

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
SISTEMAS DE PROCESSOS QUÍMICOS E INFORMÁTICA**

***“PROJETO E MONTAGEM DE UNIDADE PILOTO DE
TRANSPORTE PNEUMÁTICO EM FASE DILUÍDA
PARA ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE A PERDA DE
CARGA E A DISTRIBUIÇÃO DE PARTÍCULAS
GRANULARES NA SEÇÃO TRANSVERSAL DE DUTOS
INDUSTRIAIS”***

Autora: Sabrina Martins dos Santos

Orientador: Prof. Dr. Elias Basile Tambourgi

Co-Orientador: Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior

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

Campinas - São Paulo

Fevereiro de 2009

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

Sa59p

Santos, Sabrina Martins

Projeto e montagem de unidade piloto de transporte pneumático em fase diluída para estudo da relação entre a perda de carga e a distribuição de partículas granulares na seção transversal de dutos industriais / Sabrina Martins dos Santos. - Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientadores: Elias Basile Tambourgi, Deovaldo de Moraes Junior.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Operações unitárias. 2. Transporte por tubo pneumático. I. Tambourgi, Elias Basile. II. Moraes Junior, Deovaldo de. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. IV. Título.

Título em Inglês: Project and assembling of pneumatic transport pilot unit in diluted phase for studying the relationship between the pressure drop and the distribution of granular particles into the cross section of industrial pipes

Palavras-chave em Inglês: Unit operations, Pneumatic transport

Área de concentração: Sistemas de Processos Químicos e Informática

Titulação: Doutor em Engenharia Química

Banca examinadora: Aldo Ramos dos Santos, José Roberto Domingues Rodrigues, Ana Paula Brescancini Rabelo, Sergio Ricardo Lourenço

Data da defesa: 13/02/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Química

Tese de Doutorado , defendida por Sabrina Martins dos Santos em fevereiro de 2009 e aprovada pela banca examinadora composta pelos seguintes doutores:

Aldo Ramos Santos
Aldo Ramos dos Santos

José Roberto Domingues Rodrigues

José Roberto Domingues Rodrigues

Sergio Ricardo Lourenço
Sergio Ricardo Lourenço

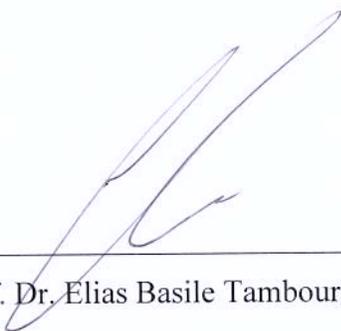
Ana Paula Brescancini Rabelo
Ana Paula Brescancini Rabelo

Elias Basile Tambourgi

Elias Basile Tambourgi

200914213

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia Química e aprovada pela banca examinadora em 13 de fevereiro de 2009. ✓



Prof. Dr. Elias Basile Tambourgi ✓

Dedico,

Ao meu filho amado “Estevão”, ao meu amado companheiro e marido Alexander e em especial a Deus que faz brotar a esperança, a fé, a perseverança e a alegria em todos os dias da minha vida,

com todo o meu amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço

A **Deus**, por ter nos inspirado e confortado nas situações adversas e nos dado força para alcançar todos objetivos, porque sem ele, nada disto teria se concretizado, sequer existiria.

Ao **Prof. Dr. Elias Basile Tambourgi**, pela orientação, suporte técnico, incentivo, motivação, confiança e amizade durante o desenvolvimento deste trabalho. Exemplo de profissional, ser humano, e com seu jeito despojado, alegre e sempre brincalhão conquista até a pessoa mais tímida. Foi um prazer conhecê-lo e desenvolver esta pesquisa, que Deus te abençoe muito ao longo da jornada da vida.

Ao **Prof. Dr. Deivaldo de Moraes Júnior**, pela co-orientação, dedicação, pelo “vasto alicerce” fornecido, pela paciência e por acreditar no meu potencial como pessoa e profissional para que com meus esforços este estudo fosse realizado. Com certeza, uma peça fundamental que sempre será lembrada, não só como um simples professor, mas como um grande amigo para todas as horas, que com a sua humildade, conhecimento e bom humor, mostrou que a arte de instruir é um dom maior.

Aos membros da banca examinadora: **Prof. Dr. Aldo Ramos Santos, Prof. Dr. José Alberto Domingues, Prof. Dr. Sérgio Ricardo Lourenço, Prof^a. Dra. Ana Paula Brescancini Rabelo.**

À **CNPQ**, pelo fornecimento da bolsa de auxílio financeiro para execução desse estudo.

À **UNISANTA**, pela construção da unidade piloto de transporte pneumático e pelo espaço cedido para realização dos testes experimentais.

Aos técnicos **Gilmar** e **Volnei**, pela atenção e empenho em viabilizar e disponibilizar os equipamentos do laboratório para realização dos experimentos.

Aos **estagiários** do Laboratório de Operações Unitárias, principalmente ao **Matheus** pelo apoio durante a coleta dos dados na unidade experimental.

A minha grande amiga e companheira de todos os momentos, **Marlene**, uma pessoa muito especial, companheira, descontraída, alegre, realmente você é um exemplo de vida, uma guerreira que sempre me estimula a seguir em frente e não deixar a peteca cair “literalmente”.

A minha **família**, pelo amor, carinho e auxílio nos momentos mais difíceis, em especial minha mãe, Benedita, pois sem ela não sei o que seria de mim.

Ao meu filhinho, **Estevão**, semente que plantei no passado, e fruto do meu presente, você me ensina que o segredo da eterna juventude, do amor e da felicidade não depende de que eu seja capaz de mudar o mundo ou vencer o tempo e a natureza, mas de que eu seja capaz de conhecer, vencer e me transformar todos os dias para que me torne uma pessoa melhor a cada dia.

Ao meu amado esposo **Alexander**, que sempre me apoiou nas tomadas de decisões e compreendeu os momentos de nervosismo, desânimo e cansaço, originados de uma rotina muitas vezes exaustiva. Você é uma pessoa muito especial e importante, faz parte da minha vida e me completa como ser humano.

“O [sucesso](#) vem da tomada de iniciativa e determinação, persistindo, eloquentemente expressando a profundidade do seu [amor](#). Qual ação simples [você](#) poderia fazer hoje para produzir um novo impulso em direção ao sucesso em sua vida?”

(Anthony Robbins)

RESUMO

O transporte pneumático que envolve o uso do ar para deslocar materiais particulados através de tubulações é uma importante operação em diversos processos industriais e químicos. Exemplos típicos são sistemas de conversão de energia de carvão, craqueamento catalítico, secagem e transporte de sólidos finos e granulares. O transporte

pneumático convencional é frequentemente operado em fase diluída na qual as partículas permanecem suspensas numa região de alta velocidade de ar. É de uso difundido em função de baixo custo de aquisição, operação e manutenção em relação aos transportadores de correia, canecas e helicoidal. Um dos maiores inconvenientes é o desgaste da parte inferior da tubulação. A velocidade superficial do gás, o diâmetro da partícula e da tubulação, o tipo e a forma da partícula influenciam o transporte pneumático. Como consequência desta complexidade, estes sistemas são baseados em correlações empíricas obtidas por meio de estudos experimentais para cada sólido, em geral em dutos de diâmetro reduzido sem dados da distribuição de partículas na seção transversal das unidades. Este trabalho teve como objetivo projetar e construir uma unidade piloto de transporte pneumático em fase diluída e obter uma curva característica de perda de carga em função da velocidade do ar, da vazão de sólidos e da distribuição dos polímeros polietileno, polipropileno e poliestireno. O sistema foi constituído basicamente de um ventilador centrífugo de pás semi-abertas com diâmetro de 210 mm, acoplado a um motor em balanço de 1 hp com rotação variável. Os sólidos foram alimentados de um silo ao transportador por meio de uma válvula rotativa. A mistura ar-partícula foi transportada através de tubos horizontais de acrílico e aço com diâmetro interno de 117 mm e comprimento total de 4020 mm e descarregada em um módulo de coleta de 9 tubos de alumínio de seção quadrada onde foram acoplados a telas filtrantes de náilon para retenção dos sólidos no final do transportador. O sistema 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.

Palavras Chaves: transporte pneumático, sólidos particulados, perda de carga, fase diluída, distribuição de partículas no duto, polietileno, poliestireno e polipropileno.

ABSTRACT

The pneumatic transport that involves the use of air particles to move materials through pipes is a major operation in various industries and chemical processes. Typical examples are systems for the conversion of energy from coal, catalytic cracking, drying and

transport of solid and fine granular. The conventional pneumatic transport is often operated in dilute phase where the particles remain suspended in a region of high speed air. It is the widespread use due to low cost of acquisition, operation and maintenance on belt conveyors, mugs and helicoidal. One of the biggest problems is the erosion of the bottom of the pipe. The superficial velocity of the gas, the diameter of the particle and the pipe, the type and shape of particles affect the pneumatic transport. As a result of this complexity, these systems are based on empirical correlations obtained from experimental studies for each solid, generally in small diameter pipelines without data distribution of particles in the cross section of the units. This study aimed to design, build a pilot plant for pneumatic conveying in dilute phase and get a curve of pressure drop on the basis of speed and air flow rate and distribution of solid polymer polyethylene, polypropylene and polystyrene. The system consisted basically of centrifugal fan semi-open blades with diameter of 210 mm, coupled to a balanced-blower motor, 1 hp with variable rotation. The solids were fed from a silo to the carrier through a rotary valve. The air-particle mixture was transported through horizontal tubes of acrylic and steel with internal diameter of 117 mm and a total length of approximately 4,020 mm and unloaded in a collector module nine square-section aluminum pipes where they were coupled nylon mesh filter for retention of solids at the end of the carrier. The system helped build figures relate to the flow of solid, pressure drop per meter of pipe, and unconventional way, the relationship of these parameters with the distribution of particles in the cross section of industrial-sized product. The work showed that under the conditions that commonly are projected industrial units to pneumatic transport dilute phase in general, more than 70% of the solids are in the lower third of the pipe causing damage in these regions with stops and profit for maintenance.

Keywords: pneumatic conveying, solid particles, drop pressure, dilute phase, distribution of particles in the pipeline, polyethylene, polystyrene and polypropylene.

SUMÁRIO

Resumo	IX
Abstract	X
Lista de Figuras	XIV
Lista de Tabelas	XVII
Capítulo 1 - Introdução	01
1.1 – Generalidades	01
1.2 – Objetivos	03
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica	04
2.1 – Transporte pneumático	04
2.2 – Fase densa/diluída e regimes de escoamento do transporte pneumático	09
2.3 – Principais unidades industriais	15
2.3.1 – Sistema de transporte em fase densa	15
2.3.2 – Sistema de transporte em fase diluída	17
2.3.2.1 Sistema com pressão positiva	19
2.3.2.2 Sistema com pressão negativa ou vácuo	20
2.3.2.3 Sistema com pressão positiva e negativa combinadas	21
2.3.2.4 Sistema com circuito fechado	22
2.4 – Partículas transportadas: classificação, atrito, velocidade, perda de carga e distribuição	22
2.4.1 – Classificação de partículas finas de GELDART	22
2.4.2 – Influência do atrito de partículas	24
2.4.3 – Velocidade para o transporte em fase diluída	25
2.4.3.1 Velocidade de afogamento no transporte vertical	28
2.4.3.2 – Velocidade de saltitação no transporte horizontal	30
2.4.4 – Previsão da perda de carga	38

2.4.5 – Distribuição das partículas na seção transversal da tubulação	42
2.5 – Resumo da revisão bibliográfica	43
Capítulo 3 – Materiais e Métodos	44
3.1 – Equipamentos e acessórios	44
3.2 – Método experimental	56
3.2.1 – Procedimento para a obtenção da curva experimental	56
3.3 – Fundamentos teóricos para o tratamento dos dados	59
3.3.1 – Perda de carga entre dois pontos da tubulação horizontal (ΔP)	59
3.3.2 – Pressão estática medida pelos anéis piezométricos (P_{EA})	61
3.3.3 – Velocidade do ar no duto de descarga e vazão determinada pelo tubo de pitot	62
3.3.4 – Vazão e velocidade na sucção pelo anemômetro	65
3.3.5 – Velocidade de descarga	65
3.3.6 – Potência consumida	66
3.3.7 – Área dos 9 coletores	67
3.3.8 – Massa das partículas por unidade de área em cada coletor	69
3.3.9 – Fração mássica das partículas por unidade de área nos coletores	70
3.3.10 – Desvio Padrão	70
Capítulo 4 – Resultados e Discussão	71
4.1 – Caracterização do ventilador centrífugo	71
4.1.1 – Curva característica do ventilador, pressão estática corrigida em função da vazão	71
4.1.2 – Curva característica do ventilador, potência consumida em função da vazão	74
4.2 – Determinação da velocidade do ar	76
4.3 – Determinação da potência consumida	78
4.4 – Determinação da vazão de sólidos	79
4.5 – Determinação da densidade aparente dos sólidos	82
4.6 – Perda de carga e distribuição de sólidos	82

Conclusões	108
Sugestões	110
Referências Bibliográficas	111
Apêndice A	116
Apêndice B	125

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
2.1	Capacidade do produto (t/h) em função da distância transportada (km)	05
2.2	Padrões de fluxo em uma tubulação horizontal: regime estável e instável	10
2.3	Regimes de escoamentos em tubulação horizontal	11
2.4	Mudança da fase diluída para a fase densa. v é a velocidade do ar e G a vazão de sólidos	12
2.5	As características gerais do transporte pneumático para fase diluída, zona instável e fluxo em golpes “slug”	13
2.6	As características da fase diluída	14
2.7	Seções de sistemas de transporte à pressão e a vácuo	14

2.8	Sistema de fase densa (Dynamic Air - Conveying Systems)	16
2.9	Sistema de fase diluída (Dynamic Air - Conveying Systems)	17
2.10	Sistemas com pressão positiva	20
2.11	Sistema com pressão negativa	20
2.12	Sistemas com pressão positiva e negativa	21
2.13	Sistema com circuito fechado	22
2.14	Diagrama de GELDART (1973). Sendo ρ_p a densidade do pó, ρ a densidade do ar e \bar{d}_v o diâmetro médio das partículas	23
2.15	Diagrama de fase para transporte vertical de fase diluída, mostrando a relação geral entre gradiente de pressão $\Delta P / \Delta L$ e a velocidade do gás. VCH é a velocidade de afogamento (“chocking”)	29
2.16	Modelo conceitual de diferentes regimes de escoamento em sistemas de dutos horizontais	33
2.17	Diagrama de fase para transporte pneumático horizontal de fase diluída	35
2.18	Elementos de queda de pressão para sistema de pressão positiva	40
3.1	Esquema da unidade piloto de transporte pneumático	44
3.2	Unidade piloto de transporte pneumático horizontal em fluxo diluído	45
3.3	Tubulação de acrílico para o transporte de sólidos	46
3.4	Ventilador centrífugo	46
3.5	Motor em balanço	46
3.6	Inversor de frequência do motor em balanço	47
3.7	Direcionador de fluxo de ferro galvanizado	47
3.8	Direcionador de fluxo (ASME)	48
3.9	Tubo de pitot na horizontal e vertical	48
3.10	Detalhes construtivos do tubo de pitot	49
3.11	Manômetro inclinado para determinação da queda de pressão	50
3.12	Silo de armazenagem de sólidos com volume de 11,5 litros	50
3.13	Válvula rotativa	51
3.14	Motor da válvula rotativa	51
3.15	Potenciômetro modelo	52
3.16 a	Vista lateral do coletor, módulo para análise da distribuição das	52

	partículas	
3.16 b	Vista frontal da entrada do coletor, módulo para análise da distribuição das partículas.	52
3.17	Sacos coletores, tela filtrante de 36 mesh	53
3.18	Tipos de polímeros polietileno, poliestireno e polipropileno	55
3.19	Representação dos tubos no módulo de coleta	56
3.20	Balanco de energia mecânico em trecho reto	59
3.21	Manômetro inclinado para tomadas de pressão, sendo A a área da seção do reservatório e a a área do tubo	61
3.22	Pontos de tomadas de pressão com tubo de pitot pelo método das centróides de áreas iguais	63
3.23	Esboço do sistema montado para o cálculo da potência consumida pelo ventilador	66
3.24	Dimensões do coletor	68
4.1	Pressão estática corrigida no anel piezométrico na saída do ventilador (mmca) em função da vazão volumétrica do ar (m^3/s)	74
4.2	Curva de potência consumida (hp) em função da vazão volumétrica do ar (m^3/s)	75
4.3	Potência consumida e velocidade de descarga do ar	79
4.4	Diagrama de fases do polietileno – Perda de carga por unidade de comprimento em função da velocidade do ar e da vazão de sólidos. Distribuição de sólidos na secção da tubulação	100
4.5	Diagrama de fases do poliestireno – Perda de carga por unidade de comprimento em função da velocidade do ar e da vazão de sólidos. Distribuição de sólidos na secção da tubulação	102
4.6	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 secção da tubulação	103

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
2.1	Exemplos de aplicações do transporte pneumático	07
2.2	Características dos sistemas pneumáticos em fase densa e diluída	09
2.3	Principais características e aplicações de sistemas de transporte pneumático em fase diluída	18
2.4	Separação de partículas por GELDART	23
2.5	Velocidades de alguns materiais	27
3.1	Resumo das principais características dos equipamentos	54
3.2	Propriedades físicas e dimensões dos polímeros polietileno de baixa densidade (LDPE), polipropileno (PP) e poliestireno (PS)	55
3.3	Resumo das condições operacionais	59
3.4	Massa e área dos 9 coletores	69
4.1	Rotação, temperatura de bulbo seco e úmido, massa e comprimento do braço	72
4.2	Pressões estática no anel piezométrico na saída do ventilador e pressões estática e dinâmica no tubo de pitot	72
4.3	Pressões dinâmica corrigida, velocidade média no pitot e vazão volumétrica	73
4.4	Rotação do motor do ventilador, força e potência consumida	75
4.5	Rotação (rpm) e comprimento nos manômetros inclinados (cm)	76
4.6	Velocidade de descarga do ar (m/s) e o desvio (%)	77
4.7	Velocidade do ar em função da frequência (Hz)	78
4.8	Rotação, força e potência consumida	78
4.9	Vazão mássica do polietileno	80
4.10	Vazão mássica de poliestireno	80
4.11	Vazão mássica de polipropileno	81
4.12	Densidade aparente dos sólidos	82
4.13	Dados de perda de carga para a vazão de 0,085 kg/s de polietileno	83
4.14	Dados de perda de carga para a vazão de 0,13 kg/s de polietileno	84
4.15	Dados de perda de carga para a vazão de 0,17 kg/s de polietileno	85

4.16	Dados de perda de carga para a vazão de 0,085 kg/s de poliestireno	86
4.17	Dados de perda de carga para a vazão de 0,13 kg/s de poliestireno	87
4.18	Dados de perda de carga para a vazão de 0,17 kg/s de poliestireno	88
4.19	Dados de perda de carga para a vazão de 0,085 kg/s de polipropileno	89
4.20	Dados de perda de carga para a vazão de 0,13 kg/s de polipropileno	90
4.21	Dados de perda de carga para a vazão de 0,17 kg/s de polipropileno	91
4.22	Perda de carga em função da vazão mássica do ar	92
4.23	Perda de carga em função da vazão mássica de polietileno	93
4.24	Perda de carga em função da vazão mássica de poliestireno	94
4.25	Perda de carga em função da vazão mássica de polipropileno	95
4.26	Fração mássica por unidade de área para o polietileno	96
4.27	Fração mássica por unidade de área para o poliestireno	97
4.28	Fração mássica por unidade de área para o polipropileno	98
4.29	Velocidade de saltitação (m/s) pela correlação de Rizk	104
4.30	Velocidade de saltitação (m/s) pela correlação de Matsumoto	104
4.31	Desvio padrão do polietileno para os pontos A, B, C, D, E, F, G, H e I	106
4.32	Desvio padrão do poliestireno para os pontos J, K, L, M, N, O, P, Q e R	106
4.33	Desvio padrão do polipropileno para os pontos S, T, U, V, X, Z, W, Y e AA	106
A 1	As características e aplicações dos diferentes tipos de polietileno	117/118
A 2	Comparação das propriedades físicas dos diferentes tipos de polietileno	119
A 3	Tipos, obtenção e características dos propilenos	120
A 4	Características básicas, aplicações e propriedades físico-química	121
A 5	Várias formas, descrição e aplicação dos poliestirenos	122/123
A6	Principais propriedades físicas do poliestireno	124

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

Os processos químicos e petroquímicos têm como finalidade transformar as matérias-primas em produtos comercializados. As etapas envolvidas durante este processamento consistem em uma série de operações unitárias que, em muitos casos, requerem o transporte de materiais particulados.

