmulo em gramas (o efeito colchão amortecedor é maior) justificando sua eficiência.

Tabela 1 – Friabilidade da soja nas singularidades e vazão de 95,092 kg/h.

Teste de friabilidade com soja - Vazão de 95,092 kg/h											
Curva (T = 24,5 °C)											
Volta	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	Total
m acúmulo (g)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
m quebrado (g)	2,60	2,30	0,90	0,80	1,50	1,00	1,90	2,10	1,60	1,90	16,60
Sem prolongamento (T = 25 °C)											
Volta	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	Total
m acúmulo (g)	544,8	545,5	570,3	559,6	554,4	588,5	544,1	555,0	569,9	553,9	-
m quebrado (g)	1,00	1,40	2,20	1,00	1,40	1,10	0,90	2,00	1,70	1,50	14,20
Prolongamento de 90 mm (T = 25 °C)											
Volta	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	Total
m acúmulo (g)	1088,6	1093,4	1111,8	1072,8	1071,4	1058,1	1044,3	1020,8	1055,5	1052,8	-
m quebrado (g)	0,50	0,50	0,70	1,20	1,20	1,40	1,30	2,00	1,80	1,80	12,40

Tabela 2 – Friabilidade da soja nas singularidades e vazão de 368,47 kg/h.

Teste de friabilidade com soja - Vazão de 368,47 kg/h											
Curva (T = 24,5 °C)											
Volta	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	Total
m acúmulo (g)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
m quebrado (g)	1,00	0,90	1,10	1,40	2,10	0,90	1,60	0,90	2,00	1,90	13,80
Sem prolongamento (T = 23 °C)											
Volta	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	Total
m acúmulo (g)	670,0	655,4	654,8	642,7	653,1	648,1	639,4	650,3	650,3	647,9	-
m quebrado (g)	0,80	1,00	1,40	1,30	1,00	0,90	1,50	2,00	2,10	1,10	13,10
Prolongamento de 90 mm (T = 23 °C)											
Volta	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	Total
m acúmulo (g)	1296,4	1265,6	1244,3	1297,5	1279,0	1255,1	1245,5	1234,3	1239,5	1228,0	-
m quebrado (g)	1,00	0,50	0,30	0,40	0,10	0,10	0,80	0,40	0,50	0,30	4,40

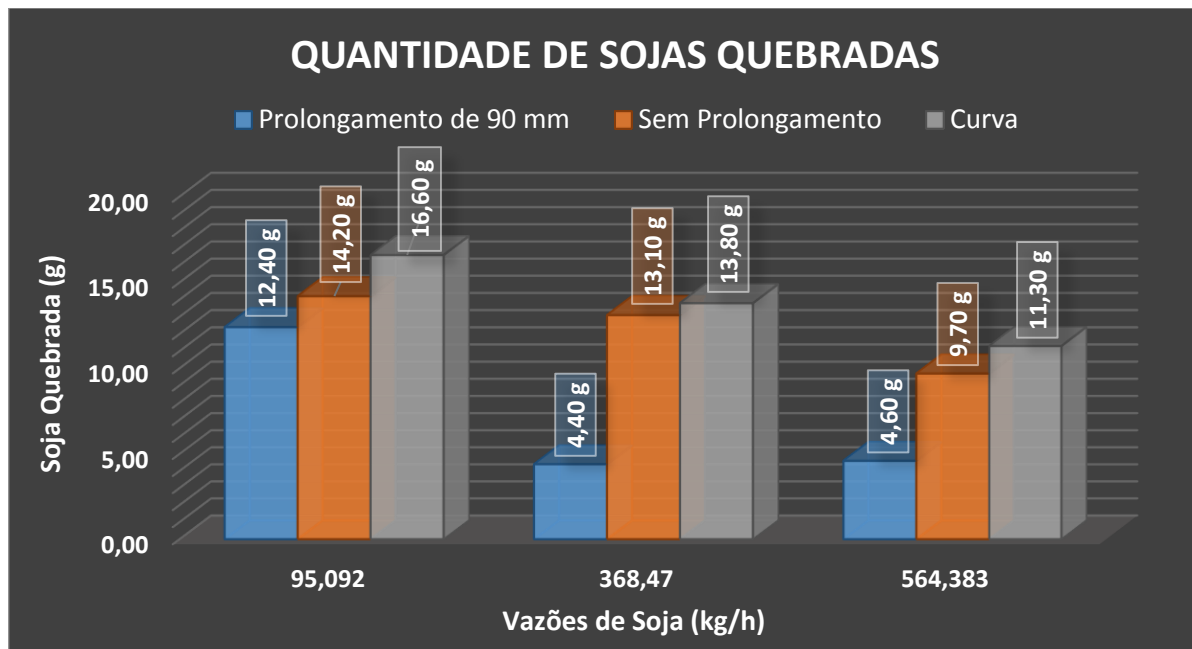
Tabela 3 – Friabilidade da soja nas singularidades e vazão de 564,383 kg/h.

