

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

VANDERLEI APARECIDO TAVARES

**TRANSPORTE PNEUMÁTICO DE SOJA EM FASE DILUÍDA: OBTENÇÃO
DA PERDA DE CARGA E DISTRIBUIÇÃO DE PARTÍCULAS NA SEÇÃO
TRANSVERSAL DA TUBULAÇÃO HORIZONTAL**

SANTOS/SP

2014

VANDERLEI APARECIDO TAVARES

**TRANSPORTE PNEUMÁTICO DE SOJA EM FASE DILUÍDA: OBTENÇÃO
DA PERDA DE CARGA E DISTRIBUIÇÃO DE PARTÍCULAS NA SEÇÃO
TRANSVERSAL DA TUBULAÇÃO HORIZONTAL**

Dissertação apresentada à Universidade
Santa Cecília como parte dos requisitos
para obtenção de título de mestre no
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, sob orientação de:

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Karina Tamião de Campos Roseno

Coorientador: Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior.

SANTOS/SP

2014

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos

TAVARES, Vanderlei Aparecido.

Transporte Pneumático de soja em fase diluída: Obtenção da perda de carga e distribuição de partículas na seção transversal da tubulação/Vanderlei Aparecido Tavares. Santos/SP, 2014
92 p.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Karina Tamião de Campos Roseno
Coorientador: Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Santa Cecília,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2014.

1. Transporte Pneumático. 2. Fase Diluída. 3. Unidade Piloto
4. Soja. 5. Perda de Carga. I. Roseno, Karina Tamião de Campos,
II. Moraes, Deovaldo Junior III. Transporte Pneumático de soja em fase diluída: Obtenção da perda de carga e distribuição de partículas na seção transversal da tubulação horizontal.

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas - Unisanta

DEDICATÓRIA

*Dedico,
à minha esposa Rosangela,
à minha filha Vanessa,
que sempre me apoiaram em meus
desafios acadêmicos e profissionais,
que muitas vezes consumiram tempo
que seria dedicado à família e ao pai,
João Tavares de Lacerda “in memoriam”.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Nosso Senhor Jesus Cristo por serem os meus grandes guias e iluminarem os meus caminhos e apontarem a direção a ser seguida.

À minha mãe, Maria e minhas irmãs, Shirley, Sandra, Silvia e Camila por serem o meu porto seguro.

À minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Karina Tamião de Campos Roseno pelo profissionalismo, disponibilidade, competência e sobretudo pela paciência com o autor deste trabalho e ao meu coorientador Prof^o. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior, pelo entusiasmo e pela evidente satisfação na nobre arte do magistério, sendo um verdadeiro consultor.

Às estagiárias do Laboratório de Operações Unitárias da Unisanta, Daniella de Oliveira Alves, Ana Virgínia Almeida de França e Flávia Cristina Franco Lopes pelo auxílio na realização dos experimentos e na operação da Unidade Piloto de Transporte Pneumático.

Ao Prof^o. Dr. Aldo Ramos Santos, petroleiro como eu, por ser uma fonte de inspiração ao mostrar que nunca é tarde para atingirmos os nossos objetivos.

Aos Professores do Programa de Mestrado de Engenharia Mecânica da Unisanta pelo profissionalismo com que conduziram as disciplinas durante o período das aulas.

Aos colegas com os quais cursei as disciplinas, tanto obrigatórias quanto optativas do Programa de Mestrado de Engenharia Mecânica da Unisanta por tornarem a minha caminhada mais fácil.

RESUMO

O Transporte Pneumático utiliza um fluido, em geral o ar, para o deslocamento de diversos sólidos através de tubulações, sendo amplamente empregado em muitos processos industriais e agrícolas, principalmente em virtude do baixo custo de operação e manutenção e da flexibilidade na montagem. Normalmente, o Transporte Pneumático é operado em fase diluída, processo no qual as partículas ficam suspensas no interior dos dutos devido às altas velocidades do ar. As principais desvantagens desse sistema são o alto consumo de energia e a abrasão na parte inferior das tubulações devido à má distribuição das partículas. Atualmente, o Brasil produz mais de 80 milhões de toneladas de soja, sendo superado apenas pelos Estados Unidos, o que demonstra a importância dessa cultura para o País. A velocidade do ar em função da perda de carga é de suma importância para o projeto de um Transportador Pneumático, pois a velocidade não pode ser elevada para não haver desperdício de energia e eventualmente causar degradação das partículas deslocadas e não pode ser tão baixa de tal modo que o sólido não se deposite na tubulação. O fato da velocidade adequada ser dependente das propriedades físicas da partícula, dificulta o projeto, uma vez que há escassez na literatura de equações de dimensionamento para esta operação unitária. Portanto, o objetivo deste trabalho foi verificar a perda de carga e a distribuição das partículas em uma seção horizontal da tubulação no deslocamento de grãos de soja em uma Unidade Piloto de Transporte Pneumático, composta basicamente por um ventilador, conectado a um motor elétrico com potência de 1 hp, com controle de velocidade. Os sólidos foram injetados no duto horizontal do Transportador através de um silo, cuja vazão foi controlada por meio de uma válvula rotativa. Para a realização dos experimentos, foram utilizadas as velocidades do ar de 12,32, 14,03 e 15,40 m/s e vazões de 0,034, 0,058, 0,076 e 0,098 kg/s. Os resultados demonstraram que houve um acúmulo da ordem de oitenta por cento dos grãos de soja na parte inferior da tubulação, assim como foram obtidos os pontos das curvas de perda de carga para o deslocamento dessa leguminosa em pontos estratégicos da Unidade Piloto. A perda de carga prevista nas equações foi, em média, 3,3 vezes superior à que foi encontrada experimentalmente.

Palavras chave: transporte pneumático, fase diluída, unidade piloto, soja.

ABSTRACT

The Pneumatic Conveying uses a fluid, usually air, to the displacement of many solids through pipes, being widely employed in many industrial and agricultural processes, mainly due to the low cost of operation and maintenance and the flexibility. Typically, the pneumatic conveying is operated in dilute phase, process in which the particles are suspended inside the ducts due to high air velocities. The main disadvantages of this system are high power consumption and abrasion on the bottom of the pipes due to poor distribution of the particles. Nowadays, Brazil produces over 80 million tons of soybeans, surpassed only by the United States that demonstrates the importance of culture to the country. The air velocity as a function of pressure loss is very important for the design of Inflatable one conveyor, because the speed cannot be increased to be no waste of energy and eventually cause degradation of particles displaced and cannot be so low so that the solid does not deposit in the tubing. The fact that the appropriate speed is dependent on the physical properties of the particles makes it difficult to design, since there is a shortage in the literature design equations for this unit operation. Therefore, the objective of this study was to assess the loss and the distribution of particles in a horizontal section of pipe in the displacement of soybeans in a Pilot Unit Pneumatic Conveying, composed by a fan, connected to an electric motor with power 1 hp, with speed control. The solids were injected into the horizontal conveyor duct through a silo whose flow was controlled by a rotary valve. The air velocities of 12.32, 14.03 and 15.40 m/s flow rates of 0.034, 0.058, 0.076 and 0.098 kg/s were used for the experiments; The results showed that there was a buildup on the order of eighty percent of the soybeans at the bottom of pipe, as well as the pressure drop points of curves for the displacement in beans at strategic points of the pilot plant were obtained. The pressure loss in the equations obtained was on average 3.3 times higher to that found experimentally.

Keywords: pneumatic conveying. dilute phase. pilot unit. soybean.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Principais componentes dos grãos de soja	19
Figura 2.2 – Mudança da fase diluída para a fase densa, onde v é a velocidade do ar e G a vazão do sólido	22
Figura 3.1 – Unidade Piloto de Transporte Pneumático Projetada e Instalada no Laboratório de Operações Unitárias da Unisanta	27
Figura 3.2 – Esboço da Unidade Piloto de Transporte Pneumático	28
Figura 3.3 – Ventilador Centrífugo	29
Figura 3.4 – Duto de Sucção	29
Figura 3.5 – Motor Elétrico utilizado para acionar o Ventilador da Unidade	31
Figura 3.6 – Inversor de Frequência	31
Figura 3.7 – Válvula Rotativa	32
Figura 3.8 – Controlador de Velocidade do Motor da Válvula Rotativa	33
Figura 3.9 – Banco de Tubos em “U”	34
Figura 3.10 – Detalhe da tubulação horizontal da Unidade Piloto	35
Figura 3.11 – Tubulação Vertical	35
Figura 3.12 – Silo para armazenamento dos grãos de soja	36
Figura 3.13 – Perfil do módulo de coleta.....	36
Figura 3.14 – Vista frontal do módulo de coleta.....	37
Figura 4.1 – Distribuição dos grãos de soja em g/cm^2 para a vazão de 0,034 Kg/s.....	49
Figura 4.2 – Distribuição dos grãos de soja para vazão de 0,034 kg/s	50
Figura 4.3 – Distribuição dos grãos de soja em g/cm^2 para a vazão de 0,058 kg/s.....	51
Figura 4.4 – Distribuição dos grãos de soja para vazão de 0,058 kg/s.....	53
Figura 4.5 – Distribuição dos grãos de soja em g/cm^2 para a vazão de 0,076 kg/s.....	54
Figura 4.6 – Distribuição dos grãos de soja para vazão de 0,076 kg/s.....	55
Figura 4.7 – Distribuição dos grãos de soja em g/cm^2 para a vazão de 0,098 kg/s.....	56
Figura 4.8 – Distribuição dos grãos de soja para vazão de 0,098 kg/s.....	57
Figura 4.9 – Pontos da curva da perda de carga da soja entre os pontos P1 e P10.....	60

Figura 4.10 – Pontos da curva da perda de carga da soja entre os pontos P3 e P4.....	61
Figura 4.11 – Pontos da curva da perda de carga da soja entre os pontos P7 e P8.....	62
Figura 4.12 – Pontos da curva da perda de carga da soja entre os pontos P1 e P7.....	63
Figura E1 – Distribuição porcentual dos grãos de soja para a vazão de 0,034 kg/s.....	82
Figura E2 – Distribuição dos grãos de soja para a vazão de 0,034 kg/s.....	83
Figura F1 – Distribuição porcentual dos grãos de soja para a vazão de 0,058 kg/s.....	84
Figura F2 – Distribuição dos grãos de soja para a vazão de 0,058 kg/s	85
Figura G1 – Distribuição porcentual dos grãos de soja para a vazão de 0,076 kg/s.....	86
Figura G2 – Distribuição dos grãos de soja para a vazão de 0,076 kg/s	87
Figura H1 – Distribuição porcentual dos grãos de soja para a vazão de 0,098 kg/s.....	88
Figura H2 – Distribuição dos grãos de soja para a vazão de 0,098 kg/s	89
Figura I1 – Curva de Perda de Carga em entre os pontos P1 e P10.....	90
Figura I2 – Curva de Perda de Carga em entre os pontos P3 e P4	91
Figura I3 – Curva de Perda de Carga em entre os pontos P7 e P8	91
Figura I4 – Curva de Perda de Carga em entre os pontos P1 e P7.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição Físico-Química da soja	20
Tabela 3.1 – Velocidades do ar no duto de sucção	38
Tabela 3.2 – Áreas dos coletores	41
Tabela 3.3 – Dados para cálculo da perda de carga de soja	42
Tabela 4.1 – Velocidades no duto de sucção	45
Tabela 4.2 – Velocidades nos Tubos de Descarga.....	46
Tabela 4.3 – Relação entre a posição da válvula rotativa e a vazão mássica ...	46
Tabela 4.4 – Relação entre vazão mássica e posição do potenciômetro.....	47
Tabela 4.5 – Perda de Carga para Vazão de 0,034 kg/s.....	58
Tabela 4.6 – Perda de Carga para Vazão de 0,058 kg/s.....	59
Tabela 4.7 – Perda de Carga para Vazão de 0,076 kg/s.....	59
Tabela 4.8 – Perda de Carga para Vazão de 0,098 kg/s.....	59
Tabela B1 – Distribuição da soja para Vazão de soja de 0,034 Kg/s	76
Tabela B2 – Distribuição da soja para Vazão de soja de 0,058 Kg/s	76
Tabela B3 – Distribuição da soja para Vazão de soja de 0,076 Kg/s	77
Tabela B4 – Distribuição da soja para Vazão de soja de 0,098 Kg/s	77
Tabela C1 – Vazão de 0,034 kg/s	78
Tabela C2 – Vazão de 0,058 kg/s	78
Tabela C3 – Vazão de 0,076 kg/s	79
Tabela C4 – Vazão de 0,098 kg/s	79
Tabela D1 – Distribuição percentual para a vazão de 0,034 Kg/s	80
Tabela D2 – Distribuição percentual para a vazão de 0,058 Kg/s	80
Tabela D3 – Distribuição percentual para a vazão de 0,076 Kg/s	81
Tabela D4 – Distribuição percentual para a vazão de 0,098 Kg/s	81
Tabela I1 – Valores de Pressão do Ar nos Pontos de Tomada em mmca	90

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A_c – Área do coletor

C – Capacidade de transporte do sistema pneumático

d – diâmetro médio da partícula de soja em mm

D – diâmetro do duto de transporte em mm

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

L_t – perda de carga por atrito devido ao comprimento total do transportador pneumático

L_h – perda de carga devido ao trecho horizontal do duto de transporte

L_v – perda de carga devido ao trecho vertical do duto de transporte

L_e – perda de carga devido aos acessórios de tubulação

m_c – massa dos grãos de soja no coletor

M_p – massa dos grãos de soja por área

P – Potência requerida

P_1 – Potência do sistema com conexão direta

P_2 – Potência requerida considerando-se o rendimento do ventilador

PVC – Curva mínima de pressão

Q – Vazão do ar

X – relação de sólidos em peso em kg de sólidos/kg de ar

ΔP_e – perda de carga nos equipamentos acoplados à tubulação do transportador pneumático

ΔP_t – Perda de carga total no transportador pneumático

μ – fator de redução da aceleração do material

π - letra grega usada para exprimir o valor de constante usada para calcular o perímetro da circunferência, tem valor aproximado a 3,1415926536;

ρ – letra grega que representa a densidade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 GENERALIDADES	16
1.2 OBJETIVOS	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 SOJA	19
2.2 TRANSPORTE PNEUMÁTICO	20
3. MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1 MATERIAL.....	27
3.1.1 UNIDADE PILOTO	27
3.1.1.1 VENTILADOR CENTRÍFUGO	29
3.1.1.2 MOTOR ELÉTRICO PARA ACIONAMENTO DO VENTILADOR CENTRÍFUGO	30
3.1.1.3 INVERSOR DE FREQUÊNCIA	31
3.1.1.4 VÁLVULA ROTATIVA OU TREMONHA	32
3.1.1.5 BANCO DE TUBOS EM “U”	33
3.1.1.6 TUBULAÇÃO DA UNIDADE PILOTO	34
3.1.1.7 SILO	36
3.1.1.8 MÓDULO DE COLETA	36
3.1.2 INSTRUMENTOS DE MEDIDA	37
3.1.3 MATERIAIS AUXILIARES	38
3.2 MÉTODOS	38
3.2.1 VELOCIDADE DO AR NO DUTO DE SUCÇÃO.....	38
3.2.2 DIÂMETROS DOS DUTOS.....	39
3.2.3 CALIBRAÇÃO DA VÁLVULA ROTATIVA	39
3.2.4 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE DA SOJA	39
3.2.5 DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE SOJA NO DUTO HORIZONTAL	40
3.2.6 DETERMINAÇÃO DA CURVA DE PERDA DE CARGA DO AR EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE.....	41

3.2.7 DETERMINAÇÃO DA PERDA DE CARGA DA SOJA	42
3.2.8 COMPARAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS DA PERDA DE CARGA DOS GRÃOS DE SOJA COM VALORES TÉORICOS CALCULADOS	42
3.3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA TRATAMENTO DOS DADOS.....	43
3.3.1 DETERMINAÇÃO DA VAZÃO E VELOCIDADE DE SUCÇÃO PELOS ANEMÔMETROS	43
3.3.2 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE NO TUBO DE DESCARGA.....	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 VELOCIDADE DO AR NO DUTO DE SUCÇÃO	45
4.2 DIÂMETROS DOS DUTOS DE SUCÇÃO E DE DESCARGA	45
4.3 VELOCIDADES NO TUBO DE DESCARGA DO TRANSPORTADOR PNEUMÁTICO	45
4.4 CALIBRAÇÃO DA VÁLVULA ROTATIVA OU CARAMBOLA	46
4.5 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE DA SOJA	47
4.6 DISTRIBUIÇÃO DOS GRÃOS DE SOJA NO TRECHO HORIZONTAL DA UNIDADE PILOTO.....	47
4.6.1 DISTRIBUIÇÃO DOS GRÃOS DE SOJA POR ÁREA DO COLETOR	48
4.6.2 DISTRIBUIÇÃO DOS GRÃOS DE SOJA EM VALORES PERCENTUAIS	48
4.6.3 ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DA SOJA POR ÁREA DO COLETOR	48
4.6.3.1 DISTRIBUIÇÃO DA SOJA PARA A VAZÃO DE 0,034 kg/s ...	48
4.6.3.2 DISTRIBUIÇÃO DA SOJA PARA A VAZÃO DE 0,058 kg/s...	51
4.6.3.3 DISTRIBUIÇÃO DA SOJA PARA A VAZÃO DE 0,076 kg/s...	53
4.6.3.4 DISTRIBUIÇÃO DA SOJA PARA A VAZÃO DE 0,098 kg/s...	56
4.7 CURVA DE PERDA CARGA DO AR EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE ..	58
4.8 PERDA DE CARGA DA MISTURA AR COM GRÃOS DE SOJA	58
4.8.1 PERDA DE CARGA DA MISTURA AR COM GRÃOS DE SOJA ENTRE OS PONTOS P1 E P10.....	59
4.8.2 PERDA DE CARGA DA MISTURA AR COM GRÃOS DE SOJA ENTRE OS PONTOS P3 E P4.....	60
4.8.3 PERDA DE CARGA DA MISTURA AR COM GRÃOS DE SOJA	

ENTRE OS PONTOS P7 E P8	61
4.8.4 PERDA DE CARGA DA MISTURA AR COM GRÃOS DE SOJA	
ENTRE OS PONTOS P1 E P7	62
4.9 DADOS CALCULADOS DA PERDA DE CARGA DOS GRÃOS DE SOJA	
ENTRE OS PONTOS P1 E P7	63
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
APÊNDICE A – ARTIGO PUBLICADO NA REVISTA UNISANTA SCIENCE AND TECHNOLOGY.....	71
APÊNDICE B – DISTRIBUIÇÃO DOS GRÃOS DE SOJA NO DUTO HORIZONTAL DA UNIDADE PILOTO DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO	76
APÊNDICE C – DISTRIBUIÇÃO DOS GRÃOS DE SOJA NO DUTO HORIZONTAL DA UNIDADE PILOTO DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO POR ÁREA DE CADA COLETOR	78
APÊNDICE D – DISTRIBUIÇÃO DOS GRÃOS DE SOJA NO DUTO HORIZONTAL DA UNIDADE PILOTO DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO EM VALORES PERCENTUAIS	80
APÊNDICE E – GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DOS GRÃOS DE SOJA NO DUTO HORIZONTAL DA UNIDADE PILOTO DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO EM VALORES PERCENTUAIS PARA A VAZÃO DE 0,034 kg/s	82
APÊNDICE F – GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DOS GRÃOS DE SOJA NO DUTO HORIZONTAL DA UNIDADE PILOTO DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO EM VALORES PERCENTUAIS PARA A VAZÃO DE 0,058 kg/s	84
APÊNDICE G – GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DOS GRÃOS DE SOJA NO DUTO HORIZONTAL DA UNIDADE PILOTO DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO EM VALORES PERCENTUAIS PARA A VAZÃO DE 0,076 kg/s	86
APÊNDICE H – GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DOS GRÃOS DE SOJA NO DUTO HORIZONTAL DA UNIDADE PILOTO DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO EM VALORES	

PERCENTUAIS PARA A VAZÃO DE 0,098 kg/s	88
APÊNDICE I – DADOS E GRÁFICOS DAS CURVAS DE PERDA DE CARGA DO AR EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE	90
APÊNDICE J – CÁLCULO DA PERDA DE CARGA TRECHO HORIZONTAL DA UNIDADE PILOTO	93

1. INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

O transporte pneumático utiliza um fluido, normalmente o ar, para deslocar materiais particulados através de tubulações e é uma importante operação usada em diversos processos industriais e agrícolas. Entretanto, se houver condições diferenciadas nos ambientes, tais como, riscos de incêndio, de explosão ou para a saúde dos trabalhadores, outros tipos de gases podem ser utilizados. O deslocamento das partículas pode ser realizado por ventilador, soprador ou compressor em função da pressão requerida pelo sistema de dutos e acessórios.

O sistema de transporte pneumático pode ser dividido em dois tipos, sendo o de fase densa, com concentração de partículas acima de 30% em volume e o de fase diluída, com concentração inferior a 1% (PAIXÃO, 1995).

As vantagens apresentadas por este tipo de transporte de partículas são (MARCUS, 2010; SILVA, 2005):

- a) pouco risco de contaminação para o elemento particulado, pois ao ser transportado em dutos, não possui contato com ambiente e não sofre ação do ambiente e de intempéries;
- b) sistemas com flexibilidade de montagem, uma vez que podem ser utilizados dutos verticais, inclinados, horizontais;
- c) baixo custo de operação e de manutenção;
- d) flexibilidade, pois o mesmo dispositivo pode transportar diversos tipos de materiais, desde que as propriedades ou características sejam similares;
- e) facilidade para automatização de sistemas;
- f) higiene e segurança dos trabalhadores no ambiente trabalho;
- g) diminui, ou ainda, elimina a perda de produto transportado.

Por outro lado, o sistema de transporte pneumático apresenta as seguintes desvantagens (MARCUS, 2010; STOESS, 1970):

- a) alto consumo de energia;
- b) provoca abrasão dos dutos de transporte, principalmente na parte inferior;
- c) pode causar degradação dos sólidos transportados, caso o sistema não seja dimensionado corretamente;
- d) distâncias limitadas;
- e) projetos e dimensionamentos complexos;
- f) transporte de produtos em um sentido.

Devido ao alto consumo de energia, sistemas de transporte pneumático são mais indicados para deslocar partículas finas em curtas distâncias. A maioria dos sistemas existentes operam com vazões entre 1 e 400 toneladas por hora, distâncias menores que 1 Km e partículas com diâmetros inferiores a 10 mm (MARCUS, 2010).

As características físicas ou químicas dos sólidos podem dificultar a sua movimentação através da modalidade de transporte pneumático. São elas (SILVA, 2005):

- a) dimensões ou massas volumétricas grandes, que requerem velocidades de gás elevadas;
- b) umidade excessiva das partículas, tornando-as pegajosas;
- c) temperatura elevada, incompatível com os dispositivos usados para o transporte;
- d) fragilidade das partículas, as quais podem se romper, sofrer redução ou mudança de seus aspectos durante o transporte.

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja, sendo a sua produção superada apenas pela dos Estados Unidos, segundo informações da empresa Embrapa Soja (EMBRAPA, 2012), o que demonstra a importância dessa cultura agrícola para o país.

Conforme a empresa Embrapa Soja (EMBRAPA, 2013), os números da cultura da soja para a safra 2010/2011 foram os seguintes:

- a) produção mundial de 263,7 milhões de toneladas, com área plantada de 103,5 milhões de hectares;
- b) produção na América do Sul de 135,7 milhões de toneladas, com área plantada de 47,5 milhões de hectares;
- c) produção nos Estados Unidos de 90,6 milhões de toneladas, com área plantada de 31,0 milhões de hectares, com produtividade 2.922 kg/ha;
- d) produção no Brasil de 75,0 milhões de toneladas, com área plantada de 24,2 milhões de hectares, com produtividade de 3.106 kg/ha.

Dentro deste contexto, o tópico a seguir apresenta os objetivos, tanto geral, quanto os específicos do presente trabalho.

1.2 OBJETIVOS

Esta pesquisa visou como objetivo geral, analisar a perda de carga em uma Unidade Piloto de Transporte Pneumático em fase diluída para deslocar grãos de soja, assim como obter a distribuição das partículas de soja na seção transversal da tubulação horizontal do sistema. Teve como objetivos específicos:

- a) calibrar o potenciômetro que controla a válvula rotativa;
- b) determinar a densidade aparente dos grãos de soja;
- c) comparar a perda de carga experimental com as equações fornecidas na literatura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOJA

A soja é uma planta pertencente à família *Leguminosae*, sub-família *Faboidae*, gênero *Glycine* e espécie *Glycine Max*. Ela é uma leguminosa herbácea e trata-se de um produto agrícola com grande importância econômica, tanto externa quanto interna para o Brasil, não só pelo seu valor nutricional como grão para consumo, mas pelas grandes possibilidades de utilização devido aos seus altos teores de óleo e proteína além da boa valorização comercial de seus resíduos Ribeiro *et al.* (2005).