Um dos métodos de deslocamento mais empregado atualmente é o transporte pneumático, que movimenta uma variedade de sólidos particulados, em geral de 0,1 mm até 10 mm com propriedades físicas e químicas diferentes (tamanho, forma, densidade, índice de fluidez, temperatura de ebulição e fusão). Tem como princípio conduzir os produtos dentro de uma tubulação na posição vertical, horizontal e inclinada, através de uma corrente de gás gerada por um ventilador ou soprador ou compressor pela diferença de pressão. Em muitos casos, o fluido empregado normalmente é o ar atmosférico, em função do preço, da facilidade de manipulação e da não toxicidade. Porém em condições especiais, com risco de explosão, com perigo de fogo e possíveis danos a saúde são utilizados gases diferentes, como o nitrogênio (MARCUS *et al*, 1990).

Os materiais granulares e pulverizados mais comumente transportados por unidades pneumáticas são alimentícios como o milho, o arroz, o feijão, a aveia e o trigo; farmacêuticos como a penicilina e a eritromicina; polímeros como o polietileno, o polipropileno, o poliestireno e o polivinil e sólidos diversos como as serragens, o algodão, o papel, o carvão, o negro de fumo, o coque, o cimento e a areia (LI e TOMITA, 2000).

O transporte pneumático caracteriza-se por ser um sistema eficaz e limpo, com pouca contaminação do meio ambiente e produto.

O transporte pneumático pode ser classificado em duas fases distintas: diluída e densa. No transporte em fase diluída, as partículas permanecem totalmente suspensas, caracterizado por uma velocidade do ar em torno de 20 m/s, concentrações de sólidos menores que 1% em volume e perda de carga por unidade de comprimento menor que 50 mmca/m (milímetros de coluna de água por metro). Na fase densa, as partículas preenchem completamente a tubulação, sendo transportadas de forma semelhante à extrusão, utilizando velocidades de ar que variam de 1 a 5 m/s, concentrações de materiais maiores que 30% em volume e perda de carga por unidade de comprimento maior que 200 mmca/m (DYNAMIC AIR, 2005).

As principais vantagens do transporte em fase diluída, em relação ao transporte em fase densa, são a possibilidade de deslocar materiais a distâncias que podem variar de 20 a 400 metros inclusive com variações de nível, baixo custo de aquisição, operação e manutenção e facilidade de controle e automação (RHODES, 2004 e MOLERUS, 1996).

A maioria das indústrias, que trabalham com sistemas de transporte pneumático, matem a máxima rotação do soprador, superdimensionando-o com desperdício de energia e desgaste dos sólidos e das singularidades, tais como curvas, joelhos e tês (DOW QUÍMICA, 2000).

Uma velocidade de ar muito baixa permite a formação de regiões de acúmulo progressivo de particulado, terminando por impedir a passagem de ar e, conseqüentemente, do próprio sólido. Velocidades baixas também podem gerar um arraste das partículas ao longo da parte inferior da tubulação, acarretando o desgaste do equipamento e sucessivas paradas da unidade de processo para eventuais substituições de linhas, elevando o custo de manutenção do transporte pneumático e o conseqüente prejuízo pelo “lucro cessante”. Este problema apresentado pela Dow Química do Brasil, situada em Cubatão, na área de transporte pneumático de polietileno e polipropileno foi um motivador para o desenvolvimento deste trabalho. A determinação experimental da velocidade de ar de transporte para cada tipo de material, de acordo com suas propriedades e particularidades e a sua distribuição na seção transversal, é de suma importância para otimizar-se os custos de transporte (menor perda de carga) e de manutenção (melhor distribuição das partículas).

A maior parte dos trabalhos disponíveis na literatura aberta, concernentes ao transporte pneumático em fase diluída, contempla dutos de diâmetros não industriais, sem abordar a distribuição das partículas na seção transversal e a sua relação com a perda de carga, velocidade de ar e vazão de sólidos.

1.2. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi projetar e construir um sistema piloto de transporte pneumático em fase diluída, para obter-se parâmetros para a especificação de novas unidades e otimizar as condições operacionais de transportadores existentes.

Visou, de forma específica, propor um método para a:

- Obtenção da curva característica de perda de carga em função da velocidade do ar e a vazão de sólidos, e da distribuição dos polímeros polietileno, polipropileno e poliestireno granulados na seção transversal do transportador com diâmetro industrial;
- Caracterização do ventilador centrífugo a partir do código ASME;
- Determinação da velocidade de ar empregando um anemometro, tubo de pitot e equação da continuidade;
- Determinação da potência consumida;
- Determinação da vazão de sólidos;
- Determinação da densidade aparente dos sólidos.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Transporte pneumático

O transporte de materiais na indústria pode ser observado em operações unitárias bem distintas como o transporte de sólidos, líquidos, gases e misturas. O transporte de sólidos é de grande importância em função da sua influência na economia global de muitos processos. Em alguns casos o custo pode atingir cerca de 80 % do custo total da operação (GOMIDE, 1983).

Dentro da indústria química, os sólidos podem ser deslocados por diversas formas, tais como, transporte hidráulico, pneumático, rodoviário, ferroviário e mecânico como por correia, corrente, caçamba, helicóide e por vibração.

De acordo com GOMIDE (1983), as principais variáveis para a seleção e o dimensionamento de equipamentos de transporte são:

- A capacidade de movimentação dos sólidos;
- As distâncias e o desnível entre a carga e a descarga;
- A natureza do material, como as características físicas e mecânicas dos sólidos;
- Os fatores econômicos, como os custos de aquisição, operação e manutenção.

São importantes na especificação de um transportador as seguintes propriedades do sólido: granulometria e forma das partículas, densidades real e aparente, ângulo de repouso dinâmico, fragilidade, umidade, mobilidade, dureza e características de abrasão, aderência e aglutinação.

A seleção do transportador pelo critério econômico de menor custo de aquisição, operação e manutenção deve incluir os periféricos, como os dispositivos de carga, armazenamento, embalagem e descarga final do produto.

A Figura 2.1 mostra as faixas de aplicações de alguns sistemas de transporte, a qual relaciona dois fatores, a capacidade de produto (t/h) em função da distância transportada (km).

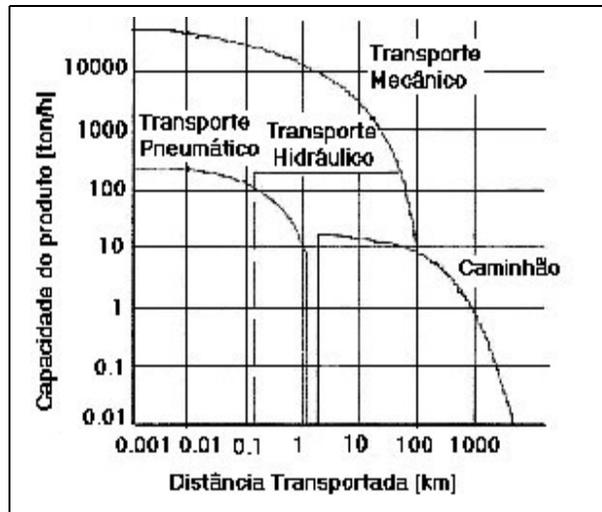


Figura 2.1 – Capacidade do produto (t/h) em função da distância transportada (km)
(UNION CARBIDE CORPORATION, 1983)

Apesar da Figura 2.1 não considerar parâmetros importantes como as dimensões dos sólidos, o grau de periculosidade e a higroscopicidade, pode-se notar que os transportadores pneumáticos são indicados para capacidades aproximadas de até 300 ton/h para até 1 km de distância a não ser que o sólido não seja adequado para tal sistema.

De acordo com MOLERUS (1996) o primeiro sistema de transporte pneumático documentado (1847) foi o da planta da Peugeot localizada na cidade de Valentigney – França na exaustão de poeiras de moedores de pedras. O segundo sistema reportado foi a patente nomeada Cramptom's, “Melhorias na moagem, preparação e queima de carvão” (1868).

MOLERUS (1996) relata também que o transporte pneumático é utilizado para deslocar uma vasta variedade de materiais particulados (cerca de 300 produtos diferentes) devido à sua versatilidade e flexibilidade, uma vez que o sólido pode ser direcionado para mais de um ponto na indústria.

O transporte pneumático, segundo RIBEIRO (2005), é um dispositivo de grande emprego na movimentação e elevação de uma variedade de materiais sólidos em um fluxo de gás, através de tubulações horizontais e verticais fechadas nas indústrias químicas, alimentícias, metalúrgicas e petroquímicas. O fluido normalmente usado é ar atmosférico, porém, em casos de risco de explosão, a saúde humana e até mesmo perigo de fogo empregam-se gases inertes, como o nitrogênio.

MARCUS *et al* (1990) relataram que o transporte pneumático pode ser aplicado nos sistemas de despoejamento, descarga de filtros de manga (“big-bag”), transporte de pó ou de produtos a granel como: açúcar, alumina, amendoim, argila em esferas, algodão, barrilha, bauxita, calcita, carbonato de cálcio, caulim, cimento, dolomita, farinha, fertilizantes, finos de carvão, granulados de aço, leite em pó, óxido de ferro, polietileno, grãos de café, PVC, sal, soda, talco, vidro, ácido adípico, entre outros.

Conforme RHODES (2004) este tipo de transporte pode ser usado para partículas que variam de pós finos a grãos, com granulometria acima de $100 \mu\text{m}$ a 10 mm respectivamente e densidades aparentes de 16 a 3200 kg/m^3 . A Tabela 2.1 mostra exemplos de vários segmentos que deslocam sólidos por meio pneumático.

Tabela 2.1 – Exemplos de aplicações do transporte pneumático (RHODES, 2004).

Segmento	Material
Cimenteiras	Pó de clínquer, cimento, escória de alto forno
Fabricantes de abrasivos	Lixa, rebolo e esmeril
Fundição	Areia de fundição
Indústrias alimentícias	Cereais, soja, malte, sementes de girassol, cacau
Indústria de alumínio	Alumina calcinada, bauxita, resíduos de eletrodos
Indústrias de isoladores e mantas sintéticas	Resíduos de produção, serragem, despoejamento
Indústria química	Cal calcinado, fertilizantes, polímeros em geral
Indústria de vidro	Feldspato, quartzo, caulim, cacos de vidro
Mineração de carvão	Concentrados, rejeitos
Processamento de carvão	Grafites, eletrodos, peças técnicas
Mineração de ferro	Concentrados, rejeitos
Processadores de lixo	Resíduos domésticos e industriais
Siderurgia (altos fornos)	Sinterização, calcário, despoejamento, escória
Usinas termoelétricas	Despoejamento, cinzas.

Segundo MARCUS *et al* (1990) as principais vantagens do sistema pneumático são:

- a) Transporta uma variedade de produtos sem liberar poeira;
- b) Possui flexibilidade de instalação – o transporte pode ser vertical ou horizontal pela inserção de um cotovelo, uma curva e outras singularidades;
- c) Permite a distribuição de sólidos e alimentação para diversas áreas da fábrica;
- d) Requer baixa manutenção e baixos custos de trabalho humano;
- e) Pode ser empregada, em função da segurança, para transportar produtos de alto valor;
- f) Utiliza, em geral, ar para a movimentação de materiais;
- g) Comporta múltiplos usos - uma tubulação pode ser usada para uma variedade de produtos;
- h) É de fácil controle e automação;

i) Pode ter altíssima capacidade de movimentação em distâncias de 20 a 400 m, inclusive com variações de nível;

MARCUS *et al* (1990) forneceram também as seguintes desvantagens do transporte pneumático:

- a) Alto consumo de energia;
- b) Alto custo inicial de instalação;
- c) Abrasão e desgaste de equipamentos;
- d) Um projeto incorreto pode resultar na degradação das partículas;
- e) Em razão dos complexos fenômenos de escoamento envolvidos, existe a necessidade de altos níveis de conhecimento no projeto, operação e manutenção dos sistemas pneumáticos.

RIBEIRO (2005) listou como vantagens do emprego dessa modalidade de transporte:

- a) A supressão de quaisquer formações de poeiras no ambiente (transporte sem poluição atmosférica);
- b) A supressão de quaisquer perdas de produto;
- c) Elimina a queda de produtos no piso de trabalho;
- d) A possibilidade de transporte aéreo e interno;
- e) A possibilidade de percurso sinuoso;
- f) A facilidade de adaptação aos edifícios existentes;
- g) A proteção do material transportado contra a poluição;
- h) A possibilidade de transportes utilizando gases neutros;
- i) A realização de instalações podendo integrar conjuntos completamente automatizados;
- j) A armazenagem e os custos de produção reduzidos;
- l) A higiene e segurança pessoal no trabalho.

Em alguns casos, citou ainda RIBEIRO (2005), o transporte pneumático não pode ser adotado devido às características físicas ou químicas do material, como:

- a) Sólido muito úmido ou pegajoso;
- b) Dimensões de partículas, ou a massa volumétrica muito grande, que requerem uma velocidade de gás também excessiva;
- c) A temperatura do material elevada;
- d) Partículas muito frágeis, que podem sofrer uma redução de tamanho, ou mudança de aspecto.

2.2. Fase densa/diluída e regimes de escoamento do transporte pneumático

Dependendo da velocidade superficial do gás e da relação entre a vazão mássica das fases gasosa e sólida, pode-se classificar o transporte pneumático em fase densa e diluída. As características gerais dos transportes em fase densa e diluída são apresentadas na Tabela 2.2 (DOW QUÍMICA DO BRASIL, 2000).

Tabela 2.2 – Características dos sistemas pneumáticos em fase densa e diluída (DOW QUÍMICA, 2000).

Tipo de transporte	Carga de sólidos, massa de sólidos/massa de ar	Velocidade de transporte	Sistema de queda de pressão
Fase densa	Maior que 15	< 2000 ft/min (< 10 m/s)	> 15 psi (> 100 kPa)
Fase diluída	0-15	> 2000 ft/min (> 10 m/s)	< 15 psi (< 100 kPa)

Obs.: 14,7 psi = 14,7 lbf/in² ≅ 1 atm ≅ 1 kgf/cm² ≅ 10,3 mca ≅

100 kPa

Um esquema dos padrões de fluxos horizontais pode ser visto na Figura 2.2. Foi observado por MARCUS *et al* (1990) que uma redução na velocidade do gás, para a mesma alimentação de sólido, resulta em uma distribuição não uniforme na seção transversal da linha de transporte. O ponto, entre a região de fluxo estável e a instável, é chamado de

velocidade de saltitação. Dependendo das características do sólido, velocidade do gás, vazão mássica de sólidos e outros fatores como rugosidade e tamanho do tubo, os padrões de fluxo na fase densa podem variar do regime instável para o estável ou para regime intermediário.

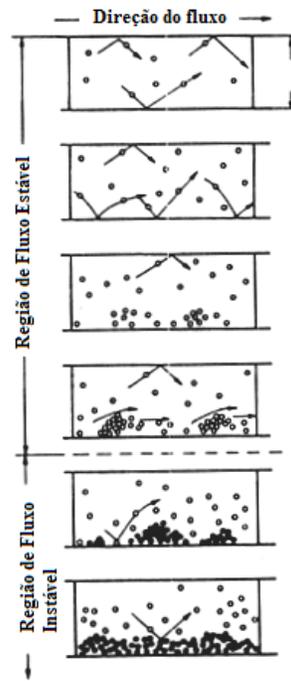


Figura 2.2 – Padrões de fluxo em uma tubulação horizontal: regime estável e instável (MARCUS *et al*, 1991).

SCHIAVON (2000) comenta que os padrões das fases de escoamento podem variar bruscamente, podendo preencher a seção da tubulação, ocasionando um escoamento pistonado denso ou gerando escoamentos nos quais os sólidos no fundo do tubo movem-se como uma série de dunas e uma camada de fase dispersa se move sobre as dunas. As situações de escoamentos estáveis resultam em um processo de escoamento suave, enquanto que situações instáveis são caracterizadas algumas vezes por violentos aumentos de pressão conforme a camada móvel se quebra.

Dentro de cada tipo de fase (diluída ou densa) pode-se verificar vários tipos de regimes de escoamento. WEN apud MARCUS *et al* (1990) mostra as diferenças destes tipos de escoamentos através da visualização de regimes em tubulações horizontais, nas quais a velocidade do ar de transporte era diminuída gradativamente e a vazão de sólidos

permanecia constante. Estes regimes são basicamente uma função das características dos sólidos. Na Figura 2.3 foram observados os regimes de escoamentos obtidos experimentalmente por WEN (1959).

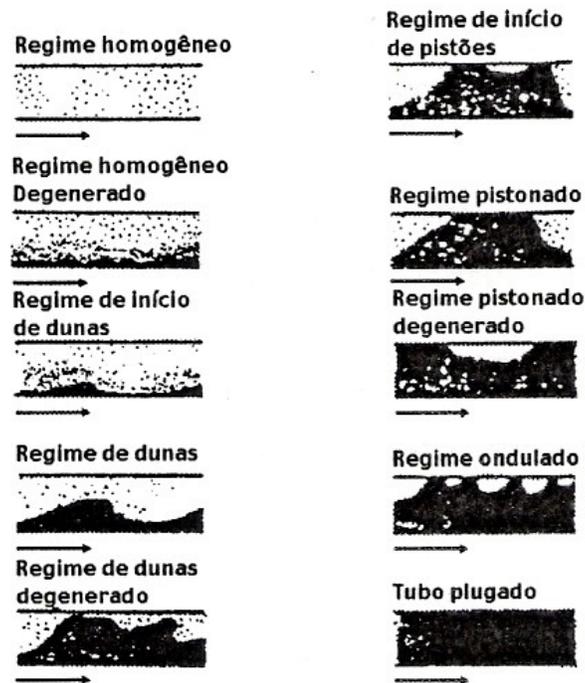


Figura 2.3 – Regimes de escoamentos em tubulação horizontal (WEN,1959).

De acordo com PAN (1999) diversos materiais sólidos com propriedades diferentes como tamanho, distribuição, forma, densidade e superfície podem ser transportados pneumaticamente em sistemas convencionais em três modos de fluxo: (a) transição suave da fase densa para a fase diluída, típica de sólidos finos como cimento, carvão pulverizado e cinzas; (b) fase diluída, zona instável e fluxo na forma de golpes “slug”, comum em produtos granulares leves e de fluxo livre como pellets de plásticos, arroz, trigo e (c) somente fase diluída, característica de materiais triturados, granulares pesados como carvão cominuído, concreto primário, areia e também alguns materiais leves, fibrosos e esponjosos como lasca de madeira, grão em pó, serragem.

A Figura 2.4 mostra a transição suave da fase diluída para a fase densa. Pode-se notar que ao reduzir a velocidade do ar da máxima para mínima e mantendo-se uma vazão mássica de produto constante a queda de pressão também diminui, atingindo um valor mínimo. A direita deste ponto mínimo de pressão refere-se à fase diluída. Entretanto, se a

velocidade de ar continua a diminuir, a queda de pressão aumenta para uma taxa mais alta do que a da fase diluída, esta região é denominada de fase densa. Nessa mesma Figura, para a mesma velocidade, quanto maior a vazão de sólidos (G) maior a queda de pressão.

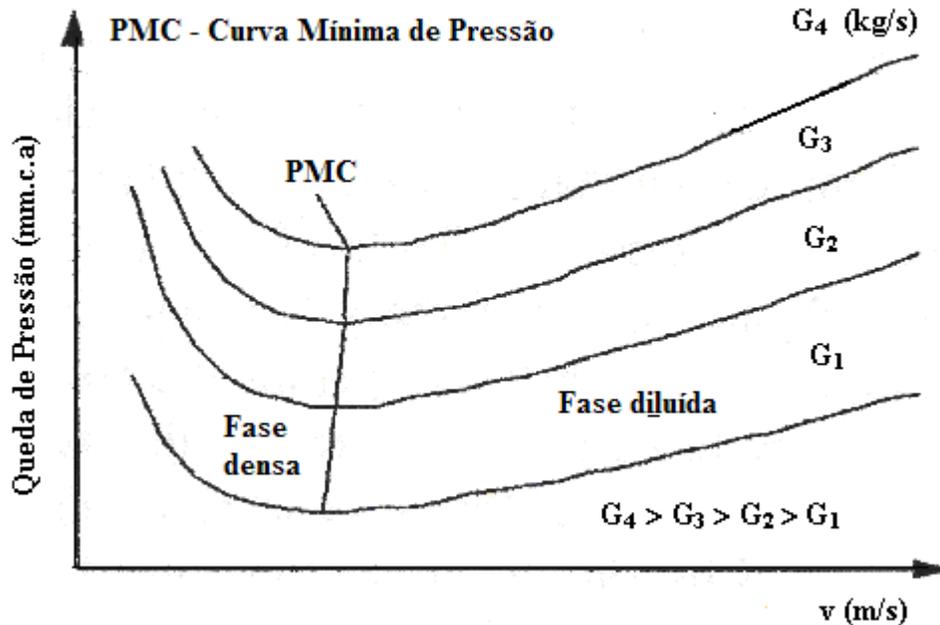


Figura 2.4 - Mudança da fase diluída para a fase densa. v é a velocidade do ar e G a vazão de sólidos (PAN, 1999).

