

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
SISTEMAS DE PROCESSOS QUÍMICOS E INFORMÁTICA

“Convecção forçada de partículas poliméricas em fase diluída: Curvas de pressão e distribuição de partículas”

Autora: Marlene Silva de Moraes

Orientador: Prof. Dr. Elias Basile Tambourgi

Tese de Doutorado apresentada à
Faculdade de Engenharia Química
como parte dos requisitos exigidos
para obtenção do título de
Doutora em Engenharia Química.

Campinas - São Paulo
março de 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

M791c Moraes, Marlene Silva de
Convecção forçada de partículas poliméricas em fase
diluída: curvas de pressão e distribuição de partículas /
Marlene Silva de Moraes. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Elias Basile Tambourgi.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Teoria do transporte. 2. Partículas. I. Tambourgi,
Elias Basile. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Título em Inglês: Forced convection of polymer particles in dilute phase: pressure curves
and the particles distribution

Palavras-chave em Inglês: Transport phenomena, Particules

Área de concentração: Sistemas de Processos Químicos e Informática

Titulação: Doutor em Engenharia Química

Banca examinadora: Sabrina Martins dos Santos, Aldo Ramos Santos, Patricia Bernardi
Leite da Silva, Luiz Carlos Bertevello

Data da defesa: 29-03-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Química

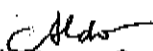
Tese de Doutorado , defendida por Marlene Silva de Moraes, em 29 de março de 2012 , e aprovada pela banca examinadora:



Dr. Elias Basile Tambourgi – orientador



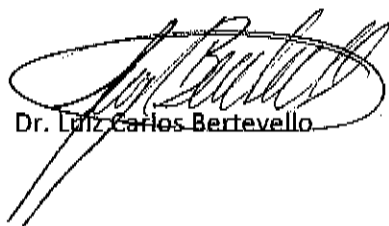
Dra. Sabrina Martins dos Santos



Dr. Aldo Ramos Santos



Dra. Patricia Bernardi Leite da Silva



Dr. Luiz Carlos Bertevello

Esta versão corresponde a final da Tese de Doutorado , defendida por
Marlene Silva de Moraes em 29 de março de 2012.



Prof Dr Elias Basile Tambourgi – orientador

DEDICATÓRIA

Dedico

Aos meus amados pais (“in memoriam”), **José Luiz e Amélia** que com muita dificuldade e esforço ajudaram a traçar meu caminho.

Ao meu querido companheiro e amado esposo **Deovaldo de Moraes Júnior**, que com o seu carinho, sua paciência, alegria e dedicação me incentiva na conquista dos objetivos.

Ao meu amado filho, **Pedro Henrique Silva de Moraes** e minha querida filha, **Júlia Silva de Moraes**, pessoas maravilhosas e motivadoras, que Deus me deu de presente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

Primeiramente a **Deus** pela vida digna e maravilhosa que me presenteou. Por me dar força e permitir que eu alcance meus objetivos.

A todos que contribuíram para a realização do presente trabalho e, de modo especial:

Ao **professor Dr. Elias Basile Tambourgi**, orientador deste trabalho, o meu reconhecimento pela dedicação e pela inestimável confiança e amizade.

Ao **professor Dr. Deovaldo de Moraes Júnior**, co-orientador deste trabalho, o meu sincero agradecimento não só pelo apoio técnico, mas também pela amizade e acima de tudo a grande capacidade profissional e dedicação como pessoa.

Aos professores **Dra. Sabrina Martins dos Santos, Dr. Aldo Ramos Santos, Dr. Thiago de Sousa Pinto e Dra. Karina Tamião de Campos Roseno**, pelo incentivo, exemplo de perseverança, amizade, dedicação e competência.

À **Universidade Santa Cecília (UNISANTA)** que, por intermédio de seus laboratórios, tecnologia e apoio da magnífica reitora **Dra. Sílvia Ângela Teixeira Penteado**, da excelentíssima diretora presidente **Dra. Lúcia Maria Teixeira Furlani**, dos competentes diretores **Dr. Antonio de Salles Penteado e Dr. Áureo Emanuel P. Figueiredo**, do coordenador do curso de engenharia química **Dr. Luis Renato Bastos Lia** que confiou em mim desde o início tornando possível a realização de um grande sonho, o de ser professora de uma conceituada universidade.

Aos técnicos da UNISANTA, **Gilmar Alcântara, Irineu Penha da Ressurreição e Volnei de Lemos**, pelo apoio na montagem da unidade experimental.

Aos meus amados filhos e esposo, **Pedirão, Julinha e Deovaldo (meu ídolo)**, que se abdicaram de minha presença em prol da elaboração deste trabalho. Minha querida família que me apóia em período integral, sempre com muita alegria, fé e otimismo. É simplesmente um grande privilégio tê-los ao meu lado.

Aos meus familiares e de modo especial às minhas irmãs **Célia, Sandra e Elisabete**, pessoas amadas que eu prezo com muito amor e carinho.

À minha linda e inteligente norinha **Eliane** e meu talentoso e esforçado genrinho **Lukinha (1,98m)**, minhas crianças grandes.

Aos estagiários voluntários do Laboratório de Operações Unitárias da UNISANTA, **Aaron, Andrews, Aline, Caroline, Daniel, Eliane, Flavia, Hugo, Lucas, Mariana, Pedro Henrique, Rodrigo, Vitor.**

Aos graduandos de Engenharia Química, **Pedro Henrique Silva de Moraes e Daniel Lopes Muiños Torneiros**, pela confecção dos desenhos e pelo auxílio no tratamento dos dados, respectivamente.

Aos meus queridos e grandes amigos **Sabrina (Bi), Fernanda (Feba), Karina, Nilena, Thiago (Thireba), Shiguemoto (Shigue), Volnei, Paulo (Paurinho) e Aldinho (meu fofo), Marques, Moino e Lia**, pessoas muito especiais com as quais obtive crescimento profissional e espiritual. Amigos de fibra e de excelente caráter.

Ao casal de amigos, **Fabiana e Naldinho**, juntamente com seus lindos filhos, **Thomas e Alice**, pessoas maravilhosas que com sua fé em Jesus Cristo e alegria me ajudaram a superar dias de grande tormenta.

Aos meus irmãos da **Capela do Calvário**, em especial ao pastor **Celso**, pela força espiritual, amizade, carinho e sua infinita fé e devoção em Jesus Cristo.

Em especial ao **Luiz Santini e Marcílio**, pessoas iluminadas, caridosas, cheias de amor ao próximo, grandes amigos (literalmente).

Marlene Silva de Moraes

RESUMO

O deslocamento de polímeros, cereais, minérios, produtos farmacêuticos e outros materiais particulados no interior de tubulações, tendo como fluido transportador o ar, é denominado de transporte pneumático. Esta técnica é comumente dividida em transporte em fase densa, com concentração de partículas acima de 30% em volume e transporte em fase diluída, com concentração inferior a 1%. A fase diluída, que não exige tubulações espessas e é de menor custo de aquisição, operação e manutenção, tem como principais inconvenientes: a) o desgaste da parte inferior do tubo transportador devido à má distribuição das partículas na seção transversal; b) a falta de dados da perda de carga de tê com saída de lado, que tem substituído curvas em unidades catalíticas de petróleo por criar um colchão amortecedor e reduzir o desgaste e c) a escassez de informações da relação entre a distribuição de partículas na seção transversal do duto e a perda de carga.

O presente trabalho teve como objetivo geral projetar e montar uma unidade experimental, em escala piloto com duto de 117 mm de diâmetro, de transporte pneumático para estudar, em fase diluída, as perdas de carga no trecho vertical, singularidades e a distribuição de partículas na seção transversal. Visou como objetivos específicos: a) construir as curvas de perda de carga em função da velocidade do ar, tendo como parâmetro, as vazões de pellets de polipropileno; b) determinar o valor do coeficiente K, multiplicador da carga cinética da expressão geral de perda de carga localizada para tê com saída de lado, com três prolongamentos (balisas) distintos de 30, 60 e 90 mm e c) obter a distribuição das partículas na seção transversal do duto vertical.

A unidade projetada e montada consistiu basicamente de um ventilador centrífugo, com pás semi abertas de 210 mm de diâmetro, acoplado a um motor de rotação variável de 1 cv, um tubo de Pitot horizontal e um vertical, uma válvula rotativa acionada por motor de rotação variável na base de um silo de alimentação, dutos de acrílico estrudados, com diâmetro interno de 117 mm, um sistema de coleta com nove dutos, de seção quadrada paralelos, para análise da distribuição das partículas na seção transversal dos dutos horizontal e vertical e um ciclone.

A perda de carga foi determinada através de tomadas de pressão estática, acopladas a anéis piezométricos, com leitura simultânea de todas as tomadas de pressão em uma série de tubos em “U”. A velocidade do ar foi obtida por Pitot e anemômetros. A vazão volumétrica do ar foi calculada pelo método das centróides de áreas iguais, com as medidas dos valores coletados pelo Pitot e anemômetro. As vazões dos sólidos particulados foram quantificadas pelo número de revoluções por unidade de tempo da válvula rotativa, aferida pela técnica da massa por tempo. A distribuição de partículas, na seção transversal dos tubos vertical e horizontal e após o tê com saída de lado, foi verificada por pesagem dos sólidos nos coletores.

O trabalho forneceu, para o duto horizontal, curvas da perda de carga em função de cinco velocidades de ar de 13,45; 15,18; 16,90; 18,97 e 21,39 m/s e vazões de polipropileno de 0,08; 0,143 e 0,233 kg/s, com a distribuição de partículas em pontos de relevância para projeto. O tê com saída de lado forneceu um coeficiente K de 1,40; com prolongamento de 30 mm, um K de 1,58; com o de 60 mm, um K de 1,43 e com o de 90 mm, um multiplicador (K) igual a 1,47.

Palavras chave: Transporte pneumático. Convecção forçada de partículas poliméricas. Distribuição de partículas.

ABSTRACT

The displacement of polymers, pharmaceutical cereals, ores, pharmaceutical products and other particulate materials in the interior of tubing, having as fluid transporter the air, is called pneumatic transport. This technique is commonly divided in: transport in dense phase, with particles concentration above 30% in volume and transport in diluted phase, with inferior concentration at 1%. The diluted phase, that does not demand thick tubing and is acquired at lesser cost operation and maintenance, has as main inconveniences: a) the consuming of the inferior part of the transporting pipe due to bad distribution of particles in the transversal session; b) the lack of data of the loss of load of T with side exit, that has been replacing curves in catalytic units of oil for creating a cushioning mattress and reducing consuming and c) the scarcity of information of the relation between the particle distribution in the transversal section of the duct and the loading loss.

The present work had as general objective to project and build up an experimental unit, in scale pilot with a 117 mm diameter duct, of pneumatic transport to study, in diluted phase, the losses of load in the vertical stretch, the particle singularities and distribution in the transversal section. It aimed as specific objective: a) to construct the curves of loss of load in function of the air speed, having as parameter, the outflows of pellets of polypropylene; b) to determine the value of coefficient K, multiplier of the kinetic load of the general expression of loss of located load for T with side exit, with three distinct prolongations (boundary-makers): 30, 60 and 90 mm and c) to get the distribution of particles in the transversal section of the vertical duct.

The projected and built unit consisted basically on a centrifugal fan, with opened half 210 mm diameter shovels, connected to a 1cv changeable rotation engine, a pipe of horizontal Pitot and one vertical line, a rotating valve set in motion by engine of changeable rotation in the base of a feeding silo, extruded acrylic ducts, with internal diameter of 117 mm, a system of collection with nine ducts, square shaped section parallel, for analysis of the distribution of particles in the transversal section of the horizontal and vertical ducts and a cyclone.

The loss of load was determined through static pressure heads, connected to piezometric surface rings, with simultaneous reading of all the pressure heads in a series of pipes in "U". The air speed was gotten by Pitot and anemometers. The volumetric outflow of air was calculated by the method of the centroids of equal areas, with the measures of the values collected by the Pitot and anemometer. The outflows of particulates solids were quantified by the number of revolutions per unit of time of the rotating valve, surveyed by the technique of the mass per time. The particle distribution, in the transversal section of the vertical and horizontal pipes and after T with side exit, was verified by weighing solids in the collectors.

The work provided to, the horizontal duct, curves of the loss of load in function of five air speeds of 13,45; 15,18; 16,90; 18,97 and 21,39 m/s and polypropylene outflows of 0,08; 0,143 and 0,233 kg/s, with the particle distribution in points of relevance for project. The T with side exit, provided a 1,40 coefficient K; with a 30mm prolongation, a 1,58 K; with 60 mm, a K of 1,43 and with 90 mm, a multiplier (K) equals to 1,47.

Words key: Pneumatic transport. Forced polymeric particle convection. Particle distribution.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	V
AGRADECIMENTOS	VI
RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABELAS	XV
NOMENCLATURA	XVI
 CAPÍTULO I	
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivos	2
 CAPÍTULO II	
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Principais tipos de transportadores de sólidos industriais	3
2.2 Transporte pneumático em fase densa e fase diluída	4
2.3 Transporte pneumático em fase diluída	9
2.3.1 Sistemas diretos, indiretos, com pressão positiva e pressão negativa	9
2.3.2 Velocidade de saltitação e afogamento	11
2.3.3 Equações de projeto para o transporte em fase diluída	12
2.3.4 Perda de carga em singularidades	18
2.4 Distribuição de partículas na seção transversal da tubulação	21

2.5	Polipropileno	29
2.6	Resumo do estado da arte	30
 CAPÍTULO III		
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	Unidade experimental	31
3.2	Métodos empregados para coleta dos dados	37
3.2.1	Aferição dos medidores	37
3.2.2	Perda de carga no tê com prolongamento (balisa), nos tubos horizontal e vertical	37
3.2.3	Distribuição das partículas na seção transversal do trecho horizontal	38
3.2.4	Distribuição na seção transversal do trecho vertical após o tê com amortecedor	39
3.3	Fundamentos teóricos para tratamento dos dados	39
3.3.1	Perda de carga entre dois pontos da tubulação e do tê com amortecedor.	39
3.3.2	Pressão estática medida pelos anéis piezométricos	42
3.3.3	Velocidade do ar no duto de transporte (descarga do ventilador) e vazão determinada pelo tubo de Pitot	43
3.3.4	Vazão e velocidade na sucção pelo anemômetro	46
3.3.5	Velocidade do ar no duto de transporte	46
3.3.6	Potência consumida	47
3.3.7	Área dos nove coletores	49
3.3.8	Massa das partículas por unidade de área em cada coletor	50
3.3.9	Fração mássica das partículas por unidade de área nos coletores	51
3.3.10	Desvio padrão (s)	51

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1 Velocidade do ar, potência do ventilador e condições de transporte	52
4.2 Perda de carga, distribuição das partículas na seção transversal dos dutos	55
4.3 Constantes das perdas de carga localizada	62
4.4 Verificação da validade de equações de perda de carga	63

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	66
5.1 Conclusões	66
5.2 Sugestões	67

CAPÍTULO VI

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
--------------------------------------	-----------

APÊNDICE

A. PRESSÕES NOS ANÉIS PIEZOMÉTRICOS	73
B. DISTRIBUIÇÃO DAS PARTÍCULAS NA SEÇÃO TRANSVERSAL DOS DUTOS	78
C. CONSTANTES DAS PERDAS DE CARGA LOCALIZADA	82
D. TRABALHOS PUBLICADOS	87

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
2.1 Transporte pneumático em fase densa	5
2.2 Transporte pneumático em fase diluída com alimentador rotativo ou helicoidal	5
2.3 Perda de carga por unidade de comprimento em função da velocidade média do ar	7
2.4 Diagrama de GELDART	8
2.5 Sistema direto de transporte pneumático em fase diluída	9
2.6 Sistema com pressão negativa de transporte pneumático em fase diluída	10
2.7 Sistema com circuito fechado de transporte pneumático em fase diluída	10
2.8 Perda de carga por unidade de comprimento	11
2.9 Unidade piloto de transporte pneumático em fase diluída (duto horizontal)	24
2.10 Tubulação horizontal de acrílico para o transporte de sólidos	24
2.11 Direcionador de fluxo de ferro galvanizado	25
2.12 Tubos de Pitot e direcionador de fluxo	26
2.13 Válvula rotativa	26
2.14 Coletor de alumínio, vista lateral e frontal do coletor	27
2.15 Sacos coletores, tela filtrante de 36 mesh	27
2.16 Diagrama de fases do polipropileno	28
3.1 Transportador pneumático em fase diluída, construído no Laboratório de Operações Unitárias da UNISANTA	31
3.2 Esboço da unidade piloto de transporte pneumático em fase diluída	32
3.3 Motor em balanço da unidade piloto	33
3.4 Detalhes do motor em balanço para o cálculo da potência	33
3.5 Arranjo para estudo em trecho horizontal prolongado acoplado ao coletor de partículas	34
3.6 Arranjo para estudo em trecho vertical acoplado ao coletor de partículas	34

3.7	Saco coletor de tule com “velcro” na extremidade	35
3.8	Coletor de alumínio com “velcro” para fixar os sacos de tule	35
3.9	Banco de piezômetro para leitura simultânea das pressões nos dutos	36
3.10	Partículas de polipropileno	36
3.11	Esboço de duto reto para estudo da perda de carga	40
3.12	Manômetro inclinado para leitura das tomadas de pressão	42
3.13	Pontos de tomadas de pressão com tubo de Pitot pelo método das centróides de áreas iguais	44
3.14	Esboço do sistema montado para o cálculo da potência consumida pelo ventilador	48
3.15	Dimensões do coletor	49
4.1	Diagrama de fases do polipropileno, tê saída de lado sem prolongamento	57
4.2	Diagrama de fases do polipropileno, tê saída de lado com prolongamento de 30 mm	58
4.3	Diagrama de fases do polipropileno, tê saída de lado com prolongamento de 60 mm	59
4.4	Diagrama de fases do polipropileno, tê saída de lado com prolongamento de 90 mm	60
4.5	Distribuição das partículas no trecho horizontal	61

LISTA DE TABELAS

Tabelas	Página
2.1 Características dos transportadores fixos	3
2.1 Características dos transportadores fixos (continuação)	4
2.2 Características e dados relevantes do transporte pneumático em fase densa e diluída	6
2.3 Separação de partículas por GELDART	8
2.4 Definições de velocidade de saltitação	12
2.5 Valores de K , K_1 e K_∞ para vários acessórios	19
2.6 Valores de K para válvula de gaveta em conduto circular	20
2.7 Alguns valores de K_{Crane}	20
2.8 Fator f_T do método da Crane	21
3.1 Velocidades médias do ar em função das frequências	38
3.2 Massa e área dos nove coletores	50
4.1 Velocidade do ar no duto de transporte sem sólido	52
4.2 Potência consumida no motor do ventilador sem sólido	53
4.3 Potência consumida no motor do ventilador com a vazão máxima de sólido de 0,233 kg/s, vazão típica industrial de polipropileno	54
4.4 Condição de transporte e acúmulo na unidade experimental	54
4.5 Perda de carga entre os pontos P_4 e P_{11} para a velocidade de 21,39 m/s e vazão de 0,233 kg/s	55
4.6 Média do coeficiente K para as cinco velocidades	62

NOMENCLATURA

A	Área da seção transversal do tubo (m^2)
A_c	Área do coletor (cm^2)
A_d	Área (m^2) da seção transversal do duto de descarga, duto onde foi obtida a velocidade média pelo Pitot e pela técnica das centróides de áreas iguais
A_s	Área da seção transversal da tubulação na sucção (m^2)
a	Área da seção do tubo (m^2)
b	Braço (m)
C	Capacidade de transporte (t/h)
D	Diâmetro interno do tubo de transporte (mm; m)
D_p	Diâmetro das partículas (mm)
D_s	Diâmetro interno da tubulação de sucção (m)
d_p	Diâmetro da partícula (m)
F	Força média pelo dinamômetro (N)
F_r	Fração mássica de sólidos (adimensional)
f	Fator de atrito (adimensional)
f_s	Coefficiente de escorregamento “sliding” do sólido (adimensional)
g	Aceleração da gravidade em $[ft\ lbf/(lbf \cdot s^2)]$ e (m/s^2)
K	Fator referente ao acessório, (adimensional)
k	Relação entre os calores específicos à pressão constante (C_p) e a volume constante (C_v), (adimensional)
L	Comprimento dos trechos retos (m)
L_i	Comprimento equivalente (m)
L_t	Comprimento total dos tubos; soma do comprimento dos trechos horizontais com o dobro do comprimento dos trechos verticais e com o comprimento equivalente dos acessórios (m)
$\ell_{w, ac}$	Perda de carga do acessório (m)
$\ell_{w(1-2)}$	Perda de carga do sistema entre os pontos 1 e 2 (m)
M_{pi}	Massa das partículas por unidade de área (g/cm^2)

m'_a	Vazão do ar (lb/s)
m_c	Massa das partículas no coletor (g)
m'_s	Vazão do sólido (lb/s)
n	Rotação (rps)
n	Número de pontos horizontais ou verticais – tomada de pressão com tubo de Pitot
n_{ci}	Número de ciclones, (adimensional)
n_{cu}	Número de curvas, (adimensional)
n_f	Número de filtros, (adimensional)
P	Pressão (psi)
$\dot{P}$	Potência do ventilador em hp por (ton/h)
P_1 e P_2	Pressão absoluta (kgf/m ²)
$P_1 - P_2$	Diferença de pressão, (N/m ²)
$\overline{P_d}$	Média da pressão dinâmica no tubo de Pitot (mca)
$\overline{P_{dc}}$	Média da pressão dinâmica no tubo de Pitot (mca)
P_{dh}	Pressão dinâmica horizontal (mca)
P_{dv}	Pressão dinâmica vertical (mca)
Pot	Potência, Break Horse Power, (W)
Q	Vazão de ar de transporte; produto da velocidade média do ar pela área da seção transversal do duto, conforme equação da continuidade (m ³ /s)
R	Constante dos gases por unidade de massa [(ft . lbf)/(lb . °R)]
R'	Raio da curva (ft)
r_0	Rotação do rotor (rpm)
T	Temperatura (°R)
v	Velocidade do ar na entrada do duto (ft/s), na pressão de 14,7 psi
v	Velocidade média do ar em (m/s)
v_d	Velocidade média do ar na descarga do ventilador (m)
v_s	Velocidade média do ar obtida por anemômetro na entrada do duto de sucção do ventilador (m/s)
v_1 e v_2	Velocidade (m/s)
v_{salt}	Velocidade de saltitação (m/s)
W	Trabalho de eixo (m)

w	Vazão mássica de sólidos (kg/s)
w_c	Trabalho de compressão do ar (ft lbf/s)
w_f	Trabalho total de atrito (ft lbf/s)
X	Fração em massa de sólido transportado ($\text{kg}_{\text{sólidos}}/\text{kg}_{\text{ar}}$)
x_i	Ponto em análise
$\bar{x}$	Média aritmética
z_1 e z_2	Desnível ou altura em relação a um plano de referência (m)
α	Fração volumétrica de sólidos (adimensional)
γ	Peso específico do fluido (kgf/m^3)
γ	Peso específico do ar (kgf/m^3)
ΔP	Perda de carga (lbf/in^2)
ΔP_e	Perda de carga nos equipamentos acoplados à linha como: ciclone, filtro, Venturi, câmaras de poeira, entrada e saída de ar (mm)
ΔP_{sep}	Perda de carga do separador ar/partícula (mmca)
ΔP_t	Perda de carga total em (mmca) ou (kgf/cm^2)
η	Rendimento do ventilador, (adimensional)
θ	Ângulo de inclinação, (adimensional)
ρ	Massa específica aparente do material (t/m^3)
ρ	Densidade da água (kg/m^3)
$\rho_{\text{água}}$	Massa específica da água (kg/m^3)
ρ_{ar}	Massa específica do ar seco ($\text{kg}_{\text{ar seco}} / \text{m}^3$)
ρ_f	Densidade do fluido (kg/m^3)
ρ_m	Densidade (massa específica) da mistura (lb/ft^3)
$\sum M_p$	Somatória da massa das partículas por unidade de área (g/m^2)
ϕ	Fator de redução da aceleração do material.

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

Na sociedade moderna, sólidos na forma de britas, partículas e grãos necessitam ser transportados. Como exemplo destes materiais, podem-se citar o minério de ferro, de alumínio, o calcário, o cimento, o carvão, a serragem, o coque de petróleo, a areia, a borracha em pó, o polietileno, o poliestireno, o polipropileno, a poliamida, o arroz, o feijão, o café, a soja, a lentilha e o trigo.

Em função da distância, tempo necessário, tamanho de partícula, saúde, meio ambiente e segurança os materiais supracitados podem ser transportados manualmente, por caminhão, trem, avião e navio. Nas indústrias, o deslocamento é comumente realizado por transporte aberto, como por correia e canecas e fechado, por tubulações, como helicoidal, hidráulico (sólidos em suspensão) e transporte pneumático.

No transporte pneumático, os sólidos são deslocados através de uma tubulação por meio do ar ou gases. Este transporte tem como vantagens: a) não perder material para o meio ambiente, com ganho econômico e ecológico; b) o pouco peso, c) a fácil distribuição para vários pontos de uma indústria; d) a possibilidade de deslocar o material em qualquer inclinação e e) não molhar o sólido. As principais desvantagens são: a) a geração de eletricidade estática e b) a abrasão e o desgaste dos equipamentos.

É prático para estudo, classificar o transporte pneumático em fase densa e em fase diluída.

O transporte em fase densa é caracterizado por operar com concentrações de sólidos acima de 30% em volume, queda de pressão acima de 200 milímetros de coluna de água por metro (200 mmca/m ou 20 mbar/m) e velocidade de gás em geral entre 1 e 5 m/s. Esta técnica, apesar de onerosa por utilizar o sistema pressurizado, causa menos danos aos sólidos.

O transporte mais empregado em função de não requerer mão de obra especializada para montagem, operação e manutenção, é o em fase diluída. Opera com concentrações de sólidos abaixo de 1% em volume, queda de pressão abaixo de 50 milímetros de coluna de água por metro (50 mmca/m ou 5 mbar/m) e velocidade de gás em geral maior que 10 m/s. Os principais inconvenientes são: a) o desgaste da parte inferior dos tubos horizontais devido à má distribuição das partículas e b) a elevada abrasão das curvas pela mudança de direção.

A distribuição das partículas na seção transversal dos dutos horizontais e verticais está diretamente relacionada com a velocidade do ar e a vazão de sólidos, relação escassa na literatura.

O emprego de um tê, com saída de lado ao invés de uma curva reduz as paradas para manutenção da unidade. O tê provoca um acúmulo de material que amortece os impactos das partículas no metal. Não foram encontrados na literatura dados da influência da espessura da camada amortecedora na perda de carga desta singularidade.

1.2 Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho foi projetar e montar uma unidade experimental de transporte pneumático, em fase diluída na escala piloto com tubo de acrílico de 117 mm de diâmetro, para estudar as perdas de carga nos trechos horizontal, vertical e singularidades e a distribuição de partículas na seção transversal.

Visou como objetivos específicos: a) construir as curvas de perda de carga em função da velocidade do ar, tendo como parâmetro as vazões de pellets de polipropileno em dutos horizontal e vertical; b) determinar o valor do coeficiente k multiplicador da carga cinética da expressão geral de perda de carga localizada, para tê saída de lado com três prolongamentos distintos de 30, 60 e 90 mm; e c) obter a distribuição das partículas na seção transversal do duto vertical em função da perda de carga, velocidade do ar e vazão de polipropileno.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Principais tipos de transportadores de sólidos industriais

Os transportadores de sólidos podem ser classificados em: a) móveis (o transportador se move com os sólidos) como: navio, avião, caminhão, guincho, guindaste, empilhadeira e pás carregadeiras e b) fixos como: correia, esteira, corrente, caçamba, helicoidal, elevador de canecas, transportador hidráulico e pneumático.

A tabela 2.1 apresenta algumas características dos transportadores fixos mais empregados industrialmente.

Tabela 2.1 – Características dos transportadores fixos. COUPER, PENNEY, WALAS (2010); GOMIDE (1983); LUDWIG (2007); MORAES, SILVA, MORAES (2011); PERRY, GREEN, MALONEY (1997).

Equipamentos	Descrição sucinta	Vantagens	Desvantagens
Correia	Cinta em geral de borracha com largura de até 2 m e comprimento que pode chegar a mais de 500 m, que se movimenta entre um tambor livre no ponto de alimentação e outro de acionamento na extremidade de descarga.	Manutenção que não requer mão de obra especializada.	Perda de material e sujeito a intempéries quando aberto à atmosfera. Com alto grau de acidentes.
Esteira	Geralmente metálica e construída com bandejas ou caçambas fixadas numa correia ou corrente.	Rápida construção e menos manutenção que o de correia. Prático para o transporte de materiais quentes e pesados. Manutenção rápida.	Perda de material e sujeito a intempéries quando aberto à atmosfera. Com alto grau de acidentes.
Corrente	Elos padronizados de corrente, que são encaixados uns nos outros ou montados com pinos ou cavilhas.	Durável e de simples manutenção.	Pouco utilizada na indústria de processo químico. É de elevado custo de manutenção.

continua

Tabela 2.1 – Características dos transportadores fixos (continuação).

Equipamentos	Descrição sucinta	Vantagens	Desvantagens
Caçamba	Caçambas suspensas em cabos de aço ou em eixos, com roletes nas duas extremidades e que se movimentam em trilhos. A descarga é feita pela inversão das caçambas.	Transporte na vertical.	Velocidade baixa de até 20 m/min.
Helicoidal	Canaleta de secção semicircular ou duto no interior do qual gira um eixo com uma helicóide ou rosca sem fim.	Versátil para pequenas distâncias, servindo para realizar simultaneamente outros tipos de operação, como mistura, lavagem, cristalização, resfriamento, extração ou secagem.	Desgaste devido ao atrito do material e alto consumo de energia, devido ao peso da helicóide.
Transportador hidráulico	Os sólidos particulados são deslocados, através de uma tubulação por meio da água. O mineroduto é um exemplo típico.	Sem perda de material para o meio ambiente.	Sólido em contato direto com a água e falta de dados de perda de carga para vários sólidos.
Transportador pneumático	Os sólidos particulados são deslocados, através de uma tubulação, por meio do ar ou gases. São comumente classificados em fase densa e em fase diluída.	Sem perda de material para o meio ambiente, pouco peso, fácil distribuição para vários pontos de uma indústria, possibilidade de deslocar o material em qualquer inclinação e não molhar o sólido.	Desgaste na parte inferior da tubulação e falta de dados de perda de carga para vários sólidos.

2.2. Transporte pneumático em fase densa e fase diluída

A Figura 2.1 fornece o esboço de uma unidade de transporte pneumático em fase densa e a Figura 2.2 em fase diluída.

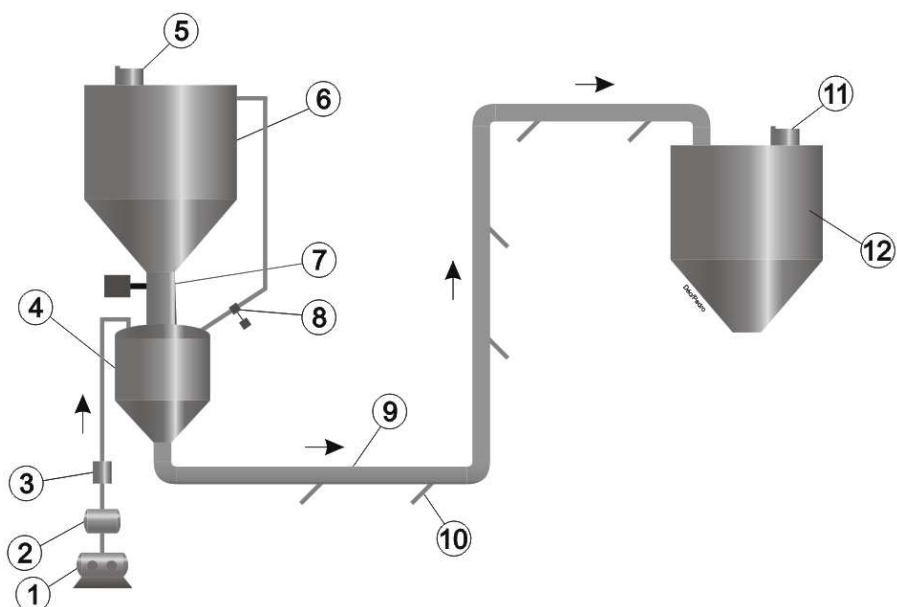


Figura 2.1 – Transporte pneumático em fase densa. 1) compressor (pressão acima de 20 mca); 2) reservatório de ar; 3) controle de ar; 4) transportador, vaso de pressão; 5) filtro de ar do silo; 6) silo com o sólido a ser transportado; 7) válvula de alimentação; 8) válvula para equalização da pressão; 9) duto de transporte com concentração acima de 30% em volume de sólido e velocidade de 1 a 5 m/s; 10) ponto de injeção de ar; 11) filtro de ar do silo receptor e 12) silo receptor.

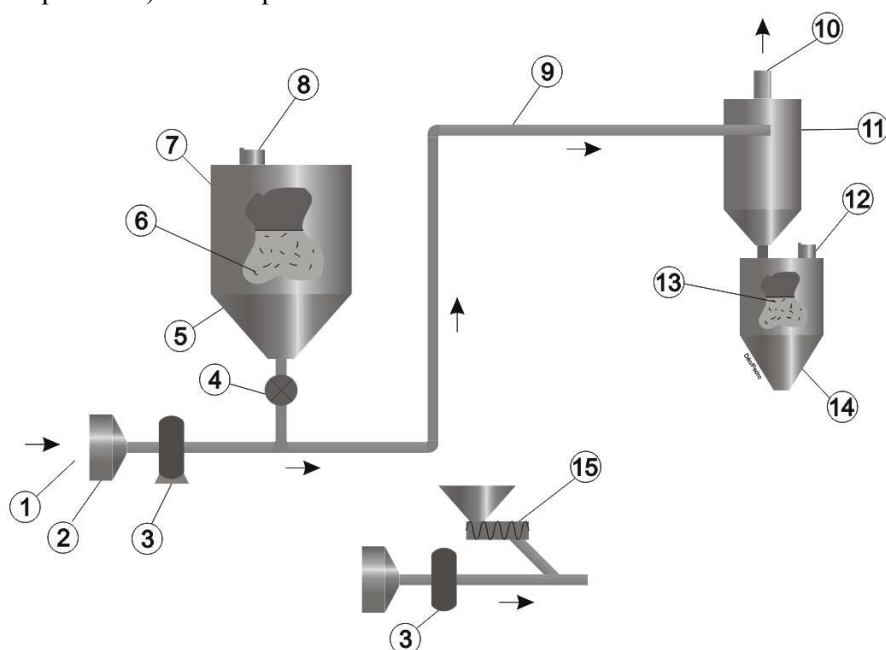


Figura 2.2 – Transporte pneumático em fase diluída com alimentador rotativo ou helicoidal. 1) entrada de ar; 2) filtro de ar; 3) soprador (pressão de 1 a 10 mca); 4) válvula rotativa (carambola); 5) silo alimentador; 6) sólido a ser transportado; 7) sensor de nível; 8) filtro de ar do silo; 9) duto de transporte com partículas suspensas, concentração abaixo de 1% em volume e velocidade próxima a 20 m/s; 10) saída do ar de transporte; 11) ciclone para separar os sólidos do ar; 12) filtro do silo receptor; 13) sólido particulado transportado; 14) silo receptor e 15) alimentador helicoidal.

A tabela 2.2 apresenta algumas características com vantagens, desvantagens e a literatura de projeto destes dois sistemas (Marcus et al 1990, Ribeiro 2005, Rhodes 2004, Frank 1975, Gluck 1968).

