

**UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SUSTENTABILIDADE DE
ECOSSISTEMAS COSTEIROS E MARINHOS
MESTRADO EM ECOLOGIA**

MARCELO DO NASCIMENTO CRISPIM

**MITIGAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS COM O TRANSPORTE PNEUMÁTICO DE
SOJA EM FASE DILUÍDA: QUANTIFICAÇÃO DA FRIABILIDADE E PERDA DE
CARGA**

**SANTOS/SP
2018**

MARCELO DO NASCIMENTO CRISPIM

**MITIGAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS COM O TRANSPORTE PNEUMÁTICO DE
SOJA EM FASE DILUÍDA: QUANTIFICAÇÃO DA FRIABILIDADE E PERDA DE
CARGA**

Dissertação apresentada a Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade de Ecossistemas Costeiros e Marinhos, sob a orientação do Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior e do Prof. Dr. Fábio Giordano.

SANTOS/SP

2018

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

301.3 Crispim, Marcelo do Nascimento.
C949m Título Mitigação de impactos ambientais com o transporte pneumático de soja em fase diluída: quantificação da friabilidade e perda de carga
Marcelo do Nascimento Crispim.-- 2018
n.páginas
70 p.

Orientador: Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior
Prof. Dr. Fábio Giordano

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade de Ecossistemas Costeiros e Marinhos, Santos, SP, 2018.

1. sustentabilidade. 2. transporte pneumático. 3. fase diluída. 4. friabilidade. 5. perda de carga.6. soja.

I.Moraes Júnior, Deovaldo, orient. II.Giordano, Fábio, orient. III. Título Mitigação de impactos ambientais com o transporte pneumático de soja em fase diluída: quantificação da friabilidade e perda de carga

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas – Unisanta

DEDICATÓRIA

*Dedico,
à minha esposa Márcia, à minha filha
Yasmin, aos meus pais Waldina e
Leonardo, que sempre me deram paz,
força e apoio aos desafios profissionais e
acadêmicos, que consomem dedicação,
atenção e tempo que seriam oferecidos à
família.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Jesus Cristo pela benção de me manter com esperança e fé, escolhendo o caminho do crescimento pelo conhecimento.

À minha irmã Nádia, por sempre me garantir apoio e segurança.

Ao orientador Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior, não só por suas aulas inovadoras, competência e pela notável inspiração para ensinar, multiplicando nossos conhecimentos, mas também pela paciência, disponibilidade e pelo incentivo e presteza no auxílio dado, para a realização deste trabalho.

Ao orientador Prof. Dr. Fábio Giordano, pela satisfação e capacidade de ensinar, nos inspirando e tornando o aprendizado de uma nova disciplina como algo acessível, bem como as conexões que proporcionou na confecção deste trabalho.

À Prof^ª. Dr^ª. Marlene Silva de Moraes, Prof. Dr. Aldo Ramos Santos, Prof. Dr. Vitor da Silva Rosa, a Prof^ª. Dr^ª. Luciene Alves Maranhão e ao Prof. Dr. Ronaldo José Torres por todos os ensinamentos, incentivo e difusão de força e confiança necessários para a conclusão deste trabalho.

Aos estagiários (as) do Laboratório de Operações Unitárias da Unisanta, Bianca da Silva Cruz, Bruna Vieira D. Pedro, Arielli Reis Malafatti, Raissa de Paula Teixeira do Nascimento, Marina Lopes Pereira, pelo auxílio na realização dos experimentos e na operação da Unidade Piloto de Transporte Pneumático, mas especialmente ao Victor Sakai Ribeiro de Oliveira que, sempre disponível, colaborou e me ensinou muito sobre os procedimentos.

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

À todos os colegas que cursaram comigo as disciplinas obrigatórias, optativas e de campo do Programa de Mestrado em Ecologia da Unisanta por me ajudarem em tantos momentos, especialmente aos parceiros Erica K. Solano e Armindo Cabral Filho.

RESUMO

O Transporte Pneumático em fase diluída é amplamente utilizado em diversas indústrias, como por exemplo as de produção de grãos de soja, milho e feijão. Porém, o deslocamento desses grãos do produtor até o porto é um dos gargalos da exportação. O transportador pneumático é um dos equipamentos que pode ser empregado para deslocar esses tipos de grãos de forma sustentável com baixa emissão de poluentes, elevadas velocidades e baixo custo comparado a outros modais de transporte. Um dos inconvenientes desta técnica é a possível quebra do material transportado. O presente trabalho objetivou quantificar a friabilidade da soja e a perda de carga em uma Unidade Piloto de Transporte Pneumático visando a sustentabilidade do processo. O sistema utilizado constituiu basicamente de um ventilador centrífugo com rotor semiaberto com diâmetro de 228 mm, duto de sucção com diâmetro de 217 mm e 11 metros de dutos de acrílico com 117 mm de diâmetro interno, diâmetro usado em processos industriais. Os grãos de soja foram introduzidos no equipamento por meio de um silo com uma válvula de rotação variável. Foram utilizadas a velocidade do ar de 3,5 m/s e vazões de soja de 95 kg/h, 368 kg/h e 564 kg/h, todas estas condições em 5 tipos diferentes de singularidades localizadas na mudança de direção horizontal para vertical na tubulação. As singularidades foram: um “tê” com prolongamento de 30 mm, um “tê” com prolongamento de 60 mm, um “tê” com prolongamento de 90 mm, um “tê” sem prolongamento e uma curva. Os resultados demonstraram que a singularidade que forneceu a menor friabilidade (menor quebra) foi o tê de saída com o máximo prolongamento, com quebra inferior a 1% e que obteve menor perda de carga para a maior velocidade de ar (4,8 m/s) e maior vazão de soja (564 kg/h). Com uma quantidade de perdas relativamente pequena, baixo custo de aquisição e operação, aliado a uma baixa emissão de poluentes e reduzida probabilidade de acidentes de trabalho, concluiu-se que o transporte pneumático trata-se de um dos meios de deslocamento estacionário mais sustentável para a movimentação da soja.

Palavras-chave: sustentabilidade. transporte pneumático. fase diluída. friabilidade. perda de carga. soja.

ABSTRACT

The diluted phase Pneumatic Transport is widely used in several industries, such as soybeans, corn, bran and beans. However, the shift of grain from the producer to the port is one of the export markets without transportation. The pneumatic conveyor is one of the equipment that can be used to move the grain types in a sustainable manner with low emission of pollutants, low cost and high speeds. One drawback of this technique is a possible breakage of the material transported. The present work aimed to quantify the friability of the soybean and a loss of load in a Pilot Unit of Pneumatic Transport aiming at a sustainability of the process. The system used consisted basically of a centrifugal fan half-open rotor with a diameter of 228 mm suction duct with a diameter of 217 mm and 11 meters of acrylic ducts with 117 mm of internal diameter, diameter used in industrial processes. Soya beans were introduced without equipment by means of a silo with a variable rotation valve. There is a velocity of 3.5 m/s and soybean flow rates of 95 kg/h, 369 kg/h and 564 kg/h, all these conditions in 05 different types of singularities located in the horizontal to vertical direction change in the pipe: 30 mm, 60 mm long, 90 mm long, without extension and bend. The results show that the singularity that provided a smaller minor, which is less than 1% and which obtained lower Loss of load for a higher transmission speed (4.8 m/s) soybean (564 kg/h). With an amount of acquisition and operation, coupled with a low emission of pollutants and reduced probability of work accidents, it is concluded that pneumatic transport is one of the most sustainable means of stationary displacement for a soybean movement.

Keywords: sustainability. pneumatic transport. diluted phase. friability. cargo loss. soy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Transporte pneumático em fase densa.	21
Figura 2 - Transporte pneumático em fase diluída	22
Figura 3 - Perdas e desperdícios de alimentos em cada fase da cadeia de suprimentos para o grupo de países desenvolvidos e em desenvolvimento.....	26
Figura 4 - <i>Ranking</i> – top 10 países emissores de GEE por emissões de perdas e desperdícios.	27
Figura 5 - Unidade Piloto do Laboratório de Operações Unitárias da UNISANTA....	28
Figura 6 - Esboço da unidade piloto de transporte pneumático em fase diluída.....	29
Figura 7 - Equipamentos utilizados no ensaio de friabilidade e perda de carga de soja na Unidade Piloto.....	32
Figura 8 - Singularidades utilizadas.....	36
Figura 9 - Quantidade de soja quebrada por vazão.....	38
Figura 10 - Porcentagem de quebra de grãos de soja em função das singularidades	39
Figura 11 - Médias dos pontos P1 a P10 em função dos prolongamentos, sendo estes subdivididos por diferentes vazões.	41
Figura 12 - Acúmulo de grãos em cada uma das singularidades, sendo estas subdivididas por vazões.....	42
Figura 13 - Frequência de viagens rodoviárias que apresentam perdas superiores às quebras técnicas contratuais em 2015	43
Figura 14 - Modelo de custos logísticos proposto.....	45
Figura 15 – Evolução comparativa de custos de transporte lavoura ao porto de embarque.....	49
Figura 16 - Variação da temperatura durante os ensaios	70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes do aumento das perdas e desperdícios de alimentos.....	27
Quadro 2 - Níveis de perdas em diferentes atividades logísticas de grãos (soja e milho) no Brasil identificados pela literatura.....	45
Quadro 3 – Proporção de soja quebrada para singularidade de 30 mm	65
Quadro 4 – Proporção de soja quebrada para singularidade de 60 mm	66
Quadro 5 – Proporção de soja quebrada para singularidade de 90 mm	67
Quadro 6 – Proporção de soja quebrada para singularidade sem prolongamento...	68
Quadro 7 – Proporção de soja quebrada para singularidade curva de 3 gomos	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre tipo de material particulado e a velocidade de deslocamento (m/s).	22
Tabela 2 – Movimento físico do Porto de Santos por natureza e tipo de carga – 2013 à 2017 (em mil toneladas).	25
Tabela 3 - Velocidade de sucção (Vs) e Velocidade de descarga (Vd)	34
Tabela 4 - Conversão de dados após calibração da válvula rotativa: técnica da massa/unidade de tempo.....	35
Tabela 5 - Conversões de medida e velocidade.....	35
Tabela 6 - Massa de grãos de soja quebrados	38
Tabela 7 - Indicadores de níveis de quebra técnica adotados nos contratos de transporte rodoviário, ferroviário e hidroviário de grãos (% de entrada de carga)	43
Tabela 8 - Indicadores de perdas no transporte rodoviário e ferroviário de grãos, critério da “quebra técnica” no modal hidroviário. Comparação com nível de quebra obtido experimentalmente em unidade piloto (com menor distância).....	44
Tabela 9 - Indicadores de perdas nas diversas atividades logísticas de grãos no Brasil, consideradas para modelagem dos índices e da cadeia de suprimentos.....	44
Tabela 10 - Distribuição das perdas na agrologística da soja no Brasil nas diversas atividades.....	45
Tabela 11 - Custo logístico total da soja por tonelada/fluxo.....	46
Tabela 12 - Estimativa de custo do transporte por granotudo de 2000 km.....	47
Tabela 13 - Emissões de CO ₂ adicionais decorrentes das perdas e emissões totais na cadeia de suprimento brasileira de grãos para diferentes atividades logísticas, em toneladas de CO ₂	48
Tabela 14 - Coeficiente dos fatores de emissão (g CO ₂ /t.km) nas atividades de transporte consideradas para a modelagem da cadeia de suprimentos.....	48
Tabela 15 - Teste de friabilidade com soja (prolongamento de 30 mm).	56
Tabela 16 - Teste de friabilidade com soja (prolongamento de 60 mm)	57
Tabela 17 - Teste de friabilidade com soja (prolongamento de 60 mm)	58
Tabela 18 - Teste de friabilidade com soja (sem prolongamento)	60
Tabela 19 - Teste de friabilidade com soja (curva de 3 gomos)	61
Tabela 20 - Média das porcentagens de quebra	62
Tabela 21 - Acúmulo de grãos de soja (g)	63

Tabela 22 - Média da perda de carga nos pontos de 1 a 10, de acordo com os
prolongamentos e vazões..... 64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MCA	–	Metros de Coluna de Água
Vs	–	Velocidade de sucção (metros/segundos)
Vd	–	Velocidade de descarga (metros/segundos)
P1 ... P10	–	Ponto 1 (um) ... Ponto 10 (dez)
GEE	–	Gases de efeito estufa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo geral.....	15
2.2	Objetivos específicos.....	15
3	REVISÃO DA LITERATURA	16
3.1	Sistemas de transporte: móveis e estacionários	16
3.1.1	Sistemas de transporte móveis	16
3.1.2	Sistemas estacionáriosde transporte	16
3.2	Transporte pneumático de partículas	17
3.3	Vantagens de um sistema de transporte pneumático	17
3.4	Desvantagens de um sistema de transporte pneumático	18
3.5	Principais componentes de um transportador pneumático	19
3.5.1	Fontes de fornecimento de gás	19
3.5.2	Mecanismo de alimentação.....	19
3.5.3	Linha de transporte	19
3.5.4	Equipamento de separação	20
3.6	Tipos de transporte pneumático	20
3.6.1	Fase densa	20
3.6.2	Fase diluída.....	21
3.7	Friabilidade e perda de carga no transportador pneumático	22
3.7.1	Friabilidade.....	22
3.7.2	Perda de carga.....	23
3.8	Soja	24
3.8.1	Transporte pneumático de soja.....	24
3.8.2	Panorama regional: Porto de Santos	24
3.9	Transportes sustentáveis.....	24
4	MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1	Material.....	28
4.1.1	Matéria-prima	28
4.1.2	Unidade piloto	28
4.1.3	Instrumentos de medida.....	33
4.2	Métodos.....	33
4.2.1	Velocidade do ar no duto de sucção	33
4.2.2	Calibração da válvula rotativa	34
4.2.3	Diâmetro dos dutos	34

4.2.4	Determinação da Friabilidade	35
4.2.5	Determinação da curva de perda de carga do ar em função da velocidade	36
4.2.6	Determinação da perda de carga da soja	37
4.2.7	Avaliação da sustentabilidade do processo comparativamente com outros métodos de transporte.....	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1	Friabilidade	38
5.2	Determinação da perda de carga de soja.....	40
5.2.1	Perda de carga da mistura ar com grãos de soja entre os pontos P1 e P10	40
5.3	Comparação da eficácia da sustentabilidade ambiental dos diferentes modais de transporte de soja	42
6	CONCLUSÕES	50
	REFERÊNCIAS	51
	APÊNDICE A.....	56
	APÊNDICE B.....	70

1 INTRODUÇÃO

O Transporte Pneumático emprega um fluido de arraste, geralmente o ar, para o deslocamento de diversos sólidos particulados através de tubulações. É largamente utilizado em processos industriais e agrícolas, por oferecer um moderado gasto de operação e manutenção, além da grande versatilidade de projeto e flexibilidade na sua instalação.

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). Geralmente operado em fase diluída, onde as partículas ficam em suspensão dentro das tubulações enquanto são transportadas devido às altas velocidades do ar.

O transporte pneumático em fase densa pode ser o método mais confiável e eficiente para a manipulação de uma grande variedade de sólidos secos a granel. Opera com uma pequena quantidade de ar para movimentar uma grande quantidade de sólidos a granel de forma pulsante. Já os sistemas pneumáticos em fase diluída utilizam grande quantidade de ar para remover volumes relativamente pequenos de material em suspensão a altas velocidades.

Algumas das aplicações melhor indicadas para os sistemas de transporte pneumático são deslocamentos de partículas finas em curtas distâncias. Deve-se avaliar corretamente as características físicas ou químicas dos sólidos a serem transportados pneumaticamente, sob risco de inviabilizar operacional e economicamente a sua movimentação. São elas: massas de grandes volumes exigem altas velocidades de ar, maior o consumo energético; partículas com umidade excessiva, tornam-se pegajosas; material com temperatura elevada é incompatível com este equipamento de transporte; partículas frágeis podem se romper ou sofrer mudança de aspecto durante o transporte (SILVA, 2005).

As vantagens relatadas por este tipo de transporte de partículas são (MARCUS, 1990; SILVA, 2005): mínimo risco de impacto ao meio ambiente, pois o transporte é feito em dutos, e as partículas não entram em contato com o ambiente; pouco risco de contaminação para o elemento particulado, pois ao ser transportado em dutos, não possui contato com ambiente e não sofre ação de intempéries;

sistemas com flexibilidade de montagem, uma vez que podem ser utilizados dutos verticais, inclinados, horizontais; baixo custo de operação e de manutenção; flexibilidade, pois o mesmo dispositivo pode transportar diversos tipos de materiais, desde que as propriedades ou características sejam similares; facilidade para automatização de sistemas; higiene e segurança dos trabalhadores no ambiente trabalho; diminui, ou ainda, elimina a perda de produto transportado.

Por outro lado, o sistema de transporte pneumático apresenta as seguintes desvantagens (MARCUS, 1990; STOESS, 1970): alto consumo de energia; abrasão interna na parte de baixo dos dutos; pode causar degradação dos sólidos transportados, caso o sistema não seja dimensionado corretamente; distâncias limitadas; projetos e dimensionamentos complexos; transporte de produtos em um sentido.

Atualmente, o Brasil é um dos maiores produtores de soja do mundo, sendo superado apenas pelos Estados Unidos (EMBRAPA, 2017), o que demonstra a importância dessa cultura para o País. O grande desafio é continuar crescendo de modo sustentável neste mercado. O Transportador Pneumático é um dos equipamentos estacionários de transporte para este tipo de grão, e, para que do ponto de vista da sustentabilidade, se minimize a emissão de poluentes, o desperdício de energia com o transporte e a própria quebra e perda da soja deslocada.

Além de causar a diminuição da oferta de alimentos, as perdas podem ser compreendidas como uma ineficiência que atinge desfavoravelmente a sustentabilidade econômica, ambiental e social de uma cadeia agroalimentar (PÉRA, 2017), principalmente por incorrer em desperdícios de recursos (físicos, financeiros e ambientais).

