

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

YAGO REITZ DE CASTRO

**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**

SANTOS/SP

2015

YAGO REITZ DE CASTRO

**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**

Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob orientação da Profa. Dra. Marlene Silva de Moraes e coorientação do Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior.

SANTOS/SP

2015

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

Castro, Yago Reitz de.

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.

Orientadora: Marlene Silva de Moraes.

Coorientador: Deovaldo de Moraes Júnior.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2015.

1. Transporte pneumático. 2. Polipropileno. 3. Tê.
4. Perda de carga. I. Moraes, Marlene Silva de, orient. II. Moraes Júnior, Deovaldo de, coorient. III. 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.

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas - Unisanta

DEDICATÓRIA

Dedico

Aos meus pais **Ives Reitz de Castro** e **Vera Lúcia Pestana de Castro** que me ajudaram a formar minhas ideias e a traçar o meu caminho.

Aos meus familiares que sempre me incentivaram e apoiaram nas mais diversas ocasiões.

Ao meu irmão **Yves Reitz de Castro** que além de eterno companheiro sempre foi e será motivo de inspiração para mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

À **professora Dra. Marlene Silva de Moraes**, orientadora deste trabalho, que me acompanhou e ofereceu grande suporte durante toda a execução do projeto com extrema dedicação.

Ao **professor Dr. Deovaldo de Moraes Júnior**, coorientador deste trabalho, pela contribuição com sua imensa sabedoria e dedicação. Além de ser um exemplo de caráter e profissionalismo.

Aos técnicos do Laboratório de Operações Unitárias da UNISANTA **Gilmar Alcântara, Irineu Penha da Ressurreição, Volnei de Lemos e Vitor Dias**, pelo companheirismo e apoio na montagem e manutenção da unidade experimental e na execução do projeto.

Ao **professor Msc. Vitor da Silva Rosa**, pela grande ajuda com seus conhecimentos estatísticos e pela amizade desenvolvida ao longo desta jornada.

Aos amigos **professor Jordan Souza Higa e engenheiro químico Daniel Muiños**, pelo companheirismo e dedicação na montagem e manutenção da unidade experimental e execução dos ensaios, pelas extensas jornadas de trabalho que foram de extrema importância no desenvolvimento deste projeto.

Aos estagiários do Laboratório de Operações Unitárias que me acolheram de braços abertos, em especial **Gustavo Adolfo Moreira Santos e Bianca da Silva Cruz**, pela ajuda na execução dos ensaios.

Aos alunos que desenvolveram seu trabalho de conclusão de curso no transportador pneumático **Carolina de Freitas, Daniel Camargo, Felipe Kuriki, Fernanda Cardoso, Gabriel de Jesus, João Otávio de Lima, Paollo de Souza, Stela Silveira** e principalmente **Ana Carolina Pulice**, pela dedicação e disposição na execução de ensaios por longas tardes, tornando possível a finalização do experimento.

Yago Reitz de Castro

RESUMO

O transporte pneumático de sólidos granulares é muito utilizado na indústria química, alimentícia, têxtil e em portos no carregamento e descarregamento de grãos. O transporte de sólidos em dutos com ar em fase diluída está sendo largamente empregado, apesar do desgaste nos dutos e singularidades, devido à facilidade de manutenção e pelo fato de não haver perdas de sólido. Visando reduzir este desgaste pode-se substituir curvas por tê saídas de lado, pois estes armazenam um pouco de material formando um colchão que amortece os impactos causados pelas partículas em alta velocidade. A literatura é carente de dados de projeto para singularidades em transporte pneumático, pois as características do escoamento variam de acordo com o material e o *layout* do sistema. Este trabalho visou definir experimentalmente a equação do coeficiente da carga cinética “K” no transporte pneumático de polipropileno granulado para o tê saída de lado e com prolongamentos de 30, 60 e 90 mm e curva de 90° com gomos em um duto de 117 mm de diâmetro interno. Utilizaram-se velocidades (v) de 9,29 a 22,02 m/s e vazões de sólido 113,8; 218,5 e 327,5 kg/h. Verificou-se estatisticamente, através do teste de Tukey, que os prolongamentos utilizados no estudo não interferiram de forma significativa no coeficiente K. Desta forma, foi modelada uma regressão não linear assintótica com o formato de $K = 9,119 \cdot v^{-0,698}$, para o tê saída de lado e $K = 5,977 \cdot v^{-0,697}$, para a curva em gomos de 90°, as quais fornecem a variação do coeficiente K em função da velocidade de ar, com uma margem de confiança de 95%. Também foram analisadas as distribuições de sólidos na seção transversal do transportador, 10 diâmetros após a mudança de direção. Foi utilizado um método intrusivo, que divide a seção do tubo em nove partes, e pesou-se as massas obtidas por cada divisão, gerando-se assim os desvios padrões de 3,86 a 4,98% para velocidades de 10,3 e 18,9 m/s para o tê saída de lado e prolongamentos; 5,7% a 10,3 m/s e 2,02% a 18,9 m/s para a curva de 90° com gomos, utilizando-se as vazões de sólido de 113,8; 218,5 e 327,5 kg/h. Apesar do tê saída de lado apresentar uma distribuição com desvio padrão máximo superior (4,98%) em relação à curva (2,02%) e aumento da perda de carga de 65% para a velocidade de 18,9 m/s, o emprego do tê com prolongamento de 90 mm fornece maior proteção ao desgaste da singularidade.

Palavras chave: Transporte pneumático. Polipropileno. Tê saída de lado. Perda de carga. Modelagem.

ABSTRACT

The pneumatic conveying of granular solids is widely used in chemical, food, textile industry, in ports to load and unload grains. The solid transportation in air pipelines with dilute phase is largely being used, despite the wear on ducts and singularities, due to easy maintenance and because there is no solid losses. In order to reduce this wear, curves can be replaced by tees with side output, because they store an amount of material forming a mattress that cushions the impacts of particles at high speed. The literature lacks project data for singularities in pneumatic conveying, since the flow characteristics vary according to the material and the system layout. This work's goal was to experimentally determine the equation of the coefficient of kinetic load K in pneumatic conveying of polypropylene for a tee with side output and with extensions 30, 60 and 90 mm and 90° buds curve on a 117 mm of internal diameter duct. It were used speed from 9.29 to 22.02 m/s and solid flows of 113,8; 218,5 and 327,5 kg/h. It was statistically verified by the Tukey test that the extensions used in the study do not interfered significantly in the coefficient K . Thus, it was modeled on Minitab software the nonlinear asymptotic regression $K = 9,119 \cdot v^{-0,698}$ for tee with side output and $K = 5,977 \cdot v^{-0,697}$ for 90° buds curve, to predict the variation of the K coefficient in function of air velocity, with a margin of 95% reliability. Also the solid distributions were analyzed in the cross section of the conveyor, 10 diameters after the direction changing. An intrusive method was used, dividing the tube section to nine parts, and weighed to the masses obtained by each division, generating the standard deviations: 3.86 to 4.98% for 10,3 and 18.9 m/s speed for tee with side output and extensions; 5.7% at 10,3 m/s and 2.02% at 18,9 m/s for 90° buds curve using the solid flows 113,8; 218,5 and 327,5 kg/h. In spite of presenting a distribution with maximum standard deviation (4,98%) higher than the curve (2,02%) and 65% higher pressure drop, the tee with 90 mm extension provides more protection from wear in the singularity.

Keywords: Pneumatic conveying. Polypropylene. Tee with side output. Pressure drop. Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
2.1 Transporte pneumático em fase densa	21
2.2 Transporte pneumático em fase diluída	22
2.3 Alimentação direta	24
2.4 Alimentação indireta	24
3.1 Unidade piloto de transporte pneumático	30
3.2 Mecanismo de acionamento do sistema	31
3.3 Alimentação de sólido	32
3.4 Potenciômetro controlador da válvula rotativa	33
3.5 Anemômetro instalado no bocal de sucção	34
3.6 Tê sem prolongamento	39
3.7 Tê com prolongamento de 30mm	39
3.8 Tê com prolongamento de 60mm	40
3.9 Tê com prolongamento de 90mm	40
3.10 Curva de 90° com gomos	41
3.11 Banco de manômetros do tipo tubo em U	42
3.12 Coletor de sólido	43
3.13 Área efetiva do coletor	44
3.14 Dispositivo coletor e recipientes acoplados às seções	45
4.1 Perda de carga em função da velocidade para o tê sem prolongamento	47
4.2 Perda de carga em função da velocidade para o tê com prolongamento de 30 mm	48
4.3 Perda de carga em função da velocidade para o tê com prolongamento de 60 mm	48
4.4 Perda de carga em função da velocidade para o tê com prolongamento de 90 mm	49
4.5 Perda de carga em função da velocidade para a curva de 90° com gomos	49
4.6 Coeficiente K em função da velocidade para o tê sem prolongamento	50

4.7	Coeficiente K em função da velocidade para o tê com prolongamento de 30 mm	50
4.8	Coeficiente K em função da velocidade para o tê com prolongamento de 60 mm	51
4.9	Coeficiente K em função da velocidade para o tê com prolongamento de 90 mm	51
4.10	Coeficiente K em função da velocidade para a curva de 90° com gomos	52
4.11	Teste de Tukey da diferença significativa	53
4.12	Curva geral do coeficiente K para o tê saída de lado	54
4.13	Equação do coeficiente K, função da velocidade, para o tê saída de lado e resíduos gerados pelo modelo.	55
4.14	Equação do coeficiente K, função da velocidade, para o tê saída de lado após tratamento de dados e resíduos gerados pelo modelo.	56
4.15	Equação do coeficiente K, função da velocidade, para a curva de 90° com gomos e resíduos gerados pelo modelo.	57
4.16	Distribuição de partículas para o tê sem prolongamento	60
4.17	Distribuição de partículas para o tê com prolongamento de 30 mm	61
4.18	Distribuição de partículas para o tê com prolongamento de 60 mm	62
4.19	Distribuição de partículas para o tê com prolongamento de 90 mm	63
4.20	Distribuição de partículas para a curva de 90° com gomos	64

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
2.1	Vantagens e desvantagens do transporte pneumático	20
2.2	Características comparativas entre as fases densa e diluída	23
2.3	Aplicações recomendadas para fases densa e diluída	23
2.4	Valores de K para algumas singularidades	28
3.1	Vazões mássicas de polipropileno	32
3.2	Áreas das nove seções do coletor	45

LISTA DE SÍMBOLOS

v	Velocidade de transporte (m/s);
ρ	Densidade aparente do material (t/m ³);
D_p	Diâmetro das partículas do material (mm);
D	Diâmetro interno do tubo (mm);
C	Capacidade de transporte do sistema (t/h);
L_t	Comprimento total do sistema (m);
L_h	Comprimento dos trechos horizontais (m);
L_v	Comprimento dos trechos verticais (m);
L_e	Comprimento equivalente às curvas, conexões e acessórios (m);
Q	Vazão (m ³ /s);
ΔP_t	Perda de carga total (kgf/cm ²);
X	Fração em massa de sólido transportado (kg de sólido/kg de ar);
ΔP_e	Perda de carga causada por equipamentos (mmCA);
φ	Fator de redução da perda de carga por aceleração, adimensional;
P_1	Pressão no ponto 1 (kgf/m ²);
P_2	Pressão no ponto 2 (kgf/m ²);
γ	Peso específico (kgf/m ³);
v_1	Velocidade média no ponto 1 (m/s);
v_2	Velocidade média no ponto 2 (m/s);
g	Aceleração da gravidade (m/s ²);
z_1	Altura do ponto 1 em relação a um plano de referência (m);
z_2	Altura do ponto 2 em relação a um plano de referência (m);
W	Trabalho de eixo ou de máquina (m);
$\ell_{\omega 1-2}$	Perda de carga entre os pontos 1 e 2 (m);
ℓ_{ω}	Perda de carga (mCA);
K	Multiplicador da carga cinética, adimensional;
v_s	Velocidade média na sucção (m/s);
A_s	Área da seção transversal do tubo de sucção (m ²);
v_r	Velocidade média no recalque (m/s);
A_r	Área da seção transversal do tubo de recalque (m ²);
P	Pressão (MPa);

V	Volume (m ³);
Z	Fator de compressibilidade adimensional;
n	Número de mols (mol);
R	Constante de ajuste (J/mol . K);
T	Temperatura (°K);
P _r	Pressão reduzida, adimensional;
P _c	Pressão crítica (Mpa);
T _r	Temperatura reduzida, adimensional;
T _c	Temperatura crítica (°K);
m	Massa (kg);
M	Massa molar (kg/kmol);
N _{Mach}	Número de Mach, adimensional;
V _{sônica}	Velocidade do som nas condições do fluido (m/s);
k	Relação entre calores específicos;
γ _{ar}	Peso específico do ar (kgf/m ³);
γ _{H₂O}	Peso específico da água (kgf/m ³).

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1.	Transporte de sólidos na indústria	18
2.2.	Transportador pneumático	19
2.2.1.	Fase densa e fase diluída	20
2.2.2.	Equações de projeto para fase diluída	25
2.3.	Polipropileno	29
3.	MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1.	Unidade experimental	30
3.2.	Condições operacionais	31
3.2.1.	Vazão de polipropileno	31
3.2.2.	Velocidade de transporte	33
3.3.	Ensaio	38
3.3.1.	Medições de pressão	41
3.3.2.	Coeficiente multiplicador da carga cinética	42
3.3.3.	Distribuição de partículas	43
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47

4.1. Perda de carga	47
4.2. Coeficiente K	50
4.3. Distribuição de partículas	58
5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	67
APÊNDICE A – Dados coletados no equipamento	69
ANEXO B – Propriedades do ar	76

1. INTRODUÇÃO

O transporte de materiais pode ser responsável por grande parte do custo de fabricação de um produto. O investimento em melhorias ou em métodos de transporte mais eficazes e seguros pode garantir maior lucro e confiabilidade para a empresa. Alguns materiais são transportados na forma de grãos ou pós, como milho, soja, café, carvão, minérios, cimento, produtos químicos e farmacêuticos (ZHAO, 2014), (SANTOS, 2011).

O transporte de materiais particulados nas indústrias normalmente é realizado por correias transportadoras e elevadores de canecas (sistemas abertos), ou por tubulações (sistemas fechados). Os métodos de transporte que utilizam tubulações são: helicoidal, hidráulico ou pneumático (MORAES, 2012). O transporte pneumático consiste no deslocamento de partículas através de um gás, deslocado por um ventilador ou compressor. É comum classificar o transporte pneumático em fase diluída e fase densa. Na fase diluída, os sólidos transportados ficam suspensos e a velocidade do ar é superior a 10 m/s e a concentração de sólido é menor que 1% em volume. Na fase densa, as partículas de sólido preenchem toda a tubulação e a velocidade de transporte do ar é inferior a 10 m/s e concentração maior que 30% em volume de sólido. (SANTOS, 2009).

As principais vantagens do uso de um transportador pneumático em fase diluída são: a) redução de perda ou contaminação de material; b) menor risco de acidentes; c) baixo custo de instalação e manutenção; d) fácil distribuição de material para qualquer lugar de uma planta e e) não requer alteração das partículas, como cominuição e adição de água (SETIA, 2014). Suas principais desvantagens são: a) alto consumo de energia, b) geração de energia eletrostática e c) elevado desgaste do equipamento (COSTA, 2009).

Nesse processo de transporte é comum a instalação de um grande número de curvas na tubulação para direcionar o fluxo de partículas, porém estas curvas geram problemas como: desgaste do material por impacto na curva, desgaste da parede da curva e fluxo irregular de sólidos após o acessório (KRUGGEL-EMDEN, 2014). No transporte pneumático em fase diluída, que é o mais aplicado, as altas velocidades de transporte causam maiores impacto na curva, gerando desgaste excessivo e maior

quebra de partículas (HANLEY, 2013). Devido aos danos causados ao equipamento e ao material, existem estudos direcionados a métodos e condições de transporte menos abrasivos. Um método conhecido na indústria é o uso de têes com saída de lado para mudar a direção do fluxo. No transportador pneumático, o uso de têes para substituir uma curva reduz o desgaste causado pela mudança de direção dos sólidos, pois estes geram acúmulo de material, devido à sua geometria, que amortece o choque das partículas com a singularidade (MORAES, 2012).

O objetivo geral deste trabalho foi gerar uma equação para prever o coeficiente da carga cinética “K” em função da velocidade do ar, a partir de dados experimentais, para as singularidades tê sem prolongamento e com prolongamentos de 30, 60 e 90 mm e curva de 90° com gomos para um transportador pneumático com diâmetro interno de 117 mm operando com polipropileno em fase diluída. Teve como objetivo específico comparar a influência de cada uma das singularidades supracitadas na distribuição de partículas e perda de carga.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Transporte de sólidos na indústria

O transporte de sólidos está presente em muitos processos de fabricação. Em alguns casos pode atingir 80% do custo da produção. A seleção do equipamento mais eficiente para um determinado processo de transporte depende, dentre muitos, de quatro fatores mais importantes: capacidade, distância e desnível entre carga e descarga, natureza do material a ser transportado e fatores econômicos. Os equipamentos mais comuns utilizados para deslocar sólidos em indústrias são os transportadores de correia, caçamba, vibratório, de calha, helicoidal e pneumático (GOMIDE, 1983).

- a) O transportador de correia é constituído por uma manta ou tela que se movimenta entre um tambor livre e um de acionamento. A correia apoia-se em roletes ao longo do percurso e precisa de esticadores para mantê-la tensionada. Pode ser horizontal ou inclinada, sendo o ângulo de inclinação e a velocidade de transporte dependentes das propriedades das partículas. Por esta técnica são transportados materiais como calcário, cimento e cereais.
- b) Minérios e sólidos que requerem operações sucessivas como lavagem e reações químicas podem ser deslocados dentro de caçambas suspensas em cabos de aço ou em eixos com roletes. Este transportador opera em velocidades abaixo de 20 m/min.
- c) No transportador vibratório as partículas ficam dispostas sobre uma calha horizontal ou levemente inclinada que vibra por ação de energia eletromagnética ou excêntrico. Ao vibrar o equipamento, as partículas são deslocadas na forma de pequenos “saltos”. Este tipo de transportador necessita de unidades com vibradores a cada 3 metros. É prático para movimentar sólidos densos e de fácil escoamento como porcas e parafusos.
- d) Emprega-se o transportador de calha para deslocar sólidos a distâncias de até 30 metros devido ao alto consumo de potência e alto custo de manutenção. Pode ser aplicado a diversos materiais como serragem de madeira, coque, cimento e carvão. Consiste em uma calha na qual movimentam-se raspadeiras que carregam o sólido.

- e) O transportador helicoidal é composto de um eixo com uma helicóide que gira dentro de uma calha, podendo atingir inclinação de 15°, ou de um tubo que pode funcionar como um dispositivo elevador. Possui alto consumo de energia. É utilizado comumente para distâncias de até 20 metros e deslocamento de materiais como farinha de trigo, açúcar e areia seca. É capaz de realizar outras operações como mistura, lavagem, secagem e extração.
- f) A elevação e o deslocamento de sólidos finos em pequenas ou longas distâncias pode ser feita com perda desprezível de materiais por um transportador pneumático. Possui alto consumo de energia, mas pode transportar o material particulado para qualquer ponto da indústria com poucas limitações. O material é transportado dentro de um tubo por um gás movimentado por um ventilador ou compressor.

2.2. Transportador pneumático

O transportador pneumático desloca sólidos particulados por meio de um duto geralmente com ar atmosférico. A capacidade e performance do transporte dependem de características do sólido transportado e do equipamento projetado. Quanto ao sólido, as características mais influentes são: densidade aparente, densidade real, coeficiente de atrito, tamanho da partícula, rugosidade, forma, teor de umidade, higroscopia e inflamabilidade. Quanto ao equipamento transportador, são: diâmetro e comprimento da linha de transporte, curvas ou singularidades ao longo da linha, características do ar ou gás utilizado e energia fornecida ao gás. (COUPER, 2010).

O transporte pneumático pode facilmente vencer longas distâncias ou grandes desníveis e atingir altas vazões de sólido sendo mais eficaz que os transportadores mecânicos em muitas aplicações. Após a Segunda Guerra Mundial projetistas já desenvolviam equipamentos de alta pressão capazes de transportar sólidos por distâncias maiores que 1 km e com vazões superiores a 100 t/h (WYPYCH, 1999). Este método de transporte possui risco de acidentes quase nulo por transportar o material dentro de um tubo e não possuir partes móveis como os outros transportadores, evita perda ou contaminação do material transportado e necessita de manutenções menos frequentes desde que o equipamento seja corretamente projetado. A Tabela 2.1 reproduz as principais vantagens e desvantagens dos

transportadores pneumáticos de uma forma geral quando comparados aos outros transportadores citados.

Tabela 2.1 – Vantagens e desvantagens do transporte pneumático. (MORAES, 2012)

Vantagens	Desvantagens
a) Higiene e segurança. b) Suporta maiores vazões de sólido. c) Vence desníveis com maior facilidade, pois pode transportar o material na vertical. d) Fácil distribuição para qualquer ponto da planta com poucas restrições. e) Evita perda ou contaminação do material, podendo ser utilizado na indústria alimentícia e farmacêutica.	a) Alto consumo de energia elétrica. b) Geração de energia eletrostática. c) Alto investimento inicial. d) Maior desgaste de componentes do transportador, principalmente das curvas.

2.2.1. Fase densa e fase diluída

As Figuras 2.1 e 2.2 demonstram instalações pneumáticas em fase densa e fase diluída respectivamente.