A Figura 2.5 apresenta as características gerais do transporte pneumático para fase diluída, zona instável e fluxo pistonado. O ponto 1 representa a distribuição das partículas em fase diluída na seção transversal da tubulação. O ponto 2 indica o ponto de pressão mínimo e a formação de uma camada de partículas na parte inferior da tubulação devido à redução da vazão mássica de ar. Com a vazão mássica de ar baixa, algumas partículas tornam-se estacionárias ao longo da parte inferior do duto e outras são transportadas em pequenas dunas e agrupamentos "clusters". Ao diminuir ainda mais a vazão mássica de ar, a velocidade de ar torna-se insuficiente para manter em suspensão as partículas acarretando o acúmulo de algumas partículas na parte inferior da tubulação e a formação de "plugs" longos. Estes "plugs" longos são forçados a atravessar a tubulação e produzem flutuações altas de pressão e vibração, formando uma zona instável (ponto 3). No ponto 4 observa-se que ao se reduzir ainda mais a velocidade do ar, o transporte das partículas se dá na forma

pistonada. Ao longo da tubulação horizontal os pistões levantam as partículas da camada estacionária em frente e deposita a mesma quantidade de partículas atrás delas.

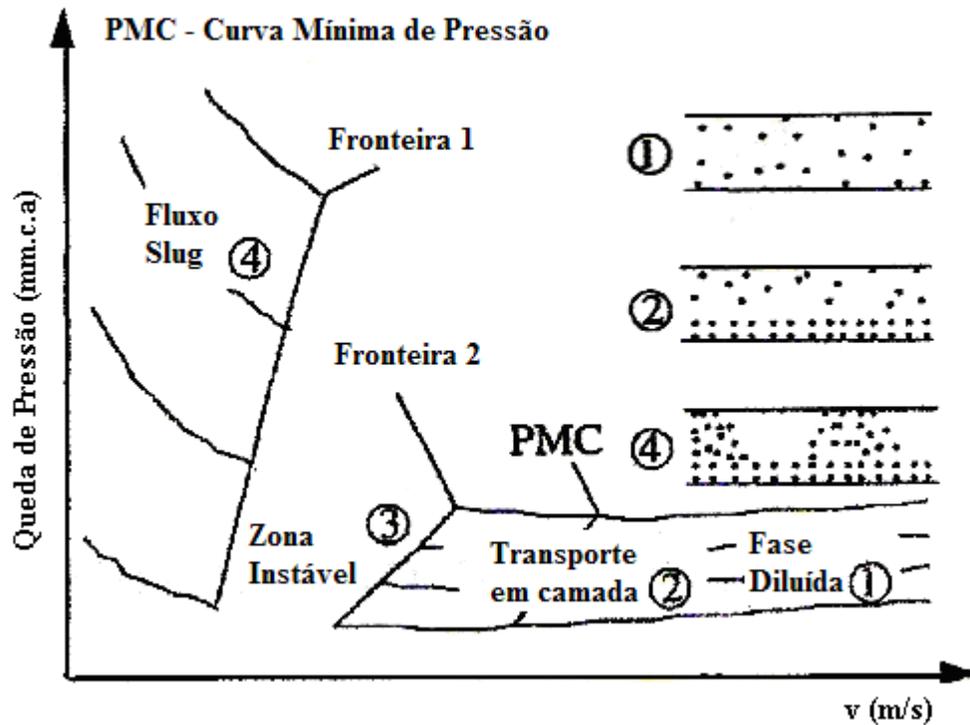


Figura 2.5 - As características gerais do transporte pneumático para fase diluída, zona instável e fluxo em golpes "slug" (PAN, 1999).

Pode-se observar na Figura 2.6 as características somente da fase diluída. Quando a vazão mássica de ar decresce do mais alto para o mais baixo e para uma vazão mássica de produto constante, a queda de pressão também diminui. Antes de alcançar o ponto de pressão mínima (PMC), as partículas começam a saltar e acumulam rapidamente ao longo da parte inferior da tubulação. O bloqueio ocorre logo que o material preenche completamente uma seção da tubulação.

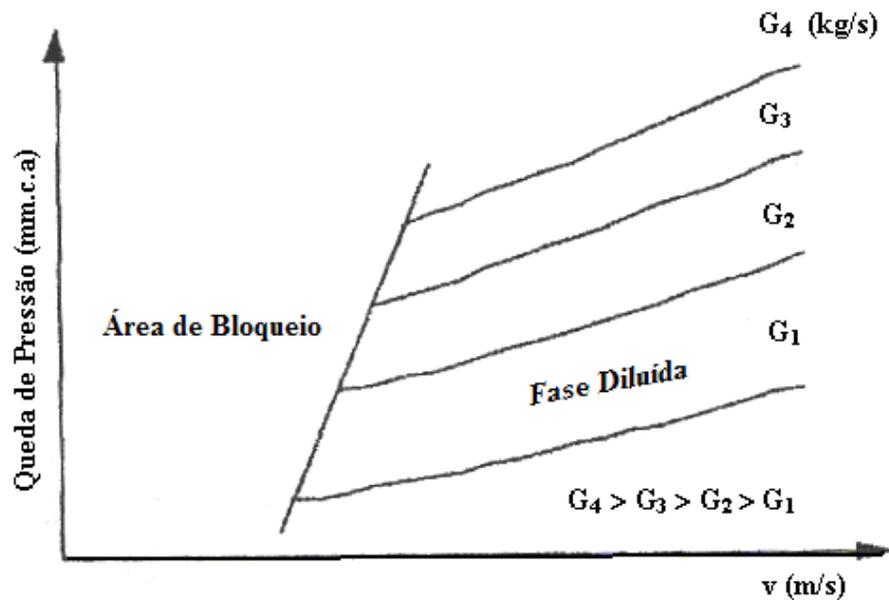


Figura 2.6 – As características da fase diluída (PAN, 1999).

MARCUS *et al* (1990) descreveram o circuito geral de transporte pneumático como constituído basicamente dos seguintes elementos e seções distintas conforme a Figura 2.7:



Figura 2.7 – Seções de sistemas de transporte à pressão e a vácuo

(MARCUS *et al*, 1991).

Apresenta-se a seguir, de forma sintética, o sistema motriz e as três seções:

a) O sistema motriz é usado para fornecer a energia necessária ao transportador por meio de compressores, sopradores, ventiladores e bombas de vácuo. Para efetuar um transporte confiável, deve-se determinar a velocidade do gás, a vazão e a pressão (positiva ou negativa).

b) Na seção de mistura, os sólidos são introduzidos dentro de uma corrente de gás. As partículas são aceleradas até alcançar a velocidade crítica. A velocidade do ar necessária para arrastar a partícula é a velocidade mínima de transporte, a qual é maior em tubo horizontal do que no vertical. Após a aceleração inicial, ocorre o aumento da velocidade das partículas ao longo da tubulação em função da expansão do fluxo de ar de transporte. É necessário certo comprimento do tubo para que haja a transferência de quantidade de movimento entre o material a ser transportado e o fluido transportador, até que se chegue a uma região de regime permanente.

c) A seção de transporte consiste de tubulações horizontais, verticais, curvas e válvulas desviadoras, que conduzem os sólidos. A seleção da tubulação baseia-se em vários fatores como a abrasividade do produto, exigências de pressão, velocidade, vazão de ar e de sólido.

d) Na seção de separação gás-sólido, o material transportado deve ser separado do material condutor. A seleção de um sistema de separação gás-sólido adequado depende basicamente do tamanho dos sólidos, do tipo de partículas e da velocidade de escoamento.

2.3 Principais unidades industriais

2.3.1 Sistema de transporte em fase densa

Desde meados dos anos 60, tem aumentado o interesse no modo de transporte de fase densa, no qual as partículas sólidas não são completamente suspensas e há muita interação entre elas, relata RHODES em 2004.

O transporte pneumático em fase densa é caracterizado por baixas velocidades de gás, concentrações de sólidos altas (maior que 30% em volume), altas quedas de pressão por unidade de comprimento do tubo e uma alta relação de carregamento impulsionando o material através da tubulação, ou seja, utiliza pressão positiva. É usado um compressor de ar de alta pressão como fonte de energia.

As principais vantagens desta fase surgem das baixas exigências de volume de gás, que geralmente significam baixas exigências de energia por massa de produto carregado e também significa que são requeridas linhas menores como também recuperação e separação

sólido/gás. Baixas velocidades de sólidos significam que materiais abrasivos podem ser carregados com pouca erosão da tubulação principal ou degradação do produto.

Este tipo de transporte pneumático é bastante empregado para materiais muito abrasivos, como por exemplo areia. As desvantagens deste sistema são os elevados custos de aquisição, além de exigir mão de obra especializada para operação e manutenção. A Figura 2.8 (DYNAMIC AIR, 2005) representa o transporte pneumático em fase densa .

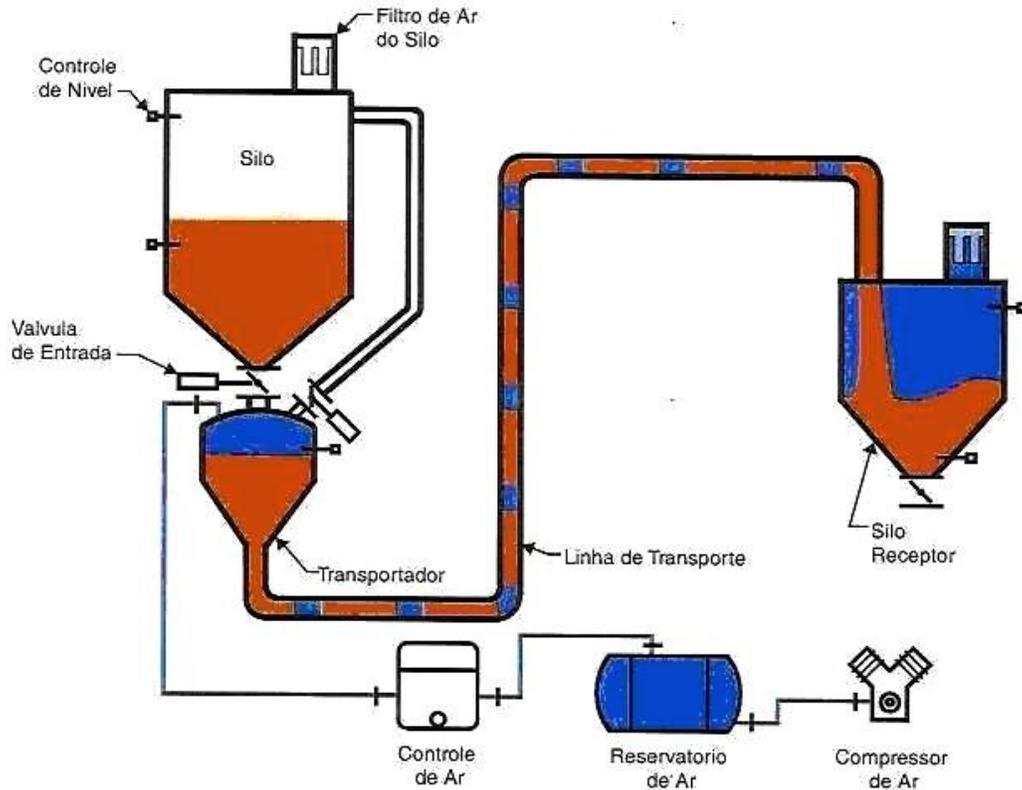


Figura 2.8 – Sistema de fase densa (Dynamic Air - Conveying Systems, 2005).

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) estudaram a perda de carga em transporte de fase densa para uma extensa faixa de velocidade com ambos tipos de partículas granulares e coesivas, para orientações de fluxo vertical, horizontal e inclinado.

2.3.2 Sistema de transporte em fase diluída

O transporte de fase diluída conforme RHODES (2004) é caracterizado por altas velocidades de gás (maiores que 20 m/s), baixas concentrações de sólidos (menos que 1% em volume), baixas quedas de pressão por unidade de comprimento de linha de transporte (menos de 5 mbar/m, \cong 50 mmca/m). Em contrapartida, gera maior atrito, erosão na tubulação e degradação de materiais. A Figura 2.9 apresenta um sistema de transporte pneumático em fase diluída (Dynamic Air – Conveying Systems, 2005).

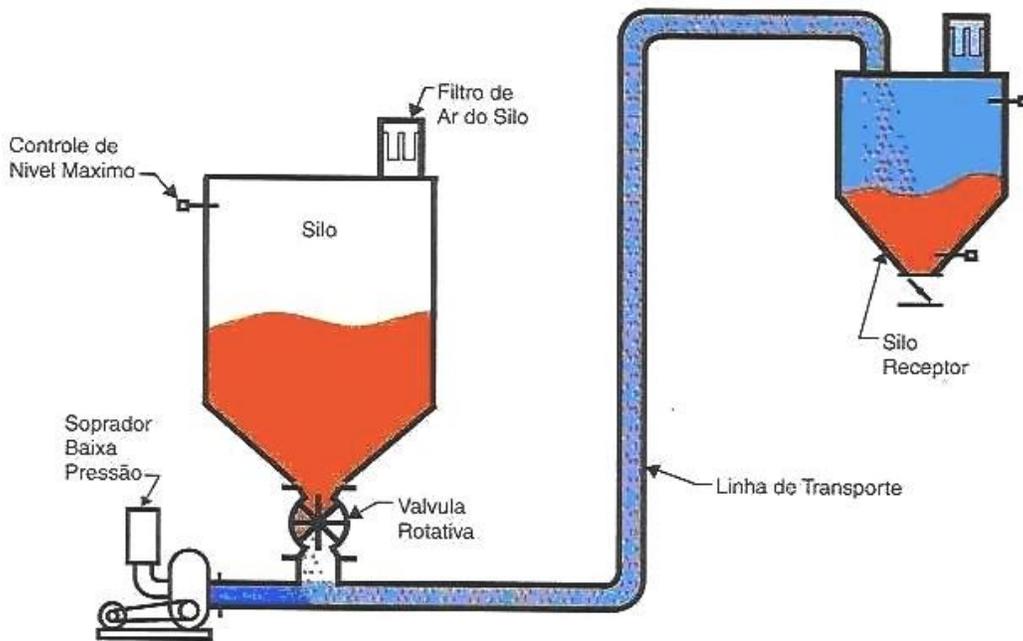


Figura 2.9 – Sistema de fase diluída (Dynamic Air - Conveying Systems, 2005).

O sistema pode ser de pressão positiva, pressão negativa ou empregar uma combinação de ambas, para succionar ou impulsionar os materiais através de dutos.

Normalmente sistemas de pressão positiva são limitados a uma pressão manométrica máxima de 1 bar (\cong 10,3 mca \cong 1 kgf/cm²) e sistemas de pressão negativa, a um vácuo de cerca de 304 mmHg (0,4 kgf/cm²) empregando sopradores e exaustores. Também é limitada a pequena extensão, transporte contínuo de sólidos a vazões menores que 10 toneladas/hora. Sob condições de fluxo diluído as partículas sólidas se comportam como individuais, completamente suspensas no gás e as forças de interação fluido - partícula predominam.

São usados separadores por ciclone para recuperar os sólidos do fluxo de gás na extremidade receptora da linha de transporte. Filtros de diversos tipos e com vários métodos de recuperação de sólidos são usados para limpar o gás de transporte, antes da descarga ou reciclo.

Em algumas circunstâncias pode não ser desejável usar o ar como o gás de transporte. Alguns exemplos são:

- Possível contaminação da fábrica com substâncias tóxicas ou radioativas;
- Possibilidade de explosão a menos que um gás inerte seja usado;
- Possíveis problemas com sólidos sensíveis a umidade, a menos que a umidade seja controlada.

A Tabela 2.3 mostra alguns parâmetros gerais para cada tipo de sistema pneumático em fase diluída.

Tabela 2.3 – Principais características e aplicações de sistemas de transporte pneumático em fase diluída (GLUCK, 1968 e FRANK,1975).

Tipo		Características	Aplicações
Sistema com pressão positiva	Alta	- Pressão aproximadamente de 125 psig (\cong 8,5 kgf/cm ²)	- Deslocar materiais finos e pós que não reagem com calor em longas distâncias
	Média	- Pressão na faixa de 7 a15 psig (\cong 0,5 a 1 kgf/cm ²)	- Sistemas com uma única entrada e diversos pontos de descarga como tanques de armazenamento de unidades de processo.
	Baixa	- Pressão menor que 3 psig (\cong 0,2 kgf/cm ²) - Baixa capacidade e taxa de material-ar.	- Usado para pós coletados e em instalações com tubos grandes devido a expansão do material quando aerado.
Sistema com pressão negativa		- Velocidade de 4 a 6 ft/min (\cong 0,02 a 0,03 m/s)	-Transportar materiais corrosivos, tóxicos e perigosos
Sistema com pressão combinada positiva e negativa		- Vácuo de 15 a 16 inHg (\cong 29 a 31 kgf/cm ²) - Positiva de 10 a 12 psig (\cong 0,7 a 0,8 kgf/cm ²)	- Movimentar materiais leves e pós
Sistema com circuito fechado			-Transportar materiais tóxicos e radioativos.

De acordo com FRANK (1975) sistemas de pressão positiva normalmente são utilizados para transportar sólidos de um único ponto do transportador para diversas localizações com o custo sendo o fator decisivo. Os sistemas de pressão positiva trabalham com tubulações menores, pois operam com aproximadamente 1,5 vezes da diferença de pressão de um sistema a vácuo. Porém, a energia necessária para os dois sistemas é aproximadamente igual (exceto as pequenas diferenças entre a eficiência dos dois ventiladores) isto porque a quantidade de produto movimentado, à distância, o volume de material alimentado pela válvula rotativa é a mesma.

A menor degradação do produto para sistemas de pressão positiva alta e diâmetros menores de tubulação ocorre porque o produto salta menos dentro da tubulação até para linhas de transportes compactas. Conforme o ar é soprado ou succionado na tubulação, o sistema de transporte pneumático pode ser dividido em:

2.3.2.1 Sistema com pressão positiva

MARCUS *et al* (1990) apresenta como sistema de pressão positiva a configuração mais extensivamente utilizada em transporte pneumático. Tem como vantagem a capacidade de deslocar os materiais de um único lugar da unidade e descarregar em diversos pontos de uma indústria. Uma desvantagem seria a necessidade de uma alta pressão até 1000 KPa ($\cong 10 \text{ kgf/cm}^2 \cong 100\,000 \text{ mca}$) para este tipo de sistema (Figura 2.10).

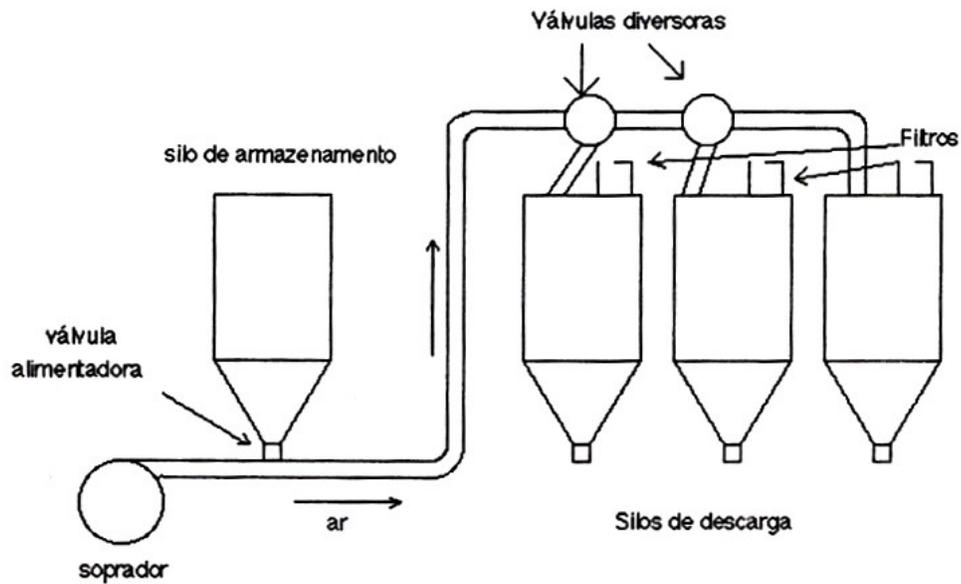


Figura 2.10 – Sistemas com pressão positiva (MARCUS *et al*, 1991).