O Brasil é um país com dimensões continentais e economias com a logística podem vir a representar um grande diferencial de sustentabilidade para o agronegócio da soja (CAIXETA-FILHO, 2006). O emprego de novos equipamentos como transportadores pneumáticos e esteiras de movimentação, poderia contribuir para a redução da perda de cargas transportadas na cadeia logística.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho teve por objetivo geral quantificar a quebra de grãos de soja (estudo da friabilidade) e a perda de carga para deslocá-la em uma Unidade Piloto de Transporte Pneumático em fase diluída visando avaliar a eficiência no processo.

2.2 Objetivos específicos

- a) Quantificar a condição mais eficiente quanto à quebra de grãos de soja (friabilidade) avaliando o deslocamento dos mesmos ao alternar vazões de 95 kg/h, 368 kg/h e 564 kg/h para 5 tipos diferentes de conexões tipo “tê” (singularidades) de mudança de direção;
- b) Quantificar a condição mais eficiente quanto à perda de carga avaliando o deslocamento dos mesmos para as combinações entre três vazões de sólido e dez velocidades de ar, alternando 5 tipos diferentes de conexões para mudanças de direção (singularidades);
- c) Comparar as emissões de dióxido de carbono (CO₂) destes modais;
- d) Comparar custos entre o transporte rodoviário e o transporte pneumático (granoduto ou grãoduto).

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Sistemas de transporte: móveis e estacionários

Sistemas de transportes podem ser móveis, como o rodoviário, ferroviário e hidroviário, ou estacionários, como os dutoviários ou pneumáticos. Têm o objetivo em comum de "transferir uma mercadoria do seu ponto de origem ao seu destino final, com o melhor preço, qualidade e tempo" (KEEDI, 2001; VAZ e OLIVEIRA, 2005).

3.1.1 Sistemas de transporte móveis

Nos sistemas de transporte móveis, o material a ser transportado se desloca juntamente com o veículo. No deslocamento da soja, os exemplos de veículos mais utilizados neste sistema de transporte são os caminhões (modal rodoviário), os trens (modal ferroviário) e as barcas (modal hidroviário).

Entretanto, fatores como perda de grãos de soja durante o transporte, oxidação do material transportado, pedágios, acidentes e outras condições de transporte acabam tornando o valor do frete muito alto no Brasil (RODRIGUES, 2008). Mas para tornar os preços mais competitivos e perpetuar o aumento das exportações de grãos, o país precisa reduzir custos, principalmente o gasto com o transporte do produtor ao porto de exportação (BARAT, 2007).

3.1.2 Sistemas estacionários de transporte

Nos sistemas estacionários de transporte, o material a ser transportado se desloca e o equipamento de transporte é estacionário ou fixo. Um bom exemplo de transporte estacionário é o dutoviário, considerado o mais consistente de todos os modais. Isso ocorre porque a variância no tempo de transporte é mínima (maior consistência) e as dutovias funcionam 24 horas por dia (frequência).

Por outro lado, é o modal que apresenta menor velocidade, menor capacidade (uma vez que é muito especializado, transporta pequena variedade de produtos) e menor disponibilidade, afinal, está presente em poucas regiões (BOWERSOX,1996), porém representa apenas 3,8% da matriz brasileira de transporte. Esse tipo de transporte funciona por gravidade ou pressão e é utilizado

em vários setores industriais (ILOS, 2010), sendo que, em muitos deles, há a utilização do transporte pneumático de diversas partículas.

3.2 Transporte pneumático de partículas

Atualmente, o transporte pneumático é uma técnica popular no campo da manipulação de materiais particulados (MORAES, 2012). De maneira geral, todos os pós e materiais granulados podem ser transportados usando o transporte pneumático, pois esse tipo de transporte utiliza um fluido, normalmente o ar, para deslocar materiais particulados através de tubulações (RATNAYAKE, 2005; MILLS, 2004). Com uma história documentada de mais de um século (RATNAYAKE, 2005), sistemas de transporte pneumático têm se popularizado no campo do manuseio de materiais sólidos a granel.

As aplicações dos sistemas de transporte pneumático podem ser vistas em muitos setores industriais, tais como a indústria de processos químicos, a indústria farmacêutica, a indústria de mineração, a indústria agrícola e a indústria de processamento de alimentos, como os vários tipos de grãos, por exemplo o milho, feijão, arroz, trigo e soja (GOMIDE, 1983; RHODES, 2003; LOPES et al., 2011).

3.3 Vantagens de um sistema de transporte pneumático

De acordo com Marcus (1990) e Silva (2005), as vantagens apresentadas por este tipo de transporte de partículas são: mínimo risco de impacto ao meio ambiente, pois o transporte é feito em dutos, e as partículas não entram em contato com o ambiente; 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; sistemas com flexibilidade de montagem, uma vez que podem ser utilizados dutos verticais, inclinados, horizontais; flexibilidade, visto que o mesmo dispositivo pode transportar diversos tipos de materiais, desde que as propriedades ou características sejam similares; facilidade para automatização de sistemas; higiene e segurança dos trabalhadores no ambiente trabalho; diminui, ou ainda, elimina a perda de produto transportado.

Segundo Gomes (2011), os sistemas de transporte pneumático podem captar o material a granel a ser transportado em fontes múltiplas e/ou distribuí-los a muitos

destinos diferentes. Pode-se acrescentar, ainda, como vantagens à utilização dos sistemas de transporte pneumático (em relação aos métodos tradicionais de transporte de materiais particulados) as dimensões reduzidas, a redução progressiva do capital e custos de instalação, baixos custos de manutenção (devido ao pequeno número de peças móveis), o uso constante de tubulações de transporte e a facilidade de controle e automação.

3.4 Desvantagens de um sistema de transporte pneumático

Devido ao alto consumo de energia, sistemas de transporte pneumático são mais indicados para deslocar partículas finas em curtas distâncias, pois suas características podem apresentar alguns entraves quanto à sua movimentação através do transportador pneumático. 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, 1990). O sistema de transporte pneumático apresenta algumas desvantagens, como: alto consumo de energia; distâncias limitadas; transporte de produtos em um sentido (MARCUS, 1990; STOESS, 1970).

Além das desvantagens citadas acima, Silva (2005) elenca outros entraves, como: dimensões ou massas volumétricas grandes, que requerem velocidades de gás elevadas; umidade excessiva das partículas, tornando-as pegajosas; temperatura elevada, incompatível com os dispositivos usados para o transporte; fragilidade das partículas, as quais podem se romper, sofrer redução ou mudança de seus aspectos durante o transporte.

Recentemente, a utilização de sistemas de transporte pneumático tem aumentado consideravelmente em vários setores da indústria, porém ainda existem muitos problemas importantes dificultando o seu emprego em uma ampla gama de aplicações industriais. No caso do transporte em fase diluída, o alto consumo de energia, a degradação excessiva dos produtos transportados e a erosão do sistema (linhas, curvas, etc.) são alguns dos principais problemas (MORAES 2012).

3.5 Principais componentes de um transportador pneumático

Há uma série de componentes em uma planta de transporte pneumático, que são necessários para condições específicas de operação. Normalmente, um sistema típico de transporte pneumático compreende diferentes zonas onde distintas operações são realizadas. Em cada uma dessas zonas, alguns equipamentos especializados são necessários para o bom funcionamento da planta. Segundo Gomes (2011), qualquer sistema de transporte pneumático consiste geralmente de quatro componentes principais que são:

3.5.1 Fontes de fornecimento de gás

Para fornecer a energia necessária para o ar ou gás transportador, vários tipos de compressores, ventiladores, sopradores e bombas de vácuo são utilizados como motor principal. A potência pneumática é geralmente utilizada nas indústrias onde as máquinas de fábrica foram projetadas para funcionar com ar comprimido, embora outros tipos de gases inertes possam ser utilizados (LOGITEC, 2014). A pureza do gás utilizado dependerá do tipo e qualidade do material particulado transportado.

3.5.2 Mecanismo de alimentação

Visando alimentar as partículas sólidas na linha de transporte, utiliza-se um mecanismo de alimentação, como válvulas rotativas, alimentadores tipo parafuso, etc. No caso do transporte pneumático de soja, a válvula rotativa servirá para controlar a quantidade de soja que entra no sistema, a fim de que a quantidade requerida se mantenha sempre constante (GOMES, 2011).

3.5.3 Linha de transporte

As linhas de transporte podem ser verticais ou horizontais, e portanto podendo funcionar com pressão positiva ou negativa. Podem também consistir por curvas e outros componentes auxiliares. As singularidades podem ter diferentes prolongamentos, que refletem em diferentes valores para friabilidade e perda de carga, bem como gasto energético do sistema e qualidade do produto transportado.

3.5.4 Equipamento de separação

No final da linha de transporte, as partículas sólidas têm de ser separadas da corrente de gás na qual foram transportadas. Para isto, utilizam-se ciclones, filtros de manga e precipitadores eletrostáticos, além de silos para armazenagem do produto transportado (GOMES, 2011).

3.6 Tipos de transporte pneumático

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

3.6.1 Fase densa

Geralmente os sistemas de fase densa são considerados como sistemas de alta pressão e baixa velocidade, utilizando uma alta relação de material/ar. Esse sistema requer controle e equipamentos muito mais sofisticados que o de fase diluída, mas cada sistema é particularmente adequado para determinadas aplicações e materiais (GOMES 2011). Ele utiliza altas pressões (positivas ou negativas) para impulsionar os materiais sólidos através da tubulação de transporte, de forma semelhante à extrusão (MILLS, 2004; DYNAMIC AIR CONVEYING SYSTEMS, 2005). É, em geral, de elevado custo inicial. Deve atender a norma NR-13 referente a vasos de pressão.

O sistema pneumático em fase densa é classificado como o mais seguro e confiável meio fixo de transporte quando aplicado para movimentação de sólidos à granel, sendo possível deslocar grandes quantidades de sólidos (acima de 30% em volume) em pequenas porções com baixa velocidade (0,2 a 5 m/s), conforme representado na Figura1 (DYNAMIC AIR CONVEYING SYSTEMS, 2005).

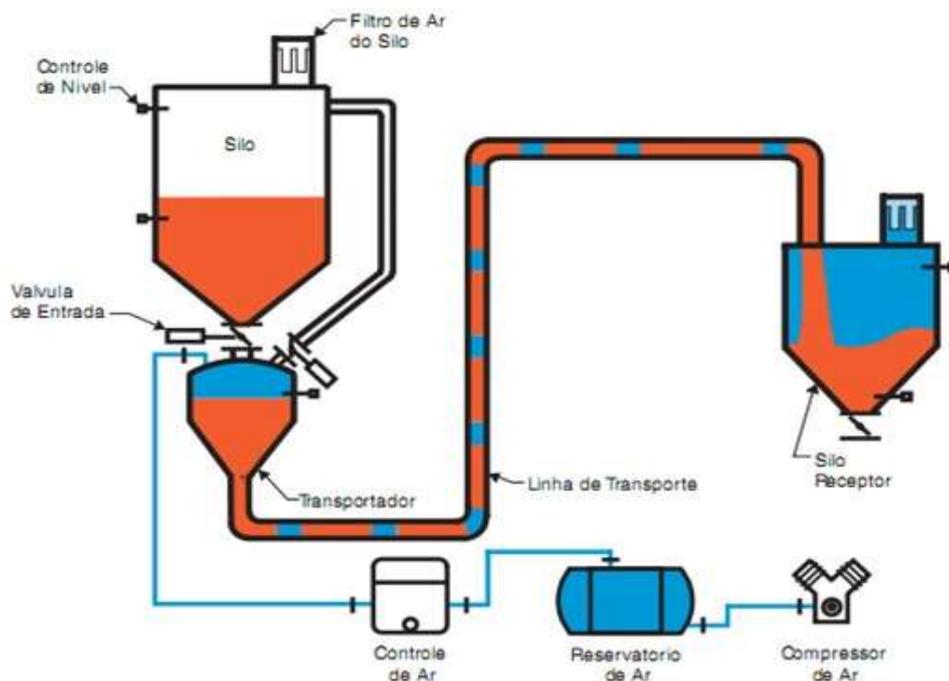


Figura 1 - Transporte pneumático em fase densa.

Fonte: Dynamic Air - Conveying Systems, 2005.

Entretanto, podem ocorrer alguns entraves como o acúmulo de produto transportado nos dutos, ocasionado pela queda de pressão, principalmente se o material estiver em baixas concentrações, dificultando o transporte. Dessa forma a utilização do transporte pneumático em fase diluída é a melhor opção.

3.6.2 Fase diluída

Os sistemas de fase diluída são os mais extensamente utilizados entre todos os sistemas de transporte pneumático (GOMES 2011), representada na Figura 2. 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, e são completamente suspensas no gás e as forças de interação fluido-partícula predominam (RHODES, 2003).

De modo geral, sistemas de fase diluída utilizam grandes vazões de ar em elevadas velocidades, como é exemplificado na Tabela 1.

Tabela 1 - Relação entre tipo de material particulado e a velocidade de deslocamento (m/s).

Tipo de material particulado	Velocidade (m/s)
Pós muito finos	15
Materiais granulares	18
Partículas maiores	>18

Fonte: Adaptado de MILLS, 2004.

Esse tipo de sistema que é considerado como de baixa pressão utiliza tanto pressão positiva como negativa, para impulsionar ou aspirar os materiais através da tubulação de transporte e apresenta uma elevada relação ar/material (MILLS, 2004).

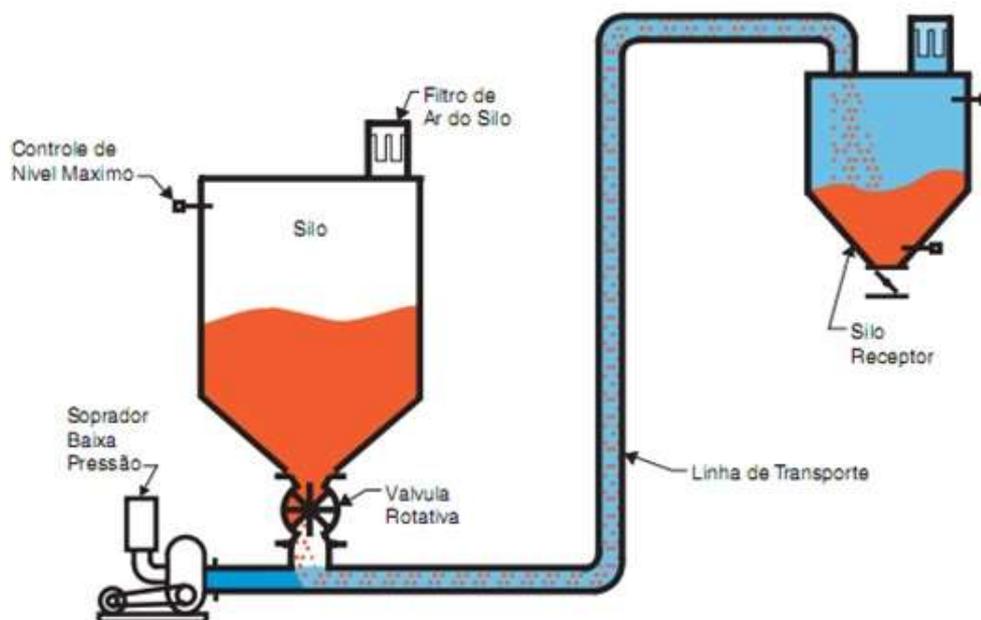


Figura 2 - Transporte pneumático em fase diluída.

Fonte: Dynamic Air - Conveying Systems, 2005.

3.7 Friabilidade e perda de carga no transportador pneumático

3.7.1 Friabilidade

A friabilidade é definida pela tendência de ocorrer fratura quando aplicado uma pressão em um determinado material. Um fator importante na escolha de um determinado tipo de transporte de grãos deve levar em conta sobre qual aquele que oferece o menor grau de perdas na movimentação daquele produto. Identificar o grau de friabilidade dos sólidos transportados é uma alternativa (RIBEIRO, 2015 apud MARINESCU, 2004).

Para determinação da friabilidade verifica-se o que se pratica na indústria farmacêutica, onde os comprimidos são submetidos a ensaios em equipamentos chamados friabilômetros, que são capazes de apontar se cápsulas ou comprimidos são capazes de se manterem íntegros após serem expostos ao atrito. Como os comprimidos estão sujeitos a choques mecânicos, do próprio processo de produção, embalagem, armazenamento, transporte, distribuição e manuseio pelo usuário, torna-se imprescindível que os mesmos possuam resistência ao esmagamento, possuindo uma friabilidade reduzida e uma dureza adequada (ROCHA, 2015).

A friabilidade é determinada em função da porcentagem de pó perdido, representada pela diferença entre o peso inicial e o peso final das cápsulas, após serem transportados e expostos ao atrito (FARMACOPÉIA BRASILEIRA, 1988).

3.7.2 Perda de carga

A previsão da perda de carga em um sistema pneumático pode ser determinada por diversas equações empíricas reportadas na literatura. Gomide (1983) sugere prever a perda de carga por atrito para trechos horizontais, por unidade de comprimento, para escoamento de ar num duto de diâmetro e velocidade conhecidas.

A perda de carga por aceleração do material nos trechos horizontais deverá ser computada sempre que a alimentação seja feita após o ventilador. A queda de pressão na linha de transporte é o parâmetro mais crítico de ser determinado. Na prática, o método mais comum baseia-se em experiências anteriores de manipulação de mesmo material ou por meio de testes em escalas pilotos para obtenção de relações entre as principais variáveis do sistema pneumático, a vazão mássica de ar e de sólidos e perda de carga na linha de transporte (SANTOS, 2009).

Atualmente, testes pilotos de um material foram considerados os métodos mais confiáveis nas determinações destas relações. Estes testes podem ser realizados para diversas condições incluindo ambos tipos de transporte em fase densa e diluída. No entanto, não existem modelos aceitáveis para transporte em fase diluída. No transporte horizontal e vertical de fase diluída a operação com velocidade baixa minimiza a perda de pressão por atrito, porém gera maior desgaste na parte inferior da tubulação horizontal (SANTOS, 2009).

3.8 Soja

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja, atrás apenas dos Estados Unidos, tendo como produtividade média de 2.882 kg por hectare. Na safra 2015/2016, a cultura ocupou área de 33,17 milhões de hectares (EMBRAPA, 2017).