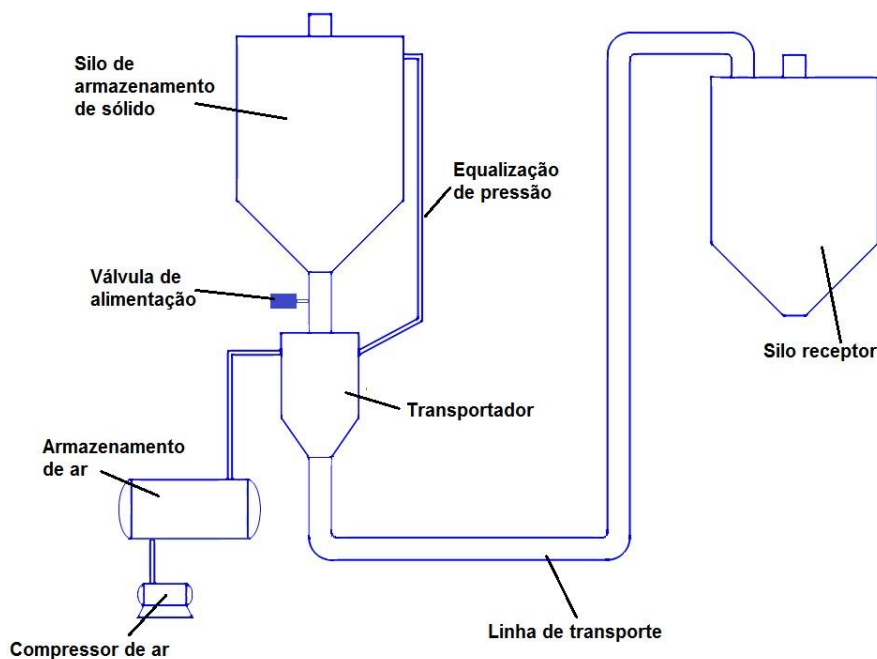


Figura 2.1 – Transporte pneumático em fase densa.

Em fase densa, as partículas preenchem a maior parte da tubulação. Opera com concentrações maiores que 30% em volume e o ar é injetado em alta pressão e baixa velocidade (em geral inferior a 10 m/s). O equipamento utilizado para movimentar o gás é um soprador de deslocamento positivo ou um compressor. Pode transportar os sólidos por longas distâncias, sendo neste caso necessária a injeção de gás em diversos pontos da tubulação devido à perda de carga por comprimento de tubo. Por trabalhar em altas pressões, deve-se tomar um maior cuidado ao projetar ou operar um equipamento em fase densa e atender os requisitos das normas para equipamentos de alta pressão (Norma Regulamentadora Brasileira 13, NR-13).

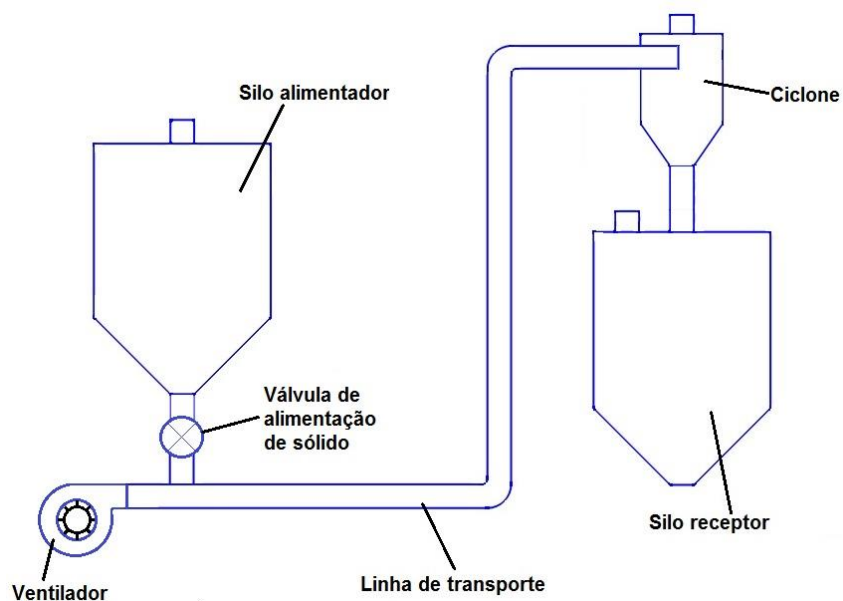


Figura 2.2 – Transporte pneumático em fase diluída

Em fase diluída, a concentração de partículas é menor que 1% em volume. A movimentação do gás, em altas velocidades e baixas pressões, é feita por um ventilador. As partículas são deslocadas de forma não homogênea na seção da tubulação; no caso de transporte na horizontal, a parte inferior do tubo é a que sofre maior desgaste. As Tabelas 2.2 e 2.3 dispõem características comparativas entre as duas fases do transporte pneumático nas condições mais clássicas e suas aplicações recomendadas (GOMIDE, 1983 e MORAES, 2012).

Tabela 2.2 – Características comparativas entre as fases densa e diluída. (GOMIDE, 1983 e MORAES, 2012).

Característica	Fase densa	Fase diluída
Velocidade de transporte	Abaixo de 10 m/s.	Acima de 10 m/s.
Pressão	Superior a 100 kPa.	Inferior a 100 kPa.
Desgaste	Baixo desgaste de tubulações e componentes do equipamento.	Alto desgaste da tubulação, principalmente em curvas, devido às elevadas velocidades requeridas.
Instalação (custo e complexidade)	Alto custo inicial de instalação e maior complexidade, pois o sistema é classificado como vaso de pressão e deve obedecer à norma NR-13.	Baixo custo de instalação e complexidade.

Tabela 2.3 – Aplicações recomendadas para fases densa e diluída. (GOMIDE, 1983 e MORAES, 2012).

Aplicação	Fase densa	Fase diluída
Classes de material transportado	Pós ou materiais granulares abrasivos e/ou que não podem sofrer degradação (quebra de partículas ou alterações físicas).	Pós e materiais granulares exceto materiais frágeis, que possam sofrer degradação, com elevada higroscopia ou muito abrasivos.
Densidade do material	> 1,2 t/m ³	< 1,5 t/m ³
Distância de transporte	> 100 metros	< 100 metros
Capacidade	> 10 t/h	< 20 t/h

A alimentação de sólido no sistema de transporte pneumático em fase diluída pode ser feita por: válvula rotativa, alimentador helicoidal, venturi ou saída direta do

silo. A forma que é feita a alimentação de sólido classifica o sistema em direto ou indireto. As Figuras 2.3 e 2.4 representam as técnicas de alimentação direta e indireta.

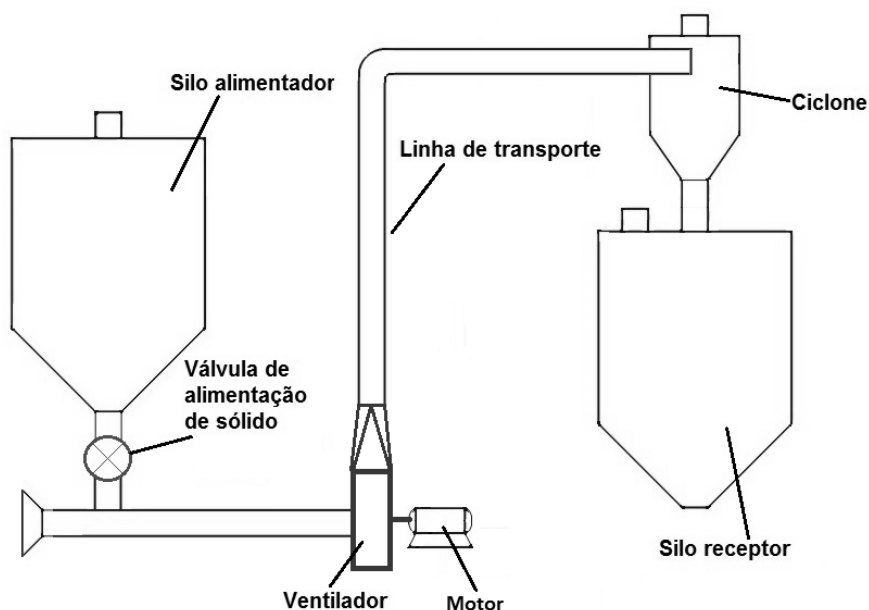


Figura 2.3 – Alimentação direta.

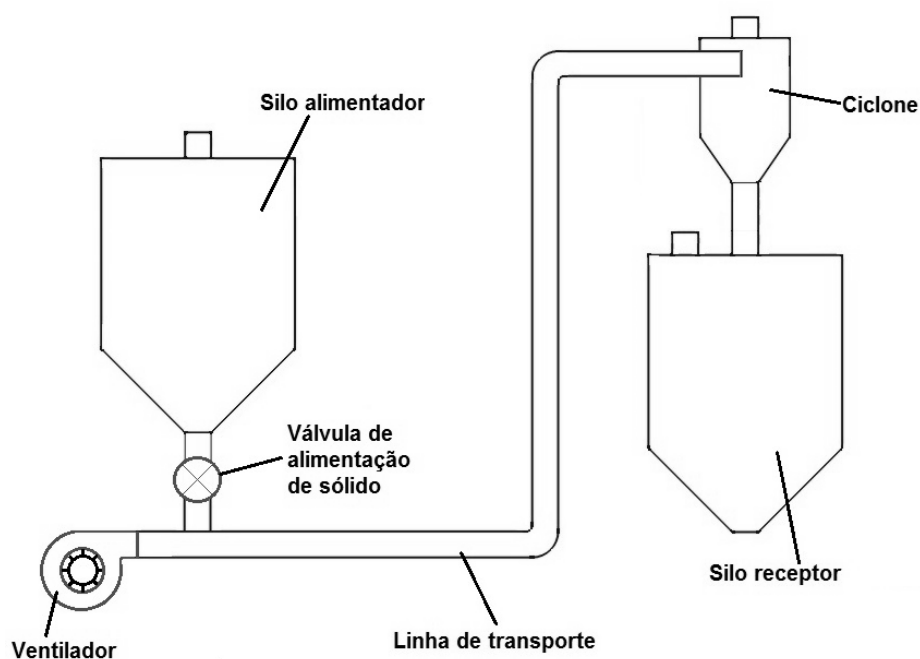


Figura 2.4 – Alimentação indireta.

No sistema direto, os sólidos são admitidos antes da sucção do ventilador e o ventilador movimenta a mistura sólido-gás. Já no sistema indireto, os sólidos são admitidos após a descarga do ventilador e o ventilador movimenta apenas o gás de

transporte. Ao transportar sólidos que possam ser danificados ou que possam causar desgaste excessivo no ventilador, deve-se utilizar o sistema indireto para preservar o equipamento e o material. Os materiais comumente transportados por alimentação direta são a serragem e o papel picado.

O transporte pneumático também pode operar com pressão negativa (à vácuo) quando o ventilador é instalado após a descarga de sólido. É comum transportar sólidos a vácuo como medida de segurança ao transportar materiais tóxicos ou utilizar gases tóxicos no transporte, para que possíveis vazamentos sejam evitados. Também transporta-se à vácuo quando há mais de um ponto de coleta para um único ponto de descarga, sendo o transporte com pressão positiva indicado para o caso contrário, quando o material se movimenta para mais de um ponto de descarga. (SANTOS, 2009)

2.2.2. Equações de projeto para fase diluída

Gomide (1983) recomenda para a especificação de uma unidade de transporte pneumático em fase diluída, as Equações de 2.1 a 2.5, construídas a partir de gráficos da Fan Engineering (1970). A velocidade de transporte, que considera a velocidade de flutuação e a do material é dada pela Equação 2.1.

$$v = 4,11 \cdot \sqrt[3]{\rho} \cdot \sqrt{D_p} + 23,4 \cdot \sqrt{\rho} \quad (2.1)$$

Sendo:

v a velocidade de transporte (m/s);

ρ a densidade aparente do material (t/m³);

D_p o diâmetro das partículas (mm).

O diâmetro interno do tubo transportador pode ser calculado pela Equação 2.2.

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

Em que:

D é o diâmetro interno do tubo (mm);

C é a capacidade do sistema (t/h);

v é a velocidade de transporte (m/s).

A perda de carga total é calculada pelas Equações de 2.3 a 2.5.

$$L_t = L_h + 2L_v + L_e \quad (2.3)$$

Sendo:

L_t o comprimento total do sistema (m);

L_h o comprimento dos trechos horizontais (m);

L_v o comprimento dos trechos verticais (m);

L_e o comprimento equivalente às curvas, conexões e acessórios (m).

Calcula-se a fração em peso (X) de sólido transportado em kg de sólido por kg de ar com a Equação 2.4.

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

Em que:

C é a capacidade de sólido do sistema (t/h);

Q é a vazão de ar (m³/s).

O resultado da perda de carga total do sistema é obtido pela Equação 2.5, que soma as perdas por atrito, por aceleração e pelos equipamentos do sistema como ciclones, silos e filtros.

$$\Delta P_t = [1,68 \cdot L_t(X + 3,5) \frac{v^{1,8}}{D^{1,22}} + 0,138 \cdot \varphi X v^2 + \Delta P_e] \cdot 10^{-4} \quad (2.5)$$

Sendo:

ΔP_t a perda de carga total (kgf/cm²)

L_t o comprimento total do sistema contemplando os acessórios (m);

X a fração em peso de sólido transportado (kg sólido/kg ar);

v a velocidade de transporte (m/s);

D o diâmetro interno do tubo (mm);

ΔP_e a perda de carga causada por equipamentos (mmca).

φ o fator de redução da perda de carga por aceleração, adimensional ($\varphi=1$ para alimentação depois do ventilador e $\varphi<1$ se o material passa pelo ventilador);

A literatura é carente de dados concernentes à perda de carga em tê saída de lado com prolongamento em transporte bifásico ar-partículas.

A perda de carga entre dois pontos pode ser obtida experimentalmente pela equação do balanço de energia mecânica (Equação 2.6) adotando-se as seguintes hipóteses (MORAES, SILVA, MORAES, 2011): a) fluido incompressível, b) o volume de controle apresenta apenas uma entrada e uma saída, c) não há variação significativa de temperatura entre a entrada e a saída do volume de controle, d) não há variação significativa em cada área da densidade e entalpia, e) escoamento em regime permanente.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + W = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \ell\omega_{1-2} \quad (2.6)$$

Sendo:

P_1 pressão no ponto 1, em kgf/m²;

P_2 pressão no ponto 2, em kgf/m²;

γ o peso específico do fluido, em kgf/m³;

v_1 velocidade média no ponto 1 (m/s);

v_2 velocidade média no ponto 2 (m/s);

g a aceleração da gravidade, em m/s²;

z_1 a altura do ponto 1 em relação a um plano de referência (m);

z_2 a altura do ponto 2 em relação a um plano de referência (m);

W o trabalho de eixo, em m;

$\ell\omega_{1-2}$ a perda de carga do sistema entre os pontos 1 e 2 (m).

Em instalações pneumáticas ou hidráulicas é necessária a presença de alguns equipamentos como medidores ou controladores de vazão e pressão, curvas, joelhos e válvulas. Cada um destes acessórios, além de suas funções específicas, geram uma perda de carga no fluido, devido à sua geometria. Existem diversos métodos para se determinar a perda de carga causada por uma singularidade, sendo o mais comum dentre eles o método do coeficiente K que multiplica a carga cinética do fluido. Este coeficiente é fornecido por alguns autores e fabricantes. A Tabela 2.4 fornece o coeficiente K para alguns exemplos de singularidades comumente utilizadas na indústria. A Equação 2.7 calcula a perda de carga localizada a partir deste método.

Tabela 2.4 – Valores de K para algumas singularidades. R é o raio de curvatura e D é o diâmetro interno, para número de Reynolds acima de 50000. (Adaptado de MORAES; SILVA; MORAES, 2011)

Acessórios	K
Cotovelo 90°, R/D=1 rosca	0,75
Cotovelo 90°, R/D=1 flange e solda	0,75
Curva 90°, R/D=1,5 raio longo, rosca, flange e solda	0,45
Tê saída de lado, rosca	1,00
Tê saída de lado, flange e solda	1,00

$$\ell_{\omega} = K \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2.7)$$

Sendo:

ℓ_{ω} a perda de carga (m);

K o coeficiente multiplicador da carga cinética, adimensional;

v a velocidade do ar (m/s);

g a aceleração da gravidade (m/s²);

2.3. Polipropileno

O polipropileno é uma resina largamente utilizada na indústria como na confecção de embalagens alimentícias, recipientes farmacêuticos, eletrodomésticos, tubulações e revestimento de tanques. Estudos comprovam que o polipropileno pode até aumentar a resistência do concreto na construção civil, sendo adicionado à sua composição em forma de fibras (AFROUGHSABET, 2015). Seu ponto de fusão varia de 165 até 175°C e a densidade de 0,89 a 0,91 g/cm³.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Unidade experimental

A unidade de transporte pneumático utilizada neste estudo, representada na Figura 3.1, foi projetada e instalada no Laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília.

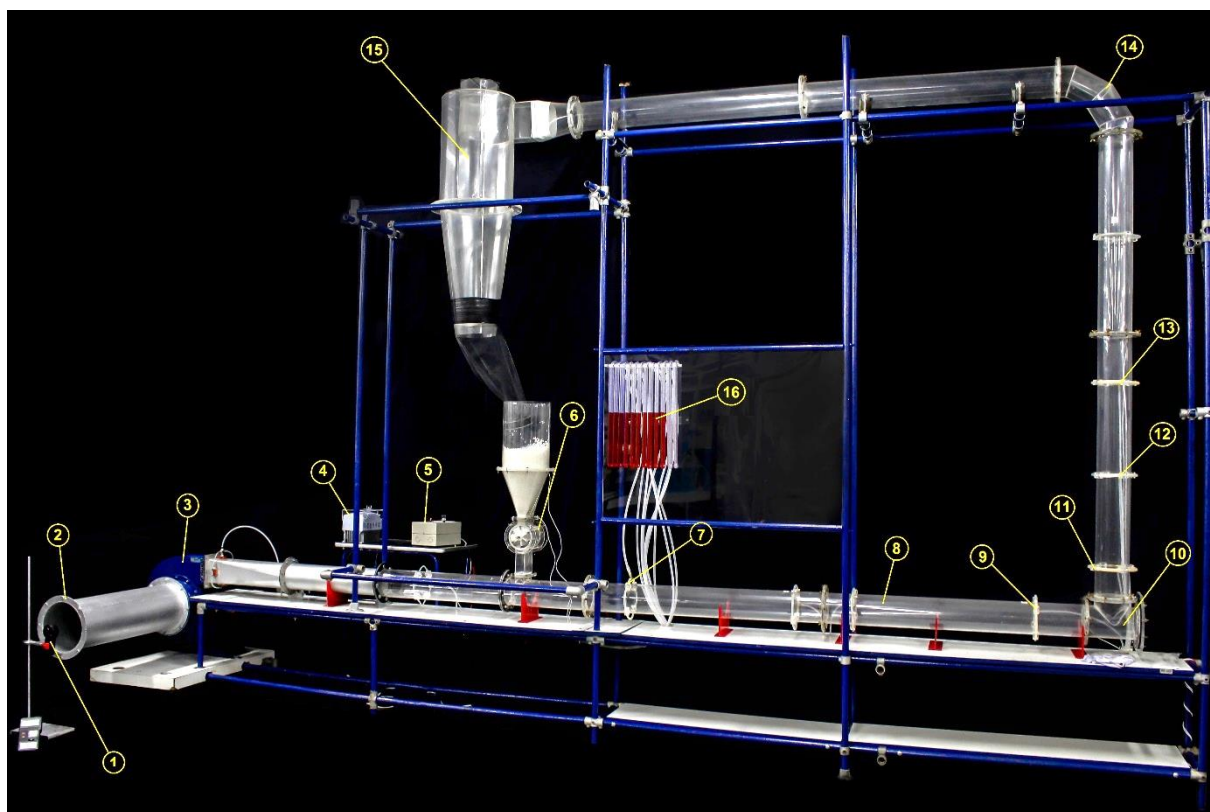


Figura 3.1 – Unidade piloto de transporte pneumático. 1) anemômetro digital; 2) tubo de sucção com diâmetro interno de 217 mm; 3) ventilador centrífugo de pás semiabertas com diâmetro de 238 mm; 4) inversor de frequência que fornece energia ao motor elétrico, 5) potenciômetro controlador da válvula de alimentação; 6) alimentação de sólido composta por silo e válvula rotativa; 7) tomada de pressão após a alimentação de sólido; 8) tubo de recalque em acrílico de 117 mm de diâmetro interno; 9) tomada de pressão a montante da singularidade, 10) Tê saída de lado; 11, 12 e 13) tomadas de pressão a jusante da singularidade; 14) curva de 90° em gomos; 15) ciclone; 16) banco de manômetros de tubo em “U” ligados às tomadas de pressão.

Apresenta-se na Figura 3.2 detalhes do mecanismo fornecedor de energia ao fluido, composto de um inversor de frequência, um motor elétrico de 0,75 hp, um sistema de correia e polias para atingir maiores rotações e um ventilador centrífugo de pás semiabertas.

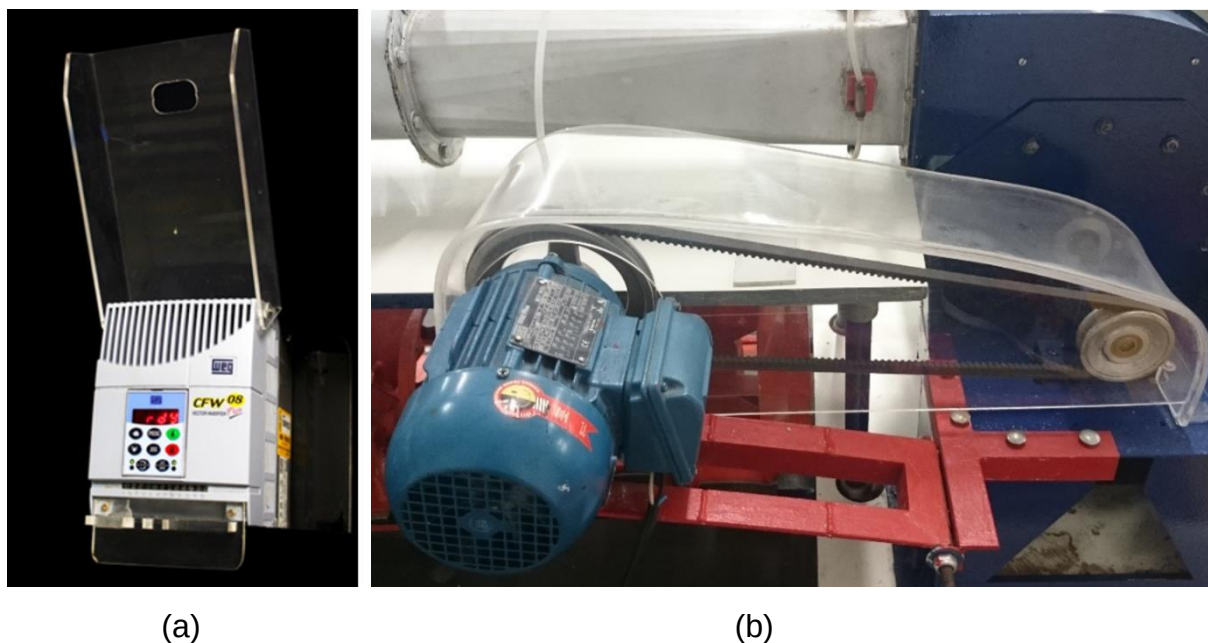


Figura 3.2 – Mecanismo de acionamento do sistema: a) Inversor de frequência; b) Motor de 0,75 hp e 3420 rpm acoplado ao ventilador com rotor semiaberto com diâmetro de 238 mm.