Tabela 2.2 – Características e dados relevantes do transporte pneumático em fase densa e diluída.

	Fase densa	Fase diluída
Carga de sólidos, massa de sólidos/massa de ar	Maior que 15	Menor que 15
Velocidade	Menor que 10 m/s	Maior que 10 m/s, em geral acima de 20 m/s
Concentração de sólido	Maior que 30% em volume	Menor que 1% em volume
Pressão de operação	Maior que 15 psi (100 kPa)	Menor que 15 psi (100 kPa)
Vantagens	- Baixa relação de energia por quilograma de sólido transportado. - Baixa erosão da tubulação. - Baixa degradação do produto.	- Baixo custo de aquisição e manutenção.
Desvantagens	- Elevado custo de aquisição e manutenção.	- Elevada erosão na parte inferior da tubulação e em curvas.
Literaturas que fornecem equações de perda de carga e dados de projeto	KONRAD (1986), GU e KLINZING (1989), DHODAPKAR, PLASYNSKI e KLINZING (1994), MOLODSOF e LAOUAR (1998), HEUCKE e MOLERUS (1999), e KLAUSNER, CHEN e MEI (2002).	RHODES (2004), GLUCK, (1968), FRANK (1975), GOMIDE (1983), PERRY&GREEN (1997) COUPER, FAIR E WALAS (2010).

Observa-se na Figura 2.3, de forma qualitativa, a relação entre a perda de carga (queda de pressão) por comprimento de duto ($\Delta P/L$) e a velocidade média do ar (v) em função da quantidade de sólido para o transporte em fase densa e fase diluída.

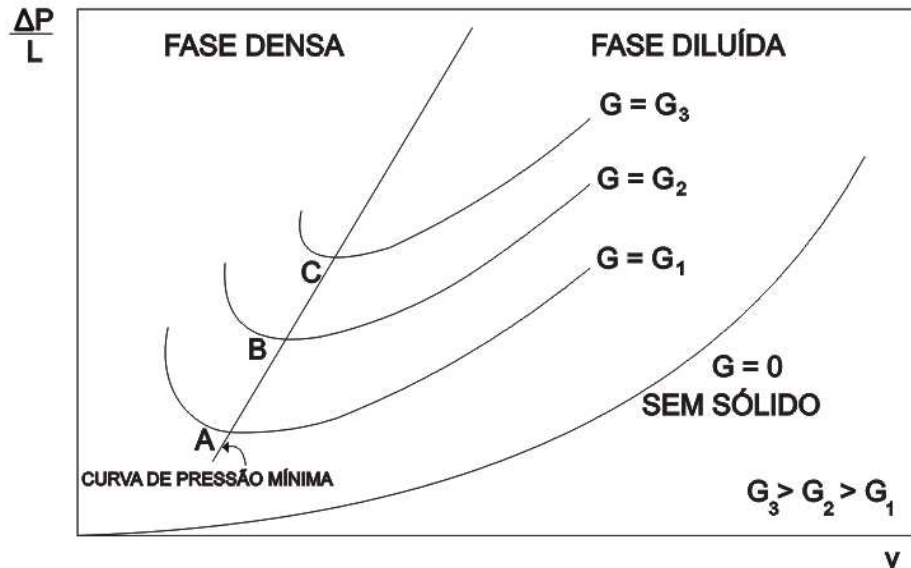


Figura 2.3 - Perda de carga por unidade de comprimento em função da velocidade média do ar. KLINZING et al., 1997.

No sistema sem sólido da Figura 2.3, o aumento da velocidade provoca um aumento contínuo na perda de carga por unidade de comprimento ($\Delta P/L$).

Com uma vazão constante de sólido, por exemplo, G_1 desta mesma Figura 2.3, a redução da velocidade a partir do extremo direito (fase diluída) provoca uma redução da perda de carga até o ponto A. Uma maior redução da velocidade a partir do ponto A acarreta um aumento na perda de carga pelo acúmulo de sólidos no duto. Ainda nesta figura, quanto maior a quantidade de sólido (G) maior a perda de carga para a mesma velocidade. A curva em formato de “U” comentada para a vazão de sólido G_1 é similar para as demais vazões G_2 e G_3 . A curva de mínima pressão separa a fase densa da fase diluída.

O tamanho da partícula e suas características físicas podem indicar o regime de transporte. GELDART em 1973 propôs um diagrama (Figura 2.4) para classificar as partículas e contribuir com a seleção da técnica de transporte (Tabela 2.3).

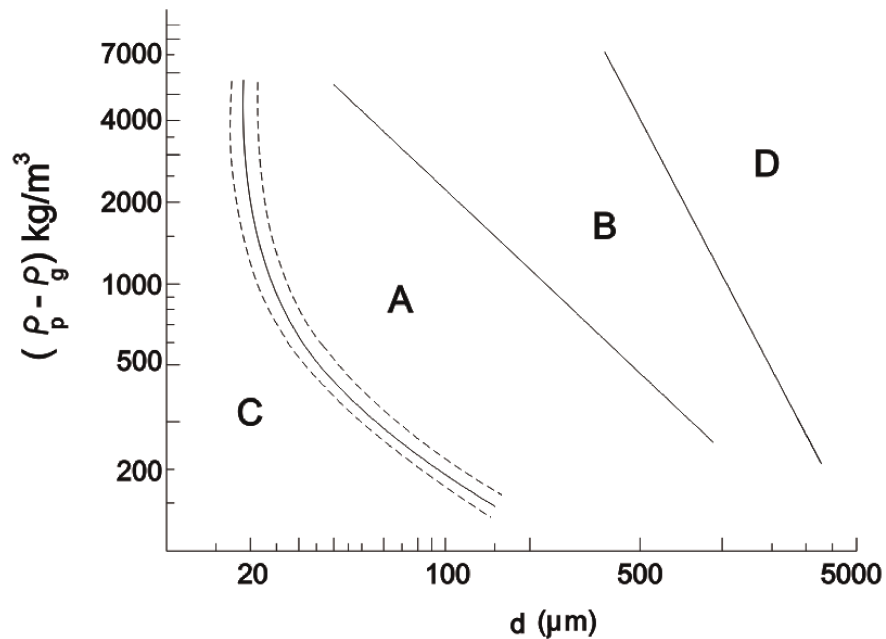


Figura 2.4 - Diagrama de GELDART (1973). Sendo ρ_p a densidade da partícula, ρ_g a densidade do gás e d o diâmetro médio das partículas. C-coesiva, A-aerável, B-como areia, D-jorrável.

Tabela 2.3 – Separação de partículas por GELDART (1973).

Grupo	Características
A	Materiais com partículas de 30 a 1000 μm e diferença de densidade de 200 a 6000 kg/m^3 . Podem ser transportados em fase densa com pouca possibilidade de entupimento da linha, como por exemplo, os catalisadores sólidos.
B	Partículas de tamanho de $40 \mu\text{m} < d_p < 500 \mu\text{m}$ e densidade entre 1,4 g/cm^3 e 4 g/cm^3 . Pós que podem ser transportados com razões de vazões mássicas sólido/gás de até 100 vezes. A areia e o vidro moído são os exemplos clássicos.
C	Pós de natureza coesiva de diâmetros muito pequenos, que tendem a se aglomerar em um sistema de transporte convencional, ocasionando a obstrução do tubo. Nestes sistemas são muito utilizados tubos flexíveis para impedir tal fenômeno físico. O cimento e o trigo são exemplos típicos.
D	Sólidos de grandes diâmetros. Transportados com altas velocidades de ar (acima de 28 m/s) e uma baixa razão mássica sólidos/gás. Como exemplo pode-se citar os pellets de polímeros e os grãos de soja, feijão, milho e arroz.

2.3 Transporte pneumático em fase diluída

2.3.1 Sistemas diretos, indiretos, com pressão positiva e pressão negativa

Além do sistema esboçado na Figura 2.2 denominado de transporte pneumático indireto, em que o sólido não passa pela fonte de ar (ventilador, pressão de até 1 mca ou soprador de 1 até 20 mca), o sólido pode ser alimentado antes do ventilador (sistema direto, Figura 2.5). O sistema com pressão negativa conforme Figura 2.6, para coleta de partícula de ambientes de trabalho, é também bastante empregado.

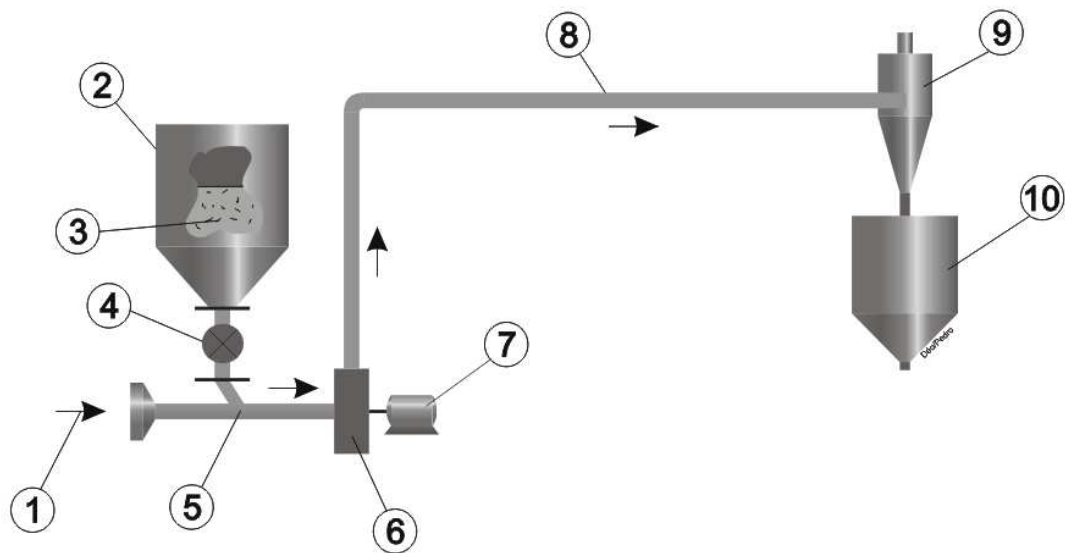


Figura 2.5 - Sistema direto de transporte pneumático em fase diluída: 1) ar; 2) silo de alimentação; 3) sólido particulado a ser transportados; 4) válvula rotativa; 5) duto em “y” para redução da perda de carga; 6) ventilador; 7) motor do ventilador; 8) duto de transporte; 9) ciclone e 10) silo de recepção.

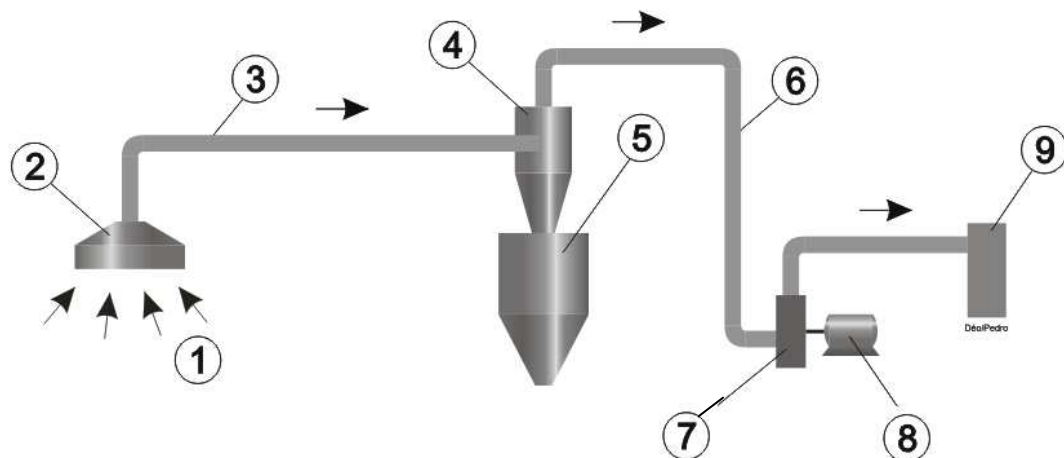


Figura 2.6 - Sistema com pressão negativa de transporte pneumático em fase diluída. 1) entrada de ar; 2) coifa; 3) duto de transporte de partículas; 4) ciclone; 5) silo receptor; 6) duto de ar com partículas não separadas pelo ciclone; 7) ventilador; 8) motor do ventilador e 9) filtro de manga.

O sistema com circuito fechado, com o mesmo ar ou gás inerte recirculando nos dutos, silos e sopradores (Figura 2.7) tem, segundo GLUCK (1968) as seguintes vantagens: a) prevenir envenenamento do material; b) evitar que partículas perigosas sejam descarregadas para a atmosfera; c) impedir que materiais higroscópicos retenham umidade da atmosfera; d) mitigar a contaminação dos produtos e e) isolar materiais altamente inflamáveis e explosivos na presença do oxigênio, usando um gás inerte.

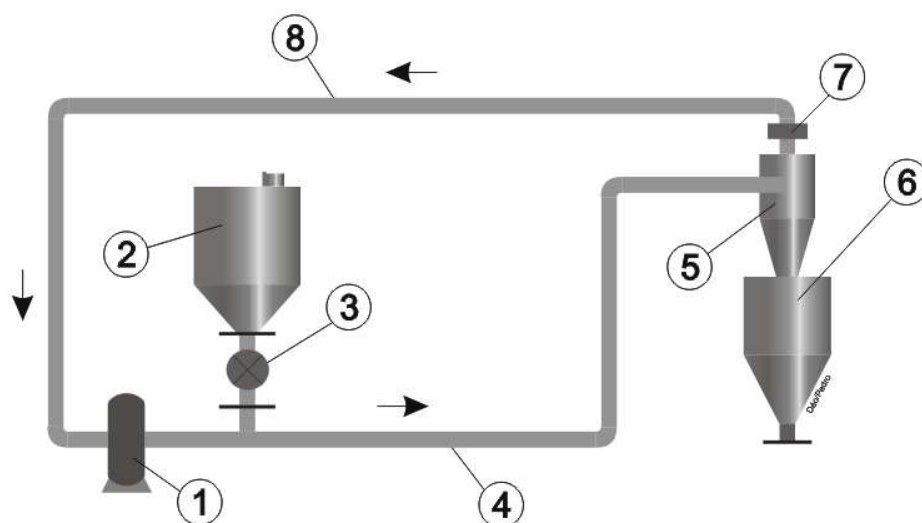


Figura 2.7 - Sistema com circuito fechado de transporte pneumático em fase diluída. 1) soprador; 2) silo de alimentação; 3) alimentador; 4) duto de transporte com pressão positiva; 5) ciclone; 6) silo receptor; 7) filtro; 8) duto com ar ou gás com pressão negativa para a entrada do soprador.

2.3.2 Velocidade de saltitação e afogamento

A Figura 2.8.a indica o ponto da velocidade de afogamento (“choking”, v_{ch}) para duto vertical e a Figura 2.8.b, o ponto da velocidade de saltitação para duto horizontal. A velocidade de afogamento (v_{ch}) é comumente definida como a mais baixa em que o ar ou gás pode deslocar todos os sólidos em suspensão (fase diluída) em um duto vertical (MOLODTSOF e MOTTE, 2001). São várias as definições da velocidade de saltitação (“saltitation”, v_{salt}) para dutos horizontais (Tabela 2.4).

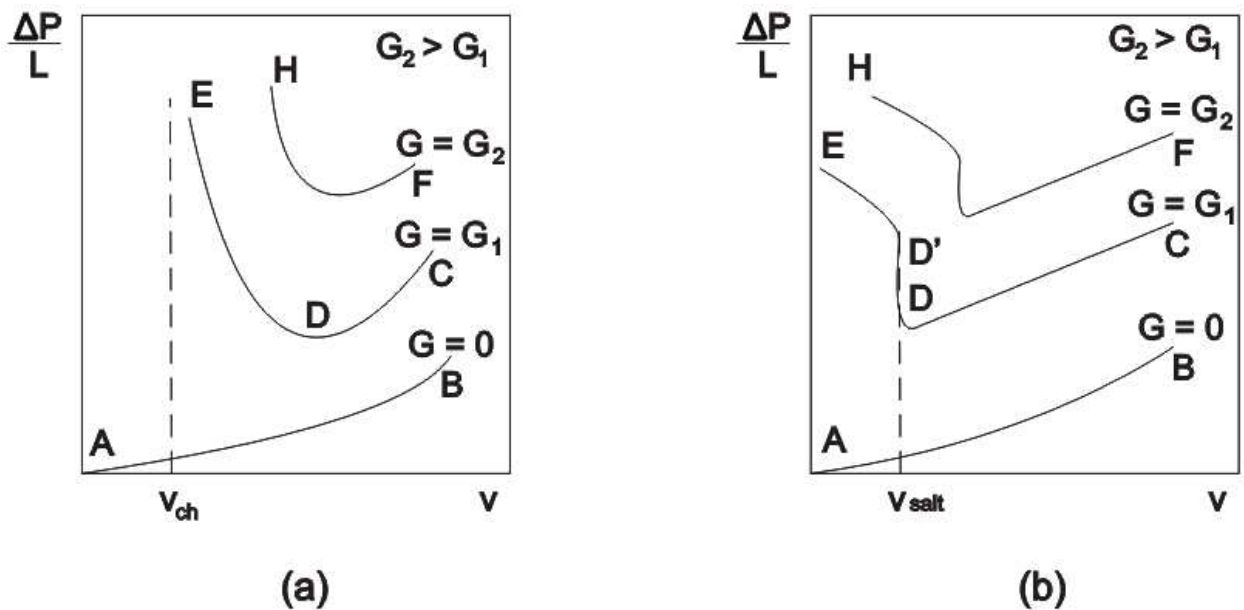


Figura 2.8 - Perda de carga por unidade de comprimento ($\Delta P/L$) em função da velocidade superficial do ar ou gás (v). a) duto vertical, velocidade de afogamento (v_{ch}), no trecho DE a carga estática dos sólidos é maior que a resistência por atrito; b) duto horizontal, velocidade de saltitação (v_{salt}), no trecho D'E uma parte dos sólidos pode mover-se em fase densa na base do tubo horizontal e outra parte desloca-se em fase diluída no topo do duto. Não há sólido ($G = 0$) no trecho AB. (KUNII 1991; RHODES 2004).

Tabela 2.4 – Definições de velocidade de saltitação.

Autor/Ano	Definição
ZENS/1949	a. A velocidade mínima do gás necessária para transportar uma única partícula sobre a parte inferior do tubo através do deslizamento, rolagem e saltitação. b. A velocidade mínima necessária para retirar uma partícula do repouso e movimentá-la em suspensão. c. A velocidade mínima para transportar uma partícula alimentada na linha de transporte sem rolar, saltar ou ter uma trajetória oscilante. d. A velocidade mínima necessária para tirar uma partícula de repouso em uma camada e transportá-la em suspensão
KLINZING e CABREJOS/1994	A mínima velocidade requerida para o transporte de sólidos sem a formação da camada estacionária na parte inferior da tubulação.
AGARWAL e DHODAPKAR/2004	Ponto de pressão mínima para uma alimentação de sólidos constante.
OCHI e TAKEI/1995	Velocidade em que a perda de carga total por unidade de comprimento para uma dada vazão torna-se mínima (determinada pelas medições de perda de carga). A velocidade de saltitação depende do diâmetro da partícula, da velocidade terminal, fricção entre a partícula e a parede e a razão de carregamento do sólido.
KALMAN e HUBERT/2003	Velocidade de aceleração crítica de mistura e velocidade de mínima perda de carga.

2.3.3 Equações de projeto para o transporte em fase diluída

O texto clássico para o projeto das unidades de transporte pneumático em fase diluída está apresentado no livro “Fan Engineering”, sétima edição de 1970.

GOMIDE (1983) montou correlações de projeto adaptadas das figuras do “Fan Engineering” visando o emprego de calculadoras eletrônicas. A velocidade média do ar, que considera a velocidade de flutuação no trecho vertical e a velocidade do material é dada pela Equação 2.1.

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

Sendo

- v a velocidade média do ar (m/s)
- ρ a massa específica aparente do material (t/m³)
- D_p o diâmetro das partículas (mm)

O diâmetro do tubo de transporte é calculado pela Equação 2.2.

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

Em que

D é o diâmetro interno do tubo de transporte (mm)

C é a capacidade de transporte (t/h)

A perda de carga total por atrito pode, de acordo com GOMIDE (1983), ser estimada pela equação empírica representada pela Equação 2.3.

$$\Delta P_t = \left[1,68 L_t \left(K + 3,5 \right) \frac{V^{1,8}}{D^{1,22}} + 0,138 \phi X v^2 + \Delta P_e \right] 10^{-4} \quad (2.3)$$

A variável X é calculada pela Equação 2.4

$$X = \frac{C}{4,29 Q} \quad \text{para ar a } 20^\circ\text{C e } 1 \text{ atm} \quad (2.4)$$

Sendo:

ΔP_t a perda de carga total (kgf/cm²)

Obs.: 1 kgf/cm² = 10⁴ mmca

L_t o comprimento total dos tubos; soma do comprimento dos trechos horizontais com o dobro do comprimento dos trechos verticais e com o comprimento equivalente dos acessórios (m)

X a fração em massa de sólido transportado (kg sólidos / kg ar)

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

ΔP_e a perda de carga nos equipamentos acoplados à linha como: ciclone, filtro, Venturi, câmaras de poeira, entrada e saída de ar (mm)

Q a vazão de ar de transporte; produto da velocidade média do ar pela área da seção transversal do duto, conforme equação da continuidade (m³/s)

A sétima edição do “Perry’s Chemical Engineers Handbook”, de 1977 p.21.22 que teve como editores Robert H. Perry e Don W. Green apresenta cinco nomogramas para projeto de uma unidade de transporte pneumático em fase diluída. Os nomogramas relacionam as seguintes variáveis: a velocidade do ar, o diâmetro interno do duto, a vazão volumétrica do ar, a massa de sólido por massa de ar, a vazão de sólido transportado, o comprimento dos dutos, a perda de carga e a potência consumida.

JONES (1988) sugere o emprego da equação de Darcy para calcular a perda de carga do gás, acrescida de um termo que considera o sólido particulado transportado e um termo que contempla a perda no separador, conforme Equação 2.5.

$$\Delta P_t = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \gamma (1 + \alpha) + \Delta P_{sep} \quad (2.5)$$

Sendo:

ΔP_t	a perda de carga total (mmca)
F	o fator de atrito de Darcy (adimensional)
L	o comprimento da linha com o comprimento equivalente das curvas (m)
D	o diâmetro interno da tubulação (m)
v	a velocidade superficial do gás (m/s)
g	a aceleração da gravidade local (m/s ²)
γ	o peso específico do ar (kgf/m ³)
α	a fração volumétrica de sólidos (adimensional)
ΔP_{sep}	a perda de carga do separador ar/partícula (mmca)

Em 2010, quatro pesquisadores renomados, Couper, Penney, Fair e Walas recomendaram as Equações de 2.6 até 2.18 para projeto e análise de unidades de transporte pneumático em fase diluída.

Obs.: 1 ton curta = 2000 lb

1 ton longa = 2240 lb

Sendo

a potência do ventilador (hp por ton/h)

w_c o trabalho de compressão do ar (ft lbf/s)

w_f o trabalho total de atrito (ft lbf/s)

η o rendimento do ventilador, (adimensional)

a vazão do sólido (lb/s)

ΔP a perda de carga (lbf/in²)

a vazão do ar (lb/s)

Obs.: $\rho_{14,7} v_{op}$ Os autores recomendam, como primeira aproximação, desprezar o efeito da perda de carga e adotar 1 atm (14,7 psi) e 20°C (527,2 °R)

em que v_{op} é a velocidade na pressão de operação em ft/s e A a área da seção transversal do duto em ft²

ρ_m a densidade (massa específica) da mistura (lb/ft³)

$$w_f = w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 \quad (2.9)$$

trabalho de atrito/contribuição do ar, trechos retos (L) e singularidades

trabalho de atrito/entrada do sólido

—

—

trabalho de atrito/elevação do sólido

—

—

trabalho de atrito/escorregamento do sólido

—

—

trabalho de atrito/curva, força centrífuga provocada pelo sólido

— —

—

densidade da mistura

—
— —

—

densidade do ar na pressão de operação

— — —

—

saturação, relação entre o volume de ar e a massa de sólido

—

—

carga, relação entre a massa de sólido e a massa de ar

—

Nas equações supracitadas:

k é a relação entre os calores específicos a pressão constante (C_p) e a volume constante (C_v), (adimensional).

Obs.: se o fluido de transporte for o ar $C_p/C_v = 1,4$

R é a constante dos gases por unidade de massa ($\text{ft lbf}/(\text{lb } ^\circ\text{R})$)

Obs.: para o ar — — —

T é a temperatura ($^\circ\text{R}$)

P é a pressão (psi)

g é a aceleração da gravidade $[(\text{ft lbf})/(\text{lb } \text{s}^2)]$

Obs.: com as unidades empregadas, $g_c = 32,2 [(\text{ft lbf})/(\text{lb } \text{s}^2)]$, $g = 32,2 \text{ ft/s}^2$.

n_{ci}	é o número de ciclones (adimensional)
n_{cu}	é o número de curvas (adimensional)
n_f	é o número de filtros (adimensional)
f	é o fator de atrito (adimensional) Obs.: uma vez que o número de Reynolds é elevado sugerem f de 0,015 ($\varepsilon/D = 0,0003$)
L	é o comprimento dos trechos retos (ft)
L_i	é o comprimento equivalente (ft) Obs.: recomendam $L_i = 30,2 D$ para curva de raio longo com D (ft)
v	é a velocidade do ar na entrada do duto (ft/s), na pressão de 14,7 psi Obs.: $v = v_{ar\ op} (14,7\ psi/P_{operação})$
f_s	é o coeficiente de escorregamento “sliding” do sólido Obs.: é igual a tangente do ângulo de repouso, em geral entre 30 e 45° ou seja, f_s entre 0,58 ($\tan 30^\circ = 0,58$) e 1,00 ($\tan 45^\circ = 1,00$).
R'	é o raio da curva (ft)

RIZK em 1973 forneceu as correlações clássicas (Equações 2.19, 2.20 e 2.21) para previsão da velocidade de saltitação.

$$v_{salt} = \left[\frac{w_s \cdot 10^\delta}{A \cdot \rho_f} \cdot \left(\sqrt{g \cdot D} \right)^x \right]^{\frac{1}{x+1}} \quad (2.19)$$

$$\delta = 1,44 \cdot dp + 1,96 \quad (2.20)$$

$$x = 1,1 \cdot dp + 2,5 \quad (2.21)$$

Em que:

v_{salt}	é a velocidade de saltitação (m/s)
w_s	é a vazão mássica de sólidos (kg/s)
A	é a área da seção transversal do tubo (m ²)
ρ_f	é a densidade do fluido (kg/m ³)
D	é o diâmetro interno da tubulação (m)
g	é a aceleração da gravidade (m/s ²)
dp	é o diâmetro da partícula (m)

LEUNG e JONES (1978) afirmam que a correlação de Rizk tem um erro médio de aproximadamente 54%.

RABINOVICH e KALMAN em 2008 forneceram uma tabela com dezesseis equações além da clássica citada para velocidade de saltitação com as respectivas faixas de validade de autores conceituados.

2.3.4 Perda de carga em singularidades

São vários os métodos para considerar a perda de carga localizada em unidades de transporte pneumático em fase diluída. O método do fator K é o mais empregado. A perda de carga devido ao acessório, obtida por esse método, deve ser somada à perda de carga do tubo reto.

O método do fator K que representa a quantidade de energia cinética perdida em acessórios, é expressa pela Equação 2.22.

$$\ell_{w,ac} = K \frac{v^2}{2g} \quad (2.22)$$

Sendo

$\ell_{w,ac}$	a perda de carga do acessório (m)
K	o fator referente ao acessório (adimensional)
v	a velocidade média na entrada do acidente (m/s)
g	a aceleração da gravidade (m/s ²)

Este método tem como base a variação pouco significativa, para N_{Re} acima de 50000 da quantidade de energia cinética (K) que o fluido perde na singularidade (MORAES; SILVA; MORAES, 2011).

LUDWIG (2007) afirma que o valor de K independe do fluido ser líquido, gás ou vapor e do fluido estar em regime laminar ou turbulento.

A Tabela 2.5 fornece alguns valores de K sugeridos por PERRY E GREEN (1997) p. 6-18. Apresenta também valores de K_1 e K_∞ recomendados por HOOPER (1981) para o método dos dois K.

Tabela 2.5 – Valores de K , K_1 e K_∞ para vários acessórios. R é o raio de curvatura, D o diâmetro interno e β a relação entre a abertura interna e o diâmetro interno. PERRY/GREEN (1997) E HOOPER (1981).

Acessórios	K	K_1	K_∞
Cotovelo 90°, $R/D = 1$ rosca	0,75	800	0,40
Cotovelo 90°, $R/D = 1$ flange e solda	0,75	800	0,25
Curva 90°, $R/D = 1,5$ raio longo, rosca, flange e solda	0,45	800	0,20
Cotovelo 45°, $R/D = 1$ rosca, flange e solda	0,35	500	0,20
Curva 45°, $R/D = 1,5$ raio longo, rosca, flange e solda	0,20	500	0,15
Tê saída de lado, rosca	1,00	500	0,70
Tê saída de lado, flange e solda	1,00	800	0,80
Tê passagem direta, rosca	0,40	200	0,10
Tê passagem direta, flange e solda	0,40	150	0,50
Válvula de gaveta e de esfera, $\beta = 1$ (passagem sem restrição)	0,17	300	0,10
Válvula de gaveta e de esfera, $\beta = 0,9$ (abertura / D interno)	–	500	0,15
Válvula de gaveta e de esfera, $\beta = 0,8$	–	1 000	0,25
Válvula de globo	6,00	1 500	4,00
Válvula de globo em ângulo	2,00	1 000	2,00
Válvula de diafragma	2,30	1 000	2,00
Válvula de borboleta	0,24	800	0,25
Válvula de retenção com obturador ascendente	10,00	2 000	10,00
Válvula de retenção de disco oscilante, portinhola	2,00	1 500	1,50
Válvula de retenção de disco basculante	–	1 000	0,50

Obs₁.: O artigo de HOOPER (1981) também fornece valores de K_1 e K_∞ para curva com gomos “mitered elbows” de 90° e 45°, curva de 180° e válvulas de controle.

Obs₂.: Curvas “elbows”; têes “tees”; válvulas “valves”; globo “globe”; gaveta “gate”; válvula de macho “cock valve”; válvula de esfera “ball valve”; diafragma “diaphragm”; borboleta “butterfly”; retenção “check”; obturador ascendente “lift”; disco oscilante de portinhola “swing”; disco basculante “tilting-disk”; rosqueado “screwed”; flangeado “flanged” e soldado “welded”.

Obs₃.: a) entrada de tubulação (normal), $K_1 = 160$ e $K = K_\infty = 0,5$; b) entrada de tubulação (Borda), $K_1 = 160$, $K = K_\infty = 1,00$; c) saída de tubulação $K_1 = 0$, $K = K_\infty = 1,00$.

Várias tabelas com valores de K podem ser encontradas na P-NB-590 (ABNT), como por exemplo, para alargamentos e estreitamentos bruscos em função dos diâmetros de entrada e saída; alargamentos suaves em função do ângulo de abertura do cone; curvas com ângulos diferentes de 90° e 45° em função da relação entre o raio de curvatura (R) e o diâmetro do tubo

(D); curvas em gomos e válvulas (de gaveta em conduto circular e retangular, de esfera, de borboleta e de retenção) em função da abertura (Tabela 2.6 para gaveta em conduto circular).

Tabela 2.6 – Valores de K para válvula de gaveta em conduto circular em função da relação entre a abertura (x) e o diâmetro interno (D). P-NMB-590 (ABNT)

$\frac{x}{D}$	K	$\frac{x}{D}$	K	$\frac{x}{D}$	K	$\frac{x}{D}$	K
0,181	41,21	0,250	22,68	0,417	6,33	0,583	1,55
0,194	35,36	0,333	11,89	0,458	4,57	0,667	0,77
0,208	31,35	0,375	88,63	0,500	3,27	1,000	0,10

A CRANE Co. (1987) recomenda um coeficiente de resistência (K_{Crane}) multiplicado por um fator de atrito f_T para se obter a perda de carga, conforme a Equação 2.23.

$$\ell_{w,ac} = K_{Crane} f_T \quad (2.23)$$

O livro preparado pela CRANE Co. (1987) ilustra os ângulos e as relações das partes internas dos vários tipos de válvulas e acessórios, com os respectivos coeficientes ou equações. Alguns valores destes coeficientes e do fator f_T são fornecidos nas Tabelas 2.7 e 2.8 respectivamente.

Tabela 2.7 – Alguns valores de K_{Crane} . R é o raio de curvatura, D o diâmetro interno e β a relação entre a abertura interna e o diâmetro interno.

Acessório	K_{Crane}	Acessório	K_{Crane}
Curva 90° R/D = 1,0 solda	20	Tê 90° passagem direta	20
Curva 90° R/D = 1,5 solda	14	Tê 90° saída lateral	60
Curva 90° R/D = 2,0 solda	12	Tê 90° saída bilateral	60
Curva 90° R/D = 3,0 solda	12	Entrada normal	0,78*
Curva 90° R/D = 4,0 solda	14	Saída de tubulação	1,0*
Curva 90° R/D = 6,0 solda	17	Válvula de gaveta $\beta = 1$	8
Curva 90° R/D = 8,0 solda	24	Válvula de globo $\beta = 1$	340
Curva 90° R/D = 10,0 solda	30	Válvula de ângulo $\beta = 1$	150

* não é multiplicado por f_T .

continua

Tabela 2.7 – Alguns valores de K_{Crane} . R é o raio de curvatura, D o diâmetro interno e β a relação entre a abertura interna e o diâmetro interno. Continuação.

Acessório	K_{Crane}	Acessório	K_{Crane}
Curva 90° R/D = 12,0 solda	34	Retenção leve (disco oscilante)	100
Curva 90° R/D = 14,0 solda	38	Retenção de obturador ascendente	600
Curva 90° R/D = 16,0 solda	42	Válvula de esfera $\beta = 1$	3
Cotovelo 90° rosca	30	Válvula de borboleta 2 a 8"	45
Cotovelo 45° rosca	16	Válvula de pé com crivo/obt. ascend.	420

Tabela 2.8 – Fator f_T do método da CRANE em função do diâmetro nominal D_N .

D_N (mm)	25	32	40	50	65,8	100	125	150	200	300	450
D_N (in.)	1	1 ^{1/4}	1 ^{1/2}	2	2 ^{1/2}	4	5	6	8	12	18
f_T	0,023	0,022	0,021	0,019	0,018	0,017	0,016	0,015	0,014	0,013	0,012

Obs.: $D_N = 200$ mm e $D_N = 250$ mm possuem o mesmo f_T de 0,014.