A supracitada leguminosa é nativa do sudeste da Ásia, especificamente da região da Manchúria, onde seu cultivo era concentrado em áreas úmidas, principalmente próximas a lagos e rios. Seus grãos são aproximadamente esféricos e compostos basicamente por três partes, denominadas de casca, cotilédone e hipocótilo ou germe. Sojas cultivadas contém aproximadamente 8 % de casca, enquanto 90 % é cotilédone e apenas 2 % é composto por hipocótilo (HOFMANN, 2012). A Figura 2.1 ilustra os principais componentes dos grãos de soja.

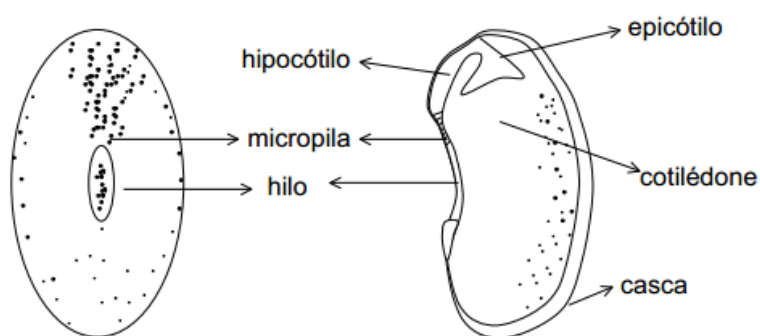


Figura 2.1 – Principais componentes dos grãos de soja (HOFMANN, 2012)

A soja apresenta as características físico-químicas e nutricionais que são apresentadas na Tabela 2.1 (KAGAWA, 1995).

Tabela 2.1 – Composição Físico-Química da soja (KAGAWA, 1995)

Nutrientes						Minerais								
Energia	Umidade	Proteínas	Lipídios	Carboidratos		Cinzas	Ca	P	Fe	Na	K	Mg	Zn	Cu
(Kcal	(g/100g)	(g/100g)	(g/100g)	(g/100g)		(g/100g)							(μg/100g)	(μg/100g)
/100 g)				açúcares fibras			(mg/100g)							
417	11,0	38,0	19,0	23,0	4,0	5,0	240	580	9,4	1,0	1900	220	3200	980

Segundo (HOFMANN, 2012), a densidade aparente da soja seca varia de 0,989 a 1,149 g/cm³. Moura *et al.* (2009) apresenta valores entre 1,11 e 1,25 g/cm³. Para Vieira *et al.* (1997), os dados levantados oscilam entre de 1,1592 a 1,1992 g/cm³ para seis cultivares de soja entre as mais plantadas no Brasil.

2.2 TRANSPORTE PNEUMÁTICO

O transporte pneumático de sólidos granulares é classificado em dois tipos, de acordo com o regime de fluxos de deslocamento das partículas e concentração dos sólidos particulados. A classificação é feita em fase diluída e fase densa.

Na fase diluída, o transporte pneumático é caracterizado por velocidades elevadas de ar, maior que 10 m/s, baixas concentrações de sólidos, menos que 1% em volume e baixas quedas de pressão por unidade de comprimento de linha de transporte, tipicamente menos de 5 mbar/m. É indicado para pequenas extensões e vazões de sólidos inferiores a 10 toneladas/hora. Sob condições de fluxo diluído, as partículas se comportam como individuais, são completamente suspensas no gás e as forças de interação fluido-partícula predominam (RHODES, 2004).

A fase densa é caracterizada por baixas velocidades de gás, tipicamente entre 1 e 5 m/s, altas concentrações de sólidos, maior que 30% em volume e

altas quedas de pressão por unidade de comprimento do tubo (tipicamente maior que 20 mbar/m) (RHODES, 2004).

Quando sólidos à granel são deslocados em um sistema de transporte pneumático, há três tipos de fluxo (PAN, 1999):

- a) transição suave da fase densa para a fase diluída, comum em sólidos finos como cimento, carvão pulverizado e cinzas;
- b) fase diluída, zona instável e fluxo na forma de golpes, comum em produtos granulares leves e de fluxo livre como *pellets* de plásticos, arroz, trigo;
- c) somente fase diluída, característica de materiais triturados, granulares pesados como carvão, concreto primário, areia e também alguns materiais leves, fibrosos e esponjosos como lasca de madeira, grão em pó, serragem.

A Figura 2.2 apresenta a transição suave da fase diluída para a densa. Pode-se verificar que ao reduzir a velocidade do ar da máxima para mínima e mantendo-se uma vazão mássica de produto constante a queda de pressão também diminui, atingindo um valor mínimo. A direita deste ponto mínimo de pressão refere-se à fase diluída. Entretanto, se a velocidade de ar continua a diminuir, a queda de pressão aumenta para uma taxa mais alta do que a da fase diluída, esta região é denominada de fase densa. Nessa mesma Figura, para a mesma velocidade, quanto maior a vazão de sólidos (G) maior a queda de pressão (KLINZING *et al.* 1997).

No transporte pneumático horizontal, a velocidade de saltitação representa a mínima velocidade do gás para que as partículas sejam transportadas com a máxima economia de energia e sem causar o entupimento da tubulação (SANTOS, 2009), enquanto a velocidade de afogamento é definida como a mínima velocidade do gás em que é possível realizar a operação de transporte das partículas e representa o limite entre transporte pneumático vertical de fase diluída e o de fase densa (RHODES, 2004).

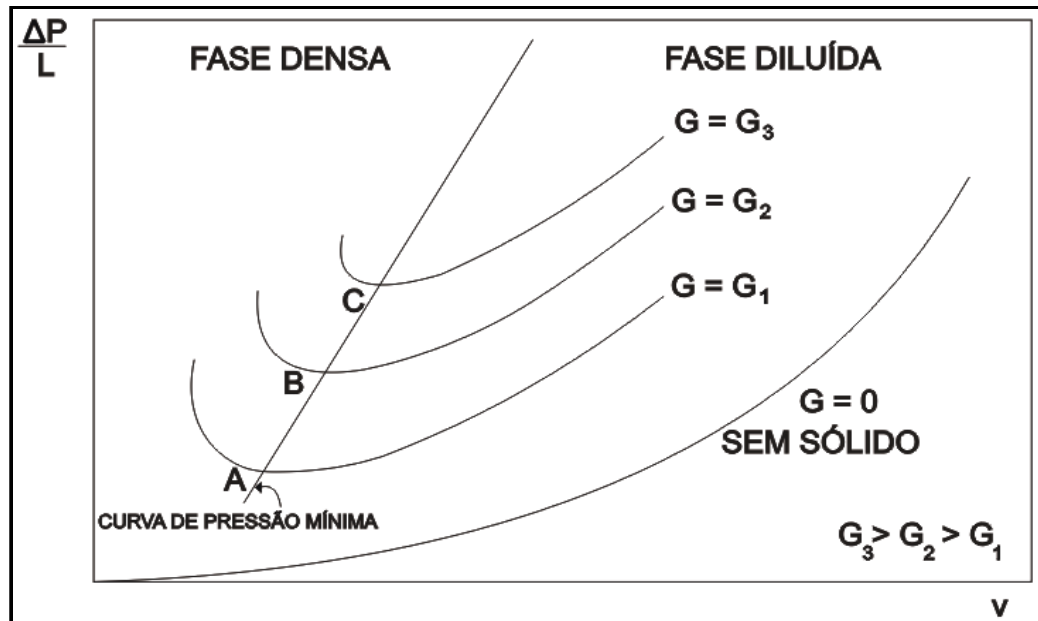


Figura 2.2 – Mudança da fase diluída para a fase densa, onde v é a velocidade do ar e G a vazão do sólido (KLINZING *et al.*, 1997)

O primeiro sistema de transporte pneumático documentado foi implantado em 1847, em uma planta industrial da fábrica da Peugeot, situada em Valentigney, França. Ele era utilizado para retirar o pó originado durante processo fabril em moedores de pedra (MOLERUS, 1996).

Embora o transporte pneumático de sólidos venha sendo utilizado em diversos processos industriais desde o século XIX e mesmo com avanço de pesquisas sobre o tema desde essa época, é difícil estabelecer relações matemáticas abrangentes e genéricas para os mais diversos sistemas, devido principalmente aos seguintes fatores (PAN, 1999):

- sistemas de transporte com diferentes desenhos e formatos de construção;
- grande variedade de tipos de sólidos a transportar e com características distintas, tais como dimensões, densidade, dureza;
- condições ambientais diferentes no ambiente industrial, que afetam tanto o gás transportador, quanto os sólidos, como por exemplo, temperatura, umidade, pressão atmosférica.

Entretanto, alguns pesquisadores (GOMIDE, 1983; SILVA, 2005) estudaram os fenômenos físicos que interferem no transporte pneumático e, através de resultados experimentais obtiveram relações matemáticas que auxiliam no projeto e dimensionamento dos sistemas.

As equações desenvolvidas (GOMIDE, 1983) são apresentadas no texto que segue:

a) A equação (2.1) apresenta o cálculo da velocidade de transporte:

$$V = 4,11 \sqrt[3]{\rho} + \sqrt{d} + 23,4 \sqrt{\rho} \quad (2.1)$$

Em que:

V é a velocidade de transporte em m/s

ρ é a densidade aparente do sólido em t/m³

d é o diâmetro médio da partícula em mm

b) O diâmetro do duto de transporte pode ser obtido pela equação (2.2):

$$D = 3016 \frac{\sqrt{C}}{V^{0,98}} \quad (2.2)$$

Sendo:

D o diâmetro do duto em mm

C a capacidade do sistema em t/h

V a velocidade de transporte em m/s

c) Com a equação (2.3) obtém-se a vazão do ar de transporte:

$$Q = \frac{VD^2}{1,26 \cdot 10^6} \quad (2.3)$$

Em que:

Q é a vazão do ar de transporte em m³/s

V é a velocidade de transporte em m/s

D é o diâmetro interno da tubulação em mm

d) A relação de sólido em peso é fornecida pela equação (2.4):

$$X = \frac{C}{4,29 \cdot Q} \quad (2.4)$$

Em que:

X é a relação de sólidos em peso em kg de sólidos/kg de ar

C é a capacidade do sistema em t/h

Q é a vazão do ar de transporte em m³/s

e) A perda de carga por atrito obtém-se através da equação (2.5):

$$L_t = L_h + L_v + L_e \quad (2.5)$$

Em que:

L_t é a perda de carga por atrito devido ao comprimento total da tubulação em m

L_h é a perda de carga devido ao trecho horizontal do duto de transporte em m

L_v é a perda de carga devido ao trecho vertical do duto de transporte em m

L_e é perda de carga devido às curvas do duto de transporte em m

f) Com a equação (2.6) tem-se o cálculo da Perda de Carga Total do Transporte Pneumático:

$$\Delta P_t = \left[1,68 \cdot L_t \cdot (X+3,5) \cdot \frac{V^{1,8}}{D^{1,22}} + 0,138 \cdot \mu \cdot X \cdot V^2 + \Delta P_e \right] \cdot 10^{-4} \quad (2.6)$$

Em que:

ΔP_t é a Perda de Carga Total em kgf/cm^2

L_t é o comprimento total em m, soma dos trechos horizontais com o dobro do comprimento vertical e com o comprimento equivalente das curvas e singularidades

X é a relação de sólidos em peso em kg de sólidos/kg de ar

V é a velocidade de transporte em m/s

D é o diâmetro interno da tubulação em mm

μ é o fator de redução da aceleração do material; adotar zero para o valor deste adimensional se o ponto de alimentação estiver localizado um pouco antes da aspiração do ventilador ou soprador; adotar 0,5 para alimentação logo na entrada do ventilador e empregar o valor unitário para este fator no caso do material ser alimentado após o ventilador.

ΔP_e é a perda de carga nos equipamentos acoplados à linha como: ciclone, filtro, Venturi, câmaras de poeira, entrada e saída de ar em mmca. Esses valores são tabelados.

g) Com a equação (2.7), calcula-se a potência requerida pelo sistema:

$$P = 131,51 \cdot Q \cdot \Delta P_t \quad (2.7)$$

Sendo:

P a Potência requerida pelo sistema em hp

Q a vazão do ar de transporte em m^3/s

ΔP_t é a Perda de Carga Total em kgf/cm^2

h) Para a potência requerida com conexão direta, utiliza-se a equação (2.8):

$$P_1 = 1,25 \cdot P \quad (2.8)$$

Em que:

P_1 é a potência considerando-se sistema com conexão direta em (hp)

P é a potência requerida pelo sistema em (hp)

i) E considerando o rendimento do ventilador, aplica-se a equação (2.9):

$$P_2 = P_1 / 0,7 \quad (2.9)$$

Sendo:

P₂ a potência requerida, considerando-se o rendimento do ventilador de 70%, em (hp)

Foram realizadas buscas nas bases de pesquisa, especificamente sobre o projeto de um transporte pneumático para soja e foi verificado escassez sobre esse assunto, o que motivou analisar o comportamento do transporte do grão de soja em uma Unidade Piloto de Transporte Pneumático, obtendo-se então informações relevantes para o projeto desse equipamento, tais como:

- a) perda de carga por trecho reto da tubulação;
- b) distribuição das partículas na seção transversal da tubulação horizontal;

Os resultados, concernentes à perda de carga, foram comparados com as equações de 2.1 a 2.6 fornecidas por (GOMIDE, 1983).

3. MATERIAL E MÉTODOS

A parte experimental deste trabalho foi realizada em uma Unidade Piloto de Transporte Pneumático em fase diluída instalada no Laboratório de Operações Unitárias da Unisanta. A Unidade Piloto, os materiais e métodos utilizados na presente pesquisa são apresentados nos tópicos a seguir.

3.1 MATERIAL

3.1.1 UNIDADE PILOTO

A Unidade Piloto utilizada nos experimentos é mostrada na Figura 3.1:

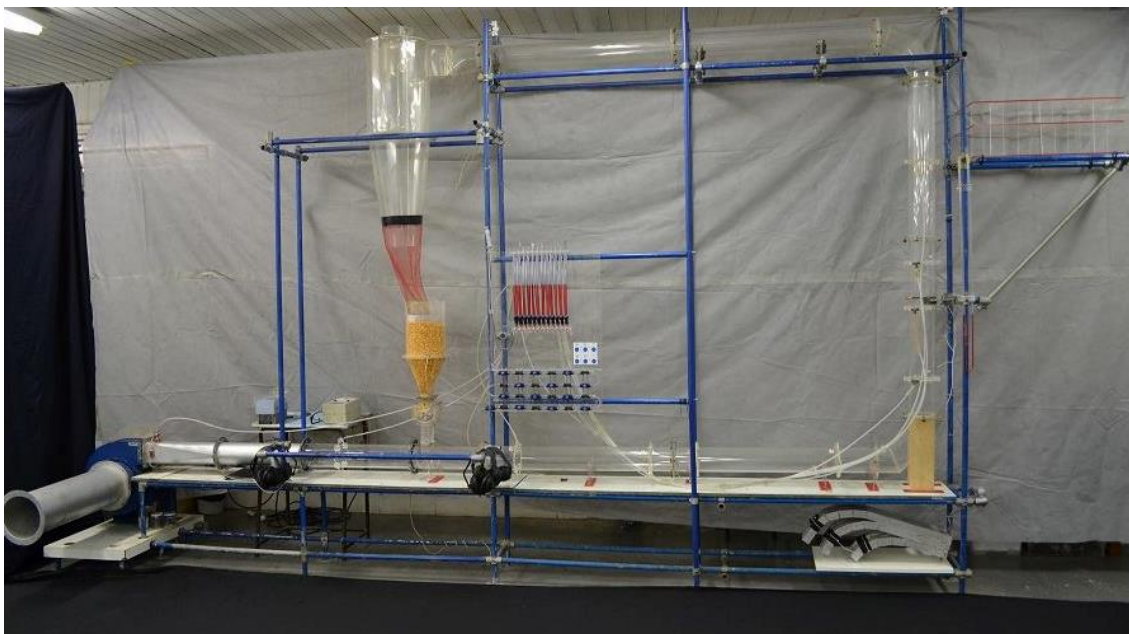


Figura 3.1 – Unidade Piloto de Transporte Pneumático Projetada e Instalada no Laboratório de Operações Unitárias da Unisanta

Um esboço da Unidade Piloto, ilustrada na Figura 3.2, apresenta os elementos que a compõe:

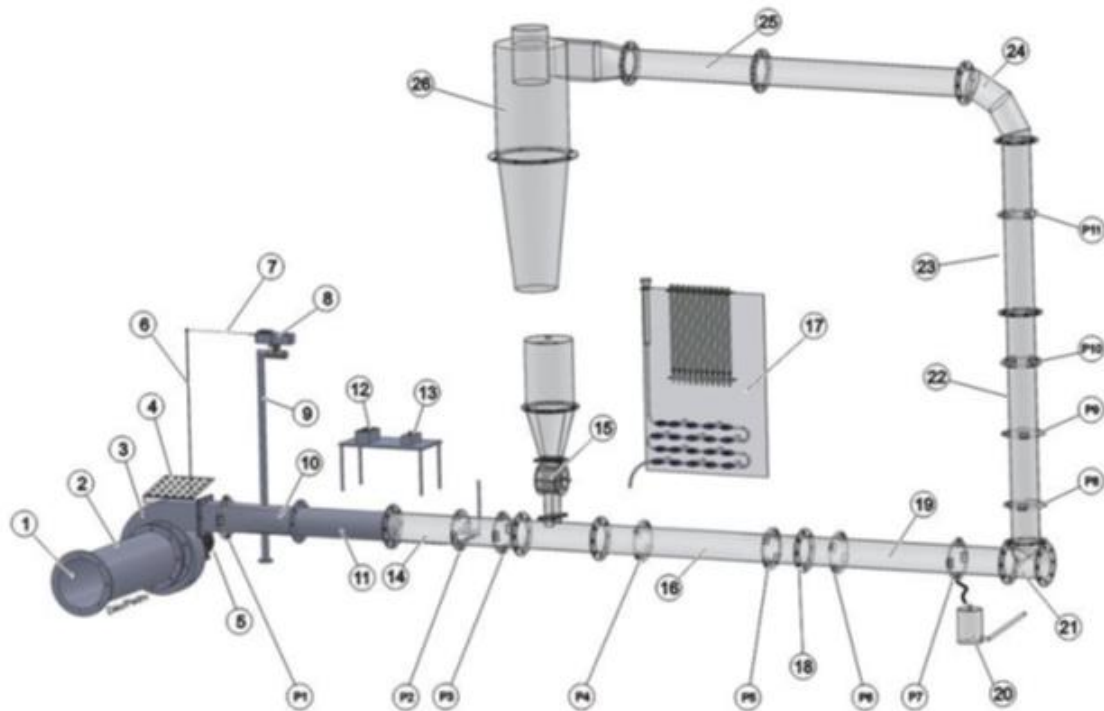


Figura 3.2 - Esboço da Unidade Piloto de transporte pneumático (MORAES, 2012)

1) Tubulação de entrada do ar de alimentação da unidade experimental; 2) Duto de sucção do ventilador; 3) ventilador centrífugo; 4) ventilador do motor; 5) motor elétrico assíncrono em balanço; 6) haste fixa ao motor para determinação da potência; 7) linha de conexão da haste ao dinamômetro; 8) dinamômetro; 9) suporte do dinamômetro; 10) tubo adaptador de seção retangular para seção circular com a tomada P1, anel piezométrico; 11) tubo de aço carbono de 117 mm de diâmetro interno com colméia para direcionar o escoamento; 12) inversor de frequência do motor do ventilador; 13) controlador de velocidade da válvula rotativa; 14) duto de acrílico de 117 mm de diâmetro interno com tubo de *Pitot* horizontal e vertical e dois anéis piezométricos (P2 e P3); 15) válvula rotativa com silo; 16) tubo de acrílico de 1000 mm de comprimento com tomadas P4 e P5; 17) banco de piezômetros para medida da pressão estática; 18) flange; 19) duto de acrílico de 1000 mm de comprimento com tomadas P6 e P7; 20) manômetro inclinado; 21) tê saída de lado; 22) tubo vertical de 1000 mm de comprimento com três tomadas piezométricas P8, P9 e P10; 23) tubo vertical de 760 mm de comprimento; 24) curva em gomos; 25) duto de retorno para o ciclone; 26) ciclone.

A seguir são apresentados detalhes dos principais componentes da Unidade Piloto de Transporte Pneumático.

3.1.1.1 VENTILADOR CENTRÍFUGO

O ar para a operação do sistema foi deslocado por um ventilador centrífugo da marca Ventisilva de pás semiabertas, com rotor de diâmetro de 210 mm e duto de sucção com diâmetro de 217 mm. A Figura 3.3 apresenta o ventilador e a Figura 3.4 mostra detalhes do duto de sucção.

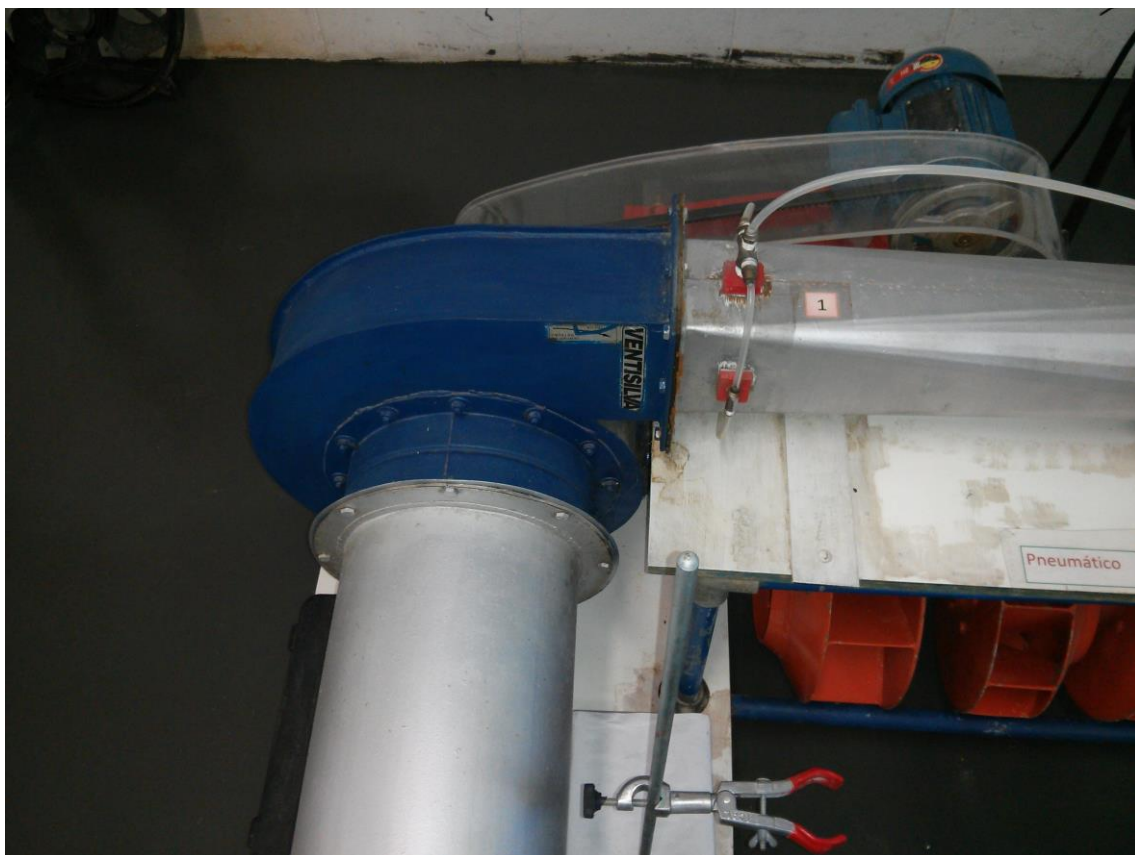


Figura 3.3 – Ventilador Centrífugo



Figura 3.4 – Duto de Sucção

3.1.1.2 MOTOR ELÉTRICO PARA ACIONAMENTO DO VENTILADOR CENTRÍFUGO

O motor elétrico representado na Figura 3.5 utilizado para acionamento do Ventilador Centrífugo possui:

- a) motor de corrente alternada trifásico, 220V/380V;
- b) marca Weg, modelo 0996 EM17253;
- c) rotação nominal de 3450 rpm;
- d) potência de 1 cv, aproximadamente 0,96 hp;
- e) rendimento de 72,7 %

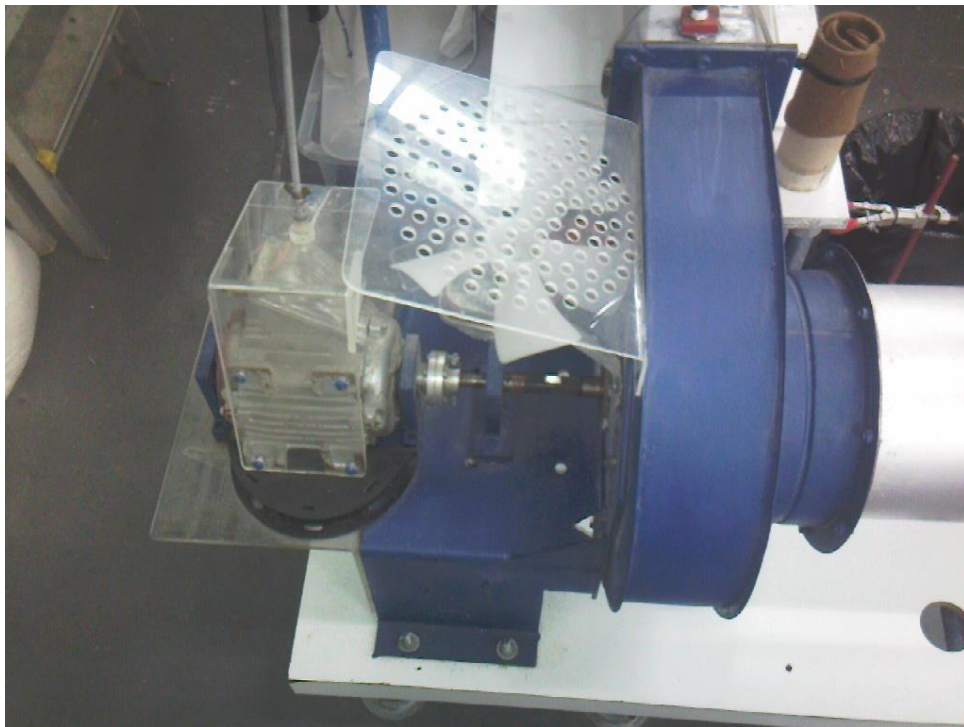


Figura 3.5 – Motor Elétrico utilizado para acionar o Ventilador da Unidade

3.1.1.3 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

A variação da rotação do motor e conseqüentemente a alteração da velocidade do ar nos dutos foi realizada através de inversor de frequência da marca Mitsubishi Electric Corporation, modelo FR-A024-1 5K-UL, com 230 V 50 Hz / 230 V 60 Hz. A Figura 3.6 mostra o dispositivo mencionado.