3.2. Condições operacionais

3.2.1. Vazão de polipropileno

O polipropileno empregado no estudo foi fornecido pela Braskem, de formato granular achatado com diâmetro de 4,5 mm, densidade de 0,905 g/cm³, índice de fluidez de 0,3 dg/min (decigramas por minuto) e densidade aparente de 0,557g/cm³. A alimentação do polipropileno no sistema de transporte pneumático foi realizada por um silo e uma válvula rotativa acionada por um motor elétrico, representados pela Figura 3.3. Para definir as condições iniciais de projeto, foram selecionados os pontos 3, 5 e 7 do potenciômetro controlador da válvula rotativa (Figura 3.4), abrangendo uma faixa intermediária, evitando tanto sobrecarregar o equipamento quanto utilizar rotações muito baixas. As vazões de polipropileno referentes aos três pontos selecionados foram mensuradas pelo método da massa por unidade de tempo e estão demonstradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Vazões mássicas de polipropileno.

Pontos	Vazões mássicas (kg/h)
3	113,8
5	218,5
7	327,5



Figura 3.3 – Alimentação de sólido composta de silo com polipropileno granulado com diâmetro médio de 4,5mm e válvula rotativa acionada por um motor elétrico.



Figura 3.4 – Potenciômetro controlador da válvula rotativa.

3.2.2. Velocidade de transporte

Com as vazões mássicas fixadas, foram realizados testes experimentais para definir a velocidade mínima de ar necessária para evitar o acúmulo de sólido em cada uma das 3 vazões. Variou-se a velocidade de ar utilizando-se o inversor de frequência (Figura 3.2 a) conectado por um cabo ao motor elétrico do ventilador. Foram escolhidas as frequências do inversor referentes às mínimas velocidades de ar necessárias para transportar o material sem acúmulo. Variou-se a frequência estabelecida em intervalos de 2 Hz visando disponibilizar 10 velocidades de ar, a partir da velocidade mínima, para cada vazão mássica de sólido.

As frequências selecionadas foram utilizadas apenas para facilitar a operação do equipamento durante os ensaios. A velocidade do ar foi quantificada em cada ensaio através de um anemômetro (Figura 3.5) instalado no tubo de sucção de ar, faceado e centralizado ao bocal de sucção.

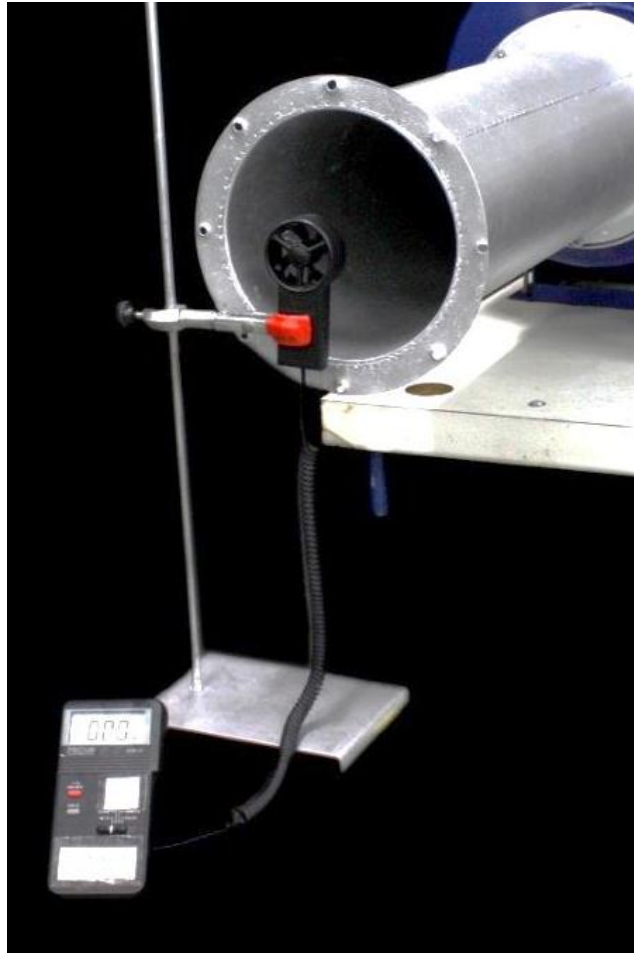


Figura 3.5 – Anemômetro instalado no bocal de sucção.

Uma vez que o diâmetro do tubo de sucção é maior que o do tubo de recalque, foi utilizada a equação da continuidade simplificada (Equação 3.1), igualando-se as vazões volumétricas de sucção e recalque e considerando o ar incompressível nas condições de operação.

$$v_s \cdot A_s = v_r \cdot A_r \quad (3.1)$$

Sendo:

v_s a velocidade média na sucção medida pelo anemômetro (m/s);

A_s a área da seção transversal do tubo de sucção (m²);

v_r a velocidade média no recalque (m/s);

A_r a área da seção transversal do tubo de recalque (m²).

Estudos realizados anteriormente neste equipamento por Moraes (2012) comprovaram que as velocidades médias na tubulação de recalque obtidas através de um anemômetro na sucção apresentaram desvios nas velocidades inferiores a 6% em relação às obtidas por tubos de Pitot na horizontal e na vertical pelo método das centroides de áreas iguais.

Com a finalidade de validar a Equação 3.1 e considerar o fluido incompressível, foi necessário calcular a variação de densidade do ar. Esta hipótese pode ser considerada se a variação da densidade do gás no processo for menor que 5% (PERRY, 2008). O cálculo da densidade do ar externo e interno está presente nas Equações de 3.2 a 3.10.

$$P \cdot V = Z \cdot n \cdot R \cdot T \quad (3.2)$$

Em que:

P é a pressão do gás (MPa);

V é o volume do gás (m³);

Z é o fator de compressibilidade, adimensional;

n é o número de mols presente (massa / massa molar);

R é a constante de ajuste $\left(R = \frac{8,314 \text{ J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} = \frac{0,08206 \text{ atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right)$;

T é a temperatura (K).

$$P_r = \frac{P}{P_c} \quad (3.3)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (3.4)$$

Sendo:

P a pressão do gás (MPa);

P_r a pressão reduzida, adimensional;

P_c a pressão crítica do gás (MPa);

T a temperatura do gás (K);

T_r a temperatura reduzida, adimensional;

T_c a temperatura crítica do gás (K);

O fator de compressibilidade Z (Figura B.1 do anexo B) é função dos adimensionais: pressão reduzida (P_r) e temperatura reduzida (T_r). Calculando para a pressão atmosférica de 0,101325 MPa e a pressão interna máxima obtida nos ensaios, de 0,102737 MPa e temperatura constante de 22°C obtém-se as pressões reduzidas interna e externa e a temperatura reduzida (Equações 3.5 a 3.7). A temperatura e pressão críticas (P_c e T_c) do ar, como também a massa molar foram retiradas do anexo B.

$$P_{r(\text{ar interno})} = \frac{(0,101325 + 0,001412) \text{ MPa}}{3,77 \text{ MPa}} = 0,027251 \quad (3.5)$$

$$P_{r(\text{ar externo})} = \frac{0,101325 \text{ MPa}}{3,77 \text{ MPa}} = 0,026877 \quad (3.6)$$

$$T_r = \frac{(22 + 273,15) \text{ K}}{132,5 \text{ K}} = 2,227547 \quad (3.7)$$

Com os valores de P_r para o ar externo e para o ar interno e T_r calculados, pode-se obter no diagrama da Figura B.1 do anexo B os valores de Z_{interno} e Z_{externo} que são ambos aproximadamente 0,999, portanto não se variou o fator de compressibilidade. Pode-se então calcular a densidade do ar interno (Equação 3.9) e a do ar externo (Equação 3.10) substituindo-se os dados na Equação 3.2 e o termo n por m/M (massa/massa molar).

$$P \cdot V = Z \cdot \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \rightarrow \frac{m}{V} = \frac{P \cdot M}{Z \cdot R \cdot T} \rightarrow \rho = \frac{P \cdot M}{Z \cdot R \cdot T} \quad (3.8)$$

$$\rho_{\text{ar interno}} = \frac{1,013937 \text{ atm}}{0,999 \cdot 0,08206 \text{ atm}} \cdot \frac{\text{Kmol} \cdot \text{K}}{\text{m}^3} \cdot \frac{28,97 \text{ Kg}}{295,15 \text{ K Kmól}} = 1,21400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (3.9)$$

$$\rho_{\text{ar externo}} = \frac{1 \text{ atm}}{0,999 \cdot 0,08206 \text{ atm}} \cdot \frac{\text{Kmol} \cdot \text{K}}{\text{m}^3} \cdot \frac{28,97 \text{ Kg}}{295,15 \text{ K Kmól}} = 1,19732 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (3.10)$$

A Equação 3.11 calcula a porcentagem de aumento da densidade.

$$\frac{\rho_{\text{ar interno}} - \rho_{\text{ar externo}}}{\rho_{\text{ar externo}}} \cdot 100 = \frac{1,21400 - 1,19732}{1,19732} \cdot 100 = 1,393\% \quad (3.11)$$

Sendo o aumento da densidade menor que 5%, foi possível considerar o ar incompressível nas condições estudadas. Um outro indicador da validade da hipótese da incompressibilidade do fluido é o número de Mach menor que 0,3 (MORAES, SILVA, MORAES, 2011). O cálculo do número de Mach é feito pelas Equações de 3.12 a 3.15.

$$N_{\text{Mach}} = \frac{v}{v_{\text{sônica}}} \quad (3.12)$$

Em que:

N_{Mach} é o número de Mach , adimensional;

v é a velocidade do fluido (m/s);

$v_{\text{sônica}}$ é a velocidade do som nas condições do fluido (m/s).

$$v_{sônica} = 91,212 \frac{Z \cdot k \cdot T}{M} \quad (3.13)$$

Sendo:

Z o fator de compressibilidade;

M a massa molar;

k a relação entre os calores específicos;

T a temperatura em Kelvin.

Calculando o número de Mach para a maior velocidade da unidade experimental de 22,02 m/s e temperatura de 22°C têm-se:

$$v_{sônica} = 91,212 \left(\frac{0,999 \cdot 1,4 \cdot 295,15}{28,97} \right)^{0,5} = 344,30 \frac{m}{s} \quad (3.14)$$

$$N_{Mach} = \frac{22,02}{344,30} = 0,064 \quad (3.15)$$

3.3. Ensaios

Com as vazões de sólido e frequências do motor selecionados, iniciaram-se os ensaios. Para cada vazão de sólido, foram realizadas medições de pressão a montante e a jusante da singularidade variando-se a frequência do inversor a fim de se obter as perdas de carga geradas pela singularidade em diferentes velocidades de ar. Estes ensaios foram repetidos para todas as singularidades estudadas: tê sem prolongamento, tê com prolongamentos de 30, 60, e 90 mm e curva 90° com gomos representados respectivamente pelas Figuras 3.6 a 3.10. Como foram selecionadas três vazões de sólido e dez velocidades de ar, foram realizados trinta ensaios com cada um dos cinco acessórios, totalizando 150 ensaios.

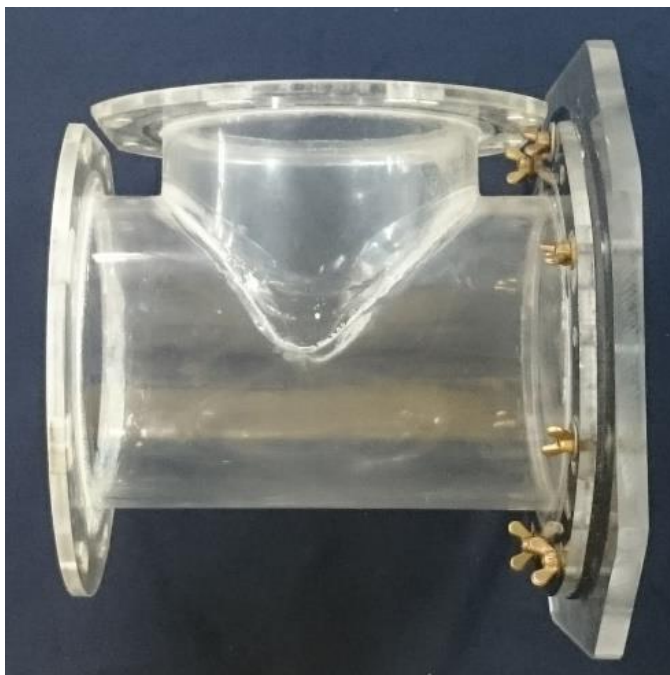
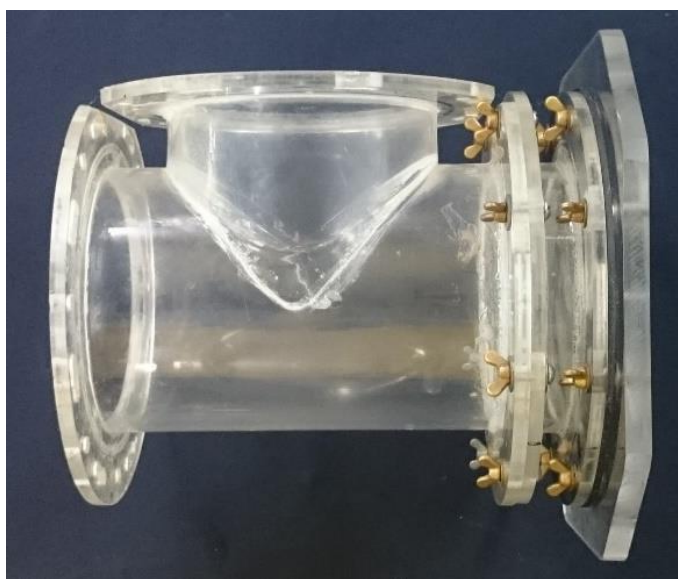


Figura 3.6 – Tê sem prolongamento.



Fifura 3.7 – Tê com prolongamento de 30 mm.

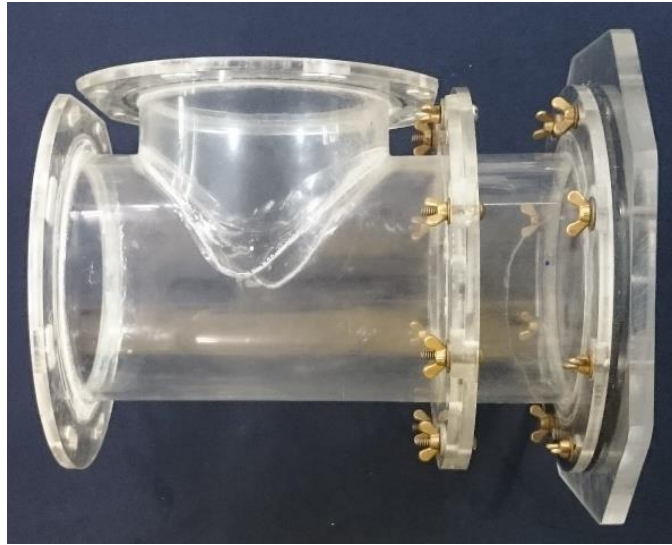


Figura 3.8 - Tê com prolongamento de 60 mm.

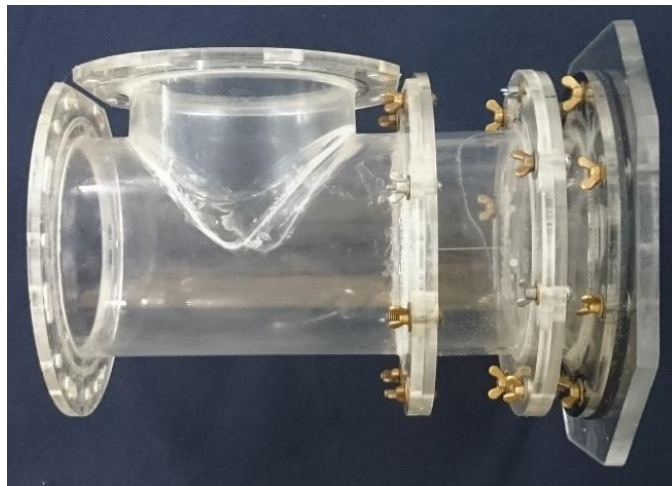


Figura 3.9 - Tê com prolongamento de 90 mm.

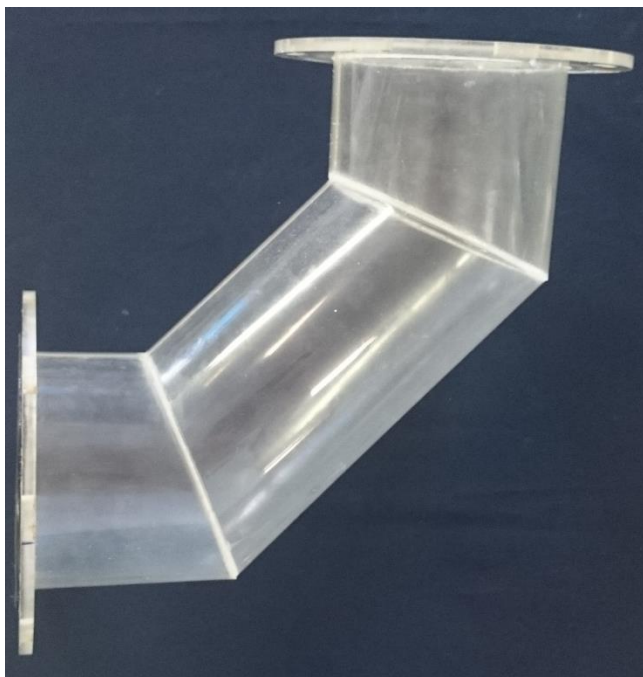


Figura 3.10 – Curva de 90° com gomos

3.3.1. Medições de pressão

Visando garantir a confiabilidade dos dados coletados, antes de cada série de medições, foi verificada a estanqueidade do equipamento em suas conexões e acoplamentos, já que um vazamento gera perda de pressão e causa interferência nos dados. As perdas de carga foram obtidas com o uso do Balanço de Energia Mecânica (Equação 2.7 da revisão bibliográfica) entre os pontos 1 e 2, referentes às marcações 9 e 11 da Figura 3.1.

Entre os pontos estudados não há trabalho de eixo e variação de diâmetro interno, então os termos de trabalho e energia cinética são anulados. O valor do desnível é irrisório em relação às pressões indicadas pelo manômetro, visto que o fluido analisado é o ar. Portanto a perda de carga nesse sistema é igual à diferença de pressão entre os dois pontos analisados, medidas no banco de manômetros (Figura 3.11).



Figura 3.11 – Banco de Manômetros do tipo tubo em U.

3.3.2. Coeficiente multiplicador da carga cinética

O multiplicador da carga cinética (K) foi obtido pela equação geral das perdas localizadas (Equação 3.16). Como a perda de carga foi medida metros de coluna d'água (mca), foi adicionado à equação a relação entre o peso específico do ar (γ_{ar}) e o peso específico da água (γ_{H_2O}), a fim de uniformizar as unidades, resultando em um coeficiente K adimensional.

$$\ell_{\omega} = K \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{\gamma_{ar}}{\gamma_{H_2O}} \quad (3.16)$$

Sendo:

ℓ_{ω} a perda de carga (mca);

K o coeficiente multiplicador da carga cinética, adimensional;

v a velocidade do ar (m/s);

g a aceleração da gravidade (m/s²);

γ_{ar} o peso específico do ar (kgf/m³);

γ_{H_2O} o peso específico da água (kgf/m³).

3.3.3. Distribuição de partículas

A distribuição de partículas foi realizada com o auxílio de um dispositivo confeccionado em alumínio com nove tubos de seção quadrada. O dispositivo coletor está representado na Figura 3.12.

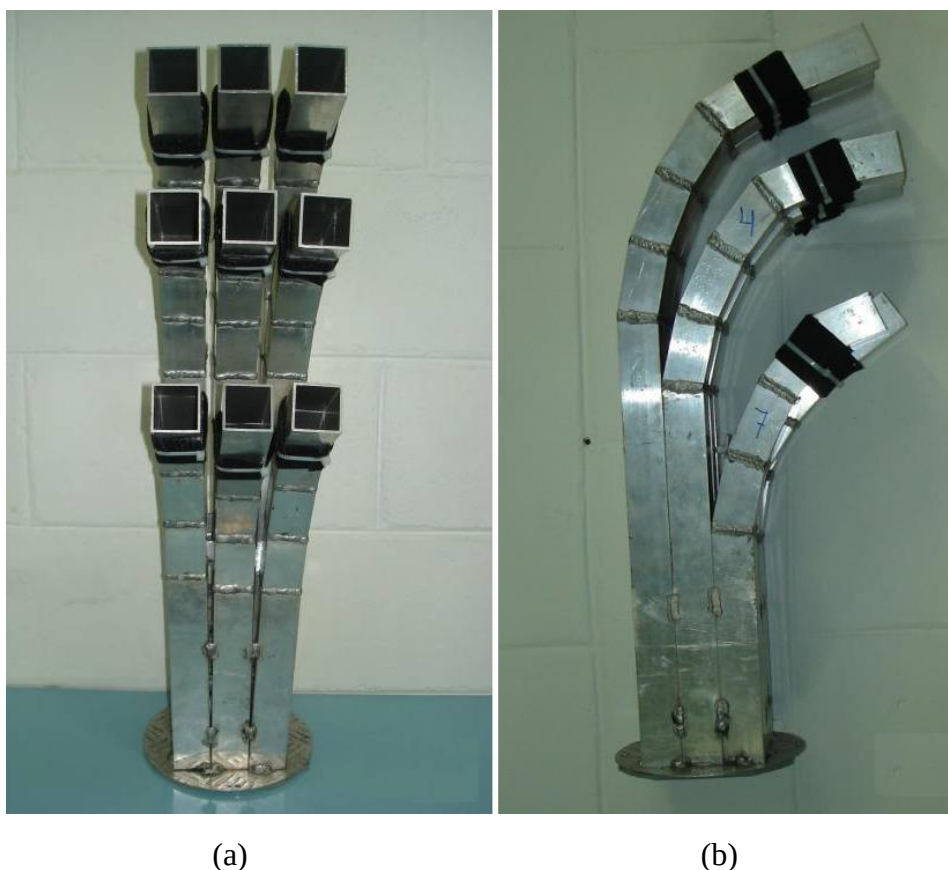


Figura 3.12 – Coletor de sólido: a) vista frontal; b) vista lateral.