WILLIAM B. HOPPER em 1997, demonstrou que o método dos dois K conduz a resultados mais exatos que os métodos anteriores principalmente para regime laminar. A perda de carga do acessório ($\ell_{w, ac}$), representada na Equação 2.24, também deve ser somada à perda de carga do tubo reto. A equação do método adiciona ao K_∞ uma correção referente ao diâmetro interno (D_{in}) em polegada e uma constante K_1 (Tabela 2.5) considerando o N_{Re} .

$$\ell_{w, ac} = [(K_1 / N_{Re}) + K_\infty (1 + 1/D_{in.})] \frac{v^2}{2g} \quad (2.24)$$

2.4 Distribuição de partículas na seção transversal da tubulação

LI e TOMITA (2000) realizaram um estudo experimental em transporte pneumático em fase diluída em fluxo helicoidal (“swirling”), provocado por chicanas instaladas no interior dos dutos, visando uma melhor distribuição das partículas na seção transversal. As medições do perfil

de velocidade e da concentração das partículas de polietileno e polivinil foram realizadas utilizando a técnica da imagem fotográfica. A partir de resultados experimentais, verificaram que a velocidade média do transporte pneumático em fluxo “swirling” foi menor que a do transportador pneumático convencional, para uma alta velocidade do gás. Os perfis de concentração das partículas no transporte pneumático em fluxo “swirling” apresentaram distribuições simétricas em relação ao eixo do tubo e a maior concentração de partículas apareceu perto da parede na região de aceleração. Na região desenvolvida, os perfis de concentração das partículas do transporte pneumático em fluxo “swirling” mostraram distribuições assimétricas, sendo que as maiores concentrações das partículas apareceram no fundo do tubo. Assim, foi concluído que as concentrações das partículas do transporte pneumático, em fluxo “swirling” no fundo do tubo, são mais baixas do que o transporte pneumático em fluxo axial. Os autores também quantificaram a distribuição dos sólidos na seção transversal do tubo por meio de fotografias, com erros inerentes a não contagem de partículas encobertas (eclipsadas).

FOKEER et al. (2004) apresentam uma discussão sobre métodos utilizados para medidas de perfis de concentração de sólidos na seção transversal de tubulações. Para os autores, a caracterização do fluxo apresenta forte dependência em como se observar e medir tais características, a partir de uma unidade experimental de transporte pneumático. As técnicas podem se dividir em métodos intrusivos, ou seja, com introdução de um medidor como um tubo coletor no interior do duto e métodos não intrusivos, sendo que cada um deles apresenta vantagens e desvantagens. Para perfis de concentração de sólidos, as variáveis que se mostram mais relevantes são predominantemente a distribuição de tamanhos das partículas, razão de sólidos alimentados, material dos tubos e tipos de curvas utilizadas. Estudos têm mostrado que curvas que utilizam tês saída lateral são menos propensos ao desgaste, já que existe uma tendência de se acumular material promovendo, assim, um efeito amortecedor nas colisões entre parede-partícula.

A literatura corrente é carente no que concerne a estudos em tês utilizando balisas de extensão. Tal mecanismo promove a formação de um leito fixo de partículas, atenuando, de forma mais preponderante, o desgaste tanto dos sólidos quanto da tubulação em curvas.

Autores como LEVI E MASON (1997); VASQUEZ ET AL, (2008) E YAN E RINOSHIKA (2011) fizeram uso de equipamentos intrusivos para medidas de velocidade do ar e

da partícula bem como a concentração de sólidos ao longo da seção transversal da tubulação para o transporte pneumático.

Métodos intrusivos podem alterar o fluxo das partículas ao redor das sondas e este pode ser diferente do fluxo real, gerando assim baixa confiabilidade nas medidas realizadas.

Como métodos não intrusivos pode-se destacar a anemometria Doppler (PDA) e métodos de tomografia como, por exemplo, ressonância magnética, capacitância e resistência elétrica (YAN E RINOSHIKA, 2011). Os autores utilizaram imagens digitais de alta velocidade, para a determinação do perfil de concentração de sólidos ao longo da seção transversal.

LI E TOMITA (2000) discutiram sobre técnicas de fotografia de imagens para determinação do perfil de concentração de sólidos. Segundo os autores, tais técnicas medem momentos instantâneos dos perfis de concentração e velocidade; no entanto, só podem ser utilizadas em fases dispersas (gás-partícula) e com baixas concentrações de sólidos. Para fluxos axiais, as regiões de maiores concentrações de sólidos apresentam-se em regiões próximas às paredes.

WEI ET AL. (2011) utilizaram a técnica da sonda de fibra ótica (OFP) para determinar a concentração volumétrica de sólidos. A confiabilidade de tais resultados apresenta forte dependência da calibração do equipamento. A técnica é baseada na refletância de luz pelas partículas. Como desvantagem de técnicas que utilizam tal procedimento, reside o fato de partículas ficarem escondidas atrás de outras e não serem capazes de refletir a luz, gerando uma fonte de erro inerente ao acobertamento de partículas ou partículas eclipsadas.

De acordo com VASQUEZ et al (2007) a perda de carga varia, para as mesmas condições, de acordo com o tipo de material. A perda de carga mostra relação próxima com o efeito de saltitação das partículas, atingindo valores mais altos para partículas de polietileno de baixa densidade, devido ao fato de a partícula necessitar ser reacelerada inúmeras vezes.

Um método não intrusivo e sem os problemas de eclipse de partículas foi estudado em duto horizontal por SANTOS, TAMBOURGI, FERNANDES, MORAES e a autora do presente trabalho em 2009 e publicado em 2011 no Brazilian Journal of Chemical Engineering. O sistema montado na época está apresentado na Figura 2.9.



Figura 2.9 - Unidade piloto de transporte pneumático em fase diluída com motor de rotação variável em balanço, direcionador de fluxo, tubos de Pitot, alimentador rotativo, anéis piezométricos, manômetros com tubo inclinado e coletor de partículas no fim do duto horizontal.

No trabalho supracitado, as tubulações eram de acrílico com diâmetro interno de 117 mm, espessura de 4 mm e comprimento total de 4020 mm. O sistema permitiu determinar a perda de carga em função da velocidade de ar e a distribuição das partículas na seção transversal do duto horizontal (Figura 2.10). Os tubos receberam conexões para os anéis piezométricos utilizados nas medições da queda de pressão quantificadas por manômetros inclinados (Figura 2.9). As tubulações foram unidas por flanges com canais para os anéis de borracha de vedação. As flanges também de acrílico, foram confeccionadas com diâmetro interno de 117 mm, externo de 189 mm e espessura de 6 mm.

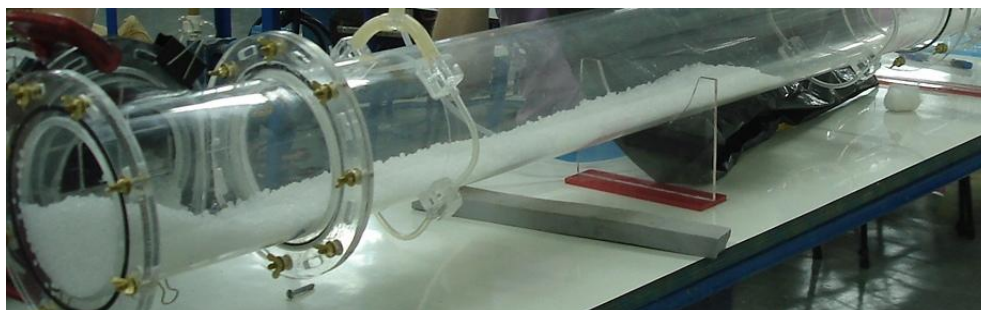


Figura 2.10 – Tubulação horizontal de acrílico para o transporte de sólidos.

O fluxo de ar foi introduzido ao sistema por um ventilador centrífugo (Figura 2.11) da marca VentiSilva de pás semi-abertas com rotor de diâmetro de 210 mm, duto de sucção com

diâmetro de 217 mm e descarga com seção retangular 150 por 160 mm. O ventilador foi acoplado a um motor de corrente alternada da marca Weg, modelo 0996 EM17253 com rotação nominal de 3450 rpm, potência de 1 cv ($\approx 0,96$ hp) e rendimento de 72,7 % onde se adicionaram dois rolamentos extras para manter o motor em balanço com carcaça móvel visando determinar a potência consumida.

A variação da rotação do motor com a consequente alteração da velocidade do ar nos dutos foi realizada por um inversor de frequência da marca Mitsubishi Electric Corporation modelo FR-A024-1 5K-UL, com 230 V 50 Hz / 230 V 60 Hz.

Uma vez que na descarga do ventilador forma-se uma região de grande turbulência, proporcionando oscilações na leitura das velocidades e pressões, foi instalado no duto de descarga um direcionador de fluxo também denominado de “colméia” ou “retificador” ou “estabilizador” (Figura 2.11).

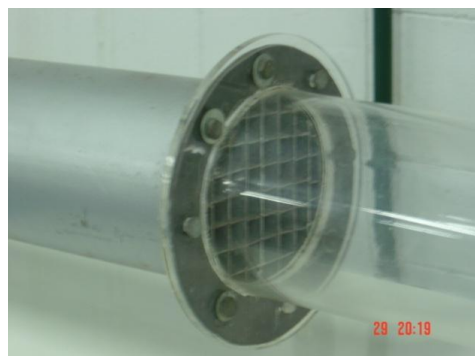
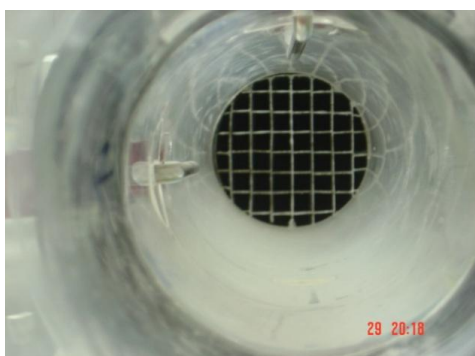


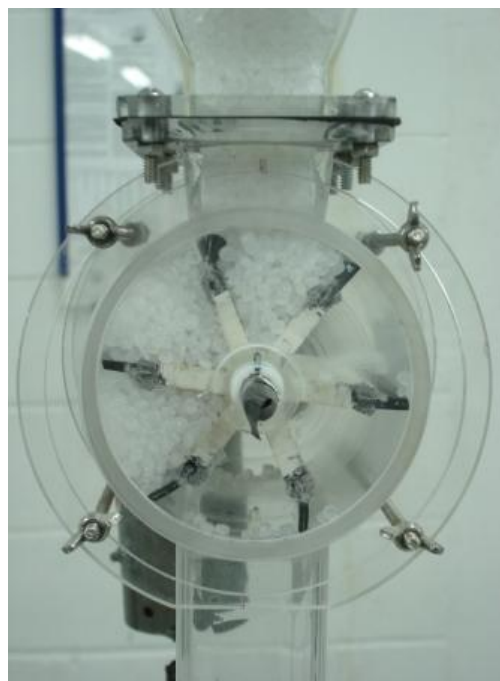
Figura 2.11 - Direcionador de fluxo de ferro galvanizado construído conforme a ASME-Test Code for Fans.

O direcionador visou minimizar as perturbações na saída do ventilador e diminuir a distância necessária para a instalação do tubo de Pitot. Os tubos de Pitot vertical e horizontal com diâmetros interno de 3 mm (0,125 in) Figura 2.12 e externo de 8 mm (0,312 in) foram acoplados a suportes móveis e instalados na tubulação para coletar os dados de pressão total e estática na seção da tubulação, conforme norma ASME. A pressão dinâmica necessária para se obter a velocidade foi determinada pela diferença entre a pressão total e a estática.



Figura 2.12 - Tubos de Pitot e direcionador de fluxo.

A figura 2.13 mostra a válvula rotativa que 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.



Figuras 2.13 – Válvula rotativa.

Os sólidos foram descarregados em um módulo de coleta (Figura 2.14) no final do transportador pneumático horizontal. Este módulo para verificar a distribuição das partículas foi dividido em 9 tubos de alumínio na seção quadrada de 40 mm por 40 mm onde se acoplaram sacos (telas filtrantes) de náilon de 36 mesh (número de orifícios por polegada linear) para retenção dos sólidos e passagem do ar.

Estas bolsas possuíam as seguintes dimensões: 870 mm de comprimento e 300 mm de largura, (Figura 2.15). O distribuidor e a bolsa coletora permitiram observar a distribuição de sólidos ao longo do transportador pneumático em fase diluída horizontal, e calcular a quantidade de partículas localizadas em cada seção quadrada do distribuidor.

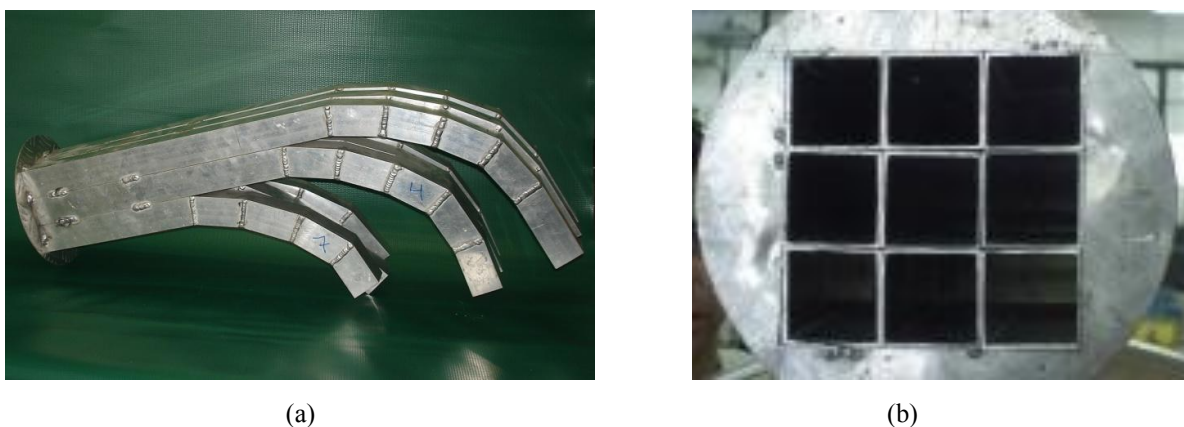


Figura 2.14 – Coletor de alumínio: a) vista lateral do coletor, módulo para análise da distribuição das partículas; b) vista frontal da entrada do coletor, módulo para análise da distribuição das partículas.

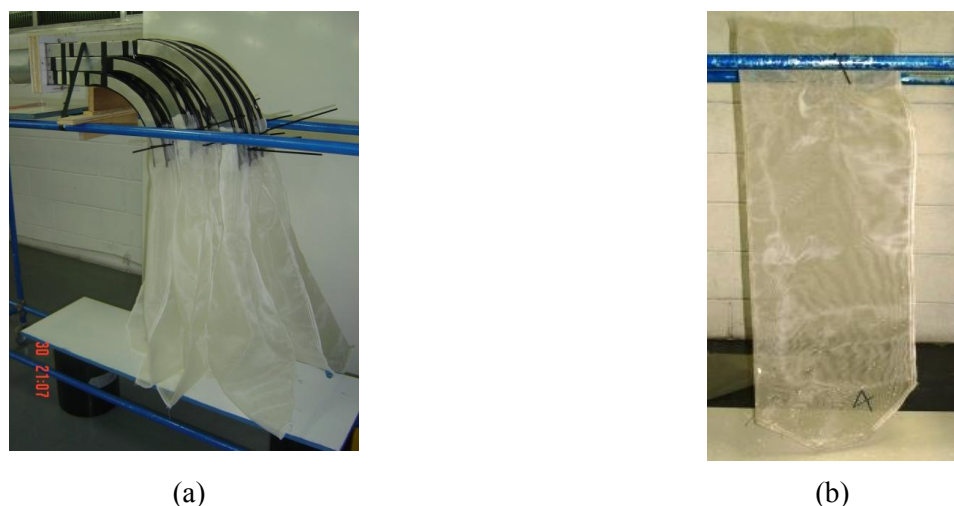
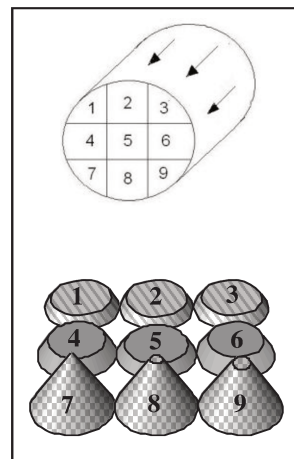
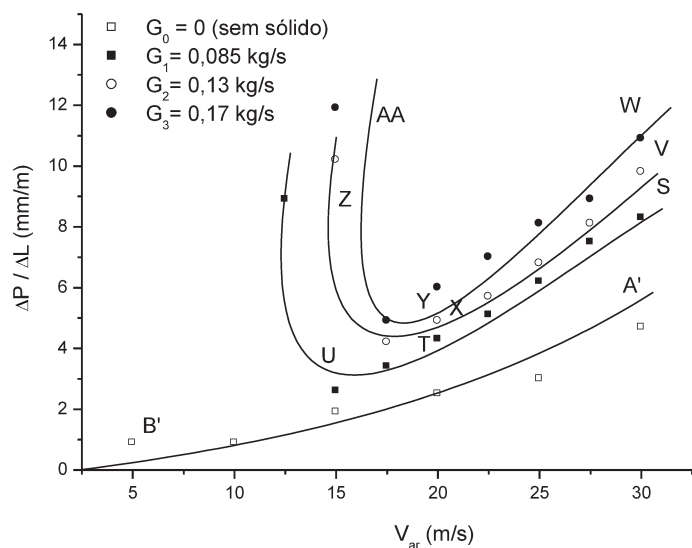


Figura 2.15 – Sacos coletores, tela filtrante de 36 mesh: a) sacos acoplados ao coletor de alumínio; b) detalhe do saco coletor.

Foram realizados ensaios com polipropileno, polietileno e poliestireno. A Figura 2.16 apresenta um dos resultados para o polipropileno.



Ponto S

4,74	4,47	4,88
6,96	5,22	7,41
25,08	21,49	19,75

Ponto T

2,24	1,95	2,22
4,22	3,28	4,26
29,95	31,66	20,23

Ponto U

0,84	0,72	0,88
2,32	1,94	2,55
28,41	39,56	22,78

Ponto V

4,21	3,81	4,34
6,29	4,80	6,81
25,36	23,65	20,73

Ponto X

2,07	1,70	2,07
3,84	3,09	3,85
28,70	35,49	19,19

Ponto Z

1,70	1,35	1,68
4,33	3,54	4,46
28,83	31,21	22,90

Ponto W

3,83	3,53	3,98
6,09	4,61	6,58
25,52	24,69	21,18

Ponto Y

1,73	1,47	1,83
3,50	2,92	3,61
27,38	36,73	20,83

Ponto Y

1,10	1,14	1,44
3,53	3,18	3,98
28,68	34,16	22,78

Figura 2.16 - Diagrama de fases do polipropileno – Perda de carga por unidade de comprimento em função da velocidade do ar e da vazão de sólidos. Distribuição de sólidos na seção da tubulação.

O método não intrusivo descrito e sem os problemas de eclipse de partículas que foi estudado em duto horizontal por SANTOS, TAMBOURGI, FERNANDES, MORAES, MORAES (2009) permitiu construir curvas que relacionam a vazão do sólido, perda de carga por metro de tubo e, de forma não convencional, a relação destes parâmetros com a distribuição das partículas na seção transversal de duto de dimensões industriais.

O trabalho demonstrou que nas condições que comumente se projetam as unidades industriais de transporte pneumático, em fase diluída, em geral mais de 70% dos sólidos estão no terço inferior da tubulação, gerando desgastes nestas regiões, com paradas e lucros cessantes para manutenção. O estudo não contemplou a análise em dutos verticais e perda de carga em tê com saída de lado.

2.5 Polipropileno

O polipropileno é uma resina reciclável empregado em embalagens de massas, na confecção de eletrodomésticos, bolsas, recipientes farmacêuticos, dutos e revestimento de tanques industriais. De acordo com o anuário das indústrias de 2010, 37% do polipropileno é empregado no segmento alimentício, 35% em bens de consumo, 7% na construção civil e industrial, 6% na área agrícola, 6% nas indústrias farmacêuticas e de cosméticos, 1% na indústria automobilística e 2% em aplicações diversas. O ponto de fusão varia de 165 até 175 °C , possui uma baixa densidade (de 0,89 até 0,91 g/cm³) e excelente resistência química à fissura ambiental. O custo relativamente baixo se comparado ao de outras resinas, além da boa transparência, rigidez ao impacto e à fadiga por flexão faz com que seja um dos polímeros de maior venda.

A indústria de polipropileno normalmente disponibiliza esta resina na forma granular, com diâmetro aproximado de 4,4 mm. Este diâmetro e a densidade supracitada de 0,89 até 0,91 g/cm³ recomendam (grupo D da classificação de Geldart, Figura 2.4) o transporte pneumático como uma das formas mais econômicas de deslocar o polipropileno na área fabril.

2.6 Resumo do estado da arte

O transporte pneumático de partículas é um sistema relevante no desenvolvimento sustentável (econômico, social e ambiental).

No que concerne ao projeto e análise de unidades de transporte pneumático em fase diluída, de menor custo de aquisição e operação em relação à fase densa, a literatura é carente de dados da:

- a) velocidade de saltitação e afogamento em unidades piloto;
- b) distribuição de partículas na seção transversal dos dutos, a qual está diretamente relacionada ao desgaste dos mesmos.
- c) constante K multiplicadora da carga cinética da perda de carga do acessório tê saída de lado e com prolongamentos para redução de desgaste e facilidade de limpeza.

CAPÍTULO III

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Unidade experimental

O sistema piloto da Figura 3.1, denominado de “Transportador Pneumático”, foi projetado e montado para o presente estudo. As Figuras de 3.2 até 3.9 fornecem detalhes da unidade experimental.

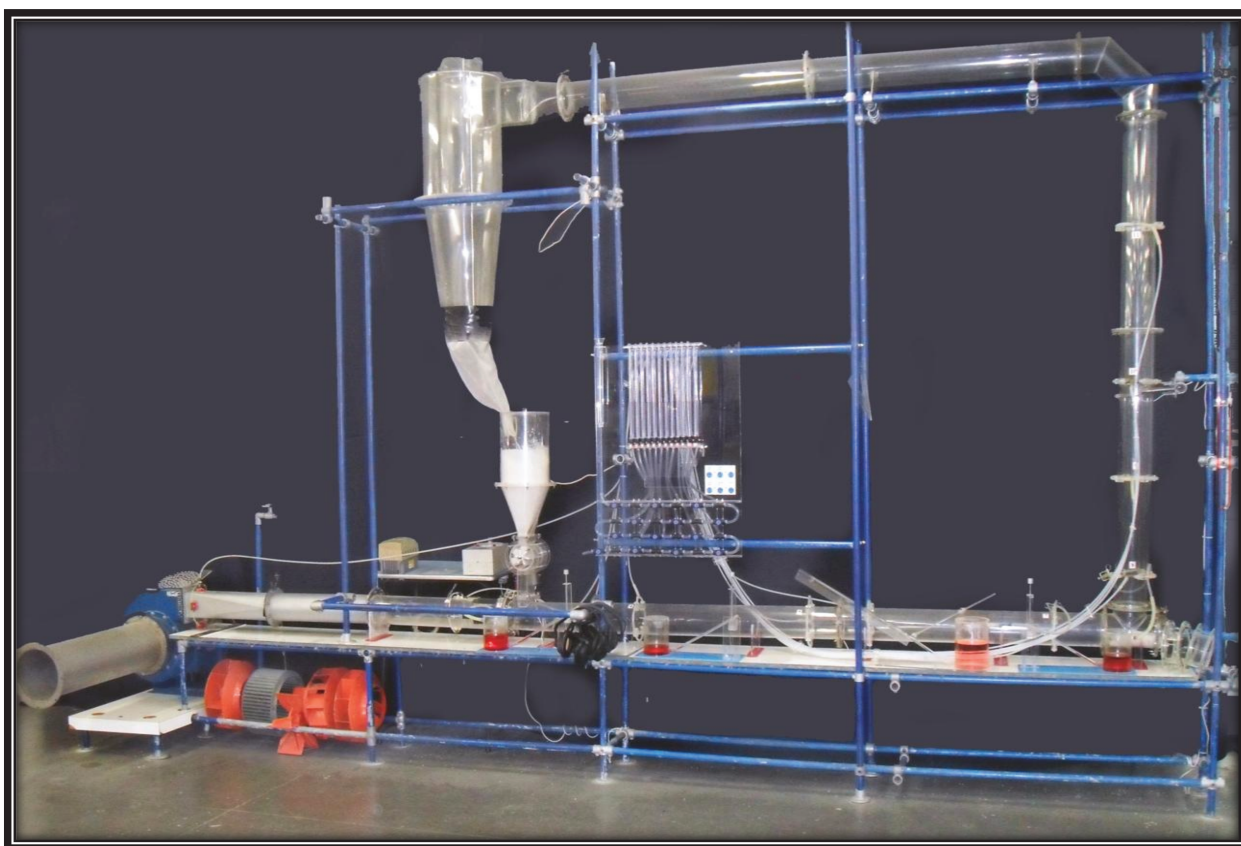


Figura 3.1 - Transportador Pneumático em fase diluída, construído no Laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília - UNISANTA. Unidade piloto com motor de rotação variável em balanço, direcionador de fluxo, tubos de Pitot, alimentador rotativo, manômetros com tubo inclinado, anéis piezométricos nos dutos horizontal e vertical, coletor de partículas que pode ser acoplado no duto horizontal ou no vertical e ciclone.

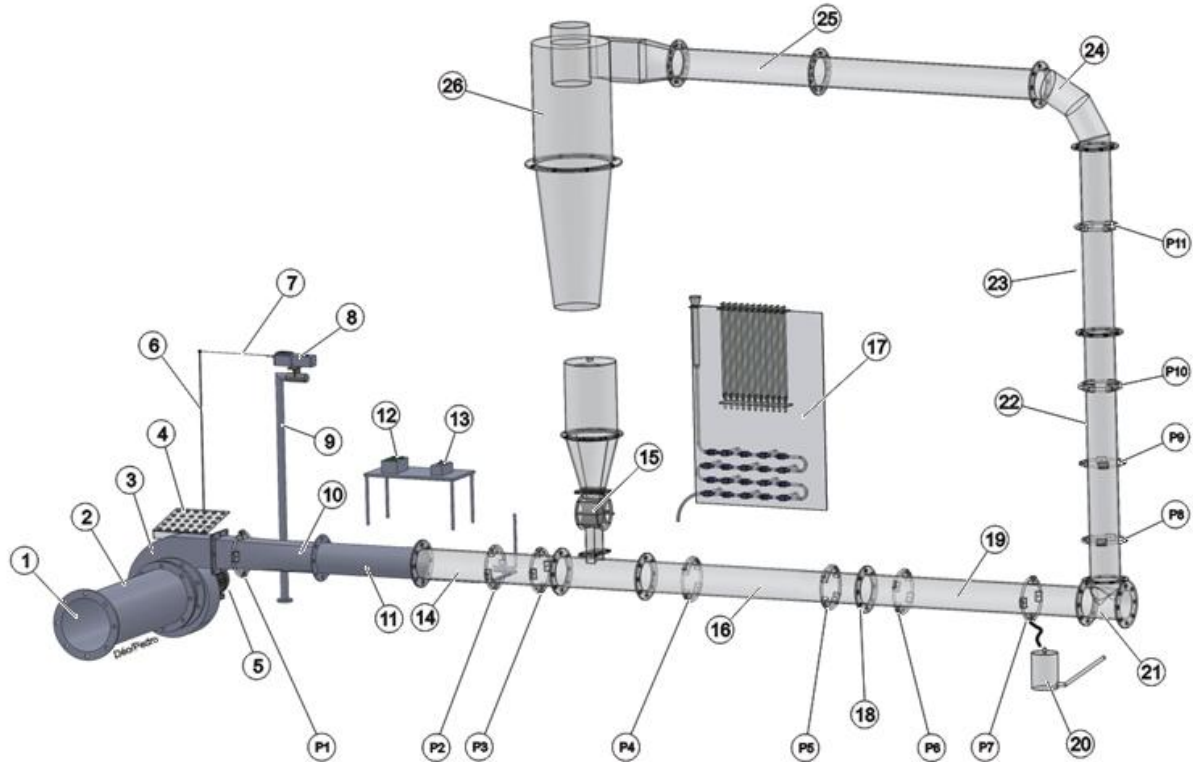


Figura 3.2 - Esboço da Unidade Piloto de transporte pneumático em fase diluída: 1) Tubulação de entrada do ar de alimentação da unidade experimental; 2) Duto de sucção do ventilador; 3) ventilador centrífugo; 4) “cooler” do motor; 5) motor elétrico síncrono em balanço; 6) haste fixa ao motor para determinação 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 P_1 ; 11) tubo de aço carbono de 117 mm de diâmetro interno com colméia para direcionar o escoamento; 12) inversor de frequência do motor do ventilador; 13) controlador de velocidade da válvula rotativa; 14) duto de acrílico de 117 mm de diâmetro interno com tubo de Pitot horizontal e vertical e dois anéis piezométricos (P_2 e P_3); 15) válvula rotativa com silo; 16) tubo de acrílico de 1000 mm de comprimento com tomadas P_4 e P_5 ; 17) banco de piezômetros para medida da pressão estática; 18) flange; 19) duto de acrílico de 1000 mm de comprimento com tomadas P_6 e P_7 ; 20) manômetro inclinado; 21) tê saída de lado; 22) tubo vertical de 1000 mm de comprimento com três tomadas piezométricas P_8 , P_9 e P_{10} ; 23) tubo vertical de 760 mm de comprimento; 24) curva em gomos; 25) duto de retorno para o ciclone e 26) ciclone.



Figura 3.3 – Motor em balanço da unidade piloto.

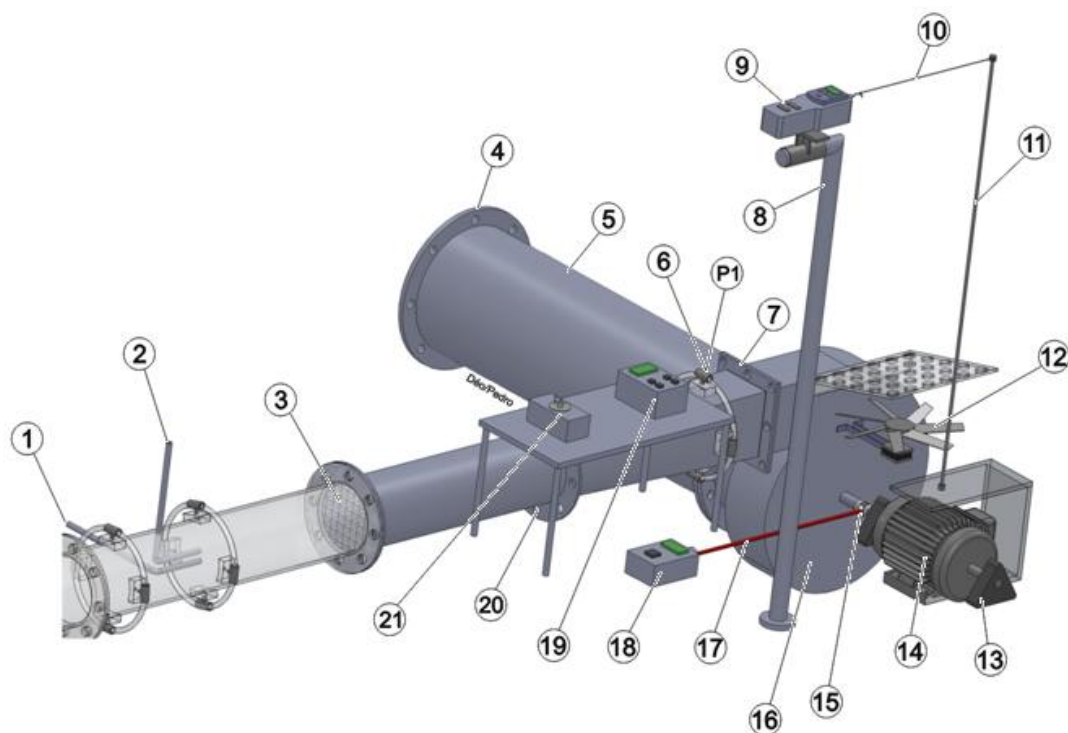


Figura 3.4 - Detalhes do motor em balanço para o cálculo da potência. 1) tubo de Pitot horizontal; 2) tubo de Pitot vertical; 3) colméia; 4) entrada de ar; 5) duto de sucção; 6) anel piezométrico com tomada de pressão P1; 7) saída do ventilador de seção retangular; 8) suporte do dinamômetro; 9) dinamômetro para medida da força; 10) linha de conexão; 11) haste fixa ao motor em balanço; 12) “cooler” do motor; 13) mancal com rolamento para permitir a rotação da carcaça do motor; 14) motor; 15) eixo do motor com papel refletor para medida da rotação; 16) voluta do ventilador; 17) radiação eletromagnética na faixa do infravermelho do tacômetro; 18) tacômetro para medida da rotação; 19) inversor de frequência; 20) flange circular do duto adaptador e 21) controlador de velocidade da válvula rotativa.

Foi confeccionada uma estrutura de metal para fixar o coletor no duto horizontal (Figura 3.5) e no vertical após o tê amortecedor (Figura 3.6) e empregado nos ensaios coletores de tule (Figura 3.7) com “velcro” na extremidade e nos tubos coletores (Figura 3.8). Os modelos anteriores de náilon e de poliamida tiveram problemas com a fixação no coletor de alumínio e de resistência mecânica, respectivamente.

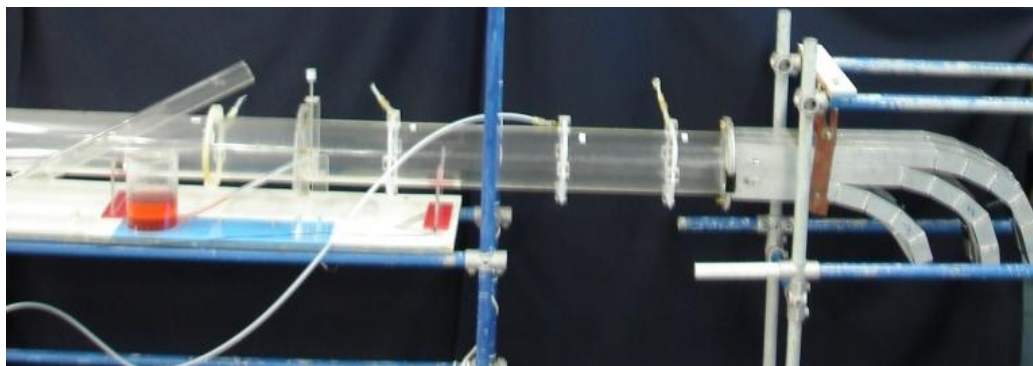


Figura 3.5 – Arranjo para estudo em trecho horizontal prolongado acoplado ao coletor de partículas.

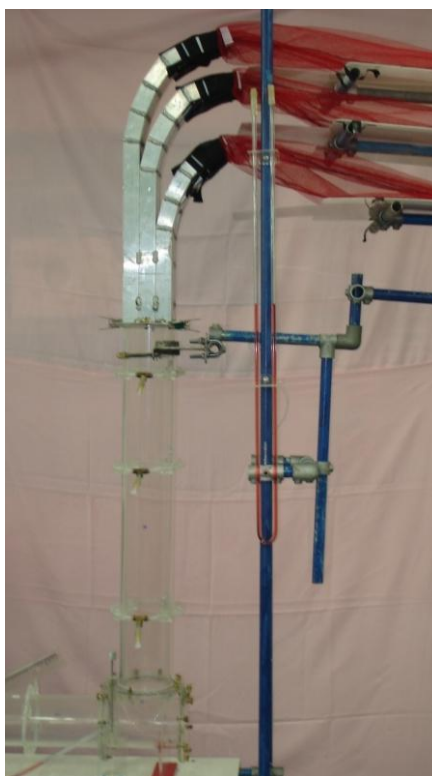


Figura 3.6 – Arranjo para estudo em trecho vertical acoplado ao coletor de partículas.