Figura 3.6 – Inversor de Frequência

3.1.1.4 VÁLVULA ROTATIVA OU CARAMBOLA

Os grãos de soja foram alimentados de um silo ao duto do Transportador Pneumático por meio de uma válvula rotativa ou tremonha, com carcaça de acrílico diâmetro interno de 100 mm, parede de 5 mm e comprimento de 92 mm. A válvula possui 6 pás radiais retangulares de PVC de 92 mm por 51,3 mm e 6 mm de largura cada com pontas de borrachas para vedação. A válvula rotativa foi acionada por um motor de corrente contínua da marca Diacti de 220 V, com potência de 1/7 hp e rotação máxima de 100 rpm. O controle da vazão foi realizado através da variação da velocidade desse motor por intermédio de controlador de velocidade da Marca Diacti.

A Figura 3.7 apresenta a válvula rotativa acoplada ao motor e a Figura 3.8 mostra o controlador de velocidade desse motor, com o objetivo de controlar a vazão dos grãos de soja.

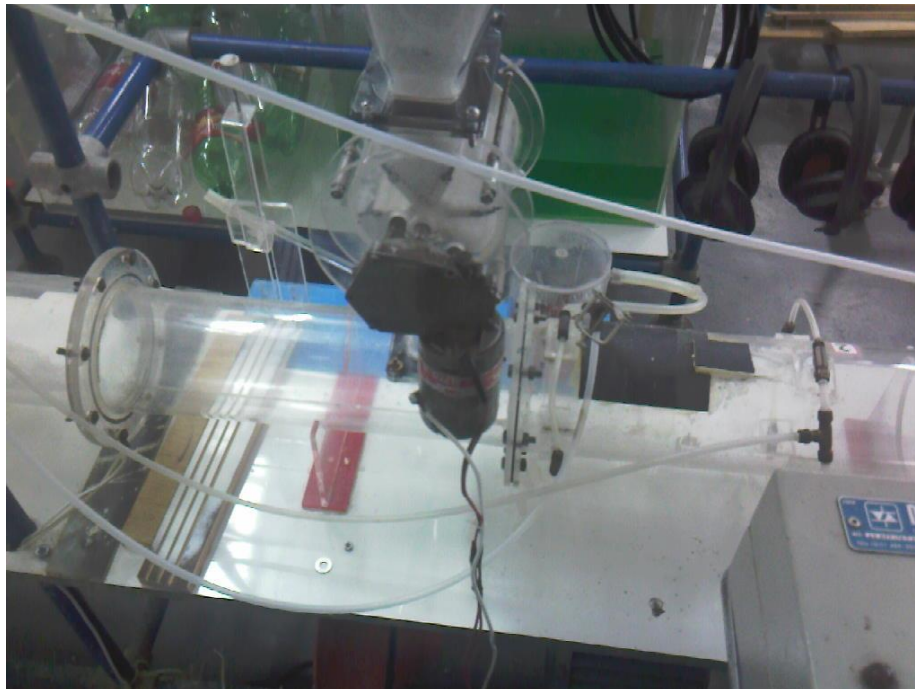


Figura 3.7 – Válvula Rotativa



Figura 3.8 – Controlador de Velocidade do Motor da Válvula Rotativa

3.1.1.5 BANCO DE TUBOS EM “U”

A queda de pressão foi medida nos 10 anéis piezométricos instalados ao longo da tubulação da Unidade, nomeados de P1 a P10, conforme Figura 3.2, conectados a um banco de tubos em “U” para leitura de cada trecho e acessórios do Transportador Pneumático. A Figura 3.9 mostra o medidor de pressão da Unidade Piloto.



Figura 3.9 – Banco de Tubos em “U”

3.1.1.6 TUBULAÇÃO DA UNIDADE PILOTO

A tubulação do transportador foi confeccionada de Acrílico e ferro galvanizado, com diâmetro interno de 117 mm, Diâmetro Externo de 125 mm e Espessura de 4mm. A Figura 3.10 apresenta um trecho da tubulação horizontal.



Figura 3.10 – Detalhe da tubulação horizontal da Unidade Piloto

A Figura 3.11 apresenta um trecho da tubulação vertical da Unidade Piloto, com três pontos de tomada (P8, P9 e P10) de medida de queda de pressão.



Figura 3.11 – Tubulação Vertical

3.1.1.7 SILO

A Unidade Piloto possui um silo armazenador de sólido construído em acrílico e com volume de 21,5 litros. A Figura 3.12 mostra o dispositivo mencionado.

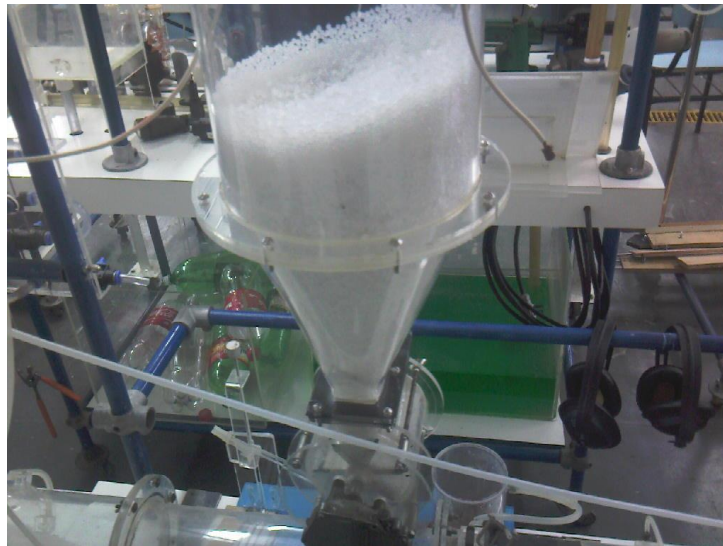


Figura 3.12 – Silo para armazenamento dos grãos de soja

3.1.1.8 MÓDULO DE COLETA

Para a determinação da distribuição dos grãos de soja na tubulação horizontal, foi utilizado um modo de coleta, conforme Figura 3.13

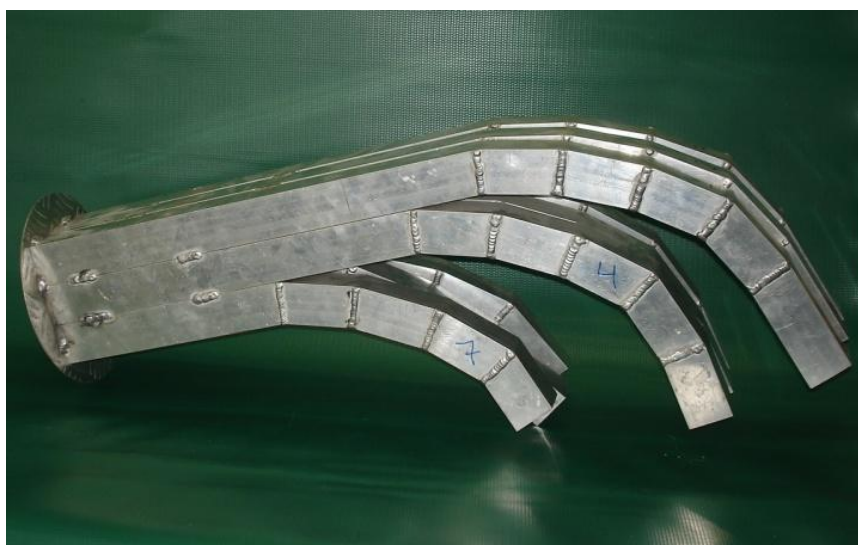


Figura 3.13 – Perfil do módulo de coleta (MORAES, 2012)

Este módulo foi dividido em 9 tubos de alumínio, numerados de 1 a 9, cuja vista frontal está apresentada na Figura 3.14, onde se acoplaram sacos de tule para retenção dos grãos de soja.

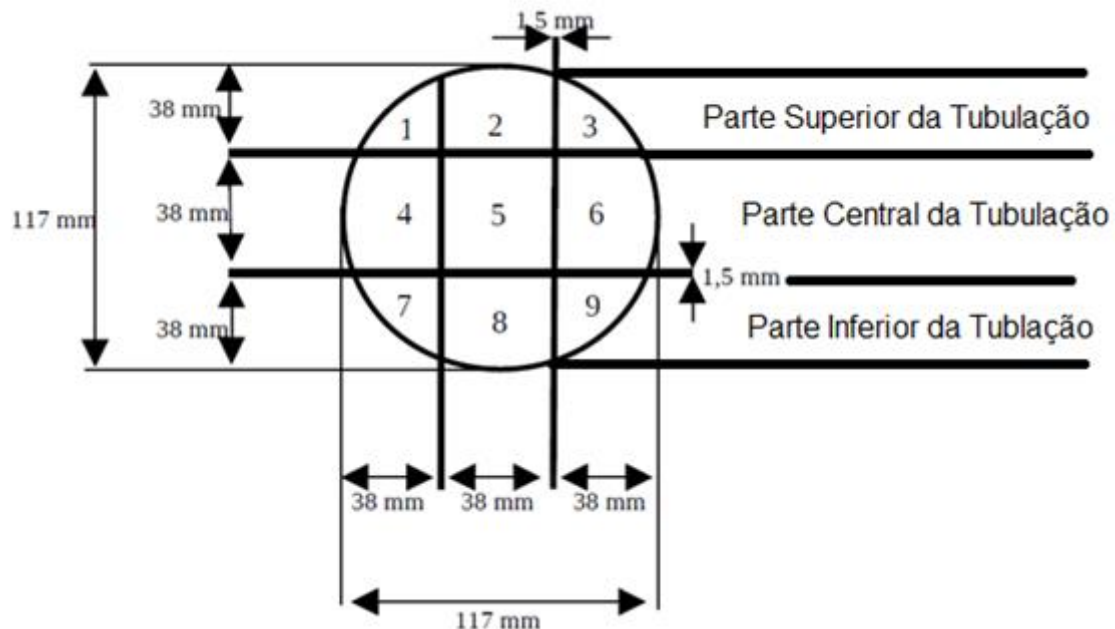


Figura 3.14 – Vista frontal do módulo de coleta (SANTOS, 2009)

3.1.2 INSTRUMENTOS DE MEDIDA

Os seguintes instrumentos de medição foram utilizados para a coleta dos dados:

- paquímetro de aço: Marca Mitutoyo, Modelo R 530 - 104 B - 10 / 0708 e 0707;
- anemômetro: Marca Prova *Instruments* Inc, Modelo AVM-01;
- balança Analógica de 5 kg;
- cronômetro Digital Marca Toppa;
- cronômetro Digital Marca Instruterm CD 2800.

3.1.3 MATERIAIS AUXILIARES

Foram empregados também na parte experimental:

- a) balde plástico de 10 litros e cronômetro para a medida de vazão de soja da válvulas rotativa;
- b) recipiente cilíndrico de acrílico com diâmetro interno de 33,60 mm para a medida da densidade aparente;
- c) saca de 60 kg de soja, tipo SYN1163, produtor Syngenta;

3.2 MÉTODOS

Inicialmente foi verificada a estanqueidade do sistema. Ligou-se o ventilador na velocidade máxima de aproximadamente 5 m/s, no duto de sucção, obstruiu-se a saída do ciclone e verificou-se alguns pontos de vazamento de ar, que foram solucionados, garantindo a maior precisão dos dados obtidos.

3.2.1 VELOCIDADE DO AR NO DUTO DE SUCÇÃO

As velocidades do ar na entrada do duto de sucção foram medidas com três anemômetros da marca prova *instruments inc.* modelo AVM-01, sendo calculados os valores médios das três medidas. Os ensaios foram iniciados sem alimentação dos grãos de soja para cada frequência disponível no inversor, conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Velocidades do ar no duto de sucção

Frequência (Hz)	v(m/s)	v(m/s)	v(m/s)
40	2,9	2,7	2,9
45	3,2	3,1	3,4
50	3,7	3,4	3,8
55	4,2	3,9	4,2
60	4,6	4,4	4,6
65	4,9	4,8	5
Anemômetro	1	2	3

3.2.2 DIÂMETROS DOS DUTOS

Com a utilização do paquímetro, foram medidos os diâmetros internos do duto de sucção, assim como duto de transporte, chamado de duto de descarga.

3.2.3 CALIBRAÇÃO DA VÁLVULA ROTATIVA

Com o auxílio dos cronômetros e do balde de 0,495 kg foi realizada a calibração da válvula rotativa, através da técnica de massa por unidade de tempo, determinando a vazão dos grãos de soja para cada posição do potenciômetro (Figura 3.8).

3.2.4 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE DA SOJA

Foi utilizado um recipiente cilíndrico de acrílico com o mesmo diâmetro em toda a sua extensão para o cálculo da densidade aparente da soja. Foi pesado o equipamento vazio e obtido o valor da sua tara. Em seguida, foram colocados em torno de 220 g de grãos de soja no cilindro de fundo, medido a altura ocupada pelos grãos de soja e pesado novamente o conjunto.

Com os dados obtidos, foi possível determinar a densidade aparente da soja, através da aplicação das seguintes equações (3.1) e (3.2):

- Determinação do volume:

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h \quad (3.1)$$

Em que:

v é o volume ocupado pelos grãos de soja, em cm³;

D é o diâmetro do cilindro de fundo, em cm;

h é a altura ocupada pela soja em cm.

- Determinação da densidade aparente:

$$d = \frac{m}{v} \quad (3.2)$$

Em que:

v é o volume ocupado pelos grãos de soja, em cm³;

m é a massa dos grãos de soja em g.

3.2.5 DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE SOJA NO DUTO HORIZONTAL

Os grãos de soja foram descarregados em um módulo de coleta, conforme Figura 3.13, instalado no final do duto horizontal do transportador.

O módulo é dividido em 9 seções conforme mostra a Figura 3.14. Estas 9 seções são formadas por tubos de alumínio, numerados de 1 a 9, aos quais foram acoplados sacos de tule para a retenção dos grãos. Inicialmente, o silo foi abastecido com 3,500 kg de soja e empregou-se a vazão mássica de 0,034 kg/s para cada uma das velocidades do ar correspondente às frequências de 45 a 60 hz. Para cada frequência, o peso dos grãos de soja coletado em cada seção do distribuidor foi pesado. A distribuição dos grãos de soja também foi realizada para as vazões mássicas de 0,058; 0,076 e 0,098 kg/s.

Para a determinação da área de cada um dos 9 coletores foram executados os seguintes passos:

- a) foi recortado um quadrado de 15 cm de lado de uma folha de sulfite e medida a sua massa, sendo obtida uma massa de 1,8 g e área de 225 cm²;
- b) o quadrado de papel sulfite foi colocado na entrada do coletor, sendo riscadas cada uma das 9 áreas com um lápis, conforme disposição apresentada na Figura 3.14;

- c) foram recortadas as figuras correspondentes a cada coletor e medidas as respectivas massas;
- d) com os valores obtidos, foi possível determinar a proporcionalidade entre a massa e a área dos coletores, conforme Tabela 3.2.

A massa de grãos de soja em cada área do coletor foi calculada com a utilização da equação (3.3).

Tabela 3.2 – Áreas dos coletores

Coletores	Massa do papel (g)	Área do Coletor (cm ²)
1	0,071	8,88
2	0,125	15,60
3	0,074	9,25
4	0,118	14,80
5	0,132	16,50
6	0,123	15,40
7	0,059	7,38
8	0,122	15,20
9	0,057	7,12

$$M_p = \frac{m_c}{A_c} \quad (3.3)$$

Em que:

M_p é a massa dos grãos de soja por área em cada saco de tule, em g/cm²;

m_c é a massa dos grãos de soja no coletor, em g;

A_c é área do coletor, em cm².

3.2.6 DETERMINAÇÃO DA CURVA DE PERDA DE CARGA DO AR EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE

A perda de carga do ar nos trechos retos horizontais e verticais foi determinada pela diferença de pressão nos anéis piezométricos apresentados na Figura 3.9 e numerados de P1 a P10.

Os ensaios foram realizados sem a alimentação dos grãos de soja para 5 velocidades médias de ar medidas com os anemômetros, conforme a Tabela 3.1, relacionadas com a frequência, de 40 a 60 Hz, obtida pelo inversor, conforme Figura 3.6.

3.2.7 DETERMINAÇÃO DA PERDA DE CARGA DA SOJA

As vazões dos grãos de soja estudadas foram 0,034 kg/s, 0,058 kg/s, 0,076 kg/s e 0,098 kg/s. Determinaram-se as perdas de carga para as combinações entre as quatro vazões de sólido e três velocidades médias do ar, correspondentes às frequências de 50, 55 e 60 Hz. Com velocidades mais baixas, os grãos de soja se acumularam na tubulação.

3.2.8 COMPARAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS DA PERDA DE CARGA DOS GRÃOS DE SOJA COM VALORES TÉORICOS CALCULADOS

Para realizar a comparação entre valores experimentais da perda de carga com os valores teóricos calculados, foram utilizadas as Equações (2.1) a (2.6) apresentadas por (GOMIDE,1983).

Foram considerados os valores de perda de carga dos grãos de soja entre os pontos P1 e P7, vazões de 0,034 kg/s e 0,058 kg/s respectivamente e velocidade do ar na frequência de 60 Hz.

Resumidamente, para os cálculos mencionados, foram utilizados os dados da Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Dados para cálculo da perda de carga de soja

Vazão dos grãos de soja (kg/s)	Distância entre os pontos P1 e P7 (mm)	Densidade aparente de soja g/cm ³	Diâmetro interno da tubulação (mm)	Velocidade do ar (m/s)
0,034	3700	1,1567	117	15,40
0,058	3700	1,1567	117	15,40

3.3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA TRATAMENTO DOS DADOS

3.3.1 DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DE AR NO DUTO DE SUCÇÃO

A vazão volumétrica do ar foi determinada pela equação da continuidade (Equação 3.4):

$$Q = A_s \cdot V_s \quad (3.4)$$

Em que:

Q é a vazão volumétrica do ar em m^3/s

A_s é a área da seção transversal da tubulação de entrada (sucção) em m^2

V_s é a velocidade obtida por anemômetro na entrada do duto de sucção em m/s .

A área da seção transversal (A_s) do duto de sucção foi calculada pela (Equação 3.5):

$$A_s = \frac{\pi \cdot D_s^2}{4} \quad (3.5)$$

Em que:

A_s é a área do duto de sucção

D_s é o diâmetro interno da tubulação de sucção em mm

3.3.2 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DO AR NO TUBO DE DESCARGA

A velocidade no tubo de descarga foi obtida, relacionando-se os valores obtidos pelos anemômetros e pela equação do balanço de massas (Equação 3.6):

$$W_d = W_s \quad (3.6)$$

Sendo:

w_d a vazão mássica do ar no duto de descarga em kg/s

w_s a vazão mássica do ar no duto de sucção em kg/s

Desmembrando a equação, chega-se a Equação 3.7:

$$\rho_d \cdot V_d \cdot A_d = \rho_s \cdot V_s \cdot A_s \quad (3.7)$$

Em que:

ρ_d é a densidade do ar no duto de descarga em kg/m^3

V_d é a velocidade do ar no duto de descarga em m/s

A_d é a área do duto de descarga em m^2

ρ_s é a densidade do ar no duto de sucção em kg/m^3

V_s é a velocidade do ar no duto de sucção em m/s

A_s é área do duto de sucção em m^2

Considerando a densidade constante, tem-se a Equação 3.8

$$V_d \cdot A_d = V_s \cdot A_s \quad (3.8)$$

Substituindo as razões das áreas nos dois lados da igualdade, obtém-se a Equação 3.9.

$$V_d \frac{\pi \cdot D_d^2}{4} = V_s \frac{\pi \cdot D_s^2}{4} \quad (3.9)$$

Eliminando-se os valores iguais dos dois lados da igualdade, obtém-se a Equação (3.10) utilizada para determinar a velocidade do ar no tubo de descarga da Unidade Piloto.

$$V_d = V_s \frac{D_s^2}{D_d^2} \quad (3.10)$$

Em que:

V_d é a velocidade de descarga, em m/s ;

V_s é a velocidade de sucção, em m/s ;

D_s é o diâmetro do duto de sucção, em m ;

D_d é o diâmetro do duto de descarga, em m .

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 VELOCIDADE DO AR NO DUTO DE SUCÇÃO

Os valores da velocidade do ar no duto de sucção para cada frequência foram obtidos pela média da leitura dos três anemômetros e se encontram na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Velocidades no duto de sucção

Frequência (Hz)	Velocidade média no duto de sucção (m/s)
40	2,8
45	3,2
50	3,6
55	4,1
60	4,5
65	4,9

4.2 DIÂMETROS DOS DUTOS DE SUCÇÃO E DE DESCARGA

Foram obtidas as seguintes medidas de diâmetro:

Duto de Sucção (Ds): 0,2160 m

Duto de Descarga (Dd): 0,11678 m

4.3 VELOCIDADES NO TUBO DE DESCARGA DO TRANSPORTADOR PNEUMÁTICO

Através da equação (3.10) foram determinadas as velocidades no duto de descarga da Unidade Piloto de Transporte Pneumático. Os valores calculados são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Velocidades nos Tubos de Descarga

Frequência (Hz)	Velocidade Média (m/s) Duto de Sucção	Velocidade (m/s) Duto de Descarga
40	2,8	9,58
45	3,2	10,95
50	3,6	12,32
55	4,1	14,03
60	4,5	15,40
65	4,9	16,76

4.4 CALIBRAÇÃO DA VÁLVULA ROTATIVA OU CARAMBOLA

Os valores obtidos da vazão mássica para cada posição da válvula rotativa estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Relação entre a posição da válvula rotativa e a vazão mássica

Indicadores de vazão	Vazão mássica (kg/s)
1	-
2	0,05800
3	0,09775
4	0,12540
5	0,15968
6	0,18968
7	0,22260
8	0,23925
9	0,26525
10	0,26625

Na posição 1 não houve vazão de soja.

Para vazões mássicas acima de 0,100 kg/s não foi possível realizar o transporte da soja, uma vez que os grãos de soja acumularam na tubulação horizontal, em virtude das limitações do Transportador Pneumático, que foi projetado originalmente para o transporte de partículas de polietileno. Devido as diferenças entre as propriedades das partículas, o ventilador da Unidade no seu limite máximo não deslocava o mencionado legume em vazões mássicas superiores a 0,098 kg/s.

Para possibilitar uma análise com maior quantidade de dados possíveis em virtude do cenário apresentado, foram selecionadas posições intermediárias da válvula rotativa, cujos valores estão expressos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Relação entre vazão mássica e posição do potenciômetro

Posição do Potenciômetro	Vazão mássica (kg/s)
1,5	0,034
2,0	0,058
2,5	0,076
3,0	0,098

4.5 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE DA SOJA

Foram obtidos os seguintes resultados:

Tara do recipiente cilíndrico de 99,25 g

Recipiente com soja de 319,58 g

Diâmetro do cilindro de 33,60 mm

Altura da soja dentro do cilindro de 214,85 mm

Massa da soja de 220,33 g

Com os dados obtidos e a aplicação das equações 3.1 e 3.2 foi calculada a densidade aparente da soja. O valor obtido de $1,1567 \text{ g/cm}^3$, considerando-se os erros de medição, estão de acordo com os apresentados por (HOFMANN, 2012) e (FREITAS 1997) na faixa de 0,989 a $1,149 \text{ g/cm}^3$ e 1,1592 a $1,1992 \text{ g/cm}^3$ respectivamente. No artigo do autor dessa dissertação, que se encontra no Apêndice A, foi considerado o valor de $1,1567 \text{ g/cm}^3$, por se tratar do valor obtido experimentalmente e condizente com dados obtidos pelos outros autores mencionados nesse parágrafo.