Nove sacos confeccionados de redes de tule foram fixos por velcro nas saídas dos tubos de seção quadrada para posterior quantificação da massa de polipropileno na seção transversal do duto. O dispositivo coletor foi acoplado à tubulação no trecho vertical a jusante da singularidade a fim de analisar a influência da mesma na distribuição das partículas de polipropileno. O dispositivo possui seção quadrada e o transportador seção circular, portanto a área efetiva do transportador ficou alterada como demonstra a Figura 3.13. Foi necessário então, o cálculo das áreas de cada uma das nove divisões do coletor.

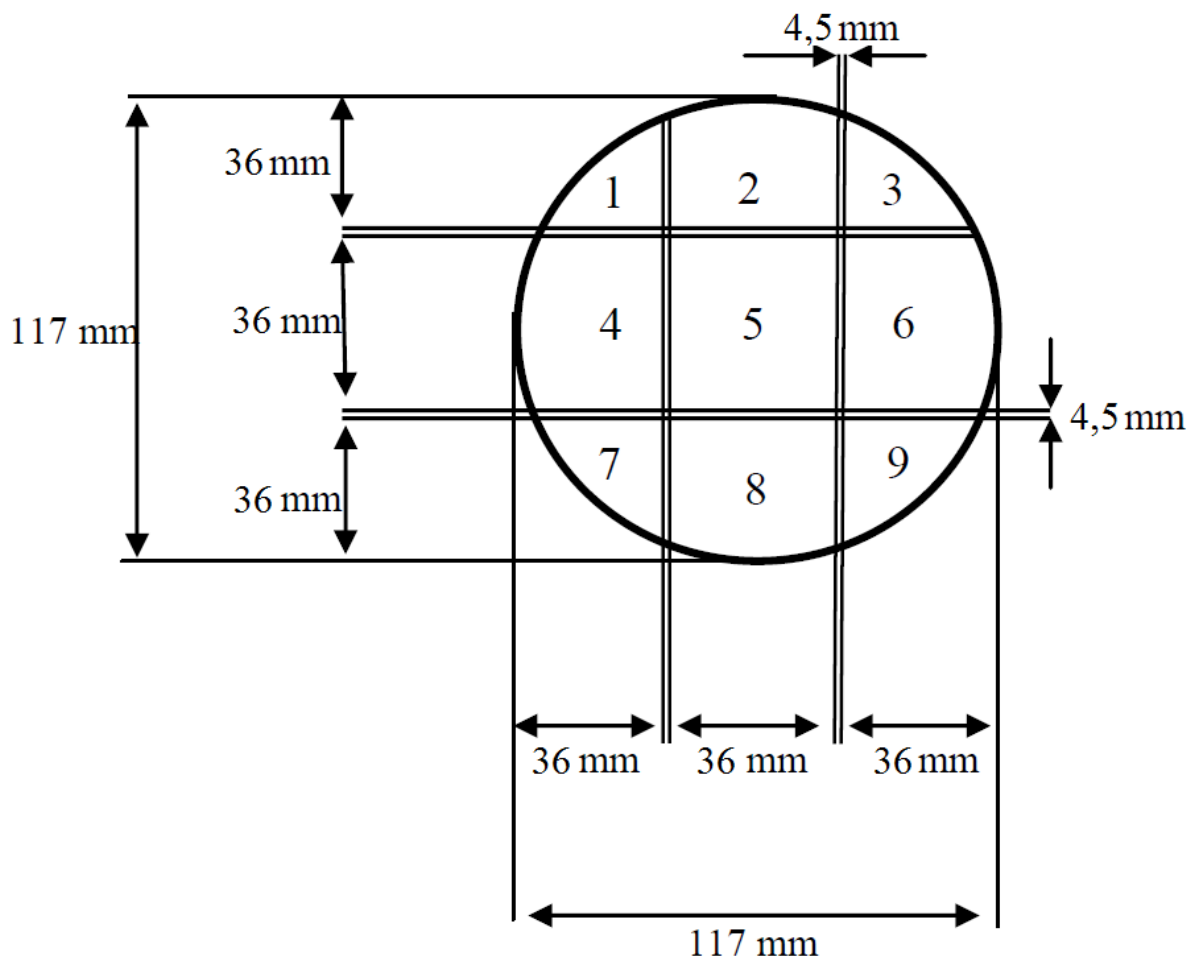


Figura 3.13 – Área efetiva do coletor. Adaptada de Santos (2009)

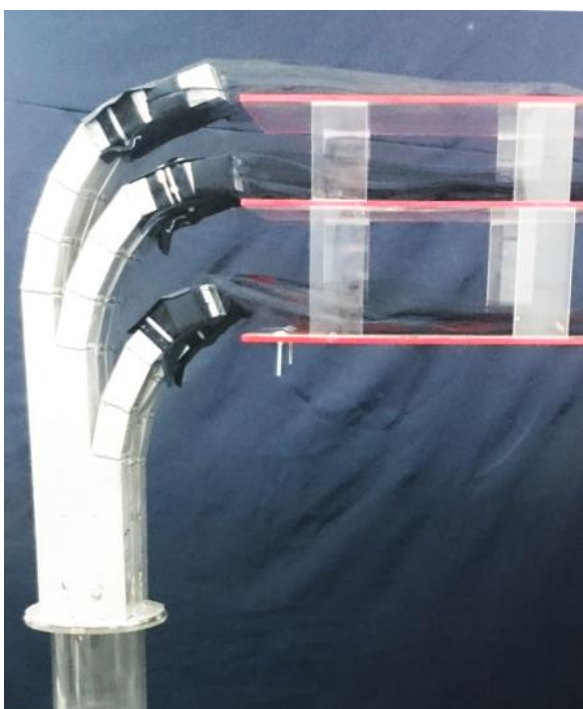
As áreas das nove seções do distribuidor estão disponíveis na Tabela 3.2 e seu cálculo realizado pelo método desenvolvido por Santos (2009):

- a) Uma folha de papel cartão foi fixada ao dispositivo;
- b) Foram riscadas com grafite as divisões do coletor;
- c) As divisões marcadas foram recortadas, dividindo-se o papel em pedaços referentes às nove seções do dispositivo, pesando-se as suas massas;
- d) Um pedaço de papel cartão de dimensões 21x21cm foi pesado;
- e) As áreas das seções foram calculadas pela razão entre suas massas individuais e a massa do papel de área conhecida.

Tabela 3.2 – Áreas das nove seções do coletor.

Seção	Área calculada (cm²)
1	7,47
2	13,78
3	6,89
4	15,50
5	16,08
6	15,50
7	8,61
8	14,93
9	8,61

Com o dispositivo instalado conforme Figura 3.14, foram realizados os ensaios nas velocidades de 10,3 e 18,9 m/s e as vazões de sólido utilizadas no estudo do coeficiente K, de 113,8; 218,5 e 327,5 kg/h. Os ensaios foram repetidos para cada singularidade (tê saída de lado sem prolongamento e com prolongamentos de 30, 6 e 90 mm e curva de 90° com gomos) utilizando-se toda a massa contida no silo, de aproximadamente 4 kg. Os recipientes acoplados no dispositivo permitiram pesar as massas coletadas em cada seção. Pelas diferenças entre as áreas das divisões, se tornou necessário dividir as massas de polipropileno em cada recipiente pelas áreas das respectivas seções para que se possa comparar os valores de massa entre si.

**Figura 3.14 – Dispositivo coletor e recipientes acoplados às seções.**

Foi calculada pela Equação 3.17 a fração percentual mássica dos sólidos por unidade de área (F_m) para elaboração de gráficos da distribuição na seção transversal da tubulação vertical a jusante da singularidade e gerado um desvio padrão para cada ensaio.

$$F_m = \frac{M_{ai}}{\sum M_a} \cdot 100 \quad (3.17)$$

Em que:

F_m é a fração percentual mássica;

M_{ai} é a massa por unidade de área (g/cm^2);

$\sum M_a$ é a somatória das massas por unidade de área (g/cm^2).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Perda de carga

Os dados obtidos nos ensaios e resultados dos cálculos descritos no trabalho são fornecidos pelas tabelas de A.1 a A.20 (Apêndice A). As Figuras de 4.1 a 4.5 fornecem as curvas da perda de carga em mmca gerada pelas singularidades estudadas em função da velocidade de ar, para as vazões de sólido de zero, 113,8, 218,5 e 327,5 kg/h de polipropileno granulado.

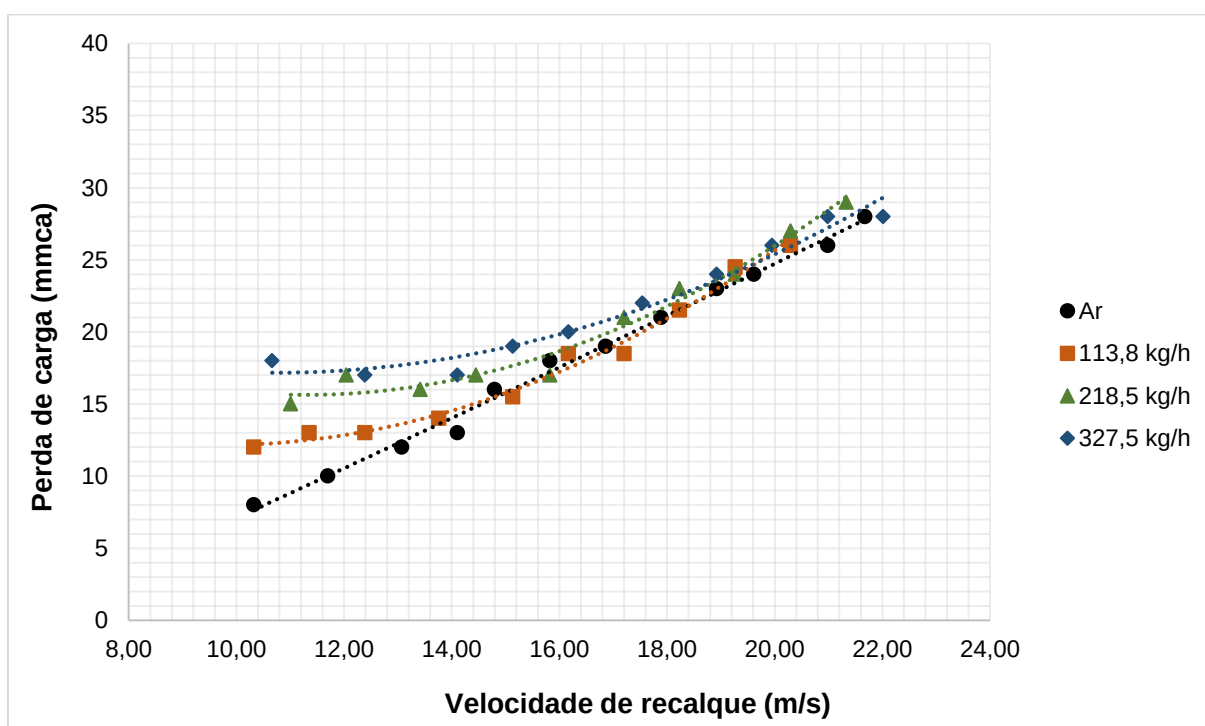


Figura 4.1 – Perda de carga em função da velocidade para o tê sem prolongamento.

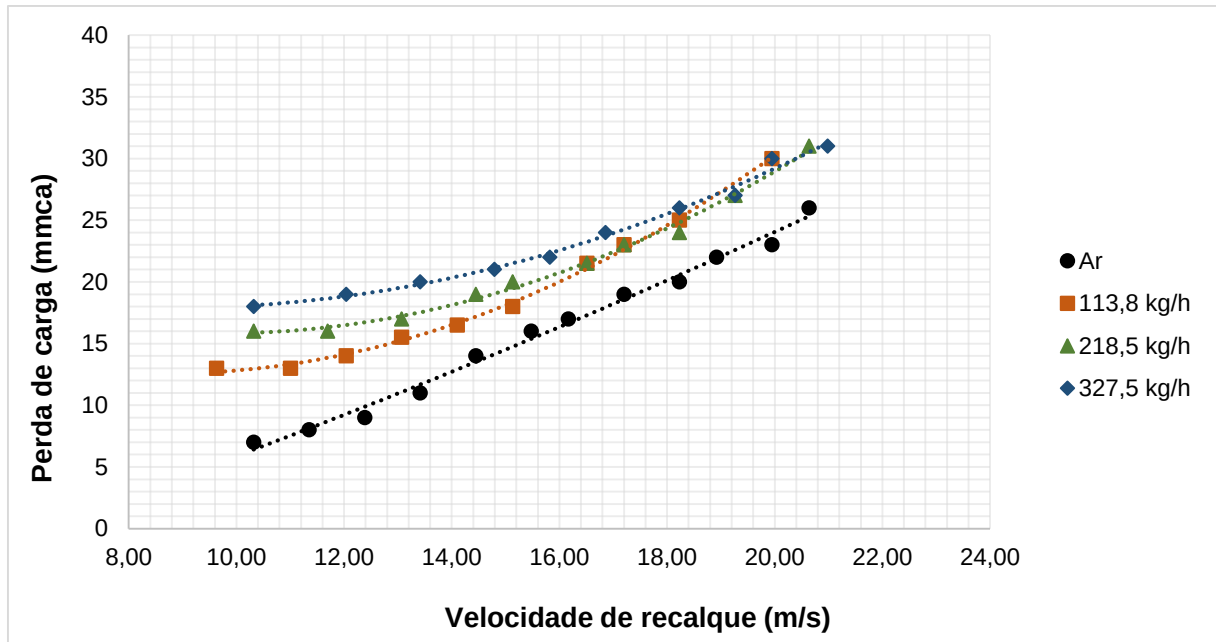


Figura 4.2 – Perda de carga em função da velocidade para o tê com prolongamento de 30 mm.

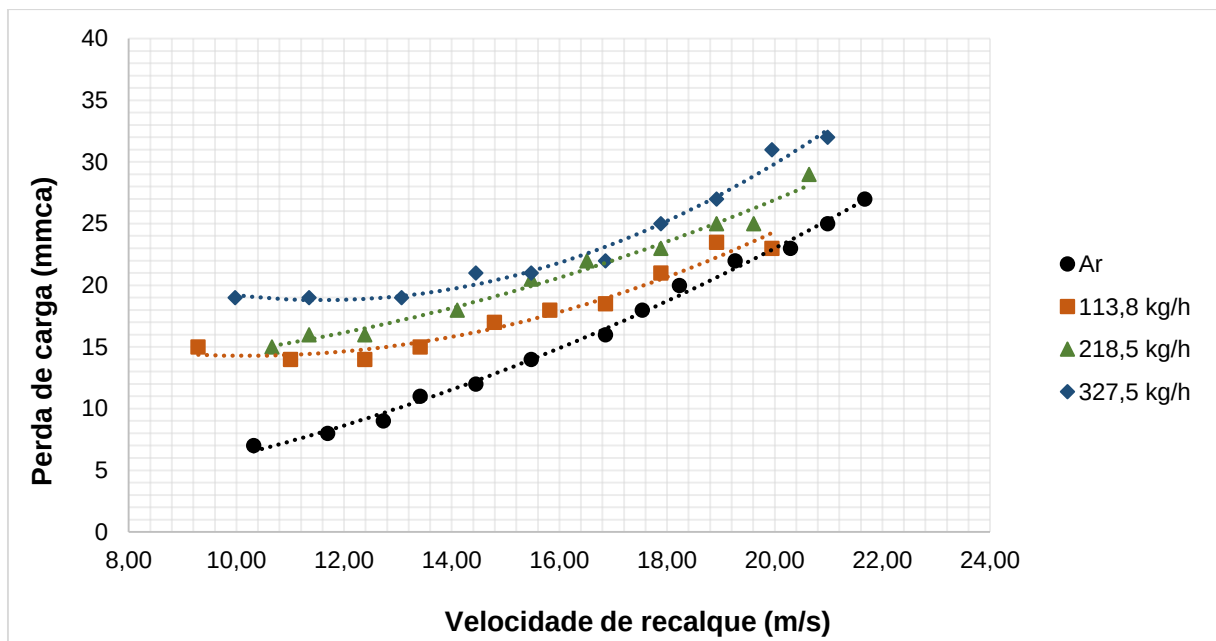


Figura 4.3 – Perda de carga em função da velocidade para o tê com prolongamento de 60 mm.

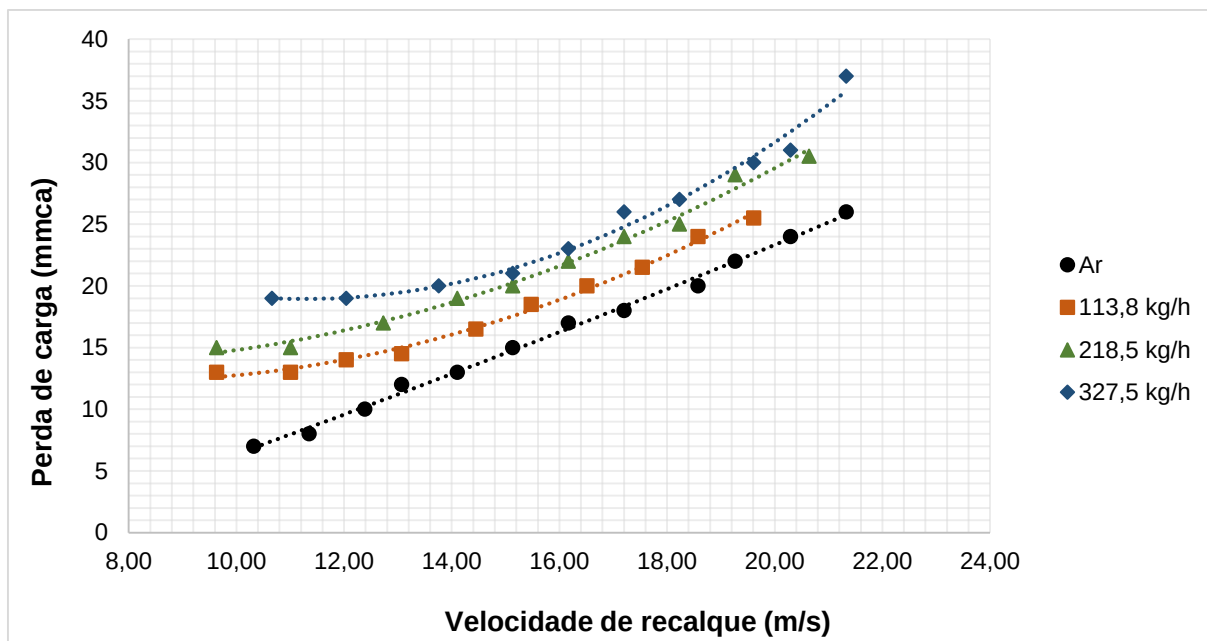


Figura 4.4 – Perda de carga em função da velocidade para o tê com prolongamento de 90 mm.

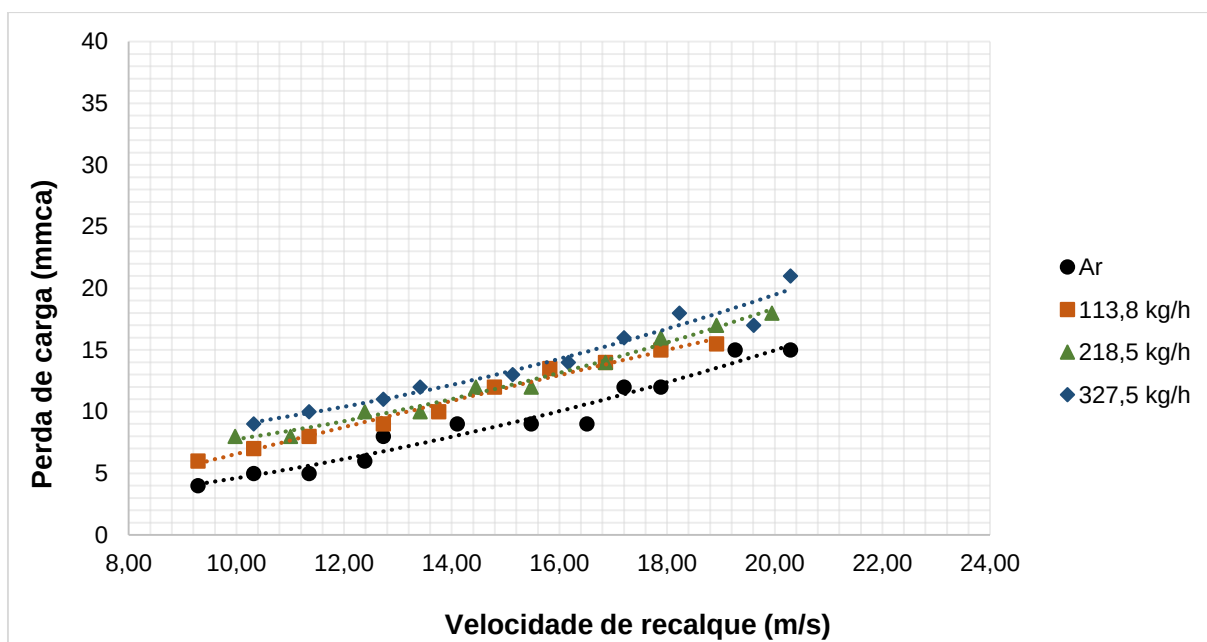


Figura 4.5 – Perda de carga em função da velocidade para curva de 90° com gomos

As Figuras de 4.1 a 4.5 permitem observar que a perda de carga no transporte pneumático sofre influência direta da velocidade de ar. Quanto maior a velocidade, maior a perda de carga gerada pela singularidade. Isto ocorre com as cinco singularidades estudadas.

4.2. Coeficiente K

As curvas do coeficiente multiplicador da carga cinética (K) obtido experimentalmente nas condições supracitadas para os tês sem prolongamento, com prolongamento de 30, 60 e 90 mm e para a curva de 90° com gomos respectivamente, nas três vazões de sólido estudadas e somente com ar, são representadas pelas Figuras de 4.6 a 4.10.