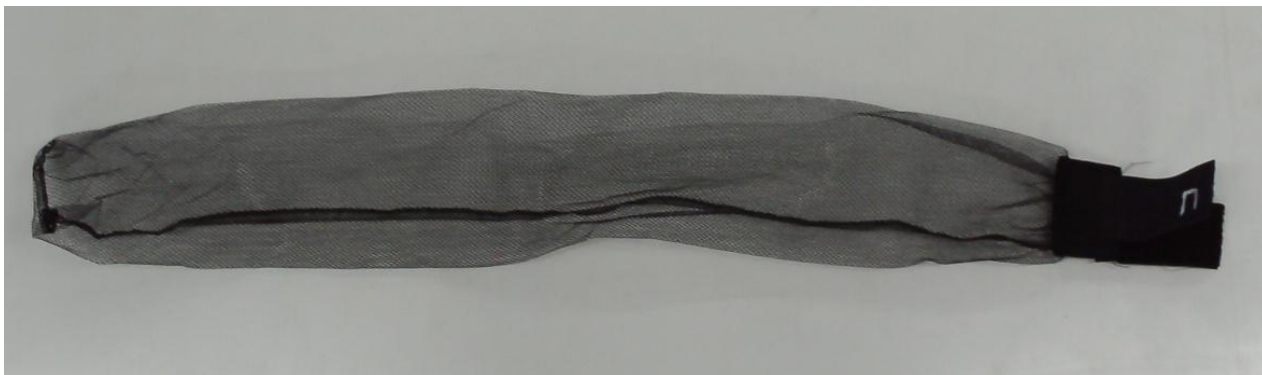


Figura 3.7 – Saco coletor de tule com “velcro” na extremidade.



Figura 3.8 – Coletor de alumínio com “velcro” para fixar os sacos de tule.

As pressões foram quantificadas pelos manômetros com tubo inclinado e por um banco de piezômetros (Figura 3.9) para leitura simultânea da perda de carga nos trechos horizontal e vertical.



Figura 3.9 - Banco de piezômetro para leitura simultânea das pressões nos dutos.

O polipropileno empregado no estudo foi fornecido pela Braskem (Figura 3.10). É de formato granular achatado com diâmetro de 4,4 mm, densidade de $0,905 \text{ g/cm}^3$, índice de fluidez de 0,3 dg/min (decigramas por minuto) e densidade aparente de $0,557 \text{ g/cm}^3$.



Figura 3.10 – Partículas de polipropileno.

3.2 Métodos empregados para coleta dos dados

3.2.1 Aferição dos medidores

Antes do início dos ensaios, os medidores foram aferidos. Os três anemômetros foram calibrados pelo fabricante e aferidos pelo tubo de Pitot horizontal e vertical com o método das centróides de áreas iguais item 3.3.3. Os dinamômetros foram calibrados por peso padrão. Os anéis piezométricos, os manômetros em “U” e os manômetros inclinados foram limpos. O sistema foi pressurizado e testado a sua estanqueidade.

3.2.2 Perda de carga no tê com prolongamento (balisa), nos tubos horizontal e vertical

A perda de carga (item 3.3.1) no tê e nos trechos retos horizontais e verticais foi determinada pela diferença de pressão nos anéis piezométricos apresentados nas Figuras 3.1 e 3.2. As pressões foram quantificadas pelo banco de piezômetros (Figura 3.9) e pelos manômetros inclinados (item 3.3.2 e Figuras 3.1, 3.2 e 3.12). Os ensaios iniciaram-se sem alimentação de partículas para cinco velocidades médias de ar conforme a Tabela 3.1, relacionadas com a frequência obtida pelo inversor número (12) da Figura 3.2.

As velocidades do ar no duto de sucção foram medidas com um anemômetro da marca prova instruments inc. modelo AVM-01, e as velocidades do ar no duto de transporte (descarga) foram calculadas empregando-se a equação da continuidade. As velocidades de descarga dadas pelo anemômetro na sucção e equação da continuidade (item 3.3.5) foram comparadas com a velocidade média pelos tubos de Pitot horizontal e vertical (item 3.3.3).

O motor em balanço (item 3.3.6) permitiu obter a potência experimental consumida pelo motor e verificar a lei da afinidade que relaciona a rotação e a potência.

As vazões de sólidos foram 0,08 kg/s, 0,143 kg/s e 0,233 kg/s em função da disponibilidade da unidade experimental. Determinaram-se as perdas de carga para todas as combinações entre as três vazões de sólido e as cinco velocidades médias do ar.

Os têes com saída de lado foram estudados para quatro condições: a) tê sem prolongamento; b) tê com prolongamento de 30 mm; c) tê com prolongamento de 60 mm e d) tê com prolongamento de 90 mm.

Tabela 3.1 – Velocidades médias do ar em função das frequências.

Frequência (Hz)	Velocidade do ar no duto de sucção (m/s)	Velocidade do ar no duto de transporte (m/s)
65	6,2	21,39
60	5,5	18,97
55	4,9	16,90
50	4,4	15,18
45	3,9	13,79

3.2.3 Distribuição das partículas na seção transversal do trecho horizontal

Instalou-se no final do trecho reto horizontal o coletor de alumínio (Figuras 3.5 e 3.8) com nove sacos de tule (Figura 3.7) para determinação das massas na seção transversal da tubulação.

Programou-se o inversor de frequência para 45 Hz, referente à velocidade média do ar na descarga do ventilador de 13,79 m/s. Após o acionamento do motor do ventilador, fixou-se a vazão de 0,08 kg/s (G_3) pelo potenciômetro (número 13 da Figura 3.2 e 21 da Figura 3.4) que aciona a válvula rotativa (número 15 da Figura 3.2). Após o esvaziamento completo do silo (número 15 da Figura 3.2), retirou-se os sacos de tule, identificado por número de 1 a 9, do coletor de alumínio. Pesaram-se as amostras de polipropileno de cada um dos sacos.

O procedimento supracitado foi repetido para todas as combinações de velocidades médias de ar e vazões de sólidos.

A análise da distribuição das partículas na seção do duto horizontal contemplou a determinação da área dos 9 coletores (item 3.3.7), a massa das partículas por unidade de área (item 3.3.8), a fração mássica por unidade de área (item 3.3.9) e o desvio padrão para quantificar a melhor distribuição (item 3.3.10).

3.2.4 Distribuição na seção transversal do trecho vertical após o tê com amortecedor

A seção transversal do trecho vertical para coleta das massas foi montada a partir de um tê saída de lado no final do arranjo horizontal. Conectou-se no fim do trecho vertical o coletor de alumínio com seus respectivos sacos de tule (Figura 3.6). O procedimento do item 3.2.3, repetiu-se para a coleta das amostras e análise dos resultados.

3.3 Fundamentos teóricos para tratamento dos dados

Os fundamentos teóricos apresentados a seguir, são em parte, os mesmos utilizados por S.M.SANTOS, E.B.TAMBOURGI, F.A.N.FERNANDES, D.MORAES JÚNIOR e a autora do presente trabalho no texto apresentado em 2011 no Brazilian Journal of Chemical Engineering. O trabalho publicado nesta revista considerou apenas a perda de carga no trecho horizontal

Os conceitos empregados baseiam-se na perda de carga, na pressão estática, na velocidade e vazão do ar, número de Mach, na potência consumida pelo ventilador, na área dos coletores do sólido transportado, da massa das partículas, da fração mássica das partículas por unidade de área e análise estatística. A seguir, será detalhado cada um desses fundamentos teóricos.

3.3.1 Perda de carga entre dois pontos da tubulação e do tê com amortecedor

Considerando o volume de controle formado pela parede interna do tubo e as seções 1 e 2 da Figura 3.11, pode-se empregar o balanço de energia mecânica.

As seguintes hipóteses foram adotadas (Moraes Jr. D.; Silva, E. L.; Moraes, M. S.; 2011).

- a) Fluido incompressível.
- b) O escoamento do fluido, que entra por uma área e sai por outra no volume de controle, é normal às respectivas áreas das seções retas.
- c) O volume de controle apresenta apenas uma entrada e uma saída.
- d) Não há variação significativa de temperatura entre a entrada e a saída do volume de controle.
- e) Não há variação significativa em cada área da densidade, entalpia e desnível.
- f) Escoamento em regime permanente.

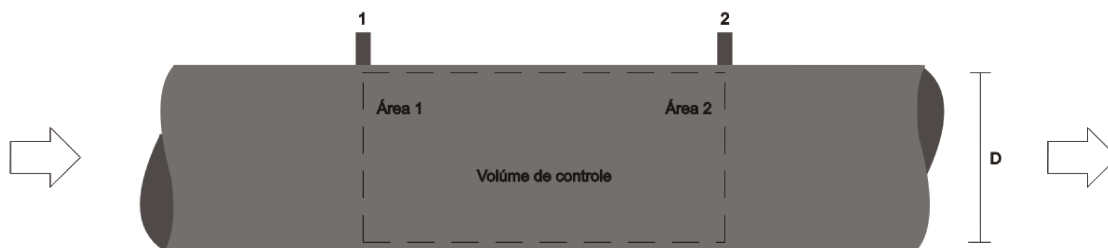


Figura 3.11 – Esboço de duto reto, para estudo da perda de carga.

Visando a análise entre dois pontos de uma tubulação sem variação significativa de temperatura, pode-se obter a partir da Equação 3.1, a perda de carga nos trechos em análise, conforme a Equação 3.5 ou 3.6.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + W = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \ell_{w(1-2)} \quad (3.1)$$

Sendo:

P_1 e P_2	a pressão absoluta em kgf/m^2
γ	o peso específico do fluido em kgf/m^3
v_1 e v_2	a velocidade em m/s
g	a aceleração da gravidade em m/s^2
z_1 e z_2	o desnível ou altura em relação a um plano de referência em m
W	o trabalho de eixo em m
$\ell_{w(1-2)}$	a perda de carga do sistema entre os pontos 1 e 2 em m

Adotando-se para os pontos 1 e 2 do sistema pneumático em estudo:

a) Velocidades iguais, (Equação 3.2).

$$v_1 = v_2 \quad \text{então} \quad \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} = 0 \quad (3.2)$$

b) Tubo horizontal, (Equação 3.3).

$$z_1 = z_2 = 0 \quad (3.3)$$

c) Trabalho de eixo é nulo entre os pontos 1 e 2, não havendo bomba ou turbina, (Equação 3.4).

$$W = 0 \quad (3.4)$$

A Equação 3.1 toma a forma da Equação 3.5 ou 3.6.

$$\ell_{w_{1-2}} = \frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma} \quad (3.5)$$

$$\ell_{w_{1-2}} = \frac{\Delta P}{\gamma} \quad (3.6)$$

Deste modo, a diferença de pressão estática (ΔP) entre os pontos 1 e 2 dividido pelo peso específico (γ), mede a perda de carga do fluido escoando entre essas duas tomadas.

A perda de carga no tê com saída de lado como citado no item 2.3.4 pode ser considerada pelo método do fator K ou expressão geral $\ell_w = (K v^2/2g)$. Uma vez que a perda de carga é dada em metros de coluna de água (mca) e a velocidade média na unidade experimental em estudo é a do ar em metros por segundo (m/s), é necessário acrescentar o peso específico padrão do ar (Equação 3.7).

$$\ell_{w_{1-2}} = K \frac{v^2}{2g} \gamma_{ar} \quad (3.7)$$

O termo $\ell_{w_{1-2}}$ é obtido de forma experimental em milímetros de coluna de água pela diferença de pressão entre a entrada e a saída do tê em estudo. O termo $(v^2/2g) \gamma$ é dado em milímetros de coluna de água como demonstrado a seguir para uma velocidade típica de 20 m/s e peso específico padrão do ar de 1,2 kgf/m³ (Equações 3.8 e 3.9).

$$\frac{v^2}{2g} \gamma_{ar} = \frac{\left(20 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} 1,2 \frac{kgf}{m^3} \frac{9,81 N}{1 kgf} \frac{0,1 mmca}{1 \frac{N}{m^2}} = 24 mmca \quad (3.8)$$

$$\frac{v^2}{2g} \gamma_{ar} = \left(20 \frac{m}{s}\right)^2 \cdot 0,06 \frac{mmca}{m^2/s^2} = 24 mmca \quad (3.9)$$

Portanto, tendo-se a perda de carga experimental em mmca e a velocidade média do ar no duto de transporte (descarga) em m/s, determina-se com as equações (3.7) e (3.10) o fator K do: a) tê saída de lado; b) tê com prolongamento (balisa) de 30 mm; c) tê com prolongamento de 60 mm e d) tê com prolongamento de 90 mm de comprimento.

$$— \quad (3.10)$$

3.3.2 Pressão estática medida pelos anéis piezométricos (P_{EA})

O manômetro inclinado, usado para medição das pressões estáticas nos pontos de análise (por meio de anéis piezométricos), está representado na Figura 3.12.

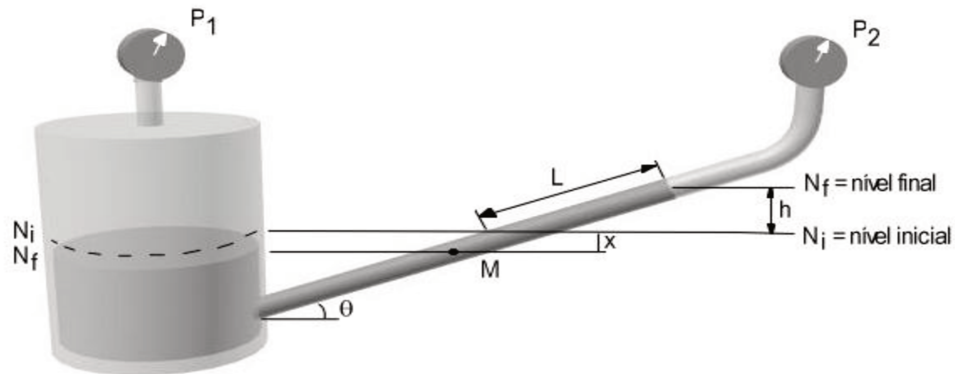


Figura 3.12 - Manômetro inclinado para leitura das tomadas de pressão.

Empregando, nos pontos N_f e M , a Lei de Pascal e de Stevin tem-se:

$$P_{N_f} = P_M \quad (3.11)$$

$$P_1 = \rho g x + \rho g h + P_2 \quad \text{sendo } h \text{ e } x \text{ as distâncias na vertical} \quad (3.12)$$

$$P_1 - P_2 = \rho g (x + h) \quad (3.13)$$

$$h = L \sin \theta \quad \text{pois } \sin \theta = \text{cateto oposto/hipotenusa} = h/L \quad (3.14)$$

$x \rightarrow$ volume deslocado no recipiente é igual ao deslocado no tubo

$$A x = a L \quad (3.15)$$

$$x = \frac{a}{A} L \quad (3.16)$$

$$P_1 - P_2 = \rho g \left(L \sin \theta + L \frac{a}{A} \right) \quad (3.17)$$

$$P_1 - P_2 = \rho g L \left(\sin \theta + \frac{a}{A} \right) \quad (3.18)$$

Nas equações apresentadas:

$P_1 - P_2$	é a diferença de pressão, (N/m ²)
ρ	é a densidade da água (kg/m ³)
g	é a aceleração da gravidade (m/s ²)
L	é o comprimento da variação da água no tubo (m)
θ	é o ângulo de inclinação
a	é a área da seção do tubo (m ²)
A	é a área da seção do recipiente (m ²)

Uma vez que a seção do tanque (A) é bem maior que a seção (a) do tubo inclinado a relação a/A pode ser desprezada (MORAES, SILVA, MORAES, 2011). A equação se resume.

$$P_1 - P_2 = \rho g L \sin\theta \quad (3.19)$$

Com a inclinação de 30°, tem-se

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho g L}{2} \quad (3.20)$$

3.3.3 Velocidade do ar no duto de transporte (descarga do ventilador) e vazão determinada pelo tubo de Pitot

Com as velocidades pontuais obtidas pelo tubo de Pitot pode-se determinar a vazão, por exemplo, pelo método das centróides de áreas iguais (Figura 3.13), recomendado pela ASME (American Society of Mechanical Engineers).

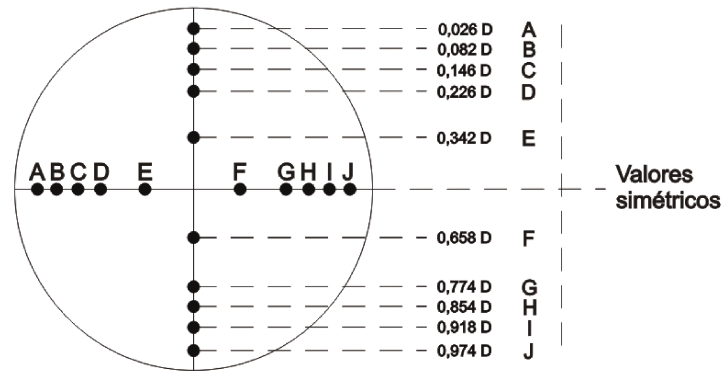


Figura 3.13 - Pontos de tomadas de pressão com tubo de Pitot pelo método das centróides de áreas iguais (ASME).

Segundo a ASME, a velocidade do ar usando o método das centróides de áreas iguais com tubo de Pitot é calculado pela Equação 3.21.

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot \rho_{\text{água}} \cdot \overline{P_{dc}}}{\rho_{\text{ar}}}} \quad (3.21)$$

Sendo:

$\rho_{\text{água}}$ a massa específica da água (kg/m^3)

$\overline{P_{dc}}$ a média da pressão dinâmica no tubo de Pitot (mca)

ρ_{ar} a massa específica do ar seco ($\text{kg}_{\text{ar seco}}/\text{m}^3$)

A média da pressão dinâmica corrigida $\overline{P_{dc}}$ no tubo de Pitot, conforme ASME é calculada pela Equação 3.22.

$$\overline{P_{dc}} = \overline{P_d} \cdot \left(\frac{1500}{r_o} \right)^2 \cdot \frac{1,2}{\rho_o} \quad (\text{mca}) \quad (3.22)$$

Nesta equação

$\overline{P_d}$ é a média da pressão dinâmica no tubo de Pitot (mca)

r_o é a rotação do rotor (rpm)

ρ_o é a massa específica do ar seco ($\text{kg}_{\text{ar seco}}/\text{m}^3$)

A Equação 3.23, fornece a pressão dinâmica ($\overline{P_d}$) no tubo de Pitot (ASME):

$$\overline{P_d} = \left[\left(\sum_{i=1}^n \sqrt{P_{dh}} + \sum_{i=1}^n \sqrt{P_{dv}} \right) / (2 \cdot n) \right]^2 \quad (\text{mca}) \quad (3.23)$$

Em que:

P_{dh} a pressão dinâmica horizontal (mca)

P_{dv} a pressão dinâmica vertical (mca)

n o número de pontos horizontais ou verticais – tomada de pressão com tubo de Pitot

A pressão dinâmica na horizontal (P_{dh}) e na vertical (P_{dv}) foi obtida pela Equação 3.24.

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot L \cdot 0,5 \quad (3.24)$$

Em metros de coluna de água tem-se a Equação 3.25.

$$P_{dh} = P_{dv} = \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} = L \cdot 0,5 \quad (3.25)$$

A vazão [Q] foi determinada pela Equação 3.26.

$$Q = v_d \cdot A_d \quad (3.26)$$

Sendo:

A_d a área (m^2) da seção transversal do duto de descarga, duto onde foi obtida a velocidade média pelo Pitot e pela técnica das centróides de áreas iguais.

v_d a velocidade média do ar na descarga do ventilador (m)

3.3.4 Vazão e velocidade na sucção pelo anemômetro

A vazão volumétrica do ar foi também determinada pela equação da continuidade (Equação 3.27).

$$Q = v_s \cdot A_s \quad (3.27)$$

Em que:

v_s é a velocidade média do ar obtida por anemômetro na entrada do duto de sucção do ventilador (m/s)

A_s é a área da seção transversal da tubulação na sucção (m^2)

A área da seção transversal do duto de sucção foi calculada pela Equação 3.28.

$$A_s = \frac{\pi \cdot D_s^2}{4} \quad (3.28)$$

Sendo:

D_s o diâmetro interno da tubulação de sucção (m)

3.3.5 Velocidade do ar no duto de transporte

Obteve-se a velocidade do ar no duto de transporte (duto de descarga v_d) pelo Pitot (item 3.3.3), pelo anemômetro (com a unidade sem o coletor) e pelo balanço de massa no duto de transporte (w_d) e sucção (w_s), indicado nas Equações de 3.29 a 3.32.

$$w_d = w_s \quad (3.29)$$

$$\rho_d \cdot v_d \cdot A_d = \rho_s \cdot v_s \cdot A_s \quad (3.30)$$

No caso em estudo com velocidade média do ar de transporte, por exemplo, de 20 m/s e velocidade do som de 346,3 m/s (1 atm e 25°C) o número de Mach (N_{Ma}) é

$$N_{Ma} = \frac{\left(20 \frac{m}{s}\right)}{\left(346,3 \frac{m}{s}\right)} = 0,058 \quad (3.31)$$

que, por ser menor que 0,3 o fluido pode ser considerado incompressível (MORAES, SILVA, MORAES 2011).

Portanto, para densidade constante (fluido incompressível) tem-se a Equação 3.32.

$$v_d \cdot \frac{\pi \cdot D_d^2}{4} = v_s \cdot \frac{\pi \cdot D_s^2}{4} \quad (3.32)$$

que simplificada chega-se à Equação 3.33.

$$v_d = v_s \cdot \frac{D_s^2}{D_d^2} \quad (3.33)$$

As velocidades de descarga estudadas foram relacionadas com as de entrada (de fácil leitura pelo anemômetro) e com a rotação do ventilador pela frequência do inversor.

3.3.6 Potência consumida

A Figura 3.14 apresenta um esquema do motor do ventilador em balanço utilizado para determinar a potência consumida durante os testes experimentais.

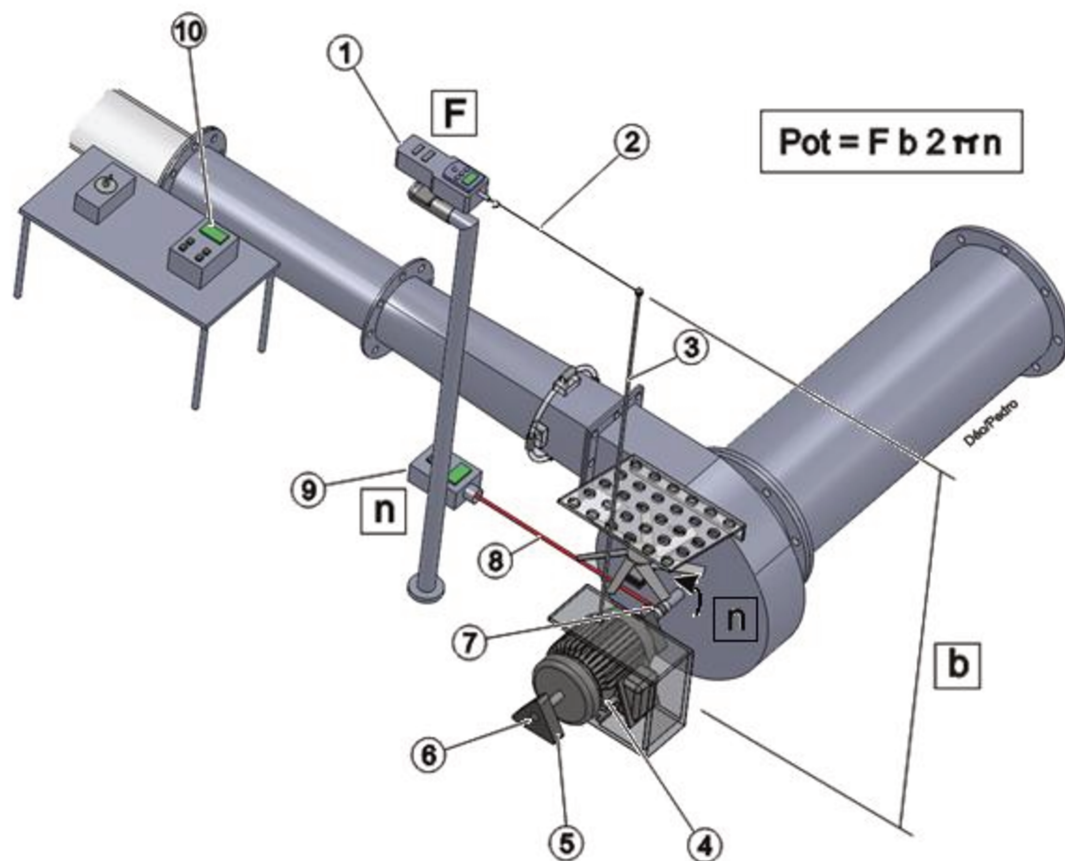


Figura 3.14 – Esboço do sistema montado para o cálculo da potência consumida pelo ventilador: 1) dinamômetro; 2) linha de conexão; 3) haste fixa ao motor em balanço; o braço é a distância do centro do eixo até a linha de conexão; 4) motor em balanço; 5) mancal com rolamento; 6) rolamento extra para manter a carcaça do motor em balanço; 7) “cooler” do motor; 8) radiação do tacômetro; 9) tacômetro e 10) inversor de frequência do motor do ventilador.

A potência consumida pelo motor em balanço durante a realização dos testes experimentais foi obtida pelas Equações 3.34 e 3.35.

$$\text{Pot} = F \cdot b \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \quad (3.34)$$

Em que:

- Pot é a potência, Break Horse Power (W)
- F é a força média pelo dinamômetro (N)
- b é o braço (m)
- n é a rotação (rps)

É prático se prever a potência consumida (Pot) pelo motor de um ventilador centrífugo em função da rotação (n) pela Lei da Afinidade.

$$(n_1/n_2)^3 = \text{Pot}_1/\text{Pot}_2 \quad (3.35)$$

3.3.7 Área dos nove coletores

Foram empregados 9 coletores para a determinação da distribuição das partículas na seção transversal dos dutos. A área dos 9 coletores foi determinada por meio do seguinte procedimento:

1. Mediu-se a área e a massa de uma folha de sulfite de 15 cm por 15 cm, obtendo-se uma área de 225 cm² e uma massa de 1,8 g.
2. Apoiou-se o papel na superfície de entrada do coletor e, com grafite, riscaram-se as 9 áreas, conforme a Figura 3.15.

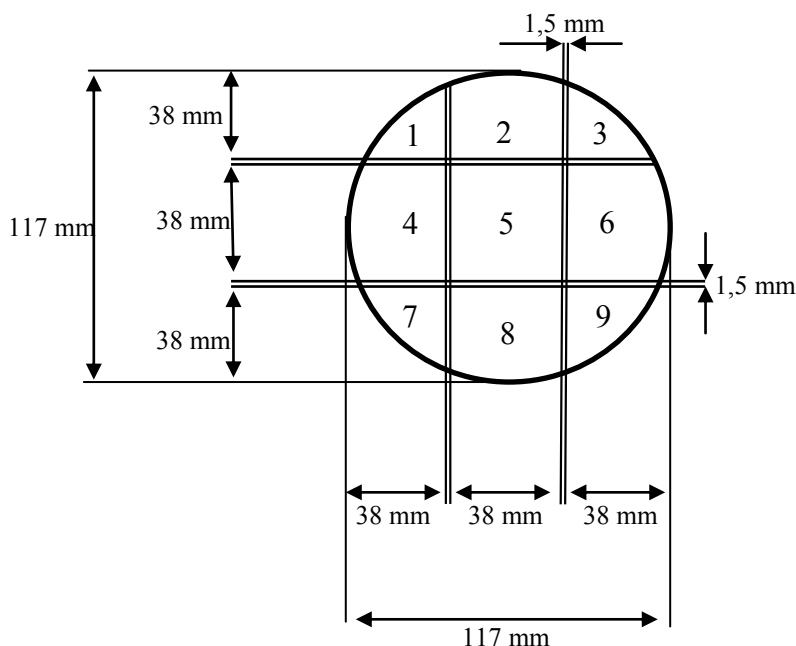


Figura 3.15- Dimensões do coletor.

3. Recortou-se e mediu-se a massa das folhas de papel correspondente às 9 áreas, cujos valores foram empregados no cálculo das áreas.

4. Considerando homogênea a folha de papel sulfite, pode-se estabelecer a proporcionalidade entre a massa e a área dos segmentos.

A Tabela 3.2 mostra a relação entre a massa e área de todos os coletores.

Tabela 3.2 – Massa e área dos nove coletores.

Coletores	Massa do papel (g)	Área do coletor (cm²)
1	0,071	8,88
2	0,125	15,60
3	0,074	9,25
4	0,118	14,80
5	0,132	16,50
6	0,123	15,40
7	0,059	7,38
8	0,122	15,20
9	0,057	7,12

3.3.8 Massa das partículas por unidade de área em cada coletor

A massa das partículas coletadas nos ensaios por unidade de área em cada coletor (M_p) foi determinada pela Equação 3.36.

$$M_p = \frac{m_c}{A_c} \quad (3.36)$$

Em que:

m_c é a massa das partículas no coletor (g)

A_c é a área do coletor (cm²)

3.3.9 Fração mássica das partículas por unidade de área nos coletores

A fração mássica dos sólidos por unidade de área (F_r) nos coletores para elaboração de gráficos que relacionam a distribuição na seção transversal da tubulação horizontal foi calculada pela Equação 3.37.

$$F_r = \frac{M_{pi}}{\sum M_p} \cdot 100 \quad (3.37)$$

Sendo:

F_r a fração mássica de sólidos (adimensional)

M_{pi} a massa das partículas por unidade de área, Figura 3.15 (g/cm^2)

$\sum M_p$ a somatória da massa das partículas por unidade de área (g/cm^2)

3.3.10 Desvio padrão (S)

A quantificação da melhor distribuição das partículas na seção do tubo foi realizada através do desvio padrão em todos os pontos selecionados para análise, conforme a Equação 3.38.

$$S = \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 / (n-1)}^{0.5} \quad (3.38)$$

Em que:

n é o número de pontos

x_i é o ponto em análise

$\bar{x}$ é a média aritmética

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Velocidade do ar, potência do ventilador e condições de transporte

A Tabela 4.1 fornece para as cinco frequências fixadas (λ), a rotação (n) do ventilador, a velocidade do ar no duto de transporte (descarga, diâmetro de 117 mm) sem sólido obtido por anemômetro (v_d) e a determinada pelos tubos de Pitot (v_p). O desvio (d) máximo de 6% do v_d , de leitura imediata no centro do duto, em relação a v_p (média, método das centróides de áreas iguais, item 3.3.3) justifica o emprego do anemômetro no estudo. No regime turbulento, a velocidade no centro do duto (v_d) é próximo da velocidade média (v_p), formando um fluxo pistonado. Quanto maior a velocidade, menor o desvio.

A ordem de grandeza do número de Reynolds pode ser obtida para o ar a 20°C e à menor velocidade de 13,45 m/s.

Tabela 4.1 – Velocidade do ar no duto de transporte sem sólido.

λ (Hz)	n (rpm)	v_d (m/s)	v_p (m/s)	d^* (%)
65	3845	21,39	20,70	3,3
60	3554	18,97	18,08	4,9
55	3221	16,90	16,08	5,1
50	2967	15,18	14,40	5,4
45	2646	13,45	12,72	5,7

Ainda com a unidade experimental sem sólido, foi verificada a validade da Lei da Afinidade para se prever a potência consumida. Conforme os dados da Tabela 4.2, a equação da Lei da Afinidade permitiu estimar a potência (Pot_{afi}) consumida pelo motor do ventilador com desvio (d) máximo de 11,6% em relação à potência experimental (Pot_{exp}). A lei da afinidade forneceu valores menores que os experimentais.

Tabela 4.2 – Potência consumida no motor do ventilador sem sólido.

v_d (m/s)	λ (Hz)	n (rpm)	F (N)	Pot_{exp} (W)	Pot_{afi} (W)	d (%)
21,39	65	3845	2,24	577,2	—	—
18,97	60	3554	1,93	459,7	455,8	0,8
16,90	55	3221	1,62	349,7	339,2	3,0
15,18	50	2967	1,43	284,4	265,2	6,7
13,45	45	2646	1,20	212,8	188,1	11,6

Obs₁.: Os valores da potência experimental foram obtidos com braço de 0,64 m.

$$Pot_{exp} = F \cdot b \cdot 2 \cdot \pi \cdot n = 2,24 \text{ N} \cdot 0,64 \text{ m} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 3845 \text{ rpm}/60 = 577,2 \text{ W}$$

Obs₂.: Pela Lei da Afinidade

$$(n_1/n_2)^3 = Pot_1/Pot_2$$

$$(3845/3554)^3 = 577,2 / Pot_2 \quad \rightarrow \quad Pot_2 = 455,8 \text{ W}$$

$$(3845/3221)^3 = 577,2 / Pot_2 \quad \rightarrow \quad Pot_2 = 339,2 \text{ W}$$

Nas operações com a adição de sólido, há um aumento no peso específico relativo que praticamente não altera, como no caso das bombas centrífugas, a rotação do impulsor (Tabelas 4.3 e 4.2). O aumento do peso específico provoca, normalmente, um aumento na potência consumida, porém, nas condições estudadas esta variação não foi significativa, conforme os resultados apresentados na Tabela 4.3 (com a vazão máxima de sólido) em relação aos da Tabela 4.2 (sem sólido).

As condições iniciais de acúmulo de sólido nos dutos tiveram pouca influência na potência consumida e na rotação do ventilador. Estão registradas na Tabela 4.4 as condições de transporte obtidas visualmente que ocorreram acúmulo aos dutos de acrílico transparente, horizontais e verticais.

Nos pares de velocidade do ar e vazão de sólido da Tabela 4.4, indicados com o sinal gráfico asterisco (*), o transporte no trecho vertical foi apenas das partículas que não se acumularam no trecho horizontal. Nestes casos, a baixa velocidade do ar foi suficiente para deslocar as partículas remanescentes em função da menor concentração destas no duto vertical.

Tabela 4.3 – Potência consumida no motor do ventilador com a vazão máxima de sólido de 0,233 kg/s, vazão típica industrial de polipropileno.

v_d (m/s)	λ (Hz)	n (rpm)	F (N)	Pot _{exp} (W)
21,39	65	3846	2,25	580,0
18,97	60	3556	1,97	469,5
16,90	55	3227	1,64	354,7
15,18	50	2970	1,45	288,6
13,45	45	2649	1,22	216,6

Tabela 4.4 – Condição de transporte e acúmulo na unidade experimental para as três vazões de sólidos e as cinco velocidades estudadas.

Velocidade do ar (m/s)	Duto	Vazão de sólidos (kg/s)		
		0,08	0,143	0,233
13,45	horizontal	acúmulo	acúmulo	acúmulo
	vertical	transporte*	transporte*	acúmulo
15,18	horizontal	transporte	acúmulo	acúmulo
	vertical	transporte	transporte*	transporte*
16,90	horizontal	transporte	transporte	acúmulo
	vertical	transporte	transporte	transporte*
18,97	horizontal	transporte	transporte	transporte
	vertical	transporte	transporte	transporte
21,39	horizontal	transporte	transporte	transporte
	vertical	transporte	transporte	transporte

* Os pellets que não se acumularam no trecho horizontal foram transportados no vertical.

4.2 Perda de carga, distribuição das partículas na seção transversal dos dutos

As pressões nos onze anéis piezométricos da Figura 3.2 foram anotadas para o sistema com o tê saída de lado sem prolongamento, sem sólido e as cinco velocidades: 13,45 m/s, 15,18 m/s, 16,90 m/s, 18,97 m/s, 21,39 m/s, (Tabela A.1 do Apêndice A).

Ainda com o tê saída de lado sem prolongamento registraram-se as onze pressões para as cinco velocidades supracitadas e vazões de sólidos de 0,08 kg/s (Tabela A.2), 0,143 kg/s (Tabela A.3) e 0,233 kg/s (Tabela A.4).