4.6 DISTRIBUIÇÃO DOS GRÃOS DE SOJA NO TRECHO HORIZONTAL DA UNIDADE PILOTO

No Apêndice B são apresentadas as tabelas de B1 até B4, referentes a quatro vazões mássicas com os valores das massas dos grãos de soja coletados nos sacos nove sacos de tule, para as quatro velocidades do ar no duto horizontal de transporte. Os resultados que constam nas Tabelas B1 a B4 foram utilizados na confecção das Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4.

4.6.1 DISTRIBUIÇÃO DOS GRÃOS DE SOJA POR ÁREA DO COLETOR

Com a aplicação da Equação 3.3 foi possível determinar a distribuição da massa dos grãos de soja por área de cada coletor, para as vazões 0,034 kg/s, 0,058 kg/s, 0,076 kg/s e 0,098 kg/s, e velocidades de 10,95 a 15,40 m/s, cujos resultados estão apresentados nas Tabelas de C1 a C4, no apêndice C deste trabalho, utilizados para a confecção das Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4.

4.6.2 DISTRIBUIÇÃO DOS GRÃOS DE SOJA EM VALORES PERCENTUAIS

Para facilitar a análise, foram determinadas as distribuições da massa dos grãos de soja em valores percentuais, para as vazões 0,034 kg/s, 0,058 kg/s, 0,076 kg/s e 0,098 kg/s, para as velocidades de 10,95 a 15,40 m/s, cujos resultados estão apresentados nas Tabelas de D1 a D4, no apêndice D deste trabalho.

4.6.3 ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DA SOJA POR ÁREA DO COLETOR

4.6.3.1 DISTRIBUIÇÃO DA SOJA PARA A VAZÃO DE 0,034 kg/s

Através do *software* Excel 2013, que foi utilizado para elaborar todos os gráficos desse trabalho, foram plotados os Gráficos representados na Figura 4.1, em formato de *pizza*, para as velocidades do ar de 10,95 m/s, 12,32 m/s, 14,03 m/s, 15,40 m/s e vazão de 0,034 kg/s para realizar a análise da distribuição dos grãos de soja no duto horizontal da Unidade Piloto de Transporte Pneumático.

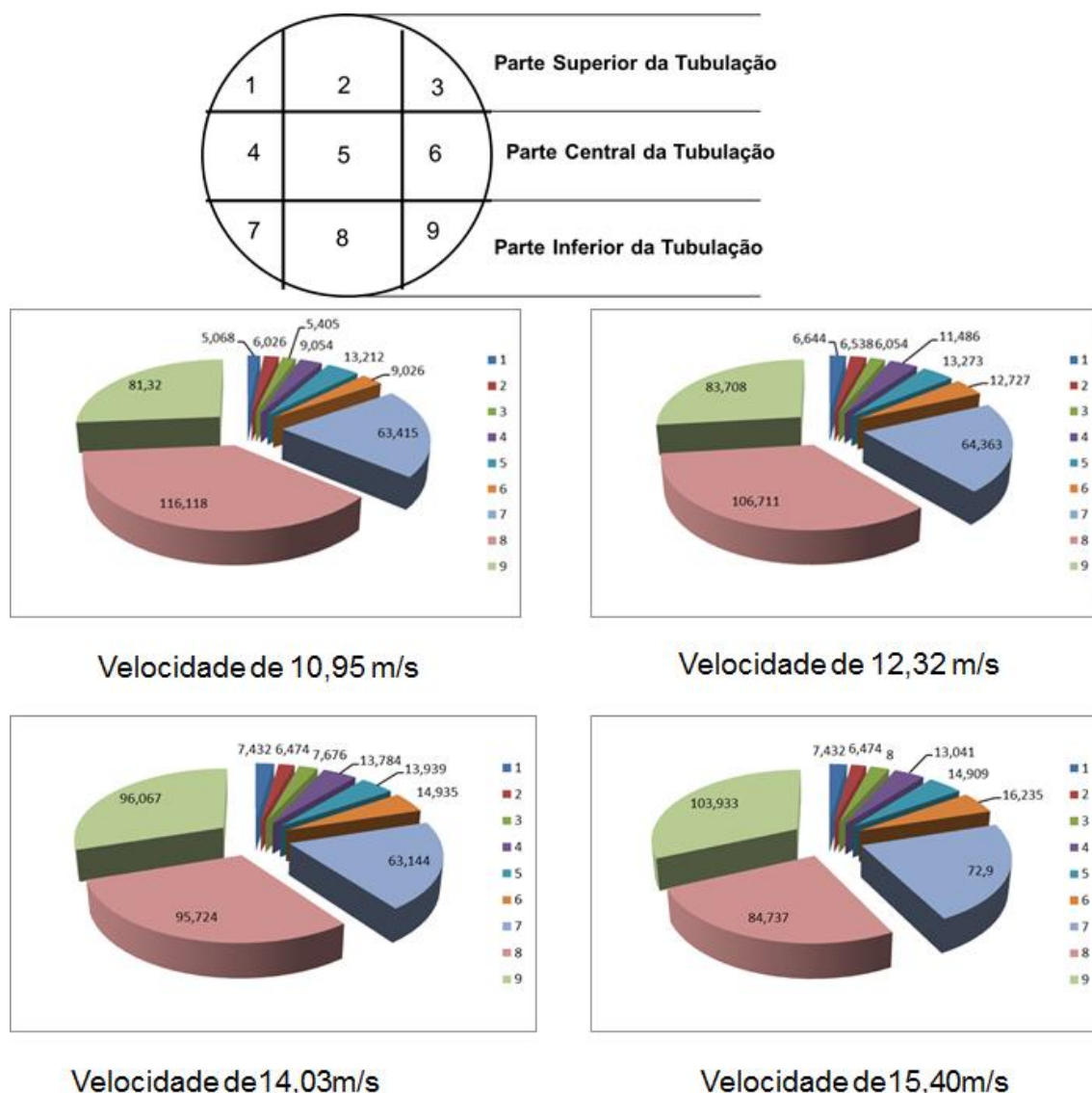


Figura 4.1 – Distribuição dos grãos de soja em g/cm² para a vazão de 0,034 Kg/s

Através dos Gráficos representados na Figura 4.1, verificou-se que:

- a concentração de grãos de soja ocorreu nos coletores 7, 8 e 9, que, conforme mostrado na mesma Figura, situam-se na parte inferior da tubulação horizontal;
- à medida que a velocidade do ar foi aumentada, houve um espalhamento dos grãos de soja, diminuindo a concentração no coletor 8 e aumentando nos demais coletores.
- nas duas primeiras velocidades do ar analisadas, 10,95 e 12,32 m/s, a concentração dos grãos de soja ocorreu no coletor 8, enquanto que para os dois últimos ensaios, o mesmo fenômeno ocorreu no coletor 9.

Em todas as velocidades estudadas, a concentração dos grãos de soja ocorreu na parte inferior da tubulação horizontal, representada pelos coletores 7,8 e 9, em virtude da gravidade e velocidade do ar, o que demonstra que essa parte do duto está sujeita um maior desgaste durante o processo de deslocamento pneumático.

Para complementar a análise para a vazão mássica de 0,034 kg/s, foi plotado o Gráfico representado pela Figura 4.2, no formato de colunas, que mostra a distribuição da soja por área de coletor para a vazão mencionada para cada coletor e para as velocidades de 10,95 m/s, 12,32 m/s, 14,03 m/s e 15,40 m/s, com o intuito de apresentar uma visão consolidada em um mesmo gráfico.

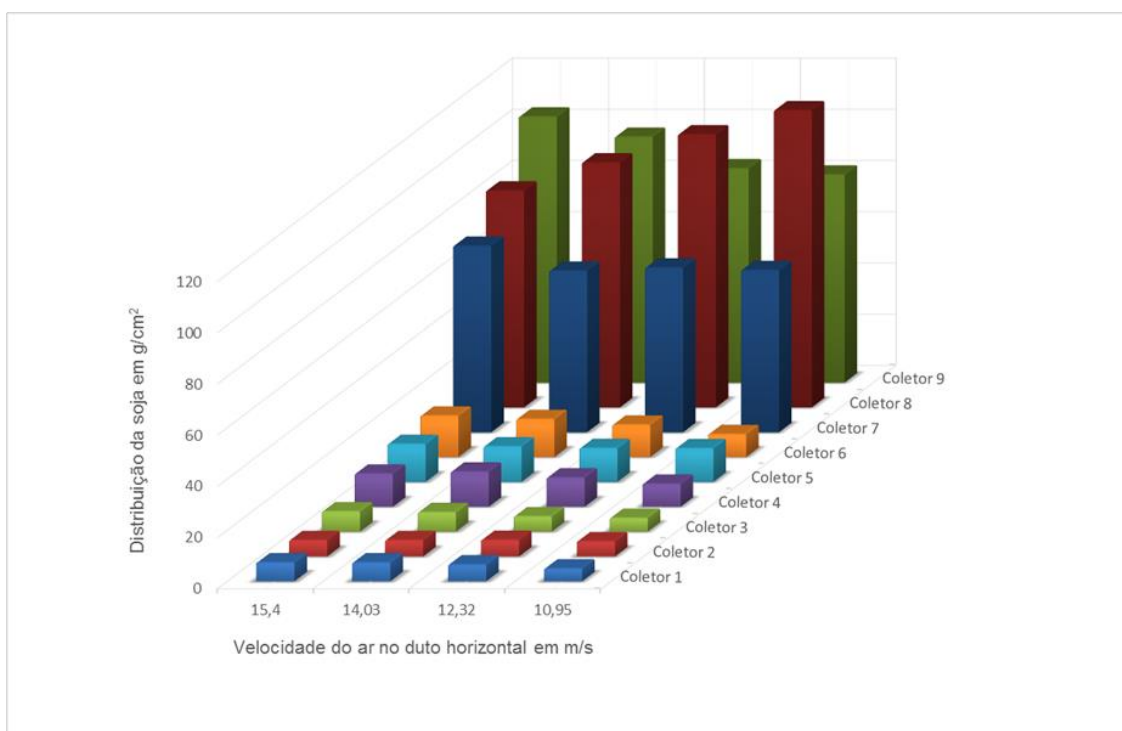


Figura 4.2 – Distribuição dos grãos de soja para vazão de 0,034 kg/s

Ao fazer a análise consolidada da distribuição da soja na seção horizontal do Transportador Pneumático para a vazão de 0,034 Kg/s, nas velocidades de 10,95; 12,32; 14,03 e 15,40 m/s, foi observado através dos valores obtidos na Tabela do C1 e do Gráfico representado pela Figura 4.2, que a concentração dos grãos de soja ocorreu nos coletores 7, 8 e 9. À medida que a frequência diminuiu e consequentemente a velocidade do ar no duto horizontal, a concentração

nesses coletores mencionados aumentava, em virtude da gravidade terrestre, pois os coletores estavam na posição inferior do duto de descarga. Com o aumento da velocidade a concentração no coletor 8 foi gradativamente diminuindo, sendo que para a última velocidade, a maior concentração dos grãos de soja ocorreu no coletor 9.

4.6.3.2 DISTRIBUIÇÃO DA SOJA PARA A VAZÃO DE 0,058 kg/s

Para fazer a análise da distribuição dos grãos de soja no duto horizontal da Unidade Piloto de Transporte Pneumático para a vazão mássica de 0,058 kg/s, foram plotados os Gráficos representados pela Figura 4.3, em formato de pizza, para as velocidades de 10,95 m/s, 12,32 m/s, 14,03 m/s e 15,40 m/s.

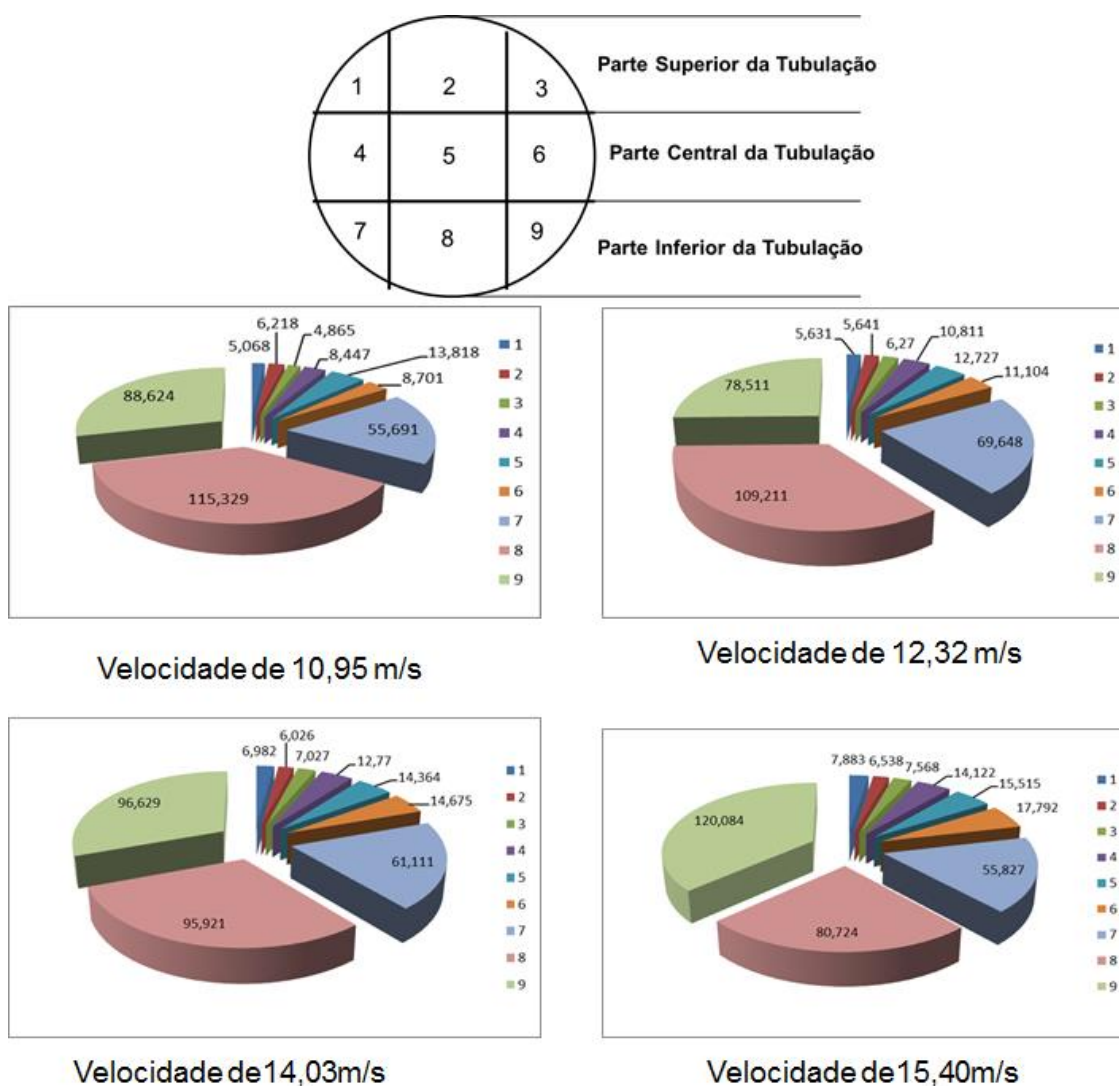


Figura 4.3 - Distribuição dos grãos de soja em g/cm² para a vazão de 0,058 kg/s

Através dos Gráficos representados pela Figura 4.3, verificou-se que:

- a) da mesma forma como ocorreu para a vazão de 0,034 kg/s, a concentração de grãos de soja ocorreu nos coletores 7, 8 e 9, sendo que houve uma variação abrupta do coletor 6 para o 7 em todas as velocidades do ar;
- b) a maior concentração ocorreu no coletor 8 nas duas primeiras velocidades estudadas, de 10,95 e 12,32 m/s e para as duas últimas, 14,03 e 15,40 m/s no coletor 9;
- c) com o aumento da vazão, a concentração dos grãos de soja aumentou nos coletores 1, 2, 3, 4, 5 e 6, se comparada com a vazão de 0,034 kg/s.

Os coletores 7, 8 e 9 estão situados na parte inferior do duto de descarga, o que demonstra o efeito da gravidade terrestre na distribuição da leguminosa estudada.

Observou-se que com o aumento da vazão mássica de 0,034 para 0,058 kg/s houve uma melhor distribuição das partículas sólidas na seção horizontal da tubulação. Esse resultado é devido ao próprio atrito entre as partículas, facilitando o seu deslocamento.

Para complementar a análise para a vazão de 0,058 kg/s, foi plotado o Gráfico representado pela Figura 4.4, no formato de colunas, que mostra a distribuição da soja por área de coletor para a vazão de 0,058 kg/s para cada coletor e para as velocidades de 10,95 m/s, 12,32 m/s, 14,03 m/s e 15,40 m/s, com o intuito de apresentar uma visão consolidada.

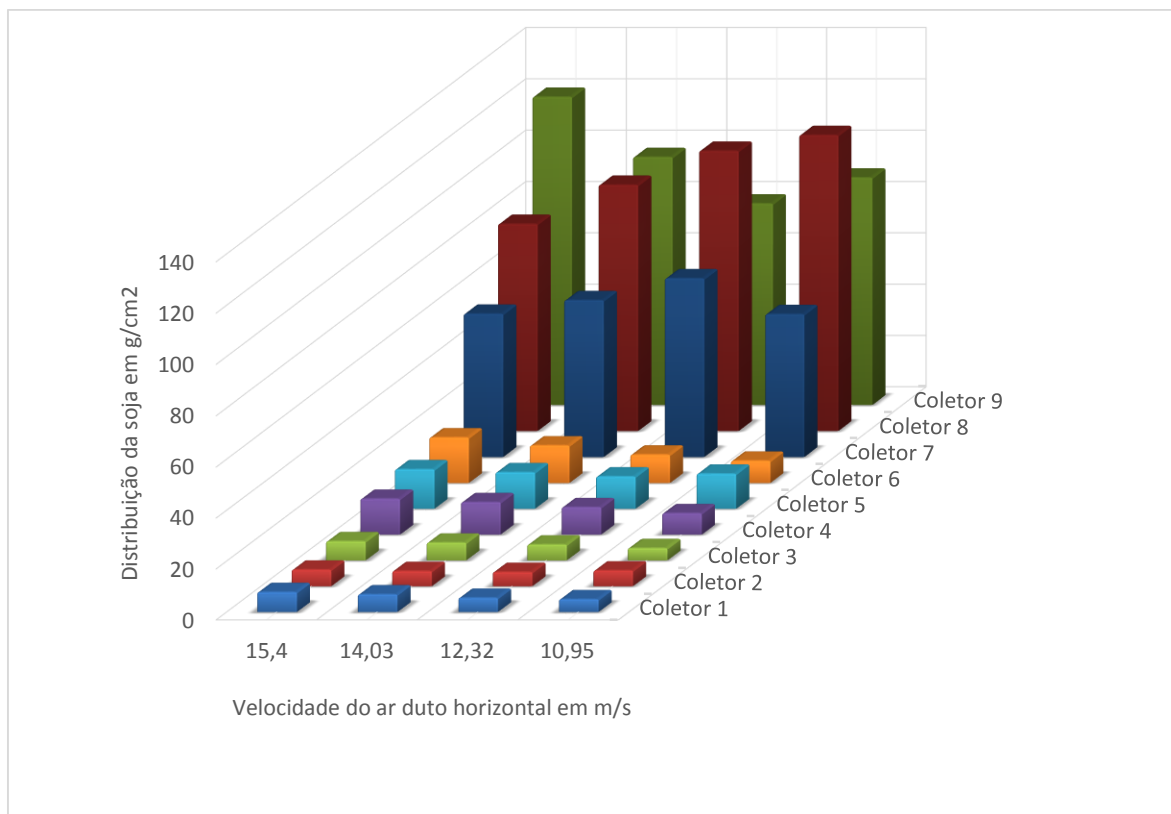


Figura 4.4 – Distribuição dos grãos de soja para vazão de 0,058 kg/s

Ao fazer a análise da distribuição da soja na seção horizontal do Transportador Pneumático para a vazão de 0,058 Kg/s, nas velocidades de 10,95; 12,32; 14,03 e 15,40 m/s, foi observado através dos valores obtidos na Tabela C2 e do Gráfico representado pela Figura 4.4, que a concentração dos grãos de soja ocorreu nos coletores 7, 8 e 9, sendo em torno dos 80% do total. Houve um aumento substancial, entre os coletores 6 e 7, praticamente a concentração de soja no coletor 7 foi o triplo.

4.6.3.3 DISTRIBUIÇÃO DA SOJA PARA A VAZÃO DE 0,076 kg/s

Os resultados para a vazão mássica de 0,076 kg/s dos grãos de soja, nas velocidades de 10,95; 12,32; 14,03 e 15,40 m/s, estão apresentados na Figura 4.5.

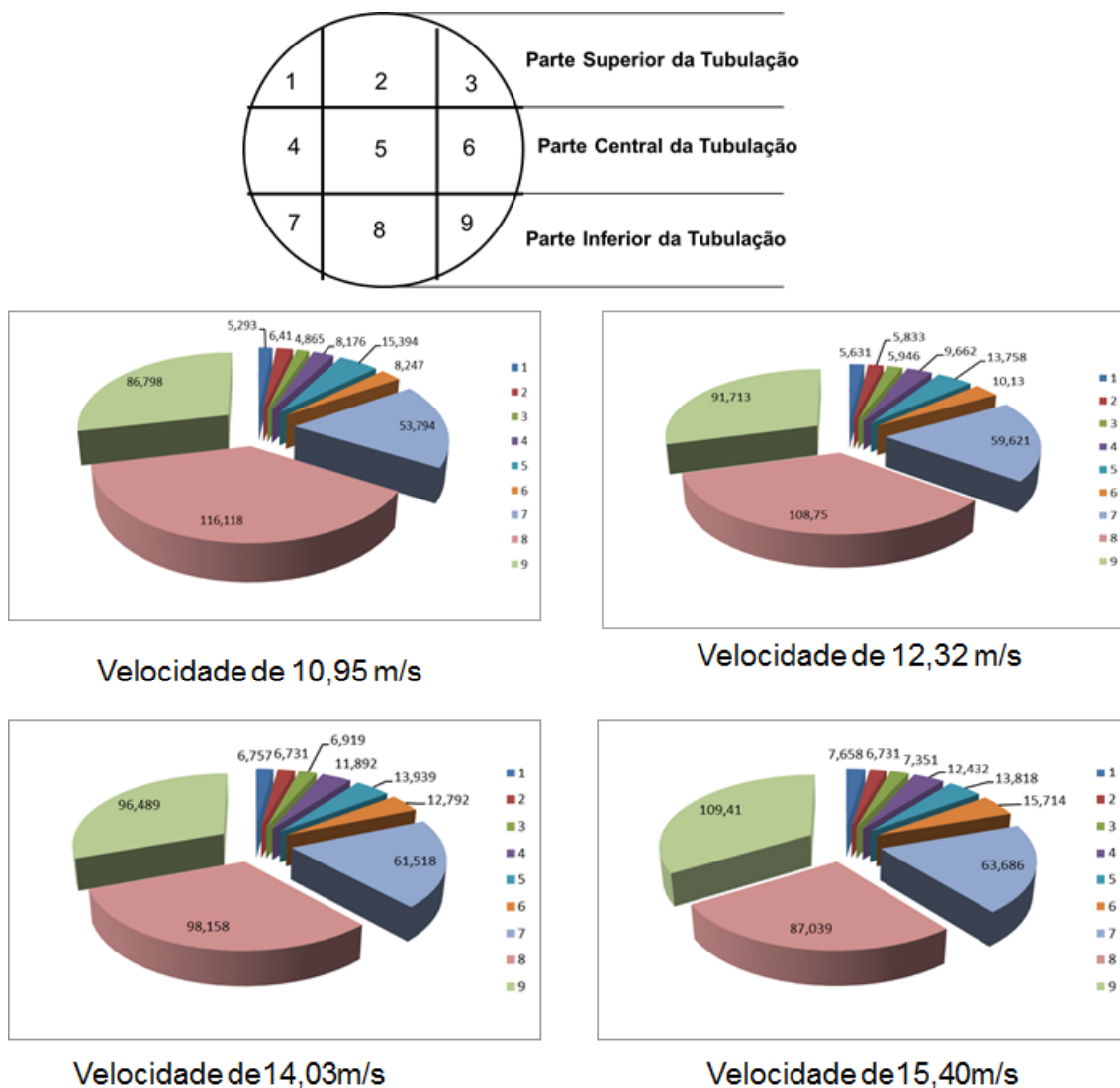


Figura 4.5 - Distribuição dos grãos de soja em g/cm^2 para a vazão de $0,076 \text{ kg/s}$

Através da análise do Gráfico representado pela Figura 4.5, verificou-se que:

- como nas duas vazões estudadas anteriormente, a concentração de grãos de soja ocorreu nos coletores 7, 8 e 9, sendo que houve uma variação abrupta do coletor 6 para o 7;
- houve pouca variação de concentração da soja nos coletores para as vazões de $0,058 \text{ kg/s}$ e $0,076 \text{ kg/s}$, porém os valores dos coletores 7, 8 e 9 aumentaram, diferentemente do que ocorreu entre as vazões de $0,034$ e $0,058 \text{ kg/s}$.