A estimativa para a produção mundial permaneceu em 351,3 milhões de toneladas/ano, demanda influenciada por aumentos em todos os grandes mercados. As exportações mundiais do ciclo 2016/17 devem alcançar 147,3 milhões de toneladas (USDA, 2018).

3.8.1 Transporte pneumático de soja

No deslocamento da soja, existem vários tipos de equipamentos mais utilizados neste sistema de transporte, como os transportadores por gravidade, por correias, de caçambas, helicoidais e de corrente (*redler*). Além dos citados anteriormente, o transportador pneumático é um sistema de transporte estacionário que está sendo usado freqüentemente em diversos setores da indústria, principalmente na área do manuseio e processamento de sólidos a granel, como é o caso do transporte de soja. Essa modalidade de transporte pode ser dividido de acordo com a concentração das partículas a serem transportadas.

3.8.2 Panorama regional: Porto de Santos

Os transportadores pneumáticos são muito aplicados para a movimentação de grandes massas de grãos em estruturas portuárias (NONNENMACHER, 1994). Nas instalações armazenadoras agrícolas brasileiras, são também aplicados para coleta e transporte pneumático de amostras de grãos para análise em laboratório (WEBER, 2005). O transporte dos grãos entre os equipamentos é realizado, predominantemente, através de transportadores mecânicos, como elevadores de canecas e correias transportadoras, entre outros (SILVA, 2005).

A soja em grãos encerrou 2017 ocupando a vice-liderança entre as cargas mais movimentadas no Porto de Santos, ao totalizar volume de 16.537.752 t (13,6% ante o mesmo período de 2016). Desse volume, foram registradas movimentações de 16.473.060 t de soja em grãos a granel (13,6%) e de 64.692 t do produto em contêineres (12,2%). Os embarques de farelo de soja registraram 4.643.372 t

(13,1%), sendo 4.994.870 t de farelo a granel (14,1%), enquanto na modalidade containerizada foram movimentadas 200.581 t (7,1%). Dessa forma, o complexo soja movimentou, no ano, um total de 21.733.202 t (13,6%) (CODESP, 2017).

Conforme dados divulgados pelo MDIC, o Porto de Santos foi o porto que mais exportou soja em grãos em 2017, com participação de 25,1% do total escoado por todos os portos nacionais, seguido pelos portos de Rio Grande (19,0%), Paranaguá (17,2%), São Luiz (9,3%) e São Francisco do Sul (7,1%) (CODESP, 2017).

Tabela 2 - Movimento físico do Porto de Santos por natureza e tipo de carga – 2013 a 2017 (em mil toneladas).

Discriminação	2013	2014	2015	2016	2017
Açúcar	16.913	15.733	16.491	18.432	18.724
Milho	11.043	8.864	15.581	7.884	14.234
Soja (grãos + peletizada)	15.828	16.231	17.430	18.880	21.468
-soja em grãos	13.092	12.442	13.025	14.503	16.473
-soja peletizada	2.736	3.789	4.405	4.378	4.995

Fonte: Adaptado de CODESP, 2017.

3.9 Transportes sustentáveis

O setor dos transportes mundial, atualmente responde por cerca de 25% das emissões de gases de efeito estufa (GEE) relacionados a energia e se encaminha para ter dobrada a demanda até 2050, dobrando também as emissões de dióxido de carbono (GONÇALVES, 2013). Reduzir o ritmo do aumento da utilização de combustíveis emissores de CO₂ será necessário e o uso de meios com melhor eficiência energética será determinante, especialmente no deslocamento de cargas.

Ainda segundo Gonçalves (2013), para uma mesma tonelagem em semelhante distância, o modal rodoviário emite 244% mais CO₂ que o modal ferroviário e 770% mais CO₂ que o aquaviário.

A Suécia está testando caminhões em auto estradas elétricas, as *eHighways*, tornando os veículos duas vezes mais eficientes que aqueles movidos por motores convencionais de combustão interna (BBC BRASIL, 2016).

Péra (2017) relata correlação entre o nível de desenvolvimento da região geográfica e a participação da perda ou desperdício em cada fase da cadeia de

suprimentos. Em países desenvolvidos, as perdas/desperdícios de alimentos são identificadas mais proximamente ao consumidor e, em países em desenvolvimento, os indicadores revelam estes problemas mais próximos à produção, conforme apresentado na Figura 3.

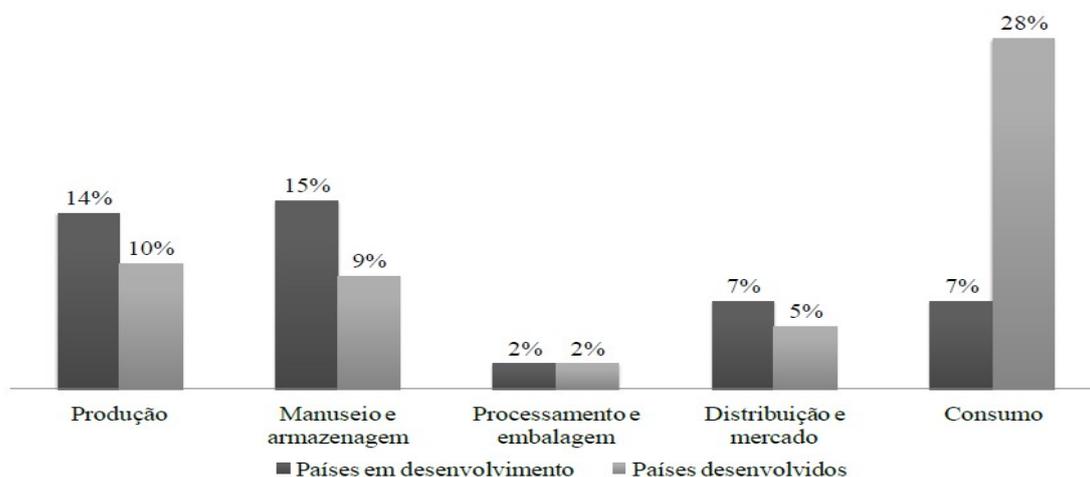


Figura 3: Perdas e desperdícios de alimentos em cada fase da cadeia de suprimentos para o grupo de países desenvolvidos e em desenvolvimento.

Fonte: Péra (2017).

O domínio de melhores técnicas de transporte e políticas públicas governamentais podem estar fazendo a diferença à favor dos países desenvolvidos. Band et al. (2013) cita alguns motivos para explicar esta situação desfavorável dos países em desenvolvimento: limitações tecnológicas, restrições financeiras, falta de treinamento/atualização, perdas nas operações de carga e descarga na armazenagem, consumo por animais sinantrópicos (aves e roedores), falta de adequada infraestrutura de transporte e armazenagem.

Um projeto em estudo no Brasil é o grão duto, um sistema de transporte estacionário com algumas características que se assemelham aos oleodutos, com rotas principais partindo de áreas de grande produção e como inovação eliminaria a emissão de CO₂ na atmosfera oriundo da queima de combustíveis (MAPA, 2017). Outra potencial qualidade deste sistema, a ser melhor estudado, seria um transporte de grãos com baixo índice de perdas por quebras (friabilidade) e risco mínimo de perdas ao ambiente, por operar em sistemas fechados, sem contato com o exterior.

Análises e gestões de conflitos referentes a perdas e desperdícios de alimentos no pós-colheita até os portos de embarque para exportação, por exemplo, são temas afetos à sustentabilidade em ambientes costeiros, podem e devem ser

melhor estudadas, especialmente em regiões sob influência de hinterlândias portuárias. Péra (2017) cita sobre as externalidades econômicas, ambientais e sociais que os desperdícios e perdas de alimentos no pós-colheita podem resultar. O autor organiza e identifica os efeitos colaterais em consequência da manutenção e ampliação das perdas e desperdícios de alimentos, representadas no Quadro 1.

Impactos	Fatores
Econômicos	Empresas e consumidores gastando em itens que não serão vendidos ou consumidos Desequilíbrio nos fluxos de produção e demanda Necessidade de investimentos em estoques intermediários construção de armazéns Ineficiência na cadeia de suprimentos Custos adicionais incorridos para redução e eliminação de resíduos Redução de recurso para investimentos em outras áreas por parte do produtor e governo Redução do lucro
Sociais	Consumidores com menos recursos para compras Falta de produtos (alimentos) Dificuldades das empresas realizarem seu planejamento Alto nível do preço dos alimentos e consequente dificuldade de acessá-los Maior número de pessoas abaixo da linha de pobreza
Ambientais	Ampliação da quantidade de lixos e resíduos Contaminação de indivíduos em áreas rurais e urbanas Multiplicação de aterros Pressão nos recursos naturais, principalmente água e uso do solo Emissão de gases do efeito estufa Ocupação de florestas e áreas de recuperação Maior gasto com energia não renovável

Quadro 1: Impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes do aumento das perdas e desperdícios de alimentos.

Fonte: Péra (2017).

De acordo com a FAO (2013) a emissão global de gases de efeito estufa decorrentes das perdas e desperdícios de alimentícios totalizou 3,3 gigatoneladas de dióxido de carbono (CO₂) equivalentes em 2007, causando impactos negativos no meio-ambiente, pois são necessários recursos para que tais produtos alimentícios sejam produzidos: água, solo e energia, dentre outros. Os patamares de emissão são superiores ao terceiro maior país emissor, conforme ilustra a Figura 4.

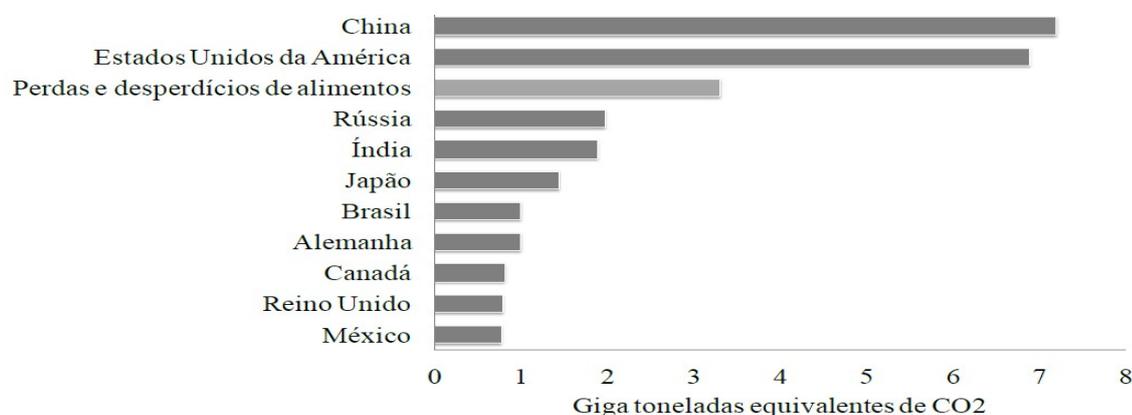


Figura 4: Ranking – top 10 países emissores de GEE por emissões de perdas/desperdícios.

Fonte: Péra (2017).

4 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. Na Unidade Piloto, os materiais e métodos utilizados na presente pesquisa são apresentados a seguir:

4.1 Material

4.1.1 Matéria-prima

A matéria-prima utilizada foi 20 kg de grãos de soja do Grupo I, destinado ao consumo in natura, marca Camil Alimentos S/A – classe amarela – Tipo I, proveniente do comércio.

4.1.2 Unidade piloto

A Unidade Piloto do Laboratório de Operações Unitárias da UNISANTA utilizada nos experimentos é mostrada nas Figuras 5 e 6.

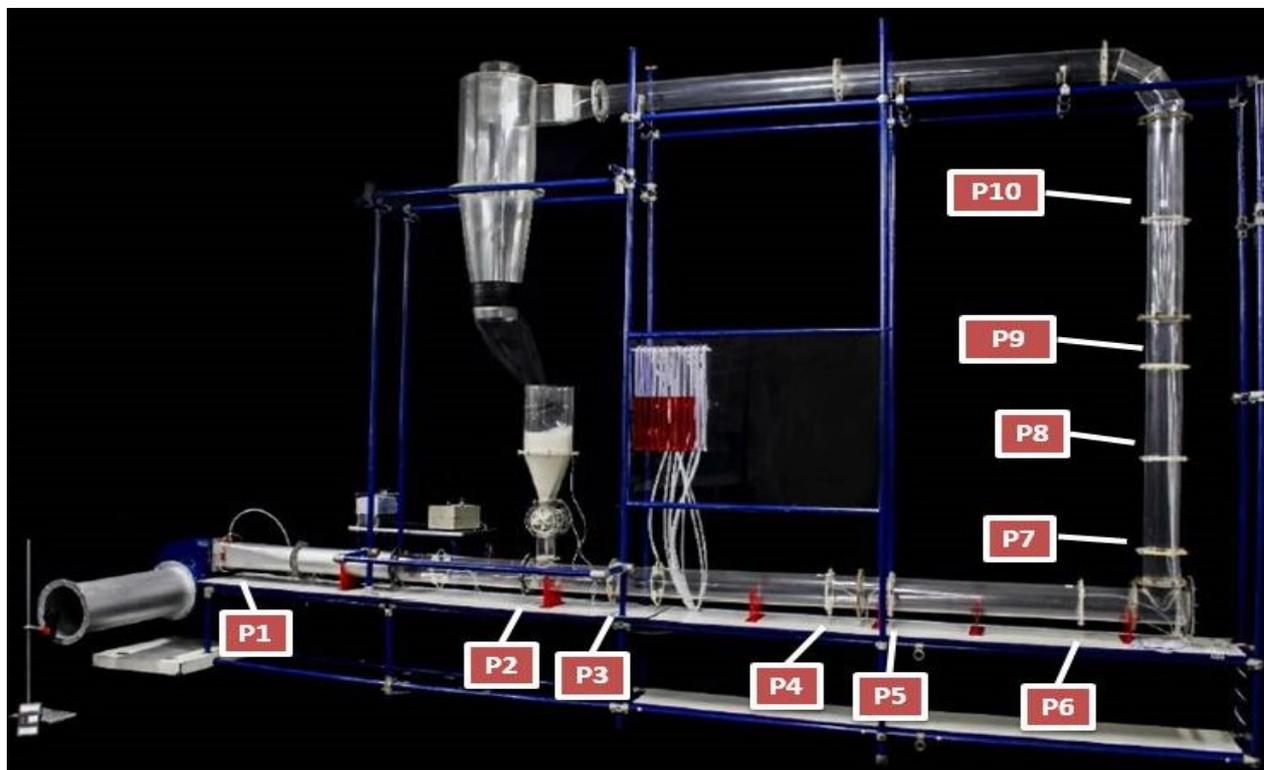


Figura 5 - Unidade Piloto do Laboratório de Operações Unitárias da UNISANTA. Legenda: Pontos de tomada de dados para ensaio de Perda de carga (P1 a P10).

Fonte: adaptado de Moraes, 2012.

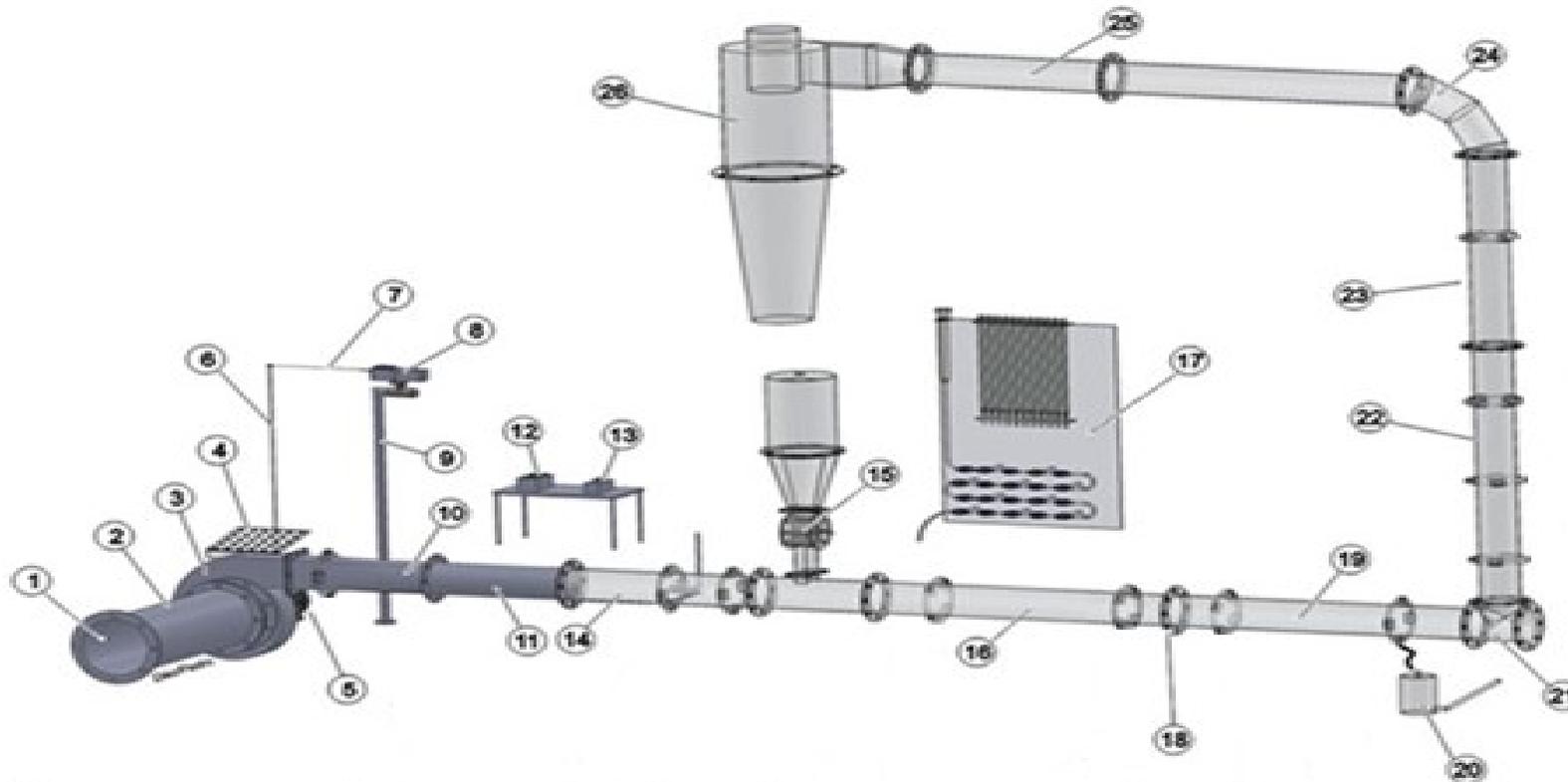


Figura 6 - Esboço da unidade piloto de transporte pneumático em fase diluída

Legenda: 1) Tubulação de entrada do ar de alimentação da unidade experimental; 2) duto de sucção do ventilador; 3) ventilador centrífugo; 4) “cooler” do motor; 5) motor elétrico síncrono 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; 11) tubo de aço carbono de 117 mm de diâmetro interno com colmeia para direcionar o escoamento; 12) inversor de frequência do motor do ventilador; 13) controlador de velocidade da válvula rotativa (potenciômetro); 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 acoplado; 16) tubo de acrílico de 1000 mm de comprimento com tomadas P4 e P5; 17) banco de tubos em U 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 e 26) ciclone

Fonte: adaptado de SILVA et al., 2014.