A sequência de ensaios foi repetida para o tê com prolongamento de 30 mm (Tabelas de A.5 até A.8), tê com prolongamento de 60 mm (Tabelas de A.9 até A.12) e com prolongamento de 90 mm (Tabelas de A. 13 até A.16). Esta série de ensaios contemplou 880 tomadas de pressão.

As Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 construídas a partir das Tabelas de A.1 até A.16 apresentam a perda de carga em função da velocidade do ar entre os pontos P_4 e P_{11} . Pode-se observar nestas figuras que há pouca influência da vazão de sólidos na variação da perda de carga em função da velocidade do ar no sistema com o tê saída de lado sem prolongamento (Figura 4.1). A instalação dos prolongamentos no tê de 30, 60 e 90 mm promoveu uma separação das curvas, ou seja, uma maior influência da vazão de sólidos nas curvas da perda de carga em função da velocidade. Com o tê de 30 mm de prolongamento gerou uma inversão na curva com a vazão baixa de sólido (0,08 kg/s), provavelmente, pela maior turbulência nos pontos de tomada de pressão.

Nos ensaios com a máxima vazão de sólido, 0,233 kg/s, de maior interesse industrial, a perda entre os pontos P_4 e P_{11} foi menor com o emprego dos prolongamentos (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 – Perda de carga entre os pontos P_4 e P_{11} para a velocidade de 21,39 m/s e vazão de 0,233 kg/s.

Singularidade	P_4 (mmca)	P_{11} (mmca)	ΔP (mmca)	Fonte Apêndice
tê saída de lado	99,4	58	41,4	Tabela A.4
tê de 30 mm	96	59,3	36,7	Tabela A.8
tê de 60 mm	97,7	61,2	36,5	Tabela A.12
tê de 90 mm	100,2	61,4	38,8	Tabela A.16

As mesmas Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 fornecem a distribuição das partículas em seis pontos da curva da perda de carga para facilitar a seleção do ponto de operação quando do projeto de uma unidade industrial. Foram construídas com as massas nos 9 sacos coletores (Tabelas de B.1 até B.5) para as 5 velocidades e 3 vazões de sólidos perfazendo um total de 675 pesagens. As massas foram corrigidas com as áreas de coleta como mostrado no Apêndice B.

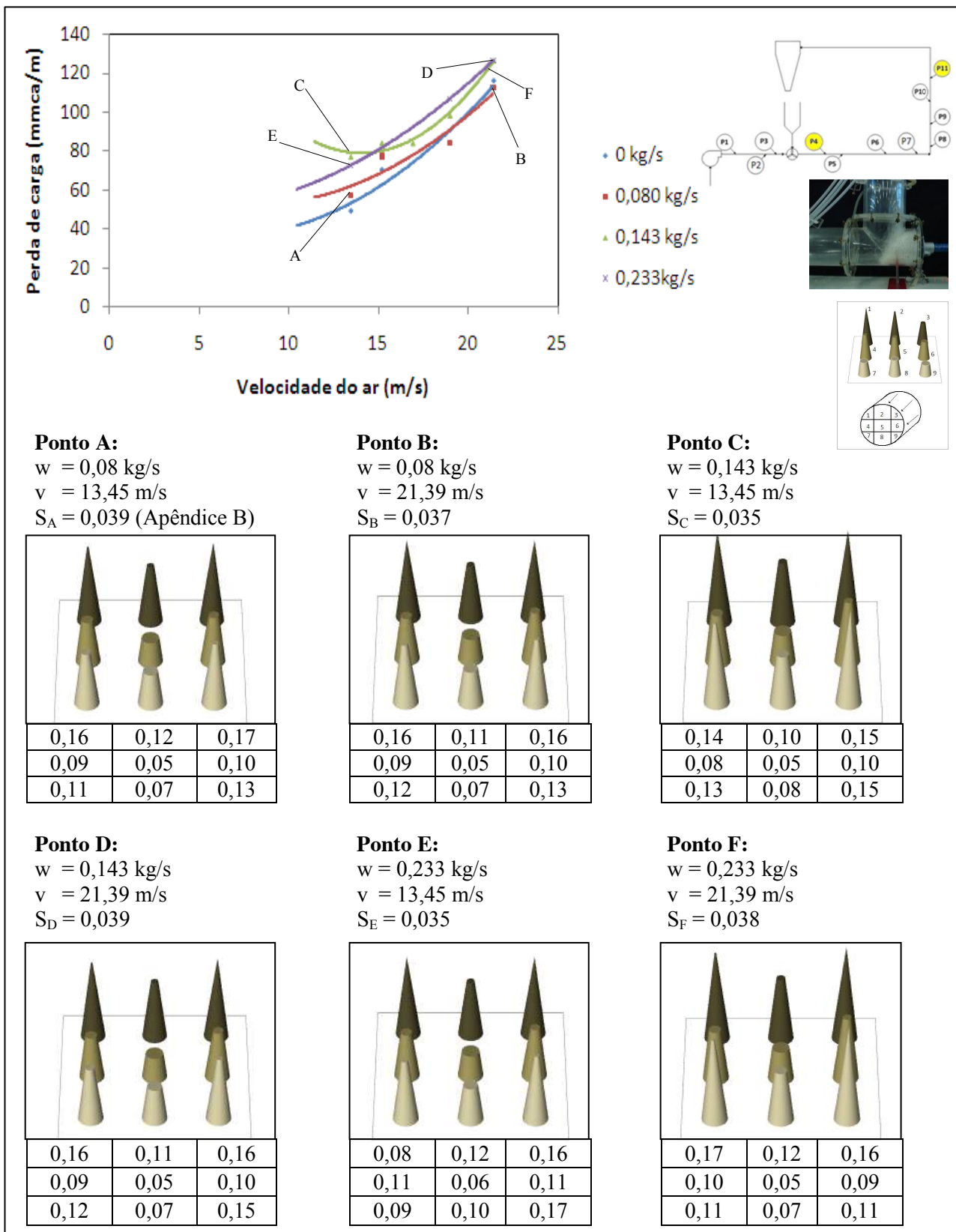


Figura 4.1 – Diagrama de fases do polipropileno. Tê saída de lado sem prolongamento. Perda de carga por unidade de comprimento entre os pontos P_4 e P_{11} em função da velocidade do ar e vazão de sólidos. Distribuição dos sólidos (massas corrigidas, Tabela B.1) no trecho vertical.

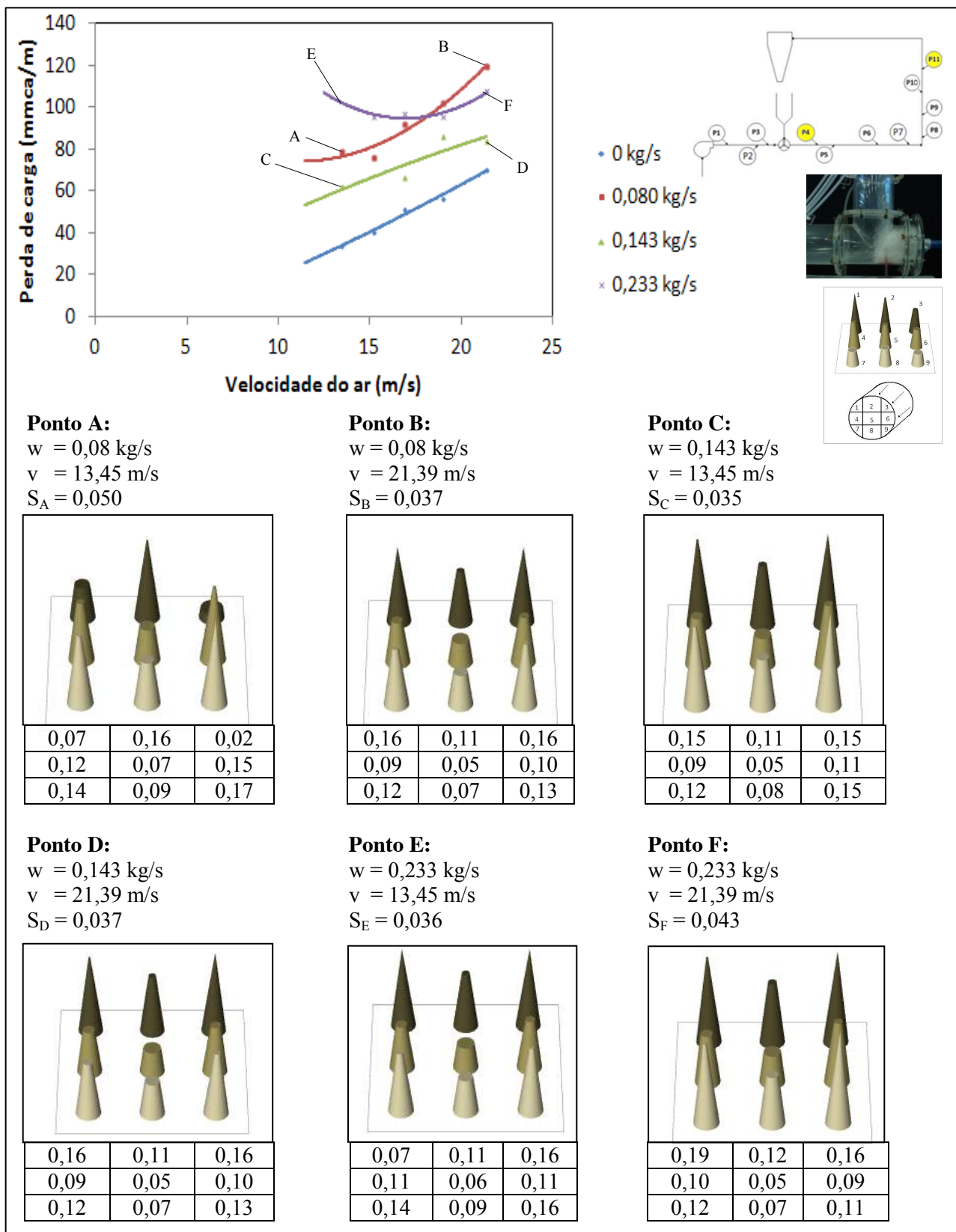


Figura 4.2 – Diagrama de fases do polipropileno. Tê saída de lado com prolongamento de 30 mm. Perda de carga por unidade de comprimento entre os pontos P₄ e P₁₁ em função da velocidade do ar e vazão de sólidos. Distribuição dos sólidos (massas corrigidas, Tabela B.2) no trecho vertical.

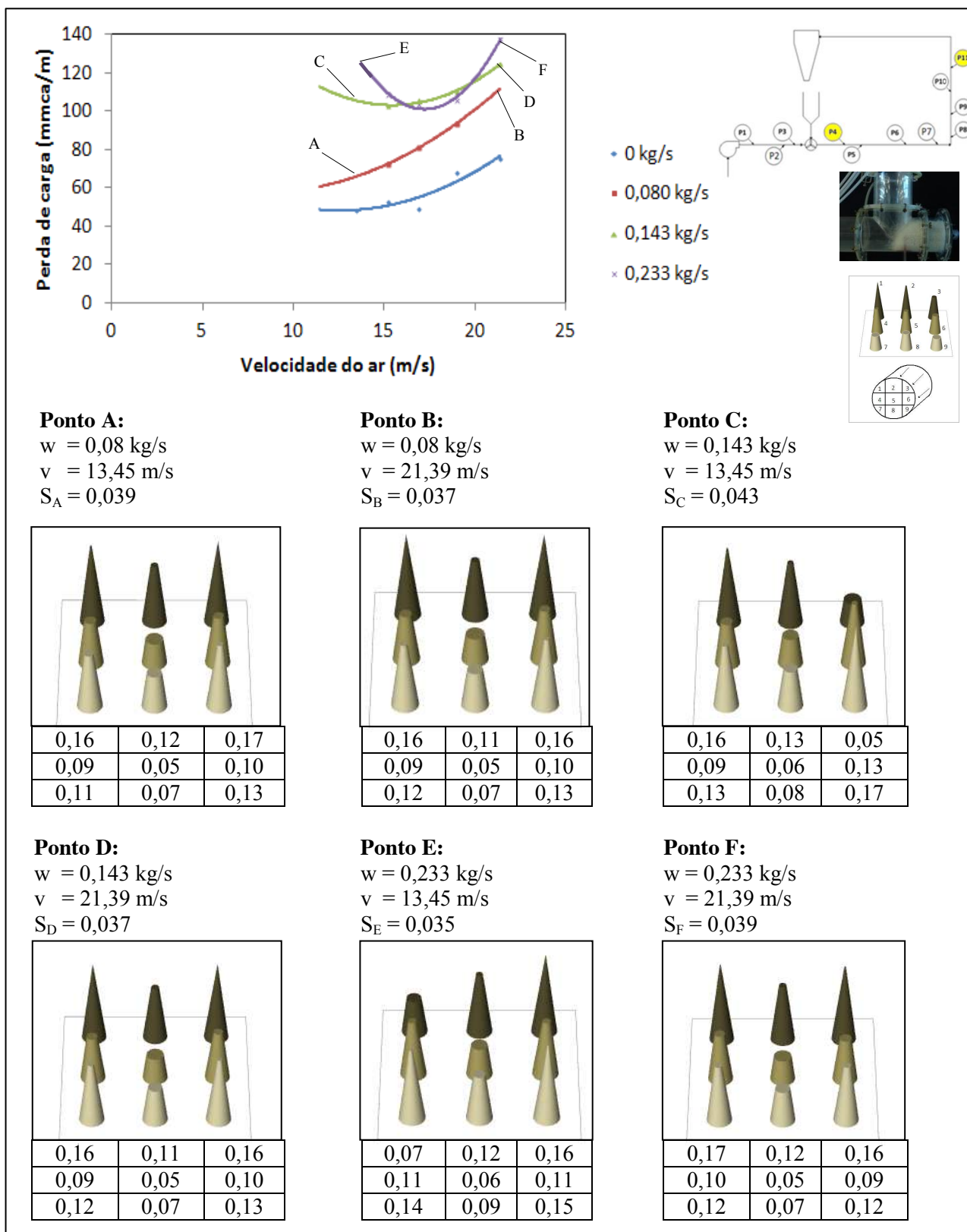


Figura 4.3 – Diagrama de fases do polipropileno. Tê saída de lado com prolongamento de 60 mm. Perda de carga por unidade de comprimento entre os pontos P₄ e P₁₁ em função da velocidade do ar e vazão de sólidos. Distribuição dos sólidos (massas corrigidas, Tabela B.3) no trecho vertical.

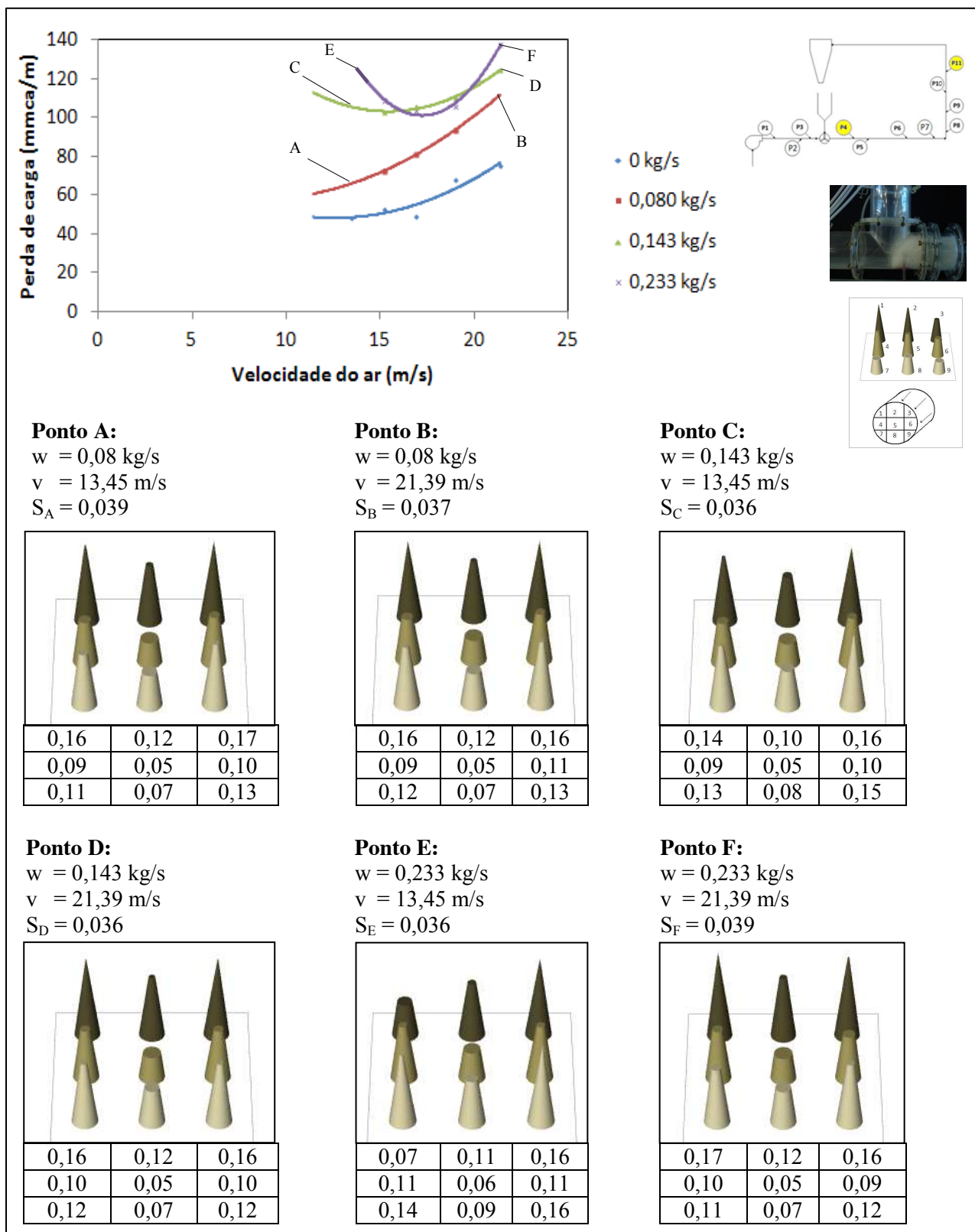
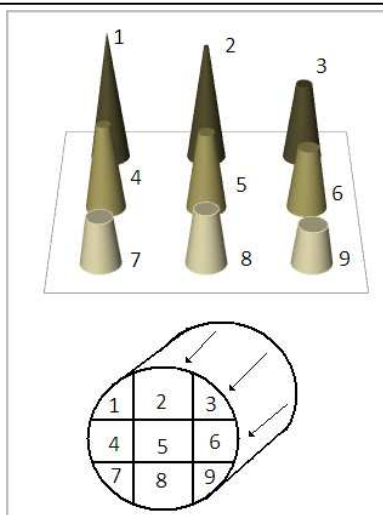
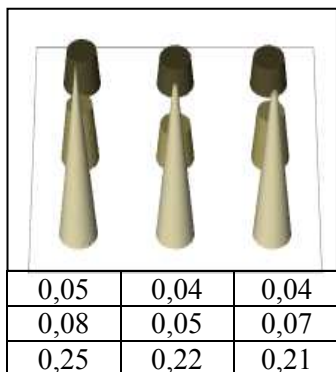


Figura 4.4 – Diagrama de fases do polipropileno. Tê saída de lado com prolongamento de 90 mm. Perda de carga por unidade de comprimento entre os pontos P_4 e P_{11} em função da velocidade do ar e vazão de sólidos. Distribuição dos sólidos (massas corrigidas, Tabela B.4) no trecho vertical.



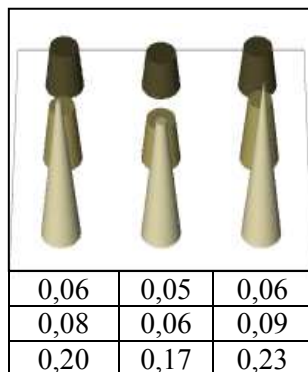
Ponto A:

$w = 0,08 \text{ kg/s}$
 $v = 13,45 \text{ m/s}$
 $S_A = 0,087$



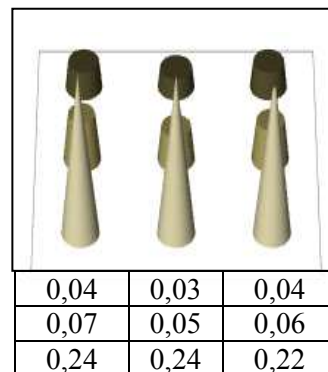
Ponto B:

$w = 0,08 \text{ kg/s}$
 $v = 21,39 \text{ m/s}$
 $S_B = 0,069$



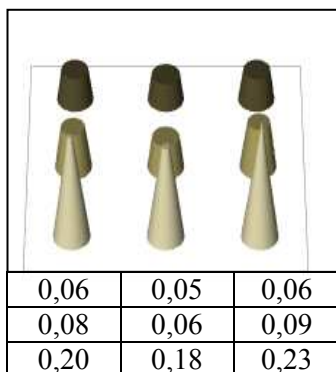
Ponto C:

$w = 0,143 \text{ kg/s}$
 $v = 13,45 \text{ m/s}$
 $S_C = 0,093$



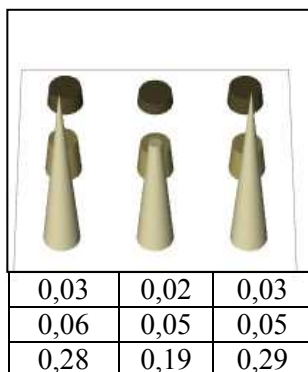
Ponto D:

$w = 0,143 \text{ kg/s}$
 $v = 21,39 \text{ m/s}$
 $S_D = 0,071$



Ponto E:

$w = 0,233 \text{ kg/s}$
 $v = 13,45 \text{ m/s}$
 $S_E = 0,111$



Ponto F:

$w = 0,233 \text{ kg/s}$
 $v = 21,39 \text{ m/s}$
 $S_F = 0,069$

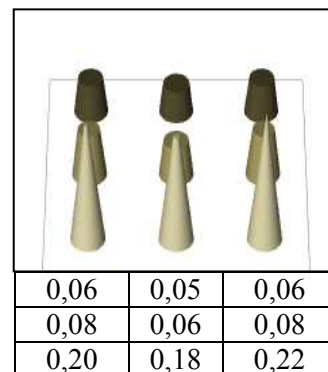


Figura 4.5 – Distribuição das partículas (massas corrigidas, Tabela B.5) no trecho horizontal para alguns pares de vazão de sólido e velocidade do ar.

4.3 Constantes das perdas de carga localizada

Os dados que concernem à obtenção do coeficiente multiplicador K da carga cinética da expressão geral da perda de carga localizada podem ser vistos nas Tabelas de C.1 até C.16 do Apêndice C (80 valores de K). A Tabela 4.6 fornece o valor médio do K das 5 velocidades estudadas.

Tabela 4.6 – Média do coeficiente K para as cinco velocidades.

Vazão de sólido (kg/s)	tê sem prolongamento	tê 30 mm	tê 60 mm	tê 90 mm
0,0	1,26	1,09	0,91	0,90
0,08	1,32	1,47	1,18	0,91
0,143	1,25	1,74	1,35	1,49
0,233	1,51	1,59	1,40	1,50
média sólido	1,36	1,60	1,31	1,30

Conforme discutido nas curvas de perda de carga, o tê com prolongamento de 30 mm gerou uma maior turbulência e um maior coeficiente K. Pelo exposto, recomendam-se os prolongamentos de 60 mm (K de 1,31), 90 mm (K de 1,30), pois além de preservarem mais a tubulação de desgastes, provocam uma menor perda de carga pela formação de uma pseudo curva formada pelos pellets.

No caso da maior velocidade (21,39 m/s) e maior vazão de sólido (0,233 kg/s) o K é de: a) 0,98 para o tê sem prolongamento (Tabela C.4); b) 1,19 para o tê de 30 mm (Tabela C.8); c) 0,92 para o tê de 60 mm (Tabela C.12) e d) 0,95 para o tê de 90 mm (Tabela C.16). Média de 1,01.

O valor do fator K dado pela Tabela 2.5 para Tê saída de lado, rosca (sem sólido, PERRY & GREEN, 1997) é, também, igual a unidade, assim como o K da CRANE (sem sólido), produto do f_t de 0,017 por 60 (Tabela 2.7 e 2.8).

4.4. Verificação da validade de equações de perda de carga

Visando verificar a validade de equações propostas em 2010 por COUPER, PENNEY, FAIR E WALAS, apresentam-se a seguir os cálculos da perda de carga para uma condição experimental: a) velocidade do ar no duto de transporte de 21,37 m/s; b) diâmetro interno do duto de 117 mm; c) vazão de sólido de 0,233 kg/s; d) densidade do polipropileno de 0,905 g/cm³; e) pressão de 1 atm; f) temperatura de 20°C; g) trecho horizontal de 2 m.

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2} \rho v^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{8}{\pi} \frac{f}{Re} \right) \frac{L}{D} \\
 & = \frac{1}{2} (1,225 \text{ kg/m}^3) (21,37 \text{ m/s})^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{8}{\pi} \frac{0,02}{Re} \right) \frac{2 \text{ m}}{0,117 \text{ m}} \\
 & = 0,1157 \text{ ft}^2 \quad (4.7) \\
 & v = \frac{Q}{A} = \frac{0,233 \text{ kg/s}}{0,1157 \text{ ft}^2} \\
 & = \frac{0,233 \text{ kg/s}}{0,0107 \text{ m}^2} \\
 & = 21,77 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

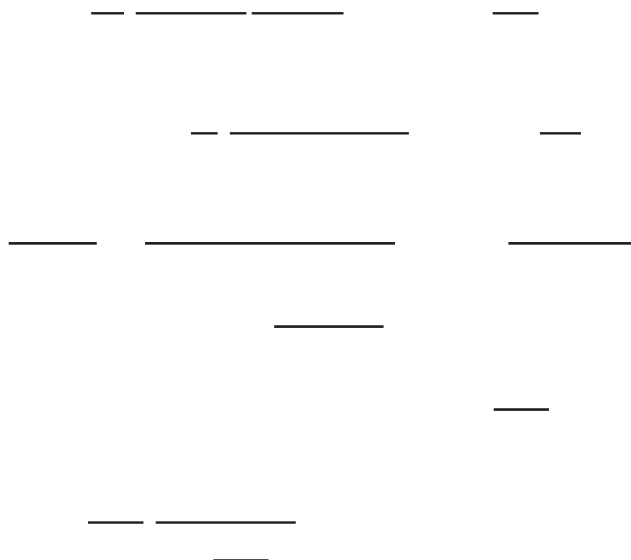


Valor conservativo uma vez que a perda de carga nas condições apresentadas é de 18 mmca.

Empregando as mesmas condições na equação sugerida por GOMIDE (1983) tem-se

$$L_T = 2 \text{ m} \quad \varphi X \quad (4.27)$$

(só trecho horizontal)



Perda de carga semelhante ao obtido pelas equações propostas por COUPER, PENNEY, FAIR E WALAS (60 mmca) e também conservativa em relação ao valor experimental de 18 mmca.

Com os mesmos valores na equação de JONES (1988) obtém-se um valor inferior ao experimental.



CAPÍTULO V

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

O trabalho realizado na unidade experimental projetada e montada na UNISANTA permitiu concluir, para as condições estudadas, que:

- a) A velocidade do ar determinada por anemômetro no duto de sucção do ventilador (de fácil leitura) e calculada para o duto de descarga pela equação da continuidade forneceu um desvio inferior a 6% em relação à velocidade média obtida por um tubo de Pitot horizontal e outro vertical através do método das centróides de áreas iguais (valor obtido de forma não imediata).
- b) Pode-se empregar a Lei da Afinidade para a potência visando prever com desvio máximo de 11,6% a energia consumida no motor quando se altera a rotação do motor do ventilador.
- c) A variação da potência consumida pelo motor do ventilador não foi significativa com e sem o transporte de sólido. As condições iniciais de acúmulo de sólido também não afetaram de forma relevante a potência.
- d) Houve para o caso do tê saída de lado e sem prolongamento, pouca influência da vazão de sólidos na variação da perda de carga em função da velocidade do ar. O prolongamento promoveu uma maior separação das curvas.
- e) A perda de carga desde a saída da válvula rotativa até, praticamente, o fim do trecho vertical foi menor com os prolongamentos para a vazão máxima de sólido (0,233 kg/s) e velocidade máxima de ar de 21,39 m/s.

- f) Os tês promoveram uma importante distribuição das partículas no trecho vertical indicadas pelo baixo desvio padrão implicando em um desgaste mais homogêneo da tubulação.
- g) A constante da perda de carga (K) para o tê com prolongamento, com a maior vazão de polipropileno (0,233 kg/s) e velocidade máxima do ventilador de 21,39 m/s foi igual a 1,0, idêntico ao da literatura para fluido sem partícula e tê saída de lado.
- h) As equações recomendadas por COUPER, PENNEY, FAIR E WALAS (1910), assim como as sugeridas por GOMIDE (1983) forneceram valores conservadores (aproximadamente 3 vezes e 3,7 vezes maior, respectivamente) para a perda de carga em um trecho reto e horizontal. A equação de JONES (1988) apresentou um valor inferior ao experimental (2,5 vezes menor).

5.2 Sugestões

Visando a continuidade da linha de pesquisa com a unidade piloto do presente trabalho sugere-se:

- a) Determinar o comprimento equivalente e o valor do coeficiente K, multiplicador da carga cinética, da expressão geral de perda de carga localizada do tê cego com balisas para diferentes:
 - a₁) Sólidos e granulometrias.
 - a₂) Materiais e diâmetros do tê.
 - a₃) Formatos de balisa como cônico, abaulado e com placa de sacrifício inclinada.
 - a₄) Condições do fluido de transporte como temperatura, umidade e vazão.
- b) Quantificar o comprimento equivalente e o coeficiente K da perda de carga de curvas sem e com prolongamento de amortecimento.
- c) Estudar a distribuição de partículas na seção transversal do duto após as singularidades em linhas horizontais e verticais para análise de desgaste dos pellets e das tubulações.
- d) Relacionar a perda de carga localizada com a perda de carga total do sistema em função das diferentes velocidades de reaceleração das partículas após as singularidades.

CAPÍTULO VI

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARWAL, A. T.; DHODAPKAR, S. V.; Debottleneck pneumatic conveying systems. Chemical Engineering. 2004, p. 38-44.

CRANE Co.; Flow of fluids through valves, fittings and pipe : New York. 1987.

COUPER, R. J.; PENNEY, W. R.; FAIR, J. R.; WALAS, S. M.; Chemical process equipment. Selection and design. 2 ed., Oxford, : Elsevier. 2010, 812 p.

DHODAPKAR, S. V.; PLASYNSKI, S.; KLINZING, G. E.; Plug flow movement of solids. Powder Technology. 1994, v. 81, p. 3-7.

FOKEER, S.; KINGMAN, S.; LOWDES, I.; REYNOLDS, A., Characterisation of the cross sectional particle concentration distribution in horizontal dilute flow conveying – a review Chemical Engineering and Processing, 43 (2004) 677-691.

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

FRANK G. J.; Specifying components of pneumatic-conveying systems. Chemical Engineering. 1975 (a), v. 31, p. 88-96.

FRANK G. J.; How to select a pneumatic-conveying system. Chemical Engineering. 1975 (b), v. 17, p. 72-86.

GELDART, D.; Types of gas fluidization. Powder Technology. 1973, v. 7, 285 p.

GLUCK S. E.; Design tips for pneumatic conveyers. Solids Handling. 1968, v. 47, p.88-95.

GOMIDE R.; Operações Unitárias. Transporte de sólidos, São Paulo. 1983, v. 1, cap. 4, p. 164-182.

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

GU, H.; KLINZING, G. E.; Vertical plug flow of cohesive coal in 2 and 4 inch pipes. Powder Technology. 1989, v. 57, p. 59-67.

HEUCKE, U.; MOLERUS, O.; Pneumatic transport of coarse grained particles in horizontal pipes. Powder Technology. 1999, v. 102, p. 135-150.

HOPPER, B. W.; Chemical Engineering, August 24, 1981.

JONES, M.; Pneumatic Conveying. Handbook of Power Science. 1988, cap 7, p. 378-388.

KALMAN H., HUBERT M. Experimental determination of length-dependent saltation velocity in dilute flows. Powder Technology. 2003, v. 134, p. 156-166.

KLINZING G. E, CABREJOS F. J. Pickup and saltation mechanisms of solid particles in horizontal pneumatic transport. Powder Technology. 1994, v. 79, p. 173-186.

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

KLAUSNER, J. F.; CHEN, D.; MEI, R.; A fluid mechanics to describing the behavior of pneumatically conveyed powder plugs. Powder Technology. 2002, v. 124, p. 127-137.

KONRAD K. Dense phase conveying: a review. Powder Technology. 1986, v.49, p. 1-35.

KUNII D., LEVENSPIEL O. Fluidization Engineering – 2 ed., Oxford, Butterworth-Heinemann, 1991.

LEUNG, L. S.; JONES, P. J.; Proceedings of Pneumotransport 4, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, paper C1, 1978.

LEVI, A.; MOONEY, T.; MARJANAVIC, P.; MASON, D. J. A comparison of analytical and numerical models for gas-solid flow through straight pipe of different inclinations with experimental data. Powder technology. 1997, v. 93, p. 253-260.

LI HUI, TOMITA YUJI. Particle velocity and concentration characteristics in a horizontal dilute swirling flow pneumatic conveying. Powder Technology. 2000, v.107, p.144-152.

LUDWIG, E. E.; Applied process design for chemical and petrochemical plants. New York: Gulf Publishing. 2007, v. 3.

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

MOLODTSOF, Y; LAOUAR, S.; Experimental characterization of the pressure drop in dense phase pneumatic transport at very low velocity. Powder Technology. 1998, v. 95, p. 165-173.

MOLODTSOF, Y.; MOTTE, J.; Predicting transport velocities. Powder Technology. 2001, v.120, p. 120-126.

MORAES, Jr. D.; SILVA, E. L.; MORAES, M. S.; Aplicações de estática e dinâmica dos fluidos, Santos: UNISANTA. 2011.

OCHI, M.; TAKEI, M.; Flow characteristics in horizontal pneumatic conveyance at low fluid velocities-3. Additional pressure drop and the friction factor. Advanced Powder Technology. 1995, v. 6, p. 317-324.

PERRY R. H., GREEN D. W., MALONEY J. O.; Perry's Chemical Engineers' Handbook. 7 ed., New York, McGraw-Hill. 1997, p. 21-22.

RABINOVICH, E.; KALMAN, H.; Boundary saltation minimum pressure velocities in particle-gas systems. Powder Technology 185. 2008, p. 67-79.

RHODES M.; Transporte Pneumático de Partículas. UFRN, Rio Grande do Norte. www.ufrnet.ufm.br. 2004.

RIBEIRO D. S.; Transporte Pneumático – Tecnologia, projetos e aplicações na indústria e nos serviços. Artliber. 2005, 172 p.

RIZK, F.; Proceedings of Pneumotransport 3, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, paper D4, 1973.

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.

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

VASQUEZ, N; JACOB, K.; COCCO, R.; DHODAPKAR, S.; KLINZING, G. E. Visual analysis of particle bouncing and its effect on pressure drop in dilute phase pneumatic conveying. Powder Tech., 179, 170 (2008).

WEI, W.; QINGLIANG, G.; YUXIN, W.; HAIRUI, Y.; JIANSHENG, Z.; JUNFU, L. Experimental study on the solid velocity in horizontal dilute phase pneumatic conveying of fine powders. Powder Technology, vol 212, Issue 3, 25 October 2011, p. 403-409.