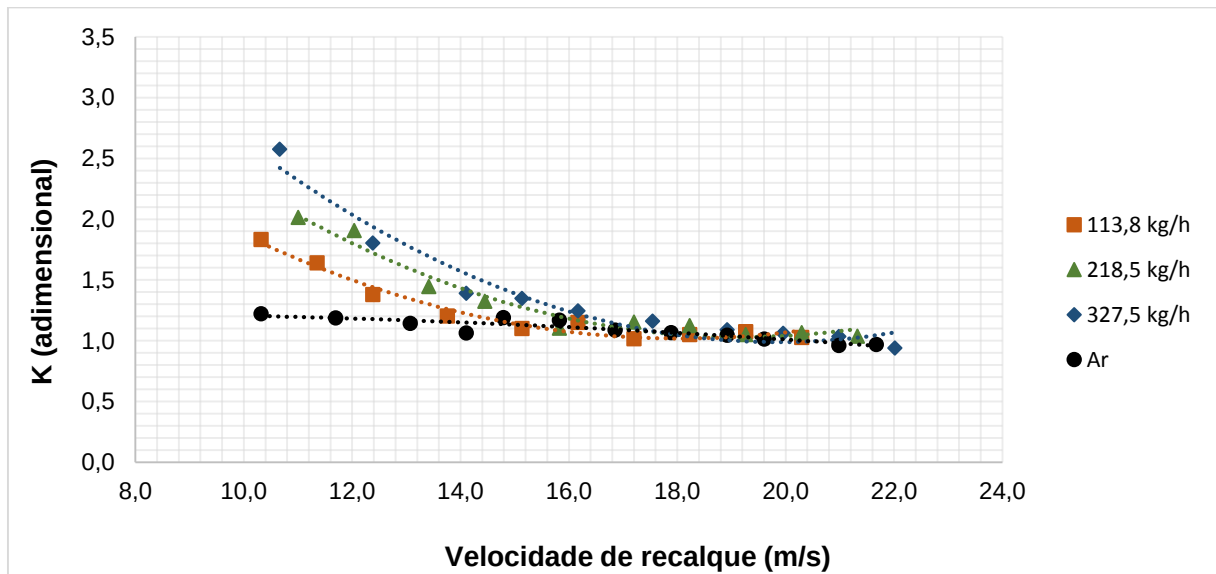


Figura 4.6 – Coeficiente K em função da velocidade para o tê sem prolongamento.

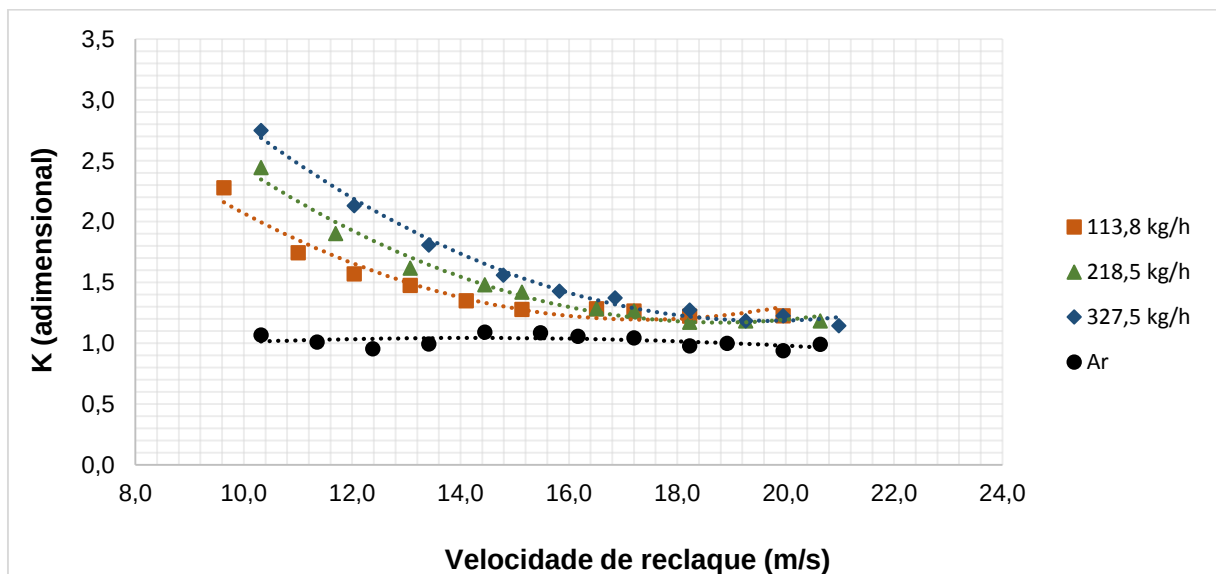


Figura 4.7 – Coeficiente K em função da velocidade para o tê com prolongamento de 30 mm.

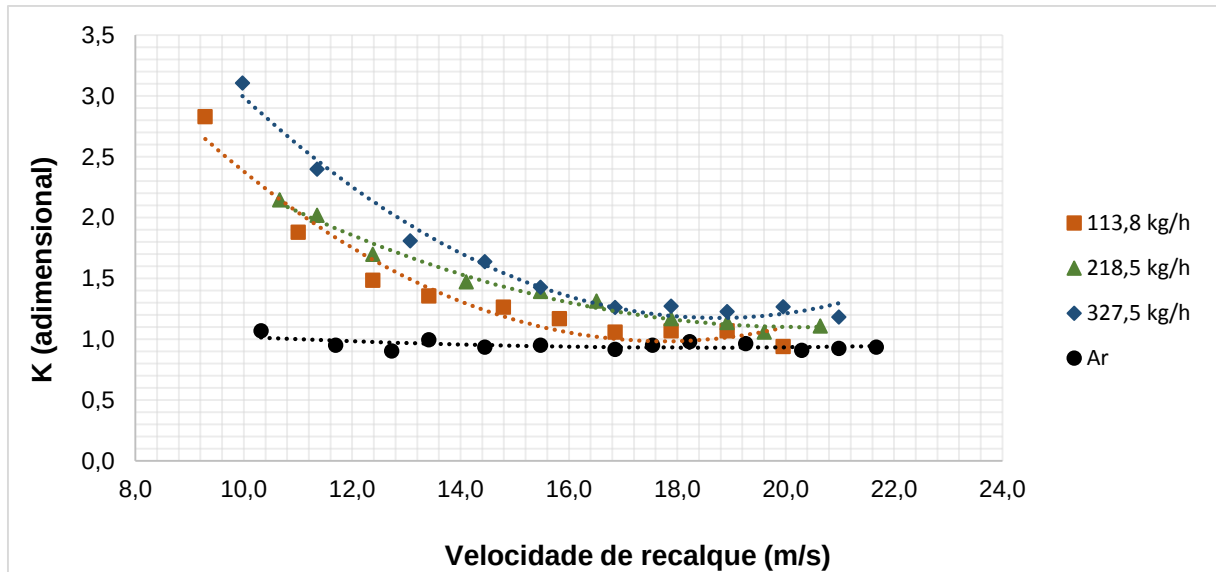


Figura 4.8 – Coeficiente K em função da velocidade para o tê com prolongamento de 60 mm.

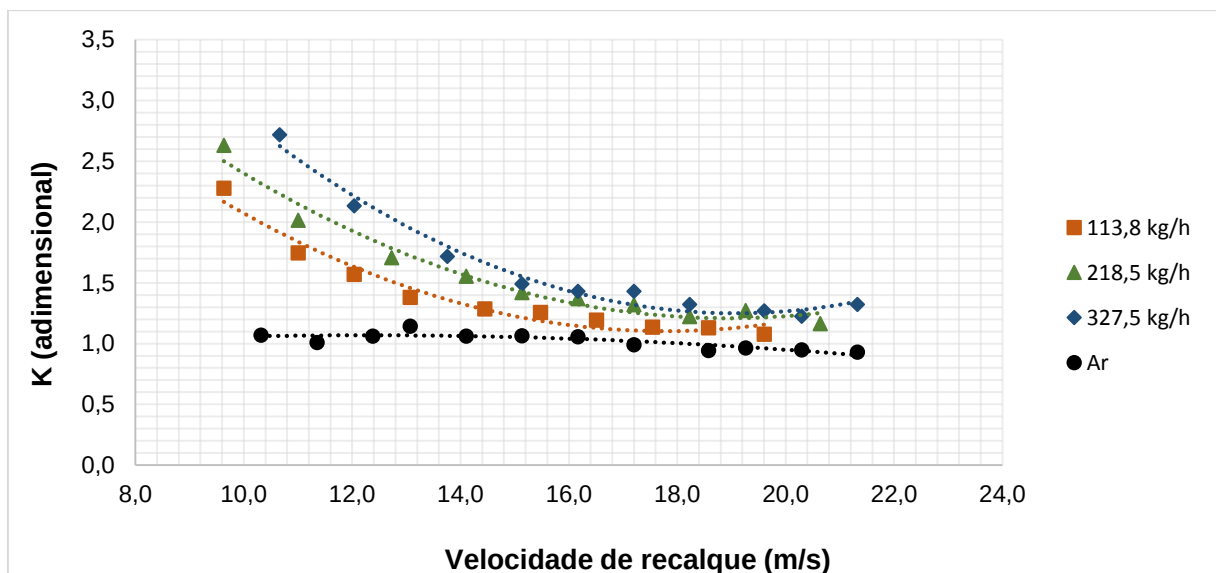


Figura 4.9 – Coeficiente K em função da velocidade para o tê com prolongamento de 90 mm.

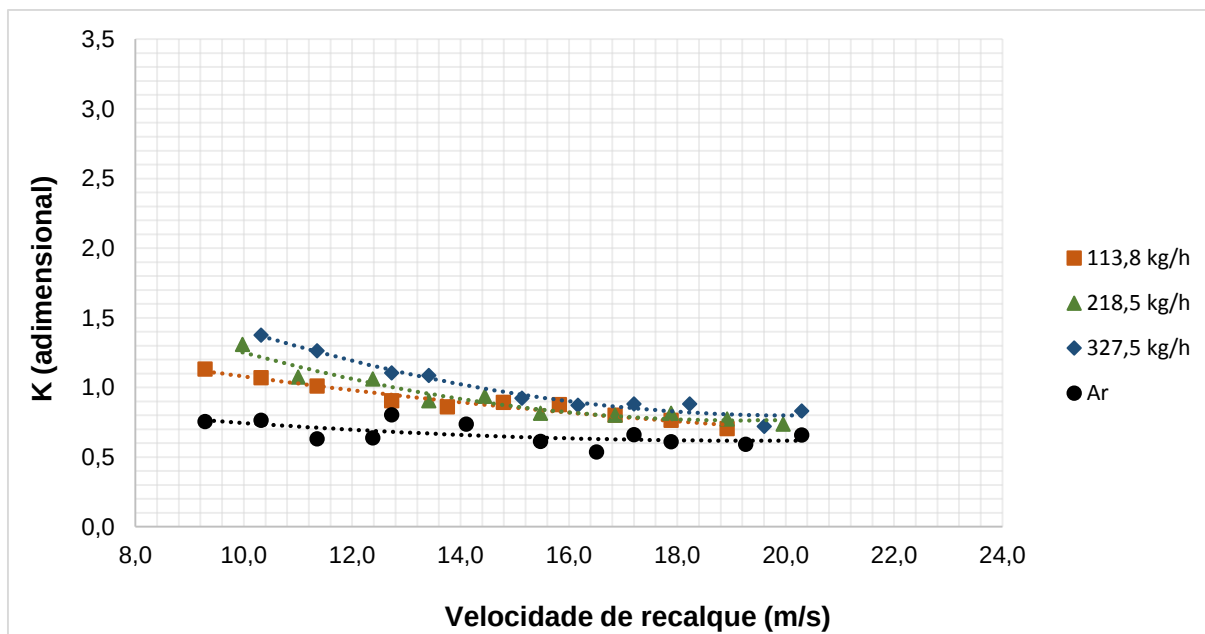


Figura 4.10 – Coeficiente K em função da velocidade para a curva de 90° com gomos.

Ao observar as Figuras de 4.6 a 4.10, notou-se que aumentando-se a velocidade de ar com a vazão de sólido fixada, o K obtido pelos ensaios com vazões de sólido tende a se aproximar do K obtido pelo ensaio apenas com ar. Isto ocorre porque a vazão de ar aumenta e a fração de sólido no transporte diminui, assim o comportamento do escoamento tende a se aproximar do escoamento apenas de ar. Também observa-se que o coeficiente K para o Tê saída de lado mantém o mesmo comportamento independentemente do prolongamento instalado. Para confirmar isto estatisticamente, foi realizado um teste de Tukey da diferença significativa. Este teste comparou os valores de K obtidos nos ensaios com Tê sem prolongamento e com os prolongamentos de 30, 60 e 90mm entre si, nomeados de k1, k2, k3 e k4 respectivamente. O gráfico do teste de Tukey está representado na Figura 4.11.

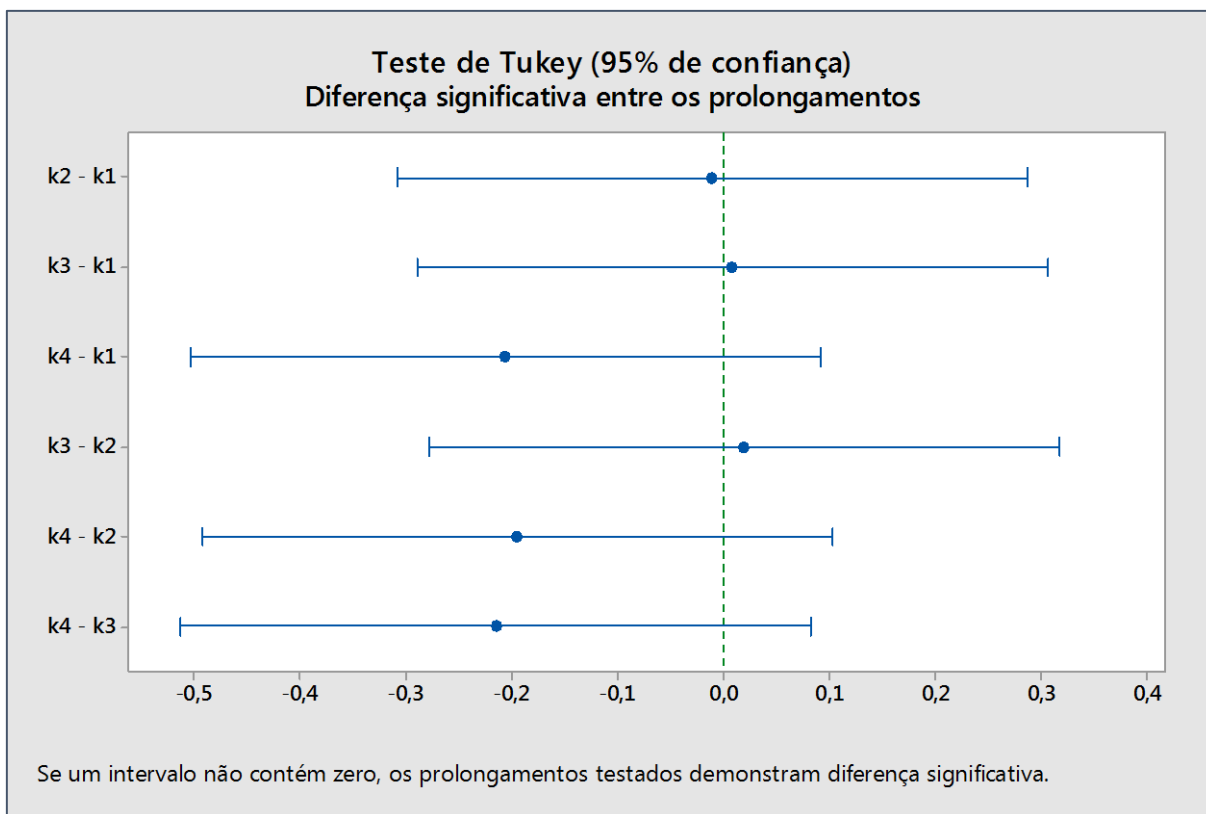


Figura 4.11 – Teste de Tukey da diferença significativa.

Como todos os intervalos cruzam a linha do zero, significa que, com 95% de confiança, nenhum dos prolongamentos demonstraram diferença significativa entre si de acordo com os dados coletados, ou seja, o tamanho do prolongamento não interfere no valor do K para o tê saída de lado no transporte pneumático nas condições estudadas. Sendo a influência dos prolongamentos no coeficiente K não significativa, como mostrou o teste de Tukey, foram adotados todos os pontos obtidos nos ensaios com o tê e os três prolongamentos a fim de gerar uma única curva. Esta curva geral pode ser observada na Figura 4.12.

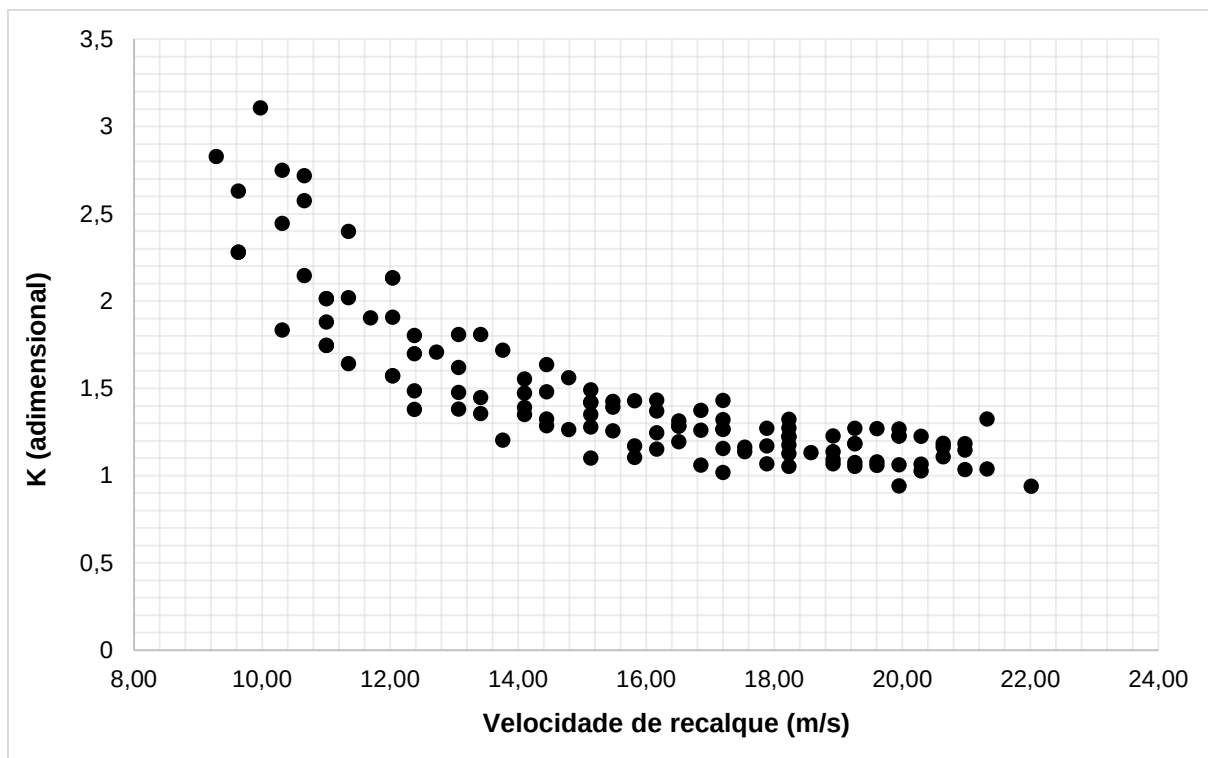


Figura 4.12 – Curva geral do K para o tê saída de lado.

Também foi possível gerar uma equação que abrange os valores da curva geral do coeficiente K. A fim de se obter maior precisão e confiabilidade da equação, foram excluídos do modelo os valores de K referentes às velocidades inferiores a 12 m/s, visto que os pontos tendem a se estabilizar a partir desta velocidade. A Figura 4.13 demonstra a equação gerada e a faixa de predição do modelo com 95% de confiança, como também os resíduos gerados pelo modelo.

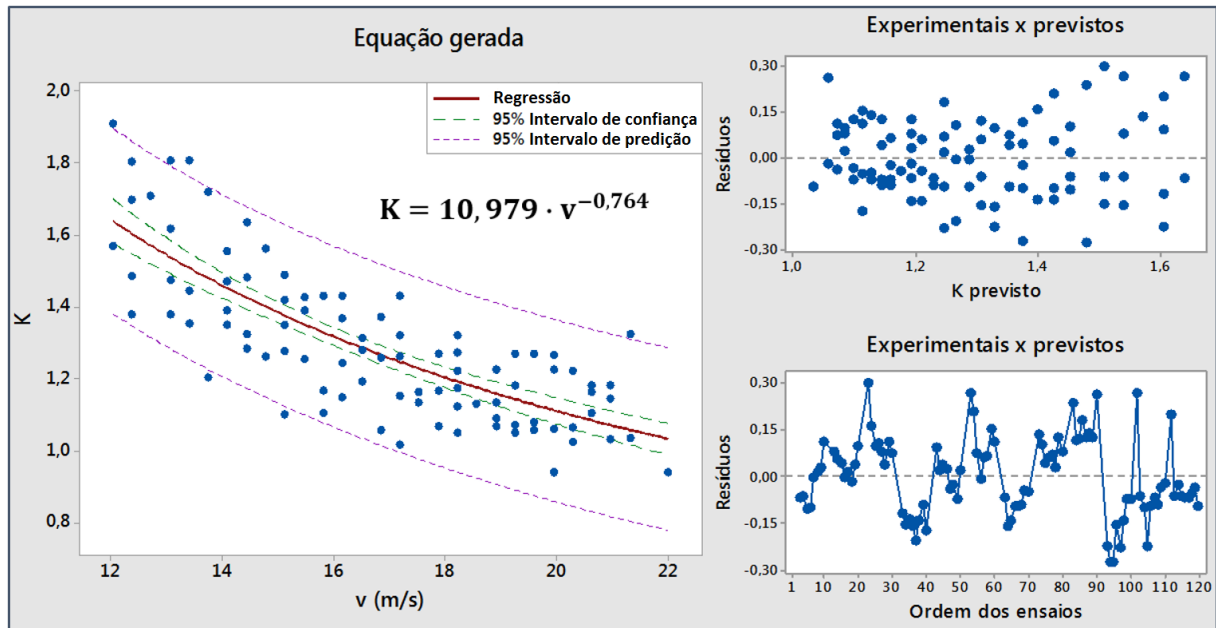


Figura 4.13 – Equação do K em função da velocidade, para o Tê saída de lado, e os resíduos gerados pelo modelo.