2.3.2.2 Sistema com pressão negativa ou vácuo

Em geral, sistemas de pressão negativa (Figura 2.11) são usados para o transporte de material de diversos pontos de alimentação para apenas um ponto de descarga. Estes sistemas são largamente limitados em sua capacidade e distância.

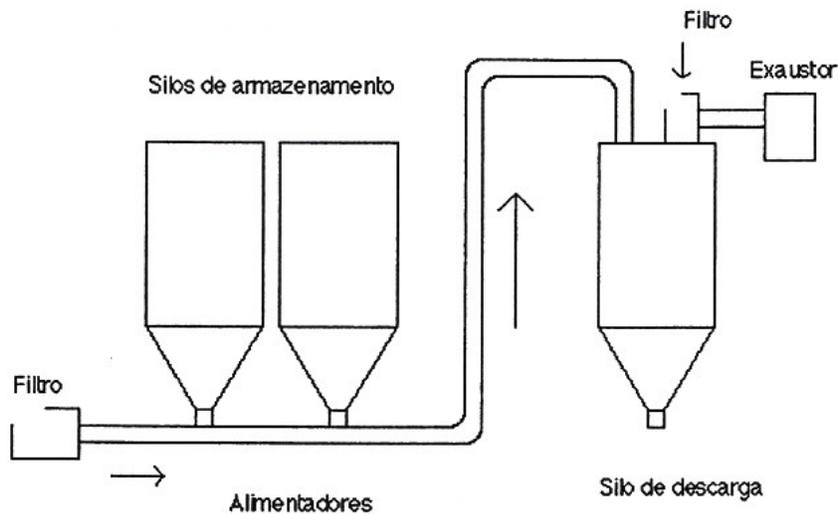


Figura 2.11 – Sistema com pressão negativa (MARCUS *et al*, 1991).

MARCUS *et al* 1990 afirmam que este tipo de sistema é bastante empregado no transporte de substâncias tóxicas, corrosivas e perigosas, visto que permitem uma alimentação livre de sujeira e também fornecem uma segurança adicional, pois quaisquer vazamento ou perdas na tubulação não acarretarão na poluição do ambiente devido ao escape do material. É usado para melhorar o desempenho de máquinas como britadores, amoladores, moinho de martelo e cortadores de faca, isto porque as superfícies e as câmaras de atrito são limpas e resfriadas pela passagem do ar.

2.3.2.3 Sistema com pressão positiva e negativa combinadas

Em seus estudos MARCUS *et al* (1990) concluíram que o sistema combinado de pressão positiva e negativa é o mais versátil pois podem ser empregados para deslocar os sólidos de várias fontes de alimentação para pontos múltiplos de descarga, conforme mostra a Figura 2.12.

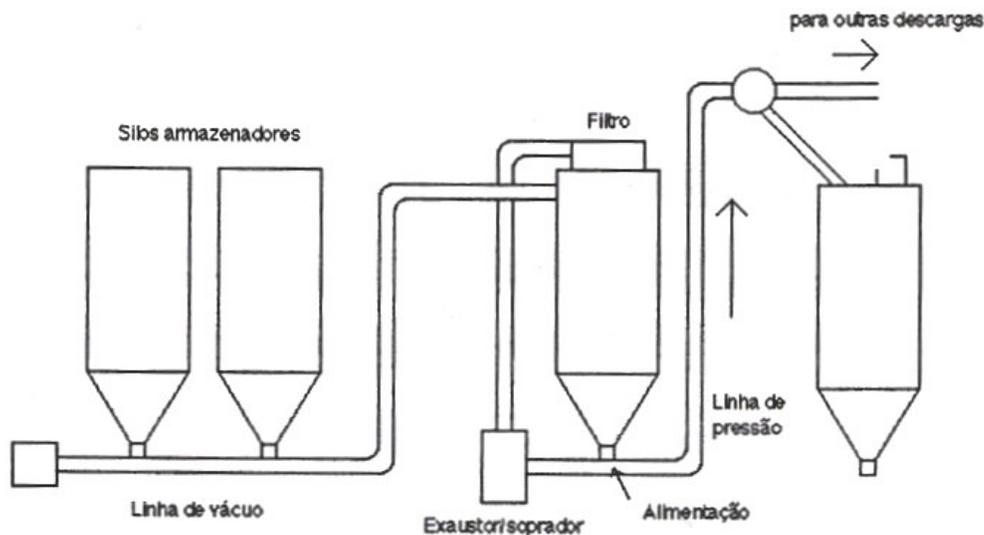


Figura 2.12 – Sistemas com pressão positiva e negativa (MARCUS *et al*, 1991).

De acordo com GLUCK (1968) sistemas combinados são de grande valor quando a taxa de material processado é diferente da taxa de material de estocagem, porque os dois lados do transportador podem operar simultaneamente. Como exemplo, carros tanques, caminhões e barcaças podem ser esvaziadas pelo vácuo, enquanto para uma vazão mássica

diferente ou para tempos diferentes o lado positivo da linha pode empurrar o material para um silo de armazenamento ou linha de processo.

2.3.2.4 Sistema com circuito fechado

GLUCK (1968) verificou que nos sistemas de circuito fechados onde o mesmo ar recircula dentro das linhas de transporte as vantagens são: a) prevenir envenenamento ou que partículas perigosas sejam descarregadas para a atmosfera; b) impedir que materiais higroscópicos absorvam umidade da atmosfera; c) prevenir a contaminação dos produtos; d) isolar materiais altamente inflamáveis e explosivos na presença do oxigênio usando um gás inerte e e) transportar materiais que não podem ser separados por filtros de tecido (Figura 2.13).

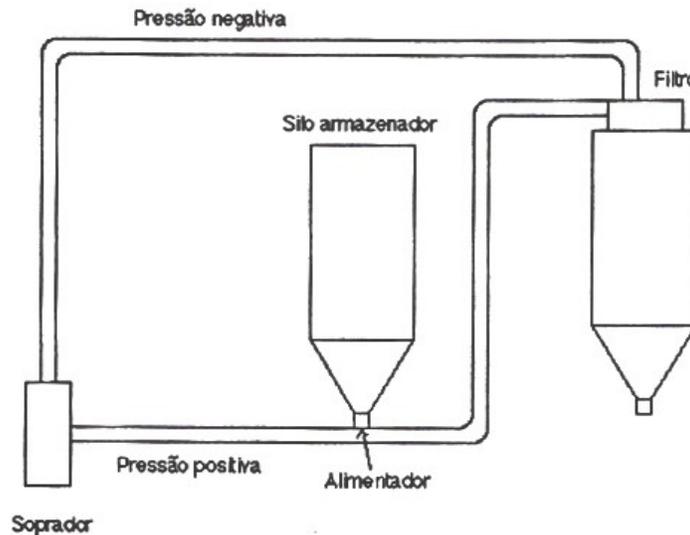


Figura 2.13 – Sistema com circuito fechado (MARCUS *et al*, 1991).

2.4 Partículas transportadas: classificação, atrito, velocidade, perda de carga e distribuição

2.4.1 Classificação de partículas finas de GELDART

Os diversos graus de granulometria dos pós e as suas características físicas influenciam regime de transporte. GELDART apud MARCUS *et al* (1990) propuseram a separação das partículas em diversos grupos, conforme a Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Separação de partículas por GELDART (1973)

Grupo	Características
A	Materiais com tamanho médio das partículas pequeno ou baixa densidade ($1,4 \text{ g/cm}^3$). Podem ser transportados em fase densa com pouca possibilidade de entupimento da linha, como por exemplo, o cimento.
B	Partículas de tamanho de $40 \mu \text{ m} < d_p < 500 \mu \text{ m}$ e densidade $1,4 \text{ g/cm}^3 < \rho_s < 4 \text{ g/cm}^3$. Pós que podem ser transportados com razões de vazões mássicas sólido/gás de até 100 vezes.
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.
D	Sólidos de grandes diâmetros. Transportados com altas velocidades de ar e uma baixa razão mássica sólidos/gás.

A Figura 2.14 com as regiões dos grupos de A até D é denominada de Diagrama de GELDART. Na abscissa encontra-se a granulometria e na ordenada a densidade dos diferentes pós.

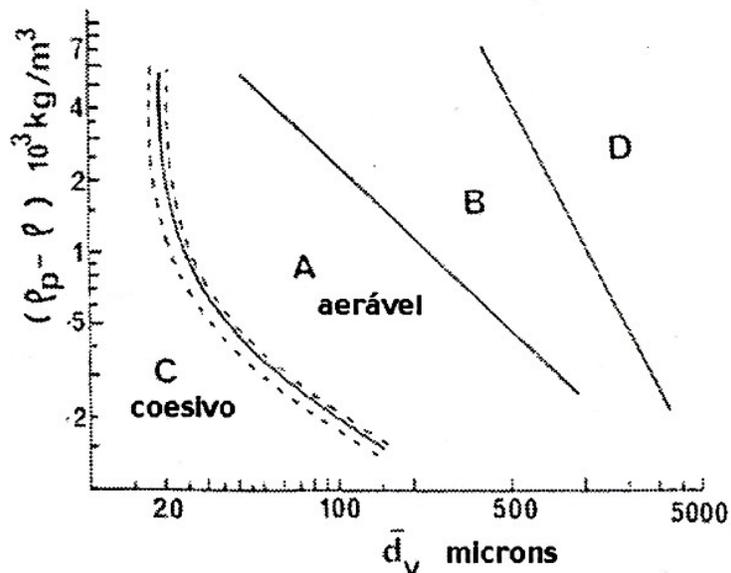


Figura 2.14 – Diagrama de GELDART (1973). Sendo ρ_p a densidade do pó, ρ a densidade do ar e \bar{d}_v o diâmetro médio das partículas

2.4.2 Influência do atrito de partículas

SALMAN, VERBA e HOUNSLOW (2002) verificaram que a quebra de partículas em muitos sistemas de transporte pneumático pode representar um dos maiores problemas para produtos particulados. Em alguns casos, devido ao transporte, a distribuição do tamanho e aparência das partículas podem mudar significativamente as especificações requeridas do produto. Finos podem geralmente causar subseqüente problemas de sujeira quando manuseados. Em casos extremos é possível que a fragmentação de um produto seja tão severa a ponto de mudar as características dos fluxos. Isto pode também levar a subseqüentes problemas de manuseio, particularmente na estocagem.

Os estudos da quebra de partículas baseam-se na circulação destas em um sistema de transporte pneumático. A mudança do tamanho da partícula antes e depois da circulação é observada e geralmente relatada para a velocidade de ar e o número de circulações conduzidas. Este estudo tem fornecido informações gerais a respeito da minimização da quebra de partículas durante o transporte. Porém, há muitas variáveis envolvidas na predição de mecanismo de quebra de partículas. Os resultados são válidos apenas para o sistema em estudo.

SALMAN, VERBA e HOUNSLOW (2002) examinaram também as características da fragmentação das partículas, o efeito da velocidade da partícula, o ângulo de impacto, o tamanho da partícula e o número de impactos. Eles também desenvolveram um método matemático capaz de prever a trajetória da partícula num tubo horizontal e a probabilidade de partículas que não foram quebradas durante o transporte pneumático em fase diluída. A validação deste modelo mostrou uma excelente conformidade com a simulação e os resultados experimentais obtidos em escala piloto.

GHADIRI *et al* (2003) analisaram a partir de testes de impactos dois tipos de aglomerados produzidos por diferentes processos, mas com a mesma formulação. Os efeitos da velocidade de impacto, tamanho do aglomerado, ângulo de impacto, fadiga, umidade e temperatura também foram estudados. Eles concluíram que ambas amostras mostram uma extensa deformação plástica devido ao alongamento e ruptura da interface da partícula, especialmente para amostras umidificadas. A redução da temperatura aumentou

substancialmente a quebra das partículas. As amostras mantidas a -20 °C tiveram o maior percentual de ruptura quando comparados com os efeitos de ângulo de impacto e exposição à umidade.

O atrito de partículas ou materiais granulares durante o transporte pneumático em fase diluída tem sido um problema de preocupação industrial. KONAMI, TANAKA e MATSUMOTO (2002) investigaram os atritos de materiais granulares durante o repetido transporte pneumático. Eles apresentaram uma equação que demonstra a correlação entre a taxa de partículas finas e o diâmetro de grânulos grossos. Os resultados demonstraram que o atrito dos grânulos durante o repetido transporte pneumático foi alto ao início, mas a taxa de atrito diminuiu gradativamente e a forma dos grânulos permaneceu constante. A vazão de partículas finas aumentou proporcionalmente com diâmetro do grânulo.

2.4.3 Velocidade para o transporte em fase diluída

JONES (1988) afirma que a seleção correta da velocidade de gás é um fator crítico e determinante para um projeto de transporte pneumático. A velocidade do gás muito baixa pode ocasionar o bloqueio da tubulação e a velocidade muito alta pode aumentar a perda de carga, o desgaste na linha, principalmente em curvas, e reduzir a vazão mássica de material a ser transportado.

A determinação da mínima velocidade de transporte depende das propriedades físicas do material. É difícil determinar precisamente esta velocidade visto que a área transversal do duto depende da área ocupada pelas partículas num dado instante. A velocidade superficial do ar (U_g) é baseada na área da secção transversal da tubulação vazia (A), mas obtida empregando, por exemplo, um Tubo de Pitot para a mistura sólido-gás, conforme a equação 2.1.

$$U_g = \frac{\dot{Q}_g}{A} = \frac{\dot{W}_g}{A \cdot \rho_g} \quad 2.1$$

Sendo Q_g a vazão volumétrica, W_g a vazão mássica e ρ_g a densidade do ar.

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, densidade e forma das partículas, e talvez outros fatores menos óbvios influenciam na velocidade mínima segura de transporte.

RIBEIRO (2005) cita que no transporte pneumático é possível distinguir a velocidade das partículas e a do gás e que testes mostraram que a velocidade de escoamento entre as duas fases pode ser importante e sua influência não é desprezível. Afirma que a velocidade de escoamento é função de um grande número de fatores e, em particular, das dimensões das partículas. Só no caso de partículas muito pequenas, e quando as concentrações de massa e volumétricas são extremamente baixas, se pode admitir que a velocidade do gás é igual à velocidade das partículas. Cita também que na distribuição de partículas que ainda não são homogêneas em uma determinada seção do tubo, as velocidades dessas partículas não são iguais, mas, na prática, não é necessário conhecer os movimentos das partículas individualmente, porque só os tamanhos dos particulados medianos são importantes. Para facilitar a escolha do sistema de funcionamento do transporte pneumático, é necessário especificar a velocidade de base do gás em escoamento monofásico, a velocidade média do gás em uma determinada seção do tubo e a velocidade média das partículas em uma determinada seção do tubo.

GOMIDE (1983) cita algumas correlações aproximadas para determinação da velocidade de transporte em função da densidade aparente. Recomenda a correlação de Flotronics como estimativa:

$$V = 37\sqrt{\rho} \quad (0,15 \leq \rho \leq 2 \text{ t/m}^3) \quad 2.2$$

Em que V é a velocidade em m/s e ρ a densidade aparente da partícula em t/m^3 .

A Tabela 2.5 mostra as velocidades indicadas por GOMIDE (1983) para alguns materiais.

Tabela 2.5 – Velocidades de alguns materiais (GOMIDE, 1993)

Material	V (m/s)	Material	V (m/s)
Algodão	22,9	Cortiça	15,2
Areia	35,6	Lã	20,3
Areia de Jato	20,3	Papel	25,4
Borracha em pó	22,9	Poeiras metálicas	9,1
Café em Grãos	17,8	Pó de chumbo	22,4
Calcário moído	25,4	Pó de fundição	22,9
Carvão fino	20,3	Raspas de metal	25,4
Cereais em grão	28,4	Serragem seca	15,2
Cimento	35,6	Trigo	29,5

As expressões 2.3 e 2.4 usadas por GOMIDE apud DALLA VALLE (1963) consideram a densidade e o diâmetro D_p das partículas (variando entre 1 e 5 mm). As velocidades obtidas com estas expressões são bem inferiores às fornecidas pela correlação anterior e às da Tabela 2.5, isto pelo pequeno tamanho das partículas empregadas.

$$V_h = 8,45 \cdot \frac{\rho}{\rho + 1} \cdot D_p^{0,4} \quad 2.3$$

$$V_v = 1,07 \cdot D_p^{0,2} \cdot V_h \quad 2.4$$

sendo: V_h a velocidade requerida para transportar o sólido na horizontal (m/s)

V_v a velocidade necessária para transporte na vertical

ρ a densidade aparente (t/m^3)

D_p o diâmetro das partículas (mm)

A velocidade de transporte (V em m/s) ainda pode ser calculada usando a expressão adaptada por GOMIDE (1983) do Fan Engineering para unidades métricas:

$$V = (V_f) + (V_m) \quad 2.5$$

$$V = (4,11 \cdot \sqrt[3]{\rho} \cdot \sqrt{D_p}) + (23,4 \cdot \sqrt{\rho}) \quad 2.6$$

Em que: V_f é a velocidade de flutuação do fluido em trechos verticais e horizontais

V_m é a velocidade de transporte do material

ρ é a densidade aparente do sólido (t/m^3)

D_p é o diâmetro das partículas (mm)

2.4.3.1 Velocidade de afogamento no transporte vertical

MOLODTSOF e MOTTE (2001) definem como velocidade de gás mínima de transporte pneumático vertical, aquela requerida para transportar em fase diluída os sólidos em suspensão.

A velocidade de afogamento é utilizada para marcar o limite entre a fase diluída e a fase densa em tubos verticais, apesar de não ser uma definição muito clara.

É comum e prático relacionar a velocidade do gás com a queda de pressão (perda de carga) para o transporte pneumático de um dado tipo de sólido.

Conforme RHODES (2004), a queda de pressão total por comprimento de linha de transporte tem em geral, seis componentes:

1. queda de pressão devido à aceleração do gás;
2. queda de pressão devido à aceleração da partícula;
3. queda de pressão devido à fricção do gás no tubo;
4. queda de pressão relacionada à fricção dos sólidos com a tubulação;
5. queda de pressão devido à carga estática dos sólidos;
6. queda de pressão devido à carga estática do gás.

A Figura 2.15 apresenta o diagrama de fase para transporte vertical de fase diluída, relacionando o gradiente de pressão por unidade de comprimento ($\Delta P / \Delta L$) e a velocidade do gás.

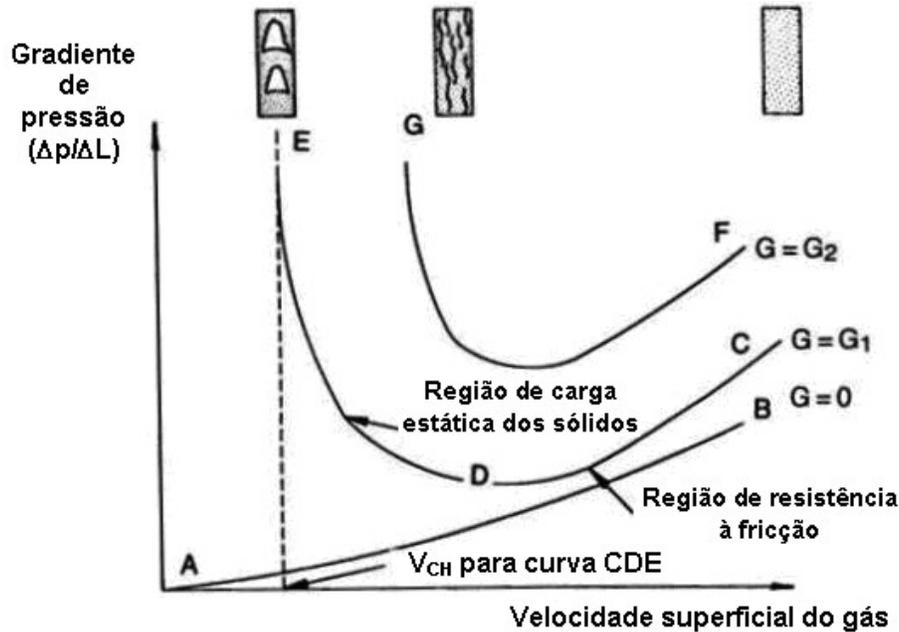


Figura 2.15 - Diagrama de fase para transporte vertical de fase diluída, mostrando a relação geral entre gradiente de pressão $\Delta P / \Delta L$ e a velocidade do gás. V_{CH} é a velocidade de afogamento (“chocking”) – (RHODES, 2004 - www.ufrnet.br).

A curva AB representa a perda de pressão por atrito devida ao escoamento do gás sozinho em uma linha de transporte vertical.

A curva CDE é para um fluxo de sólidos a taxa de alimentação, G_1 .