YAN, F.; RINOSHIKA, A.; Application of high-speed PIV and image processing to measuring particle velocity and concentration in a horizontal pneumatic conveying with dune model. Powder Technology. 2011, v. 208, p. 158-165.

ZENZ, F. A. Fluidization and fluid particle systems. Ind. Eng. Chem. 1949, v. 41, p. 2801-6.

APÊNDICE

APÊNDICE A – PRESSÕES NOS ANÉIS PIEZOMÉTRICOS

APÊNDICE B – DISTRIBUIÇÃO DAS PARTÍCULAS NA SEÇÃO TRANSVERSAL DOS DUTOS

APÊNDICE C – CONSTANTES DAS PERDAS DE CARGA LOCALIZADA

APÊNDICE D – TRABALHOS PUBLICADOS

APÊNDICE A – PRESSÕES NOS ANÉIS PIEZOMÉTRICOS

As tabelas de A.1 até A.16 são referentes às pressões nos anéis piezométricos da unidade experimental. A distância entre as tomadas de pressão P_4 e P_7 (Figura 3.2) é de 1,647 m; entre P_7 e P_8 de 0,485 m; entre P_8 e P_{11} de 1,275 m e a distância total (P_4 até P_{11}) é igual a 3,407 m.

Tabela A.1 – Pressões nos anéis piezométricos de P_1 até P_{11} (Figura 3.2) em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d), tê saída de lado sem prolongamento e sem sólido.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)										
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}
65	21,39	52,0	111,0	111,0	111,0	112,0	112,0	112,0	73,0	74,0	78,0	76,0
60	18,97	44,0	94,0	94,0	88,0	90,0	90,0	88,0	64,0	64,0	64,0	62,0
55	16,90	36,0	80,0	80,0	78,0	80,0	78,0	74,0	54,0	58,0	52,0	52,0
50	15,18	24,0	66,0	67,0	64,0	68,0	64,0	64,0	46,0	46,0	44,0	44,0
45	13,45	26,0	54,0	54,0	50,0	52,0	52,0	50,0	36,0	38,0	36,0	36,0

Obs: Para a velocidade de 21,37 m/s a diferença de pressão entre os anéis piezométricos P_4 e P_{11} por unidade de comprimento (L) é de:

ou, diretamente pelo fator de conversão de 9,8088 Pa/mmca.

Tabela A.2 – Pressões nos anéis piezométricos de P_1 até P_{11} (Figura 3.2) em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d), tê saída de lado sem prolongamento e com vazão de polipropileno de 0,08 kg/s.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)										
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}
65	21,39	52,0	108,0	108,0	100,0	98,0	94,0	92,0	68,0	72,0	68,0	68,0
60	18,97	42,0	94,0	94,0	86,0	88,0	86,0	84,0	60,0	64,0	62,0	36,0
55	16,90	36,8	80,0	82,0	75,0	70,0	72,0	72,0	48,0	48,0	50,0	48,0
50	15,18	22,0	68,0	68,0	62,0	62,0	62,0	60,0	40,0	42,0	40,0	40,0
45	13,45	21,0	53,0	52,0	50,4	50,0	50,2	50,0	31,0	33,8	34,0	33,6

Tabela A.3 – Pressões nos anéis piezométricos de P_1 até P_{11} (Figura 3.2) em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d), tê saída de lado sem prolongamento e com vazão de polipropileno de 0,143 kg/s.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)										
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}
65	21,39	48,0	108,0	106,0	96,0	96,0	90,0	90,0	64,0	66,0	60,0	58,0
60	18,97	40,0	90,0	90,0	80,0	80,0	78,0	78,0	52,0	54,0	52,0	50,0
55	16,90	36,0	80,0	80,0	70,0	72,0	68,0	72,0	50,0	48,0	46,0	42,0
50	15,18	34,0	70,0	68,0	60,0	30,0	58,0	64,0	34,0	38,0	36,0	30,0
45	13,45	28,0	58,0	58,0	52,0	48,0	50,0	48,0	28,0	30,0	30,0	28,0

Tabela A.4 – Pressões nos anéis piezométricos de P_1 até P_{11} (Figura 3.2) em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d), tê saída de lado sem prolongamento e com vazão de polipropileno de 0,233 kg/s.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)										
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}
65	21,39	46,4	112,6	113,0	99,4	97,4	98,0	93,6	66,8	68,5	63,4	58,0
60	18,97	96,6	96,4	97,5	85,2	84,7	86,0	89,3	57,4	58,9	54,8	50,0
55	16,90	80,2	84,4	84,3	75,1	76,8	74,7	72,0	43,4	48,6	43,6	38,8
50	15,18	34,6	70,0	68,8	61,0	54,6	54,6	54,2	35,2	38,3	32,7	28,8
45	13,45	28,0	56,4	55,2	46,0	42,0	44,0	43,2	28,8	30,4	25,3	21,2

Tabela A.5 – Pressões nos anéis piezométricos de P_1 até P_{11} (Figura 3.2) em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d), tê com prolongamento de 30 mm sem sólido.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)										
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}
65	21,39	46,5	105,1	102,3	98,3	101,9	98,0	99,1	70,7	82,5	78,3	78,3
60	18,97	43,1	88,5	91,1	86,0	88,9	86,3	85,4	62,7	68,0	70,0	68,9
55	16,90	35,9	76,3	77,9	72,0	72,3	74,3	72,0	53,1	56,9	57,5	58,0
50	15,18	28,3	62,0	58,9	57,5	59,7	62,0	56,5	42,3	42,0	46,0	44,0
45	13,45	24,9	48,7	46,5	46,5	48,7	48,7	45,9	32,3	37,1	36,9	36,5

Tabela A.6 – Pressões nos anéis piezométricos de P_1 até P_{11} (Figura 3.2) em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d), tê com prolongamento de 30 mm com vazão de polipropileno de 0,08 kg/s.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)										
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}
65	21,39	50,2	110,4	105,6	98,9	97,8	95,1	93,1	64,5	72,6	64,8	63,4
60	18,97	42,0	94,0	94,0	86,0	87,4	80,6	82,0	54,8	61,2	57,0	54,8
55	16,90	37,2	80,7	78,0	72,0	74,7	69,2	67,6	44,6	50,2	45,9	44,4
50	15,18	32,2	69,2	65,6	61,9	59,4	57,2	58,2	34,7	39,6	40,4	34,0
45	13,45	28,3	56,8	55,4	50,4	50,4	49,5	47,4	25,4	28,0	28,0	30,0

Tabela A.7 – Pressões nos anéis piezométricos de P_1 até P_{11} (Figura 3.2) em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d), tê com prolongamento de 30 mm com vazão de polipropileno de 0,143 kg/s.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)										
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}
65	21,39	50,0	107,2	107,7	87,8	100,0	106,7	95,3	63,9	78,7	64,0	63,4
60	18,97	44,0	93,0	94,9	78,2	86,9	81,0	82,8	53,5	68,3	53,7	51,0
55	16,90	38,0	82,2	79,9	65,9	72,0	71,8	66,6	45,8	59,0	47,1	39,8
50	15,18	34,3	69,0	69,0	59,8	63,4	63,5	62,2	29,6	45,4	35,4	32,4
45	13,45	2,8	55,4	76,6	46,6	50,0	50,0	51,0	22,4	56,3	29,0	25,8

Tabela A.8 – Pressões nos anéis piezométricos de P_1 até P_{11} (Figura 3.2) em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d), tê com prolongamento de 30 mm com vazão de polipropileno de 0,233 kg/s.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)										
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}
65	21,39	42,4	105,0	182,4	96,0	96,0	95,4	96,0	63,2	77,3	65,4	59,3
60	18,97	49,8	101,6	98,8	83,9	83,9	83,8	84,0	38,2	67,0	56,8	53,2
55	16,90	40,5	85,4	83,6	73,8	73,8	73,5	71,6	47,2	56,6	46,2	40,0
50	15,18	35,8	72,0	71,6	59,2	56,6	56,6	60,0	36,2	48,8	32,0	29,2
45	13,45	30,0	60,0	56,6	46,6	44,2	43,6	44,6	28,4	34,0	28,7	22,6

Tabela A.9 – Pressões nos anéis piezométricos de P_1 até P_{11} (Figura 3.2) em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d), tê com prolongamento de 60 mm sem sólido.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)										
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}
65	21,39	48,6	107,6	107,6	100,0	103,4	98,2	99,4	78,6	82,8	82,8	77,6
60	18,97	44,2	91,6	92,4	88,6	82,6	88,6	85,4	69,0	71,4	89,8	68,8
55	16,90	40,2	78,6	77,8	74,8	77,0	74,8	73,4	59,2	62,0	59,8	57,6
50	15,18	34,2	65,6	64,4	62,0	62,4	62,2	61,4	49,0	50,4	48,2	48,2
45	13,45	25,0	54,5	48,8	45,4	48,0	45,0	48,6	34,2	38,4	36,6	36,6

Tabela A.10 – Pressões nos anéis piezométricos de P_1 até P_{11} (Figura 3.2) em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d), tê com prolongamento de 60 mm com vazão de polipropileno de 0,08 kg/s.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)										
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}
65	21,39	46,8	98,1	102,2	91,0	96,7	90,3	86,6	61,9	66,1	64,0	60,9
60	18,97	43,1	88,2	92,6	82,7	82,7	81,0	78,0	52,3	56,0	54,9	55,9
55	16,90	77,1	74,9	78,0	69,3	42,0	70,0	69,9	48,0	48,0	47,5	42,0
50	15,18	32,0	65,5	63,3	58,0	56,0	57,1	56,7	36,0	40,5	39,1	36,7
45	13,45	26,7	56,5	51,5	47,5	49,3	46,7	44,9	22,7	30,9	27,7	27,7

Tabela A.11 – Pressões nos anéis piezométricos de P_1 até P_{11} (Figura 3.2) em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d), tê com prolongamento de 60 mm com vazão de polipropileno de 0,143 kg/s.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)										
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}
65	21,39	49,6	109,4	108,3	96,4	99,0	93,0	93,0	69,2	69,0	63,6	61,0
60	18,97	45,6	94,0	94,2	85,0	83,2	82,6	80,8	58,4	59,0	55,0	52,4
55	16,90	38,4	82,4	80,4	72,6	75,4	71,2	70,4	48,0	51,2	45,6	44,6
50	15,18	32,8	79,8	78,6	61,0	63,6	62,0	60,9	33,0	39,4	36,0	34,6
45	13,45	20,4	56,2	55,2	48,7	48,2	46,2	45,0	28,4	33,4	29,2	29,0

Tabela A.12 – Pressões nos anéis piezométricos de P_1 até P_{11} (Figura 3.2) em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d), tê com prolongamento de 60 mm com vazão de polipropileno de 0,233 kg/s.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)										
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}
65	21,39	50,6	110,6	109,3	97,7	99,8	94,8	93,5	68,3	69,0	64,4	61,2
60	18,97	45,8	97,8	95,8	84,8	88,4	84,0	81,0	59,2	59,0	54,8	52,4
55	16,90	29,6	79,2	82,4	70,2	75,1	66,6	72,5	36,4	37,6	37,2	33,3
50	15,18	33,6	70,6	67,4	58,0	57,7	56,0	57,1	32,8	40,0	33,2	33,4
45	13,45	27,3	44,4	53,6	43,2	44,4	44,2	44,0	30,6	30,4	29,0	26,8

Tabela A.13 – Pressões nos anéis piezométricos de P_1 até P_{11} (Figura 3.2) em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d), tê com prolongamento de 90 mm sem sólido.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)										
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}
65	21,39	53,2	108,0	106,4	104,4	102,5	102,4	99,1	78,0	83,1	80,5	78,9
60	18,97	43,9	83,3	90,0	88,9	89,5	86,0	89,3	66,7	70,7	69,5	69,6
55	16,90	38,3	76,5	74,5	75,1	75,1	74,5	71,9	57,3	61,3	60,5	56,3
50	15,18	32,8	66,2	66,2	63,8	59,2	62,9	58,3	46,6	43,6	48,8	47,4
45	13,45	28,2	52,4	43,1	50,6	50,6	50,0	46,0	35,0	37,0	36,8	36,0

Tabela A.14 – Pressões nos anéis piezométricos de P_1 até P_{11} (Figura 3.2) em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d), tê com prolongamento de 90 mm com vazão de polipropileno de 0,08 kg/s.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)										
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}
65	21,39	52,9	106,0	106,0	88,3	94,9	95,5	94,0	64,5	71,5	67,3	66,0
60	18,97	47,3	90,0	88,9	83,3	82,3	83,9	78,6	47,1	60,5	56,7	53,5
55	16,90	40,0	79,3	76,5	70,5	72,8	72,9	68,0	46,3	50,0	47,5	44,6
50	15,18	31,2	66,0	63,6	57,4	56,0	56,8	56,4	33,3	40,0	36,8	34,6
45	13,45	26,4	53,1	51,5	44,4	44,6	44,6	44,6	25,6	30,6	27,4	26,0

Tabela A.15 – Pressões nos anéis piezométricos de P_1 até P_{11} (Figura 3.2) em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d), tê com prolongamento de 90 mm com vazão de polipropileno de 0,143 kg/s.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)										
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}
65	21,39	53,2	115,0	110,0	103,2	99,0	96,4	91,2	62,8	67,2	64,0	60,6
60	18,97	48,8	100,0	117,4	89,0	89,0	84,0	82,8	56,0	58,8	55,0	48,6
55	16,90	42,0	88,0	87,6	74,8	74,8	74,6	70,8	43,0	48,6	45,4	41,2
50	15,18	36,2	72,7	72,4	65,5	59,6	59,6	59,4	32,2	34,8	34,0	33,8
45	13,45	28,7	59,6	57,0	50,6	50,6	49,0	46,0	28,5	33,6	31,2	30,4

Tabela A.16 – Pressões nos anéis piezométricos de P_1 até P_{11} (Figura 3.2) em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d), tê com prolongamento de 90 mm com vazão de polipropileno de 0,233 kg/s.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)										
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}
65	21,39	54,8	114,7	108,8	100,2	100,0	96,0	91,8	65,8	69,8	65,2	61,4
60	18,97	49,0	96,0	95,6	86,8	89,0	83,0	80,8	54,4	60,8	55,6	54,0
55	16,90	43,0	86,6	82,6	74,0	73,6	70,8	69,2	48,6	45,8	44,0	43,8
50	15,18	36,6	71,0	70,0	65,8	62,6	62,0	61,0	28,8	39,0	36,6	35,8
45	13,45	28,7	59,6	57,0	50,6	50,6	49,0	46,0	26,6	35,6	31,2	30,4

APÊNDICE B – DISTRIBUIÇÃO DAS PARTICULAS NA SEÇÃO TRANSVERSAL DOS DUTOS

Nas tabelas de B1 até B5 são apresentadas as massas coletadas para as três vazões de sólidos e as cinco velocidades do ar no duto de transporte estudadas.

Tabela B1 – Massa em gramas (g) nos Sacos Coletores (SC) de 1 a 9 no duto vertical a jusante do tê saída de lado e sem prolongamento. Vazões de sólidos G_1 de 0,08 kg/s, G_2 de 0,143 kg/s e G_3 de 0,233 kg/s. Velocidade do ar no duto de transporte (v_d). Massa Total (MT) dos nove coletores em gramas.

Velocidade do ar no duto de transporte (v_d)															
	13,45 m/s			15,18 m/s			16,90 m/s			18,97 m/s			21,39 m/s		
SC	G_1	G_2	G_3	G_1	G_2	G_3	G_1	G_2	G_3	G_1	G_2	G_3	G_1	G_2	G_3
1	755	711	358	834	760	722	810	876	758	798	854	860	804	809	851
2	983	883	940	1041	1114	961	1005	1043	1052	1007	1059	1070	997	993	1049
3	848	794	759	837	922	843	840	842	875	842	825	766	846	822	807
4	696	701	857	775	741	716	766	840	768	765	842	857	754	749	803
5	451	468	550	481	556	507	481	526	577	474	542	537	461	477	497
6	815	906	870	829	860	902	846	782	833	854	824	749	851	837	787
7	428	555	326	495	426	483	515	466	439	512	536	469	516	505	466
8	557	726	821	620	560	631	634	648	582	638	364	585	645	648	594
9	483	621	627	496	449	545	510	438	429	520	522	421	527	573	450
MT	6016	6365	6108	6408	6388	6310	6407	6461	6313	6410	6368	6314	6401	6353	6304

Tabela B2 – Massa em gramas (g) nos Sacos Coletores (SC) de 1 a 9 no duto vertical a jusante do tê com prolongamento de 30 mm. Vazões de sólidos G_1 de 0,08 kg/s, G_2 de 0,143 kg/s e G_3 de 0,233 kg/s. Massa Total (MT) dos nove coletores em gramas.

Velocidade do ar no duto de transporte (v_d)															
	13,45 m/s			15,18 m/s			16,90 m/s			18,97 m/s			21,39 m/s		
SC	G_1	G_2	G_3	G_1	G_2	G_3	G_1	G_2	G_3	G_1	G_2	G_3	G_1	G_2	G_3
1	309	601	331	825	679	737	830	839	763	870	886	866	856	863	898
2	1277	795	958	1034	972	995	1034	1075	1103	1066	941	1032	1056	1041	1107
3	114	633	800	811	791	825	828	800	829	902	817	759	887	877	859
4	918	581	838	771	734	712	762	806	799	788	585	867	788	794	837
5	581	413	507	481	546	509	479	506	554	491	534	542	483	490	513
6	1172	779	871	810	872	865	824	763	767	878	803	750	893	885	832
7	524	407	558	471	435	435	492	440	424	528	548	471	539	532	507
8	666	543	699	599	599	582	611	557	553	660	625	576	673	673	615
9	620	475	593	462	483	494	482	413	404	531	464	343	539	538	471
MT	6181	5227	6155	6264	6111	6154	6342	6199	6196	6714	6203	6206	6714	6693	6639

Tabela B3 – Massa em gramas (g) nos Sacos Coletores (SC) de 1 a 9 no duto vertical a jusante do tê com prolongamento de 60 mm. Vazões de sólidos G_1 de 0,08 kg/s, G_2 de 0,143 kg/s e G_3 de 0,233 kg/s. Massa Total (MT) dos nove coletores em gramas.

Velocidade do ar no duto de transporte (v_d)															
SC	13,45 m/s			15,18 m/s			16,90 m/s			18,97 m/s			21,39 m/s		
	G_1	G_2	G_3	G_1	G_2	G_3	G_1	G_2	G_3	G_1	G_2	G_3	G_1	G_2	G_3
1	683	660	301	747	650	660	737	784	713	741	758	775	783	723	767
2	899	927	883	923	969	897	931	983	996	936	951	967	965	902	958
3	758	229	700	727	793	756	745	715	748	770	735	692	804	740	742
4	649	642	765	697	662	648	696	789	723	698	731	790	724	695	733
5	419	456	471	430	489	454	433	455	504	435	487	478	445	420	442
6	754	976	776	729	764	785	747	677	696	757	717	678	821	765	726
7	400	463	492	491	361	379	446	397	387	468	430	439	497	460	429
8	533	612	634	539	480	511	549	497	492	568	543	534	608	572	539
9	443	559	524	417	387	430	436	369	360	458	410	374	497	461	415
MT	5538	5524	5546	5640	5555	5065	5720	5616	5619	5831	5712	5726	6144	5788	5751

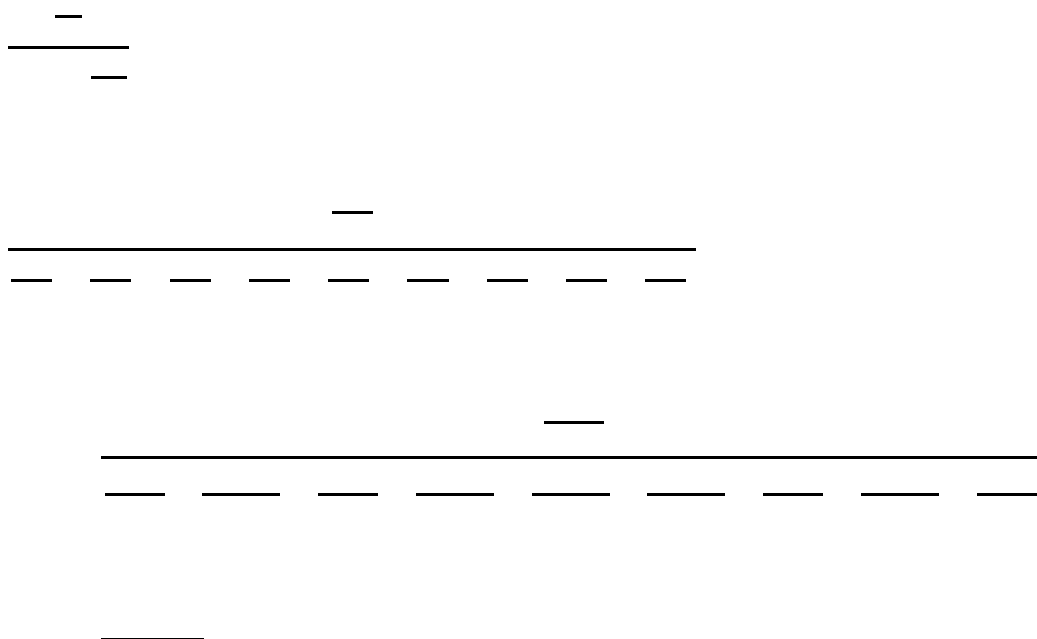
Tabela B4 – Massa em gramas (g) nos Sacos Coletores (SC) de 1 a 9 no duto vertical a jusante do tê com prolongamento de 90 mm. Vazões de sólidos G_1 de 0,08 kg/s, G_2 de 0,143 kg/s e G_3 de 0,233 kg/s. Massa Total (MT) dos nove coletores em gramas.

Velocidade do ar no duto de transporte (v_d)															
SC	13,45 m/s			15,18 m/s			16,90 m/s			18,97 m/s			21,39 m/s		
	G_1	G_2	G_3	G_1	G_2	G_3	G_1	G_2	G_3	G_1	G_2	G_3	G_1	G_2	G_3
1	720	646	301	754	634	666	742	770	728	745	766	755	748	731	771
2	914	802	843	949	972	892	949	999	1003	943	951	961	939	942	932
3	767	731	718	760	819	750	745	745	741	764	725	689	771	736	731
4	661	639	766	725	664	655	720	748	743	710	753	764	708	720	733
5	432	413	466	438	518	447	441	481	506	436	58	490	433	444	440
6	777	795	803	733	805	781	755	703	700	769	720	670	780	741	706
7	413	484	505	437	369	401	445	406	395	453	440	420	459	453	421
8	543	616	644	541	507	431	551	512	511	571	550	524	576	564	529
9	451	522	544	425	415	444	437	370	368	457	416	353	471	440	412
MT	5668	5648	5590	5762	5703	5567	5785	5734	5695	5848	5779	526	5885	5771	6675

Tabela B5 – Massa em gramas (g) nos Sacos Coletores (SC) de 1 a 9 no duto horizontal. Vazões de sólidos G_1 de 0,08 kg/s, G_2 de 0,143 kg/s e G_3 de 0,233 kg/s. Massa Total (MT) dos nove coletores em gramas.

Velocidade do ar no duto de transporte (v_d)															
SC	13,45 m/s			15,18 m/s			16,90 m/s			18,97 m/s			21,39 m/s		
	G_1	G_2	G_3	G_1	G_2	G_3	G_1	G_2	G_3	G_1	G_2	G_3	G_1	G_2	G_3
1	244	209	162	278	252	232	279	293	286	287	289	285	305	299	282
2	320	291	215	371	336	324	387	391	385	412	412	393	440	428	401
3	213	194	151	261	231	214	288	275	257	302	296	279	336	310	295
4	659	593	511	693	659	611	656	692	683	656	674	666	680	673	639
5	505	499	484	535	512	505	538	536	520	542	552	521	545	546	523
6	564	533	492	665	573	573	743	655	589	769	726	659	765	741	687
7	1044	970	1199	928	1000	925	846	914	881	834	851	821	826	829	790
8	1877	2046	1674	1634	1851	1766	1540	1617	1542	1487	1525	1462	1431	509	1430
9	822	884	1192	883	810	768	968	856	742	956	914	796	919	915	836
MT	6248	6219	6248	6224	5882	6229	5885	6239	5882	6245	6239	5882	6250	6250	5883

O valor 0,16 da massa por unidade de área referente ao ponto A (G_1 de 0,08 kg/s e v_d de 13,45 m/s) da Figura 4.1 foi obtida da seguinte forma (materiais e métodos, item 3.3.8 e 3.3.9) com os dados da Tabela B.1.



O desvio padrão, conforme apresentado no item 3.3.10, foi empregado para quantificar o grau de irregularidade na distribuição das partículas na seção transversal da tubulação. O desgaste da tubulação será menor, quanto mais homogênea a distribuição das partículas na seção transversal do duto, indicado pelo menor desvio padrão (S) dado pelas equações.

e

Sendo

n o número de pontos

Apresenta-se a seguir, com os dados da Figura 4.1 do tê saída de lado, um exemplo para a velocidade do ar de 13,45 m/s com vazão de polipropileno (G_1) de 0,08 kg/s.

—

que, no caso em estudo, é constante para todas as vazões G_1 , G_2 e G_3

APÊNDICE C – CONSTANTES DAS PERDAS DE CARGA LOCALIZADA

Apresentam-se a seguir, nas tabelas de C1 até C16, os dados referentes à determinação do coeficiente K, multiplicador da carga cinética da expressão geral da perda de carga localizada.

Tabela C.1 – Coeficiente K. Perda de carga entre os anéis piezométricos P₇ e P₈ em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d) e t_e saída de lado sem sólido.

λ (Hz)	v _d (m/s)	Pressão (mmca)			K (adimensional)
		P ₇	P ₈	ℓ _{w(7-8)} = (P ₇ – P ₈)	
65	21,39	112,00	73,00	39,00	1,421
60	18,97	88,00	64,00	24,00	1,111
55	16,90	74,00	54,00	20,00	1,167
50	15,18	64,00	46,00	18,00	1,302
45	13,45	50,00	36,00	14,00	1,289

Obs: Como exemplo de cálculo do K para a velocidade de 21,39 m/s tem-se

$$\ell_{w_{7-8}} = K \frac{v^2}{2g} \gamma_{ar}$$

$$\frac{v^2}{2g} \gamma_{ar} = \frac{(21,39 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} \cdot 1,2 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \frac{9,81 \text{ N}}{1 \text{ kgf}} \frac{0,1 \text{ mmca}}{1 \text{ N/m}^2} = 27,45 \text{ mmca}$$

$$K = \ell_{w_{7-8}} / \left[\frac{v^2}{2g} \gamma_{ar} \right] = 39 \text{ mmca} / 27,45 \text{ mmca} = 1,421$$

para os demais valores pode-se empregar

$$K = \ell_{w_{7-8}(\text{mmca})} / \left[\frac{v^2_{(\text{m/s})} \cdot 0,06}{2g} \right]$$

Tabela C.2 – Coeficiente K. Perda de carga entre os anéis piezométricos P_7 e P_8 em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d) e tê saída de lado com vazão de polipropileno de 0,08 kg/s.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)			K (adimensional)
		P_7	P_8	$\Delta w_{(7-8)} = (P_7 - P_8)$	
65	21,39	92,00	68,00	24,00	0,874
60	18,97	84,00	60,00	24,00	1,111
55	16,90	72,00	48,00	24,00	1,401
50	15,18	60,00	40,00	20,00	1,446
45	13,45	50,00	31,00	19,00	1,750

Tabela C.3 – Coeficiente K. Perda de carga entre os anéis piezométricos P_7 e P_8 em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d) e tê saída de lado com vazão de polipropileno de 0,143 kg/s.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)			K (adimensional)
		P_7	P_8	$\Delta w_{(7-8)} = (P_7 - P_8)$	
65	21,39	90,00	64,00	26,00	0,947
60	18,97	78,00	52,00	26,00	1,204
55	16,90	72,00	50,00	22,00	1,284
50	15,18	64,00	34,00	30,00	2,169
45	13,45	48,00	28,00	20,00	1,843

Tabela C.4 – Coeficiente K. Perda de carga entre os anéis piezométricos P_7 e P_8 em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d) e tê saída de lado com vazão de polipropileno de 0,233 kg/s.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)			K (adimensional)
		P_7	P_8	$\Delta w_{(7-8)} = (P_7 - P_8)$	
65	21,39	93,60	66,80	26,80	0,976
60	18,97	89,30	57,40	31,90	1,477
55	16,90	72,00	43,40	28,60	1,669
50	15,18	54,20	35,20	29,00	2,097
45	13,45	43,20	28,80	14,40	1,326

Tabela C.5 – Coeficiente K. Perda de carga entre os anéis piezométricos P_7 e P_8 em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d) e tê com prolongamento de 30 mm sem sólidos.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)			K (adimensional)
		P_7	P_8	$\Delta w_{(7-8)} = (P_7 - P_8)$	
65	21,39	99,10	70,70	28,40	1,034
60	18,97	85,40	62,70	22,70	1,051
55	16,90	72,00	53,10	18,90	1,103
50	15,18	56,50	42,30	14,20	1,027
45	13,45	45,90	32,30	13,60	1,253

Tabela C.6 – Coeficiente K. Perda de carga entre os anéis piezométricos P_7 e P_8 em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d) e tê com prolongamento de 30 mm e vazão de 0,08 kg/s.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)			K (adimensional)
		P_7	P_8	$\Delta w_{(7-8)} = (P_7 - P_8)$	
65	21,39	93,10	64,50	28,60	1,042
60	18,97	82,00	54,80	27,20	1,259
55	16,90	67,60	44,60	23,00	1,342
50	15,18	58,20	34,70	23,50	1,699
45	13,45	47,40	25,40	22,00	2,027

Tabela C.7 – Coeficiente K. Perda de carga entre os anéis piezométricos P_7 e P_8 em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d) e tê com prolongamento de 30 mm e vazão de 0,143 kg/s.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)			K (adimensional)
		P_7	P_8	$\Delta w_{(7-8)} = (P_7 - P_8)$	
65	21,39	95,30	63,90	31,40	1,144
60	18,97	82,80	53,50	29,30	1,357
55	16,90	66,60	45,80	20,80	1,214
50	15,18	62,20	29,60	32,60	2,358
45	13,45	51,00	22,40	28,60	2,635

Tabela C.8 – Coeficiente K. Perda de carga entre os anéis piezométricos P_7 e P_8 em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d) e tê com prolongamento de 30 mm e vazão de 0,233 kg/s.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)			K (adimensional)
		P_7	P_8	$\Delta w_{(7-8)} = (P_7 - P_8)$	
65	21,39	96,00	63,20	32,80	1,195
60	18,97	84,00	38,20	45,80	2,121
55	16,90	71,60	47,20	24,40	1,424
50	15,18	60,00	36,20	23,80	1,721
45	13,45	44,60	28,40	16,20	1,492

Tabela C.9 – Coeficiente K. Perda de carga entre os anéis piezométricos P_7 e P_8 em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d) e tê com prolongamento de 60 mm e sem sólidos.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)			K (adimensional)
		P_7	P_8	$\Delta P_{(7-8)} = (P_7 - P_8)$	
65	21,39	99,40	78,60	20,80	0,757
60	18,97	85,40	69,00	16,40	0,759
55	16,90	73,40	59,20	14,20	0,829
50	15,18	61,40	49,00	12,40	0,897
45	13,45	48,60	34,20	14,40	1,327

Tabela C.10 – Coeficiente K. Perda de carga entre os anéis piezométricos P_7 e P_8 em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d) e tê com prolongamento de 60 mm e vazão de 0,08 kg/s.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)			K (adimensional)
		P_7	P_8	$\Delta P_{(7-8)} = (P_7 - P_8)$	
65	21,39	86,60	61,90	24,70	0,899
60	18,97	78,00	52,30	25,70	1,190
55	16,90	69,90	48,00	21,90	1,278
50	15,18	56,70	36,00	20,70	1,497
45	13,45	44,90	22,70	22,20	1,045

Tabela C.11 – Coeficiente K. Perda de carga entre os anéis piezométricos P_7 e P_8 em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d) e tê com prolongamento de 60 mm e vazão de 0,143 kg/s.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)			K (adimensional)
		P_7	P_8	$\Delta P_{(7-8)} = (P_7 - P_8)$	
65	21,39	93,00	69,20	23,80	0,867
60	18,97	80,80	58,40	22,40	1,037
55	16,90	70,40	48,00	22,40	1,307
50	15,18	60,90	33,00	27,90	2,018
45	13,45	45,00	28,40	16,60	1,529

Tabela C.12 – Coeficiente K. Perda de carga entre os anéis piezométricos P_7 e P_8 em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d) e tê com prolongamento de 60 mm e vazão de 0,233 kg/s.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)			K (adimensional)
		P_7	P_8	$\Delta P_{(7-8)} = (P_7 - P_8)$	
65	21,39	93,50	68,30	25,20	0,918
60	18,97	81,00	59,20	21,80	1,010
55	16,90	72,50	36,40	36,10	2,106
50	15,18	57,10	32,80	24,30	1,757
45	13,45	44,00	30,60	13,40	1,234

Tabela C.13 – Coeficiente K. Perda de carga entre os anéis piezométricos P_7 e P_8 em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d) e tê com prolongamento de 90 mm e sem sólidos.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)			K (adimensional)
		P_7	P_8	$\Delta w_{(7-8)} = (P_7 - P_8)$	
65	21,39	99,10	78,00	21,10	0,768
60	18,97	89,30	66,70	22,60	1,047
55	16,90	71,90	57,30	14,60	0,852
50	15,18	58,30	46,60	11,70	0,842
45	13,45	46,00	35,00	11,00	1,013

Tabela C.14 – Coeficiente K. Perda de carga entre os anéis piezométricos P_7 e P_8 em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d) e tê com prolongamento de 90 mm e vazão de 0,08 kg/s.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)			K (adimensional)
		P_7	P_8	$\Delta w_{(7-8)} = (P_7 - P_8)$	
65	21,39	99,10	78,00	21,10	0,769
60	18,97	89,30	66,70	22,60	1,057
55	16,90	71,90	57,30	14,60	0,852
50	15,18	58,30	46,60	11,70	0,846
45	13,45	46,00	35,00	11,00	1,013

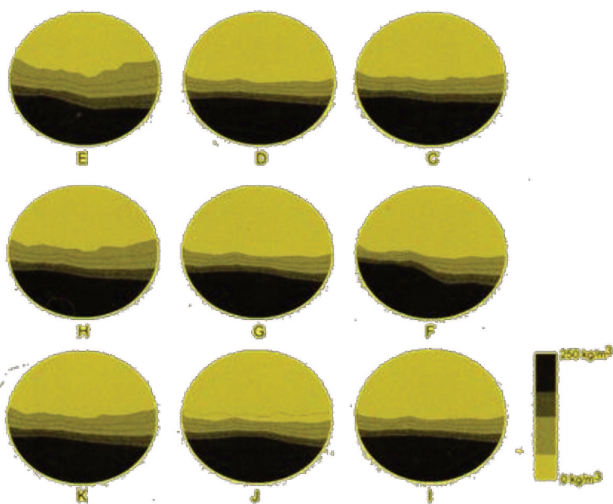
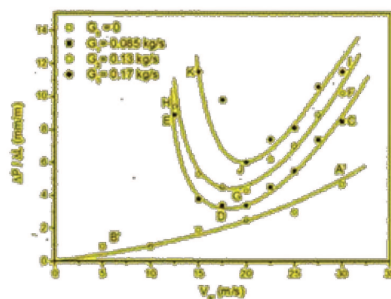
Tabela C.15 – Coeficiente K. Perda de carga entre os anéis piezométricos P_7 e P_8 em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d) e tê com prolongamento de 90 mm e vazão de 0,143 kg/s.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)			K (adimensional)
		P_7	P_8	$\Delta w_{(7-8)} = (P_7 - P_8)$	
65	21,39	91,20	62,80	28,40	1,034
60	18,97	82,80	56,00	26,80	1,241
55	16,90	70,80	43,00	27,80	1,622
50	15,18	59,40	32,20	27,20	1,967
45	13,45	46,00	28,50	17,50	1,612

Tabela C.16 – Coeficiente K. Perda de carga entre os anéis piezométricos P_7 e P_8 em função da frequência (λ) do inversor e velocidade do ar no duto de transporte (v_d) e tê com prolongamento de 90 mm e vazão de 0,233 kg/s.