Os principais componentes da Unidade Piloto de Transporte Pneumático da Figura 7 (quadros: a, b, c, d, e, f, g, h, i, j):

- a) Ventilador centrífugo: O ar para a operação do sistema foi deslocado por um ventilador centrífugo da marca “Ventisilva” de pás semi-abertas, com rotor de diâmetro de 210 mm e duto de sucção com diâmetro de 217 mm. Apresenta-se na Figura 7.a o ventilador centrífugo e o duto de sucção (7.b).
- b) Motor elétrico para acionamento do ventilador centrífugo: O motor elétrico, representado na Figura 7.c, tinha 0,75 hp de potência e 3420 rpm, e estava acoplado ao ventilador com rotor semiaberto (CASTRO, 2015).
- c) 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 (Figura 7.d) da marca Mitsubishi Electric Corporation, modelo FR-A024-1 5K-UL, com 230 V 50 Hz / 230 V 60 Hz.
- d) Válvula rotativa: A soja foi alimentada por meio de um silo ao duto horizontal do Transportador Pneumático através de uma válvula rotativa, com corpo de acrílico com comprimento de 92 mm, diâmetro interno de 100 mm e parede de 5 mm. A válvula rotativa foi confeccionada com PVC e dispõe de 6 pás radiais retangulares de 92 mm por 51,3 mm e 6 mm de largura cada com arestas de borrachas para vedação.
- e) Controlador de velocidade do motor da válvula rotativa (potenciômetro): O controle da vazão foi executado por meio da variação da velocidade por intermédio de controlador de velocidade da Marca Diacti. 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. Tem-se na Figura 7.e a válvula rotativa acoplada ao motor e na Figura 7.f o controlador de velocidade desse motor, que controla a vazão dos grãos de soja.
- f) Banco de tubos em “U”: Em cada um dos 10 anéis piezométricos, foram tomadas medidas de pressão. Podem ser tomadas medidas de pressão em cada um dos 10 anéis piezométricos instalados ao longo da tubulação da Unidade, nomeados de P1 a P10. Esses anéis foram conectados a um banco de tubos em “U” para leitura de cada trecho e acessórios do Transportador Pneumático. Mostra-se na Figura 7.g o medidor de pressão da Unidade Piloto. O líquido inserido nos tubos em “U” foi água corada de vermelho, para

facilitar a visualização e leitura, a qual foi realizada em milímetros utilizando uma régua de aço graduada.

- g) Tubulação da unidade piloto: A tubulação do transportador foi confeccionada de Acrílico e ferro galvanizado, com diâmetro externo de 125 mm, diâmetro interno de 117 mm e espessura de 4 mm. Mostra-se na Figura 7.h um trecho da tubulação horizontal e a Figura 7.i um trecho da tubulação vertical da Unidade Piloto.
- h) Silo: A Unidade Piloto possuía um silo armazenador de sólido construído em acrílico e com volume de 21,5 litros. Pode-se observar na Figura 7.j o dispositivo mencionado.
- i) Ciclone: O classificador utilizado foi o ciclone para separar os grãos de soja do ar. Ao final do equipamento, foi utilizada uma rede furada para recolhimento da soja visando maximizar a eficácia do experimento e garantir que nenhum grão se seja perdido ao sair da tubulação para o silo.

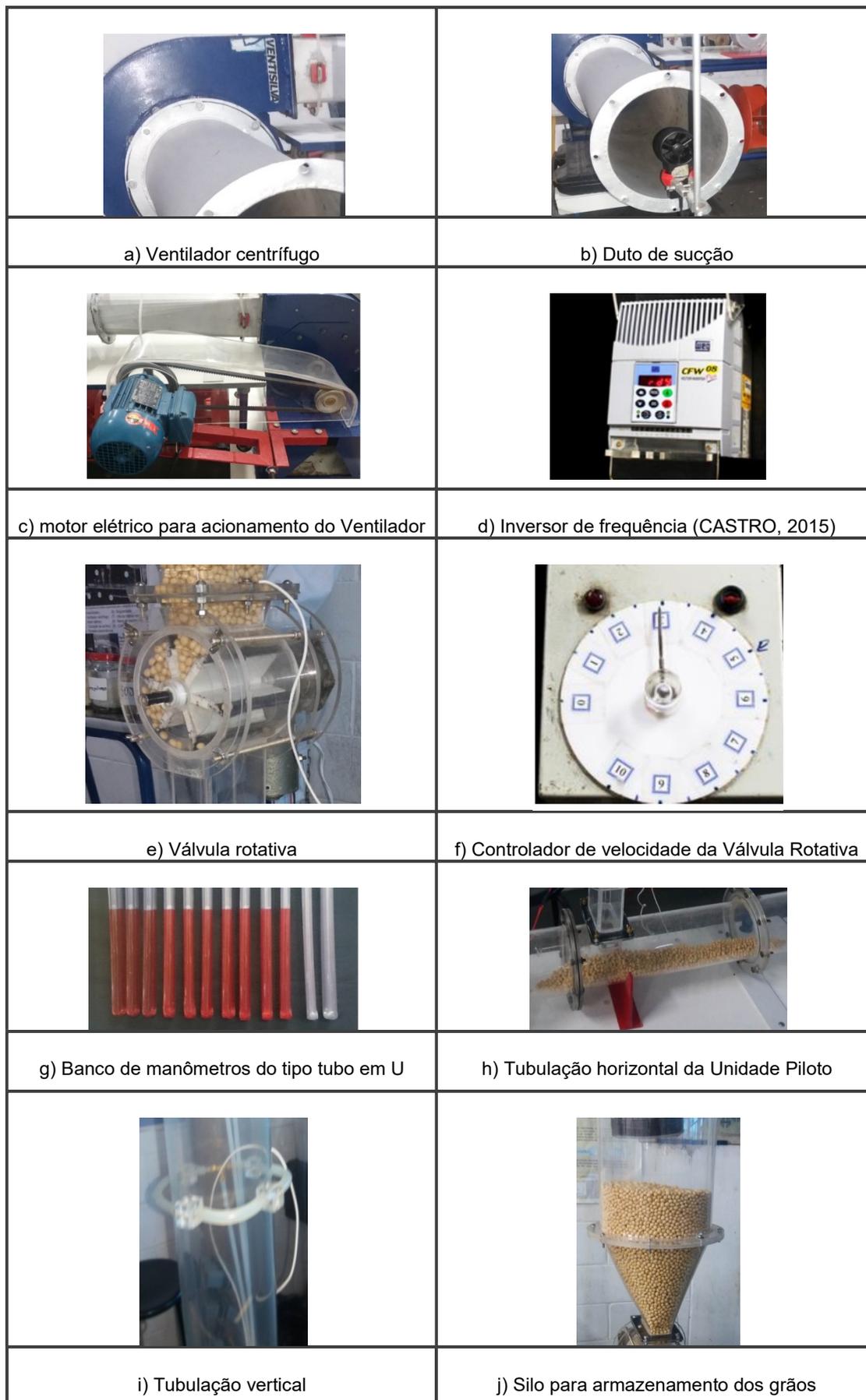


Figura 7 (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j) - Equipamentos utilizados no ensaio de friabilidade e perda de carga de soja na Unidade Piloto.

4.1.3 Instrumentos de medida

A seguir os instrumentos de medição utilizados para a coleta dos dados:

a) Anemômetro: marca *Prova Instrum.* Mod. AVM-01 (velocidade de sucção);

b) Balança digital: marca *Gehakade* 8 kg (pesagem de grãos de soja);

c) cronômetro digital: marca *Toppa* (calibração da UP);

d) cronômetro digital: marca *Instrutterm CD 2800* (calibração da UP);

e) régua de aço: fabricante *Mitutoyo*, modelo R530 – 104 B -10/0708 e 0707 (utilizada para metragem da coluna em metros de água - MCA).

Além disso, foram necessários a utilização de materiais auxiliares como um balde de plástico de 10 L para pesagem dos grãos, cronômetro para medida de vazão de soja da válvula rotativa, e termômetro para mensurar as variações de temperatura durante os experimentos.

4.2 Métodos

À princípio verificou-se a estanqueidade do sistema, testando-se a ocorrência de vazamentos de ar, com auxílio de uma solução detergente passada externamente ao duto e conexões, obstruindo-se a saída do ciclone e submetendo-se velocidade máxima no duto de sucção. Com tal procedimento, garantiu-se maior precisão dos dados obtidos.

4.2.1 Velocidade do ar no duto de sucção

A velocidade do ar na entrada do duto de sucção (V_s) foi medida com um anemômetro (Tabela 3). Os ensaios foram iniciados sem alimentação dos grãos de soja para cada frequência disponível no inversor. Os valores da velocidade do ar no duto de sucção para cada Velocidade de Descarga (V_d) foram obtidos pela média da leitura dos três anemômetros e se encontram na Tabela 3.

Tabela 3 - Velocidade de sucção (Vs) e Velocidade de descarga (Vd).

Velocidade de sucção (m/s)	Velocidade de descarga (m/s)
3,50	12,07
3,70	12,76
3,90	13,45
4,00	13,80
4,20	14,49
4,30	14,83
4,40	15,18
4,50	15,52
4,60	15,87
4,80	16,56

4.2.2 Calibração da válvula rotativa

Com o auxílio dos cronômetros e do recipiente de coleta 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 (Tabela 4).

Tabela 4 - Conversão de dados após calibração da válvula rotativa: técnica da massa/unidade de tempo.

Identificação no potenciômetro	Massa coletada de grãos de soja (kg)	Tempo (s)	Vazão mássica (kg/s)	Vazão mássica (kg/h)
2	3,884	147,040	0,026	95,092
3	3,821	80,033	0,048	171,875
4	3,747	56,975	0,066	236,725
5	3,754	43,570	0,086	310,177
6	3,763	36,765	0,102	368,470
7	3,654	30,653	0,119	429,146
8	3,655	26,280	0,139	500,685
9	3,687	24,000	0,154	553,050
10	3,756	23,955	0,157	564,383

4.2.3 Diâmetro dos dutos

Com a utilização do paquímetro, foram medidos diâmetros internos (Tabela 5) do duto de sucção (m/s), assim como duto de transporte, chamado de duto de descarga (m/s).

Tabela 5 - Conversões de medida e velocidade

Conversões de medidas		
Diâmetro	Sucção (m)	0,2170
	Descarga (m)	0,1150
Área	Sucção (m ²)	0,0370
	Descarga (m ²)	0,0104
Conversões de velocidades		
Velocidade	Sucção (m/s)	3,5000
	Descarga (m/s)	12,0397

4.2.4 Determinação da Friabilidade

Para obter os dados de friabilidade, foi estabelecida a vazão de suprimento do produto e da velocidade do ar. A cada volta dos grãos na unidade piloto, a soja quebrada era posta num quadro de separação de grãos (Quadros de 3 até 7, Apêndice A) e separada das inteiras e pesada (m_{quebrada}), da mesma forma os grãos inteiros também tinham o seu peso apurado (m_{coletada}) e, por meio de cálculos (subtração do m_{inteiro} pelo m_{quebrado}), foi possível determinar o acúmulo de soja dentro dos prolongamentos.

Dessa forma, a friabilidade dos grãos de soja utilizados neste estudo foi determinada pela Equação 1:

$$\% \text{ quebra de grãos} = \frac{\text{massa de soja quebrada}}{\text{massa de soja coletada}} \times 100 \quad (1)$$

Os ensaios foram repetidos para: tê com prolongamento de 30 mm (Figura 8.A), tê com prolongamento de 60 mm (Figura 8.B), tê com prolongamento de 90 mm (Figura 8.C), tê sem prolongamento (Figura 8.D) e curva de 90° com 3 gomos, denominada neste trabalho como curva de 3 gomos (Figura 8.E).

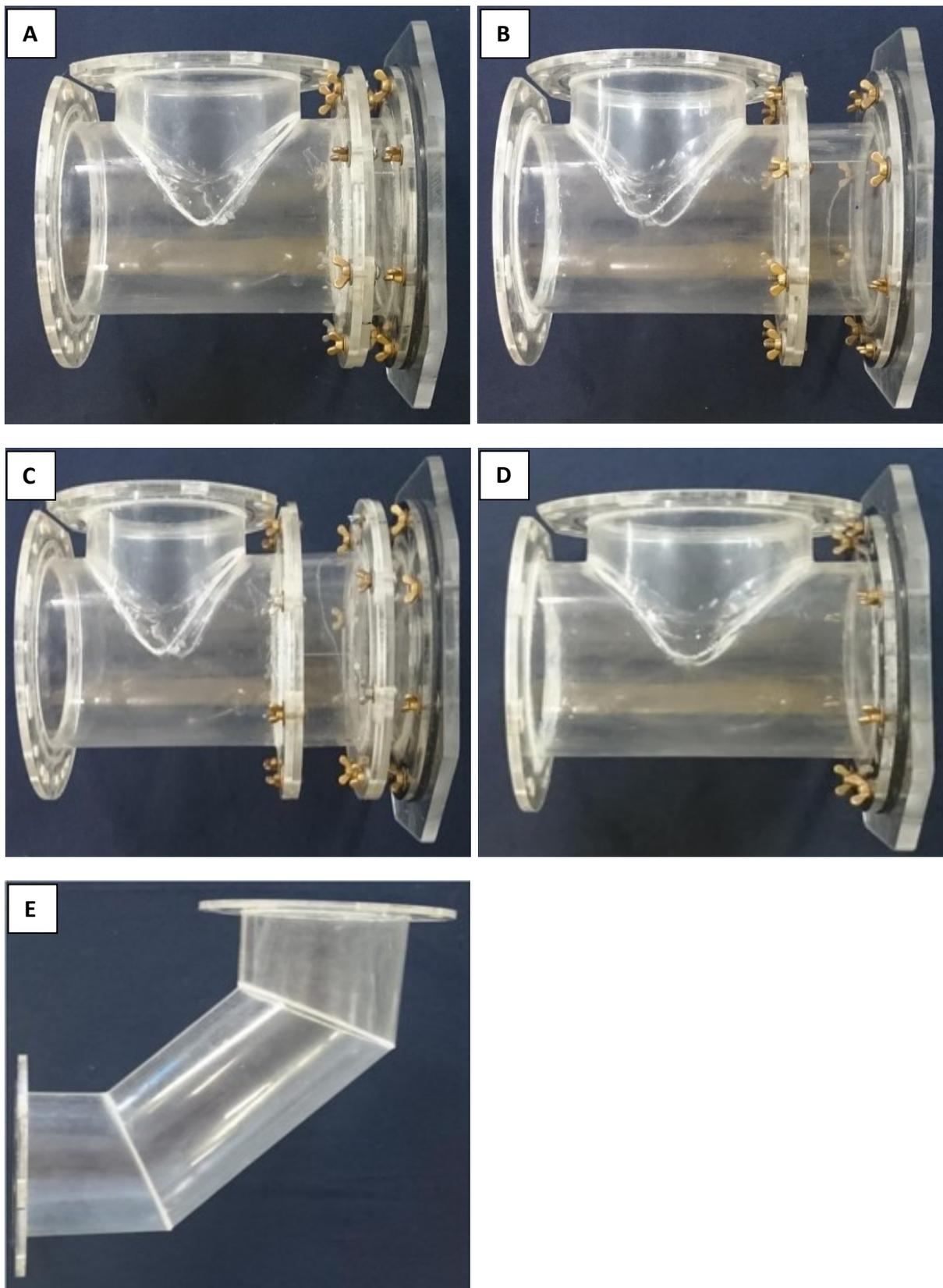


Figura 8 - Singularidades utilizadas. Legenda: a) tê com prolongamento de 30 mm; b) tê com prolongamento de 60 mm; c) tê com prolongamento de 90 mm; d) tê sem prolongamento; e) curva de 3 gomos.

Foram realizadas análises da friabilidade dos grãos submetidos ao transporte pneumático da Unidade Piloto, segundo os parâmetros de singularidades: 30 mm, 60 mm, 90 mm, sem prolongamento e curva de 3 gomos, bem como as vazões de suprimento de material para cada tipo de prolongamento: vazão de 95 kg/h, 368 kg/h e 564 kg/h. Para todos esses ensaios, a massa inicial de grãos de soja foi de 7.781,2 g, numa velocidade de sucção do ar (V_s) de 3,5 m/s.

Para cada singularidade e vazão, foram realizados 10 ensaios, representados nas Tabelas 16 a 20 do Apêndice A como "n° de voltas". Parâmetros como a massa coletada (g), massa quebrada (g), massa acumulada (g), massa total (g) e massa de grãos inteiros (g) foram analisados a cada volta. Além disso, foram fotografadas a soja coletada separada da massa quebrada na 1° e na 10° volta, e em cada singularidade e vazão, apresentados na Figura 16 do Apêndice A.

4.2.5 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 6 e enumerados de P1 a P10.

Os ensaios foram realizados sem a alimentação dos grãos de soja para 10 velocidades médias de ar medidas com os anemômetros, conforme a Tabela 3.