Pode-se observar na Figura 4.13 que alguns pontos ficaram fora do intervalo de predição do modelo, e também que alguns resíduos ficaram próximos a $\pm 0,3$. Com o objetivo de melhorar o modelo e aumentar sua confiabilidade, foram estatisticamente descartados os pontos que geraram maiores resíduos, permitindo recalcular a equação do modelo. A Figura 4.14 representa a nova equação gerada após o tratamento estatístico dos dados, na qual os pontos permanecem dentro do seu intervalo de predição e os resíduos gerados estão inferiores a $\pm 0,2$.

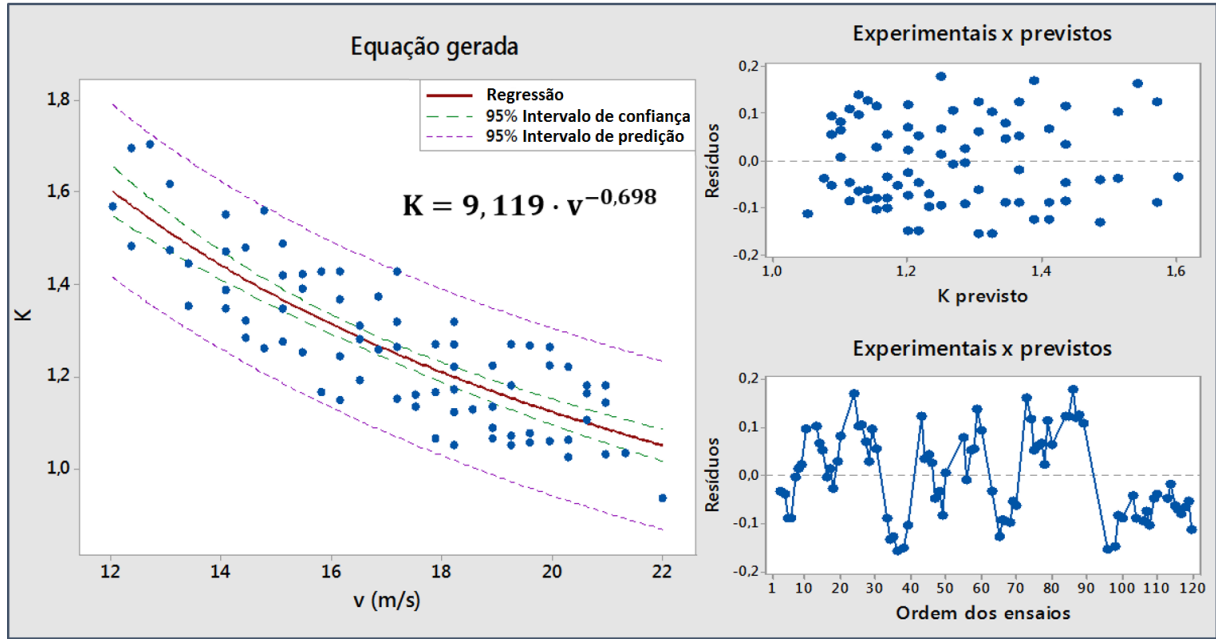


Figura 4.14 – Equação do coeficiente K em função da velocidade, para o tê saída de lado após tratamento dos dados, e os resíduos gerados pelo modelo.

O mesmo procedimento foi realizado para a curva de 90° com gomos, gerando também uma equação da curva da potência demonstrada na Figura 4.15. Pode-se observar que os resíduos gerados para a curva de 90° com gomos também são menores que $\pm 0,2$. Portanto, as Equações 4.1 e 4.2 propostas pelo presente trabalho calculam o fator multiplicador da carga cinética para o transporte pneumático em fase diluída de polipropileno com diâmetro de partícula médio de 4,5mm.

$$K = 9,119 \cdot v^{-0,698} \quad [\text{tê saída de lado, } (12\text{m/s}) < v < (22\text{m/s})] \quad (4.1)$$

$$K = 5,977 \cdot v^{-0,697} \quad [\text{curva de } 90^\circ \text{ com gomos, } (9,29\text{m/s}) < v < (20,3\text{m/s})] \quad (4.2)$$

Sendo assim, a perda de carga promovida por estas singularidades pode ser calculada pelas Equações de 4.3 até 4.6.

$$\ell\omega = (9,119 \cdot v^{-0,698}) \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (4.3)$$

$$\ell\omega = 9,119 \cdot \frac{v^{1,302}}{2g} \quad [\text{tê saída de lado, } (12\text{m/s}) < v < (22,02\text{m/s})] \quad (4.4)$$

$$\ell\omega = (5,977 \cdot v^{-0,697}) \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (4.5)$$

$$\ell\omega = 5,977 \cdot \frac{v^{1,302}}{2g} \quad [\text{curva de } 90^\circ \text{ com gomos, } (9,29\text{m/s}) < v < (20,3\text{m/s})] \quad (4.6)$$

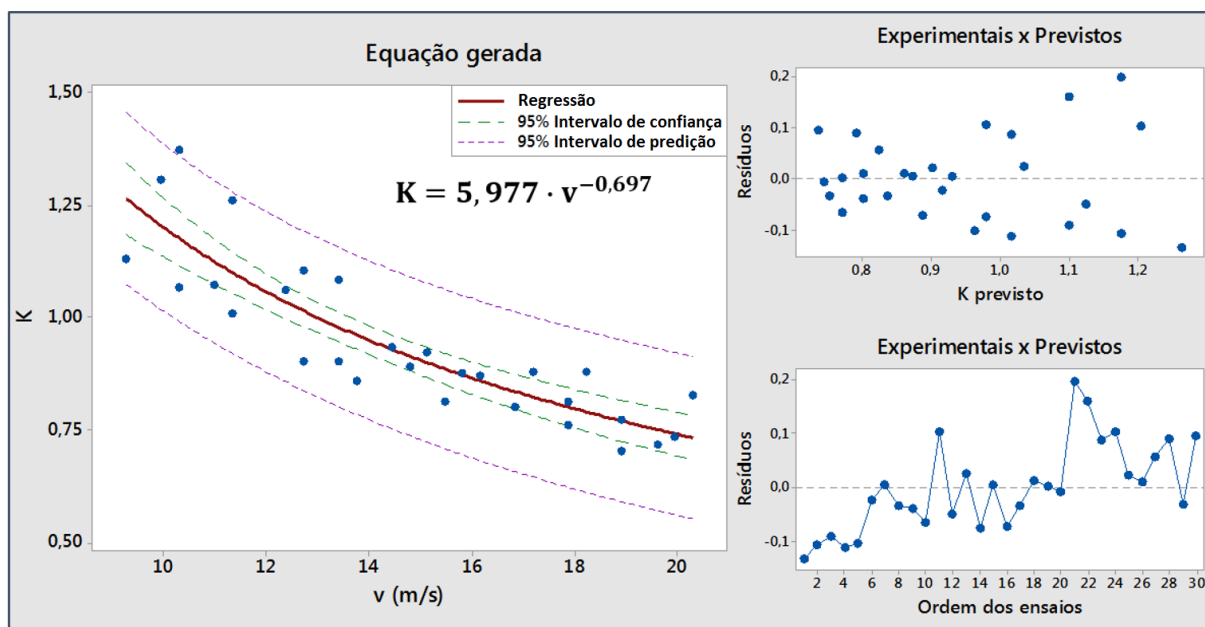


Figura 4.15 – Equação do coeficiente K em função da velocidade, para a curva de 90° com gomos.

O coeficiente K calculado a partir das equações geradas, para velocidade de 12 e 20 m/s, por exemplo, é demonstrado nas Equações 4.5 e 4.6 para o tê saída de lado e nas Equações 4.7 e 4.8 para a curva de 90° com gomos.

$$K = 9,119 \cdot 12^{-0,698} = 1,61 \quad (4.5)$$

$$K = 9,119 \cdot 20^{-0,698} = 1,13 \quad (4.6)$$

$$K = 5,997 \cdot 12^{-0,697} = 1,06 \quad (4.7)$$

$$K = 5,997 \cdot 20^{-0,697} = 0,74 \quad (4.8)$$

A Tabela 2.4 da revisão bibliográfica apresenta valores de K para número de Reynolds maior que 50000. A fim de comparar os valores de K calculados com o tabelado fornecido pela literatura, foi determinado o número de Reynolds (condição para emprego da tabela) pela Equação 4.9 com a menor velocidade dos ensaios, de 9,29 m/s, e viscosidade (μ) do ar a 22°C de $18,272 \cdot 10^{-6}$ kg/ms.

$$Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu} = \frac{0,117m \cdot 9,29 \frac{m}{s} \cdot 1,214 \frac{kg}{m^3}}{18,272 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{ms}} = 72216,1 > 50000 \quad (4.9)$$

O valor de K para o tê saída de lado fornecido pela Tabela 2.4 é 1,00 e os calculados com velocidades exemplares de 12 e 20m/s são 1,61 e 1,13 respectivamente. Indicando que a uma velocidade de 12m/s, o K obtido experimentalmente é 61% maior que o tabelado e a 20 m/s, o K experimental é 13% maior que o fornecido. Um desvio de 61% nos cálculos da perda de carga causada pela singularidade pode comprometer o projeto de um transportador, quando há uma grande quantidade de singularidades ao longo da linha, levando possivelmente à seleção de equipamentos de menor eficiência para a aplicação.

4.3. Distribuição de partículas

Os resultados dos ensaios de distribuição de partículas na seção transversal do duto vertical após o tê e prolongamentos de 30, 60 e 90 mm e com a curva 90° com gomos, nas vazões de sólido de 113,8, 218,5 e 327,5 kg/h e velocidades de 10,3 e 18,9 m/s, estão disponibilizados nas Figuras de 4.16 a 4.20. Os valores representados são referentes às frações percentuais das massas pelas correspondentes áreas. Fornecem também o desvio padrão gerado em cada ensaio, que permitiu comparar as distribuições entre as singularidades estudadas. Pôde-se observar que os desvios padrões dos ensaios com o tê e seus prolongamentos tiveram os valores mínimo de 3,86% e máximo de 4,98% considerando-se todas as vazões e velocidades, que não demonstraram diferença significativa entre si. Já os desvios padrões para a curva de 90° em gomos tiveram grande variação devido à velocidade de ar, atingindo 5,70% para a velocidade de 10,3 m/s e 2,02% para a velocidade de 18,9 m/s.

Os grãos de polipropileno transportados foram melhor distribuídos na seção transversal da tubulação após a curva de 90° em gomos em comparação com o tê saída de lado, ao se utilizar a velocidade de ar de 18,9 m/s. Transportando-se com velocidade de 10,3 m/s não foi possível comparar a distribuição de sólidos entre o tê

saída de lado e a curva de 90° em gomos, visto que os valores de desvio padrão oscilaram nos ensaios da cruva de 90° em gomos.

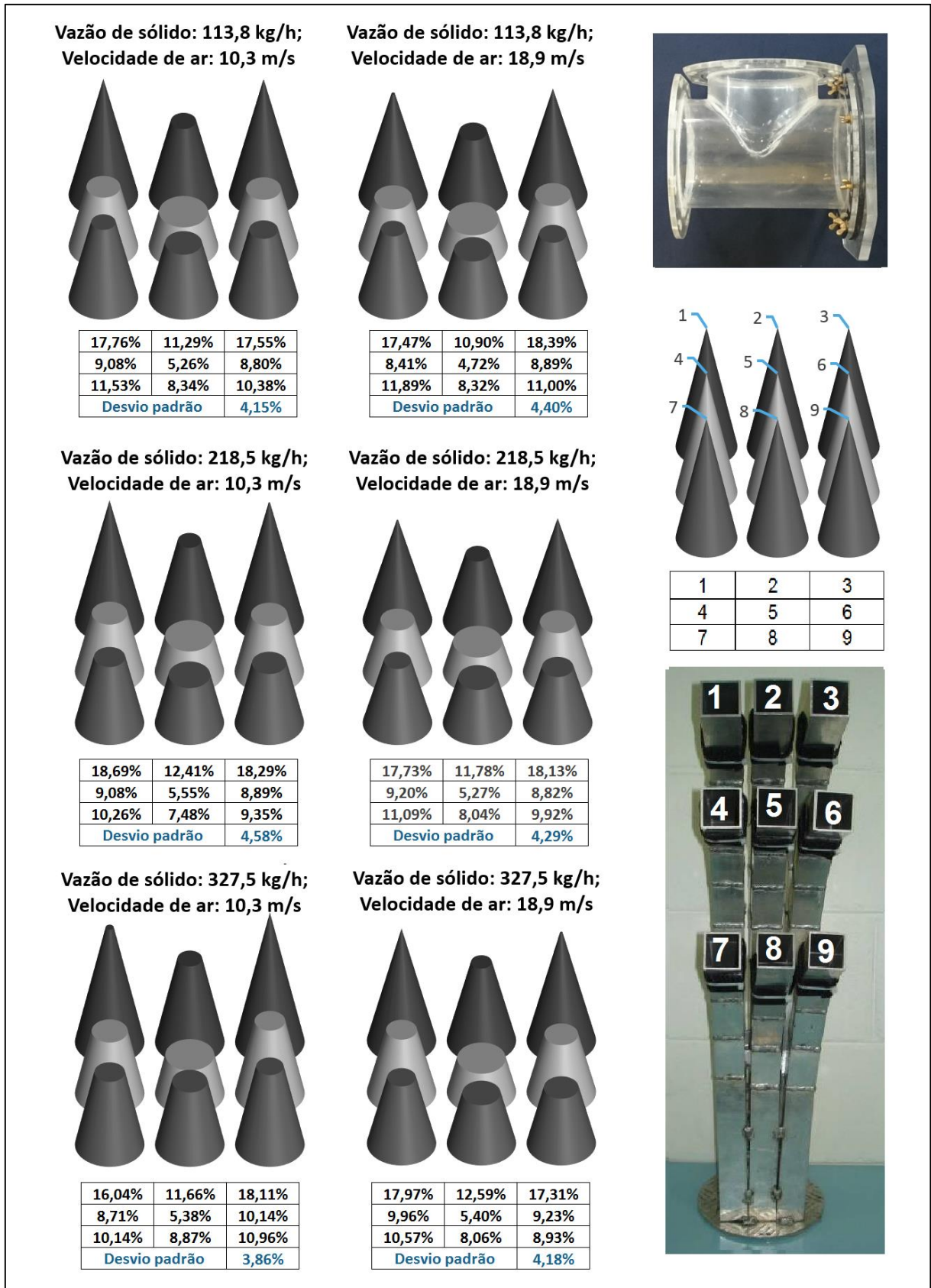


Figura 4.16 – Distribuição de partículas para o tê sem prolongamento.

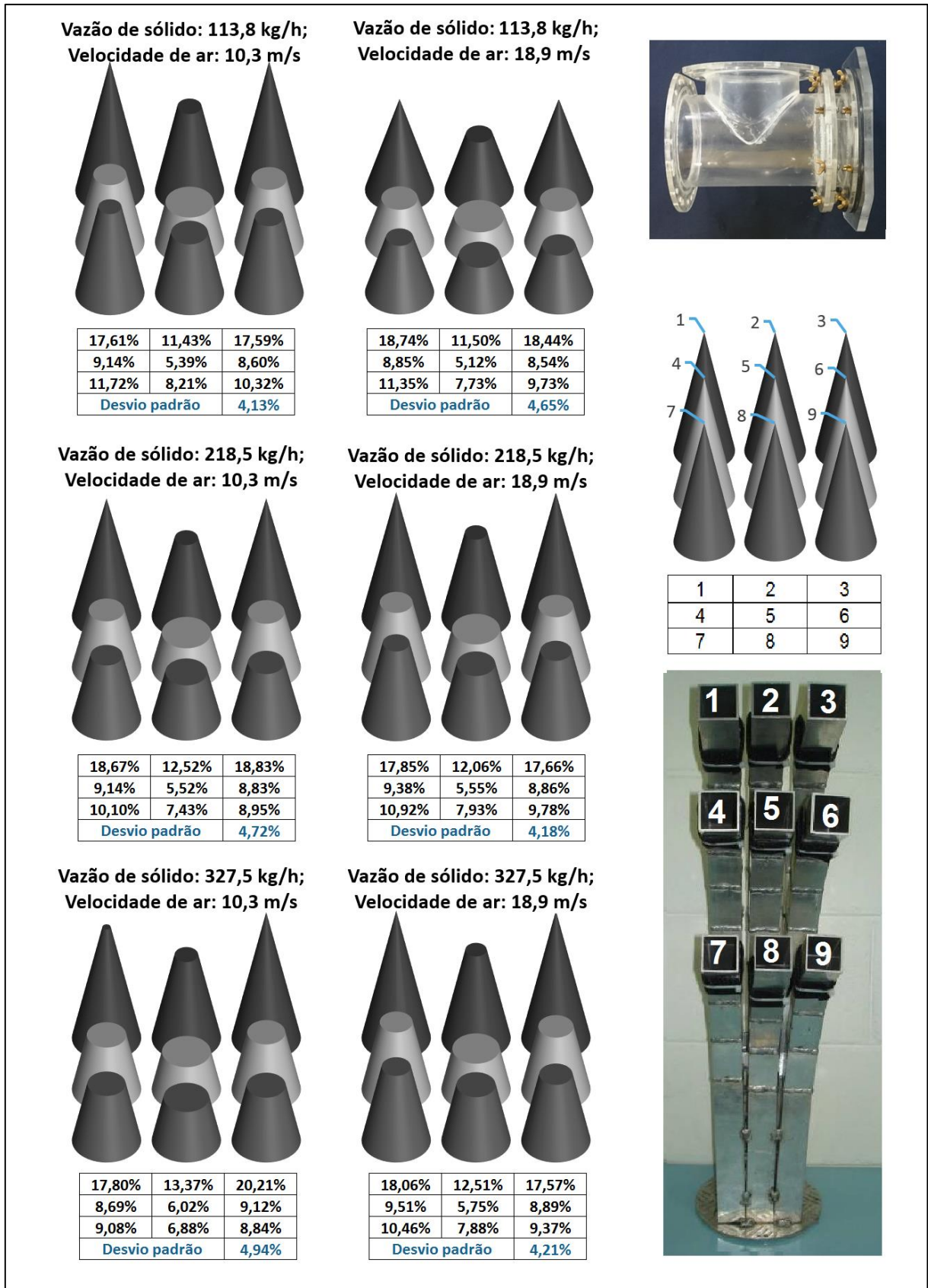


Figura 4.17 – Distribuição de partículas para o tê com prolongamento de 30mm.

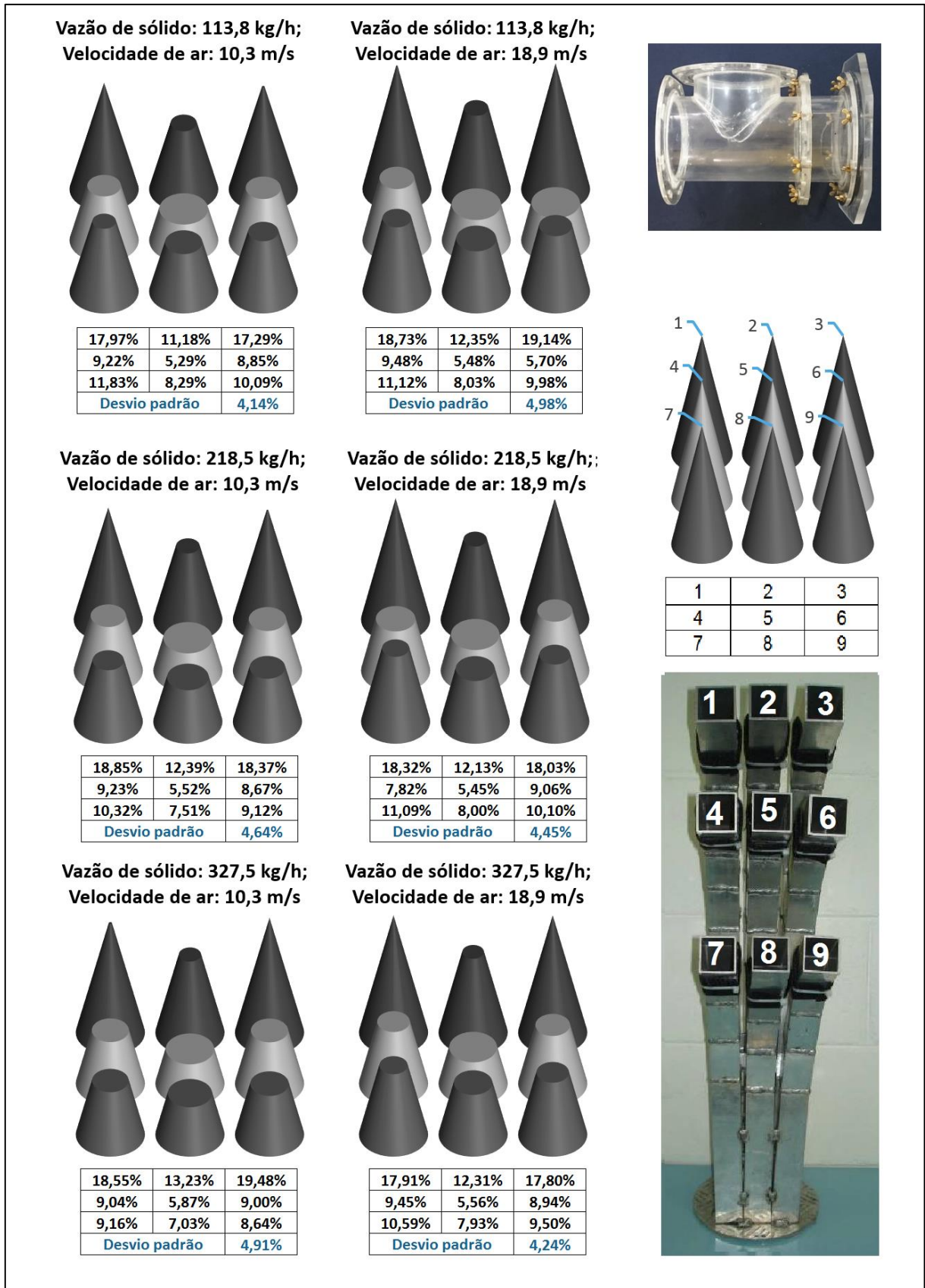


Figura 4.18 – Distribuição de partículas para o tê com prolongamento de 60mm.