λ (Hz)	v_d (m/s)	Pressão (mmca)			K (adimensional)
		P_7	P_8	$\Delta w_{(7-8)} = (P_7 - P_8)$	
65	21,39	91,80	65,80	26,00	0,947
60	18,97	80,80	54,40	26,40	1,223
55	16,90	69,20	48,60	20,60	1,202
50	15,18	61,00	28,80	32,20	2,329
45	13,45	46,00	26,60	19,40	1,787

Brazilian Journal of Chemical Engineering



A quarterly publication of the



**Brazilian Society of
Chemical Engineering**

DILUTE-PHASE PNEUMATIC CONVEYING OF POLYSTYRENE PARTICLES: PRESSURE DROP CURVE AND PARTICLE DISTRIBUTION OVER THE PIPE CROSS-SECTION

S. M. Santos¹, E. B. Tambourgi¹, F. A. N. Fernandes², D. Moraes Júnior^{3*} and M. S. Moraes³

¹Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Cidade Universitária
Zeferino Vaz, C. P. 6066, 13083-970 Campinas - SP, Brazil.

²Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Química,
Phone: + (55) (85) 33669611, Fax: + (55) (85) 3366-9610,
Campus do Pici, Bloco 709, 60455-760, Fortaleza - CE, Brazil.
E-mail: fabiano@ufc.br

³Universidade Santa Cecília, Departamento de Engenharia Química,
Fax: + (55) (13) 3202-7132, R. Oswaldo Cruz 266, 11045-907 Santos - SP, Brazil,
E-mail: deovaldo@unisanta.br; marlene@unisanta.br

(Submitted: May 14, 2010 ; Revised: August 8, 2010 ; Accepted: August 27, 2010)

Abstract - During the pneumatic conveying of plastic pellets, it has been observed that materials with similar physical characteristics may develop a substantial difference in pressure drop. In this work, the pressure drop in a particle-laden 2.7 meter long horizontal channel with circular cross-section is presented from an experimental perspective. Experiments are carried out for cylindrical polystyrene beads with an average diameter of 3.2 mm and mass loadings of 0.06 to 0.11 (kg particles/kg gas). The air mass flow rate was studied in the range from 0.085 kg/s to 0.170 kg/s. The pressure drop curve is shown as a function of air velocity and particle load. Response surface methodology showed high statistical significance for air velocity, particle load and their cross-relation.

Keywords: Pneumatic conveying; Particulate solids; Polystyrene; Particle distribution; Pressure loss.

INTRODUCTION

Pneumatic conveying of solid particles in channel or pipe flows is of great technical importance and is characterized by particle phase segregation due to gravity and particle inertia. Due to the presence of the confinement in these systems, the collisions of the solid particles with the walls play an essential role in the particle transport process. The wall collision frequency is directly responsible for the additional pressure drop due to the solids as a result of the momentum and energy loss involved in the deformation process (Adam, 1960; Vásquez et al., 2008).

A considerable number of industrial and chemical processes use pneumatic conveying systems to transport solids particles such as cereals, minerals,

chemicals and pharmaceuticals. Transport of particles occurs by means of gases flowing either in inclined, vertical or horizontal pipes. In most cases, air is used as carrier, but under certain conditions its use can cause hazards such as risks of explosion, fire and environmental contamination (Marcus et al., 1990; Li and Tomita, 2000).

The advantages of this transport system are the conservation of the product characteristics, prevention of product loss due to environmental damage, good flexibility and low weight of pipelines, and low operating costs. The main disadvantages are the high costs when high pressure is required and the abrasion of the solid materials that can wear down the bottom of pipes when a low solid/air ratio is applied (Molerus, 1996; Hirota et al., 2002).

*To whom correspondence should be addressed

A number of experiments were performed in the past aiming at a detailed analysis of particulate flows in pipes and channels, which have been reviewed by Sommerfeld (2003). Tsuji and Morikawa (1982, 1984) studied a gas–solid flow in a horizontal and vertical pipe using different types of relatively large polystyrene spheres. Numerical modeling of pneumatic conveying of solid particles in horizontal tubes has been published by several authors (Kuang et al., 2008; Lain et al., 2009; Sommerfeld and Lain, 2009), but experimental work is still needed to determine pressure drop curves.

Solid flow in conveying pipelines is usually carried out by applying two different flow techniques: dense phase and dilute phase. In dense phase, a high concentrations of solids, typically greater than 30% v/v, and velocities varying from 1 to 5 m/s are applied. The dense-phase regime has high acquisition, operating and maintenance costs, because it requires high gas pressures (pressures above 20 mbar/m). Dilute-phase conveying operates at solid concentrations lower than 1% v/v and velocities above 20 m/s. The dilute-phase regime has lower cost, but it provokes irregular pipe wear at low transport velocities, mainly in the lower parts of horizontal pipes.

The performance of a pneumatic conveying system in the dilute phase is highly affected by the pressure drop, which in turn depends on several parameters such as material properties, pipe designs and airflow.

The objective of this study was to obtain the pressure drop curve for cylindrical polystyrene

particles and to analyze the effects of air velocity and solid load on the pressure drop. Response surface methodology was used to analyze the influence of air velocity and solid load on the pressure drop response.

MATERIALS AND METHODS

Experimental Apparatus

The total length of the cylindrical channel of the experimental apparatus was 4.2 m. The first part of the channel was 1.5 m long and served to get a fully developed gas flow before the feeding point of the polymer particles. The initial part of the cylindrical channel has a flow conditioner, placed 0.9 m after the blower, which serves to homogenize the velocity profile in the pipe flow. The flow conditioner is also intended to accelerate the formation of a fully developed turbulent velocity profile, which is obtained at approximately 25 diameters downstream from the conditioner (Xiong et al., 2005).

The main component of the experimental apparatus consisted of a cylindrical channel, placed after the feeding point of the particles, with 2.7 m in length and 117 mm in internal diameter. This configuration allowed establishment of a two-dimensional flow condition, where gravity breaks down the cylindrical symmetry in the two-phase flow due to particle settling (Figures 1 and 2).

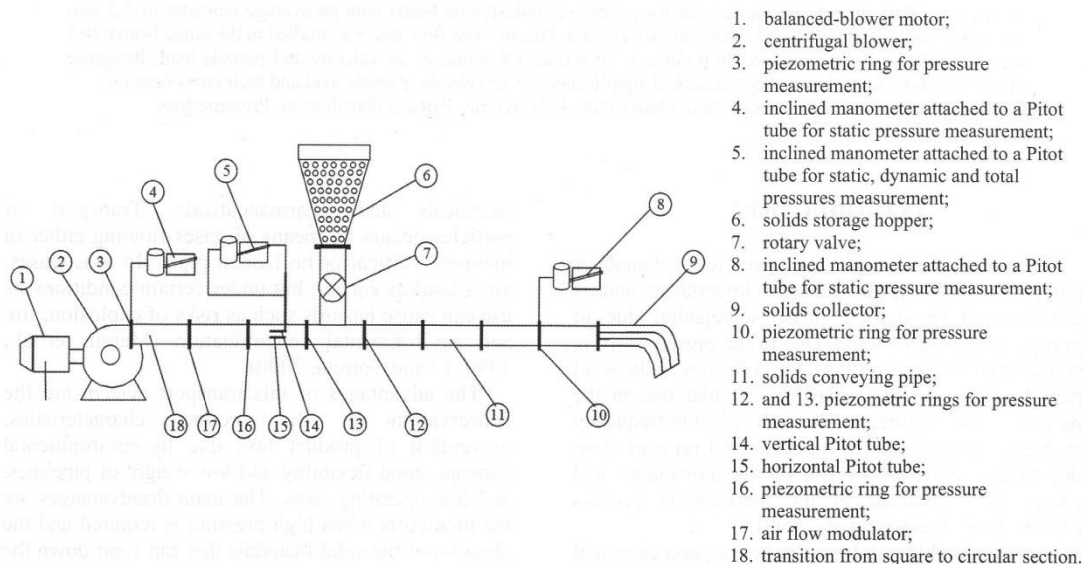


Figure 1: Schematic of the pilot pneumatic conveying system.

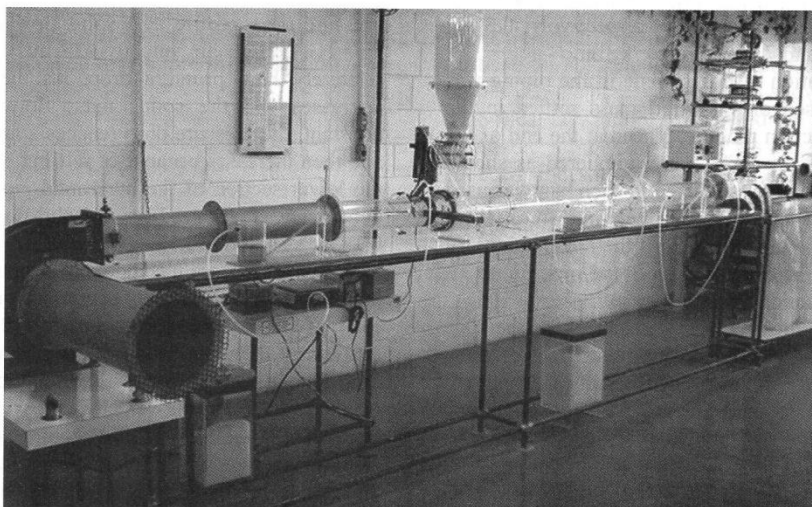


Figure 2: Pilot pneumatic conveying system: installation view.

Air was introduced by a centrifugal blower (Ventisilva, Brazil) with 100 mm diameter semi-open blades, a 203 mm diameter suction line, and a 102 mm square discharge section attached to a 1 Hp variable rotation motor, to which two extra bearings were added (balanced-blower motor) to assess the mechanical power.

The total pressure and the static pressure were measured by means of Pitot tubes. The tubes consisted of two "L" shaped coaxial tubes 190 mm in length. The inner tube had an internal diameter of 3 mm and the external tube had an internal diameter of 8 mm, and was built following ASME code. The total pressure was obtained by the central tube of the Pitot tube, while the static pressure was obtained by small orifices placed in the wall of the external tube of the Pitot tube. The dynamic pressure was determined as the difference between the total and static pressures. The Pitot tubes were placed 0.13 m after the first piezometric ring and 0.53 m after the flow conditioner.

The first, second, third and fourth piezometric rings were placed, respectively, at 0.40 m, 0.60 m, 1.20 m and 3.00 m after the flow conditioner.

The solids were fed from the feeder vessel to the conveying pipe by means of a rotary valve with six radial blades, measuring 92 mm by 42 mm and 76.2 mm in diameter. The solids were discharged into a collector module placed at the end of the horizontal pneumatic conveyor. The particle-distribution analysis module was comprised of nine square section aluminum pipes, to which nylon bags were attached to collect the solid particles (Figure 3). The loading, μ (solids mass flow/air mass flow), was controlled by the interaction of the airflow valve and the rotary valve.

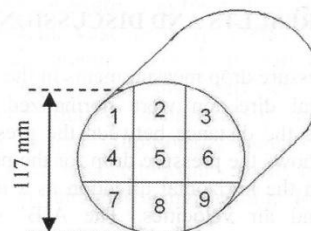


Figure 3: Schematics of the particle collector.

Material

Polystyrene particles (PS) were used in the tests and were provided by BASF. The properties of the polystyrene particles are presented in Table 1.

Table 1: Properties of the polystyrene particles.

Shape	cylindrical
Particle diameter (mm)	3.2
Density (kg/m ³)	1.050

Experiments

The polystyrene pressure drop characteristic curve as a function of the air velocity was built by setting the solid mass flow rates at 0.085 kg/s, 0.13 kg/s and 0.17 kg/s, herein termed G_1 , G_2 and G_3 , respectively. The velocity varied from 5 to 35 m/s and the pressures over the carrier were measured with piezometric rings attached to inclined pressure gauges. Minimum and maximum particle loadings

under these conditions were respectively 0.5 kg particle/kg air and 7.8 kg particle/kg air.

The distribution of polystyrene in the piping was determined based on the solid mass settled in the nine-pipe collection module, placed at the end of the conveying line; the pipes were numbered as shown in Figure 3. The mass collected in each bag was used to calculate the mass fraction per unit area, which then allowed calculation of the dispersion of polystyrene in the cross-section of the pipe for all air velocities and solids mass flow rates.

The particle density was calculated for the nine collectors and the points were also treated using surface response methodology. The software Statistica v7.0 was used to generate the particle distribution profile based on the interpolation of the data using the distance-weighted least square method. This method was applied because it gave better fitting of the data for non-symmetrical profiles.

RESULTS AND DISCUSSION

The pressure drop measurements in the horizontal and vertical direction were normalized as $\Delta P/L$, where L is the distance between the pressure taps. Figure 4 shows the pressure drop for the polystyrene particles in the horizontal direction as a function of loading and air velocities. The A'B' section in Figure 4 represents the pressure drop caused by the air flow (solid-free flow rate $G_0 = 0$) throughout the horizontal transport line. The pressure drop increased as the velocity increased because of internal friction, air-to-wall friction and flow perturbations.

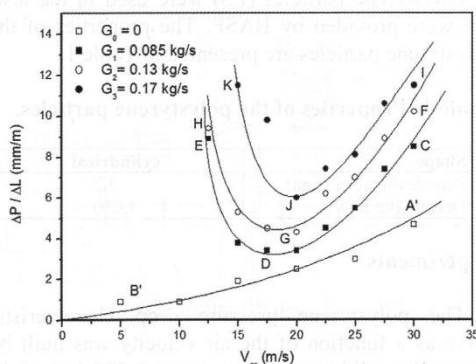


Figure 4: Pressure drop per unit length for polystyrene cylindrical particles as a function of air velocity and the solids flow rate.

The CDE section in Figure 4 represents the

pressure drop profile at a solid flow rate of 0.085 kg/s (G_1). High air velocity (25 m/s) resulted in a relatively high pressure drop. As the air velocity decreases and the solids mass flow rate is kept constant, the pressure drop reaches a minimum point and then increases because of settling of the solids in the lower section of the horizontal pipes. The same behavior was observed for all solid flow rates ($G_2 = 0.13$ kg/s and $G_3 = 0.17$ kg/s).

Response surface methodology was used to analyze the effects of the operating conditions on the pressure drop of polystyrene particles. Table 2 presents the analysis of the perturbation of the factors on pressure drop. The results showed that the solid loading and the quadratic effect of air velocity (v^2) were statistically significant at the 99% level of confidence ($p < 0.01$). Both operating conditions had a positive effect on pressure drop, meaning that an increase in solid loading or in air velocity tends to increase the pressure drop for polystyrene beads. The total pressure gradient increased with increasing solid mass flow rate at constant air velocity. The pressure drop increase at a high solids flow rates can be attributed to higher cross-sectional solid concentration in the pipe, creating an extra resistance to air flow through the system.

Table 2: Analysis of perturbation of the factors on the pressure drop of polystyrene particles in horizontal pipes.

Factor	Effect	Standard Error	p
Mean	4.589	0.489	0.0000
G *	4.000	0.590	0.0000
G ²	1.691	0.992	0.1063
v	0.779	0.753	0.3154
v ² *	9.697	1.323	0.0000
G×v	-1.610	0.956	0.1105

* significant effects at a confidence level of 95%; G is the solid loading; v is the air velocity.

The positive significance at the 99% level of confidence of the quadratic term of air velocity indicates that an increase in air velocity will have a much higher influence on pressure drop than the solid loading. The cross-interaction between air velocity and solid loading was negative, which means that, under certain operating conditions, a minimum in the pressure drop can be found, as observed in Figure 4.

The pressure drop for air flow in the pipe ($G = 0$) can be expressed by Equation (1):

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = 0.90 - 0.0043 \cdot v + 0.0037 \cdot v^2 \quad (1)$$

The pressure drop for two-phase flow in the horizontal pipe ($G = 0.085$ to $G = 0.17$) can be expressed by Equation (2) (in mm/m) or Equation (3) (in Pa/m):

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = 27.98 - 26.30 \cdot G + 468.08 \cdot G^2 - 2.37 \cdot v + 0.063 \cdot v^2 - 2.16 \cdot G \cdot v \quad (2)$$

where $\Delta P/\Delta L$ is the pressure drop (mm/m), G is the solid flow rate (kg/s) and v is the air flow rate (m/s).

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = 3730 - 357 \cdot G + 62408 \cdot G^2 - 16 \cdot v + 8.4 \cdot v^2 - 288 \cdot G \cdot v \quad (3)$$

where $\Delta P/\Delta L$ is the pressure drop (Pa/m), G is the solid flow rate (kg/s) and v is the air flow rate (m/s).

To become universally valid for any pipe diameter, Equation (3) can be redefined as shown in Equation (4):

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = a_0 (\rho_{\text{air}} g) + a_1 \left(\frac{g^{0.5}}{D^{2.5}} \right) G + a_2 \left(\frac{1}{\rho_{\text{air}} D^5} \right) G^2 + a_3 \left(\frac{\rho_{\text{air}} g^{0.5}}{D^{0.5}} \right) v + a_4 \left(\frac{\rho_{\text{air}}}{D} \right) v^2 + a_5 \left(\frac{1}{D^3} \right) G \cdot v \quad (4)$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = 322.6 (\rho_{\text{air}} g) + 0.534 \left(\frac{g^{0.5}}{D^{2.5}} \right) G + 1.615 \left(\frac{1}{\rho_{\text{air}} D^5} \right) G^2 + 29.261 \left(\frac{\rho_{\text{air}} g^{0.5}}{D^{0.5}} \right) v + 0.833 \left(\frac{\rho_{\text{air}}}{D} \right) v^2 + 0.461 \left(\frac{1}{D^3} \right) G \cdot v \quad (5)$$

where $\Delta P/\Delta L$ is the pressure drop (Pa/m), D is the pipe diameter (m), G is the solid flow rate (kg/s), g is the acceleration due to gravity (m/s^2), v is the air flow rate (m/s), and ρ_{air} is the air density (kg/m^3).

The regression model for the pressure drop of polystyrene particles in horizontal pipes and for the pressure drop of air flow in horizontal pipes was validated by means of the F-test (Table 3). The results of the F-test showed that the calculated F-value was more than 4 times higher than the listed F-value (for 95% confidence level), indicating that the

regression model is valid and can be used for the prediction of the pressure drop of polystyrene particles in horizontal pipes. A plot of the predicted values and the observed values is shown in Figure 5.

Solids are totally suspended in the air stream when the air velocity is high. As the air velocity is reduced, the solids move more slowly and tend to settle in the lower section of the pipeline. When the air velocity is insufficient to keep all particles suspended, the particles start settling at the bottom of the pipe until total choking of the cross-section occurs (Rhodes, 2000). At this point, the solids are transported in the dense phase along the bottom of the pipe. This point marks the boundary between the dilute and dense phases of pneumatic conveying in a horizontal line.

Vásquez et al. (2008) have studied pressure drop curves for 4 mm polyethylene particles (hard and soft particles) for velocities between 15 and 30 m/s and solid load/air mass flows between 0.5 and 2.5. The results obtained by Vásquez et al. (2008) are similar to the pressure drop for polystyrene particles obtained herein. Vásquez et al. (2008) claimed that the increased pressure drop is in part due to the multiple times that the particles must be reaccelerated during their transit through the conveying system. Additionally, intense bouncing increases the difference in axial velocity between the solids and the air, increasing the drag force on the particles.

Tomita and Asou (2009) studied the transport of polyethylene particles in a horizontal pipe at very low velocity (< 8 m/s). They observed a high pressure loss, like the trend reported in this study for low air velocities, which could also be fit by an equation similar to Equation (3). The same typical result was observed by Pakh and Klinzing (2008) for polystyrene particles, but at high air velocity and for a slightly bigger particle diameter (3.9 mm).

The pressure drop for pneumatic conveying in horizontal pipes can also be fit by an equation that considers the velocity of gas flow, pipe diameter, gas density, particle loading and the particle friction factor. The particle friction factor, however, is difficult to calculate and several correlations exist for its estimation. Usually the particle friction factor depends on the velocity of gas flow, the velocity of the particles, the pipe diameter, the gas density, the particle loading, the drag coefficient, the particle diameter and the gas viscosity (Klinzing et al, 1997). The equation proposed herein for estimating the pressure drop in horizontal pneumatic conveying of polystyrene particles may be used as a substitute for more complex equations.

Table 3: ANOVA of the regression model for pressure drop of polystyrene particles in horizontal pipes and for air flow in horizontal pipes.

	SS	DF	MS	F-value
ANOVA for two-phase flow				
Regression	120.90	5	24.18	19.34
Erro	21.19	17	1.25	
Total SS	142.09	22		
ANOVA for air flow				
Regression	7.236	2	3.618	28.78
Error	0.377	3	0.128	
Total SS	7.613	5		

Listed F-value (5, 22) = 2.66; Listed F-value (2, 5) = 5.78

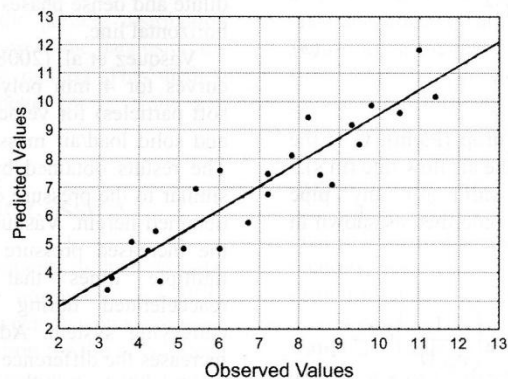
**Figure 5: Predicted values against observed values for the pressure drop correlation.**

Figure 6 shows that a non-uniform particle distribution in the cross-section of the tube may occur, even far from the minimum pressure drop points. At the highest air velocity (23 m/s) and the lowest solids flow rate (0.085 kg/s), the solids were in large part transported near the bottom of the pipe, with 83% of the polystyrene particles present in the collectors 7, 8 and 9 (Figure 3). The transport of polystyrene particles in the pipe was not uniformly distributed under any operating condition. The best distribution was found when the pneumatic transport was operated at high air velocity and low polyethylene flow rates. Even then, 68% of the particles were moving along the bottom of the pipe and only 16% of the particles were collected in the upper level of the pipe.

The particle distribution in the cross-section of the tube obtained in this work was similar to the particle density profiles for horizontal pipe flow obtained by advanced techniques such as extended Laser Doppler Anemometry (LDA). Lu et al. (2009)

studied the transport of glass beads by using the extended LDA technique and reported particle distributions similar to the ones obtained herein.

The Stokes number for all conditions applied herein was higher than 1, indicating that the particle motion is independent of the carrier gas flow, as it was not able to respond to its changes. The lowest Stokes number calculated for the two-phase flow was 1.53, obtained at an air flow velocity of 5 m/s, which is near the theoretical boundary between a rapid and a slow response time of the particles to a change in air velocity. The highest Stokes number calculated for the two-phase flow was 10.7, obtained at an air flow velocity of 35 m/s.

The results suggest that the pressure drop curves as a function of the air velocity and of the solids mass flow rates must be coupled with data concerning the particle distribution in the pipe's cross-section in order to enhance the design and analysis of dilute-phase pneumatic conveying systems.

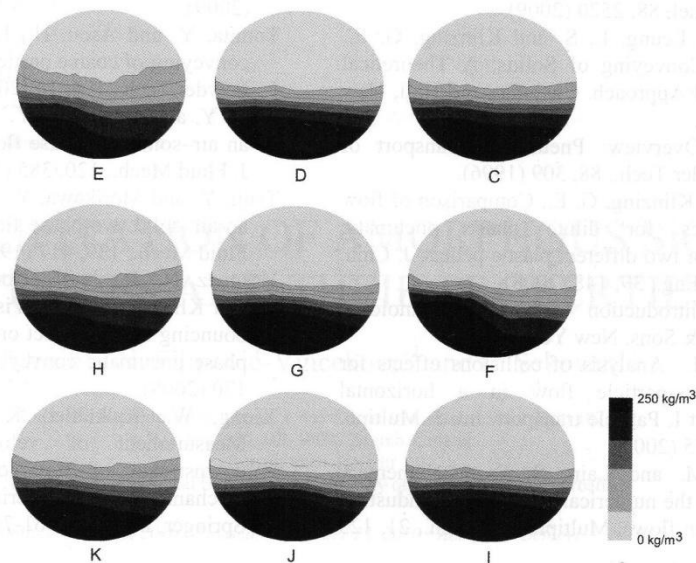


Figure 6: Particle density inside the pipe for polystyrene cylindrical particles. C. $G = 0.085$ kg/s, $v = 30$ m/s; D. $G = 0.085$ kg/s, $v = 13$ m/s; E. $G = 0.085$ kg/s, $v = 12$ m/s; F. $G = 0.11$ kg/s, $v = 30$ m/s; G. $G = 0.11$ kg/s, $v = 20$ m/s; H. $G = 0.11$ kg/s, $v = 12$ m/s; I. $G = 0.17$ kg/s, $v = 30$ m/s; J. $G = 0.17$ kg/s, $v = 20$ m/s; K. $G = 0.17$ kg/s, $v = 15$ m/s.

CONCLUSIONS

Polystyrene presented a non-uniform particle distribution in horizontal pneumatic transport in pipes. Transport of cylindrical polystyrene particles is mainly in the lower sections of the pipe, even at low solid loads and high air velocities. The best distribution was found when the system was operated at high air velocity and low polystyrene loads. The results show the importance of studying the dispersion of particles and the characteristic curve of the system.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank CNPq for the award of a scholarship, and the Universidade Santa Cecília (UNISANTA) for building the pilot pneumatic transport facility.

REFERENCES

Adam, O., Untersuchungen über die Vorgänge in feststoffbeladenen Gasströmungen. Forschungsberichte

des Landes Nordrhein-Westfalen. Westdeutscher Verlag, Köln (1960).

Hirota, M., Sogo, Y., Marutani, T. and Suzuki, M., Effect of Mechanical Properties of Powder on Pneumatic Conveying in Inclined Pipe. Powder Tech., 122, 150 (2002).

Klinzing, G. E., Marcus, R. D., Rizk, F. and Leung, L. S., Pneumatic conveying of solids: a theoretical and practical approach. Chapman & Hall, London (1997).

Kuang, S. B., Chu, K. W., Yu, A. B., Zou, Z. S. and Feng, Y. Q., Computational investigation of horizontal slug flow in pneumatic conveying. Ind. Eng. Chem. Res., 47, 470 (2008).

Lain, S., Sommerfeld, M. and Quintero, B. Numerical simulation of secondary flow in pneumatic conveying of solid particles in a horizontal circular pipe. Braz. J. Chem. Eng., 26, 583 (2009).

Li, H. and Tomita, Y. Particle velocity and concentration characteristics in a horizontal dilute swirling flow pneumatic conveying. Powder Tech., 107, 144 (2000).

Lu, Y., Glass, D. H. and Easson, W. J., An investigation of particle behavior in gas-solid horizontal pipe flow by an extended LDA

- technique. *Fuel*, 88, 2520 (2009).
- Marcus, R. D., Leung, L. S. and Klinzing, G. E., *Pneumatic Conveying of Solids: A Theoretical and Practical Approach*. Chapman and Hall, New York (1990).
- Molerus, O., Overview: Pneumatic Transport of Solids. *Powder Tech.*, 88, 309 (1996).
- Pahk, J. B. and Klinzing, G. E., Comparison of flow characteristics for dilute phase pneumatic conveying for two different plastic pellets. *J. Chin. Inst. Chem. Eng.*, 39, 148 (2008).
- Rhodes, M., *Introduction to particle technology*. John Wiley & Sons, New York (2000).
- Sommerfeld, M. Analysis of collisions effects for turbulent gas-particle flow in a horizontal channel: Part I. Particle transport. *Int. J. Multiph. Flow*, 29, 675 (2003).
- Sommerfeld, M. and Lain, S. From elementary processes to the numerical prediction of industrial particle-laden flows. *Multiph. Sci. Tech.*, 21, 123 (2009).
- Tomita, Y. and Asou, H., Low-velocity pneumatic conveying of coarse particles in a horizontal pipe. *Powder Tech.*, 196, 14 (2009).
- Tsuji, Y. and Morikawa, Y. LDV measurements of an air-solid two-phase flow in a horizontal pipe. *J. Fluid Mech.*, 120, 385 (1982).
- Tsuji, Y. and Morikawa, Y. LDV measurements of an air-solid two-phase flow in a vertical pipe. *J. Fluid Mech.*, 139, 417 (1984).
- Vásquez, N., Jacob, K., Cocco, R., Dhodapkar, S. and Klinzing, G. E., Visual analysis of particle bouncing and its effect on pressure drop in dilute phase pneumatic conveying. *Powder Tech.*, 179, 170 (2008).
- Xiong, W., Kalkühler, K. and Merzhirch, W., Measurement of velocity and turbulence downstream of flow conditioners. In: *Fluid mechanics of flow metering* (Ed. Merzkirch, W.), Springer, Berlin, pp. 61-78 (2005).

UNIDAD PILOTO DE TRANSPORTE NEUMÁTICO EN FASE DILUIDA: PIERDA DE CARGA EN TES COM FLANGES DE COMPRIMENTOS DIFERENTES

Sabrina Martins dos Santos^{*1}, Elias Basile Tambourgi², Fernando Marques Fernandes³, Deovaldo de Moraes Júnior⁴, Marlene Silva de Moraes⁵ y Luis Renato Bastos Lia⁶

^{1*,2-} Department of Chemical Engineering Systems – FEQ, UNICAMP, Cidade Universitária Zeferino Vaz, Caixa Postal 6.066, Campinas – SP, CEP 13083-970, Brazil, Fax +55 19-3521-3908, e-mail adress: sabrinaeq@hotmail.com, eliastam@feq.unicamp.br.

³⁻ Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad Santa Cecilia Calle Osvaldo Cruz nº 277, Santos, São Paulo, Brasil - e-mail: fmarques@unisantabr.br
^{4, 5,6-} Department of Chemical Engineering – UNISANTA, Oswaldo Cruz 266, Santos – SP, CEP 11045-907, Brazil, Fax +55 13-3202-7132, e-mail adress: deovaldo@unisantabr.br, marlene@unisantabr.br, bastos@unisantabr.br.

RESUMEN

En el transporte neumático, partículas de sólidos son dislocadas a través de una tabulación, usando aire u otro gas como fluido transportador. Este sistema puede ser usado para partículas que varían de polvos a *pellets* de 100 µm a 1 cm. y densidades de 16 a 3200 Kg/m³.

Denominase transporte neumático en fase diluida la técnica de transporte con concentración menor que 1% en volumen, con velocidad en general de 10 a 25 m/s y presión abajo de 1 atm y fase densa con concentración arriba de 30% en volumen, e velocidad de 0,25 a 2,5 m/s.

La principal desventaja deste sistema es el desgaste del equipamiento, causado por el impacto de las partículas sólidas principalmente en las curvas. Os tês con salida de lado permiten o acumulo de partículas que funcionan como colchón amortiguador.

El trabajo leve por objetivo estudiar a perdida de carga e a distribución de partículas en lo perfil transversal de un tubo en la escala piloto después de tês con salida de lado con variación da camada do colchón amortiguador. Para este estudio se utilizo polietileno de baja densidad como sólido a ser transportado. El equipamiento constituye básicamente de: ventilador con palas de 210 mm de diámetro, motor de 1 CV, entubación en acrílico con largura de aproximadamente 4 metros con enchufes piezométricas por toda su extensión, válvula rotativa en PVC (para inserir el sólido en la entubación), tubo recto de 1 m antes del distribuidor y un colector en aluminio con nueve partes (para analizar la distribución).

Concluyese, para el caso estudiado, que la utilización de aumentos de las camadas del colchón de partículas de los tês para reducción de la perdida de carga no tiene alteración significativa, pudiendo ser mantenida apenas con complemento de 6 cm. para la protección de la entubación. **Palabras Claves:** transporte neumático; pérdida de carga.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

O transporte pneumático tem como princípio deslocar um produto particulado através de uma corrente de gás dentro de uma tubulação estanque. Para evitar depósitos do produto na tubulação de transporte, é necessário manter uma velocidade mínima na linha. Essa velocidade é obtida através da diferença de pressão entre o ponto de introdução e o ponto de extração do produto, necessária para vencer as perdas de carga provocadas por um escoamento turbulento bifásico. Visando reduzir o desgaste, não é rara a substituição de curvas por tês saída de lado, apesar de maior perda de carga. Os tês com saída de lado permitem o acúmulo de uma pequena quantidade de partículas que funcionam como amortecedor (colchão) e reduzem o desgaste.

1.2 Objetivo

O trabalho teve como objetivo, quantificar a distribuição de partículas de polietileno na seção transversal de um tubo na escala piloto após um tê com saída de lado e determinar a perda de carga desta singularidade com várias camadas de partículas amortecedoras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os sólidos podem ser transportados por diversas formas, como por exemplo: transporte mecânico (correia, helicóide e caçamba), hidráulico, pneumático, rodoviário e ferroviário. É importante salientar que na seleção devem ser considerados o tamanho do material e suas propriedades, fatores e custos de aquisição, operação e manutenção.

Segundo Gomide (1983), um dispositivo de largo emprego na movimentação e elevação de sólidos finos na indústria química é o transportador pneumático. A distância de transporte pode variar desde alguns poucos metros até longas distâncias (400 m), situação para a qual são particularmente recomendados.

2.1 Aplicações

Conforme Ribeiro (2005), o transporte pneumático é usado em todos os setores industriais, onde se manuseiam materiais particulados (pós, granulados), ou setores de envase (latas, caixas), sendo aplicado em indústrias químicas, metalúrgicas, fábricas de cimento, produção e transformação de materiais plásticos, indústria de papel, indústrias gráficas, indústrias alimentícias. É aplicável aos materiais que se apresentam sob a forma de granulados ou pulverulentos, para os produtos fibrosos. Essa modalidade de transporte permite realizar um conjunto de operações de manuseio de produtos em quantidades que podem variar de algumas centenas de quilogramas para várias dezenas de toneladas por hora, em circuitos que podem alcançar várias centenas de metros.

2.2 Classificação do Transporte Pneumático

Dependendo da aplicação, diferentes regimes de transporte são usados, tais como transporte em fase diluída e densa. O regime operacional é determinado pela velocidade superficial do gás e vazão mássica do sólido, definida como a razão da taxa de fluxo de massa do pó, pela taxa de fluxo de massa do gás.

2.2.1 Fase Diluída

O transporte em fase diluída é caracterizado por: altas velocidades de gás (maior que 10 m/s), baixas concentrações de sólidos (menor que 1% em volume) e baixas quedas de pressão por unidade de comprimento de linha de transporte (tipicamente menor que 5 mbar/m). É limitado a pequenas extensões e transporte contínuo de sólidos a taxas menores que 10 toneladas/hora. O sistema pode operar sob pressão positiva (inferior a 1 bar), pressão negativa ou empregar uma combinação de ambas. A Figura 1 A e B mostra um sistema em fase diluída onde o material está misturado com o ar e as partículas estão totalmente suspensas.