Isto indica que a Unidade projetada apresentou melhores condições de transporte para a vazão mássica de 0,058 kg/s, pois acima desta vazão e para as velocidades do ar estudadas (limite do equipamento), a tendência é ocorrer o acúmulo de grãos, o que pode ser verificado nas Figuras 4.6 e 4.8, para as vazões de 0,076 e 0,098 kg/s, respectivamente.

Para complementar a análise para a vazão de 0,076 kg/s, foi plotado o Gráfico representado pela Figura 4.6, no formato de colunas.

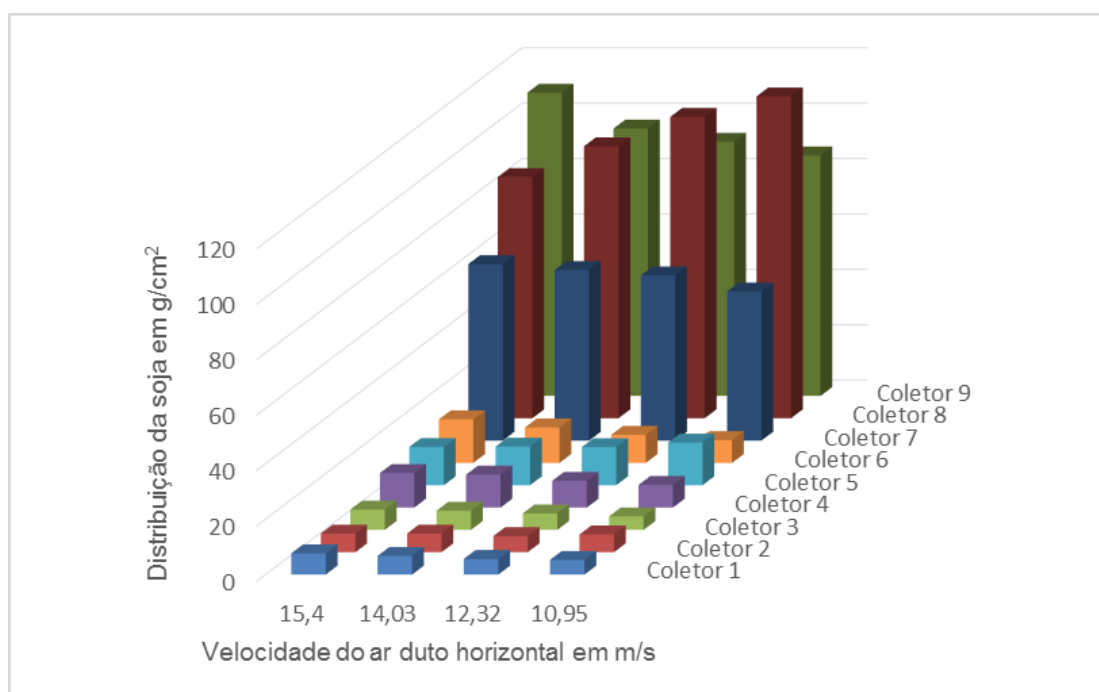


Figura 4.6 – Distribuição dos grãos de soja para vazão de 0,076 kg/s

Ao fazer a análise da distribuição da soja na seção horizontal do Transportador Pneumático para a vazão de 0,076 Kg/s, nas velocidades de 10,95; 12,32; 14,03 e 15,40 m/s, foi observado através dos valores obtidos na Tabela C3 e do Gráfico representado pela Figura 4.6, que a concentração dos grãos de soja ocorreu nos coletores 7, 8 e 9, sendo em torno dos 80% do total. Houve um aumento substancial, entre os coletores 6 e 7, praticamente a concentração de soja no coletor 7 foi o triplo. À medida que a frequência diminuiu e consequentemente a velocidade do ar no duto horizontal, a concentração nesses coletores mencionados aumentava, em virtude da gravidade terrestre, pois os coletores mencionados estavam na posição inferior do duto de descarga.

4.6.3.4 DISTRIBUIÇÃO DA SOJA PARA A VAZÃO DE 0,098 kg/s

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam os gráficos da distribuição da soja em formato de *pizza* e a visão consolidada no gráfico de colunas, respectivamente para a vazão de 0,098 kg/s.

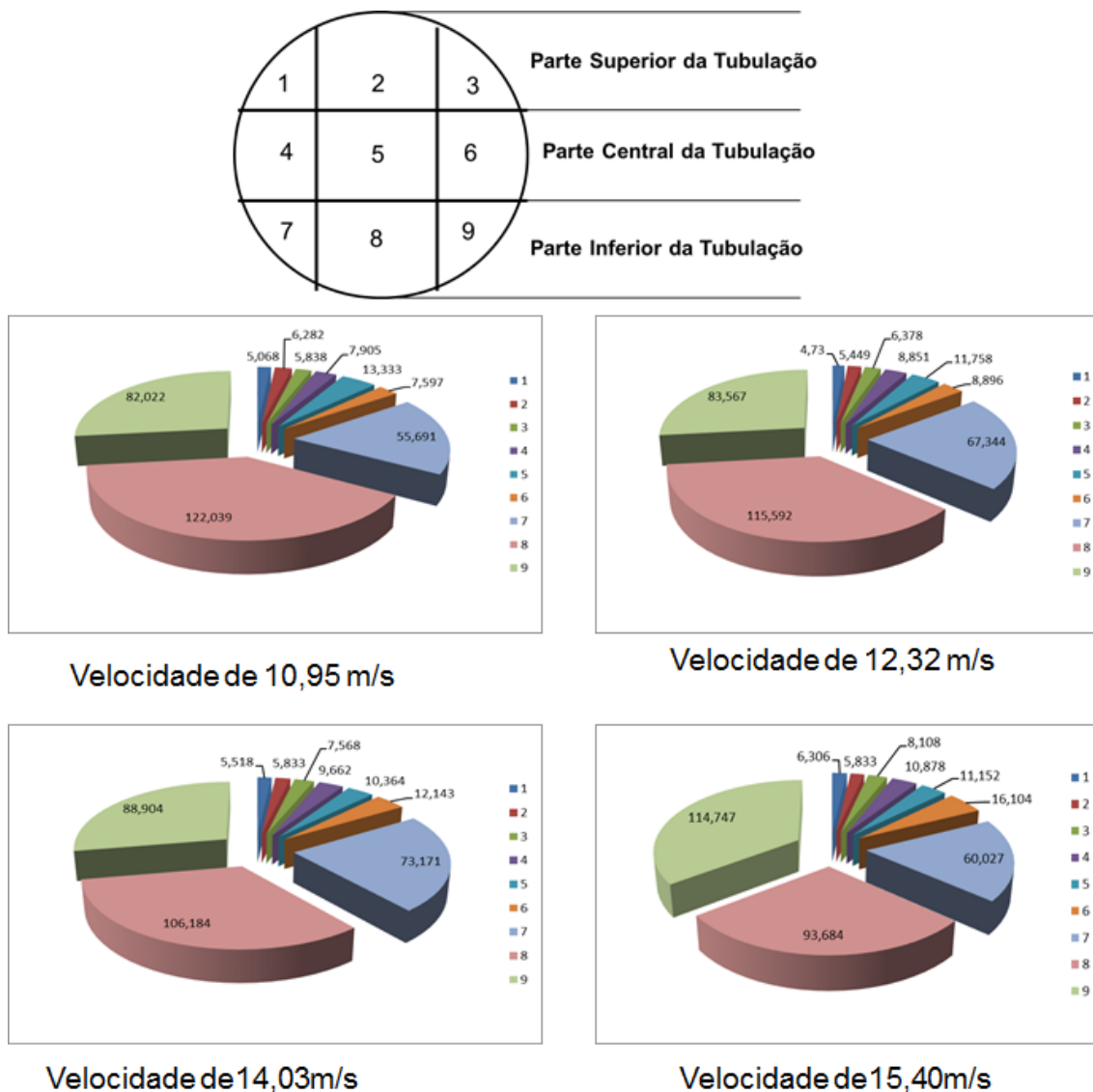


Figura 4.7 - Distribuição dos grãos de soja em g/cm² para a vazão de 0,098 kg/s

Através do Gráfico representado pela Figura 4.7, verificou-se que:

- a) do mesmo modo como ocorreu para as três vazões estudadas anteriormente, a concentração de grãos de soja ocorreu nos coletores 7, 8 e 9, sendo que houve uma variação abrupta do coletor 6 para o 7;

- b) a maior concentração, 122 g/cm², foi no coletor 8 para a velocidade de 10,95 m/s;
- c) diferentemente do que ocorreu para as três vazões anteriormente analisadas, o coletor 8 só foi superado pelo 9 na última velocidade, ou seja, 14,03 m/s.

Os coletores 7, 8 e 9 estão situados na parte inferior duto de descarga, concentrando em torno de 85% da quantidade dos grãos de soja. Isso se deveu em virtude da gravidade e da velocidade do ar.

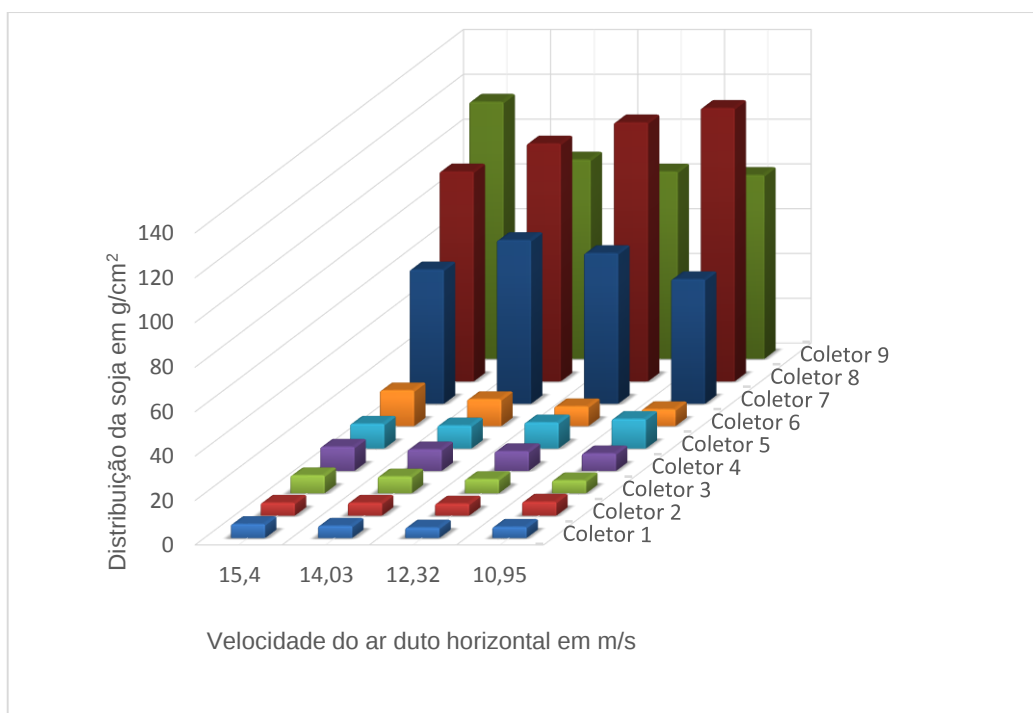


Figura 4.8 – Distribuição dos grãos de soja para vazão de 0,098 kg/s

Em todos os cenários analisados, há uma concentração de grãos de soja na parte inferior da tubulação do Transportador Pneumático. De uma forma geral, esse acúmulo indica que o transporte da soja não está nas condições adequadas, ou seja, a velocidade do ar deveria ser maior para não ocorrer a concentração dos grãos, pois isso provoca desgaste na parte inferior e aumento da perda de carga.

Com os dados nas Tabelas D1 a D4 constantes no Apêndice D, foram plotados os gráficos de distribuição da soja em valores percentuais que estão

apresentados nos Apêndices E, F, G e H, para as vazões de 0,034, 0,058, 0,076 e 0,098 kg/s respectivamente.

4.7 CURVA DE PERDA CARGA DO AR EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE

Os dados obtidos no experimento descrito no item 3.2.6 e os valores medidos de pressões do ar nos pontos de tomada de P1 a P10, relativos a cada velocidade do ar no duto de descarga, estão representados no Anexo I, através da Tabela I1 e dos Gráficos representados pela Figura I1, diferença de pressão entre os pontos P1 e P10, Figura I2, diferença de pressão entre P3 e P4 e I3, diferença de pressão entre os pontos P7 e P8 e I4, diferença de pressão entre os P1 e P7.

4.8 PERDA DE CARGA DA MISTURA AR COM GRÃOS DE SOJA

Para a determinação da perda de carga da mistura ar com os grãos de soja, foram consideradas as quedas de pressão entre os pontos P1 e P10, que envolve o primeiro e último ponto de tomada de pressão da Unidade Piloto; pontos P3 e P4, que se situam antes e depois do Silo; entre os pontos P7 e P8, que estão posicionados antes e após a primeira curva e entre os pontos P1 e P7 que abrangem o trecho horizontal. Foram utilizadas as vazões mássicas de 0,034 kg/s, 0,058 kg/s, 0,076 kg/s e 0,098 kg/s, as mesmas usadas para análise da distribuição da soja no trecho horizontal e pelo fato da Unidade Piloto não operar com vazões mais altas no transporte pneumático de grãos de soja, em virtude da densidade desse vegetal. Os dados obtidos estão apresentados nas Tabelas 4.4, 4.6, 4.7 e 4.8.

Tabela 4.5 – Perda de Carga para Vazão de 0,034 kg/s

V ar em m/s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15,40	98,20	87,15	86,40	81,30	82,65	79,35	76,65	68,40	64,20	65,05
14,03	84,10	72,55	72,75	69,25	67,70	67,65	66,55	58,70	55,35	54,15
12,32	71,20	62,30	62,00	58,10	59,20	57,70	56,00	48,40	46,50	46,20

Tabela 4.6 – Perda de Carga para Vazão de 0,058 kg/s

V ar em m/s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15,40	99,75	86,70	84,65	81,50	79,65	76,95	76,60	66,75	64,65	61,70
14,03	84,80	74,30	73,20	68,25	67,55	66,60	65,80	56,35	54,25	52,80
12,32	72,15	64,65	64,50	59,90	60,25	58,45	58,40	49,00	48,35	47,00

Tabela 4.7 – Perda de Carga para Vazão de 0,076 kg/s

V ar em m/s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15,40	99,85	86,85	86,10	81,55	78,90	78,10	76,25	65,95	62,30	60,85
14,03	85,85	74,20	73,65	69,25	68,60	67,60	65,00	56,60	51,90	51,50
12,32	79,9	64	69,3	63,2	55,65	69	54,4	44,55	41,75	40,9

Tabela 4.8 – Perda de Carga para Vazão de 0,098 kg/s

V ar em m/s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15,40	101,40	88,00	86,20	82,75	79,40	77,70	74,85	64,40	61,30	58,70
14,03	86,4	75,6	73	77,5	75,25	75,35	70	49,35	47,3	47,15
12,32	72,9	64,5	61,7	50,5	54,7	50,1	55,9	47,75	46	48,1

4.8.1 PERDA DE CARGA DA MISTURA AR COM GRÃOS DE SOJA ENTRE OS PONTOS P1 E P10

Através do *Software Excel* foi plotado o Gráfico representado pela Figura 4.9 que apresenta os pontos da perda de carga da mistura ar com grãos de soja entre os pontos P1 e P10 para as vazões de 0,034 kg/s, 0,058 kg/s, 0,076 kg/s e 0,098 kg/s e para as velocidades do ar no tubo de descarga de 12,32; 14,03 e 15,40 m/s.

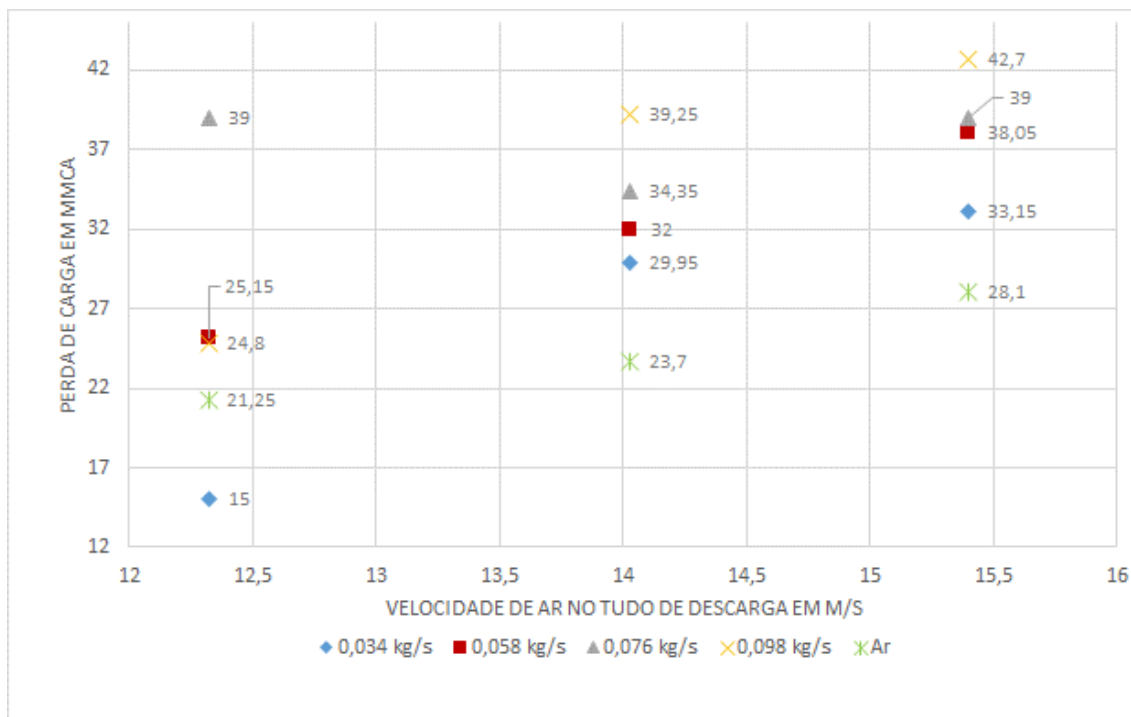


Figura 4.9 – Pontos da curva da perda de carga da soja entre os pontos P1 e P10

Para a perda de carga da mistura ar e soja para as vazões de 0,034 kg/s, 0,058 kg/s, 0,076 kg/s e 0,098 kg/s entre os pontos P1 e P10, que envolve todos os pontos de medição e transporte dos grãos nos trechos horizontal e vertical, foi verificado através dos pontos plotados no Gráfico representado pela Figura 4.9, que quanto maior a vazão, maior a queda de pressão, o que está de acordo com a literatura. Entretanto, houve uma distorção para a velocidade de 12,32 m/s, ponto em que a queda de pressão do ar foi superior à da vazão de 0,034 kg/s, fato que ocorreu provavelmente em virtude da má distribuição das partículas na tubulação.

4.8.2 PERDA DE CARGA DA MISTURA AR COM GRÃOS DE SOJA ENTRE OS PONTOS P3 E P4

Através da Figura 4.10 é apresentada a perda de carga da mistura ar com grãos de soja entre os pontos P3 e P4 para as vazões de 0,034 kg/s, 0,058 kg/s, 0,076 kg/s e 0,098 kg/s e para as velocidades do ar no tubo de descarga de 12,32; 14,03 e 15,40 m/s.

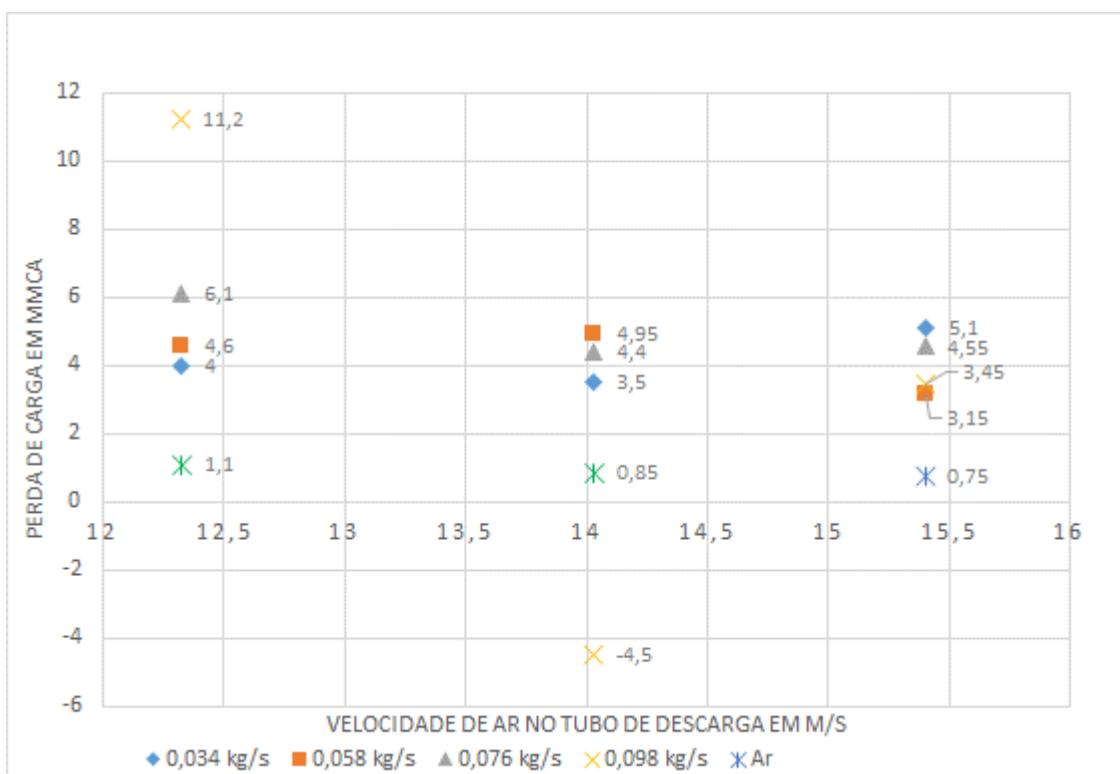


Figura 4.10 – Pontos da curva da perda de carga da soja entre os pontos P3 e P4

Com o objetivo de verificar a influência do local de alimentação da soja na tubulação e consequentemente do efeito da entrada de ar na perda de carga da mistura ar e soja para as vazões de 0,034 kg/s, 0,058 kg/s, 0,076 kg/s e 0,098 kg/s, foram selecionados os pontos de medição P3 e P4, que abrangem o silo do transportador pneumático, foi verificado através dos pontos do Gráfico representado pela Figura 4.10, que houve pouca variação da perda de carga nas velocidades e vazões estudadas, pois trata-se do ponto da alimentação, onde as partículas estão inicialmente paradas, no fundo da tubulação e em início de deslocamento.

4.8.3 PERDA DE CARGA DA MISTURA AR COM GRÃOS DE SOJA ENTRE OS PONTOS P7 E P8

Com o intuito de avaliar o impacto no transporte pneumático da soja em curva, foram escolhidos os pontos P7 e P8 para elaborar o gráfico representado pela Figura 4.11, que apresenta os pontos da perda de carga da mistura ar com grãos de soja entre os pontos mencionados para as vazões de 0,034 kg/s, 0,058

kg/s, 0,076 kg/s e 0,098 kg/s e para as velocidades do ar no tubo de descarga de 12,32; 14,03 e 15,40 m/s.