A curva FG é para uma vazão de alimentação mais alta, G_2 .

No ponto C a velocidade do gás é alta, a concentração é baixa e a resistência do atrito entre o gás e a parede do tubo predomina. À medida que a velocidade do gás é reduzida, a resistência do atrito diminui, mas como a concentração da suspensão aumenta, a carga estática exigida para suportar estes sólidos aumenta. Se a velocidade do gás é reduzida a um valor abaixo do ponto D, então o aumento na carga estática excede em valor a diminuição na resistência por atrito e $\Delta P/\Delta L$ sobe novamente.

Na região DE a velocidade decrescente causa um aumento rápido na concentração de sólidos e é alcançado um ponto em que o gás não pode mais arrastar todos os sólidos. Neste ponto, forma-se na linha de transporte um leito fluidizado deslizante (“slugging”). O fenômeno é conhecido como "afogamento" e normalmente é acompanhado por grandes flutuações de pressão.

A velocidade de afogamento, VCH é definida como a mais baixa velocidade na qual essa linha de transporte pode operar em fase diluída na vazão mássica de alimentação de sólidos G_1 . A uma vazão mássica de alimentação de sólidos mais alta, G_2 , a velocidade de afogamento é mais alta. Esta velocidade marca o limite entre transporte pneumático vertical de fase diluída e o transporte de fase densa. Note que o afogamento pode ser alcançado diminuindo a velocidade do gás a uma vazão mássica de sólidos constante, ou aumentando a vazão de sólidos a uma velocidade de gás constante.

KNOWLTON, MOUNTZIARIS e JACKSON (1986) recomenda a correlação de PUNWANI, MODI e TARMAN (1976) para predizer a velocidade de afogamento que leva em conta o efeito da densidade do gás.

2.4.3.2 Velocidade de saltitação no transporte horizontal

No transporte horizontal SCHIAVON (2000) considera a determinação da velocidade de saltitação um fator importante para o projeto de um sistema pneumático, pois indica a mínima velocidade do gás para que as partículas sejam transportadas com a máxima economia de energia e sem causar o entupimento da tubulação. No entanto, a predição dessa velocidade é muito complexa devido às diferentes definições de velocidade de saltitação existentes na literatura, os diferentes mecanismos que ocorrem no escoamento dependentes da relação entre o tamanho da partícula e a espessura da camada limite e os efeitos da variação da concentração de particulados na linha de transporte.

ZENZ (1949) apud MARCUS *et al* (1990) apresentam quatro definições para a velocidade de saltitação para uma única partícula em transportador horizontal:

- 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

Estas definições são tomadas para uma concentração de sólidos nula. Os ensaios realizados por ZENZ (1949) mostraram que a velocidade dada pela definição (d) pode ser de 2,0 a 2,5 vezes maior que a velocidade obtida pela definição (a). Portanto, nota-se uma discrepância muito grande da literatura existente e a dificuldade de sua normalização.

SCHIAVON (2000) comenta que o fator mais importante na predição da velocidade de saltitação é o perfil de velocidades do gás próximo à parede na seção onde está ocorrendo o salto. Este perfil de velocidade é de difícil medição devido à grande influência das partículas sobre o mesmo.

Na literatura foram encontradas várias definições de velocidade de saltitação como pode ser visto a seguir. KLINZING e CABREJOS (1994) definem a velocidade de saltitação como a mínima velocidade requerida para o transporte de sólidos sem a formação da camada estacionária na parte inferior da tubulação. AGARWAL e DHODAPKAR (2004) relatam que para uma alimentação de sólidos constante, existe um ponto de pressão mínima que corresponde a velocidade de saltitação. Para OCHI e TAKEI (1995), a velocidade de saltitação é a velocidade em que a perda de carga total por unidade de comprimento para uma dada vazão torna-se mínima (determinada pelas medições de perda 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) citam várias definições para velocidade de saltitação, como a velocidade de aceleração, a velocidade crítica, a velocidade inicial de mistura e a velocidade para a mínima perda de carga.

SAVAGE, PFEFFER e ZHAO (1996) relatam que os dois parâmetros que caracterizam o transporte pneumático de materiais sólidos em tubulações horizontais são as velocidades de saltitação e arraste. A primeira pode ser definida como a mínima velocidade do gás onde as partículas começam a se sedimentar no fundo do tubo. Eles definem a velocidade de arraste como a velocidade do gás requerida para re-suspender as partículas inicialmente em repouso na parte inferior da tubulação horizontal. As suas relações também estão descritas qualitativamente por KLINZING e CABREJOS apud SAVAGE, PFEFFER e ZHAO (1996). Eles apresentaram correlações de fatores tais como, o tamanho da partícula (maiores que 100 μm), a densidade do gás, e a viscosidade do gás com a velocidade de arraste. KLINZING e CABREJOS (1991) concluíram que a velocidade de arraste é proporcional à raiz quadrada do diâmetro da partícula e à densidade da partícula a três quartos (75%) do consumo de energia. Afirmou também que a velocidade de arraste é inversamente proporcional a raiz quadrada da densidade do gás e não é influenciada pela viscosidade do gás.

CURTIS, KIMBERLY e PARK (2003) investigaram a correlação entre as características das partículas e a velocidade de arraste empregando partículas menores de 35 μm de diâmetro. Citam que existe uma forte correlação entre o tamanho da partícula e a força dominante a qual determina a importância da velocidade de aceleração. O estudo dos efeitos do tamanho das partículas mostrou a existência de uma velocidade mínima de arraste. Acima deste mínimo, efeitos inertes requerem velocidades altas para o arraste de partículas grandes. Abaixo deste mínimo, as interações partícula-partícula tornam-se mais significantes e maiores velocidades são requeridas para separar as partículas.

A Figura 2.16 mostra os diferentes tipos de regime de escoamento e a diferença entre a velocidade de saltitação e arraste de partículas sólidas. Este gráfico relaciona o número de Froude (Fr_p) com o número de Reynolds das partículas (Re_p):

$$Fr_p = \frac{U_p}{\sqrt{gd_p}} \quad 2.7$$

$$Re_p = \frac{\rho_p d_p U_g}{\mu_g} \quad 2.8$$

Sendo: U_p e U_g as velocidades da partícula e do gás, respectivamente; d_p o diâmetro da partícula; ρ_p a densidade da partícula; μ_g a viscosidade do gás e g a aceleração da gravidade.

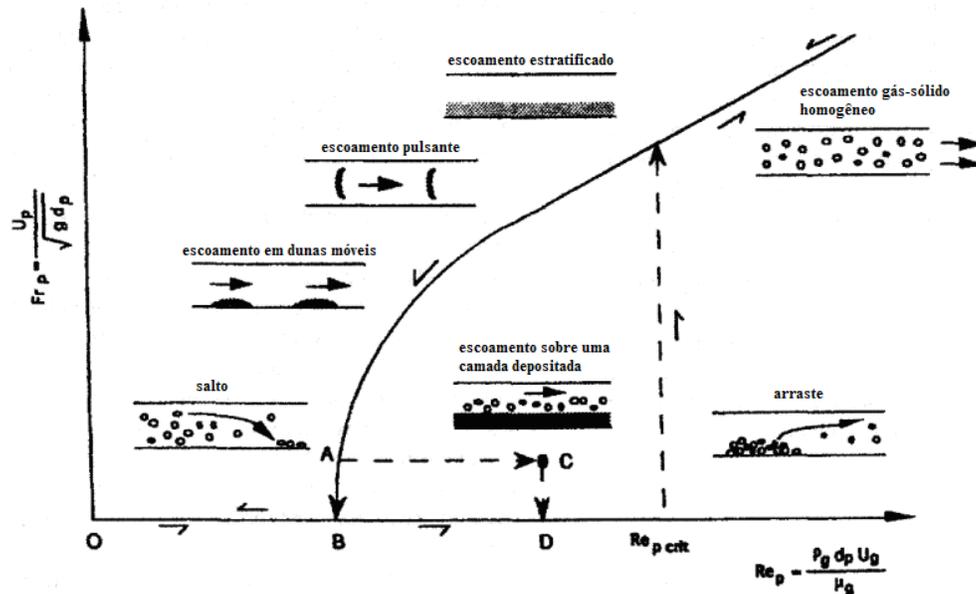


Figura 2.16 – Modelo conceitual de diferentes regimes de escoamento em sistemas de dutos horizontais, conforme SAVAGE, PFEFFER e ZHAO (1996)

As partículas inicialmente formam uma camada suportada ou depositada no fundo do tubo com velocidade do gás nula (ponto O). Observa-se na Figura 2.16 que um ponto pode ser alcançado pelo aumento da velocidade média do gás onde as partículas do topo da camada se reorientam e movimentam-se lentamente sem serem arrastadas pelo fluxo de gás. Como a velocidade média do gás continua aumentando o estado de repouso das partículas torna-se instável e certas partículas começam a ser arrastadas e separadas da superfície da camada. Se a velocidade do gás aumentar um pouco mais, um ponto é atingido na qual partes das partículas se separam da superfície e a camada sofre erosão. Estes fenômenos de arraste se iniciam quando o número de Reynolds das partículas atinge um valor crítico, $Re_{p\text{crit}}$. Depois as partículas são suspensas e transportadas em uma suspensão gás-sólido homogênea com uma dada velocidade das partículas. Além disso, um

aumento posterior na velocidade média do gás aumentará a velocidade das partículas e o número de Froude das mesmas.

A velocidade de saltitação difere-se da velocidade de arraste em relação à posição inicial das partículas. Uma mudança no padrão de escoamento pode ser observada quando a velocidade média dos gases de uma suspensão homogênea gás-sólido decresce lentamente. Nota-se que abaixo do número de Reynolds crítico da partícula, instabilidades devido a uma baixa velocidade média do gás afetam o comportamento das partículas sendo transportadas em suspensão dentro da tubulação e diversos regimes de escoamento podem se desenvolver antes da saltitação, por exemplo, escoamento estratificado, pulsante e dunas móveis.

Se a velocidade média do gás decresce ainda mais, um ponto é alcançado no qual as partículas saem da suspensão e depositam-se no fundo da tubulação (ponto A), denominada de saltitação. Esta condição sempre ocorre abaixo do número de Reynolds crítico para o arraste. Dois fenômenos diferentes podem ser vistos neste ponto: algumas partículas permanecem em repouso no fundo da tubulação formando dunas enquanto outras continuam escoando, deslizando e saltando sobre estas dunas fixas, causando um arraste da partícula até que uma condição de equilíbrio seja alcançada, na qual as partículas são transportadas sobre o topo da camada depositada. Entretanto, a velocidade média do gás aumenta devido à redução da área transversal livre, e um transporte permanente é restabelecido no topo da camada depositada (linha A-C). O número de Reynolds da partícula no sistema de transporte denso está cerca de 20% abaixo do valor crítico, confirmando que a presença de sólidos na corrente causa a fácil remoção da camada depositada. A seqüência dos padrões de fluxo do gás-sólido pode ser observada para velocidade do gás média abaixo da velocidade de saltitação: dunas em movimento, depositadas e camada depositada. Conforme a velocidade média do gás continua a diminuir, não é mais possível um escoamento gás-sólido e as partículas passam a se acumular na tubulação aumentando o risco de entupimento.

Na linha A-C da Figura 2.16 ocorre o transporte pneumático com regime de escoamento pistonado para partículas de tamanho grande, já que para partículas de tamanho pequeno é mais provável que ocorra o bloqueio da tubulação. Assim, o transporte pneumático é interesse na prática industrial devido a diversas características, tais como:

baixo consumo de energia, razão alta de fluxo mássico de sólidos e baixa fricção das partículas na tubulação. Entretanto, o risco de entupimento do tubo pode ser desprezado somente para partículas grandes com formato uniforme e de superfície lisa e o regime de operação também requer medidas adicionais, tal como descrito MOLERUS apud SAVAGE, PFEFFER e ZHAO (1996), incluindo uma vibração axial onde o intervalo de tempo entre os ciclos de vibração é escolhido de forma a propulsionar as partículas sólidas dentro da tubulação.

SCHIAVON (2000) diz que o transporte de alguns materiais sólidos granulares em um modo de escoamento não suspenso e a baixa velocidade tem muitos benefícios na operação de sistemas de transporte pneumático. Infelizmente, muitos materiais sólidos granulares não podem ser transportados em um escoamento não suspenso. Isto tem levado ao desenvolvimento de um número de sistemas especificamente planejados para superar esta limitação. BARTON apud SAVAGE, PFEFFER e ZHAO (1996) apresentam uma investigação sobre o uso de tubulações de ar de derivação com o meio de transporte de materiais, que poderiam de outro modo requerer uma alta velocidade em um modo de escoamento não suspenso.

Segundo RHODES (2004) a relação geral entre a velocidade do gás e o gradiente de pressão por comprimento ($\Delta P/\Delta L$) para uma linha de transporte horizontal pode ser vista na Figura 2.17.

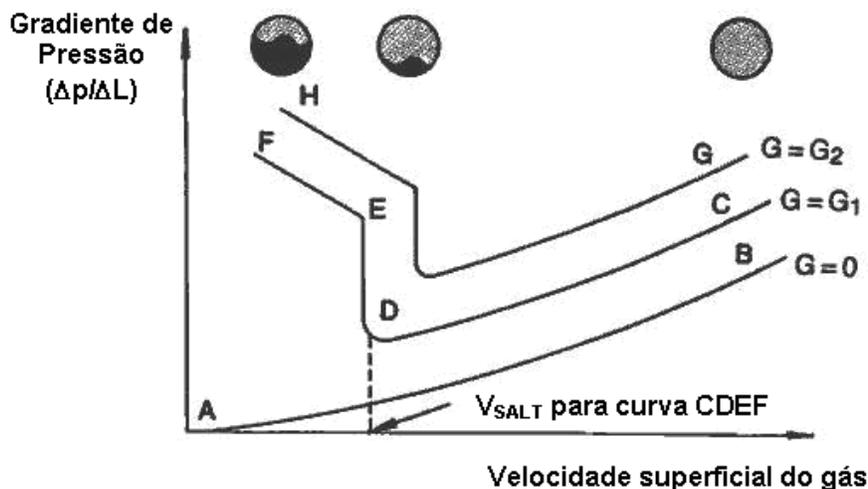


Figura 2.17 - Diagrama de fase para transporte pneumático horizontal de fase diluída (RHODES, 2004 – www.ufmnet.br).

A linha AB representa a curva obtida para gás escoando sem sólido na tubulação, CDEF representa o fluxo de sólidos, G_1 , e a curva GH o fluxo a uma vazão mássica de alimentação de sólidos mais alta, G_2 .

No ponto C, a velocidade do gás é suficientemente alta para conduzir todos os sólidos numa suspensão muito diluída. As partículas sólidas são impedidas de sedimentar nas paredes do tubo pelos redemoinhos turbulentos, gerados na corrente de gás. Se a velocidade do gás é reduzida, enquanto a taxa de alimentação de sólidos é mantida constante, a resistência de fricção e $\Delta P/\Delta L$ decrescem. Os sólidos se movem mais lentamente e a concentração de sólidos aumenta. No ponto D a velocidade de gás é insuficiente para manter os sólidos em suspensão e os sólidos começam a sedimentar no fundo do tubo. A velocidade de gás à qual isto acontece é chamada de velocidade de saltitação. Uma posterior diminuição na velocidade do gás resulta numa rápida "deposição" de sólidos e rápido aumento em $\Delta P/\Delta L$ à medida que a área disponível para fluxo de gás é restringida pela sedimentação de sólidos. Na região E e F alguns sólidos podem se mover em fluxo de fase densa, ao longo do fundo do tubo, enquanto outros seguem em fluxo de fase diluída no gás, na parte superior do tubo. A velocidade de pulsação marca o limite entre fluxo de fase diluída e fluxo de fase densa no transporte pneumático horizontal.

Não é possível prever teoricamente as condições nas quais ocorrerá escoamento pistonado (saltitação). Porém, muitas correlações obtidas a partir de dados experimentais para prever a velocidade de saltitação estão disponíveis na literatura. A correlação de ZENZ (1964) que é freqüentemente usada requer o uso de um gráfico. LEUNG e JONES (1978) afirmam que ela tem um erro médio de $\pm 54\%$. A correlação de RIZK (1973), baseada em uma aproximação semi-teórica, é consideravelmente mais simples, mas apresenta uma margem de erro semelhante. É representada por:

$$V_{gs} = \left[\frac{w_s \cdot 10^\delta}{A \cdot \rho_f} \cdot (\sqrt{g \cdot D})^x \right]^{\frac{1}{x+1}} \quad 2.9$$

$$\delta = 1,44 \cdot dp + 1,96 \quad 2.10$$

$$x = 1,1 \cdot dp + 2,5 \quad 2.11$$

sendo: V_{gs} a velocidade de saltitação em m/s.

w_s a vazão mássica de sólidos em kg/s

A a área em m^2

ρ_f a densidade do fluido em kg/m^3

D o diâmetro da tubulação em m

g a aceleração da gravidade em m/s^2

MATSUMOTO (1975) fornece a correlação para $dp \geq dp^*$.

$$\frac{dp^*}{D} = 1,39 \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right)^{-0,74} \quad 2.12$$

$$\frac{w_s}{w_g} = 0,373 \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right)^{1,06} \cdot \left(\frac{Fr_p}{10} \right)^{-3,7} \cdot \left(\frac{Fr_s}{10} \right)^{3,61} \quad 2.13$$

$$Fr_s = \frac{V_{gs}}{\sqrt{g \cdot D}} \quad 2.14$$

$$Fr_p = \frac{V_t}{\sqrt{g \cdot dp}} \quad 2.15$$

$$V_t = 1,47 \cdot \frac{\sqrt{g \cdot dp \cdot (\rho_p - \rho_f)}}{\rho_f} \quad 2.16$$

Rearranjando, tem-se:

$$V_{gs} = \left[\left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right)^{-1,7} \cdot \left(\frac{Fr_p}{10} \right)^{3,7} \cdot \frac{w_s \cdot 10^{3,71} \cdot (\sqrt{g \cdot D})^{3,71}}{(1,47)^3 \cdot (A \cdot \rho_f)} \right]^{\frac{1}{3,71+1}} \quad 2.17$$

Em que V_{gs} é a velocidade de saltitação em m/s

Fr_p é o número de Froude das partículas

V_t é a velocidade das partículas em m/s

d_p é o diâmetro das partículas em m

d_p^* é o diâmetro crítico em m

ρ_f a densidade do fluido em kg/m^3

ρ_p a densidade das partículas em kg/m^3

D é o diâmetro da tubulação em m

A é a área m^2

g é aceleração da gravidade em m/s^2

2.4.4 Previsão da perda de carga

A previsão da perda de carga em um sistema pneumático pode ser determinada por diversas equações empíricas reportadas na literatura. GOMIDE (1983) sugere prever a perda de carga por atrito para trechos horizontais, por unidade de comprimento ($\Delta P/L$), para escoamento de ar num duto de diâmetro e velocidade conhecidas, por meio da equação empírica 2.18:

$$\frac{\Delta P}{L} = 1,68 (X + 3,5) \frac{V^{1,8}}{D^{1,22}} \quad (\text{mm/m}) \quad 2.18$$

O valor de X pode ser obtido pela expressão:

$$X = \frac{C}{4,29 \cdot Q} \quad 2.19$$

Em que: V é a velocidade de transporte (m/s)

D é o diâmetro interno do duto (mm)

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

C é a capacidade do sistema (t/h)

Q é a vazão de ar de transporte (m^3/s)

A perda de carga por aceleração do material nos trechos horizontais deverá ser computada sempre que a alimentação seja feita após o ventilador e pode ser representada pela expressão:

$$\Delta P_a = 2,25 X P_v \quad 2.20$$

$$P_v = \text{pressão de velocidade} = \left(\frac{V}{4,043} \right)^2 \text{ mmca, para ar ambiente.}$$

Uma vez que esta perda não existe se o sólido for alimentado após o ventilador, convém multiplicar este valor por um fator de redução Φ , que será igual a 1,0, se o sólido for alimentado depois do ventilador, e menor que 1,0, se o material passar pelo ventilador. Como regra prática utiliza-se $\Phi = 0,5$ se o ponto de alimentação estiver localizado a montante da boca de aspiração.

A perda de carga total é a soma de todas as perdas de carga por atrito, por aceleração e nos demais equipamentos dos sistemas, como silos, ciclones, filtros e outros. A equação 2.21 representa esta perda de carga:

$$\Delta P_t = \left[1,68 \cdot L_t \cdot (X + 3,5) \cdot \frac{V^{1,8}}{D^{1,22}} + 0,138 \phi \cdot X \cdot V^2 + \Delta P_e \right] \cdot 10^{-4} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad 2.21$$

Sendo: L_t o comprimento total (m)

V a velocidade de transporte (m/s)

D o diâmetro interno do duto (mm)

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

Φ o fator de redução

ΔP_e a perda de carga de equipamentos (mm)

Conforme JONES (1988), a queda de pressão total de um sistema está relacionada com a resistência só do ar na linha de fornecimento deste fluido (ΔP), queda de pressão na linha de transporte (ΔP_{conv}) e queda de pressão através de sistemas de

separação gás-sólidos (ΔP_{sep}). A Figura 2.18 ilustra a perda de carga dos elementos para um sistema de pressão positiva.