4.2.6 Determinação da perda de carga da soja

As vazões estudadas dos grãos de soja foram 95 kg/h, 368 kg/h e 564 kg/h. Determinaram-se as perdas de carga para as combinações entre as quatro vazões de sólido e 10 velocidades médias do ar, correspondentes às diferentes frequências que foram ajustadas de acordo com a velocidade de sucção de descarga. Com velocidades mais baixas, os grãos de soja se acumularam na tubulação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Friabilidade

A partir dos resultados apresentados na Tabela 12 do Apêndice A, foi possível determinar a massa de grãos de soja (Tabela 6)

Tabela 6 - Massa de grãos de soja quebrados

	Quantidade de soja quebrada (gramas)		
Vazão (kg/h)	95	368	564
Prolongamento de 30 mm	14,1	11,7	6,1
Prolongamento de 60 mm	13,0	8,8	5,5
Prolongamento de 90 mm	12,4	4,4	4,6
Sem prolongamento	14,2	13,1	9,7
Curva com 3 gomos	16,6	13,8	11,3

Fonte: elaborada pelo autor

Apresenta-se na Figura 9 os resultados dos ensaios concernentes à quebra da soja.

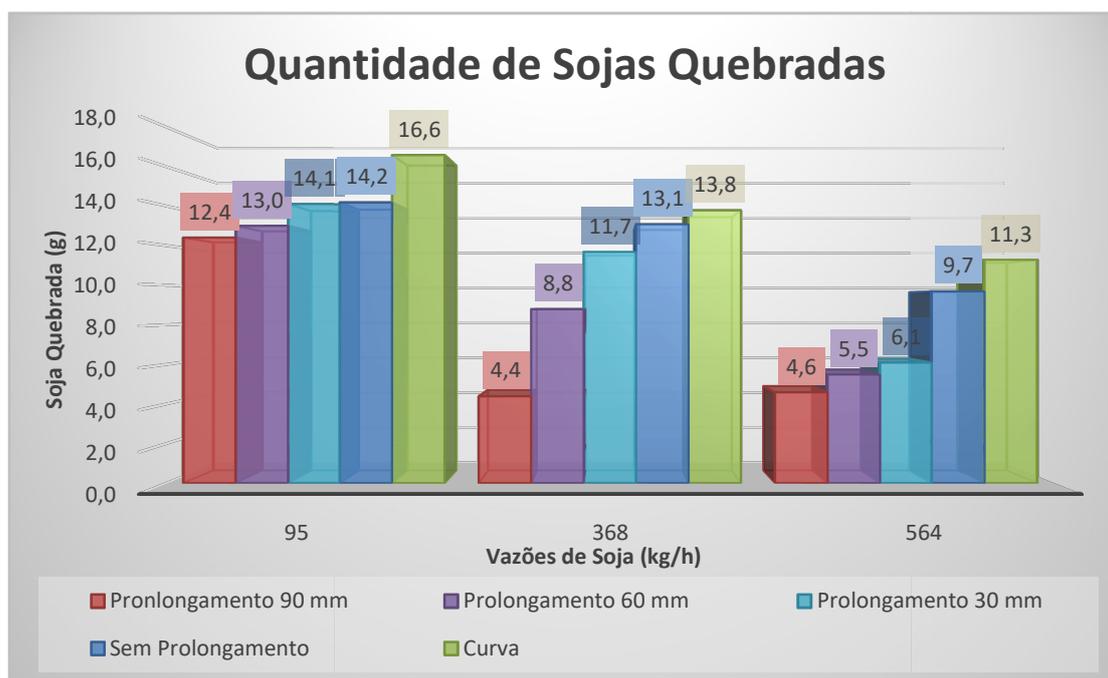


Figura 9 - Quantidade de soja quebrada por vazão e quebra de grãos de soja em função das singularidades.

Conforme a Figura 9, é possível inferir que quanto maior a vazão de soja e quanto maior o prolongamento, menor é a quebra. Esse comportamento pode ser justificado uma vez que a maior quantidade de material minimiza a quebra por impacto e o prolongamento dos acessórios forma um colchão amortecedor.

Com os dados das Tabelas de números 16 a 20 do Apêndice A, foi possível quantificar a porcentagem de quebra de grãos de soja (% quebra), apresentados na Figura 10. Observa-se que, em todos os prolongamentos, a vazão em que há a maior porcentagem de quebras de grãos de soja é na vazão de 95 kg/h e a menor porcentagem de quebras é na vazão de 564 kg/h.

Além disso, quando é apresentado na Figura 10, a porcentagem de quebra de grãos em relação a cada prolongamento, pode-se concluir que no prolongamento de 90 mm, observa-se a menor quantidade de soja quebrada, tanto em porcentagem de quebra (Figura 10), quanto em massa (Figura 9). Além disso, nesse mesmo prolongamento, conclui-se que são necessárias maiores vazões de ar para que se obtenha menor friabilidade.

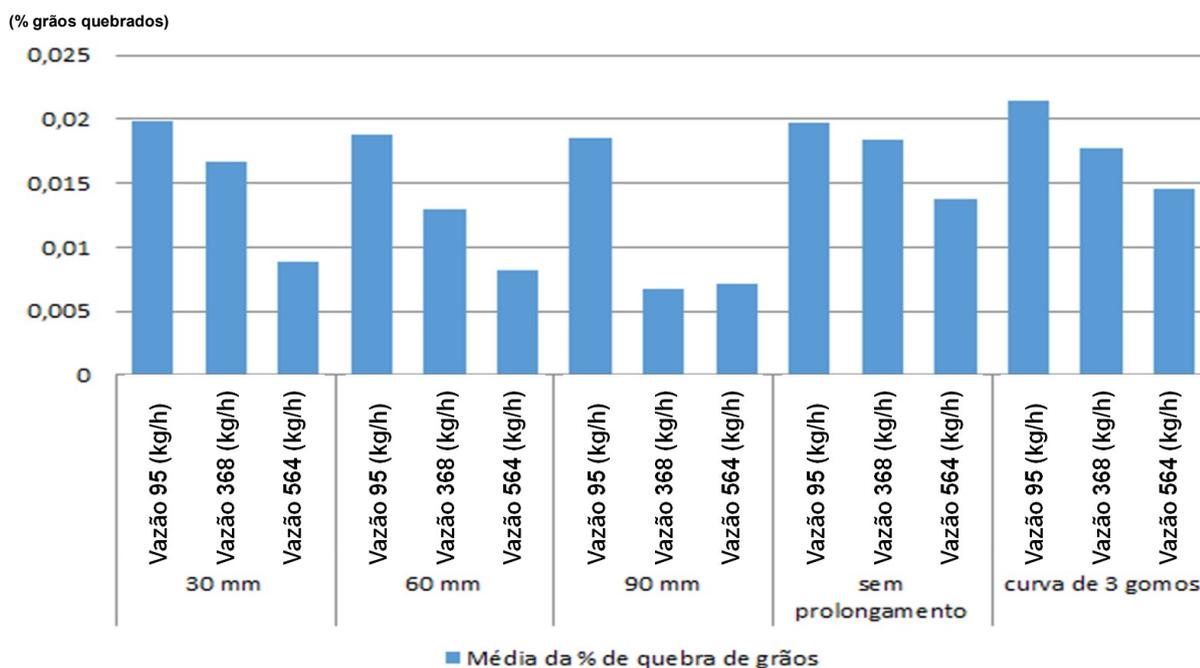


Figura 10 - Porcentagem de quebra de grãos de soja em função das singularidades.

Em um estudo realizado por Silva et al. (2009), utilizando esta mesma Unidade Piloto (U.P.) para análise de transporte pneumático em fase diluída, porém para o milho, observou-se que, dentre os três prolongamentos analisados (30, 60 e 90 mm), o que melhor reduziu a quantidade de quebra de grãos de milho foi o tê com prolongamento de 90 mm e com maiores vazões, corroborando com o atual estudo.

Este resultado pode ser explicado ao se considerar a hipótese de que no prolongamento de 90 mm o acúmulo de grãos aumenta e forma uma "almofada" (pseudo curva), o que ameniza o impacto e o desgaste dos grãos causados pela curva. Tais condições são de grande interesse pelas indústrias, pois se busca obter o menor consumo de energia e friabilidade, a fim de que seja um sistema sustentável e que preserve a qualidade do material particulado transportado.

5.2 Determinação da perda de carga de soja

Foram analisadas as perdas de carga para cada uma das singularidades, compreendidas em "tê" sem prolongamento, "tês" com prolongamentos de 30 mm, 60 mm, 90 mm, e curva de 3 gomos; subdivididos nas seguintes vazões: 95 kg/h, 368 kg/h e 564 kg/h.

Foram medidos, em metros de coluna de água (MCA), por meio do deslocamento do líquido avermelhado, provocada pela pressão do ar ao entrar pelo duto implantado em cada um dos 10 pontos analisados, exemplificados anteriormente na Figura 5.

5.2.1 Perda de carga da mistura ar e grãos de soja entre os pontos P1 e P10

As vazões dos grãos de soja estudadas foram de 95 kg/h, 368 kg/h e 564 kg/h. Determinaram-se as perdas de carga para as combinações entre as três vazões de sólido e dez velocidades médias do ar. Com velocidades mais baixas, os grãos de soja se acumularam na tubulação.

Representam-se na Figura 11 os resultados obtidos nos ensaios de perda de carga utilizando as singularidades "tê" prolongamento de 30 mm, 60 mm, 90 mm, sem prolongamento e curva de 3 gomos, com 10 velocidades apenas do ar entre 3,5 à 4,8 (m/s), que serviram como base para a construção do gráfico de perda de carga sem a soja.

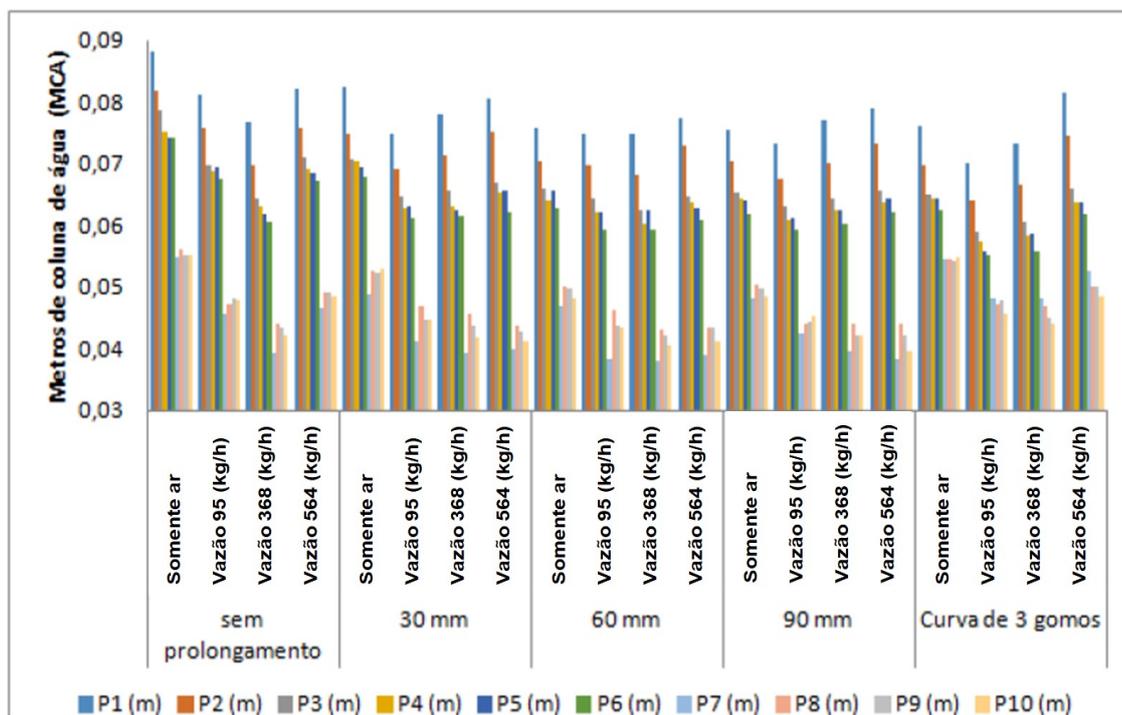


Figura 11 - Médias dos pontos P1 a P10 em função dos prolongamentos, sendo estes subdivididos por diferentes vazões.

Observou-se que ao utilizar-se a curva de 3 gomos, a perda de carga apurada foi menor em todos os pontos medidos. A hipótese é que neste tipo de singularidade não se forma um “colchão de ar” que pode amortecer o atrito dos grãos, além de um acúmulo de massa. Esse “colchão amortecedor” pode oferecer maior resistência ao ar. A ausência desta resistência pode exigir menor energia do sistema, permitindo assim um menor consumo energético para o transporte dos grãos.

Na Figura 11, pode-se notar que, a partir dos valores médios de velocidades para cada um dos pontos de perda de carga (P1 a P10), gradualmente a altura em MCA foi decaindo ao longo dos pontos, com exceção do P7, em que houve decaimento significativo em relação aos demais. Isso pode ser explicado por conta deste ponto estar logo após uma curva e posterior transporte com pressão negativa.

Além disso, tal decaimento pode ser atribuído ao fenômeno “*Vena contracta*”, em que o fluido sofre uma brusca mudança de direção, deste modo, ele não consegue preencher rapidamente todo o espaço disponível na tubulação, ocasionando um estreitamento das linhas de corrente do fluido (que gerará um aumento de velocidade e então uma zona de vácuo que acontece na área não preenchida pelo fluido (GOMES, 2011). Segundo Tavares (2014), que utilizou esta

mesma Unidade Piloto e os mesmos pontos em estudo, observou o mesmo decaimento no P7, e também relacionou ao fenômeno *vena contracta*, e relacionou à re-aceleração dos grãos de soja pelo ar, logo após a curva, ou seja mudança da direção do deslocamento das partículas.

Logo após o P7, o decaimento na velocidade voltou a ser gradual, tendo média de menor decaimento no P10. Entretanto, ao observar a perda de carga em relação aos prolongamentos, denota-se que o prolongamento "curva de 3 gomos" foi o que teve menor perda de carga, atribuindo-se ao fato de que não o acúmulo é relativamente menor pois não há espaço para que o acúmulo ocorra. Na Figura 12, corrobora-se tal constatação.

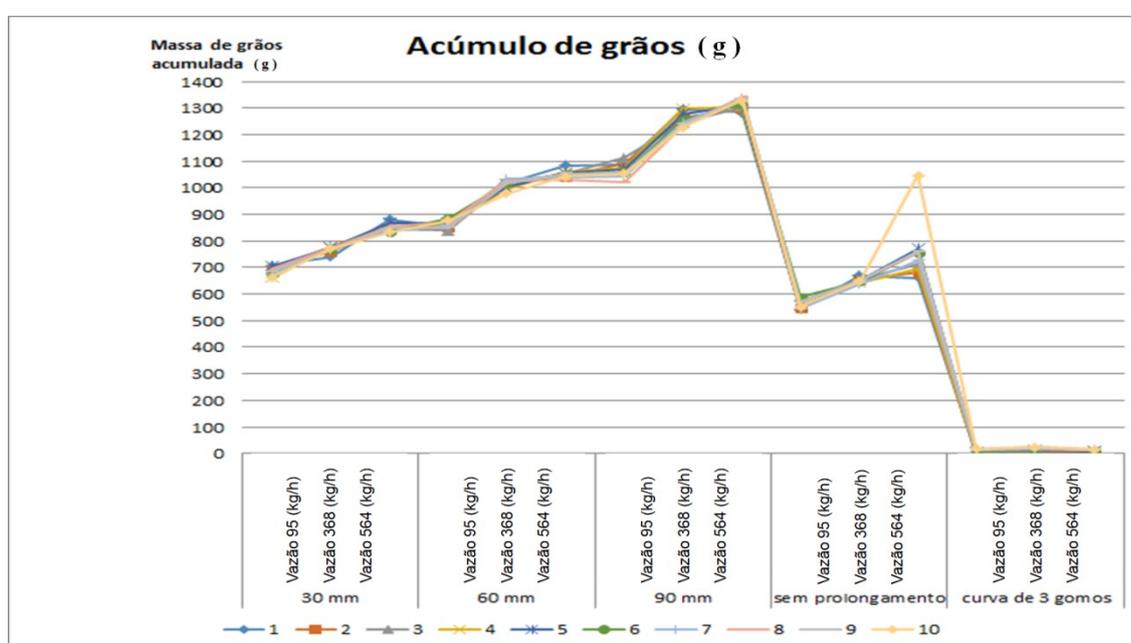


Figura 12 - Acúmulo de grãos em cada uma das singularidades, sendo estas subdivididas por vazões.

5.3 Comparação da eficácia da sustentabilidade ambiental dos diferentes modais de transporte de soja

A partir de resultados de friabilidade obtidos, foram traçados comparativos com os modais de transporte mais utilizados para o deslocamento da soja.

Segundo Kussano (2012), adota-se pelo mercado uma taxa de quebra convencional, um índice de 0,25% de soja transportada por trecho de transporte rodoviário até 1.000 km. Trata-se de um custo considerado representativo e que varia de acordo com as condições do veículo e da via em que trafega. No transporte

de grãos, a mensuração das perdas são obtidas pela diferença de peso entre a origem e o destino. Péra (2017) identificou o conceito de “quebra técnica” no transporte, onde é estabelecido nos contratos de serviços de transporte rodoviário, ferroviário e hidroviário um nível tolerado de diferença de peso em tais operações, ou seja, os respectivos transportadores são contratualmente obrigados a indenizar as perdas que eventualmente ocorram acima do nível da quebra técnica, o que no ano de 2015, segundo o autor, numa frequência de viagens rodoviárias em que as perdas apresentam-se superiores às quebras técnicas contratuais entre 1% e 24%, ocorreu em 57,1% dos casos (Figura 13). Por outro lado, caso a diferença de peso seja inferior ao nível de quebra-técnica, não ocorre penalidade ou ressarcimento às transportadoras, sejam elas rodoviárias, ferroviárias ou hidroviárias.