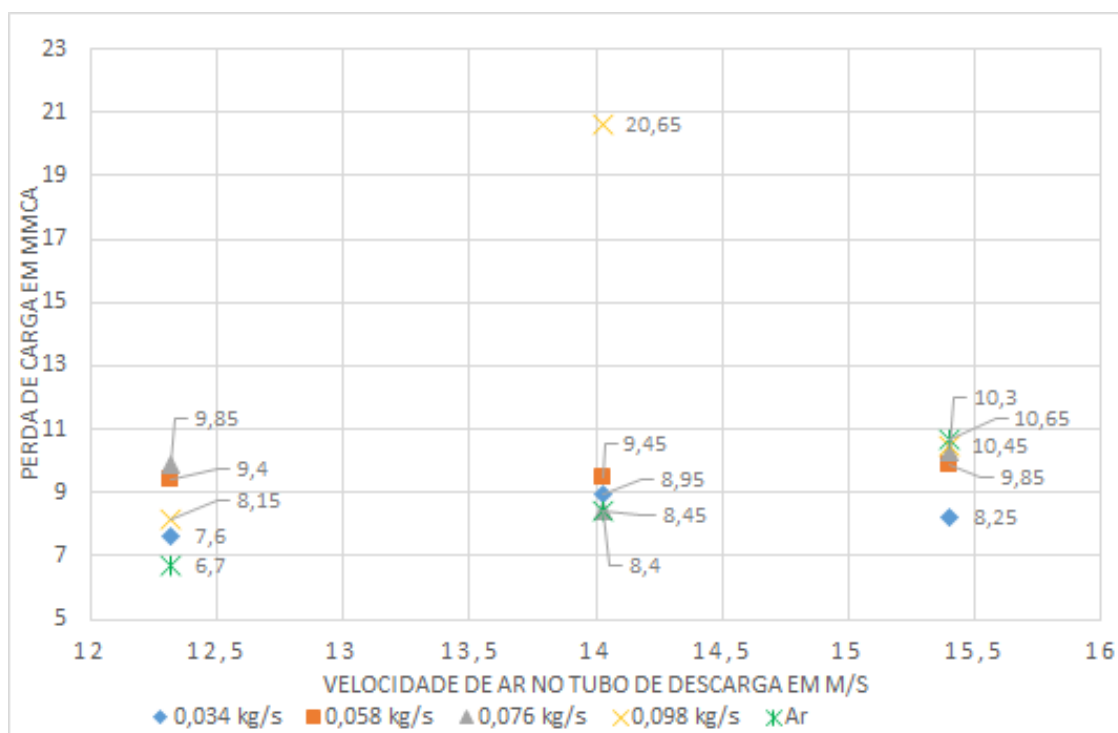


Figura 4.11 – Pontos da curva da perda de carga da soja entre os pontos P7 e P8

Os pontos do Gráfico representado pela Figura 4.11 e os dados demonstram que o transporte pneumático dos grãos de soja entre os pontos P7 e P8 não está de acordo com o visto na Figura 2.2 e consequentemente na literatura, por se tratar de um ponto crítico, ou seja, uma curva, onde há acúmulo de grãos, além de ser mais susceptível à erosão. Houve pouca variação da perda de carga para as vazões e velocidades analisadas e à medida que a velocidade do ar aumentou, a perda de carga do ar ficou superior às das demais vazões dos sólidos.

Com o aumento da velocidade do ar, a perda de carga, que deveria subir, diminuiu para a vazão de 0,034 kg/s, em virtude de fenômeno *vena contracta*, que ocorre devido à re-aceleração dos grãos de soja pelo ar, logo após a curva, ou seja mudança da direção do deslocamento das partículas.

4.8.4 PERDA DE CARGA DA MISTURA AR COM GRÃOS DE SOJA ENTRE OS PONTOS P1 E P7

Afim de observar o comportamento do transporte pneumático no trecho horizontal da Unidade Piloto, foi plotado o Gráfico representado pela Figura 4.12 que apresenta a perda de carga da mistura ar com grãos de soja entre os pontos P1 e P7 para as vazões de 0,034 kg/s, 0,058 kg/s, 0,076 kg/s e 0,098 kg/s e para as velocidades do ar no tubo de descarga de 12,32; 14,03 e 15,40 m/s.

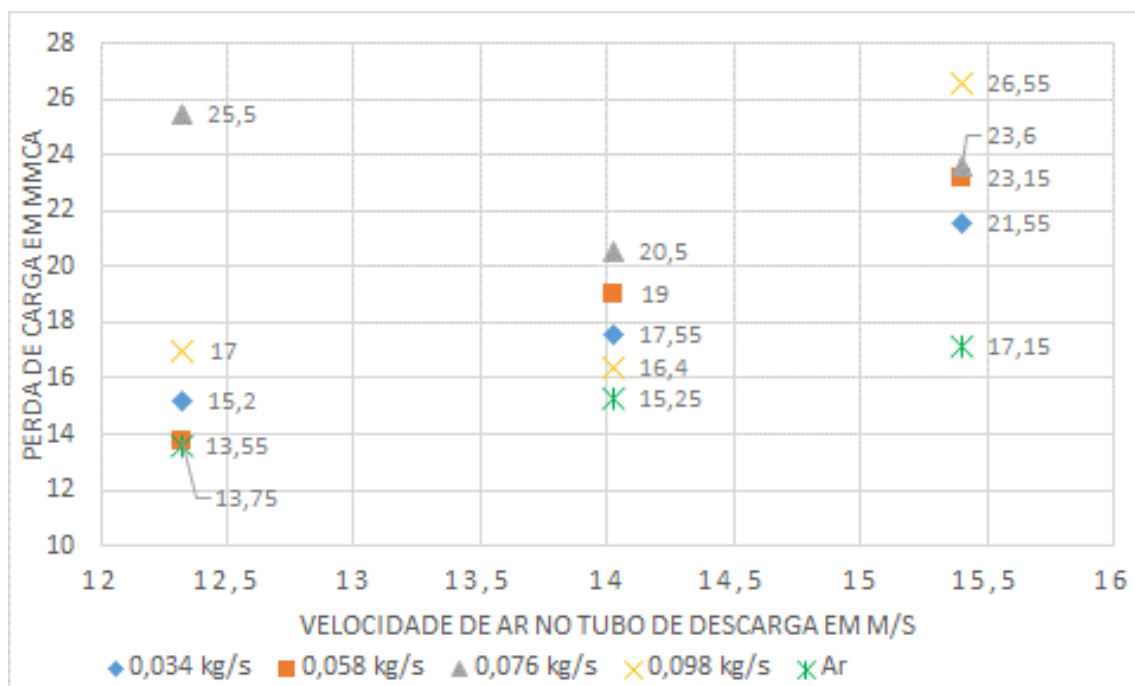


Figura 4.12 – Pontos da curva da perda de carga da soja entre os pontos P1 e P7

Foi observado que quanto maior a vazão em função da velocidade do ar, maior a queda de pressão, o que está de acordo com (KLINZING *et al.*1997) representada pela Figura 2.2. Entretanto, as curvas referentes às vazões de 0,076 kg/s e 0,098 kg/s de soja mostram que eles entraram em fase diluída na velocidade de 14 m/s, posterior às demais vazões, que já se encontravam nessa situação com 12 m/s. Isso demonstra que para as vazões maiores, o Transportador Pneumático utilizado nos experimentos não apresenta bom desempenho, pois o ventilador apresenta dificuldade para deslocar os grãos, sendo necessário redimensioná-lo.

4.9 DADOS CALCULADOS DA PERDA DE CARGA DOS GRÃOS DE SOJA ENTRE OS PONTOS P1 E P7

Foram calculados os valores de Perda de Carga para o transporte pneumático da soja entre os pontos P1 e P7, com a utilização das equações da literatura, ou seja, comparar um trecho reto experimental com as equações de (GOMIDE, 1983), as quais estão demonstradas no Apêndice J. Foi utilizada a velocidade de 15,40 m/s, sendo obtidos os seguintes resultados:

- a) para a vazão de 0,034 kg/s o valor de 75,12 mmca;
- b) para a vazão de 0,058 kg/s o valor de 79,32 mmca.

Os valores calculados foram superiores a 3,6 vezes os valores obtidos experimentalmente de 21,55 mmca e 23,15 mmca, para as vazões de 0,034 kg/s e 0,058 kg/s, respectivamente. Para o transporte pneumático de *pellets* de propileno no trecho horizontal da Unidade Piloto, (MORAES, 2012) os resultados da perda de calculados foram da ordem de 3 vezes em relação àqueles obtidos nos ensaios, o que mostra que as equações de (GOMIDE, 1993) são superdimensionados para o transportador utilizado.

O Transportador Pneumático não está operando em condições adequadas para a soja, pois há acúmulo e má distribuição dos grãos na seção horizontal da tubulação e, portanto, a perda de carga experimental também não seria um valor condizente.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Após a realização dos experimentos na Unidade Piloto de Transporte Pneumático da Unisanta, parte fundamental para a elaboração dessa dissertação, foram obtidos diversos resultados, com os quais pode-se concluir que:

- a) O valor obtido experimentalmente para a densidade aparente da soja, através do método de cilindro de fundo foi de $1,1567 \text{ g/cm}^3$, que está próximo aos levantados pela literatura e foi utilizado como parâmetro para dimensionamento do motor para o transporte pneumático de soja, conforme artigo do autor, que se encontra no ANEXO A.
- b) Ao realizar a análise da distribuição da soja na seção horizontal do Transportador Pneumático para a vazão de $0,034 \text{ kg/s}$, nas velocidades de $10,95$; $12,32$; $14,03$ e $15,40 \text{ m/s}$, foi observado que a concentração dos grãos de soja ocorreu nos coletores 7, 8 e 9, fundo da tubulação horizontal, variando entre 79 e 84% do total. À medida que a frequência diminuiu e consequentemente a velocidade do ar no duto horizontal, a concentração nesses coletores aumentava, em virtude da gravidade terrestre, pois os coletores estavam na posição inferior do duto de descarga. Houve mudança da maior concentração de soja entre os coletores 8 e 9 quando velocidade do ar aumentou de $14,03 \text{ m/s}$ para $15,40 \text{ m/s}$. O fenômeno se repetiu, com poucas variações, para as vazões de $0,058 \text{ kg/s}$, $0,076 \text{ kg/s}$ e $0,098 \text{ kg/s}$.
- c) Os pontos das curvas da perda de carga do ar foram levantados com os dados obtidos entre os pontos P1 e P10, que envolve todos os pontos de medição, entre os pontos P3 e P4, antes e após a alimentação da soja na tubulação, entre os pontos P7 e P8, antes e depois da primeira curva do Transportador Pneumático e entre os pontos P1 e P7, trecho reto horizontal da Unidade Piloto.

- d) Foram comparados os dados de perda de pressão obtidos experimentalmente no trecho horizontal da Unidade Piloto para a velocidade do ar de 15,40 m/s e vazões de 0,034 e 0,058 kg/s de grãos de soja com os valores calculados através das equações da referência (GOMIDE,1983) e foi que verificado que eles foram da ordem de 3,6 dos dados experimentais.

Na Unidade Piloto de Transporte Pneumático não foi possível realizar experiências com vazão superiores a 0,100 Kg/s de soja e frequências inferiores a 50 Hz, o que não ocorreu para os *pellets* polipropileno e polietileno, conforme (MORAES, 2012) que realizou experimentos com vazão máxima de 0,233 kg/s dos produtos mencionados e frequências de até 45 Hz. Isso ocorreu, pois a densidade aparente dos *pallets* foi 0,557 g/cm³ é inferior à da soja, 1,1567 g/cm³.

Como mencionado anteriormente, no Apêndice A, se encontra um artigo do autor deste trabalho, que foi submetido ao II Encontro de Pós-Graduação da Unisanta no final de 2013, sendo aceito e exposto na forma de Painel no mês de Novembro do mesmo ano. Posteriormente, o artigo foi publicado na Revista *Online Unisanta Science and Technology*, Vol.3, nº.1 de 06 de Julho de 2014, disponível no endereço eletrônico: <http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat>)

Nesse artigo, considerando-se vazão de 0,233 kg/s de soja, valor máximo utilizado com os *pellets* de polietileno e polipropileno e densidade aparente da soja da soja 1,1567 g/cm³, foi dimensionado um novo motor elétrico do ventilador, para que a Unidade Piloto pudesse operar com grãos de soja nas condições mencionadas, o qual possui as seguintes características:

- a) motor elétrico trifásico;
- b) tensões de 220 e 380 V;
- c) potência de 3 hp;
- d) rotação de 3500 rpm

Como sugestão de trabalho futuro, propõe-se instalar no Transportador Pneumático da Unisanta, um novo motor elétrico com as características acima e

realizar os experimentos com o intuito de verificar a viabilidade da Unidade Piloto operar plenamente com o transporte pneumático dos grãos de soja.

Outra proposta seria instalar na Unidade Piloto uma polia com diâmetro menor, diretamente conectada à atual com o objetivo de aumentar a rotação do ventilador do Transportador Pneumático, mantendo-se o motor elétrico atual.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Endereço Eletrônico da empresa Embrapa, site http://www.cnpso.embrapa.br/index.php?op_page=22&, informação acessada em 30/09/2013.

(2) Endereço Eletrônico da Empresa Embrapa, site http://www.cnpso.embrapa.br/index.php?op_page=294&cod_pai=16, informação acessada em 30/09/2013.

FREITAS, R. E.; STERTZ, S. C.; WASZCZYNSKYJ, N.; **Viabilidade da produção de pão, utilizando farinha mista de trigo e mandioca em diferentes proporções**. B. CEPPA, v. 15, n. 2, p. 197-208, 1997

GOMIDE, R.; Operações unitárias. **Operações com sistemas granulares**. São Paulo, ed. do autor. 1983, v. 1.

HOFMANN, A. M. S.; **Experimentos, modelagem, simulação e controle de uma operação contínua de secagem e resfriamento de soja (*Glycine max*) extrusada**, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012

KAGAWA, A. ed. **Standard table of food composition in Japan**. Tokyo: University of Nutrition for women, 1995. p. 104-105

KLINZING, G. E.; et al.; **Pneumatic conveying of solids: A theoretical and practical approach**. 2ed. London, Chapman & Hall. 1997, 624 p.

MARCUS, R. D., LEUNG L. S., KLINZING G. E., RIZK F.; **Pneumatic conveying of solid**. London: Chapman and Hall. 2010.

MOLERUS, O., **Overview: Pneumatic transport of solids**. Powder Technology, v.88, p.309-321, 1996.

MOURA, N.C.; BRAZACA, S. G. C.; SOUZA, M. C.; **Características físicas de quatro cultivares de soja crua e submetidas a diferentes tratamentos térmicos**, Revista Alimentos e Nutrição, Araraquara, v.20, n.3, p. 383-388, jul./set. 2009.

MORAES, M.S.; **Convecção forçada de partículas poliméricas em fase diluída: Curvas de pressão e distribuição de partículas**, Tese (Doutorado), Unicamp, Campinas, Março de 2012.

PAIXÃO, A. E. A.; **Modelagem do Transporte Pneumático vertical em fase diluída: Aplicações em Transferência de calor e Secagem**, Tese (Doutorado), Unicamp, Campinas, Outubro de 1995.

PAN, R.; **Material properties and flow modes in pneumatic conveying**, Powder Technology v. 104, p. 157–163, 1999.

RHODES M.; **Transporte Pneumático de Partículas**. UFRN, Rio Grande do Norte, 2004. (www.ufrnet.ufm.br), acessado em 12 de março de 2014.

RIBEIRO, D. M.; Correa, P. C.; RODRIGUES, D. H.; GONELI, A. L. D; **Análise da variação das propriedades físicas dos grãos de soja durante processo de secagem**, Revista Ciência, Tecnologia e Alimentos, nº. 25, p. 611-617, julho-setembro, Campinas, São Paulo, 2005.

SANTOS, S. B.; **Projeto e montagem de unidade piloto de transporte pneumático em fase diluída para estudo da relação entre a perda de carga e a distribuição de partículas granulares na seção transversal de dutos industriais**, Tese (Doutorado), Unicamp, Campinas, Fevereiro de 2009.

SILVA, D.R.; **Transporte Pneumático – Tecnologia, projetos e aplicações na indústria e nos serviços**. Artliber. 2005, 172 p.

STOESS Jr, H. A.; **Pneumatic Conveying**. New York: John Wiley & Son – Interscience, 1970, 217 p.

VIEIRA, C. R.; CABRAL, L. C.; PAULA, A. C. O. de; **Caracterização Física e Tecnológica de seis cultivares de soja plantadas no Brasil**, Revista Ciência e Tecnologia Alimentar, Embrapa, Rio de Janeiro v. 17, 1997.

APÊNDICE A – ARTIGO PUBLICADO NA REVISTA UNISANTA SCIENCE AND TECHNOLOGY

Unisanta Science and Technology, 2014, 6, July
Published Online 2014 Vol.3 Nº1 <http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat>



Motor/ventilador para unidade piloto de transporte pneumático em fase diluída: deslocamento de grãos de soja

V. A. Tavares, K. T. C. Roseno, D. Moraes Jr. e A. R. Santos

*Unisanta – Universidade Santa Cecília – Departamento de Pós-Graduação
Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica
Rua Osvaldo Cruz- Santos-SP, Brasil
E-mail: rsantos@unisanta.br, k.tamiao@unisanta.br
Received January, 2014, revised march, 2014*

Resumo

A Unidade Piloto de Transporte Pneumático do Laboratório de Operações Unitárias da Unisanta foi inicialmente projetada para o estudo do deslocamento de partículas de polietileno e polipropileno. Estudos iniciais com o transporte de soja, em função de sua maior densidade, indicaram a necessidade de uma maior potência do ventilador para evitar o acúmulo desta leguminosa na parte inferior da tubulação. O trabalho teve por objetivo especificar um motor para o sistema. A análise das condições operacionais indicam o emprego de um motor trifásico, 220/380V, 2 polos, 3500 rpm e 3 CV.

Palavras chave: Transporte Pneumático, Fase Diluída, Soja.

Engine/fan to the experimental unit of pneumatic conveying in diluted phase: displacement of soya beans

Abstract

The Experimental Unit of Pneumatic Conveying of the Laboratory of Unit Operations of Unisanta was initially designed to study the displacement of particles of polyethylene and polypropylene. Initial studies with transport of soybeans, due to its higher density indicated the need for a higher fan power to avoid the accumulation of this legume in the underside of the pipe. The study aimed to specify an engine for the system. The analysis of operating conditions indicate the use of a three-phase motor, 220/380V, 2-pole, 3500 rpm and 3 HP.

Keywords: Pneumatic Conveying, Dilute Phase, Soybean.

1. Introdução

O Transportador Pneumático é um equipamento de amplo emprego na movimentação e elevação de diversos sólidos nos processos industriais e agrícolas. A granulometria do sólido transportado pode variar desde pó fino, acima de 100 μm , até grãos de cerca de 1 cm. E a densi-

dade abrange valores desde 15 kg/m^3 até um máximo de 3 t/m^3 (Gomide, 1983).

As vantagens apresentadas pelo transporte pneumático são (Marcus, 2010; Silva, 2005):

- a) pouco risco de contaminação para o elemento particulado;
- b) sistemas com flexibilidade de montagem, uma vez que podem ser utilizados dutos verticais, inclinados, horizontais e curvas;
- c) baixo custo de operação e de manutenção;
- d) facilidade para automatização de sistemas;
- e) higiene e segurança dos trabalhadores no ambiente trabalho;
- f) diminui, ou ainda, elimina a perda de produto transportado.

O princípio básico do dispositivo do transporte pneumático é a fluidização do sólido com um fluido que geralmente é o ar ou um gás inerte. A mistura sólido-fluido escoar pelo interior dos dutos do sistema. A diferença entre transporte pneumático em fase diluída e fase densa, reside principalmente no equipamento de movimentação do gás, que é um ventilador centrífugo ou compressor, no caso de deslocamento em fase diluída ou soprador de deslocamento positivo ou compressor, na operação em fase densa (Gomide, 1983). O projeto de transportador pneumático requer a especificação da capacidade de transporte (curvas, válvulas, e equipamentos de coleta do sólido). Os parâmetros calculados são o diâmetro do transportador, a vazão do gás, a perda de carga total do sistema e a potência do ventilador ou soprador (Gomide, 1983) (Damin, *et al.* 2013) (Melo, *et al.* 2012).

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja, sendo a sua produção superada apenas pela dos Estados Unidos, segundo informações da empresa Embrapa Soja (1).

Conforme a empresa Embrapa Soja (2), os números da cultura da soja para a safra 2010/2011 foram:

- a) produção mundial de 263,7 milhões de toneladas, com área plantada de 103,5 milhões de hectares;
- b) produção nos Estados Unidos de 90,6 milhões de toneladas, com área plantada de 31,0 milhões de hectares, com produtividade 2.922 kg/ha;
- c) produção no Brasil de 75,0 milhões de toneladas, com área plantada de 24,2 milhões de hectares, com produtividade de 3.106 kg/ha.

Dentro deste contexto, o presente trabalho visa a apresentar os cálculos referentes à seleção de um novo ventilador para a Unidade Piloto de Transporte Pneumático em fase diluída instalada no Laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília. Salienta-se que atualmente a Unidade é operada com um ventilador de deslocamento de milho e polipropileno, porém a soja é um sólido de maior densidade, necessitando de uma potência mais elevada para o transporte sem acúmulo de material.

2. Objetivo

O objetivo do presente trabalho é o cálculo da potência requerida pelo motor/ventilador da Unidade Piloto de Transporte Pneumático em fase diluída (figura 1), para esta operar em deslocamento de grãos de soja.



Figura 1 – Unidade Piloto de Transporte Pneumático Projetada e Instalada no laboratório de Operações Unitárias da Unisantia (Moraes, 2012)

3. Materiais e Métodos

A Unidade Piloto de Transporte Pneumático apresentada na Figura 1 foi projetada para o deslocamento de pellets de polipropileno, visando o estudo da perda de carga em trechos retos e acessórios de tubulações, além da distribuição das partículas na seção transversal da (Moraes, 2012). Os detalhes do motor do ventilador, assim como outros componentes, são apresentados na Figura 2.

Detalhes do motor para o cálculo da potência.

1) dinamômetro; 2) linha de conexão; 3) haste fixa ao motor em balanço; 4) motor em balanço; 5) mancal com rolamento; 6) rolamento extra para manter a carcaça do motor em balanço; 7) "cooler" do motor; 8) radiação do tacômetro; 9) tacômetro e 10) inversor de frequência do motor do ventilador.

Os estudos utilizando pellets de polipropileno foram realizados com um ventilador acoplado a um motor (Figura 2) de corrente alternada, da marca WEG, modelo 0996EM17253, com rotação nominal de 3.450 rpm, potência de 1 CV (~0,96 HP). Com este motor/ventilador foi transportada no sistema uma capacidade máxima de propileno de 0,233 kg/s (0,8388 t/h).

Para a seleção de um novo ventilador/motor para a unidade operar com grãos de soja, serão utilizadas as equações de (1) a (8), disponibilizadas por (Gomide, 1983).

$$V = 4,11 \sqrt{\rho} + \sqrt{a} + 23,1 \sqrt{\rho} \quad (1)$$

Sendo: V a velocidade de transporte em (m/s)

ρ a densidade aparente do sólido em (t/m³).
 d o diâmetro médio da partícula de soja em (mm).

$$L_t = L_h + 2 \cdot L_v + L_e \quad (2)$$

Sendo:

L_t a perda de carga por atrito devido ao comprimento total em (m).

L_h a perda de carga devido ao trecho horizontal do duto de transporte em (m).

L_v a perda de carga devido ao trecho vertical do duto de transporte em (m).

L_e a perda de carga devido às curvas do duto de transporte em (m).

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot V \quad (3)$$

Sendo:

Q a vazão do ar de transporte em (m³/s).

D o diâmetro interno da tubulação em (m).

V a velocidade de transporte em m/s.

$$X = \frac{c}{4,29 \cdot Q} \quad (4)$$

Sendo:

X a relação de sólidos em peso em (kg de sólidos/kg de ar)

Q a vazão do ar de transporte em (m³/s).

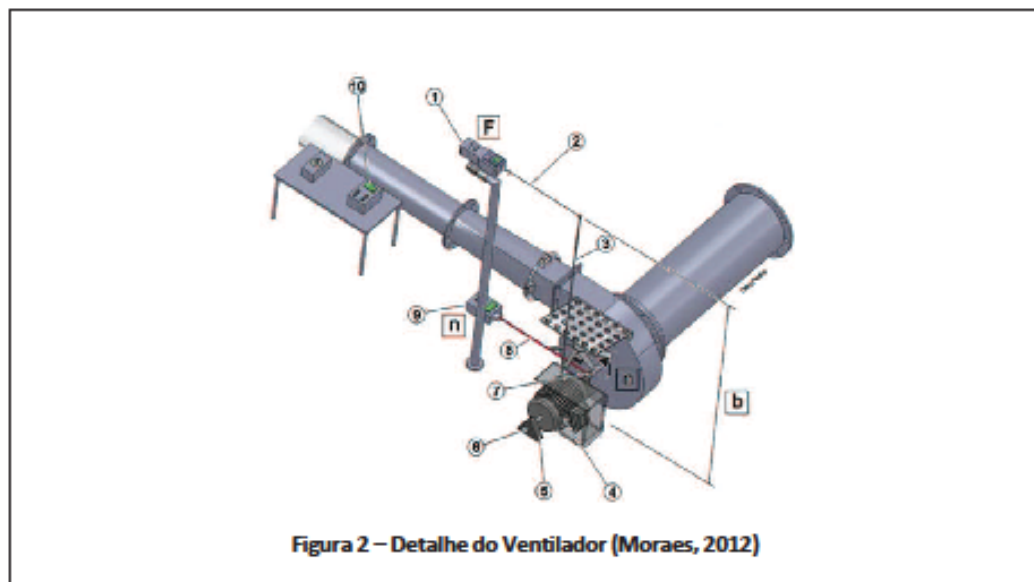


Figura 2 – Detalhe do Ventilador (Moraes, 2012)

$$\Delta P_t = \left[1,68 \cdot 10^{-4} (X + 3,5) \cdot \frac{V^{1,8}}{D^{1,2}} + 0,138 \cdot 10^{-4} X \cdot V^2 + \Delta P_u \right] \cdot 10^{-2} \quad (5)$$

Sendo:

ΔP_t a Perda de Carga Total em (Kg/cm²)

Lt a perda de carga por atrito devido ao comprimento total em (m).