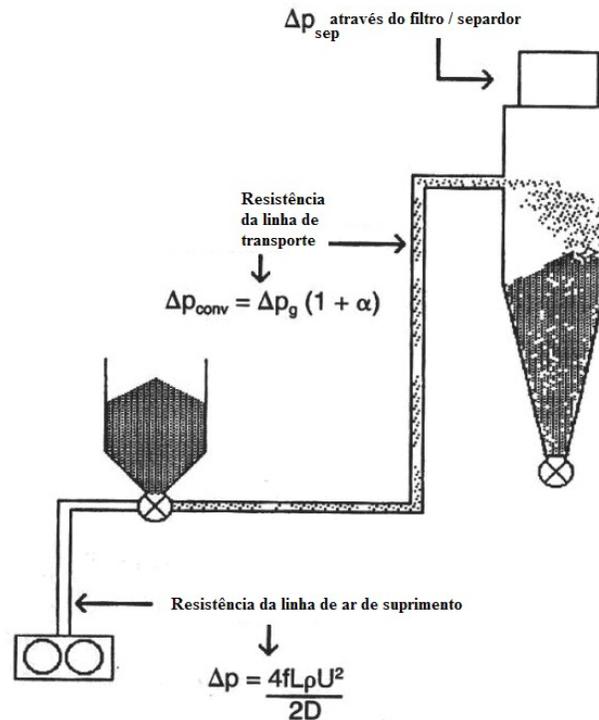


Figura 2.18 – Elementos de queda de pressão para sistema de pressão positiva
(JONES, 1988)

As perdas de cargas do ar de suprimento e da linha de transporte podem ser calculadas a partir das equações 2.22 e 2.23 respectivamente:

$$\Delta p = \frac{4f.L.\rho \cdot U^2}{2D} \quad 2.22$$

$$\Delta p_{conv} = \Delta p_g (1 + \alpha) \quad 2.23$$

Sendo: f o fator de fricção (adimensional)

L o comprimento da linha (m)

ρ a densidade do ar (kg/m^3)

U a velocidade superficial do gás (m/s)

D o diâmetro interno da tubulação(m)

ΔP_g a perda de carga do gás (Pa)

α a fração volumétrica de sólidos (adimensional)

A queda de pressão na linha de transporte é o parâmetro mais crítico de ser determinado. Na prática, o método mais comum baseia-se em experiências anteriores de manipulação de mesmo material ou por meio de testes em escalas pilotos para obtenção de relações entre as principais variáveis do sistema pneumático, a vazão mássica de ar e de sólidos e perda de carga na linha de transporte.

Atualmente, testes pilotos de um material foi considerado o método mais confiável na determinações destas relações. Estes testes podem ser realizados para diversas condições incluindo ambos tipos de transporte em fase densa e diluída. No entanto, não existe modelos aceitáveis para transporte em fase diluída.

No transporte horizontal e vertical de fase diluída a operação com velocidade baixa minimiza a perda de pressão por atrito, porém gera maior desgaste na parte inferior da tubulação.

No transporte de fase diluída a fricção do gás na parede é assumida freqüentemente independente da presença dos sólidos e assim o fator de fricção para o gás pode ser usado (o fator de atrito de Fanning).

Foram apresentadas várias aproximações na literatura para calcular o atrito do sólido na parede. A correlação de KONNO e SAITO (1969) é utilizada para calcular a perda de pressão devido a fricção do sólido no tubo em transporte vertical e a correlação de HINKLE (1953) para calcular esta perda de pressão no transporte horizontal. HINKLE (1953) assume que as partículas perdem impulso por colisão com as paredes do tubo. A perda de pressão devido a fricção sólido-parede é a perda de pressão do gás como resultado da reaceleração dos sólidos.

RIBEIRO (2005) cita que quando as medidas das partículas são pequenas em relação ao diâmetro do tubo, e se as concentrações volumétricas e de massa são muito fracas, pode-se admitir uma concentração espacial média dentro de uma determinada seção da tubulação que é uniforme, sendo possível assimilar que a suspensão fluida é homogênea. Porém, em práticas industriais, esse método não é muito utilizado, tendo em vista que, mesmo em fase diluída, as partículas não são distribuídas uniformemente em uma seção da tubulação.

Quando concentrações volumétricas e de massa não são mais desprezíveis e quando as dimensões das partículas não são pequenas em relação ao diâmetro da tubulação, as trajetórias destas partículas serão diferentes das do gás, especialmente nas zonas de introdução do produto na tubulação de transporte. Essa zona onde acontece a colocação das partículas em velocidade é o ponto de uma perda de pressão bastante elevada. A perda de carga nesta região, como também à jusante do alimentador de partículas, é distintamente superior quando em regime já estabelecido a perda de carga em regiões onde o gradiente de pressão é quase constante.

SOMMERFELD e KUSSIN (2004) realizaram uma análise experimental do comportamento de partículas de vidros em um canal de fluxo horizontal. Os resultados demonstraram a influência do tamanho da partícula, do grau de rugosidade das paredes sobre as concentrações de partículas, os perfis de velocidade e a perda de pressão.

2.4.5 Distribuição das 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 secção transversal do tubo por meio de fotografias, com erros inerentes a não contagem de partículas encobertas (eclipsadas).

2.5 Resumo da revisão bibliográfica

Foi apresentado neste capítulo os principais fundamentos e equipamentos para transporte de sólidos e principais as vantagens e desvantagens, a classificação e os regimes de escoamento do transporte pneumático de partículas. Descreveram-se também as principais unidades industriais de transporte pneumático, as características e parâmetros concernentes às partículas como classificação, velocidade, perda de carga e distribuição na seção transversal dos tubos.

Na literatura não foram encontrados trabalhos que relacionam a perda de carga e a distribuição de sólidos, requisitos fundamentais para a elaboração de projetos otimizados no que concerne ao desgaste dos dutos, para uma das tecnologias mais empregada para o deslocamento de partículas, o transporte pneumático em fase diluída. O projeto de uma unidade de transporte pneumático em fase diluída baseado em um ponto de operação com a otimização da perda de carga e a distribuição mais homogênea de partículas na seção transversal é fundamental para a redução de custos operacionais e de manutenção relacionados ao desgaste da parte inferior dos dutos, grande inconveniente desta importante tecnologia de deslocamento de sólidos.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Equipamentos e acessórios

A vista geral da unidade piloto experimental de transporte pneumático horizontal em fase diluída sob pressão positiva, projetada e construída pela Universidade Santa Cecília (UNISANTA) para coleta de dados, está apresentada nas Figuras 3.1 e 3.2.

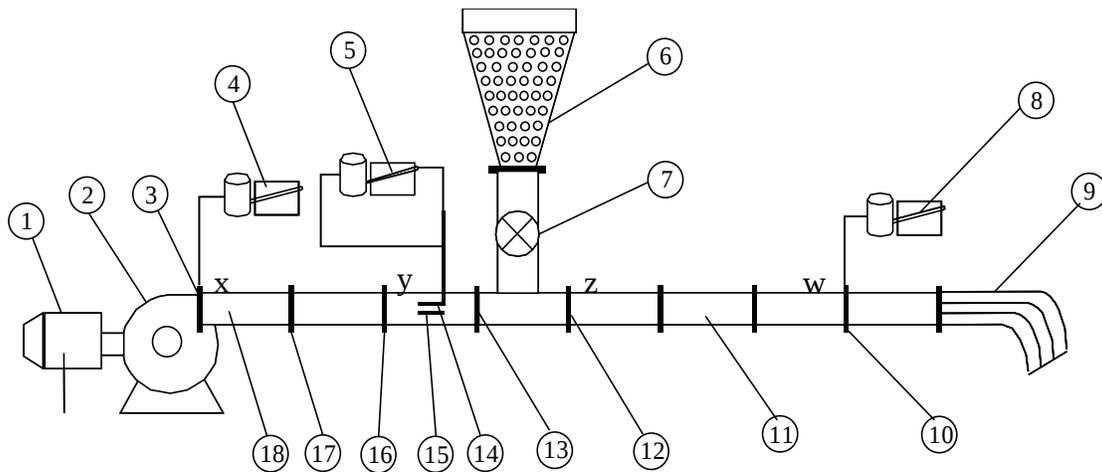


Figura 3.1 – Esquema da unidade piloto de transporte pneumático: 1- motor do ventilador em balanço; 2- ventilador centrífugo; 3- anel piezométrico para tomada de pressão no ponto x; 4- manômetro inclinado para medida de pressão estática na saída do ventilador; 5- manômetro inclinado acoplado a um tubo de pitot para medida das pressões estática, dinâmica e total; 6- silo de armazenagem do sólido; 7- válvula rotativa; 8- manômetro inclinado para medida da pressão estática no duto de descarga; 9- coletor de sólidos; 10- anel piezométrico para tomada de pressão no ponto w; 11- tubulação para o transporte dos sólidos; 12- anel piezométrico para tomada de pressão no ponto z; 13- anel piezométrico para tomada de pressão; 14- tubo de pitot vertical; 15- tubo de

pítot horizontal; 16- anel piezométrico para tomada de pressão no ponto y; 17- direcionador de fluxo (colméia, retificador, estabilizador) e 18- transição de seção quadrada para circular.

As distâncias entre os pontos selecionados x, y, z e w não são equidistantes. Do ponto x ao y a distância é de 1320 mm, do ponto y ao z é de 810 mm, do ponto z ao w é de 1660 mm e do ponto y ao w é de 2650 mm.



Figura 3.2 – Unidade piloto de transporte pneumático horizontal em fluxo diluído

Tubulações de acrílico com diâmetro interno de 117 mm, espessura de 4 mm e comprimento total de 4020 mm foram usadas para determinar a perda de carga em função da velocidade de ar e a distribuição das partículas na seção transversal do duto horizontal (Figura 3.3). Os tubos receberam conexões para os anéis piezométricos utilizados nas medições da queda de pressão. As tubulações foram unidas por flanges confeccionadas de mesmo material com diâmetro interno de 117 mm, externo de 189 mm e espessura de 6 mm. As flanges receberam canais com anéis de borracha para vedação.

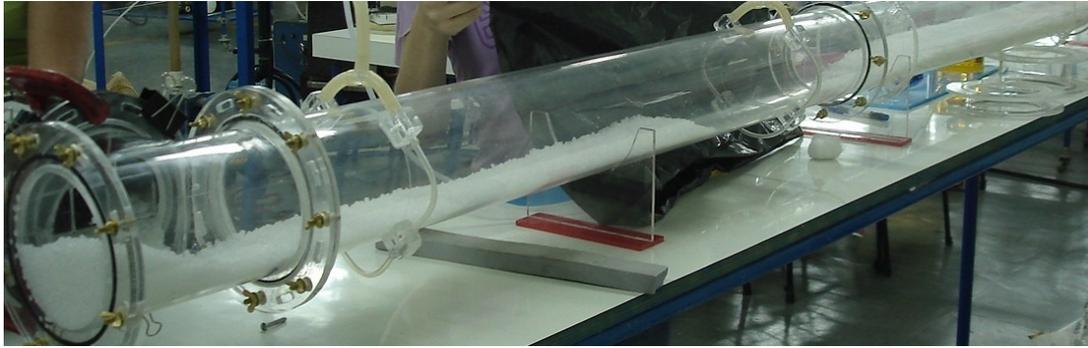


Figura 3.3 – Tubulação de acrílico para o transporte de sólidos

O fluxo de ar foi introduzido ao sistema por um ventilador centrífugo (Figura 3.4) 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 adicionou dois rolamentos extras para manter o motor em balanço com carcaça móvel visando determinar a potência consumida, conforme Figura 3.5.



Figura 3.4- Ventilador centrífugo



Figura 3.5 – Motor em balanço

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, que pode ser visto na Figura 3.6.



Figura 3.6 – Inversor de frequência do motor em balanço

Uma vez que na descarga do ventilador forma uma região de grande turbulência, proporcionando oscilações na leitura das velocidade e pressões, foi instalado no duto de descarga um direcionador de fluxo também denominado de “colméia” ou “retificador” ou “estabilizador” (Figura 3.7).

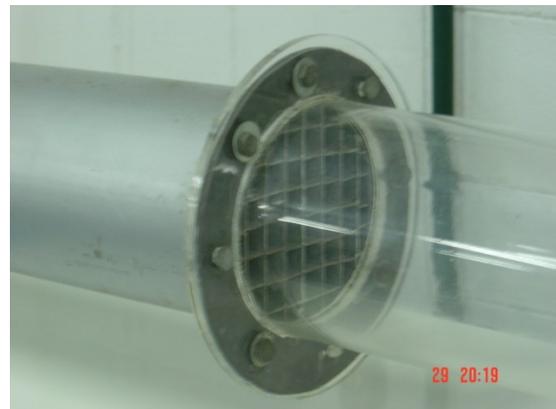
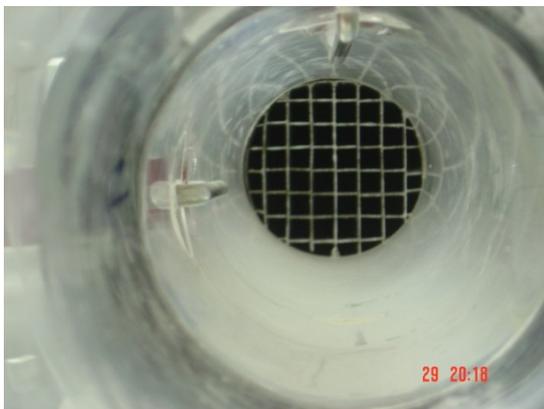


Figura 3.7 - Direcionador de fluxo de ferro galvanizado

A Figura 3.8 detalha as especificações do direcionador de fluxo (normas ASME – Test Code for Fans, 1946).

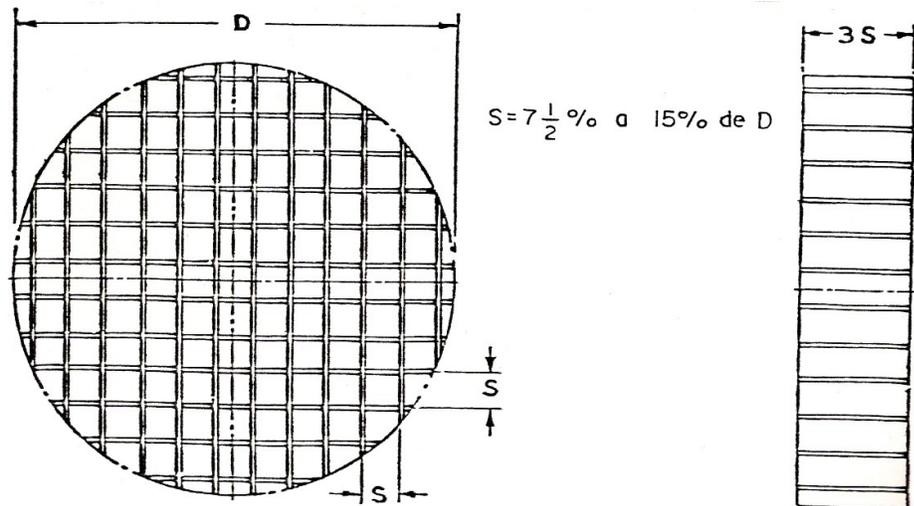


Figura 3.8 – Direcionador de fluxo (ASME, 1946)

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 diâmetro interno de 3 mm (0,125 in, Figura 3.9) 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 3.9 – Tubo de pitot na horizontal e vertical

O medidor do tipo pitot foi constituído por dois tubos coaxiais formando uma Figura em L de comprimento de 190 mm. A parte dos tubos de pitot vertical e horizontal dentro da tubulação foi direcionada para a montante e mantidos (pelos suportes) paralelos a

tubulação. A pressão total foi obtida pelo tubo central do pitot que recebia o impacto da velocidade e a estática foi determinada através dos pequenos orifícios da parede do tubo externo, distantes da ponta do tubo (Figura 3.10).

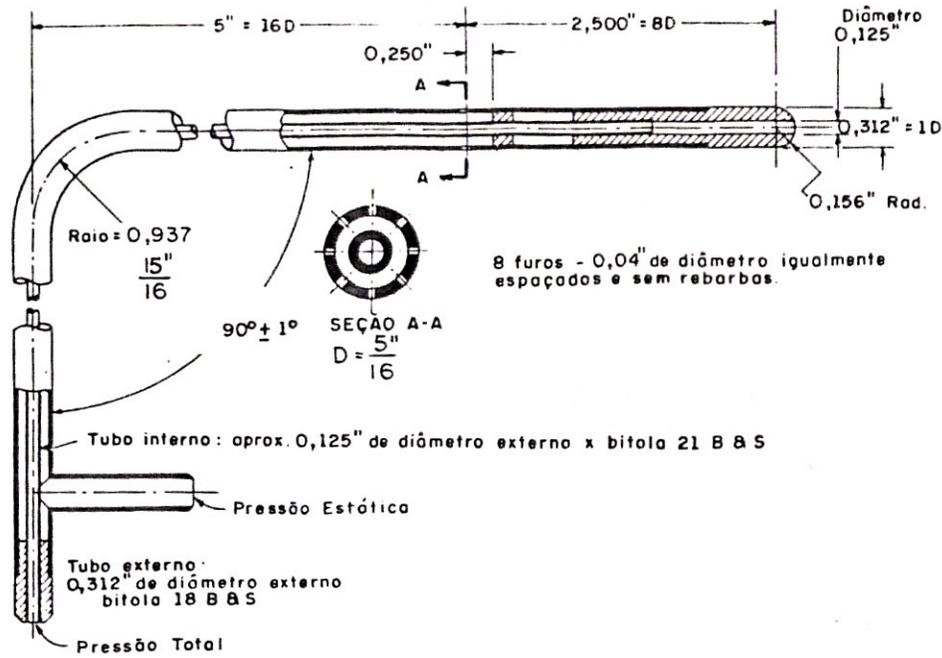


Figura 3.10 – Detalhes construtivos do tubo de pitot

Conforme demonstrado na Figura 3.1, o manômetro inclinado de acrílico (3 unidades) com recipiente de diâmetro interno de 96,7 mm e altura de 140 mm foi preenchido com água e corante para a demarcação do diferencial de pressão. Este medidor de pressão foi utilizado para calcular a pressão estática em vários pontos do sistema pneumático através dos anéis piezométricos. O tubo do manômetro com diâmetro interno de 5,8 mm e comprimento de 297 mm foi mantido em ângulo de 30° , para facilitar a conversão dos valores de deslocamento de água no manômetro para valores de pressão (Figura 3.11).

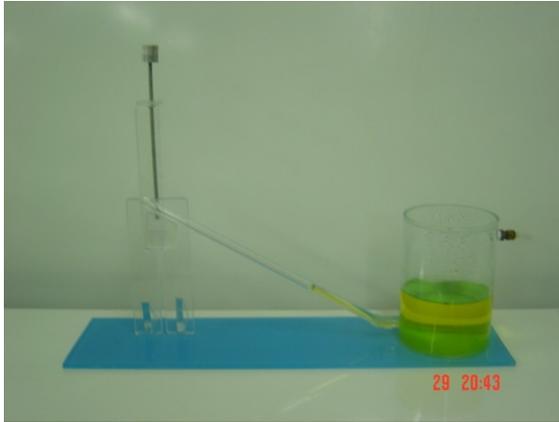
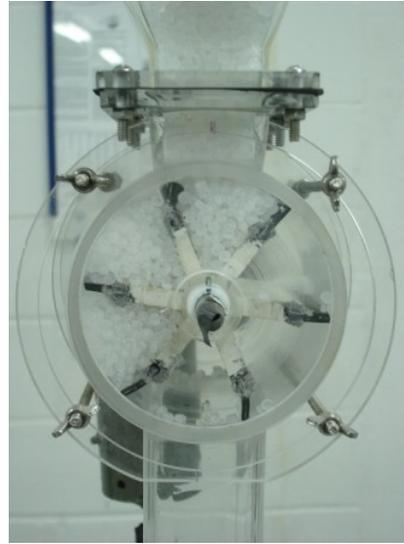


Figura 3.11 – Manômetro inclinado para determinação da queda de pressão

Os sólidos foram deslocados do silo para a linha de transporte (Figuras 3.12) por meio de uma válvula rotativa com carcaça de acrílico com diâmetro interno de 100 mm, parede de 5 mm e comprimento de 92 mm. A válvula (Figura 3.13) continha 6 pás radiais retangulares de PVC de 92 mm por 51,3 mm e 6 mm de largura cada com pontas de borrachas para vedação.