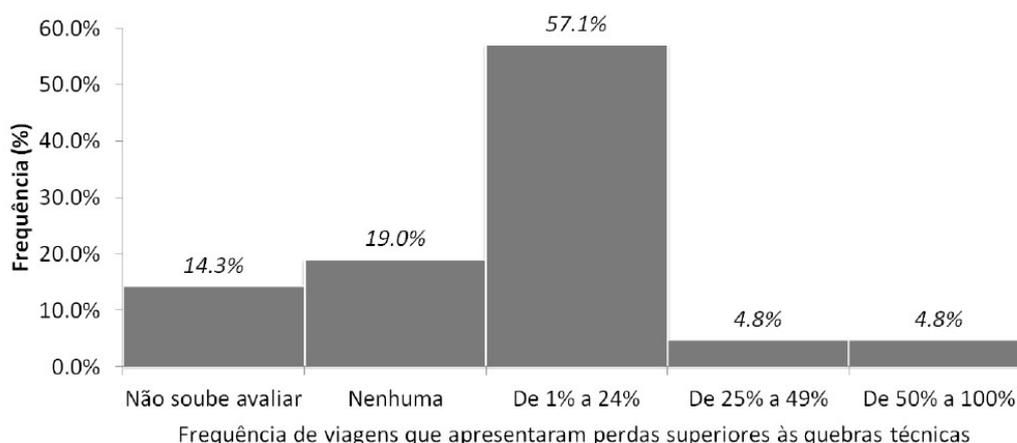


Figura 13: Frequência de viagens rodoviárias que apresentam perdas superiores às quebras técnicas contratuais em 2015.

Fonte: Péra (2017).

Na Tabela 7 apresentam-se os indicadores de quebra técnica adotados nos contratos de transporte rodoviário, ferroviário e hidroviário de grãos.

Tabela 7 – Indicadores de níveis de quebra-técnica adotados nos contratos de transporte rodoviário, ferroviário e hidroviário de grãos (% de entrada de carga).

Modalidade	Nível de quebra técnica (%)
Transporte rodoviário	0,250%
Transporte ferroviário	0,250%
Transporte hidroviário	0,250%

Fonte: adaptado de Péra (2017)

Indicadores de perdas nos transportes rodoviário e ferroviário foram levantados por Péra (2017), que por motivos de sigilo contratual não pode obter dados para o transporte hidroviário. No modal rodoviário o autor buscou captar o

efeito da qualidade das vias, classificando-as como de “boa qualidade” e “não boa qualidade” mas não retratou operações de transporte entre fazendas e armazéns. Kussano (2012) por sua vez, aplicou o índice de quebra técnica de 0,25% em seus estudos para o modal hidroviário. Na Tabela 8 apresentam-se indicadores de perdas para os modais rodoviários e ferroviários, e, adotando o critério de quebra técnica para o hidroviário, compara-os com o nível de quebra obtido experimentalmente.

Tabela 8 – Indicadores de perdas no transporte rodoviário e ferroviário de grãos, critério da “quebra técnica” no modal no hidroviário. Comparação com o nível de quebra obtido experimentalmente em unidade piloto (com menor distância).

Modalidade	Nível de quebra (%)
Transporte rodoviário – geral (independente da classificação das vias) ¹	0,204%
Transporte rodoviário – Vias de “boa qualidade” ¹	0,132%
Transporte rodoviário – Vias de “não boa qualidade” ¹	0,267%
Transporte ferroviário ¹	0,170%
Transporte hidroviário (critério “quebra-técnica” ²)	0,250%
Transporte por granoduto (ensaio friabilidade, experimental em Unidade Piloto) ³	0,021%

Fonte: ¹adaptado de Péra (2017), ²Kussano (2012), ³ensaio experimental em Unidade Piloto

A soja é um produto com grande variação de preço no mercado, sua produção, transporte e armazenamento depende sobremaneira de fatores climáticos. Apesar do baixo custo de produção e alta produtividade por hectare alcançadas no Brasil, a logística também precisa ser eficiente (KUSSANO, 2012). O transporte é apenas uma parte das atividades logísticas desta cadeia, também compostas por operações de transbordo e armazenagem, entre outros. Desta forma, quanto maior o número de manuseios e transbordos, maior é a taxa de perda. Neste sentido, Péra (2017) aponta os níveis de perdas em diferentes atividades logísticas de grãos (soja e milho) no Brasil identificados pela literatura (Tabelas 9, 10 e 11).

Tabela 9: Indicadores de perdas nas diversas atividades logísticas de grãos no Brasil, consideradas para modelagem dos índices e da cadeia de suprimentos.

Atividade logística	Indicador de perda (%)
Transporte rodoviário de transferência (fazenda-armazém externo) ¹	0,500%
Transporte rodoviário (portos, terminais multimodais, centros consumidores) ¹ - Vias de “boa qualidade”	0,132%
Transporte rodoviário (portos, terminais multimodais, centros consumid.) ¹ - Vias de “não boa qualidade”	0,267%
Transporte ferroviário ¹	0,170%
Transporte hidroviário ¹	0,170%
Transporte granoduto pneumático (ensaio laboratorial em Unidade Piloto) ²	0,021%
Armazenagem (nível fazenda ou externa) ¹	0,900%
Terminais portuários, ferroviários e hidroviários (transbordo e armazenagem) ¹	0,250%

Fonte: adaptado de ¹Péra (2017); ²autor: maior das médias de porcentagens de quebra obtida em laboratório.

Quadro 2 – Níveis de perdas em diferentes atividades logísticas de grãos (soja e milho) no Brasil identificados pela literatura.

Atividades logísticas	Níveis de perdas identificados
Transporte rodoviário da fazenda ao armazém (curta distância)	0,50% (Associação dos Produtores de Soja – APROSOJA, 2015) 0,50% (Nascimento et al., 2016) 0,50% (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, 1997)
Transporte rodoviário de longa distância (armazém até porto ou centros consumidores)	0,25% (APROSOJA, 2015) 0,10% (SEMPREBOM, 2009)
Transporte ferroviário	Não identificado em revisão de literatura
Transporte hidroviário	Não identificado em revisão de literatura
Armazenagem	2,00% para armazenagem a granel em silos, em graneleiros e em sacarias (SANTOS et al., 1994 apud EMBRAPA, 1997) 2,03% para armazenagem a granel considerando um período de cento e oitenta dias do total armazenado (CAMPOS, 2001)
Terminais Ferroviários, Hidroviários e Portuários	Não identificado em revisão de literatura

Fonte: Péra (2017)

Tabela 10 – Distribuição das perdas na agrologística da soja no Brasil nas diversas atividades.

Produto	Atividade logística	Perdas (t)	Perdas em relação ao total (%)	Perdas em relação à produção (%)
Soja	Armazenagem (externa)	345.448,03	32,08%	0,35%
	Armazenagem (fazenda)	77.879,65	7,23%	0,08%
	Terminal Ferroviário	44.174,94	4,10%	0,05%
	Terminal Hidroviário	10.924,97	1,01%	0,01%
	Terminal Portuário	141.437,37	13,14%	0,14%
	Transporte Ferroviário	30.030,47	2,79%	0,03%
	Transporte Hidroviário	7.430,29	0,69%	0,01%
	Transporte Rodo-Ferroviário	39.179,20	3,64%	0,04%
	Transporte Rodo-Hidroviário	11.699,10	1,09%	0,01%
	Transporte Rodoviário Direto	175.677,90	16,32%	0,18%
	Transporte Rodoviário Fazenda-Armazém	192.879,97	17,91%	0,20%
	Total	1.076.761,90	100,00%	1,102%

Fonte: adaptado de Péra (2017)

Segundo Kussano (2012), o transporte é apenas uma parte do custo logístico, também composto por outras variáveis (Figura 14).

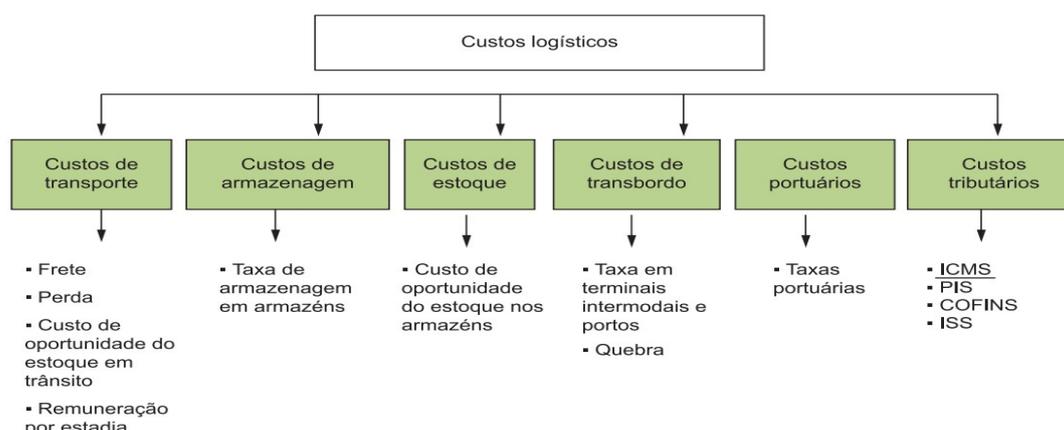


Figura 14: Modelo de custos logísticos proposto.

Fonte: Kussano (2012)

Kussano (2012) demonstra outras variáveis de custos de diferentes atividades logísticas de grãos de soja por tonelada/fluxo (Tabela 12) entre o município de Primavera do Leste/MT e o porto de Santos/SP, distantes cerca de 1.700 quilômetros.

Tabela 11 – Custo logístico total da soja por tonelada/fluxo.

Origem	Fluxo 1			Total	Fluxo 2		Fluxo 3	
	Primavera do L. (MT)	São Simão (GO)	Pederneiras (SP)		Primavera do L. (MT)	Alto Araguaia (MT)	Total	Primavera do L. (MT)
Destino	São Simão (GO)	Pederneiras (SP)	Santos (SP)	-	Alto Araguaia (MT)	Santos (SP)	-	Santos (SP)
Distância (km)	724	650	560	1934	334	1357	1691	1685
Tempo total (dias) transporte + transbordos	0,5	7	1,5	9 dias	0,3	4,7	5 dias	3 dias
Modal	Rodoviário	Hidroviário	Ferrovário	-	Rodoviário	Ferrovário	-	Rodoviário
Custo de transporte total (R\$)	90,73	36,63	56,63	183,98	49,85	81,63	148,11	183,70
Frete (R\$)	87,75	35,00	55,00	177,75	47,62	95,00	142,62	180,00
Quebra no transporte (R\$)	1,63	1,63	1,63	4,88	1,63	1,63	3,25	1,63
Remuneração por estadia (R\$)	0	0	0	0	1,50	0	1,50	0
Custo do estoque em trânsito (R\$)		1,35		1,35	0,73		0,6	0,44
R\$/km	0,1212	0,0538	0,0982	0,0919	0,1425	0,0700	0,0843	0,1068
Custo de transbordo total (R\$)	6,30	1,30	1,30	8,90	2,80	1,30	4,10	1,30
Taxa de transbordo (R\$)	5,00	**	*	5,00	1,50	*	1,50	*
Quebra no transbordo (R\$)	1,30	1,30	1,30	3,90	1,30	1,30	2,60	1,30
Custo tributário ICMS (R\$)	10,53	4,20	6,60	21,33	0,00	11,40	11,40	21,60
Custo Portuário (R\$)	-	-	20,00	20,00	-	20,00	20,00	20,00
Custo logístico total (R\$)		234,22				183,61		226,60

*: Incluso nos custos portuários. **: Incluso no frete ferroviário.

Fonte: Kussano, 2012

Estudos preliminares de transporte de soja via um transportador horizontal, denominado granoduto, com 2000 km de extensão e capacidade de transportar 1.500 t/h, operando 24 horas e a uma velocidade de 4 m/s, estimam um custo de frete por tonelada de R\$ 7,02/t (MAPA, 2017), considerando apenas o consumo de energia elétrica de 510 kW (683 hp). Segundo o mesmo estudo, para o mesmo trecho o custo do frete rodoviário seria de R\$ 235,00 por tonelada, ou seja, 3% do que custa o modal rodoviário (Tabela 13). Acrescenta ainda que se fontes de energias alternativas fossem utilizadas, como eólica e solar, os custos poderiam ser menores, assim como os impactos ambientais.

Tabela 12 – Estimativa de custo do transporte por granoduto de 2000 km.

Especificações	valores
Custo do transporte por granoduto	
Comprimento do granoduto (km)	2.000,00
Velocidade (m/s)	4,00
Massa específica de soja (kg/m ³)	500,00
Vazão (t/hora)	1.500,00
Vazão em toneladas em 24 horas (t/dia)	36.000,00
Vazão em toneladas por 30 dias (t/mês)	1.080.000,00
Potência motriz estimada (kw)	14.760,52
Potência (cv)	19.794,18
Custo da tarifa de energia elétrica em (R\$/kWh)	0,72
Custo de energia elétrica por hora, para um granoduto de 2000 km (R\$/h)	10.533,85
Custo de energia elétrica por 30 dias, para um granoduto de 2000 km (R\$/h)	7.584.368,47
Custo de energia elétrica por tonelada transportada (kw.h/t)	7,02
Preço do frete por tonelada, fonte APROSOJA (R\$/t)	235,00
Comparativo de preço entre frete rodoviário e granoduto (múltiplo)	33,46
Redução de valor entre frete rodoviário e granoduto por tonelada (em %)	97,00
Custo do transporte rodoviário	
Capacidade de carga de uma carreta graneleira Randon em toneladas (t)	38,20
Preço do frete por carreta (R\$)	8.977,00
Velocidade operacional (km/h)	55
Consumo de diesel (km/l)	2,9
Jornada de trabalho (h)	8
Rendimento da viagem (km)	650
Percurso considerado (km)	2.000
Tempo para rodar 2.000 km em dias (dias)	3
Número de viagens por mês (viagens/mês)	10
Custo de combustível por litro (R\$/l)	3,067
Consumo de combustível em litro (litros)	5.800
Despesa com combustível por carreta (R\$)	17.788,60
Toneladas por mês por caminhão (t/mês)	382
Toneladas por hora (t/h)	0,53
Número de carretas para entregar 1500t/h em 30 dias (nº carretas)	2.830
Custo do frete para 2900 carretas para 1500t (R\$)	247.714.386,79
Comparativo de preço do granoduto com custo de 2900 carretas (múltiplo)	32,66

Fonte: adaptado de MAPA, 2017.

Quanto à questão ambiental da pegada do carbono, Péra (2017) relata que as perdas de grãos de soja geram uma emissão adicional no sistema logístico, rodoviário e hidroviário na ordem de 21.533 mil toneladas (equivalente a 19.979 kg de CO₂ por tonelada perdida de soja), implicando uma emissão adicional na ordem de 1,53% em relação às emissões totais do produto. A mitigação das perdas físicas contribuiria para a redução de dióxido de carbono no sistema.

Ao comparar-se a pegada do carbono decorrente das perdas nas cadeias de suprimentos da soja no Brasil considerando os indicadores de fatores de emissões para atividades logísticas de transporte. Os ensaios experimentais em Unidade Piloto indicam uma baixa friabilidade dos grãos de soja, na casa de 0,0214%, além disso o granoduto minimizaria perdas de grãos de soja para o ambiente uma vez que funciona em sistema fechado (MAPA, 2017). Na Tabela 13 apresentam-se as emissões de CO₂ adicionais decorrentes das perdas e emissões totais na cadeia de suprimento brasileira de grãos para diferentes atividades logísticas, em toneladas de CO₂.

Tabela 13 – Emissões de CO₂ adicionais decorrentes das perdas e emissões totais na cadeia de suprimento brasileira de grãos para diferentes atividades logísticas, em toneladas de CO₂.

Produto	Atividades logísticas agregadas	Emissões de CO ₂ adicionais decorrentes das perdas	Emissões totais de CO ₂ na cadeia de suprimentos de grãos	Participação das perdas nas emissões totais (% das emissões totais)
Soja	Multimodal: Ferroviário	6.271,01	367.914,72	1,70%
	Multimodal: Hidroviário	2073,79	58.267,50	3,56%
	Rodoviário	7.680,74	814.631,91	0,94%
	Transporte Rodoviário Fazenda-Armazém	5.507,47	167.648,03	3,29%
	<i>Total</i>	<i>21.533,01</i>	<i>1.408.462,17</i>	<i>1,53%</i>

Fonte: adaptada de Péra (2017).

O granoduto, como inovação no meio ambiente, eliminaria a emissão de dióxido de carbono na atmosfera oriundo da queima de combustíveis (MAPA, 2017). Na Tabela 14 apresenta-se a emissão nas diversas atividades de transporte.

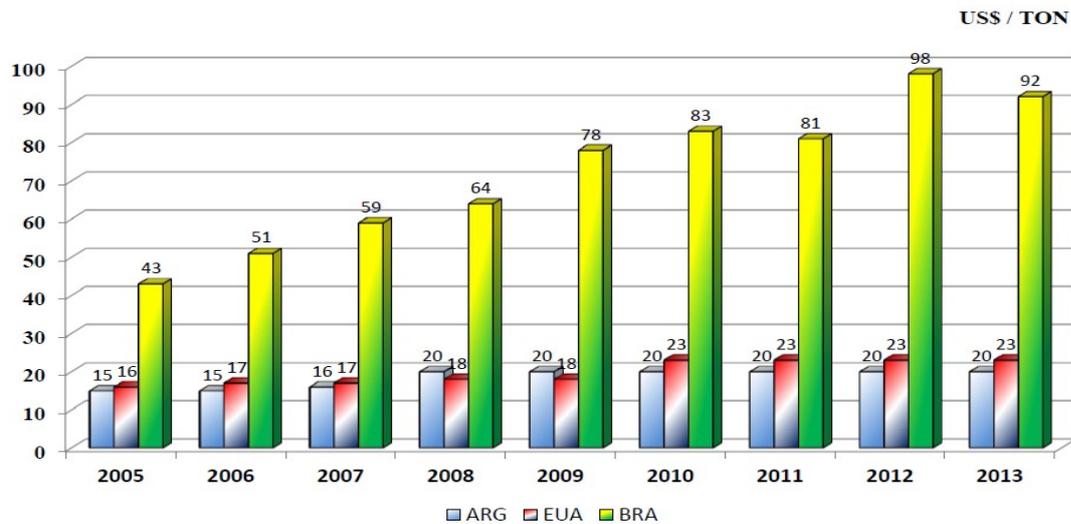
Tabela 14 – Coeficientes dos fatores de emissão (g CO₂/t.km) nas atividades de transporte consideradas para a modelagem da cadeia de suprimentos.