X a relação de sólidos em peso em kg de (sólidos/kg de ar).

V a velocidade de transporte em (m/s).

D o diâmetro interno da tubulação em (mm).

μ o fator de redução da perda de carga por aceleração (Adotado valor de 0,5 pois o ponto de alimentação é localizado a montante da boca de aspiração (Gomide, 1983)).

ΔP_u a perda de carga nos equipamentos (mmca). (Foi considerado um ciclone comum no transportador estudado, tem-se o valor de 60 mmca (Gomide, 1983)).

$$P = 131,51 \cdot Q \cdot \Delta P_t \quad (6)$$

Sendo:

P a potência requerida pelo sistema em (HP)

Q a vazão do ar de transporte em (m³/s).

ΔP_t a Perda de Carga Total em (Kg/cm²).

$$P_1 = 1,25 \cdot P \quad (7)$$

Sendo:

P₁ a potência considerando-se sistema com conexão direta em (HP)

P a potência requerida pelo sistema em (HP).

$$P_2 = P_1/0,7 \quad (8)$$

Sendo:

P₂ a potência requerida, considerando-se o rendimento do ventilador de 70%, em (HP)

4. Resultados

A Tabela 1 apresenta os resultados referentes ao cálculo para a seleção de um motor/ventilador que deverá ser instalado na Unidade Piloto para estudos no Transporte Pneumático da soja. Os cálculos foram realizados utilizando-se como capacidade máxima do sistema (C) o valor de 0,233 kg/s ou 0,8388t/h. O diâmetro da tubulação da Unidade de Transporte Pneumático é de 117 mm.

Grandezas calculadas	Valor	Unidade
Velocidade de transporte	31,266	m/s
Perda de Carga	26,56	m
Vazão	0,336	m ³ /s
Fração em peso de sólido transportado	0,5819	Kg de sólidos / kg de ar
Perda de carga total	0,03678	Kg/cm ²
Potência requerida	1,62	HP
Potência considerando o sistema em conexão direta	2,025	HP
Potência considerando o rendimento do ventilador	2,893	HP

Tabela 1 – Resultados dos cálculos

5. Comentários e Conclusões

Trabalhos anteriores (Moraes, 2012) mostraram que a Unidade Piloto de Transporte Pneumático em estudo operou satisfatoriamente com pellets de polipropileno com uma vazão máxima de 0,233 kg/s, permitindo estudos de perda de carga e distribuição de partículas na seção transversal da tubulação, de grande importância no projeto desse tipo de equipamento. No entanto, o transporte de grãos de soja não foi possível no atual sistema, devido a maior densidade da soja ($1,1567 \text{ g/cm}^3$) em relação aos valores do polímero polipropileno ($0,90 \text{ g/cm}^3$).

Como o valor da potência calculada foi de 2,893 HP, o motor especificado deverá apresentar as seguintes características: motor trifásico, 3 CV (3 HP), velocidade de 3500 rpm, 2 polos, 220/380 V.

Obs:

(1) Endereço Eletrônico da empresa Embrapa, site http://www.cnpso.embrapa.br/index.php?op_page=22&informação acessada em 30/09/2013.

(2) Endereço Eletrônico da Empresa Embrapa, site http://www.cnpso.embrapa.br/index.php?op_page=294&cod_pai=16, informação acessada em 30/09/2013.

6. Referências Bibliográficas

- GOMIDE, R.; **Operações unitárias. Operações com sistemas granulares**. São Paulo, ed. do autor. 1983, v. 1.
- DAMIN O. C. B., MORAES Jr, D., SANTOS A. R., **Sequestration of carbon dioxide (CO₂) for construction and demolition waste**, UNISANTA – Science and Technology, ISSN: 2317-1316, Vol 2, No 2, p.p. 50-55, 2013.
- MELO, L. R. S., MORAES Jr, D., SANTOS A. R., **Oil-water bifasic flow in a bench scale experimental unit**, UNISANTA – Science and Technology, ISSN: 2317-1316, Vol 1, No 2, 2012.
- MARCUS R. D., LEUNG L. S., KLINZING G. E., RIZK F.; **Pneumatic conveying of solid**. London: Chapman and Hall. 2010.
- MORAES, M.S.; **Convecção forçada de partículas poliméricas em fase diluída: Curvas de pressão e distribuição de partículas**, Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas, Março de 2012.
- SILVA, D.R.; **Transporte Pneumático – Tecnologia, projetos e aplicações na indústria e nos serviços**. Artiber. 2005, 172 p.

APÊNDICE B – DISTRIBUIÇÃO DOS GRÃOS DE SOJA NO DUTO HORIZONTAL DA UNIDADE PILOTO DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO

Nas tabelas de B1 até B4 são apresentadas as massas coletadas para as quatro vazões de sólidos e as quatro velocidades do ar no duto horizontal de transporte.

Tabela B1 – Distribuição da soja para Vazão de soja de 0,034 Kg/s

Sacos	Massa (kg)			
	Vd = 15,40 m/s	Vd = 14,03 m/s	Vd = 12,32 m/s	Vd = 10,95 m/s
1	0,066	0,066	0,059	0,045
2	0,101	0,101	0,102	0,094
3	0,074	0,071	0,056	0,050
4	0,193	0,204	0,170	0,134
5	0,246	0,230	0,219	0,218
6	0,250	0,230	0,196	0,139
7	0,538	0,466	0,475	0,468
8	1,288	1,455	1,622	1,765
9	0,740	0,684	0,596	0,579

Tabela B2 – Distribuição da soja para Vazão de soja de 0,058 Kg/s

Sacos	Massa (kg)			
	Vd = 15,40 m/s	Vd = 14,03 m/s	Vd = 12,32 m/s	Vd = 10,95 m/s
1	0,070	0,062	0,050	0,045
2	0,102	0,094	0,088	0,097
3	0,070	0,065	0,058	0,045
4	0,209	0,189	0,160	0,125
5	0,256	0,237	0,210	0,228
6	0,274	0,226	0,171	0,134
7	0,412	0,451	0,514	0,411
8	1,227	1,458	1,660	1,753
9	0,855	0,688	0,559	0,631

Tabela B3 – Distribuição da soja para Vazão de soja de 0,076 Kg/s

Sacos	Massa (kg)			
	Vd = 15,40 m/s	Vd = 14,03 m/s	Vd = 12,32 m/s	Vd = 10,95 m/s
1	0,068	0,060	0,050	0,047
2	0,105	0,105	0,091	0,100
3	0,068	0,064	0,055	0,045
4	0,184	0,176	0,143	0,121
5	0,228	0,230	0,227	0,254
6	0,242	0,197	0,156	0,127
7	0,470	0,454	0,440	0,397
8	1,323	1,492	1,653	1,765
9	0,779	0,687	0,653	0,618

Tabela B4 – Distribuição da soja para Vazão de soja de 0,098 Kg/s

Sacos	Massa (kg)			
	Vd = 15,40 m/s	Vd = 14,03 m/s	Vd = 12,32 m/s	Vd = 10,95 m/s
1	0,056	0,049	0,042	0,045
2	0,091	0,091	0,085	0,098
3	0,075	0,070	0,059	0,054
4	0,161	0,143	0,131	0,117
5	0,184	0,171	0,194	0,220
6	0,248	0,187	0,137	0,117
7	0,443	0,540	0,497	0,411
8	1,424	1,614	1,757	1,855
9	0,817	0,633	0,595	0,584

APÊNDICE C – DISTRIBUIÇÃO DOS GRÃOS DE SOJA NO DUTO HORIZONTAL DA UNIDADE PILOTO DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO POR ÁREA DE CADA COLETOR

Nas tabelas de C1 a C4 são apresentadas a distribuição dos grãos de soja no duto horizontal da Unidade de Transporte Pneumático por área do coletor em g/cm^2 , calculadas para as velocidades de 10,95 a 15,40 m/s e para as vazões 0,034 kg/s, 0,058 kg/s, 0,076 kg/s e 0,098 kg/s.

Tabela C1 – Vazão de 0,034 kg/s

Coletores	Massa de soja por área do coletor (g/cm^2)			
	v = 15,40 m/s	v = 14,03 m/s	v = 12,32 m/s	v = 10,95 m/s
1	7,432	7,432	6,644	5,068
2	6,474	6,474	6,538	6,026
3	8,000	7,676	6,054	5,405
4	13,041	13,784	11,486	9,054
5	14,909	13,939	13,273	13,212
6	16,235	14,935	12,727	9,026
7	72,900	63,144	64,363	63,415
8	84,737	95,724	106,711	116,118
9	103,933	96,067	83,708	81,320

Tabela C2 – Vazão de 0,058 kg/s

Coletores	Massa de soja por área do coletor (g/cm^2)			
	v = 15,40 m/s	v = 14,03 m/s	v = 12,32 m/s	v = 10,95 m/s
1	7,883	6,982	5,631	5,068
2	6,538	6,026	5,641	6,218
3	7,568	7,027	6,270	4,865
4	14,122	12,770	10,811	8,447
5	15,515	14,364	12,727	13,818
6	17,792	14,675	11,104	8,701
7	55,827	61,111	69,648	55,691
8	80,724	95,921	109,211	115,329
9	120,084	96,629	78,511	88,624

Tabela C3 – Vazão de 0,076 kg/s

Coletores	Massa de soja por área do coletor (g/cm ²)			
	v = 15,40 m/s	v = 14,03 m/s	v = 12,32 m/s	v = 10,95 m/s
1	7,658	6,757	5,631	5,293
2	6,731	6,731	5,833	6,410
3	7,351	6,919	5,946	4,865
4	12,432	11,892	9,662	8,176
5	13,818	13,939	13,758	15,394
6	15,714	12,792	10,130	8,247
7	63,686	61,518	59,621	53,794
8	87,039	98,158	108,750	116,118
9	109,410	96,489	91,713	86,798

Tabela C4 – Vazão de 0,098 kg/s

Coletores	Massa de soja por área do coletor (g/cm ²)			
	v = 15,40 m/s	v = 14,03 m/s	v = 12,32 m/s	v = 10,95 m/s
1	6,306	5,518	4,730	5,068
2	5,833	5,833	5,449	6,282
3	8,108	7,568	6,378	5,838
4	10,878	9,662	8,851	7,905
5	11,152	10,364	11,758	13,333
6	16,104	12,143	8,896	7,597
7	60,027	73,171	67,344	55,691
8	93,684	106,184	115,592	122,039
9	114,747	88,904	83,567	82,022

APÊNDICE D – DISTRIBUIÇÃO DOS GRÃOS DE SOJA NO DUTO HORIZONTAL DA UNIDADE PILOTO DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO EM VALORES PERCENTUAIS

Nas tabelas de D1 a D4 são apresentadas as distribuições dos grãos de soja no duto horizontal da Unidade de Transporte Pneumático em valores percentuais, calculadas para as velocidades de 10,95 a 15,40 m/s e para as vazões 0,034 kg/s, 0,058 kg/s, 0,076 kg/s e 0,098 kg/s.

Tabela D1 – Distribuição percentual para a vazão de 0,034 Kg/s

Coletores	Distribuição dos grãos de soja em %			
	v = 15,40 m/s	v = 14,03 m/s	v = 12,32 m/s	v = 10,95 m/s
1	2,27	2,33	2,13	1,64
2	1,98	2,03	2,10	1,95
3	2,44	2,40	1,94	1,75
4	3,98	4,32	3,69	2,93
5	4,55	4,37	4,26	4,28
6	4,95	4,68	4,09	2,92
7	22,25	19,78	20,66	20,55
8	25,86	29,99	34,26	37,62
9	31,72	30,10	26,87	26,35

Tabela D2 – Distribuição percentual para a vazão de 0,058 Kg/s

Coletores	Distribuição dos grãos de soja em %			
	v = 15,40 m/s	v = 14,03 m/s	v = 12,32 m/s	v = 10,95 m/s
1	2,42	2,21	1,82	1,65
2	2,01	1,91	1,82	2,03
3	2,32	2,23	2,025	1,59
4	4,33	4,05	3,49	2,75
5	4,76	4,55	4,11	4,50
6	5,46	4,65	3,59	2,84
7	17,12	19,37	22,50	18,15
8	24,76	30,40	35,28	37,60
9	36,83	30,63	25,36	28,89

Tabela D3 – Distribuição percentual para a vazão de 0,076 Kg/s

Coletores	Distribuição dos grãos de soja em %			
	v = 15,40 m/s	v = 14,03 m/s	v = 12,32 m/s	v = 10,95 m/s
1	2,36	2,14	1,81	1,73
2	2,08	2,14	1,88	2,10
3	2,27	2,20	1,91	1,59
4	3,84	3,77	3,11	2,68
5	4,27	4,42	4,42	5,05
6	4,85	4,06	3,26	2,70
7	19,67	19,52	19,17	17,63
8	26,88	31,14	34,96	38,06
9	33,79	30,61	29,49	28,45

Tabela D4 – Distribuição percentual para a vazão de 0,098 Kg/s

Coletores	Distribuição dos grãos de soja em %			
	v = 15,40 m/s	v = 14,03 m/s	v = 12,32 m/s	v = 10,95 m/s
1	1,93	1,73	1,51	1,66
2	1,78	1,83	1,74	2,05
3	2,48	2,37	2,04	1,91
4	3,33	3,03	2,83	2,59
5	3,41	3,25	3,76	4,36
6	4,93	3,80	2,85	2,48
7	18,37	22,91	21,55	18,21
8	28,66	33,25	36,98	39,91
9	35,11	27,84	26,74	26,82

APÊNDICE E – GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DOS GRÃOS DE SOJA NO DUTO HORIZONTAL DA UNIDADE PILOTO DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO EM VALORES PERCENTUAIS PARA A VAZÃO DE 0,034 kg/s

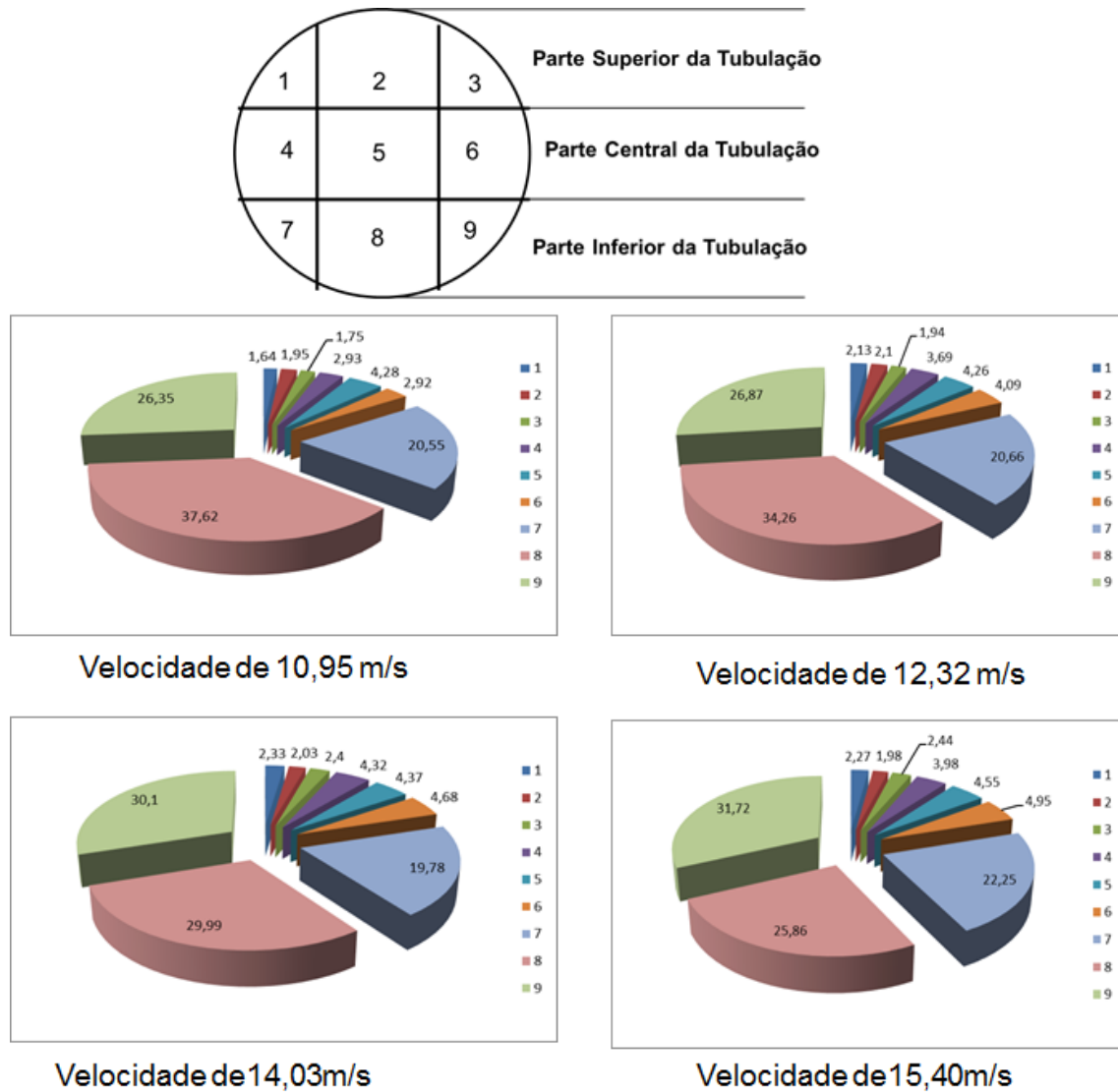


Figura E1 – Distribuição porcentual dos grãos de soja para a vazão de 0,034 kg/s

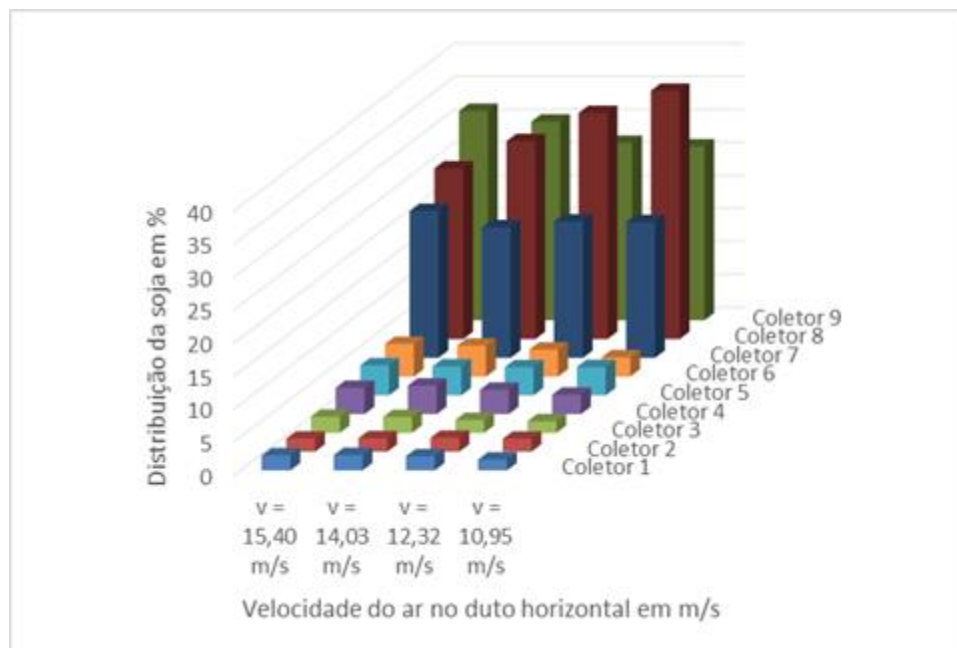


Figura E2 – Distribuição dos grãos de soja para a vazão de 0,034 kg/s

APÊNDICE F – GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DOS GRÃOS DE SOJA NO DUTO HORIZONTAL DA UNIDADE PILOTO DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO EM VALORES PERCENTUAIS PARA A VAZÃO DE 0,058 kg/s

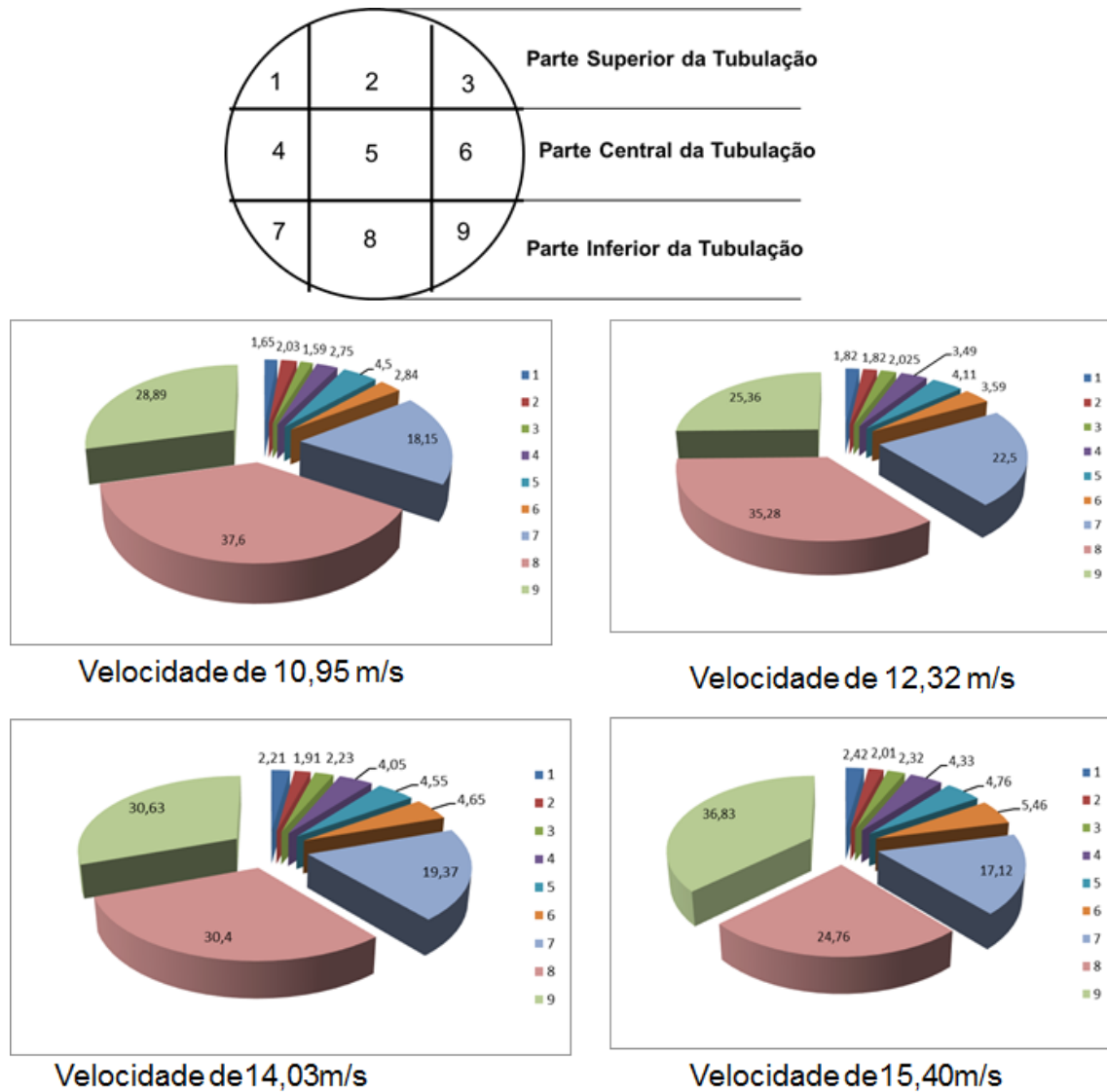


Figura F1 – Distribuição porcentual dos grãos de soja para a vazão de 0,058 kg/s

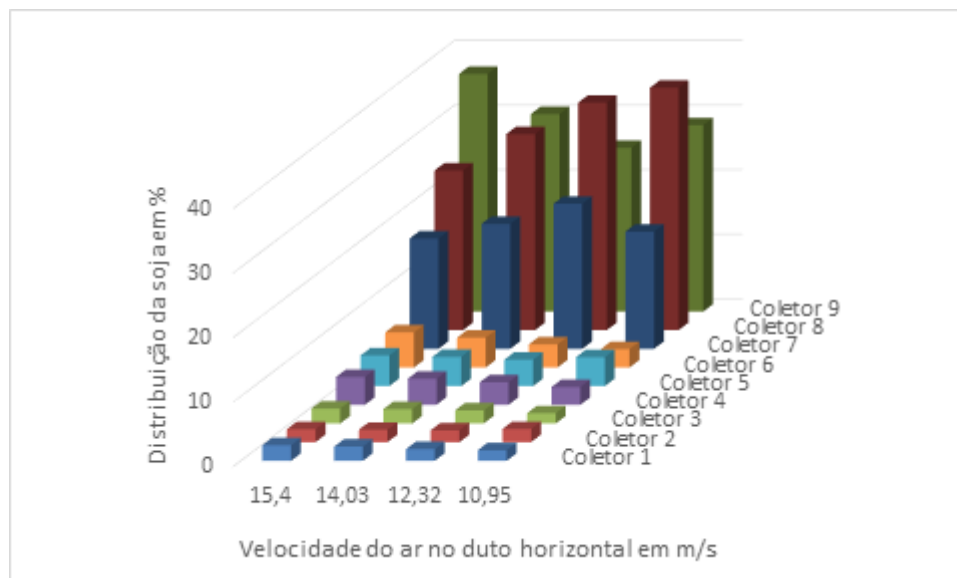


Figura F2 – Distribuição dos grãos de soja para a vazão de 0,058 kg/s

APÊNDICE G – GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DOS GRÃOS DE SOJA NO DUTO HORIZONTAL DA UNIDADE PILOTO DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO EM VALORES PERCENTUAIS PARA A VAZÃO DE 0,076 kg/s