Figuras 3.12 – Silo de armazenagem de sólidos com volume de 11,5 litros



Figuras 3.13 – Válvula rotativa

A válvula rotativa foi acionada por um motor de corrente contínua da marca Diacti de 220 V com potência de 1/7 hp e rotação máxima de 100 rpm (Figura 3.14).



Figura 3.14 – Motor da válvula rotativa

A Figura 3.15 apresenta o potenciômetro da marca Diacti que foi empregado para alterar a rotação da válvula rotativa, permitindo o ajuste da vazão de sólido adicionado na corrente de ar.



Figura 3.15 – Potenciômetro modelo

Os sólidos foram descarregados em um módulo de coleta (Figura 3.16) 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.

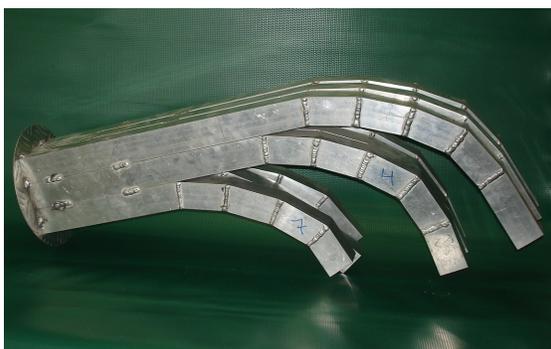


Figura 3.16.a – Vista lateral do coletor, módulo para análise da distribuição das partículas.



Figura 3.16.b – Vista frontal da entrada do coletor, módulo para análise da distribuição das partículas.

Estas bolsas possuíam as seguintes dimensões: 870 mm de comprimento e 300 mm de largura, (Figura 3.17). 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.

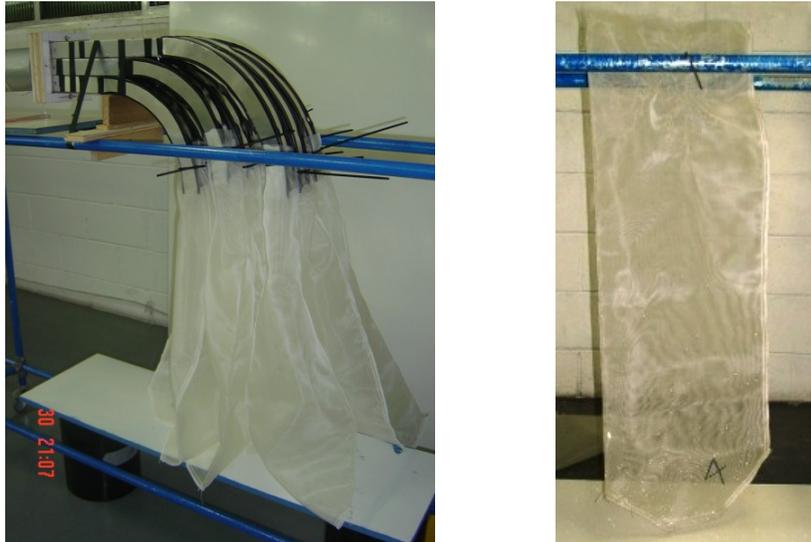


Figura 3.17 – Sacos coletores, tela filtrante de 36 mesh

A Tabela 3.1 resumiu as principais características dos equipamentos do transporte pneumático empregados nos ensaios experimentais.

Tabela 3.1 – Resumo das principais características dos equipamentos

Equipamento	Especificação
Ventilador	Modelo: Ventisilva e Tipo: centrífugo Dimensões: 8” na sucção (circular) e 4” na descarga (quadrada) Pás semi-aberta com 210 mm de diâmetro
Motor do ventilador	Marca: Weg Modelo: 0996 EM17253, \approx 0,96 hp e rendimento de 72,7 %. Rotação nominal: 3450 rpm variável
Tubulação de transporte	Material: acrílico e ferro galvanizado Dimensões: 4” de diâmetro e 4,02 m de comprimento total
Silo armazenador de sólido	Material: acrílico Volume: 11,5 litros
Válvula rotativa	Material: PVC, acrílico e borracha com 6 pás radiais de 92 mm por 51,3 mm e 6 mm de largura. Carcaça: diâmetro interno de 100 mm, parede de 5 mm e comprimento de 92 mm.
Motor da válvula rotativa	Modelo: Diacti Potência: 1/7 hp ou 107 W Rotação: 100 rpm, (máxima, variável por potenciômetro)
Inversor de frequência	Modelo: Mitsubishi Electric Corporation /FR-A024-1 5K-UL Potência: 3 hp
Manômetro inclinado	Recipiente de diâmetro interno de 96,7 mm e altura de 140 mm e volume de 1,1 L. Tubo: diâmetro interno de 5,8 mm e comprimento de 297 mm e ângulo de 30°
Coletor de sólido	Material: alumínio Seção quadrada de 40 mm por 40 mm

O material empregado nos testes experimentais foram os polímeros polietileno de baixa densidade (LDPE), polipropileno e poliestireno (Figura 3.18).

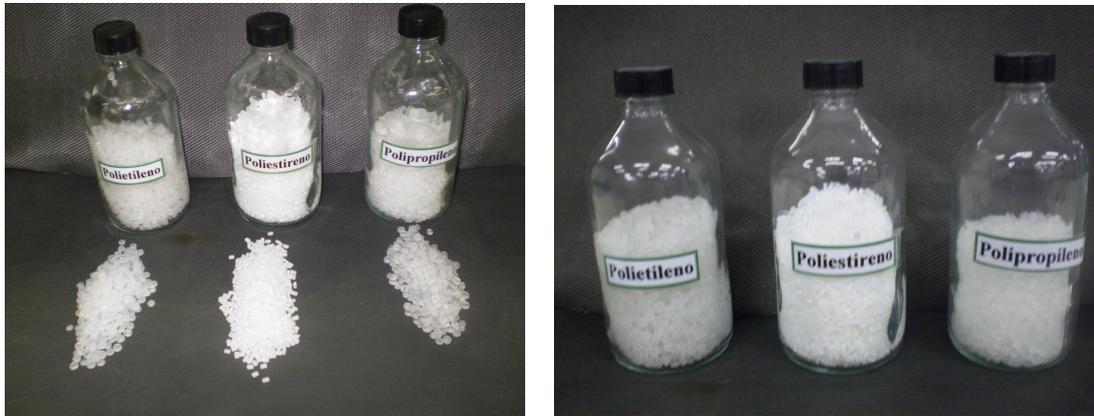


Figura 3.18 – Tipos de polímeros polietileno, poliestireno e polipropileno

As principais propriedades físicas e dimensões dos sólidos empregados são apresentadas na Tabela 3.2. O APÊNDICE A fornece com mais detalhes as características dos polímeros utilizados. O índice de fluidez é bastante empregado para avaliar qualitativamente a massa molecular do polímero. A taxa de extrusão para efeito do índice de fluidez é sempre medida tomando-se por base a quantidade de material, em decigramas, que é extrudada através da matriz por minuto. A densidade aparente foi obtida adicionando-se os polímeros em uma proveta de 2 litros com a mesma altura de queda (funil com tubo de 200 mm).

Tabela 3.2 – Propriedades físicas e dimensões dos polímeros polietileno de baixa densidade (LDPE), polipropileno (PP) e poliestireno (PS).

Tipo	Forma	Diâmetro (mm)	Densidade (g/cm³)	Índice de Fluidez (dg/min)	Fornecedor
Polietileno	Granular achatada	4,4	0,921	0,3	Dow Química do Brasil
Polipropileno	Granular achatada	4,4	0,905	0,1	Braskem
Poliestireno	Granular cilíndrica	3,2	1,050	0,4	BASF

3.2 Método experimental

A curva característica da perda de carga em função da velocidade do ar foi construída para cada tipo de sólido, como polietileno de baixa densidade, poliestireno e polipropileno utilizando como parâmetro as vazões mássicas de sólidos de 0,085 kg/s, 0,13 kg/s e 0,17 kg/s nomeadas respectivamente de G_1 , G_2 e G_3 . A velocidade do ar variou de 0 a 30 m/s e as pressões ao longo do transportador foram medidas por anéis piezométricos acoplados a manômetros inclinados.

A distribuição de cada sólido na tubulação foi determinada pela massa de sólido depositada no módulo de coleta com 9 tubos localizados no final do transportador, numerados como mostra a Figura 3.19. A partir da massa coletada de cada saco (tela filtrante) pode-se calcular a fração mássica por unidade de área e assim verificar a dispersão de cada sólido na seção transversal do duto para todas as velocidades de ar e vazões mássicas de sólidos.

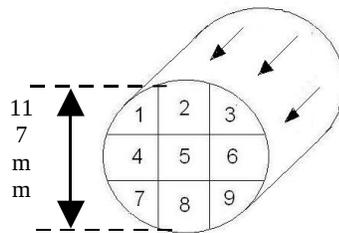


Figura 3.19 – Representação dos tubos no módulo de coleta.

3.2.1 Procedimento para a obtenção da curva experimental

Os testes experimentais do transporte pneumático horizontal de sólidos em fase diluída foram realizadas conforme descrito a seguir:

1. Os equipamentos auxiliares como balança digital, cronômetro, anemômetro e tacômetro foram aferidos para garantir a precisão dos resultados;
2. Verificou-se possíveis vazamentos em todo o sistema;
3. Fixou-se os pontos para tomadas de pressão com o tubo de Pitot horizontal e vertical;
4. Ajustou-se o ângulo dos manômetros inclinados para 30°;

5. Conectou-se os nove coletores na saída do tubo horizontal do transporte pneumático em fase diluída;
6. Fixou-se uma haste perpendicular ao eixo na carcaça do motor do ventilador para a medida da potência;
7. Mediu-se o comprimento do eixo do motor até o extremo da haste;
8. Instalou-se uma balança para medir a força peso exercida pelo motor através da haste para cada velocidade de ar empregada no sistema, conforme Figura 3.23;
9. Introduziu-se as partículas no silo de alimentação de acrílico;
10. Adotou-se um ponto para tomada de pressão no pitot horizontal para medir a pressão total e outro ponto no pitot vertical para a pressão estática;
11. Instalou-se um anemômetro na entrada de ar do ventilador;
12. Ajustou-se o inversor de frequência do motor do ventilador para a vazão de ar requerida;
13. Mediu-se a rotação do motor do ventilador com auxílio de um tacômetro;
14. Mediu-se a velocidade de ar na entrada do ventilador por meio do anemômetro;
15. Anotou-se a força peso gerada pela haste fixa ao motor do ventilador;
16. Anotou-se as pressões estática e total no tubo de pitot acoplados aos manômetros inclinados para determinação da velocidade de ar;
17. Mediu-se as pressões estáticas do ar nos sete pontos de tomadas piezométricas demarcadas pelo deslocamento do líquido no manômetro inclinado;
18. Ajustou-se uma vazão mássica de sólido;
19. Ligou-se a válvula rotativa para alimentação das partículas na linha de transporte pneumático;
20. Acionou-se o cronômetro para determinar o tempo dos testes experimentais;
21. Anotou-se após o estabelecimento da velocidade de ar, as pressões estáticas da mistura ar-sólido nos sete pontos de tomadas piezométricas demarcadas pelo

deslocamento do líquido no manômetro inclinado. A perda de carga foi calculada pela diferença de pressão entre dois pontos;

22. Interrompeu-se o cronômetro, desligou-se a válvula rotativa e o inversor de frequência após o esvaziamento completo do silo de alimentação. O tempo de duração dos ensaios foi de no máximo 2 min;

23. Retirou-se os nove coletores acoplados ao distribuidor e registrou-se as massas do material presente em cada uma das bolsas;

24. Verificou-se a distribuição do sólido em análise na seção transversal do duto a partir de cálculos relacionando a fração mássica por unidade de área em cada coletor;

25. Repetiu-se o mesmo procedimento para outras variáveis do sistema, como vazão mássica de sólido, velocidade de ar e tipo de material empregado.

26. Realizou-se também todos os experimentos em duplicata.

É importante mencionar que, em alguns casos, onde a velocidade de ar não foi suficiente para transportar todo o material, ocorreu um acúmulo na seção mais próxima a alimentação. Nesse momento parou-se a válvula rotativa de alimentação, interrompeu-se o cronômetro e o inversor de frequência.

Mediu-se as massas obtidas nas bolsas e também a massa acumulada na tubulação. Para retirar essa massa, aumentou-se a frequência até esvaziar totalmente a tubulação. A determinação da quantidade de massa que restou no silo de alimentação foi realizada pela diferença entre a massa inicial de alimentação e as massas obtidas na pesagem das bolsas e acúmulo.

A Tabela 3.3 apresenta o resumo das condições operacionais do transportador pneumático empregadas durante os testes experimentais.

Tabela 3.3 – Resumo das condições operacionais

Velocidade do ar (m/s)	Vazão de sólidos (kg/s)	Tipo de material
-------------------------------	--------------------------------	-------------------------

0 - 30	0,085 / 0,13 / 0,17	polietileno / poliestireno / polipropileno
--------	---------------------	---

3.3 Fundamentos teóricos para o tratamento dos dados

3.3.1 Perda de carga entre dois pontos da tubulação horizontal (ΔP)

A Figura 3.20 apresenta o esboço de um tubo com as tomadas de pressão 1 e 2.



Figura 3.20 – Balanço de energia mecânica em trecho reto

O balanço de energia mecânica (equação 3.1) entre os pontos 1 e 2 pode ser empregada a partir das hipóteses (MORAES Jr. D; SILVA, E.L.; MORAES, M.S, 2008):

- Escoamento em regime permanente;
- Apenas uma entrada e uma saída;
- O fluido que entra por uma área e sai por outra no volume de controle é normal às respectivas áreas;
- Não há variação significativa em cada área da densidade, entalpia e desnível;
- Sem variação significativa de temperatura entre a entrada e a saída;
- Fluido incompressível;

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + W = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + l_{w_{1-2}} \quad 3.1$$

sendo: P_1 e P_2 a pressão absoluta em kgf/m^2

V_1 e V_2 a velocidade em m/s

Z_1 e Z_2 o desnível ou altura em relação a um plano de referência em m

γ o peso específico do fluido em kgf/m^3

g a aceleração da gravidade em m/s^2

W o trabalho de eixo em m

$l_{w_{1-2}}$ 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:

1. Velocidades iguais:

$$V_1 = V_2 = 0$$

2. Tubo horizontal:

$$Z_1 = Z_2 = 0$$

3. Sem trabalho de eixo entre os pontos (bomba ou turbina):

$$W = 0$$

A equação 3.1 resume-se a:

$$l_{w_{1-2}} = \frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma} \quad \text{ou:} \quad l_{w_{1-2}} = \frac{\Delta P}{\gamma} \quad 3.2$$

Portanto, a perda de carga entre os pontos 1 e 2 é a diferença de pressão estática destas tomadas.

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

A Figura 3.21 representa o manômetro inclinado usado para medição das pressões estáticas nos pontos de análise por meio de anéis piezométricos.

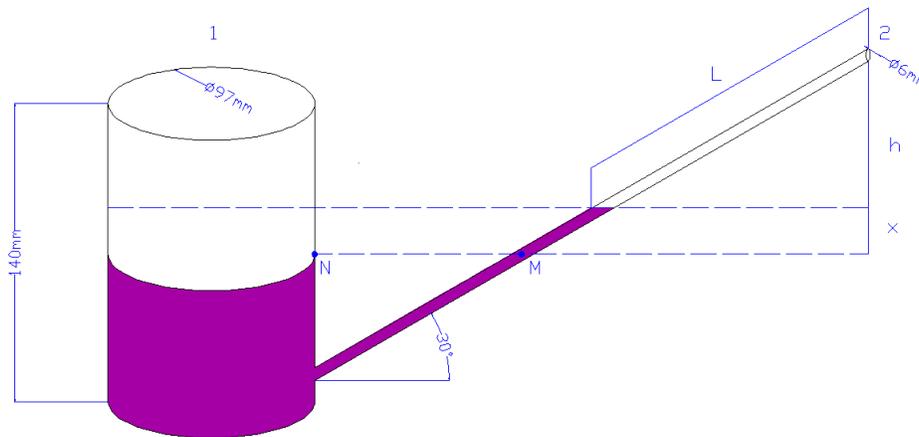


Figura 3.21 – Manômetro inclinado para tomadas de pressão, sendo A a área da seção do reservatório e a a área do tubo.

Aplicando a lei de Pascal e a de Stevin nos pontos N e M tem-se:

$$P_N = P_M \quad 3.3$$

$$P_1 = \rho \cdot g \cdot h + \rho \cdot g \cdot x + P_2 \quad 3.4$$

$$P_1 - P_2 = \rho \cdot g (h + x) \quad 3.5$$

$$h = L \cdot \text{sen} \theta \quad 3.6$$

$$A \cdot x = a \cdot L \quad (\text{volume deslocado no "reservatório" e no tubo "inclinado"}) \quad 3.7$$

$$x = \frac{a \cdot L}{A} \quad 3.8$$

$$P_1 - P_2 = \rho \cdot g \left(L \cdot \text{sen} \theta + \frac{aL}{A} \right) \quad 3.9$$

$$P_1 - P_2 = \rho \cdot g \cdot L \left(\text{sen} \theta + \frac{a}{A} \right) \quad 3.10$$

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot L \left(\text{sen} \theta + \frac{a}{A} \right) \quad 3.11$$

Sendo: ΔP a diferença de pressão em N/m^2 (pascal, Pa)

ρ a densidade da água em kg/m^3

g a aceleração da gravidade em m/s^2

L o comprimento da variação da água no tubo em m (Figura 3.20)

θ o ângulo de inclinação

a a área da seção do tubo em m^2

A a área da seção do recipiente em m^2

No caso em estudo a equação 3.11 pode ser simplificada uma vez que o diâmetro interno do tubo é de 5,8 mm e o diâmetro do recipiente de 96,7 mm. A relação a/A é desprezível.

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot L \cdot (\text{sen}\theta) \quad 3.12$$

Para $\text{sen } 30^\circ = 0,5$ tem-se

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot L \cdot 0,5 \quad 3.13$$

3.3.3 Velocidade do ar no duto de descarga e vazão determinada pelo tubo de pitot

O tubo de pitot normalmente é utilizado para medir a velocidade pontual de uma corrente fluida. É possível, entretanto, fazer uma exploração das velocidades locais em vários pontos de uma canalização fechada e deduzir a vazão. Durante a exploração é necessário assegurar-se que a vazão seja fixa.

Vários pontos de medição podem ser escolhidos ao longo do raio ou da coordenada, admitindo-se que cada ponto de medição de velocidade seja representativo de uma área de influência. Existem diversos métodos de escolha desses pontos de medição. A ASME recomenda o método das centróides de áreas iguais (Figura 3.22) para se fixar esses pontos de medição.

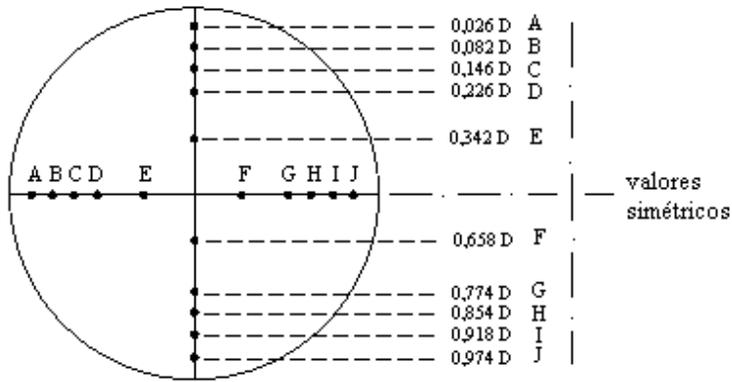


Figura 3.22 – Pontos de tomadas de pressão com tubo de pitot pelo método das centróides de áreas iguais

A velocidade do ar usando o método das centróides de áreas iguais com tubo de pitot (ASME) é dado por:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot \rho_{\text{água}} \cdot \overline{P}_{dc}}{\rho_{\text{ar}}}} \quad 3.14$$

Sendo: g a aceleração da gravidade em m^2/s

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

\overline{P}_{dc} a média da pressão dinâmica corrigida no tubo de pitot em mca

ρ_{ar} a massa específica do ar em kg/m^3

A média da pressão dinâmica corrigida no tubo de pitot, conforme ASME, é calculada por:

$$\overline{P}_{dc} = \overline{P}_d \cdot \left(\frac{10 \cdot \cdot}{r_0} \right)^r \cdot \frac{1,2}{\rho_0} \quad (\text{mca}) \quad 3.15$$

Nesta equação:

\overline{P}_d é a média da pressão dinâmica no tubo de pitot em mca

r_0 é a rotação do rotor em rpm

ρ_0 é a massa específica do ar seco em $kg \text{ ar seco} / m^3$

A equação a seguir fornece a pressão dinâmica no tubo de pitot (ASME):

$$\overline{Pd} = \left[\left(\sum_{i=1}^n \sqrt{P_{dh}} + \sum_{i=1}^n \sqrt{P_{dv}} \right) / (2 \cdot n) \right]^2 \quad (\text{mca}) \quad 3.16$$

Sendo:

P_{dh} a pressão dinâmica horizontal em mca

P_{dv} a pressão dinâmica vertical em 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 3.13 (item 3.3.2).