Teste de friabilidade com soja - Vazão de 564,383 kg/h											
Curva (T = 24,5 °C)											
Volta	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	Total
m acúmulo (g)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
m quebrado (g)	1,80	1,00	0,60	0,60	1,00	0,60	1,50	1,60	1,30	1,30	11,30
Sem prolongamento (T = 23 °C)											
Volta	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	Total
m acúmulo (g)	660,5	681,4	712,8	693,3	770,6	755,5	727,5	759,1	761,0	1047,8	-
m quebrado (g)	3,20	0,80	0,40	0,70	0,60	0,40	0,90	1,00	0,90	0,80	9,70
Prolongamento de 90 mm (T = 23 °C)											
Volta	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	Total
m acúmulo (g)	1284,7	1298,2	1304,2	1303,7	1313,8	1315,1	1336,0	1341,1	1333,1	1329,2	-
m quebrado (g)	0,50	0,80	0,50	0,40	0,60	0,20	0,40	0,40	0,30	0,50	4,60

Conforme indicado na Figura 5, o “tê” saída lateral de prolongamento de 90 mm mostrou-se mais efetivo na redução da quebra do material nas vazões de 95,092; 368,470 e 564,383 kg/h. A curva de 90° de 2 gomos não possui acúmulo, e por isso houve um contato maior entre o sólido e a tubulação interna, gerando uma quantidade maior de quebra. O “tê” saída lateral sem prolongamento demonstrou valores intermediários.



Figura 5 – Total de grãos de soja quebradas (ordenada) em relação as três vazões mássicas de soja (abscissas).



## 5. CONCLUSÃO

Concluiu-se que a friabilidade da soja, em relação à mudança de singularidade na parte inferior da unidade experimental (Figura 4, item 10), foi alterada. Conforme indicado na Figura 5, o “tê” saída lateral de prolongamento de 90 mm mostrou-se mais efetivo na redução da quebra do material nas vazões de 95,092; 368,470 e 564,383 kg/h, devido a uma maior quantidade de acúmulo que é formado em seu prolongamento, criando uma condição de colchão amortecedor. Com a maior vazão de grãos de soja (564,383 kg/h) observou-se uma menor quebra em função do menor impacto com os dutos e singularidades.

## 6. REFERÊNCIAS

GOMIDE R.; Operações Unitárias. Transporte de sólidos, São Paulo, ed. Do autor. 1983, v. 1.

MORAES, M.S.; Tese de Doutorado: “Convecção forçada de partículas poliméricas em fase diluída: Curvas de pressão e distribuição de partículas”, UNICAMP, 2012.

MORAES, M.S., TORNEIROS, D.L.M., ROSA, V.S., HIGA, J.S., CASTRO, Y.R., SANTOS, A.R., COELHO, N.M.A., MORAES JUNIOR, D. Experimental quantification of the head loss coefficient  $k$  for fittings and semi-industrial pipe cross section solid concentration profile in pneumatic conveying of polypropylene pellets in dilute phase. Powder Technology 310 pg 250-263, 2017.