Atividades logísticas de transporte	Coeficientes dos fatores de emissão (g CO ₂ /t.km)
Transporte rodoviário (vias boas) ¹	28,0
Transporte rodoviário (vias não boas) ¹	29,0
Transporte rodoviário (fazenda/armazém) ¹	29,0
Transporte ferroviário ¹	16,6
Transporte hidroviário ¹	11,9
Transporte por granoduto ²	00,0

Fonte: organizada pelo autor a partir das seguintes fontes: ¹Péra (2017); ²MAPA(2017)

Assim como em outras áreas no Brasil, o setor de transporte no país ainda não possui a infraestrutura adequada e organizada o suficiente para escoar a produção de soja. Desta forma, um dos custos que mais impacta na produção é o custo de transporte (EMBRAPA, 2017), especialmente entre a lavoura e os portos de

embarque para exportação, principalmente se comparado com outros grandes exportadores mundiais de soja, como Argentina e Estados Unidos (Figura 15).



*Estimativa realizada com base no valores de frete praticados em 2010, e atual valor do dólar: US\$ 1.62 (maio/2011)

Figura 15: Evolução Comparativa de custos transporte lavoura ao porto de embarque.

Fonte: <http://www.anec.com.br/pt-br/>

6 CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram que a singularidade que forneceu a menor friabilidade (menor quebra) foi o tê com saída de lado com máximo prolongamento, com quebra inferior a 1% e que obteve menor perda de carga para a maior velocidade de ar (4,8 m/s) e maior vazão de soja (564 kg/h), entre os pontos 1 a 10, em relação às demais singularidades.

Do ponto de vista da agrologística, vislumbra-se o granoduto (transportador pneumático em fase diluída) como um modal potencialmente interessante, a ser melhor estudado, e uma alternativa para o deslocamento de grãos de soja para exportação, atividade que impacta sensivelmente a vida de cidades, especialmente as portuárias, que geralmente são litorâneas e costeiras. Os resultados obtidos em laboratório (experimentalmente, em unidade piloto), demonstraram uma quantidade de perdas por quebra (friabilidade) relativamente baixa, em torno de 0,0214% e sem perdas para o ambiente (sistema fechado), enquanto nos modais rodoviário, ferroviário e hidroviário já se trabalha com a “quebra técnica” na casa dos 0,25% de perda. A emissão de CO₂ na atmosfera oriundo da queima de combustíveis tenderia a ser zerada. Os estudos preliminares teoricamente prevêem o granoduto operando 24 horas, transportando 1.500 t/h e por um custo de frete por tonelada a cerca de 3% do que custa o atual modal rodoviário. Com uma quantidade de perdas relativamente pequena, baixo custo de aquisição e operação, aliado a uma baixa emissão de poluentes e reduzida probabilidade de acidentes de trabalho, conclui-se que o transporte pneumático trata-se de um dos meios de deslocamento estacionário mais sustentável para a movimentação da soja.

REFERÊNCIAS

ALVES F. C. O. F.; SILVA F. A. et al. **Estudo da distribuição de polietileno e perda de carga em singularidades, curvas e tês, em sistema pneumático horizontal.** Santos (SP): UNISANTA, 2006. Trabalho de conclusão de curso.

BAND, M.; MEACHAM, T. BHUNNOO, R. BENTON, T.G. **Food waste with in global food systems. A Global Food Security Report.** Disponível em: <<http://www.foodsecurity.ac.uk/assets/pdfs/food-waste-report.pdf>>. Acesso em 25 de dezembro de 2017.

BARAT, J. **Logística e transporte no processo de globalização: oportunidades para o Brasil.** São Paulo, Ed: UNESP, 2007.

BBC BRASIL. **Como funciona a primeira estrada elétrica do mundo, inaugurada na Suécia.** (2016). Disponível em: <<http://www.bbc.com/portuguese/geral-36660436>>. Acesso em 22 de dezembro de 2017.

BOWERSOX, Donald J., CLOSS, David J. **Logistical management: The integrated supply chain process.** (1986) McGraw-Hill International Editions, Singapore.

CASTRO Y. R. **Determinação experimental da equação do coeficiente da carga cinética para tê com saída de lado e curva no transporte pneumático de polipropileno em fase diluída.** Yago Reitz de Castro — 2015. 74 p.

CAIXETA-FILHO, J.V. **A Logística do Escoamento da Safra Brasileira.** CEPEA/ESALQ-USP. Disponível em: <www.cepea.esalq.usp.br/especialagro/EspecialAgroCepea_7.doc>. Acessado em 22 de dezembro de 2017.

CODESP. **Companhia Docas do Estado de São Paulo.** Disponível em <<http://www.portodesantos.com.br/estatisticas.php>>. Acesso em 20 de Setembro de 2017.

COMISSÃO PERMANENTE DE REVISÃO DA FARMACOPÉIA BRASILEIRA. **Farmacopéia Brasileira.** parte 1. 4 ed. São Paulo: Editora Atheneu, 1988.

COSTABILE, L. T. **Estudo sobre as perdas de grãos na colheita e pós colheita.** Lucio Tadeu Costabile - 2017. 155 p.

DYNAMIC AIR LTDA. **Princípios Fundamentais do Transporte Pneumático.** Nazaré Paulista, SP, Brasil, 2005.

EMBRAPA. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.** Disponível em <<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>>. Acesso em 26 de dezembro de 2017.

ESALQ-LOG. **Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial (2015).** Disponível em <<http://esalqlog.esalq.usp.br/>>.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OFF THE UNITED NATIONS (FAO). **Toolkit: Reducing the Food Wastage Footprint.** Roma, Itália. 2013.

GOMES, L. M. **Contribuição à análise do transporte pneumático em fase diluída.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais, 2011.

GOMIDE, R. **Operações Unitárias.** São Paulo, Edição do Autor, 1983. 2.930 p.

GONÇALVES, J. M. F. **Transporte de açúcar e de containers para o porto de Santos visando a redução das emissões de CO₂** (2013). Disponível em <http://www.brasilengenharia.com/portal/images/stories/revistas/edicao614/614_transporte.pdf>. Acessado em 22 de dezembro de 2017.

ILOS. **Panorama Custos Logísticos no Brasil 2010.** Panorama Logística Verde – Iniciativas de sustentabilidade ambiental das empresas no Brasil. Rio de Janeiro, 2011.

KEEDI, S. **Logística de Transporte Internacional: veículo prático de competitividade.** São Paulo: Aduaneiras, 2001 p.25 (a)

KUSSANO, M.R., BATALHA, M.O. **Custos logísticos agroindustriais: avaliação do escoamento da soja em grão do Mato Grosso para o mercado externo.** Gest. Prod., São Carlos, v. 19, n. 3, p. 619-632, 2012.

LOGITEC SISTEMAS. **Sistema de transportador pneumático.** (2014). Disponível em:<<http://www.logitecsistemas.com.br/noticia-8-sistema-de-transportador-pneumatico>>. Acesso em 20 de Setembro de 2017.

LOPES, C. S.; PÁDUA, T. F.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T. **Influence of the Entrance Configuration on the Performance of a Non-Mechanical Solid Feeding Device for a Pneumatic Dryer**. Dry. Technol. 29, 1186- 1194, 2011.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeto Grano Duto 50**. (2017). Disponível em: < <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-tematicas/infraestrutura-e-logistica/anos-anteriores/projeto-grano-duto-50.pdf/view>>. Acesso em 20 de Setembro de 2017.

MARCUS R. D., LEUNG L. S., KLINZING G. E., RIZK F. **Pneumatic conveying of solids**, London: Chapman and Hall, 1990, 455p.

MARINESCU, I., ROWE, B., DIMITROV, B., INASAKI, I., **Tribology of Abrasive Machining Processes**, vol. 126, no. 4. 2004

MILLS D. **Pneumatic Conveying Design Guide**, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2004.

MILLS, D., JONES, M.G., AGARWAL, V.K. **Handbook of Pneumatic Conveying Engineering**, Marcel Dekker, INC, New York, 2004.

MORAES, M.S. **Convecção forçada de partículas poliméricas em fase diluída: Curvas de pressão e distribuição de partículas**. UNICAMP (Tese de doutorado), 2012.

MORCELI, P. **Estudo de Pré-viabilidade para Implantar um Sistema de Transporte de Grãos, Farelos e Fertilizantes para o Agronegócio Brasileiro**. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária. Universidade de Brasília, 2011. 166p. Dissertação de Mestrado.

NONNENMACHER, H. **Curso de transporte pneumático**. Santa Maria: FATEC, 1994. 71p.

PÁDUA, T.F.; LOPES, C.S.; FREIRE, J.T. **Estudo experimental sobre a alimentação de sólidos em dispositivos Venturi de orientação vertical para transportadores pneumáticos de material granular**. ENEMP, anais, Vassouras, 2011.

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.

PÉRA, T. G. **Modelagem das perdas na agrológica de grãos no Brasil: uma aplicação de programação matemática**. 2017. 180p. Dissertação(Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

RATNAYAKE, C. **A comprehensive scalingup technique for pneumatic transport systems**. University of Science and Technology, Ph.D. Thesis. The Norwegian (2005)

RHODES, M., **Transporte Pneumático de Partículas**, Monash University, Melbourne, Australia, 2003.

RIBEIRO, C. M. F. **Efeito da porosidade nas propriedades físicas, mecânicas e tribológicas de mós abrasivas**. 2015. Universidade do Minho, Braga, Portugal, Dissertação de Mestrado.

ROCHA, A. C. C., **Controle de qualidade físico-químico de comprimidos de cloridrato de propranolol dispensados pelo programa Farmácia Popular do Brasil**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro, Brasil, Perspectivas da Ciência e Tecnologia, V.7, n.1, 2015.

RODRIGUES, P.R.A.. **Introdução aos sistemas de transporte no Brasil e à logística internacional**. São Paulo, Edições Aduaneiras, 2008.

SANTOS, S. M. **Projeto e montagem de unidade piloto de transporte pneumático em fase diluída para estudo da distribuição de partículas granulares**. UNICAMP (Tese de Doutorado), 2009

SILVA, D.R. **Transporte pneumático. Tecnologia, projetos e aplicações na indústria e nos serviços**. São Paulo: Artliber, 2005. 172p.

STOESS, H. A. JR., P.E. **Pneumatic Conveying**. New York: Wiley Interscience, 1970

TAVARES, V.A.. **Transporte Pneumático de soja em fase diluída: Obtenção da perda de carga e distribuição de partículas na seção transversal da tubulação.** Santos, SP, 2014 . 92 p.

USDA – “World Agricultural Supply and Demand Estimates Report (WASDE) – January 2018”. <http://goo.gl/r56WEM>

VAZ A. V.; OLIVEIRA K. N. **O modal dutoviário: análise da importância e considerações sobre suas principais características.** Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes – PETRAN Universidade Federal do Ceará – UFC, 2005.

WEBER, E.A. **Excelência em beneficiamento e armazenagem de grãos.** Canoas: Salles, 2005. 586p.

ZANETTE F.H.; MONTEIRO L.B. Et al. **Influência de t^e saída se lado e curva de três gomos na perda de carga a montante e a jusante em unidade piloto de transporte pneumático.** Revista Ceciliana Jun 2(1): 34-36, 2010 ISSN 2175-7224 - © 2009/2010 - Universidade Santa Cecília.

APÊNDICE A

Friabilidade

Foram calculadas, para cada prolongamento e vazão, divididos por número de voltas, parâmetros como a massa coletada (g), massa quebrada (g), massa acumulada (g), massa total (g) e massa de grãos inteiros (g) analisados a cada volta. As Tabelas abaixo foram divididas por prolongamentos: 30 mm (Tabela 15), 60 mm (Tabela 16), 90 mm (Tabela 17), sem prolongamento (Tabela 18) e curva de 3 gomos (Tabela 19).

Tabela 15 - Teste de friabilidade com soja (prolongamento de 30 mm)

n° de voltas	m _{coletado} (g)			m _{quebrado} (g)			m _{acúmulo} (g)			m _{total} (g)			grãos inteiros (g)			porcentagem de quebra (%)		
	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃
1	7073,7	7041,2	6899,4	1,2	2,3	0,8	707,5	740,0	881,8	7780,0	7778,9	7780,4	7072,5	7038,9	6898,6	0,016964	0,032665	0,011595
2	7085,2	7018,0	6928,6	2,1	1,9	0,8	694,8	760,9	851,8	7777,9	7777,0	7779,6	7083,1	7016,1	6927,8	0,029639	0,027073	0,011546
3	7085,9	6999,3	6933,6	0,5	0,9	1,1	692,0	777,7	846,0	7777,4	7776,1	7778,5	7085,4	6998,4	6932,5	0,007056	0,012858	0,015865
4	7117,0	6999,0	6924,7	1,7	1,4	0,3	660,4	777,1	853,8	7775,7	7774,7	7778,2	7115,3	6997,6	6924,4	0,023886	0,020003	0,004332
5	7071,5	6999,5	6910,2	1,3	0,7	0,7	704,2	775,2	868,0	7774,4	7774,0	7777,5	7070,2	6998,8	6909,5	0,018384	0,010001	0,010130
6	7097,8	7005,5	6943,0	2,2	0,8	0,1	676,6	768,5	834,5	7772,2	7773,2	7777,4	7095,6	7004,7	6942,9	0,030996	0,011420	0,001440
7	7097,2	7003,1	6938,9	1,8	0,9	0,9	675,0	770,1	838,5	7770,4	7772,3	7776,5	7095,4	7002,2	6938,0	0,025362	0,012851	0,012970
8	7075,3	6999,3	6921,4	0,9	1,0	0,4	695,1	773,0	855,1	7769,5	7771,3	7776,1	7074,4	6998,3	6921,0	0,012720	0,014287	0,005779
9	7084,8	7005,3	6928,2	1,0	1,1	0,1	684,7	766,0	847,9	7768,5	7770,2	7776,0	7083,8	7004,2	6928,1	0,014115	0,015702	0,001443
10	7105,3	6998,6	6942,7	1,4	0,7	0,9	663,2	771,6	833,3	7767,1	7769,5	7775,1	7103,9	6997,9	6941,8	0,019704	0,010002	0,012963

Tabela 16 - Teste de friabilidade com soja (prolongamento de 60 mm)

n° de voltas	m _{coletado} (g)			m _{quebrado} (g)			m _{acúmulo} (g)			m _{total} (g)			grãos inteiros (g)			porcentagem de quebra (%)		
	v ₁	v ₂	v ₃	v ₁	v ₂	v ₃	v ₁	v ₂	v ₃	v ₁	v ₂	v ₃	v ₁	v ₂	v ₃	v ₁	v ₂	v ₃
1	6928,6	6765,3	6696,1	2	1,1	0,4	852,6	1015,9	1085,1	7779,2	7780,1	7780,8	6926,6	6764,2	6695,7	0,028866	0,016259	0,005974
2	6925,7	6765,1	6738,3	0,6	0,8	0,5	853,5	1015,0	1042,5	7778,6	7779,3	7780,3	6925,1	6764,3	6737,8	0,008663	0,011825	0,00742
3	6938,0	6756,1	6727,4	1,5	0,7	0,7	840,6	1023,2	1052,9	7777,1	7778,6	7779,6	6932,5	6755,4	6726,7	0,02162	0,010361	0,010405
4	6911,6	6782,0	6720,4	1,5	0,5	0,5	865,5	996,6	1059,2	7775,6	7778,1	7779,1	6910,1	6781,5	6719,9	0,021703	0,007372	0,00744
5	6906,3	6775,7	6723,3	0,5	0,2	0,8	869,3	1002,4	1055,8	7775,1	7777,9	7778,3	6905,8	6775,5	6722,5	0,00724	0,002952	0,011899
6	6890,1	6759,1	6726,5	1,2	1,5	0,4	885,0	1018,8	1051,8	7773,9	7776,4	7777,9	6888,9	6757,6	6726,1	0,017416	0,022192	0,005947
7	6915,1	6743,2	6736,7	1,7	0,9	0,1	858,8	1033,2	1041,2	7772,2	7775,5	7777,8	6913,4	6742,3	6736,6	0,024584	0,013347	0,001484
8	6902,8	6750,4	6747,9	1,5	1,5	0,9	869,4	1025,1	1029,9	7770,7	7774,0	7776,9	6901,3	6748,9	6747	0,02173	0,022221	0,013337
9	6920,6	6754,9	6724,6	1,4	0,6	0,5	850,1	1019,1	1052,3	7769,3	7773,4	7776,4	6919,2	6754,3	6724,1	0,020229	0,008882	0,007435
10	6891,3	6794,3	6733,9	1,1	1,0	0,7	878	979,1	1042,5	7768,2	7772,4	7775,7	6890,2	6793,3	6733,2	0,015962	0,014718	0,010395

Tabela 17 - Teste de friabilidade com soja (prolongamento de 90 mm)

n° de voltas	m _{coletado} (g)			m _{quebrado} (g)			m _{acúmulo} (g)			m _{total} (g)			grãos inteiros (g)			porcentagem de quebra (%)		
	v ₁	v ₂	v ₃	v ₁	v ₂	v ₃	v ₁	v ₂	v ₃	v ₁	v ₂	v ₃	v ₁	v ₂	v ₃	v ₁	v ₂	v ₃
1	6692,6	6484,8	6496,5	0,5	1,0	0,5	1088,6	1296,4	1284,7	7780,7	7780,2	7780,7	6692,1	6483,8	6496	0,007471	0,015421	0,007696
2	6687,3	6514,6	6483,0	0,5	0,5	0,8	1093,4	1265,6	1298,2	7780,2	7779,7	7779,9	6686,8	6514,1	6482,2	0,007477	0,007675	0,012340
3	6668,4	6535,4	6477,0	0,7	0,3	0,5	1111,8	1244,3	1304,2	7779,5	7779,4	7779,4	6667,7	6535,1	6476,5	0,010497	0,004590	0,007720
4	6706,7	6481,9	6477,5	1,2	0,4	0,4	1072,8	1297,5	1303,7	7778,3	7779,0	7779,0	6705,5	6481,5	6477,1	0,017893	0,006171	0,006175
5	6706,9	6500,0	6467,4	1,2	0,1	0,6	1071,4	1279	1313,8	7777,1	7778,9	7778,4	6705,7	6499,9	6466,8	0,017892	0,001538	0,009277
6	6719,0	6523,8	6466,1	1,4	0,1	0,2	1058,1	1255,1	1315,1	7775,7	7778,8	7778,2	6717,6	6523,7	6465,9	0,020836	0,001533	0,003093
7	6731,4	6533,3	6445,2	1,3	0,8	0,4	1044,3	1245,5	1336,0	7774,4	7778,0	7777,8	6730,1	6532,5	6444,8	0,019312	0,012245	0,006206
8	6753,6	6543,7	6440,1	2,0	0,4	0,4	1020,8	1234,3	1341,1	7772,4	7777,6	7777,4	6751,6	6543,3	6439,7	0,029614	0,006113	0,006211
9	6716,9	6538,1	6448,1	1,8	0,5	0,3	1055,5	1239,5	1333,1	7770,6	7777,1	7777,1	6715,1	6537,6	6447,8	0,026798	0,007647	0,004653
10	6717,8	6549,1	6452,0	1,8	0,3	0,5	1052,8	1228,0	1329,2	7768,8	7776,8	7776,6	6716,0	6548,8	6451,5	0,026794	0,004581	0,007750