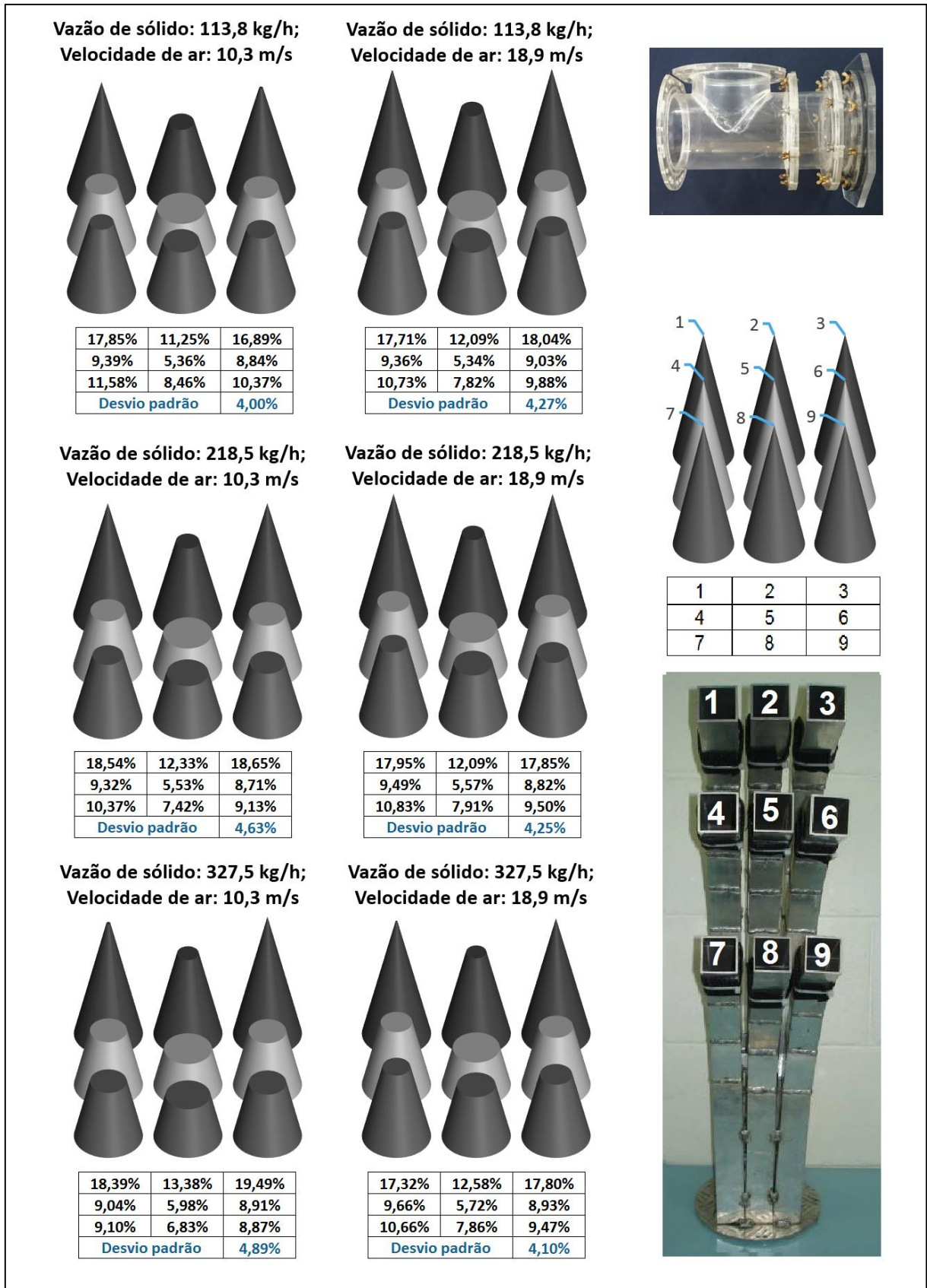


Figura 4.19 – Distribuição de sólidos para o tê com prolongamento de 90mm.

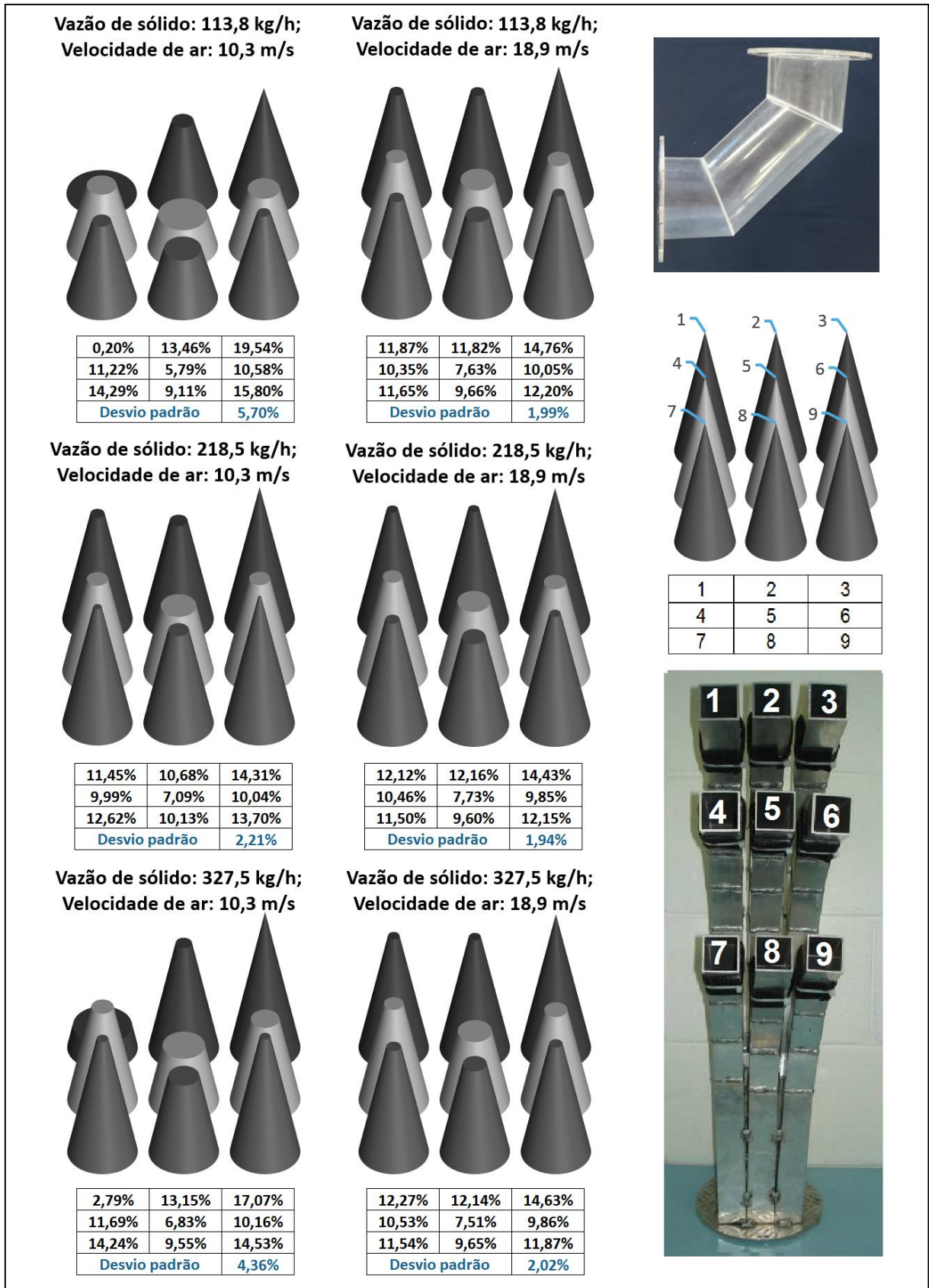


Figura 4.20 – Distribuição de partículas para a curva de 90° com gomos.

5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Os estudos realizados permitiram concluir que:

- a) O prolongamento da singularidade tê saída de lado não demonstrou influência significativa no coeficiente da carga cinética K para o transporte pneumático de polipropileno.
- b) Foi gerada a partir dos dados experimentais a equação “ $K = 9,119 \cdot v^{-0,698}$ ”, que prevê o K para o tê saída de lado com 95% de confiança para velocidades de transporte entre 12 e 22,02 m/s e vazões de sólido entre 113,8 e 327,5 kg/h.
- c) Foi gerada também a equação “ $K = 5,977 \cdot v^{-0,697}$ ” que prevê o coeficiente K para a curva de 90° com gomos com 95% de confiança para velocidades de transporte entre 9,29 e 20,30 m/s e vazões de sólido entre 113,8 e 327,5 kg/h.
- e) A distribuição de partículas no trecho vertical a jusante do tê saída de lado não sofre influência do prolongamento instalado e/ou da velocidade de ar e vazão de sólidos, obtendo desvios padrões que variam de 3,86 a 4,98% para as velocidades de 10,3 e 18,9 m/s e vazões de sólido de 113,8, 218,5 e 327,5 kg/h.
- f) A distribuição de sólidos para a curva de 90° com gomos sofreu influência da velocidade de ar e obteve desvios padrões que oscilaram, atingindo 5,7% para velocidade de 10,3 m/s e 2,02% para a velocidade de 18,9 m/s.
- g) Recomenda-se para o transporte pneumático em fase diluída de polipropileno granulado o emprego de tê saída de lado em trecho horizontal com prolongamento acima de 60 mm visando maior proteção da singularidade, pois formam colchões de sólido mais bem definidos. A distribuição das partículas após o acessório é similar à de uma curva e o aumento da perda de carga gerado pelo emprego do tê saída de lado pode ser quantificado pelas equações obtidas.

Como sugestões de continuidade da pesquisa pode-se citar:

- a) Verificar validade das equações para materiais de diferentes propriedades como milho e soja.

- b) Utilizar velocidades de ar e vazões de sólido mais elevadas, visando obter um modelo com maior aplicabilidade.
- c) Estudar a influência do diâmetro da tubulação sobre o coeficiente da carga cinética.
- d) Modificar o sistema de alimentação de sólido com a finalidade de se obter melhor distribuição de sólidos no trecho horizontal e/ou evitar o acúmulo de partículas em baixas velocidades de transporte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

AFROUGHSABET, V., OZBAKKALOGLU, T.; **Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers**. Construction and Building Materials, vol. 94, p 73-82, 2015.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR-13 CALDEIRAS E VASOS DE PRESSÃO**. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2008. Disponível em: <http://portal.mte.gov.br/data/files/FF8080812BE914E6012BEF2695817E43/nr_13.pdf> Acesso em 08 jul.2015.

ÇENGEL, Y.A., BOLES, M.A.; **Termodinâmica**; McGraw Hill; 7ª edição, 2013; p 908.

COSTA, C. F. F; **Desenvolvimento de um programa de dimensionamento de instalações para transporte pneumático**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.

COUPER, J.R., PENNEY, W.R., FAIR, J.R., WALAS S.M.; **Chemical Process Equipment**; Elsevier; 2010;

FAN Engineering. 7 ed., 729 p., 1970.

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

HANLEY, K. J.; BYRNE, E.P.; CRONIN, K.; **Probabilistic analysis of particle impact at a pipe bend in pneumatic conveying**. Powder Technology, vol. 233, p 176-185, 2013.

KRUGGEL-EMDEN, H.; OSCHMANN, T. **Numerical study of rope formation and dispersion of non-spherical particles during pneumatic conveying in a pipe bend**. Powder Technology, vol. 268, p 219-236, dec 2014.

MORAES Jr., D.; SILVA, E. L.; MORAES, M. S. **Aplicações industriais de estática e dinâmica dos fluidos I**. Santos, ed. do autor, 2011; p 216.

MORAES, M. S.; **Convecção forçada de partículas poliméricas em fase diluída: Curvas de pressão e distribuição de partículas**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, SP, 2012.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; **Perry's Chemical Engineer's Handbook**; McGraw-Hill; 8th edition, 2008; p 6-16, 6-22.

SANTOS, S. M.; **Projeto e montagem de unidade piloto de transporte pneumático em fase diluída para estudo da relação entre a perda de carga e a distribuição de partículas granulares na seção transversal de dutos industriais**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, SP, 2009.

SANTOS, S. M.; TAMBOURGI, E. B.; FERNANDES, F. A. N.; MORAES, D. J.; MORAES, M. S.; **Dilute-phase pneumatic conveying of polystyrene particles: Pressure drop curve and particle distribution over the pipe cross-section**. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 28, No. 01, p. 81-88, January-March. 2011.

SETIA, G.; MALLICK, S. S.; WYPYCH, P.W. **On improving solid friction factor modeling for fluidized dense-phase pneumatic conveying systems**. Powder Technology, vol. 257, p 88-103, maio 2014.

TRIPATHI, N.; SHARMA, A.; MALLICK, S.S.; WYPYCH, P.W.; **Energy loss at bends in pneumatic conveying of fly ash**. Particuology, vol. 21, p 65-73, 2015.

WYPYCH, P. W.; **Pneumatic conveying of powders over long distances and at large capacities**. Powder Technology, vol.104, p 278-286, 1999.

ZHAO, X.; MASSOUDI, M.; **Flow of granular materials with slip boundary condition: A continuum–kinetic theory approach**. Applied Mathematics and Computation, vol. 242, p 518-527, sep. 2014.

APÊNDICE A – Dados coletados no equipamento

Neste apêndice estão as tabelas com todos os dados coletados para o tê saída de lado sem prolongamento e com os prolongamentos de 30, 60 e 90mm, e também para a curva de 90° com gomos. Cada assessorio possui quatro tabelas sendo uma para vazão apenas de ar, e as outras para as três vazões de sólido utilizadas nos ensaios.

Tabela A.1 – Dados coletados com o tê sem prolongamento, sem vazão de sólido.

V_{suc} (m/s)	V_{rec} (m/s)	P_3 (mmca)	P_6 (mmca)	P_7 (mmca)	P_8 (mmca)	P_9 (mmca)	P_{10} (mmca)	$\ell\omega$ (mmca)	$\ell\omega$ (mc ar)	K
3,0	10,32	38	37	27	29	28	26	8	6,63	1,222
3,4	11,70	46	44	33	34	33	32	10	8,29	1,189
3,8	13,07	53	53	39	41	39	37	12	9,95	1,142
4,1	14,10	62	60	45	47	45	43	13	10,78	1,063
4,3	14,79	71	70	65	54	51	50	16	13,27	1,190
4,6	15,82	80	78	58	60	57	55	18	14,92	1,169
4,9	16,86	89	87	65	68	65	62	19	15,75	1,088
5,2	17,89	99	95	71	74	72	70	21	17,41	1,068
5,5	18,92	108	105	80	82	79	76	23	19,07	1,045
5,7	19,61	119	114	86	90	87	84	24	19,90	1,015
6,1	20,98	130	124	92	98	94	93	26	21,56	0,961
6,3	21,67	138	133	101	105	100	99	28	23,21	0,970

Tabela A.2 - Dados coletados com o tê sem prolongamento e vazão de sólido 0,032 kg/s.

V_{suc} (m/s)	V_{rec} (m/s)	P_3 (mmca)	P_6 (mmca)	P_7 (mmca)	P_8 (mmca)	P_9 (mmca)	P_{10} (mmca)	$\ell\omega$ (mmca)	$\ell\omega$ (mc ar)	K
3,0	10,32	41	39	19	27	26	25	12	9,95	1,833
3,3	11,35	47	45	22	32	29	28	13	10,78	1,641
3,6	12,38	53	51	29	38	37	35	13	10,78	1,379
4,0	13,76	60	57	35	43	41,5	39	14	11,61	1,203
4,4	15,14	67	64	44	48,5	47	43,5	15,5	12,85	1,101
4,7	16,17	75	71	47,5	52,5	51,5	48	18,5	15,34	1,151
5,0	17,20	84	79	56,5	60,5	57,5	52	18,5	15,34	1,017
5,3	18,23	93	88	60	66,5	64	59	21,5	17,83	1,052
5,6	19,26	101	96	68,5	71,5	68	66	24,5	20,31	1,074
5,9	20,30	109	102	74	76	74	71	26	21,56	1,027

Tabela A.3 - Dados coletados com o tê sem prolongamento e vazão de sólido 0,061 kg/s.

V_{suc} (m/s)	V_{rec} (m/s)	P_3 (mmca)	P_6 (mmca)	P_7 (mmca)	P_8 (mmca)	P_9 (mmca)	P_{10} (mmca)	$\ell\omega$ (mmca)	$\ell\omega$ (mc ar)	K
3,2	11,01	47	44	20	29	28	27	15	12,44	2,014
3,5	12,04	53	51	27	34	33	30	17	14,09	1,908
3,9	13,42	60	57	34	41	39	36	16	13,27	1,446
4,2	14,45	67	64	39	47	44	41	17	14,09	1,325
4,6	15,82	76	70	45	53	50	46	17	14,09	1,104
5,0	17,20	82	78	50,5	57	55	51	21	17,41	1,155
5,3	18,23	90	86	55	63	61	57	23	19,07	1,126
5,6	19,26	100	94	63,5	70	66	63	24	19,90	1,052
5,9	20,30	109	102	68,5	75	71	68	27	22,39	1,066
6,2	21,33	118	110	74	81	78	74	29	24,04	1,037

Tabela A.4 - Dados coletados com o tê sem prolongamento e vazão de sólido 0,091 kg/s.

V_{suc} (m/s)	V_{rec} (m/s)	P_3 (mmca)	P_6 (mmca)	P_7 (mmca)	P_8 (mmca)	P_9 (mmca)	P_{10} (mmca)	$\ell\omega$ (mmca)	$\ell\omega$ (mc ar)	K
3,1	10,66	52	49	23	31	28	27	18	14,92	2,575
3,6	12,38	56	54	29	37	34	30	17	14,09	1,803
4,1	14,10	64	60	37	43	39	37	17	14,09	1,390
4,4	15,14	70	67	43	48	46	42	19	15,75	1,349
4,7	16,17	79	74	49	54	51	47	20	16,58	1,245
5,1	17,54	87	82	55	60	57	53	22	18,24	1,163
5,5	18,92	94	89	61	65	62	57	24	19,90	1,091
5,8	19,95	104	97	66	71	68	64	26	21,56	1,062
6,1	20,98	112	105	72	77	73	69	28	23,21	1,034
6,4	22,02	121	112	79	84	80	75	28	23,21	0,940

Tabela A.5 - Dados coletados com o tê com prolongamento de 30 mm, sem vazão de sólido.

V_{suc} (m/s)	V_{rec} (m/s)	P_3 (mmca)	P_6 (mmca)	P_7 (mmca)	P_8 (mmca)	P_9 (mmca)	P_{10} (mmca)	$\ell\omega$ (mmca)	$\ell\omega$ (mc ar)	K
3,0	10,32	36	34	25	27	25	25	7	5,80	1,069
3,3	11,35	43	41	29	33	31	30	8	6,63	1,010
3,6	12,38	49	47	35	38	36	35	9	7,46	0,955
3,9	13,42	58	55	40	44	42	41	11	9,12	0,994
4,2	14,45	66	64	47	50	49	48	14	11,61	1,091
4,5	15,48	75	73	53	57	55	54	16	13,27	1,086
4,7	16,17	84	81	59	64	61	60	17	14,09	1,058
5,0	17,20	92	90	66	71	70	69	19	15,75	1,045
5,3	18,23	103	99	72	79	76	75	20	16,58	0,979
5,5	18,92	112	108	79	86	84	83	22	18,24	1,000
5,8	19,95	122	117	85	94	91	90	23	19,07	0,940
6,0	20,64	133	127	92	101	99	98	26	21,56	0,993

Tabela A.6 - Dados coletados com o tê com prolongamento de 30 mm e vazão de sólido 0,032 kg/s.

V_{suc} (m/s)	V_{rec} (m/s)	P_3 (mmca)	P_6 (mmca)	P_7 (mmca)	P_8 (mmca)	P_9 (mmca)	P_{10} (mmca)	$\ell\omega$ (mmca)	$\ell\omega$ (mc ar)	K
2,8	9,63	37	36	16	23	22	22	13	10,78	2,279
3,2	11,01	42	41	21	28	27	27	13	10,78	1,745
3,5	12,04	51	49	28	35	34	33	14	11,61	1,571
3,8	13,07	58	56	33,5	40,5	39	37	15,5	12,85	1,476
4,1	14,10	65	63	43	46,5	44,5	43	16,5	13,68	1,349
4,4	15,14	72,5	70	47	52	51	48,5	18	14,92	1,278
4,8	16,51	80,5	78,5	54	57	54,5	54	21,5	17,83	1,283
5,0	17,20	89	86	58,5	63	59,5	59	23	19,07	1,265
5,3	18,23	98	93	64,5	68	66,5	65	25	20,73	1,223
5,8	19,95	106	105	68	75	74	71,5	30	24,87	1,226

Tabela A.7 - Dados coletados com o tê com prolongamento de 30 mm e vazão de sólido 0,061 kg/s.

V_{suc} (m/s)	V_{rec} (m/s)	P_3 (mmca)	P_6 (mmca)	P_7 (mmca)	P_8 (mmca)	P_9 (mmca)	P_{10} (mmca)	$\ell\omega$ (mmca)	$\ell\omega$ (mc ar)	K
3,0	10,32	47	44	19	28	26	25	16	13,27	2,444
3,4	11,70	51	50	27	34	32	31	16	13,27	1,903
3,8	13,07	58	57	34	40	37	36	17	14,09	1,618
4,2	14,45	64,5	63	37	44	42	41	19	15,75	1,481
4,4	15,14	73,5	69	43	49	47	46	20	16,58	1,420
4,8	16,51	80	77,5	51	56	54	53	21,5	17,83	1,283
5,0	17,20	89	84	53	61	58	56	23	19,07	1,265
5,3	18,23	97	93	60,5	69	66	64	24	19,90	1,175
5,6	19,26	105	100	66	73	70	68	27	22,39	1,184
6,0	20,64	114	110	73	79	77	75	31	25,70	1,184

Tabela A.8 - Dados coletados com o tê com prolongamento de 30 mm e vazão de sólido 0,091 kg/s.