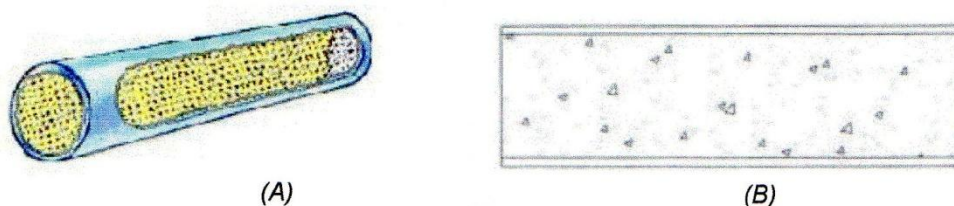


Figura 1 – Sistema em fase diluída

2.2.2 Fase Densa

O transporte em fase densa é caracterizado por: baixas velocidades de gás (1 - 5 m/s), altas concentrações de sólidos (maior que 30% em volume), altas quedas de pressão por unidade de comprimento do tubo (comumente maior que 20 mbar/m) e uma baixa relação ar/ material. Estes sistemas usam pressões positivas para impulsionar o material através da tubulação, de forma semelhante à extrusão com auxílio de um compressor de ar de alta pressão como fonte de energia. As principais vantagens dessa fase surgem das baixas exigências de volume de gás que geralmente requerem baixos consumos de energia por quilograma de produto carregado, e também linhas menores, recuperação e separação sólido/gás. A Figura 2 A, B e C apresenta os principais tipos de fase densa: (A) fase densa, (B) fase densa descontínua e (C) fase densa contínua, respectivamente.

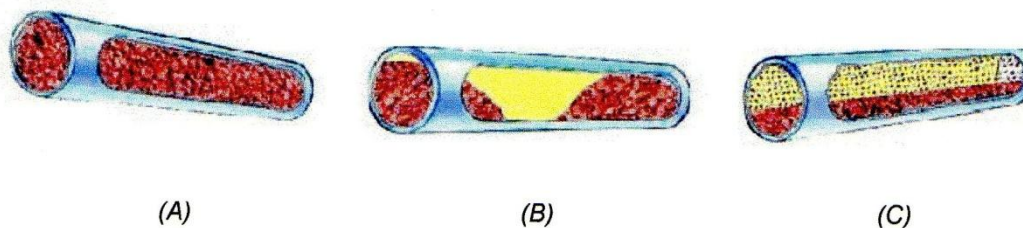


Figura 2 – Os principais tipos de transporte em fase densa

2.3 Velocidades

A velocidade de um transporte não pode ser excessiva, por razões de economia de potência, diminuição do desgaste abrasivo de tubulações (especialmente em cotovelos) e em alguns casos, para diminuir a deterioração das partículas causada por impactos. O tamanho, a densidade, a forma das partículas e outros fatores influenciam na velocidade mínima ideal de transporte. No transporte pneumático é possível distinguir a velocidade das partículas e a do gás. A Tabla 1 mostra a relação entre a densidade e a velocidade do ar.

Tabla 1 - Relação entre a densidade e a velocidade do ar

Densidade bulk		Velocidade do Ar	
lb/ft ³	kg/ft ³	ft/min	m/min
10	160	2900	884
15	240	3590	1094
20	320	4120	1256
25	400	4600	1402
30	480	5050	1539
35	560	5500	1676
40	640	5840	1780
45	720	6175	1882
50	800	6500	1981
55	880	6800	2072
60	960	7150	2179

Densidade bulk		Velocidade do Ar	
lb/ft ³	kg/ft ³	ft/min	m/min
65	1024	7450	2270
70	1120	7700	2347
75	1200	8000	2438
80	1280	8250	2515
85	1360	8500	2591
90	1440	8700	2652
95	1520	9000	2743
100	1600	9200	2804
105	1680	9450	2880
110	1760	9700	2957
115	1840	9900	3118

2.4 Curvas

As curvas são fatores que tendem a complicar o projeto de sistemas de transporte pneumático em fase diluída. Ao projetar um sistema de transporte é melhor evitar ou reduzir o seu uso, pois elas aumentam a queda de pressão em uma linha e também são pontos de erosão e atrito da partícula. Além da queda de pressão devido à própria curva, há também uma queda de pressão devido à subsequente re-aceleração da partícula pelo gás. O comprimento de tubo reto necessário, antes dos sólidos atingirem novamente a sua velocidade de estado estacionário, pode ser considerável.

2.5 Tê cego

No passado, os projetistas de sistemas de transportes pneumáticos de fase diluída, intuitivamente pensavam que cotovelos de raio longo, inclinados gradualmente, reduziram a erosão e aumentariam a vida útil da curva em relação aos cotovelos de 90 graus. Zenz (1964), porém, recomendou que "Tê" cegos sejam usados, em vez de cotovelos. A Figura 3 apresenta o Tê cego onde uma passagem encoberta forma uma almofada de partículas estagnadas,

coletadas na ramificação fechada, assim as partículas transportadas colidem nas partículas estagnadas na baliza ao invés de ser na superfície do metal, como em um cotovelo de raio longo ou de raio curto.

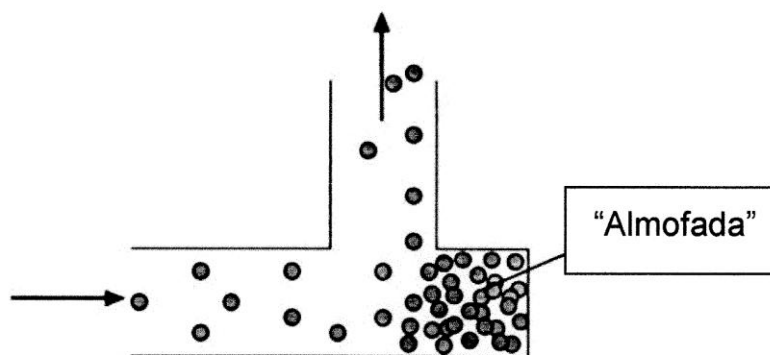


Figura 3 - Curva em Tê cego

3. ESTUDO EXPERIMENTAL

3.1 Método

Inicialmente aferiram-se os instrumentos como a balança, o cronômetro, o anemômetro e o tacômetro, para garantir a precisão dos resultados.

Selecionou-se o polietileno para ser utilizado nos testes e fixou-se uma vazão de alimentação, acoplou-se a singularidade em estudo ao sistema, ligou-se o inversor de frequência do ventilador e selecionou-se uma vazão de ar. Depois de ser estabelecida a vazão anotaram-se as pressões nos dois pontos, antes e após a passagem pelo Tê, onde se encontravam as tomadas piezométricas demarcadas pela altura do líquido.

Mediu-se a velocidade do ar na entrada do ventilador utilizando o anemômetro e a rotação com o tacômetro, após a obtenção dos dados descritos ligou-se a válvula rotativa para iniciar o transporte do material. Durante a passagem do material pela tubulação demarcaram-se as novas pressões dos dois pontos nas tomadas piezométricas.

A perda de carga foi calculada pela diferença entre estes pontos. Quando se esvaziou o silo de alimentação, interrompeu-se o cronômetro, desligou-se a válvula rotativa, o inversor de frequência. Este procedimento foi repetido para três vazões de alimentação de sólido (0,06; 0,11 e 0,16 Kg/s) e para cinco vazões de ar, variando de 10 a 30 m/s.

3.2 Materiais

A figura 4 é uma representação esquemática da unidade experimental onde foram realizados os estudos das singularidades e a figura 5 apresenta o Tê e os flanges utilizados no experimento.

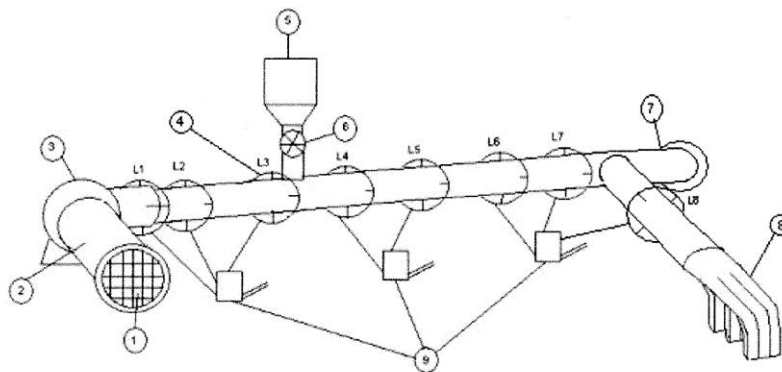
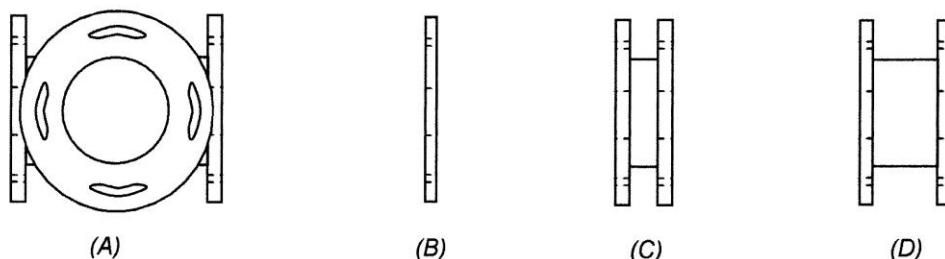


Figura 4

Esquema do equipamento utilizado nos estudos: 1) entrada de ar do soprador; 2) duto de sucção do soprador; 3) soprador; 4) anel piezométrico 5) silo de alimentação; 6) válvula rotativa; 7) singularidades (Tês com prolongamentos e Tê cego); 8) coletor com nove saídas; 9) manômetros



inclinados acoplados à anéis piezométricos. Os pontos L7 e L8 são referentes às pressões estudadas.

Figura 5 – (A) Tê saída de lado para adaptação de flange cego; (B) Flange sem prolongamento; (C) Flange com prolongamento de 60 mm e (D) Flange com prolongamento de 120 mm

4. RESULTADOS

4.1 Perda de Carga em Função da Velocidade do Ar para Tê Cego

Sem sólidos				
$V_{\text{DESLOCAMENTO}}(m/s)$	$P7 (cm)$	$P8 (cm)$	$\Delta P = P7 - P8 (cm)$	$P (mm)$
0	0	0	0	0
5	0,8	0,3	0,5	2,5
10	3,1	0,5	2,6	13,0
15	6,1	2,2	3,9	19,5
20	9,5	3,2	6,3	31,5
25	13,7	5,0	8,7	43,5
30	22,1	6,3	15,8	79,0

Com sólidos e 30% da velocidade (vazão de sólido = 0,06 Kg/s)				
$V_{\text{DESLOCAMENTO}}(m/s)$	$P7 (cm)$	$P8 (cm)$	$\Delta P = P7 - P8 (cm)$	$P (mm)$
10	1,7	0,4	1,3	6,50
15	6,0	3	3,5	17,50
20	8,7	4,1	4,6	23,00
25	12,5	5,4	7,1	35,50
30	17,8	8,5	9,3	46,50

Com sólidos e 40% da velocidade (vazão de sólido = 0,09 Kg/s)				
$V_{DESLOCAMENTO}(m/s)$	$P7 (cm)$	$P8 (cm)$	$\Delta P = P7-P8 (cm)$	$P (mm)$
10	1,6	1	1,0	5,00
15	6,0	3	3,4	17,00
20	8,8	3,9	4,9	24,50
25	12,6	5,1	7,5	37,50
30	17,9	7,8	10,1	50,50
Com sólidos e 50% da velocidade (vazão de sólido = 0,12 Kg/s)				
$V_{DESLOCAMENTO}(m/s)$	$P7 (cm)$	$P8 (cm)$	$\Delta P = P7-P8 (cm)$	$P (mm)$
10	1,7	0,3	1,4	7
15	5,2	1,7	3,5	18
20	8,9	3,8	5,1	26
25	12,6	5,3	7,3	37
30	17,5	7,3	10,2	51

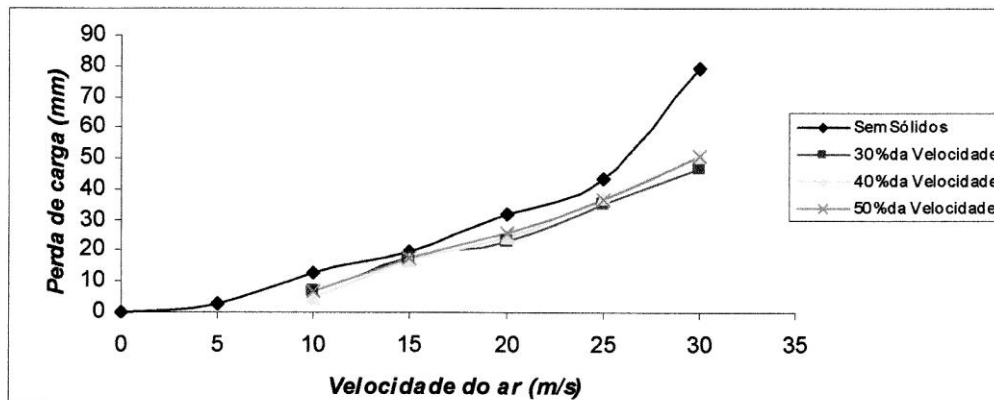


Figura 5 – Perda de Carga em Função da Velocidade do Ar para Tê Cego

4.2 Perda de Carga em Função da Vel. do Ar para Tê com prolongamento de 60 mm

Sem sólidos				
$V_{DESLOCAMENTO}(m/s)$	$P7 (cm)$	$P8 (cm)$	$\Delta P = P7-P8 (cm)$	$P (mm)$
0	0	0	0	0
5	0,5	0,4	0,1	0,5
10	2,0	0,9	1,1	5,5
15	4,7	2,1	2,6	13,0
20	7,3	3,4	3,9	19,5
25	8,8	4,0	4,8	24,0
30	14,5	6,1	8,4	42,0

Com sólidos e 30% da velocidade (vazão de sólido = 0,06 Kg/s)				
$V_{DESLOCAMENTO}(m/s)$	$P7 (cm)$	$P8 (cm)$	$\Delta P = P7-P8 (cm)$	$P (mm)$
10	1,9	0,8	1,1	5,50
15	4,5	2	2,4	12,00
20	8,1	3,5	4,6	23,00
25	9,8	4,4	5,4	27,00
30	15,3	7,0	8,3	41,50

Com sólidos e 40% da velocidade (vazão de sólido = 0,09 Kg/s)				
$V_{DESLOCAMENTO}(m/s)$	$P7 (cm)$	$P8 (cm)$	$\Delta P = P7-P8 (cm)$	$P (mm)$
10	1,9	1	1,1	5,50
15	4,4	2	2,7	13,50
20	8,1	3,6	4,5	22,50
25	12,2	5,0	7,2	36,00
30	15,9	6,9	9,0	45,00

Com sólidos e 50% da velocidade (vazão de sólido = 0,12 Kg/s)				
$V_{DESLOCAMENTO}(m/s)$	$P7 (cm)$	$P8 (cm)$	$\Delta P = P7-P8 (cm)$	$P (mm)$
10	1,9	0,7	1,2	6
15	4,3	2,0	2,3	12
20	8,3	4,4	3,9	20
25	11,7	5,4	6,3	32
30	14,3	6,4	7,9	40

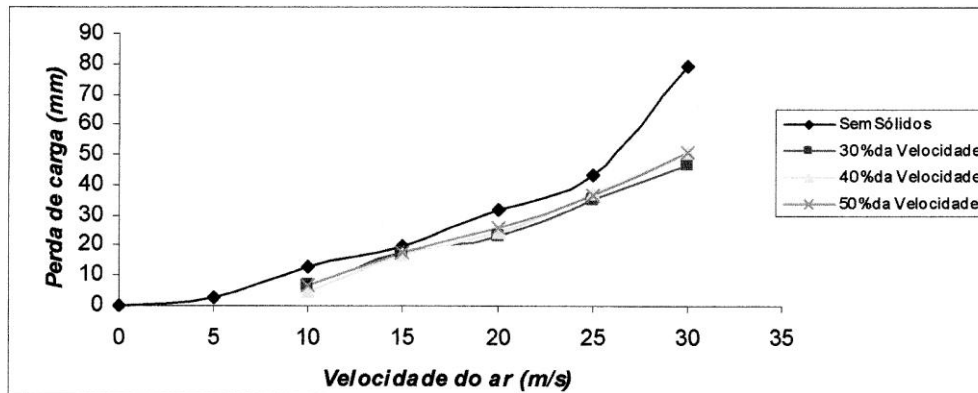


Figura 6 – Perda de Carga em Função da Velocidade do Ar para Tê com prolongamento de 60 mm

4.3 Perda de Carga em Função da Vel. do Ar para Tê com prolongamento de 120 mm

Sem sólidos				
$V_{DESLOCAMENTO}(m/s)$	$P7 (cm)$	$P8 (cm)$	$\Delta P = P7-P8 (cm)$	$P (mm)$
0	0	0	0	0
5	0,8	0,2	0,6	3,0
10	2,0	0,9	1,1	5,5
15	4,3	1,5	2,8	14,0
20	6,3	2,9	3,4	17,0
25	10,0	4,3	5,7	28,5
30	14,0	6,5	7,5	37,5
Com sólidos e 30% da velocidade (vazão de sólido = 0,06 Kg/s)				
$V_{DESLOCAMENTO}(m/s)$	$P7 (cm)$	$P8 (cm)$	$\Delta P = P7-P8 (cm)$	$P (mm)$
10	2,1	0,9	1,2	6,00
15	3,9	2	2,2	11,00
20	6,3	2,9	3,4	17,00
25	10,5	4,7	5,8	29,00
30	14,6	6,4	8,2	41,00
Com sólidos e 40% da velocidade (vazão de sólido = 0,09 Kg/s)				

$V_{\text{DESLOCAMENTO}}(\text{m/s})$	$P7 (\text{cm})$	$P8 (\text{cm})$	$\Delta P = P7 - P8 (\text{cm})$	$P (\text{mm})$
10	2,0	1	1,2	6,00
15	4,1	2	2,2	11,00
20	7,0	3,2	3,8	19,00
25	10,5	4,7	5,8	29,00
30	14,8	6,6	8,2	41,00

Com sólidos e 50% da velocidade (vazão de sólido = 0,12 Kg/s)				
$V_{\text{DESLOCAMENTO}}(\text{m/s})$	$P7 (\text{cm})$	$P8 (\text{cm})$	$\Delta P = P7 - P8 (\text{cm})$	$P (\text{mm})$
10	1,8	0,8	1,0	5
15	4,0	1,6	2,4	12
20	7,5	3,4	4,1	21
25	10,5	4,8	5,7	29
30	14,6	6,5	8,1	41

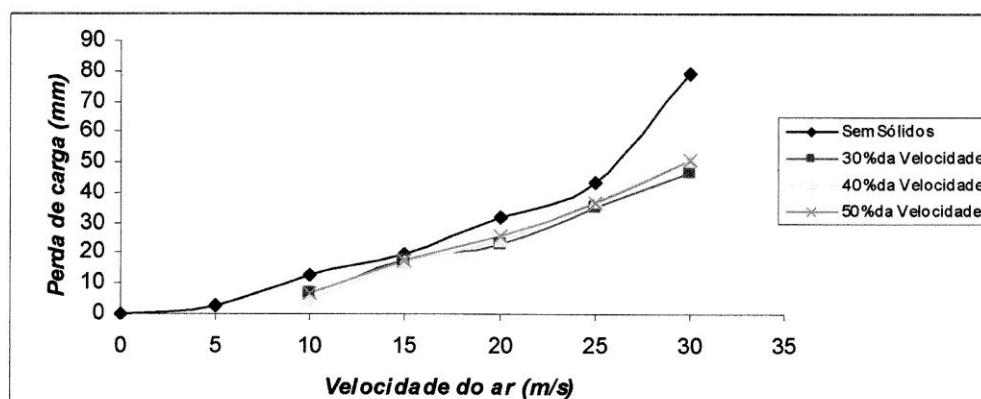


Figura 7 – Perda de Carga em Função da Velocidade do Ar para Tê com prolongamento de 120 mm

4. CONCLUSIONES

Conforme as figuras 5, 6 e 7 conclui-se que o uso do Tê cego e o aumento do Tê para 60 e 120 mm não teve influência significativa na perda de carga, em todas as velocidades de ar (10 a 30 m/s).

No entanto recomenda-se para o transporte pneumático de polietileno em fase diluída o uso de no mínimo um complemento de 60 mm para a formação da almofada, com o objetivo de proteger a singularidade de possíveis desgastes. As potências não apresentaram alterações significativas de uma singularidade para outra, mostrando que para o caso estudado, o consumo de energia do motor do ventilador foi praticamente o mesmo.

5. REFERENCIAS

- [1] Gomide, R., *Operações Unitárias – 1º Volume: Operações com Sistemas Sólidos Granulares*, Livraria Kosmos Editora Ltda, Rio de Janeiro - RJ, 1983.
- [2] Silva, D. R. da, *Transporte Pneumático – Tecnologia, Projetos e Aplicações na Indústria e nos Serviços*, Artliber Editora Ltda, São Paulo – SP, 2005.

[3] Coutinho, F. M. B. et al, *Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações*, Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 13, nº 1, p. 1-13, 2003.

[4] Marcus, R. D. et al, *Pneumatic conveying of solids*, Trabalho apresentado no XXIX ENEMP, São João Del-Rei - MG, 1990.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Dirección de la Universidad Santa Cecilia por el apoyo que recibieran en la realización do mismo.

PERDA DE CARGA EM SINGULARIDADES EM UNIDADE PILOTO PARA TRANSPORTE PNEUMÁTICO DE POLIPROPILENO

Marlene Silva de Moraes¹, Aldo Ramos Santos¹, Luiz Renato Bastos Lia¹, Pedro Henrique Silva de Moraes¹,
Fernando Marques Fernandes², Carlos Alberto Amaral Moino², Elias Basile Tambourgi³
Sabrina Martins dos Santos³, Deovaldo de Moraes Júnior¹

1-Departamento de Engenharia Química – Universidade Santa Cecília, Rua Osvaldo Cruz n° 277, Santos, São Paulo, Brasil - e-mail: marlene@unisanta.br
2-Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Santa Cecília, Rua Osvaldo Cruz n° 277, Santos, São Paulo, Brasil - e-mail: fmarques@unisanta.br
3-Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos – Universidade Estadual de Campinas, Caixa Postal 6066, Campinas, São Paulo, Brasil - e-mail: eliasam@feq.unicamp.br

Palavras chave: Transporte pneumático, polipropileno, perda de carga em singularidades, perda de carga em tê com saída lateral.

Resumo

O transporte pneumático em fase diluída, apesar do inconveniente de gerar um desgaste não desprezível nos trechos curvos dos dutos, continua sendo de emprego difundido em função do menor custo de aquisição e montagem do que o sistema em fase densa. Uma das técnicas para se reduzir o desgaste principalmente nos pontos com mudança de direção das unidades com sólidos em fase diluída é substituir as curvas por tê com saída lateral que formam um colchão amortecedor no trecho reto (balisa). O presente estudo visou quantificar a influência do comprimento da balisa (prolongamento) que gera o colchão amortecedor na perda de carga e distribuição de partículas na seção transversal do duto. Na unidade piloto com dutos de acrílico transparente de 117 mm de diâmetro interno estudou-se o deslocamento de polipropileno com 4 mm de diâmetro e vazão de 0,11 kg/s. Para a velocidade do ar de 15, 20 e 25 m/s as perdas de carga dos tê com balisas de 90 e 120 mm provocou uma perda de carga menor que o tê cego. O aumento do prolongamento do tê de 90 para 120 mm não gerou variação significativa na perda de carga. A distribuição das partículas na seção transversal do duto (que pode gerar desgaste localizado após as singularidades foi semelhante nos tê estudados).

1. Introdução

1.1. Generalidades

O sistema de transporte pneumático é constituído por uma tubulação por onde circulam os sólidos com o fluido transportador (normalmente o ar), por um soprador e/ou bomba de vácuo para deslocar a mistura por um alimentador de sólidos e por um separador de fluido e sólido na parte terminal (em geral um ou mais ciclones).

O transporte pneumático (Fernandes et al, 2011) pode ser usado para partículas que variam de pós a *pellets*, aproximadamente de 100 µm a 10 mm e densidade de 16 a 3200 kg/m³.

Caracteriza-se por ser um sistema eficiente e limpo. Evita perda e contaminação do produto e do meio ambiente, mantendo a sua integridade e qualidade quando

comparado à movimentação mecânica de elevadores, transportes helicoidais e outros.

As principais vantagens são: a) a elevada capacidade de movimentação de material em distâncias que podem variar de 20 a 400 metros, inclusive com variação de nível; b) o baixo custo de operação e manutenção e c) a facilidade de controle e automação. Apresenta algumas desvantagens como: a) o alto investimento inicial, com o transporte em fase densa (com pressões elevadas); b) a abrasão de equipamentos, principalmente nas singularidades (curvas) do sistema; c) a falta de literatura específica de projeto, relacionando a perda de carga em função da velocidade do ar e a distribuição de partículas na seção transversal da tubulação horizontal e vertical. É comum o emprego desta técnica para a movimentação de polipropileno granulado, açúcar, amendoim, argila em esferas, cal virgem e hidratada, caulim, cimento, farinha, finos de carvão,

granulados de aço, leite em pó, óxido de ferro, sal, soda e vidro.

Denomina-se, em geral: a) fase diluída a técnica de transporte com concentrações menores que 1% em volume, com velocidades em geral de 10 a 25 m/s, pressões abaixo de 1 atm manométrica e perdas de carga inferiores a 50 mm de coluna de água por metro (50 mmca/m), b) fase densa com concentrações de sólidos acima de 30% em volume, velocidades de 0,25 a 2,5 m/s e de perdas de carga menor que 200 mmca/m.

O transporte em fase diluída é o mais empregado em função do menor custo inicial. Sua principal desvantagem é o desgaste do equipamento, causado pelo impacto das partículas sólidas na tubulação. Para minimizar esse desgaste, evita-se o uso de singularidades, como curvas e tês, que são responsáveis pelo aumento da perda de carga e desaceleração das partículas, tornando-se pontos de abrasão.

Já em 1964 Zenz recomendava o uso do tê cego ou tê saída de lado ao invés de curva pela maior durabilidade pois durante o transporte uma pequena quantidade de partículas se acomoda próxima ao flange cego, formando uma espécie de almofada, (colchão, balisa) reduzindo o impacto das outras partículas com o equipamento.

Não são fornecidas informações da perda de carga gerada pela espessura da almofada nos textos clássicos de projeto como Perry & Green (2007); Fan engineering (1970), Bodner (1982), Morrison, D. P. & Jones, M. G. (2006) e Rhodes, M. (2011).

1.2. Objetivos

O presente trabalho teve por objetivos determinar, em uma unidade piloto, a perda de carga provocada por um tê com saída lateral para dois comprimentos de balisa e a distribuição das partículas na seção transversal do duto após as singularidades.

2. Materiais e Método

As Figuras de 1 até 9 apresentam a unidade experimental. Após o tê, foi instalado um coletor (Figuras 7 e 8) com

nove sacos de tela para reter o sólido e separá-lo do ar. As massas das partículas nos sacos foram pesadas visando determinar a distribuição do polipropileno na seção transversal do tubo. A perda de carga antes e depois do tê foi quantificada por anéis piezométricos acoplados a manômetros inclinados. A vazão dos sólidos foi fixada em 0,11 kg/s. As velocidades do ar medidas por anemômetro e tubos de Pitot foram de 15, 20 e 25 m/s.

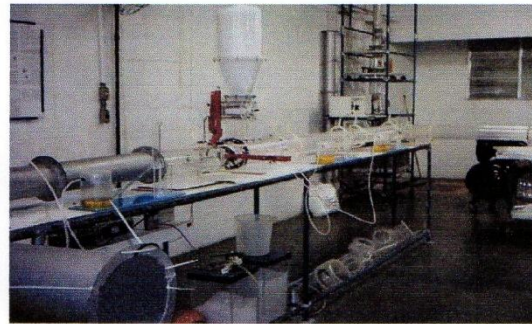


Figura 1: Foto da unidade experimental.

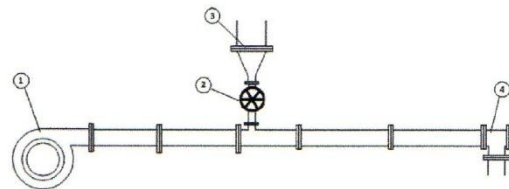


Figura 2: Esboço da unidade piloto. 1) ventilador, 2) válvula rotativa, 3) silo, e 4) tê com saída de lado.



Figura 3: Ventilador centrífugo acoplado a motor com rotação variável.

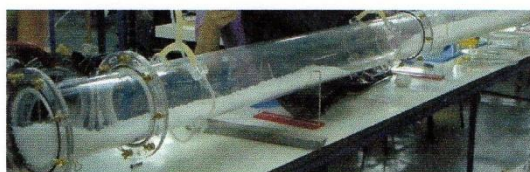


Figura 4: Tubulação de acrílico com diâmetro interno de 117 mm e com anéis piezométricos para medida da perda de carga.

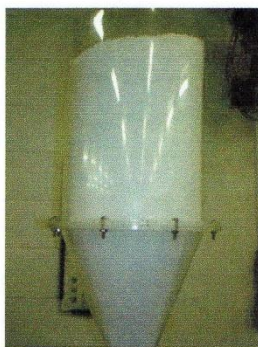


Figura 5: Silo de alimentação com polipropileno granulado.

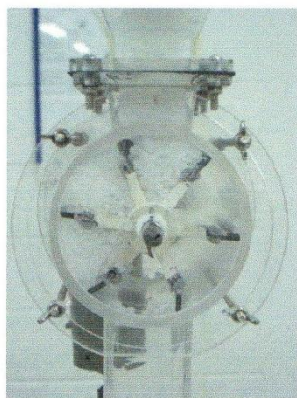


Figura 6: Válvula rotativa



Figura 7: Vista lateral do coletor de alumínio para estudo da distribuição das partículas após o tê.

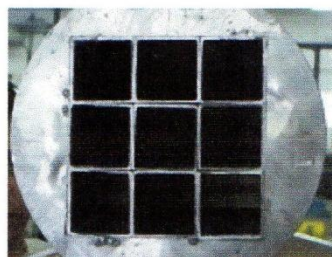


Figura 8: Vista frontal do coletor de partículas.

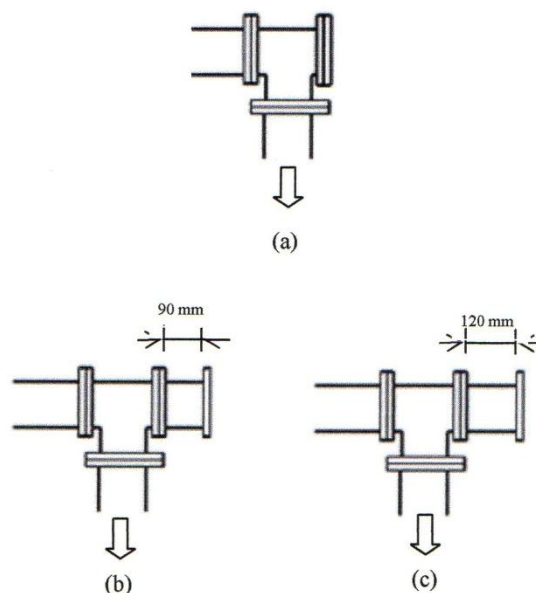
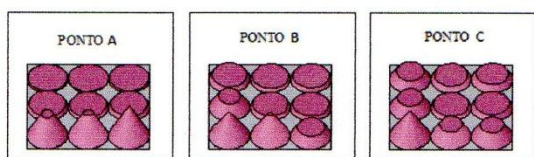
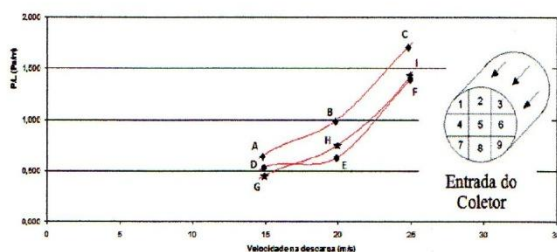


Figura 9: Esboço das singularidades. a) tê com saída de lado; b) tê com balisa de 90 mm e c) tê com balisa de 120 mm.

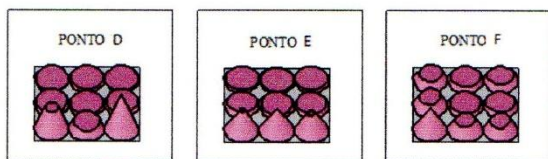
3. Resultados e discussões

Observa-se na Figura 10 que houve uma redução (em relação ao tê cego) na perda de carga quando foi instalado um trecho de tubo (balisa) de 90 mm. Fernandes et al (2008) encontraram resultados semelhantes na operação com o polietileno. Os sólidos acumulados nesta balisa formavam uma “pseudo” curva que além de reduzir a perda de carga protegeram a tubulação de desgastes. O aumento do trecho de tubo para produzir balisas de 90 mm e de 120 mm forneceu uma perda de carga e uma distribuição de sólidos (representadas por cones na figura) semelhantes. O aumento da velocidade provocou uma

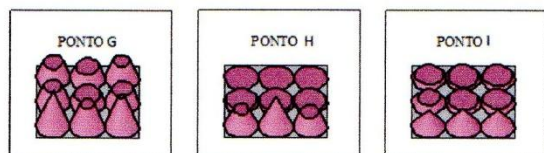
melhor distribuição das partículas, de polipropileno indicada pela maior homogeneidade do tamanho dos cones.



tê cego – distribuição das partículas.



tê com balisa de 90 mm - distribuição das partículas.



tê com balisa de 120 mm - distribuição das partículas.

Figura 10: Perda de carga nos tê e distribuição das partículas de polipropileno na seção transversal após os tê. O tamanho do cone é proporcional a quantidade de partículas em cada ponto do coletor. A localização dos cones é referente aos números de 1 até 9 na entrada do coletor ao lado das curvas.

4. Conclusões

Para as condições estudadas recomenda-se o emprego de balisas com 90 ou 120 mm com o intuito de se reduzir a perda de carga. O comprimento das balisas teve pouca influência na perda de carga e distribuição das partículas

de polipropileno de 4 mm de diâmetro na seção transversal do duto de 117 mm de diâmetro interno após os tê.

5. Referências

BODNER S., Proceedings of International Conference on Pneumatic Transport Technology Powder Advisory Centre, Londres, 1982 in RHODES M. Introduction do Particle Technology – 2ª Ed., San Francisco, Wiley, 2008.

Buffalo Forge Company, Fan engineering. Buffalo, N. Y., 1970.

FERNANDES, F. M., SANTOS, S. M., MORAES, D. Jr., MORAES, M. S., LIA, L. R. B., TAMBOURGI, E. B., Unidad piloto de transporte neumático en fase diluida: pérdida de carga en curvas “T” (tes) con bridas de larguras distintas. I CAIM – Primer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica. Octubre 2008.

MORRISON. P. D., MARK G. Jones, Selecting a pneumatic conveying system. Chemical Processing 2000 powder & solids annual.

PERRY R. H., GREEN D. W., O. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 8 ed., New York : McGraw-Hill, 2007.

RHODES M. Transporte Pneumático de Partículas. WWW.ufnet.ufm.br

ZENZ F. A., Conveyability of materials of mixed particle size. 1964. Ind. Eng. Fund. 3(1): 65-75.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem a direção da Universidade Santa Cecília e ao Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos da Universidade Estadual de Campinas pelo apoio recebido durante toda a execução deste trabalho.