Tabela 18 - Teste de friabilidade com soja (sem prolongamento)

n° de voltas	m _{coletado} (g)			m _{quebrado} (g)			m _{acúmulo} (g)			m _{total} (g)			grãos inteiros (g)			porcentagem de quebra (%)		
	v ₁	v ₂	v ₃	v ₁	v ₂	v ₃	v ₁	v ₂	v ₃	v ₁	v ₂	v ₃	v ₁	v ₂	v ₃	v ₁	v ₂	v ₃
1	7236,4	7110,5	7120,7	1,0	0,8	3,2	544,8	670,7	660,5	7780,2	7780,4	7778,0	7235,4	7109,7	7117,5	0,013819	0,011251	0,044939
2	7234,7	7125,0	7096,6	1,4	1,0	0,8	545,5	655,4	681,4	7778,8	7779,4	7777,2	7233,3	7124,0	7095,8	0,019351	0,014035	0,011273
3	7208,5	7124,6	7064,4	2,2	1,4	0,4	570,3	654,8	712,8	7776,6	7778,0	7776,8	7206,3	7123,2	7064,0	0,030520	0,01965	0,005662
4	7217,0	7135,3	7083,5	1,0	1,3	0,7	559,6	642,7	693,3	7775,6	7776,7	7776,1	7216,0	7134,0	7082,8	0,013856	0,018219	0,009882
5	7221,2	7123,6	7005,5	1,4	1,0	0,6	554,4	653,1	770,6	7774,2	7775,7	7775,5	7219,8	7122,6	7004,9	0,019387	0,014038	0,008565
6	7185,7	7127,6	7020	1,1	0,9	0,4	588,5	648,1	755,5	7773,1	7774,8	7775,1	7184,6	7126,7	7019,6	0,015308	0,012627	0,005698
7	7229,0	7135,4	7047,6	0,9	1,5	0,9	544,1	639,4	727,5	7772,2	7773,3	7774,2	7228,1	7133,9	7046,7	0,012450	0,021022	0,01277
8	7217,2	7123,0	7015,1	2,0	2,0	1,0	555,0	650,3	759,1	7770,2	7771,3	7773,2	7215,2	7121,0	7014,1	0,027712	0,028078	0,014255
9	7200,3	7121,0	7012,2	1,7	2,1	0,9	569,9	650,3	761	7768,5	7769,2	7772,3	7198,6	7118,9	7011,3	0,023610	0,029490	0,012835
10	7215,1	7121,3	6724,5	1,5	1,1	0,8	553,4	647,9	1047,8	7767,0	7768,1	7771,5	7213,6	7120,2	6723,7	0,020790	0,015447	0,011897

Tabela 19 - Teste de friabilidade com soja (curva de 3 gomos)

n° de voltas	m _{coletado} (g)			m _{quebrado} (g)			m _{acúmulo} (g)			m _{total} (g)			grãos inteiros (g)			porcentagem de quebra (%)		
	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃
1	7779,7	7778,5	7778,9	2,6	1,0	1,8	1,5	2,7	2,3	7778,6	7780,2	7779,4	7777,1	7777,5	7771,1	0,03342	0,012856	0,02314
2	7777,08	7777,2	7774,8	2,3	0,9	1,0	1,52	3,0	4,6	7776,3	7779,3	7778,4	7774,8	7776,3	7773,8	0,029574	0,011572	0,012862
3	7775,2	7773,1	7771,7	0,9	1,1	0,6	1,1	6,2	6,7	7775,4	7778,2	7777,8	7774,3	7772,0	7771,1	0,011575	0,014151	0,00772
4	7771,9	7768,2	7769,8	0,8	1,4	0,6	3,5	10	8,0	7774,6	7776,8	7777,2	7771,1	7766,8	7769,2	0,010293	0,018022	0,007722
5	7768	7764,3	7767,3	1,5	2,1	1,0	6,6	12,5	9,9	7773,1	7774,7	7776,2	7766,5	7762,2	7766,3	0,019310	0,027047	0,012874
6	7763,5	7759,7	7764,1	1,0	0,9	0,6	9,6	15	12,1	7772,1	7773,8	7775,6	7762,5	7758,8	7763,5	0,012881	0,011598	0,007728
7	7760,7	7755,7	7762,7	1,9	1,6	1,5	11,4	18,1	12,9	7770,2	7772,2	7774,1	7758,8	7754,1	7761,2	0,024482	0,020630	0,019323
8	7755,8	7751,7	7760,9	2,1	0,9	1,6	14,4	20,5	13,2	7768,1	7771,3	7772,5	7753,7	7750,8	7759,3	0,027077	0,011610	0,020616
9	7751,9	7748,1	7757,4	1,6	2,0	1,3	16,2	23,2	15,1	7766,5	7769,3	7771,2	7750,3	7746,1	7756,1	0,020640	0,025813	0,016758
10	7749,2	7744,2	7755,1	1,9	1,9	1,3	17,3	25,1	16,1	7764,6	7767,4	7769,9	7747,3	7742,3	7753,8	0,024519	0,024534	0,016763

Tabela 20 - média das porcentagens de quebra

nº de voltas	30 mm			60 mm			90 mm			sem prolongamento			curva de 3 gomos		
	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃
1	0,0170	0,0327	0,0116	0,0289	0,0163	0,0060	0,0075	0,0154	0,0077	0,0138	0,0113	0,0449	0,0334	0,0129	0,0231
2	0,0296	0,0271	0,0115	0,0087	0,0118	0,0074	0,0075	0,0077	0,0123	0,0194	0,0140	0,0113	0,0296	0,0116	0,0129
3	0,0071	0,0129	0,0159	0,0216	0,0104	0,0104	0,0105	0,0046	0,0077	0,0305	0,0197	0,0057	0,0116	0,0142	0,0077
4	0,0239	0,0200	0,0043	0,0217	0,0074	0,0074	0,0179	0,0062	0,0062	0,0139	0,0182	0,0099	0,0103	0,0180	0,0077
5	0,0184	0,0100	0,0101	0,0072	0,0030	0,0119	0,0179	0,0015	0,0093	0,0194	0,0140	0,0086	0,0193	0,0270	0,0129
6	0,0310	0,0114	0,0014	0,0174	0,0222	0,0059	0,0208	0,0015	0,0031	0,0153	0,0126	0,0057	0,0129	0,0116	0,0077
7	0,0254	0,0129	0,0130	0,0246	0,0133	0,0015	0,0193	0,0122	0,0062	0,0124	0,0210	0,0128	0,0245	0,0206	0,0193
8	0,0127	0,0143	0,0058	0,0217	0,0222	0,0133	0,0296	0,0061	0,0062	0,0277	0,0281	0,0143	0,0271	0,0116	0,0206
9	0,0141	0,0157	0,0014	0,0202	0,0089	0,0074	0,0268	0,0076	0,0047	0,0236	0,0295	0,0128	0,0206	0,0258	0,0168
10	0,0197	0,0100	0,0130	0,0160	0,0147	0,0104	0,0268	0,0046	0,0077	0,0208	0,0154	0,0119	0,0245	0,0245	0,0168
Média	0,0199	0,0167	0,0088	0,0188	0,0130	0,0082	0,0185	0,0068	0,0071	0,0197	0,0184	0,0138	0,0214	0,0178	0,0146

Acúmulo de grãos

Tabela 21 - Acúmulo de grãos de soja (g)

nº de voltas	30 mm			60 mm			90 mm			sem prolongamento			curva de 3 gomos		
	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃
1	707,5	740	881,8	852,6	1015,9	1085,1	1088,6	1296,4	1284,7	544,8	670,7	660,5	1,5	2,7	2,3
2	694,8	760,9	851,8	853,5	1015,0	1042,5	1093,4	1265,6	1298,2	545,5	655,4	681,4	1,52	3,0	4,6
3	692,0	777,7	846,0	840,6	1023,2	1052,9	1111,8	1244,3	1304,2	570,3	654,8	712,8	1,1	6,2	6,7
4	660,4	777,1	853,8	865,5	996,6	1059,2	1072,8	1297,5	1303,7	559,6	642,7	693,3	3,5	10,0	8,0
5	704,2	775,2	868,0	869,3	1002,4	1055,8	1071,4	1279,0	1313,8	554,4	653,1	770,6	6,6	12,5	9,9
6	676,6	768,5	834,5	885,0	1018,8	1051,8	1058,1	1255,1	1315,1	588,5	648,1	755,5	9,6	15,0	12,1
7	675,0	770,1	838,5	858,8	1033,2	1041,2	1044,3	1245,5	1336,0	544,1	639,4	727,5	11,4	18,1	12,9
8	695,1	773,0	855,1	869,4	1025,1	1029,9	1020,8	1234,3	1341,1	555,0	650,3	759,1	14,4	20,5	13,2
9	684,7	766,0	847,9	850,1	1019,1	1052,3	1055,5	1239,5	1333,1	569,9	650,3	761,0	16,2	23,2	15,1
10	663,2	771,6	833,3	878,0	979,1	1042,5	1052,8	1228,0	1329,2	553,4	647,9	1047,8	17,3	25,1	16,1

Tabela 22 - Média das perdas de carga nos pontos de 1 a 10, de acordo com os prolongamentos e vazões (kg/h).

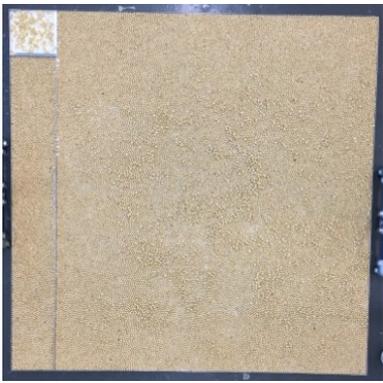
		Perda de carga									
		P1 (m)	P2 (m)	P3 (m)	P4 (m)	P5 (m)	P6 (m)	P7 (m)	P8 (m)	P9 (m)	P10 (m)
sem prolongamento	Somente ar	0,08815	0,08195	0,0786	0,0753	0,0742	0,0741	0,055	0,056	0,0553	0,0552
	Vazão 95	0,0811	0,0759	0,0698	0,0688	0,0694	0,06745	0,04575	0,0473	0,0482	0,0478
	Vazão 368	0,0768	0,0698	0,0644	0,063	0,0618	0,0605	0,0393	0,044	0,0435	0,0421
	Vazão 564	0,0820	0,0758	0,0709	0,0690	0,0684	0,06735	0,0466	0,0491	0,049	0,0483
30 mm	Somente ar	0,0825	0,0747	0,0706	0,0703	0,0694	0,068	0,0489	0,0526	0,05245	0,0528
	Vazão 95	0,0749	0,069	0,0648	0,0629	0,063	0,0611	0,0413	0,0469	0,0447	0,0446
	Vazão 368	0,078	0,0715	0,0655	0,0631	0,0626	0,0616	0,0392	0,0456	0,04375	0,0417
	Vazão 564	0,0807	0,0753	0,067	0,06545	0,0656	0,0623	0,04	0,0439	0,0429	0,0411
60 mm	Somente ar	0,0759	0,0703	0,066	0,0639	0,0656	0,0627	0,047	0,0501	0,0497	0,0483
	Vazão 95	0,0747	0,0699	0,0643	0,0621	0,0623	0,0593	0,0385	0,0463	0,0436	0,0434
	Vazão 368	0,0747	0,0682	0,0625	0,0604	0,0624	0,0592	0,038	0,0431	0,04215	0,0406
	Vazão 564	0,0775	0,0728	0,0646	0,0637	0,0629	0,061	0,0389	0,0435	0,0434	0,0413
90 mm	Somente ar	0,0755	0,0703	0,0652	0,0643	0,0642	0,0618	0,0483	0,0503	0,0498	0,0486
	Vazão 95	0,0732	0,0676	0,0632	0,061	0,0611	0,05925	0,0424	0,0441	0,0443	0,0453
	Vazão 368	0,0772	0,07	0,0643	0,0626	0,0625	0,0604	0,0395	0,044	0,0423	0,0421
	Vazão 564	0,0791	0,0732	0,0656	0,0636	0,0644	0,0621	0,0382	0,0441	0,0421	0,0397
Curva de 3 gomos	Somente ar	0,0761	0,0699	0,0651	0,0644	0,0643	0,0626	0,0546	0,0546	0,0543	0,0548
	Vazão 95	0,0701	0,0641	0,059	0,0574	0,0558	0,0551	0,0482	0,0472	0,0479	0,0457
	Vazão 368	0,0732	0,0667	0,0607	0,0582	0,0587	0,0558	0,0481	0,0468	0,0451	0,044
	Vazão 564	0,0815	0,0745	0,066	0,0636	0,0636	0,0618	0,0525	0,04995	0,05005	0,04845

A partir dos Quadros de 3 até 7, pode-se observar que a quantidade de quebras na 10° volta é maior que na 1° volta.

Quadro 3 – Proporção de soja quebrada para a singularidade de 30 mm

Singularidade	Vazão	Fotografia da 1° volta	Fotografia da 10° volta
30 mm	Vazão de 95		
	Vazão de 368		
	Vazão de 564		

Quadro 4 – Proporção de soja quebrada para a singularidade de 60 mm

Singularidade	Vazão	Fotografia da 1° volta	Fotografia da 10° volta
60 mm	Vazão de 95		
	Vazão de 368		
	Vazão de 564		

Quadro 5 – Proporção de soja quebrada para a singularidade de 90 mm

Singularidade	Vazão	Fotografia da 1° volta	Fotografia da 10° volta
90 mm	Vazão de 95		
	Vazão de 368		
	Vazão de 564		

Quadro 6 – Proporção de soja quebrada para a singularidade sem prolongamento

Singularidade	Vazão	Fotografia da 1° volta	Fotografia da 10° volta
Sem prolongamento	Vazão de 95		
	Vazão de 368		
	Vazão de 564		

Quadro 7 – Proporção de soja quebrada para a singularidade curva de 3 gomos

Singularidade	Vazão	Fotografia da 1° volta	Fotografia da 10° volta
Curva de 3 gomos	Vazão de 95		
	Vazão de 368		
	Vazão de 564		

APÊNDICE B

PERDA DE CARGA

Temperatura

A temperatura (°C), apresentada na Figura 16, variou entre 21,5 a 25 °C. As temperaturas mais baixas foram observadas no prolongamento de 60 e 90 mm e as mais elevadas no prolongamento de 30 mm, porém não representaram grandes variações a ponto de interferir nas avaliações de Friabilidade.

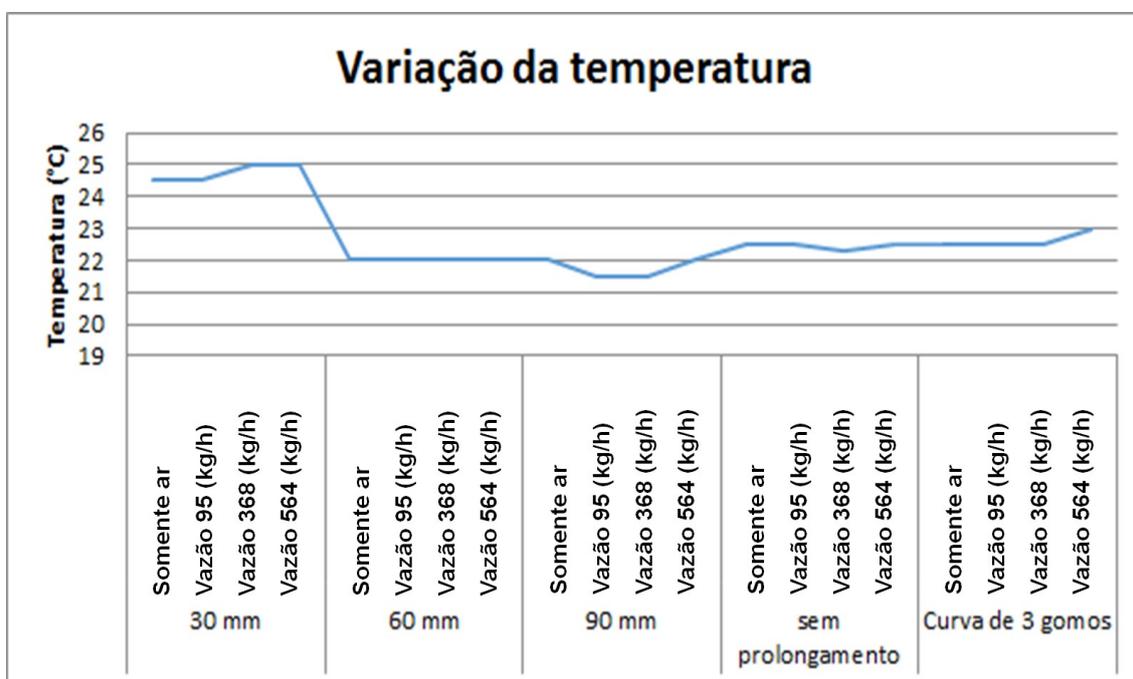


Figura 16 - Variação da temperatura durante os ensaios