V_{suc} (m/s)	V_{rec} (m/s)	P_3 (mmca)	P_6 (mmca)	P_7 (mmca)	P_8 (mmca)	P_9 (mmca)	P_{10} (mmca)	$\ell\omega$ (mmca)	$\ell\omega$ (mc ar)	K
3,0	10,32	49	47	21	29	27	26	18	14,92	2,749
3,5	12,04	55	54	30	35	33	31	19	15,75	2,132
3,9	13,42	61	60	35	40	38	37	20	16,58	1,808
4,3	14,79	68	65	42	44	44	42	21	17,41	1,561
4,6	15,82	76	73	47	51	49	48	22	18,24	1,429
4,9	16,86	83	80	52	56	54	52	24	19,90	1,374
5,3	18,23	93	88	59	62	60	57	26	21,56	1,272
5,6	19,26	100	96	64	69	67	64	27	22,39	1,184
5,8	19,95	109	104	70	74	72	69	30	24,87	1,226
6,1	20,98	117	111	76	80	77	75	31	25,70	1,145

Tabela A.9 - Dados coletados com o tê com prolongamento de 60 mm, sem vazão de sólido.

V_{suc} (m/s)	V_{rec} (m/s)	P_3 (mmca)	P_6 (mmca)	P_7 (mmca)	P_8 (mmca)	P_9 (mmca)	P_{10} (mmca)	$\ell\omega$ (mmca)	$\ell\omega$ (mc ar)	K
3,0	10,32	37	34	26	27	25	26	7	5,80	1,069
3,4	11,70	43	41	31	33	31	31	8	6,63	0,951
3,7	12,73	50	48	37	39	36	36	9	7,46	0,904
3,9	13,42	60	58	43	47	45	44	11	9,12	0,994
4,2	14,45	66	63	49	51	49	48	12	9,95	0,935
4,5	15,48	76	73	55	59	56	55	14	11,61	0,950
4,9	16,86	85	81	62	65	64	62	16	13,27	0,916
5,1	17,54	95	91	68	73	71	69	18	14,92	0,951
5,3	18,23	106	101	76	81	79	78	20	16,58	0,979
5,6	19,26	114	110	82	88	85	84	22	18,24	0,964
5,9	20,30	126	120	91	97	94	93	23	19,07	0,908
6,1	20,98	133	128	96	103	100	99	25	20,73	0,924
6,3	21,67	144	139	104	112	110	107	27	22,39	0,935

Tabela A.10 - Dados coletados com o tê com prolongamento de 60 mm e vazão de sólido 0,032 kg/s.

V_{suc} (m/s)	V_{rec} (m/s)	P_3 (mmca)	P_6 (mmca)	P_7 (mmca)	P_8 (mmca)	P_9 (mmca)	P_{10} (mmca)	$\ell\omega$ (mmca)	$\ell\omega$ (mc ar)	K
2,7	9,29	39	37	13	22	21	21	15	12,44	2,829
3,2	11,01	44	42,5	21	28,5	28	28	14	11,61	1,879
3,6	12,38	50	48,5	28	34,5	33	33	14	11,61	1,485
3,9	13,42	58	56	34	41	39,5	38,5	15	12,44	1,356
4,3	14,79	65	62,5	39,5	45,5	45	43	17	14,09	1,264
4,6	15,82	71,5	70	46	52	50,5	48	18	14,92	1,169
4,9	16,86	81	77,5	53	59	56	55	18,5	15,34	1,059
5,2	17,89	90	85,5	58	64,5	62,5	59,5	21	17,41	1,068
5,5	18,92	98	92,5	63,5	69	67,5	66,5	23,5	19,48	1,068
5,8	19,95	106	100	65,5	77	75,5	73	23	19,07	0,940

Tabela A.11 - Dados coletados com o tê com prolongamento de 60 mm e vazão de sólido 0,061 kg/s.

V_{suc} (m/s)	V_{rec} (m/s)	P_3 (mmca)	P_6 (mmca)	P_7 (mmca)	P_8 (mmca)	P_9 (mmca)	P_{10} (mmca)	$\ell\omega$ (mmca)	$\ell\omega$ (mc ar)	K
3,1	10,66	46	43	20	28	27	26	15	12,44	2,146
3,3	11,35	52	49	27	33	31	30	16	13,27	2,020
3,6	12,38	58	55	31	39	37	35	16	13,27	1,697
4,1	14,10	64	62	38	44	42	41	18	14,92	1,472
4,5	15,48	73	68,5	41	48	47	46	20,5	17,00	1,392
4,8	16,51	80,5	77	48	55	53	52	22	18,24	1,313
5,2	17,89	88,5	83	52	60	58	55	23	19,07	1,169
5,5	18,92	96,5	91	59	66	63	62	25	20,73	1,136
5,7	19,61	105	98	70,5	73	70	68	25	20,73	1,058
6,0	20,64	113	107	73	76	78	76	29	24,04	1,107

Tabela A.12 - Dados coletados com o tê com prolongamento de 60 mm e vazão de sólido 0,091 kg/s.

V_{suc} (m/s)	V_{rec} (m/s)	P_3 (mmca)	P_6 (mmca)	P_7 (mmca)	P_8 (mmca)	P_9 (mmca)	P_{10} (mmca)	$\ell\omega$ (mmca)	$\ell\omega$ (mc ar)	K
2,9	9,98	50	47	20	28	26	25	19	15,75	3,106
3,3	11,35	56	53	30	34	32	30	19	15,75	2,398
3,8	13,07	61	59	35	40	37	37	19	15,75	1,809
4,2	14,45	69	66	42	45	43	42	21	17,41	1,637
4,5	15,48	76	72	47	51	48	47	21	17,41	1,426
4,9	16,86	84	78	51	56	53	51	22	18,24	1,260
5,2	17,89	90	86	57	61	59	57	25	20,73	1,271
5,5	18,92	100	94	64	67	64	62	27	22,39	1,227
5,8	19,95	110	103	68	72	70	68	31	25,70	1,267
6,1	20,98	118	110	75	78	76	74	32	26,53	1,182

Tabela A.13 - Dados coletados com o tê com prolongamento de 90 mm, sem vazão de sólido.

V_{suc} (m/s)	V_{rec} (m/s)	P_3 (mmca)	P_6 (mmca)	P_7 (mmca)	P_8 (mmca)	P_9 (mmca)	P_{10} (mmca)	$\ell\omega$ (mmca)	$\ell\omega$ (mc ar)	K
3,0	10,32	36	35	27	28	26	26	7	5,80	1,069
3,3	11,35	43	42	32	34	31	32	8	6,63	1,010
3,6	12,38	51	50	39	40	39	39	10	8,29	1,061
3,8	13,07	59	59	44	47	45	44	12	9,95	1,142
4,1	14,10	68	66	51	53	51	50	13	10,78	1,063
4,4	15,14	77	75	56	60	59	57	15	12,44	1,065
4,7	16,17	87	85	65	68	66	64	17	14,09	1,058
5,0	17,20	95	93	71	75	73	71	18	14,92	0,990
5,4	18,58	106	103	79	83	81	79	20	16,58	0,943
5,6	19,26	116	113	86	91	89	88	22	18,24	0,964
5,9	20,30	126	123	95	99	97	95	24	19,90	0,948
6,2	21,33	135	132	100	106	103	101	26	21,56	0,930

Tabela A.14 - Dados coletados com o tê com prolongamento de 90 mm e vazão de sólido 0,032 kg/s.

V_{suc} (m/s)	V_{rec} (m/s)	P_3 (mmca)	P_6 (mmca)	P_7 (mmca)	P_8 (mmca)	P_9 (mmca)	P_{10} (mmca)	$\ell\omega$ (mmca)	$\ell\omega$ (mc ar)	K
2,8	9,63	39	38	17	25	24	23	13	10,78	2,279
3,2	11,01	44	43	21	30	28	27	13	10,78	1,745
3,5	12,04	52	50	28	36	34	33	14	11,61	1,571
3,8	13,07	58	57	35,5	42,5	41,5	39	14,5	12,02	1,380
4,2	14,45	65	64	41	47,5	44	42,5	16,5	13,68	1,286
4,5	15,48	73,5	71	45,5	52,5	50,5	48	18,5	15,34	1,256
4,8	16,51	81,5	78,5	51,5	58,5	55,5	52,5	20	16,58	1,193
5,1	17,54	91	86,5	58	65	61	60,5	21,5	17,83	1,136
5,4	18,58	99,5	95	61,5	71	69,5	67	24	19,90	1,131
5,7	19,61	107	101	65,5	75,5	74	72	25,5	21,14	1,079

Tabela A.15 - Dados coletados com o tê com prolongamento de 90 mm e vazão de sólido 0,061 kg/s.

V_{suc} (m/s)	V_{rec} (m/s)	P_3 (mmca)	P_6 (mmca)	P_7 (mmca)	P_8 (mmca)	P_9 (mmca)	P_{10} (mmca)	$\ell\omega$ (mmca)	$\ell\omega$ (mc ar)	K
2,8	9,63	45	43	20	28	26	26	15	12,44	2,630
3,2	11,01	51	50	27	35	33	32	15	12,44	2,014
3,7	12,73	58	57	34	40	38	37	17	14,09	1,707
4,1	14,10	65	64	38	45	43	41	19	15,75	1,554
4,4	15,14	73	71	44	51	50	47	20	16,58	1,420
4,7	16,17	81	78	50	56	55	53	22	18,24	1,369
5,0	17,20	89,5	87	55	63	61	59	24	19,90	1,320
5,3	18,23	97,5	93	61	68	67	65	25	20,73	1,223
5,6	19,26	105	102	65,5	73	71,5	69	29	24,04	1,271
6,0	20,64	115	110	73	79,5	78	74,5	30,5	25,29	1,165

Tabela A.16 - Dados coletados com o tê com prolongamento de 90 mm e vazão de sólido 0,091 kg/s.

V_{suc} (m/s)	V_{rec} (m/s)	P_3 (mmca)	P_6 (mmca)	P_7 (mmca)	P_8 (mmca)	P_9 (mmca)	P_{10} (mmca)	$\ell\omega$ (mmca)	$\ell\omega$ (mc ar)	K
3,1	10,66	53	50	23	31	28	27	19	15,75	2,718
3,5	12,04	57	55	30	36	34	33	19	15,75	2,132
4,0	13,76	64	61	37	41	39	38	20	16,58	1,718
4,4	15,14	71	68	43	47	46	44	21	17,41	1,491
4,7	16,17	79	76	49	53	51	50	23	19,07	1,431
5,0	17,20	88	84	53	58	57	55	26	21,56	1,430
5,3	18,23	95	91	58	64	63	60	27	22,39	1,321
5,7	19,61	105	99	66	69	68	64	30	24,87	1,269
5,9	20,30	114	107	70	76	74	72	31	25,70	1,224
6,2	21,33	120	118	75	81	79	76	37	30,68	1,323

Tabela A.17 - Dados coletados com a curva de 90° com gomos, sem vazão de sólido.

V_{suc} (m/s)	V_{rec} (m/s)	P_3 (mmca)	P_6 (mmca)	P_7 (mmca)	P_8 (mmca)	P_9 (mmca)	$\ell\omega$ (mmca)	$\ell\omega$ (mc ar)	K
2,7	9,29	32	30	28	26	26	4	3,32	0,754
3,0	10,32	38	37	33	32	32	5	4,15	0,764
3,3	11,35	47	45	40	39	40	5	4,15	0,631
3,6	12,38	54	52	46	46	46	6	4,97	0,636
3,7	12,73	61	60	52	52	52	8	6,63	0,803
4,1	14,10	70	68	60	59	58	9	7,46	0,736
4,5	15,48	79	76	68	65	67	9	7,46	0,611
4,8	16,51	87	84	75	75	74	9	7,46	0,537
5,0	17,20	98	95	83	83	83	12	9,95	0,660
5,2	17,89	107	103	90	91	90	12	9,95	0,610
5,6	19,26	116	114	99	99	99	15	12,44	0,658
5,9	20,30	125	122	107	107	106	15	12,44	0,592

Tabela A.18 - Dados coletados com a curva de 90° com gomos e vazão de sólido 0,032 kg/s.

V_{suc} (m/s)	V_{rec} (m/s)	P_3 (mmca)	P_6 (mmca)	P_7 (mmca)	P_8 (mmca)	P_9 (mmca)	$\ell\omega$ (mmca)	$\ell\omega$ (mc ar)	K
2,7	9,29	32	31	26	25	25	6	4,97	1,131
3,0	10,32	39	38	32	31	31	7	5,80	1,069
3,3	11,35	46	44	37	36	36	8	6,63	1,010
3,7	12,73	51	50	42	41	41	9	7,46	0,904
4,0	13,76	59	57	48	47	46	10	8,29	0,859
4,3	14,79	66,5	63,5	54	51,5	50	12	9,95	0,892
4,6	15,82	74	71	58,5	57,5	57	13,5	11,19	0,877
4,9	16,86	81	78,5	63,5	64,5	62,5	14	11,61	0,802
5,2	17,89	90	84,5	71,5	69,5	69,5	15	12,44	0,763
5,5	18,92	99	91,5	77,5	76	75,5	15,5	12,85	0,704

Tabela A.19 - Dados coletados com a curva de 90° com gomos e vazão de sólido 0,061 kg/s.

V_{suc} (m/s)	V_{rec} (m/s)	P_3 (mmca)	P_6 (mmca)	P_7 (mmca)	P_8 (mmca)	P_9 (mmca)	$\ell\omega$ (mmca)	$\ell\omega$ (mc ar)	K
2,9	9,98	40	38	31	30	30	8	6,63	1,308
3,2	11,01	47	43	36	35	35	8	6,63	1,074
3,6	12,38	51	49	40	39	39	10	8,29	1,061
3,9	13,42	58	55	46	45	44	10	8,29	0,904
4,2	14,45	65	62	51	50	49	12	9,95	0,935
4,5	15,48	72	69	57	57	55	12	9,95	0,815
4,9	16,86	81	76	63	62	62	14	11,61	0,802
5,2	17,89	88	84	69	68	67	16	13,27	0,813
5,5	18,92	97	92	75	75	73	17	14,09	0,773
5,8	19,95	104	99	81	81	80	18	14,92	0,736

Tabela A.20 - Dados coletados com a curva de 90° com gomos e vazão de sólido 0,091 kg/s.

V_{suc} (m/s)	V_{rec} (m/s)	P_3 (mmca)	P_6 (mmca)	P_7 (mmca)	P_8 (mmca)	P_9 (mmca)	$\ell\omega$ (mmca)	$\ell\omega$ (mc ar)	K
3,0	10,32	44	41	33	32	32	9	7,46	1,375
3,3	11,35	49	47	38	37	36	10	8,29	1,262
3,7	12,73	55	53	43	42	42	11	9,12	1,105
3,9	13,42	63	59	48	47	46	12	9,95	1,085
4,4	15,14	70	65	53	52	52	13	10,78	0,923
4,7	16,17	77	73	59	59	57	14	11,61	0,871
5,0	17,20	84	80	65	64	63	16	13,27	0,880
5,3	18,23	93	88	70	70	69	18	14,92	0,881
5,7	19,61	101	94	77	77	76	17	14,09	0,719
5,9	20,30	108	103	83	82	82	21	17,41	0,829

ANEXO B – Propriedades do ar

Neste anexo encontram-se as tabelas e diagramas utilizados para consulta das propriedades do ar e fatores utilizados nos cálculos.

Tabela B-1 – Massa molar, constante do gás e propriedades do ponto crítico para o ar.
Adaptado de (ÇENGEL, 2013)

Massa molar, M (kg/kmol)	Constante do gás, R (kJ/kg.K)	Propriedades do ponto crítico		
		Temperatura (K)	Pressão (MPa)	Volume (m ³ /kmol)
28,97	0,2870	132,5	3,77	0,0883

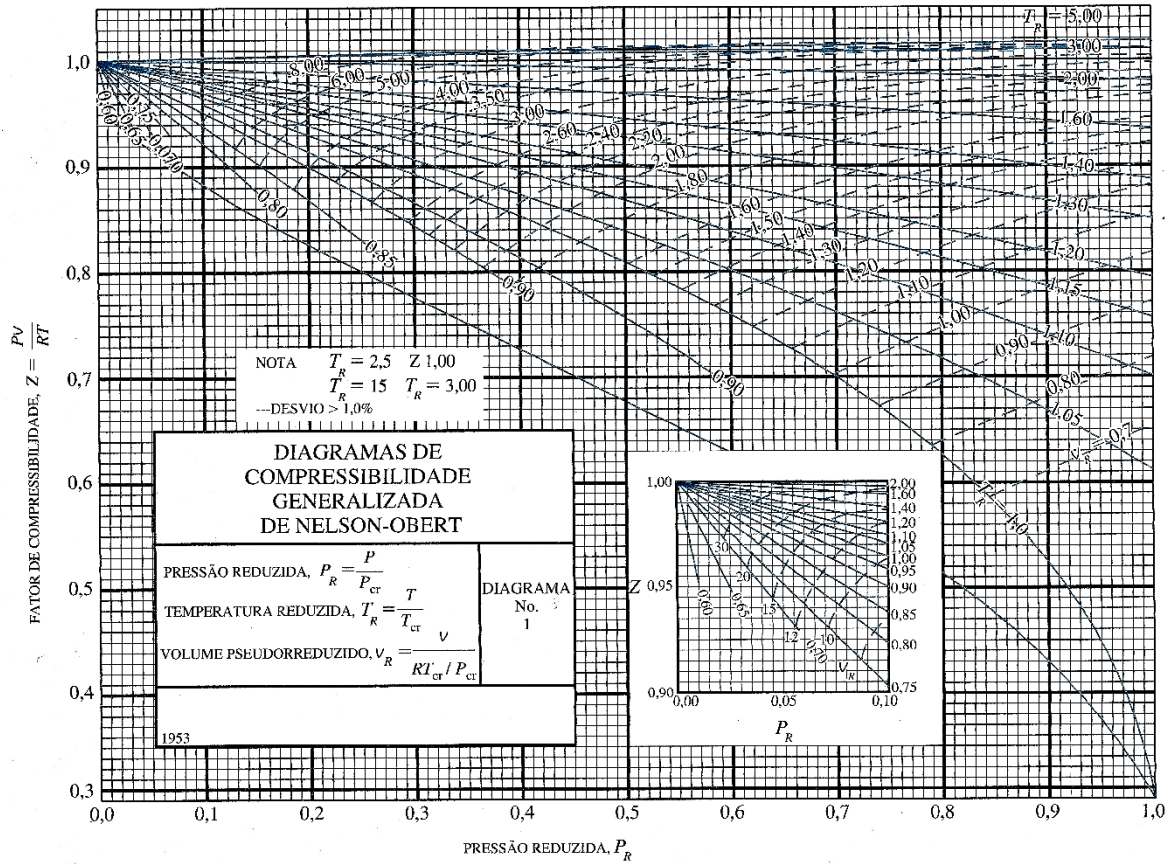
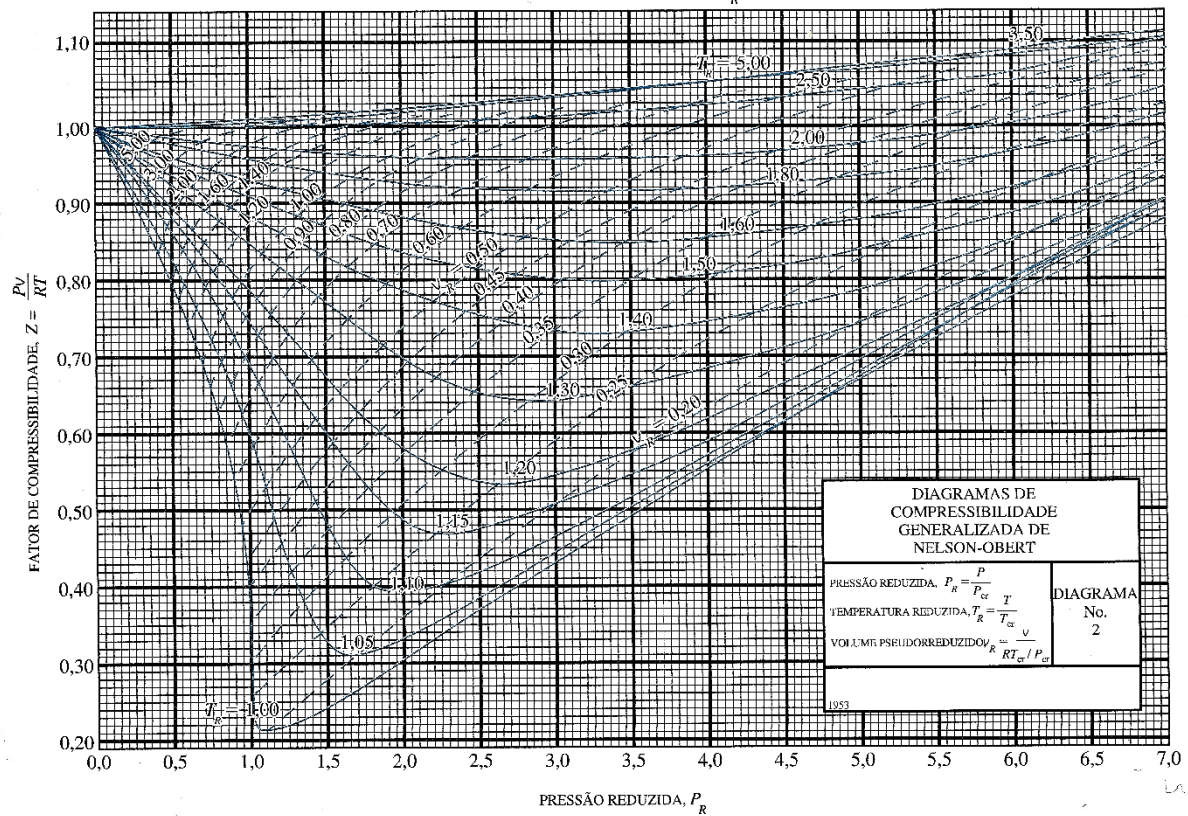
(a) Pressões baixas, $0 < P_R < 1,0$ (b) Pressões intermediárias, $0 < P_R < 7$ 

Figura B.1 – Diagrama generalizado de compressibilidade de Nelson-Obert (ÇENGEL, 2013)