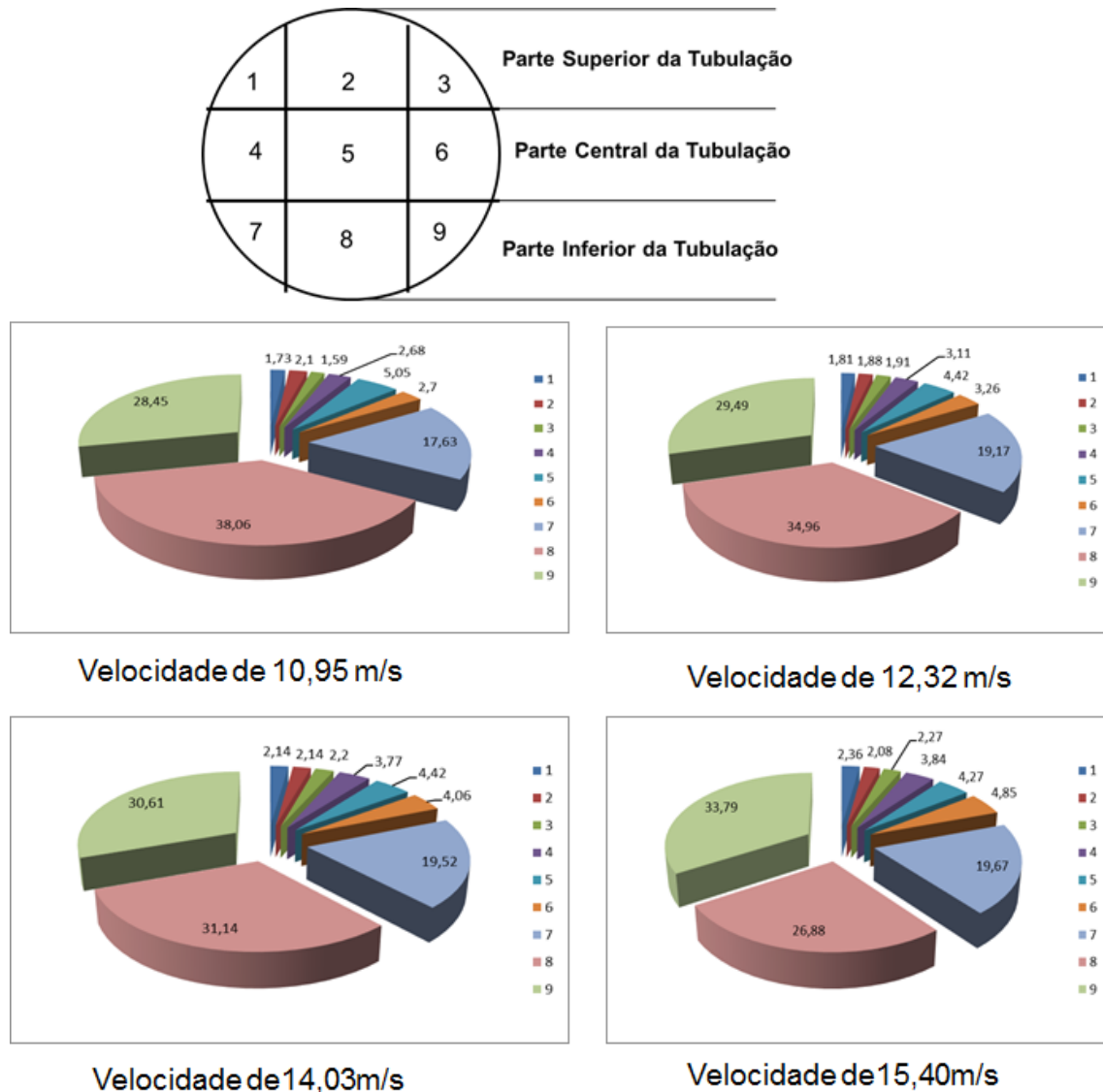


Figura G1 – Distribuição porcentual dos grãos de soja para a vazão de 0,076 kg/s

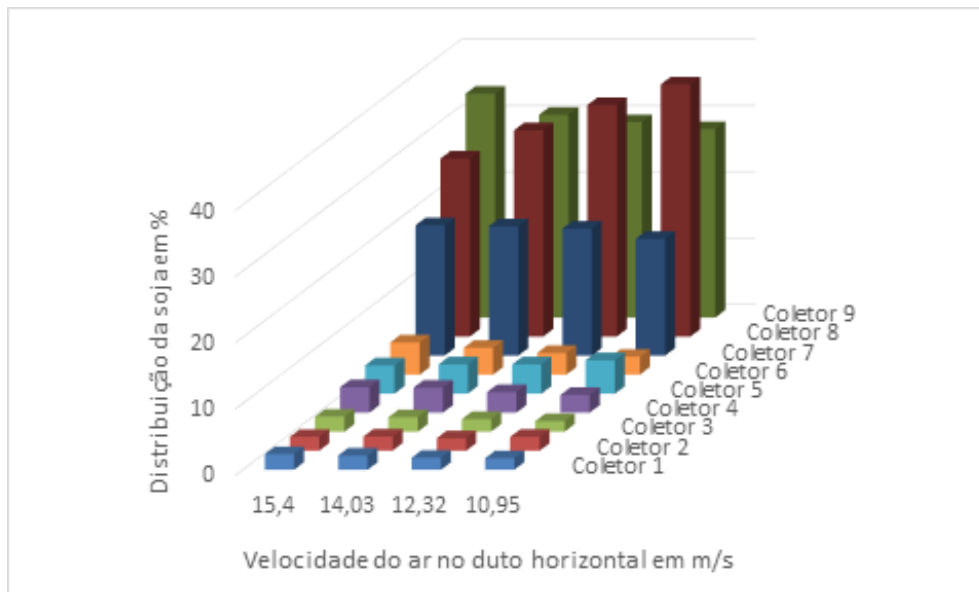


Figura G2 – Distribuição dos grãos de soja para a vazão de 0,076 kg/s

APÊNDICE H – GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DOS GRÃOS DE SOJA NO DUTO HORIZONTAL DA UNIDADE PILOTO DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO EM VALORES PERCENTUAIS PARA A VAZÃO DE 0,098 kg/s

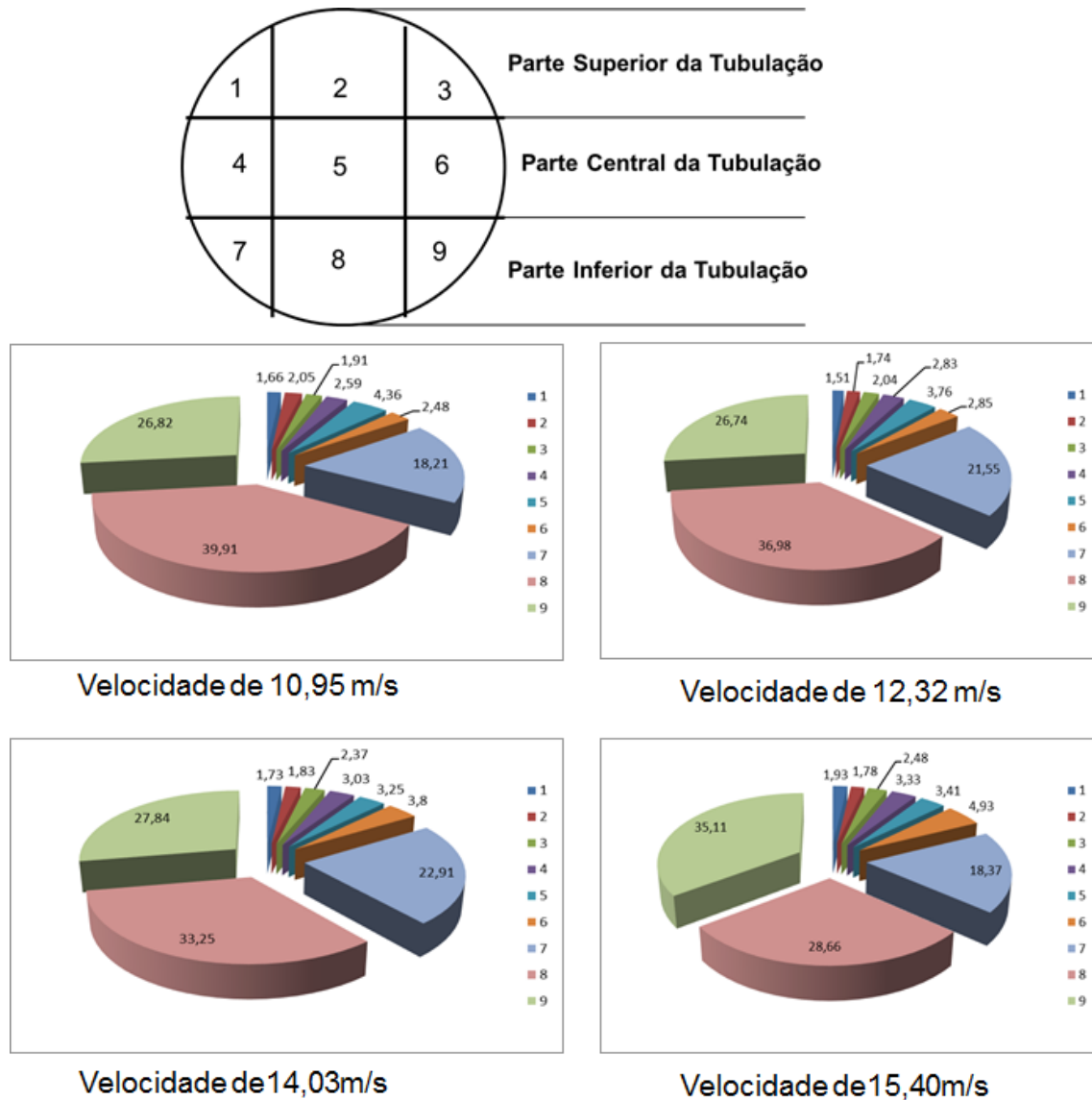


Figura H1 – Distribuição porcentual dos grãos de soja para a vazão de 0,098 kg/s

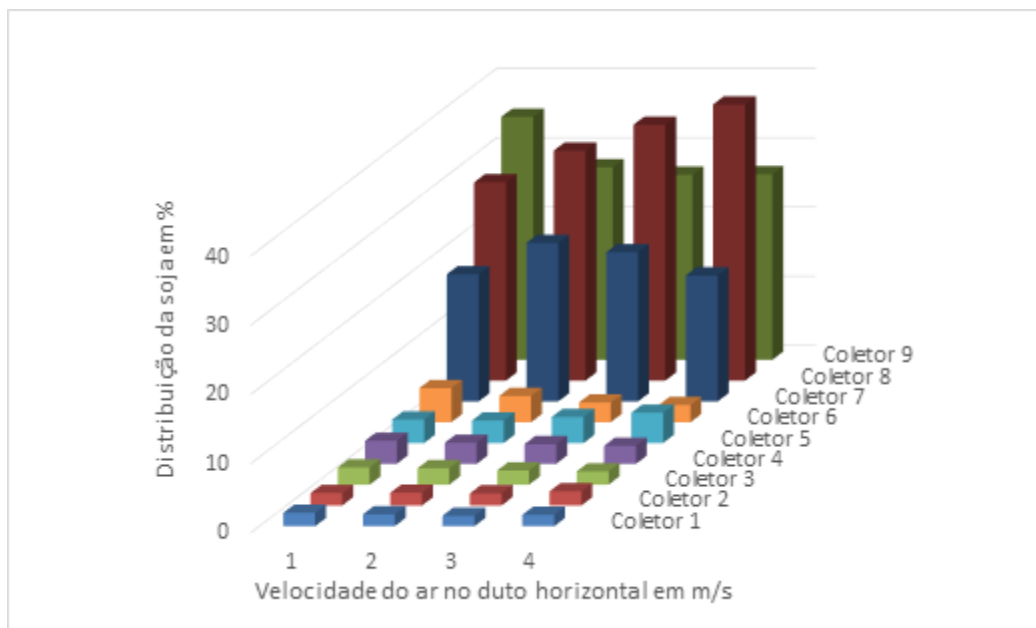


Figura H2 – Distribuição dos grãos de soja para a vazão de 0,098 kg/s

APÊNDICE I – DADOS E GRÁFICOS DAS CURVAS DE PERDA DE CARGA DO AR EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE

Tabela I1 – Valores de Pressão do Ar nos Pontos de Tomada em mmca

f (Hz)	V ar (m/s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
60	15,40	98,55	86,40	84,90	84,15	85,15	81,55	81,40	70,75	69,70	70,45
55	14,03	82,45	73,50	72,70	71,85	72,70	69,30	67,20	58,75	57,70	58,75
50	12,32	68,35	60,80	58,50	57,40	58,30	57,0	54,80	48,10	47,50	47,10
45	10,95	56,60	48,80	48,70	47,35	49,15	45,90	44,10	44,15	37,70	36,80
40	9,57	42,45	37,20	37,85	37,0	38,20	37,85	36,85	30,95	29,65	29,95

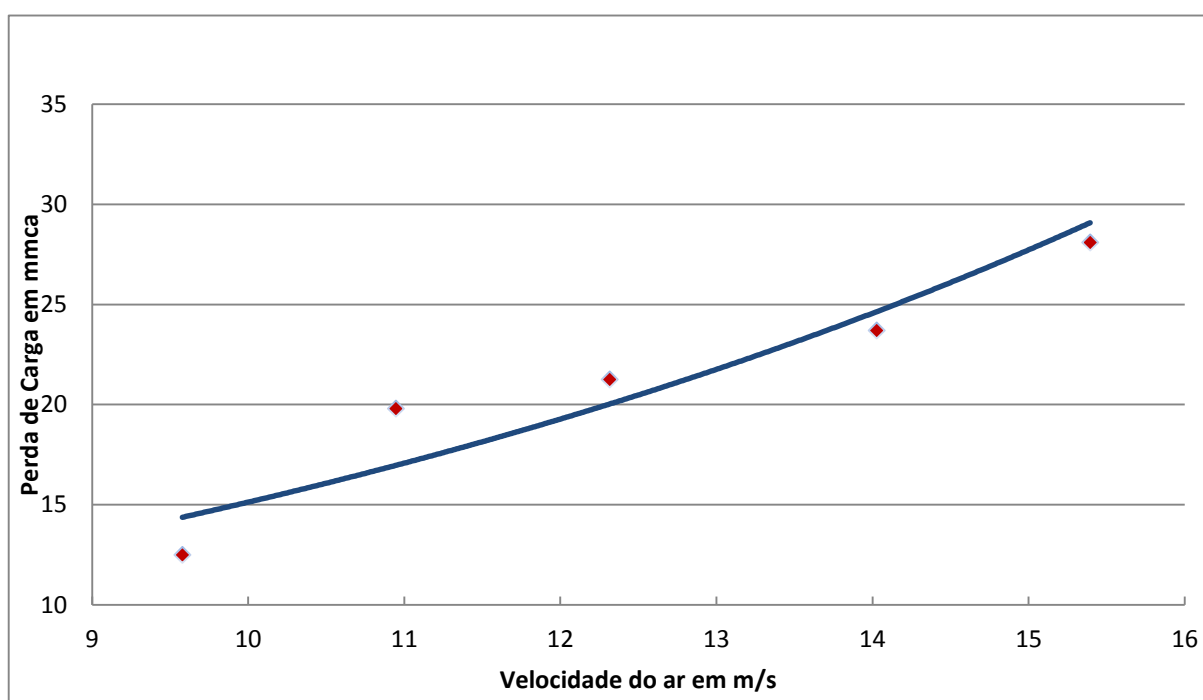


Figura I1 – Curva de Perda de Carga em entre os pontos P1 e P10

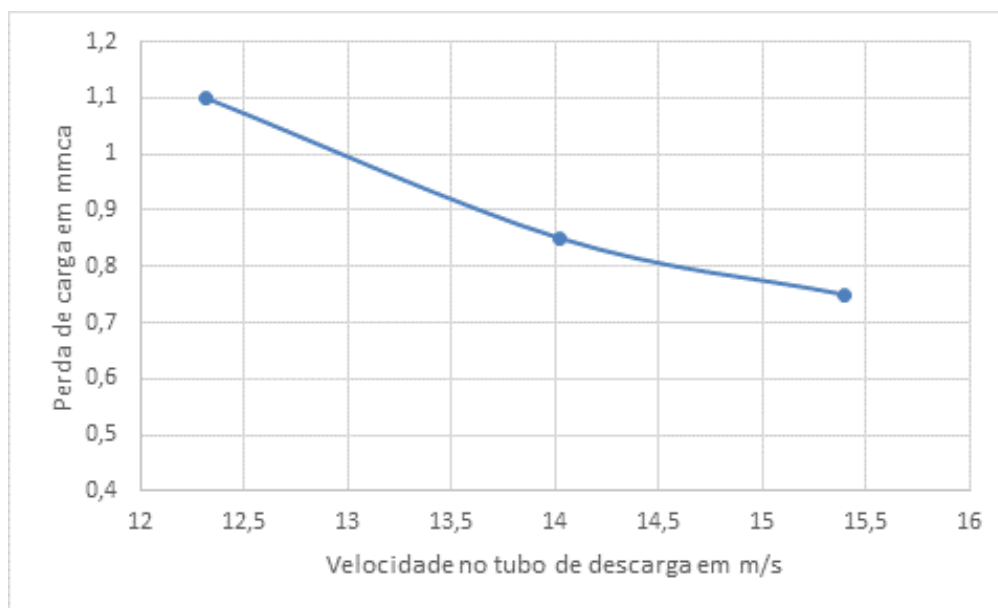


Figura I2 – Curva de Perda de Carga em entre os pontos P3 e P4

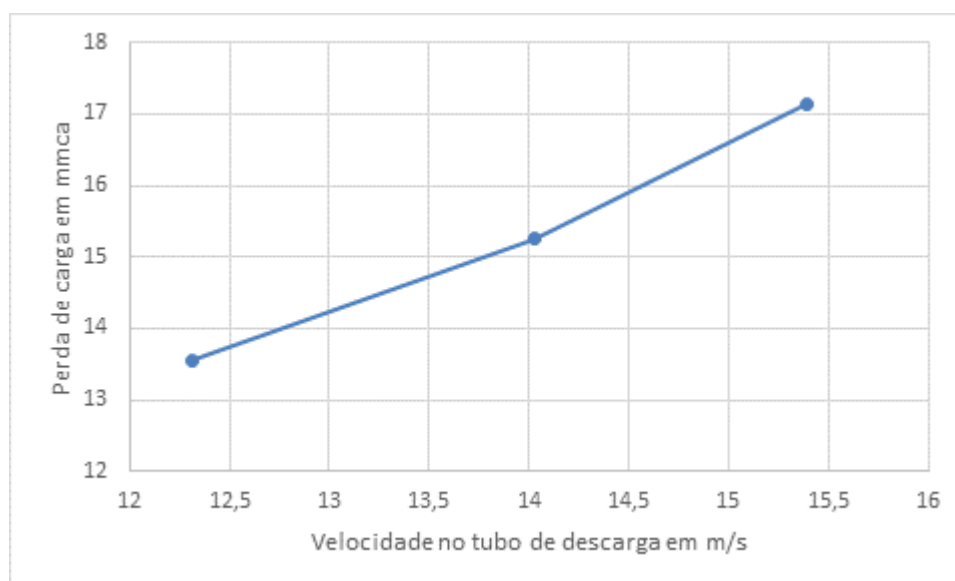


Figura I3 – Curva de Perda de Carga em entre os pontos P7 e P8

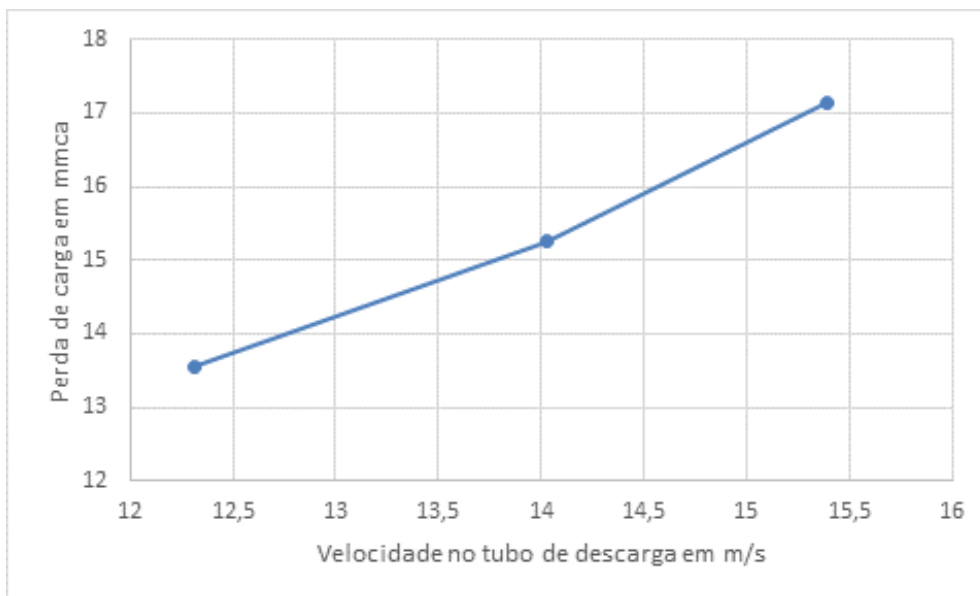


Figura I4 – Curva de Perda de Carga em entre os pontos P1 e P7

APÊNDICE J – CÁLCULO DA PERDA DE CARGA TRECHO HORIZONTAL DA UNIDADE PILOTO

Os valores disponíveis para o cálculo da perda de carga para as vazões de 0,034 kg/s e 0,058 kg/s e velocidade do ar de 15,40 m/s no trecho horizontal da Unidade Piloto são os seguintes:

- a) diâmetro da tubulação é 0,117 m;
- b) distância entre os pontos P1 e P7 é 3,7 m;

Determinação da perda de carga para a vazão de 0,034 kg/s:

- a) a vazão de 0,034 kg/s corresponde à capacidade do sistema, C, de 0,1224 ton/h;
- b) com diâmetro, D, da tubulação horizontal de 0,117 m, tem-se área da seção transversal do duto, A_s , de 0,1075 m²;
- c) multiplicando-se velocidade do ar, em m/s, pela área da seção transversal em m/s, chega-se à vazão de ar de 0,1656 m³/s;
- d) aplicando-se a equação 2.4, obtém a relação sólido em peso de kg de sólido/kg de ar, X, de 0,1723 kg sólido/kg ar;
- e) como está sendo utilizado o trecho vertical, a perda de carga, L_t , em m, corresponde a perda devido ao trecho horizontal, de 3,7 m;
- f) para o fator μ , foi adotado o valor de 1, alimentação dos sólidos logo após o ventilador;
- g) foi adotado o valor de 60 mmca para ΔP_e , perda de carga nos equipamentos acoplados à linha, conforme tabela IV-21, página 171 (GOMIDE, 1983).

Dessa forma, com os dados existentes, os valores obtidos e a aplicação da equação 2.6, é possível calcular a perda de carga total no trecho horizontal:

$$\Delta P_t = 0,007512 \text{ kgf/cm}^2 = 75,12 \text{ mmca}$$

Determinação da perda de carga para a vazão de 0,058 kg/s:

- a) a vazão de 0,034 kg/s corresponde à capacidade do sistema, C, de 0,2088 ton/h;
- b) área da seção transversal do duto, A_s , é de 0,1075 m²;
- c) a vazão de ar de 0,1656 m³/s;
- d) aplicando-se a equação 2.4, obtém a relação sólido em peso de kg de sólido/kg de ar, X, de 0,294 kg sólido/kg ar;
- e) como está sendo utilizado o trecho vertical, a perda de carga, L_t , em m, corresponde a perda devido ao trecho horizontal, de 3,7 m;
- f) para o fator μ , foi adotado o valor de 1, alimentação dos sólidos logo após o ventilador;
- g) foi adotado o valor de 60 mmca para ΔP_e , perda de carga nos equipamentos acoplados à linha, conforme tabela IV-21, página 171 (GOMIDE, 1983).

Dessa forma, com os dados existentes, os valores obtidos e a aplicação da equação 2.6, é possível calcular a perda de carga total no trecho horizontal:

$$\Delta P_t = 0,007932 \text{ kgf/cm}^2 = 79,32 \text{ mmca}$$