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot L \cdot 0,5 \quad 3.13$$

Em metros de coluna de água tem-se

$$P_{dh} = P_{dv} = \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} = L \cdot 0,5 \quad 3.17$$

Sendo:

L o comprimento da variação de nível da água no manômetro inclinado em m

θ o ângulo do manômetro inclinado

A vazão [Q] foi determinada pela relação

$$Q = V_d \cdot A_d \quad 3.18$$

Sendo:

A_d a área em 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 no duto de descarga em m

3.3.4 Vazão e velocidade na sucção pelo anemômetro

A vazão volumétrica do ar foi também determinada pela equação da continuidade:

$$Q = A_s \cdot V_s \quad 3.19$$

Em que:

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

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

A área da seção transversal do duto de sucção foi calculada por:

$$A_s = \frac{\pi \cdot D_s^2}{4} \quad 3.20$$

Sendo:

D_s o diâmetro interno da tubulação de sucção em m

3.3.5 Velocidade de descarga

A velocidade na descarga foi obtida pelo pitot (item 3.3.3) e também diretamente pelo anemômetro (com a unidade sem o coletor) e pelo balanço de massa (w):

$$w_d = w_s \quad 3.21$$

$$\rho_d \cdot V_d \cdot A_d = \rho_s \cdot V_s \cdot A_s \quad 3.22$$

Adotando densidade constante tem-se

$$V_d \cdot \frac{\pi \cdot D_d^2}{4} = V_s \cdot \frac{\pi \cdot D_s^2}{4} \quad 3.23$$

$$V_d = V_s \cdot \frac{D_s^r}{D_d^r} \quad 3.24$$

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. A unidade experimental permitia trabalhar com velocidade de ar na descarga de até 30 m/s.

3.3.6 Potência consumida:

A Figura 3.23 apresenta um esquema do motor do ventilador em balanço utilizado para determinar a potência consumida durante os testes experimentais.

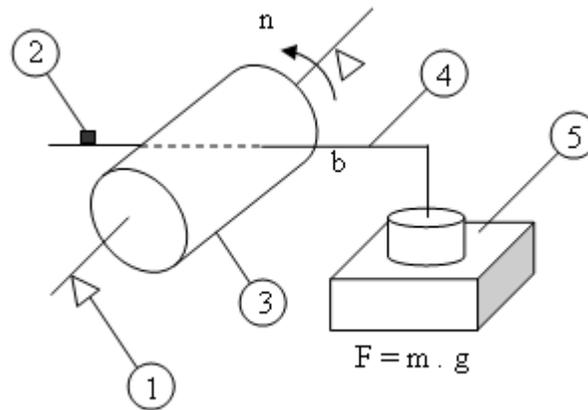


Figura 3.23 – Esboço do sistema montado para o cálculo da potência consumida pelo ventilador 1- mancais, 2- contrapeso do braço, 3- motor em balanço, 4- braço do centro do eixo até o ponto que pressiona a balança e 5- balança digital.

A potência consumida pelo motor em balanço durante a realização dos testes experimentais foi obtida pelas equações.

$$\text{Pot} = F \cdot b \cdot 2\pi \eta \quad 3.25$$

Em que: Pot é a potência (BHP – Break Horse Power) em W

F é a força em N

b é o braço em m

η é a rotação em rps

A força foi dada pela 2ª Lei de Newton.

$$F = m \cdot g$$

3.26

Sendo: F a força em N

m a massa do braço em kg

g a aceleração da gravidade em m/s^2

3.3.7 Área dos 9 coletores

A área dos 9 coletores dispostos na seção transversal do duto foi determinada por meio do seguinte procedimento:

1. Mediu-se a massa de uma folha de sulfite de 15 cm x 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 riscou-se as 9 áreas, conforme a Figura 3.24.

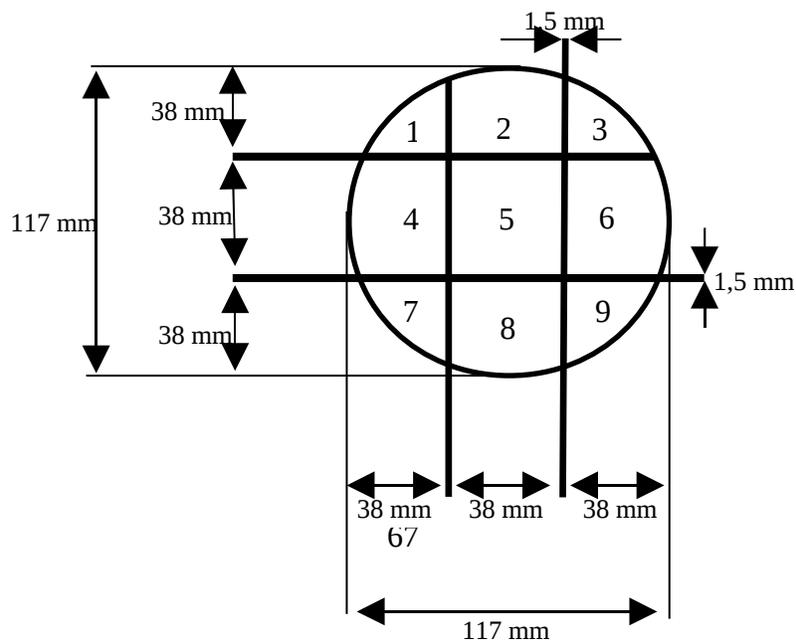


Figura 3.24- Dimensões do coletor

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

$$\boxed{\frac{\text{Área do quadrado}}{\text{Área do coletor}} = \frac{\text{Massa do quadrado}}{\text{Massa do coletor}}} \longrightarrow \frac{225 \text{ cm}^2}{X} = \frac{1,8 \text{ g}}{Y} \quad 3.27$$

A Tabela 3.4 mostra os valores de massa e área de todos os coletores encontrados a partir dos cálculos.

Tabela 3.4 – Massa e área dos 9 coletores

Coletores	Massa do papel (g)	Área do coletor (cm²)
1	0,071	8,88
2	0,125	15,6
3	0,074	9,25
4	0,118	14,8
5	0,132	16,5
6	0,123	15,4
7	0,059	7,38
8	0,122	15,2
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 relação:

$$M_p = \frac{m_c}{A_c} \quad 3.28$$

Em que: m_c é a massa das partículas no coletor em g

A_c é a área do coletor em 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 relação

$$F_r = \frac{M_{pi}}{\sum M_p} \cdot 100 \quad 3.29$$

sendo:

F_r a fração mássica de sólidos adimensional

M_{pi} a massa das partículas por unidade de área (de 1 até 9, Figura 3.23) em g/cm^2

$\sum M_p$ a somatória da massa das partículas por unidade de área em 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 3.30

$$S = \left[\sum (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1) \right]^{0,5} \quad 3.30$$

em que: n é o número de pontos

x_i é o ponto em análise

\bar{x} é a média aritmética

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do ventilador centrífugo

O ventilador utilizado nos experimentos foi caracterizado pela construção de curvas de pressão estática corrigida no anel piezométrico na saída do ventilador, em função da vazão e da potência consumida. Foi colocado um cone na saída do duto de descarga (conforme ASME) para se ter a variação da vazão e pressão com reduzida oscilação.

4.1.1 Curva característica do ventilador, pressão estática corrigida em função da vazão

Os dados foram coletados para várias aberturas do cone empregando o código ASME e o método de centróides de áreas iguais, conforme apresentado nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 – Rotação, temperatura de bulbo seco e úmido, massa e comprimento do braço.

Abertura do Cone L (cm)		Rotação (rpm)	T _{bs} (°C)	T _{bu} (°C)	M _{braço} (kg)	L _{braço} (m)
A	Sem cone	2818	22,10	18,00	0,23	0,503
B	9,10	2916	22,10	18,40	0,20	0,503
C	6,30	2975	21,30	19,20	0,198	0,503
D	3,20	2953	21,30	19,20	0,151	0,503
E	Fechado	2930	21,30	19,20	0,099	0,503

Tabela 4.2 – Pressões estática no anel piezométrico na saída do ventilador e pressões estática e dinâmica no tubo de pitot. Os pontos de B até I são indicadas na Figura 3.22. Emprega-se os pontos A e J para diâmetros de tubulações acima de 250 mm.

Abertura do Cone L (cm)		Comprimento nos manômetros inclinados sem correção da inclinação											
		Anel Piezométrico na saída do ventilador (cm)	Posição horizontal e vertical	Pressão Estática (cm)	Tubo de Pitot								
					Pressão Dinâmica sem correção (cm)								
						B	C	D	E	F	G	H	I
A	Sem cone	6,1	ho	1,9	5,3	6,2	6,8	7,4	7,5	7,2	6,3	5,7	
			ve	1,9	3,3	3,5	4,1	5,5	7,9	7,6	6,1	4,3	
B	9,10	9,4	ho	5,5	4,2	5,0	5,5	6,0	6,2	5,8	5,0	4,5	
			ve	5,8	2,4	2,7	3,5	4,8	6,2	5,8	4,4	3,4	
C	6,30	12,3	ho	8,8	3,0	3,6	4,1	4,8	4,6	4,2	3,6	3,1	
			ve	9,1	1,6	1,9	2,7	3,7	4,3	4,1	3,0	2,1	
D	3,20	15,2	ho	12,2	1,4	1,5	1,8	2,0	2,3	2,2	2,0	1,6	
			ve	12,6	0,3	0,5	0,9	1,4	1,7	1,5	1,1	0,5	

E	Fechado	17,0	ho	17,0	0	0	0	0	0	0	0	0
			ve	17,0	0	0	0	0	0	0	0	0

A Tabela 4.3 apresenta os resultados das pressões estáticas e dinâmicas corrigidas no anel piezométrico na saída do ventilador e no tubo de pitot, respectivamente. Os valores de velocidade média e a vazão volumétrica de ar também estão expressos nesta tabela.

Tabela 4.3 – Pressões dinâmica corrigida, velocidade média no pitot e vazão volumétrica

Rotação (rpm)	P_{Ea}		P_{Eca}		P_d (mmca)	P_{dc} (mmca)	V_M (m/s)	Q (m ³ /s)
	(mmca)	(Pa)	(mmca)	(Pa)				
2818	30,50	298,6	30,68	300,5	29,81	30,00	22,13	0,238
2916	47,00	460,1	44,23	433,0	23,82	22,41	19,12	0,206
2975	61,50	602,1	55,58	544,2	17,22	15,56	15,94	0,171
2953	76,00	744,1	69,72	682,5	6,95	6,38	10,20	0,110
2930	85,00	832,2	79,20	775,4	0	0	0	0

Geralmente na literatura, os resultados de pressão são apresentados em Pascal, unidade do Sistema Internacional de Medidas (SI). Tendo em vista que os processos industriais utilizam milímetro de coluna de água (mmca) para expressar com maior facilidade a pressão de seus sistemas pneumáticos, este trabalho adotou esta unidade de medida de pressão e vazão em metros cúbico por segundo (m³/s).

A Figura 4.1 mostra a curva da pressão estática corrigida para uma rotação de 2800 rpm, densidade do ar de $1,2 \text{ kg/m}^3$ e T_{bs} de $22 \text{ }^\circ\text{C}$ em função da vazão volumétrica do ar.

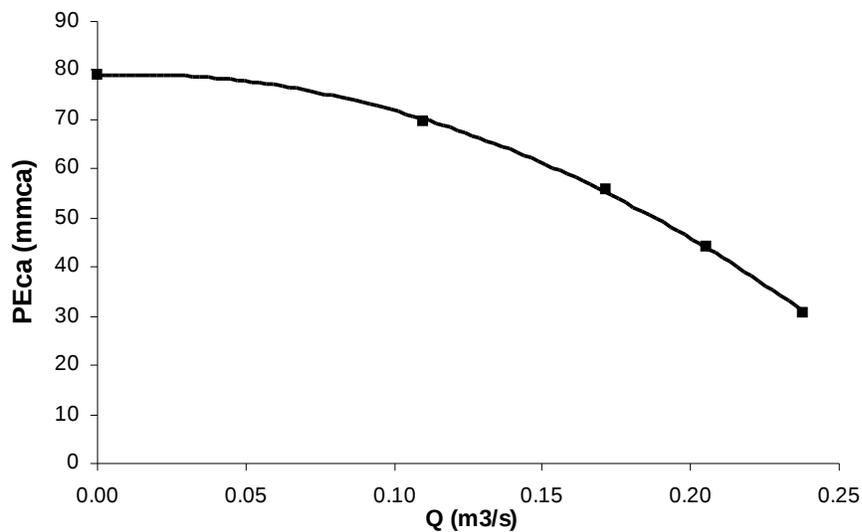


Figura 4.1 – Pressão estática corrigida no anel piezométrico na saída do ventilador (mmca) em função da vazão volumétrica do ar (m^3/s)

Pode-se observar na Figura 4.1 que para uma vazão de ar nula tem-se o ponto onde a altura manométrica é máxima atingindo aproximadamente 80 mmca, que representa o “shut-off” do ventilador. É uma curva típica de ventilador com voluta e rotor semi aberto ou seja, ocorre um aumento da vazão de ar e um decréscimo da pressão com a abertura do cone.

4.1.2 Curva característica do ventilador, potência consumida em função da vazão

A Tabela 4.4 mostra os dados da potência consumida nos experimentos em W e hp. De mesmo modo, em função do emprego industrial adotou-se a unidade de potência em hp.

Tabela 4.4 – Rotação do motor do ventilador, força e potência consumida.

Rotação (rpm)	Rotação (rps)	F (N)	Pot (W)	P (hp)	Q (m ³ /s)
2818	46,97	2,26	334,74	0,45	0,238
2916	48,60	1,96	301,20	0,40	0,206
2975	49,58	1,94	304,23	0,41	0,171
2953	49,22	1,48	230,29	0,31	0,110
2930	48,83	0,97	149,81	0,20	0

A Figura 4.2 representa a curva característica do ventilador, potência consumida em função da vazão de ar.

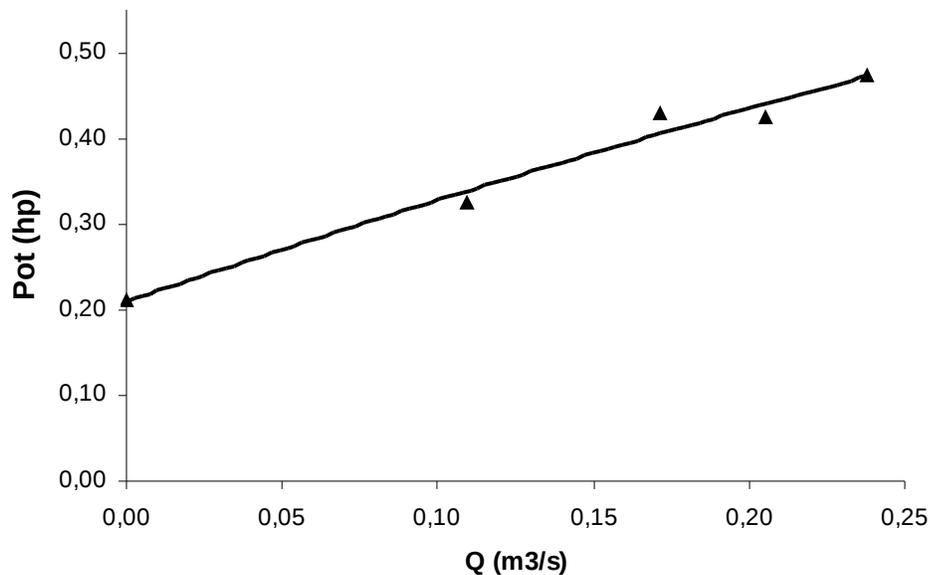


Figura 4.2 – Curva de potência consumida (hp) em função da vazão volumétrica do ar (m³/s).

4.2 Determinação da velocidade do ar

Visando a facilidade de coleta de dados na indústria e na planta piloto, a velocidade de descarga adotada no duto de transporte pneumático foi medida acoplado um anemômetro no centro do duto de entrada e corrigida para o ponto em estudo pela equação da continuidade.

A Tabela 4.5 ilustra os ensaios realizados para coleta de dados visando a determinação da velocidade média de ar pelo método das centróides de áreas iguais usando o tubo de pitot na posição horizontal e vertical. Os pontos A e J da Figura 3.22 são empregados para tubos com diâmetro acima de 250 mm.

Tabela 4.5– Rotação (rpm) e comprimento nos manômetros inclinados (cm).

Rotação (rpm)	Comprimento nos manômetros inclinados sem correção da inclinação									
	Anel Piezométrico (cm)	Posição horizontal e vertical	Tubo de Pitot							
			Pressão Dinâmica sem correção (cm)							
			B	C	D	E	F	G	H	I
1290	0,5	ho	1,0	1,0	1,3	1,6	1,6	1,6	1,3	1,4
		ve	0,7	0,8	1,0	1,3	1,3	1,3	1,2	0,8
2335	1,8	ho	3,8	4,3	4,6	5,2	5,5	5,2	5,0	4,7
		ve	2,5	2,6	3,6	4,6	4,8	4,6	4,1	3,0
3381	3,4	ho	8,4	8,6	9,2	9,8	10,4	10,4	9,2	8,6
		ve	5,2	5,7	6,7	8,6	9,9	9,5	8,3	6,7

A Tabela 4.6 mostra as velocidades de descarga do ar obtidas por diferentes mecanismos, como anemômetro, equação da continuidade e tubo de pitot.

Tabela 4.6– Velocidade de descarga do ar (m/s) e o desvio (%).

Rotação (rpm)	Anemômetro		Equação da Continuidade	Tubo de Pitot	Desvio* (%)
	Vsucção (m/s)	Vdescarga (m/s)	Vdescarga (m/s)	Vdescarga (m/s)	
1290	2,9	10,6	10,03	9,98	0,5
2335	5,8	20,4	20,06	18,72	5,3
3381	8,7	30,1	30,08	26,40	12,2

* O desvio é da velocidade obtida pela equação da continuidade em relação a dada pelo tubo de pitot.

As velocidades de descarga de ar obtidas pelo anemômetro e calculadas pela equação da continuidade apresentaram valores bastantes similares, com um desvio na faixa de 0,07% a 5,4 %. Pode-se notar ainda que, os resultados de velocidades de descarga do ar obtidos pelo tubo de pitot e as corrigidas pela equação da continuidade não demonstram discrepâncias elevadas de valores, com desvios variando de 0,5 % a 12,2% (Tabela 4.6).

Tendo em vista a pequena diferença entre os resultados de velocidade do ar, adotou-se para construção das curvas de perda de carga em função da velocidade de ar e vazão de sólidos, a velocidade do ar na sucção registrada pelo anemômetro calibrado. A velocidade foi corrigida pelo diâmetro da descarga pela a equação da continuidade, visando a praticidade, facilidade de coleta de dados e repetição dos ensaios.

A velocidade de sucção do ar foi relacionada (Tabela 4.7) com a frequência em Hertz do sistema de controle do motor (inversor de frequência). Para cada velocidade de ar foi determinada uma frequência, e empregada para todos os ensaios experimentais.

Tabela 4.7 – Velocidade de sucção do ar em função da frequência (Hz)

V_{descarga} (m/s)	$V_{\text{sucção}}$ (m/s)	Frequência (Hz)
10,0	2,9	22,00
12,5	3,6	25,86
15,0	4,3	30,82
17,5	5,1	35,37
20,0	5,8	40,06
22,5	6,5	44,76
25,0	7,2	49,60
27,5	8,0	55,00
30,0	8,7	58,60

4.3 Determinação da potência consumida

A potência consumida para velocidade de ar variando de 0 a 30 m/s e rotações na faixa de 706-3381 rpm está registrada na Tabela 4.8

Tabela 4.8– Rotação, força e potência consumida.

V_{descarga} Calculada (m/s)	η (rpm)	η (rps)	$M_{\text{braço}}$ (kg)	$L_{\text{braço}}$ (m)	F (N)	Pot (W)	Pot (hp)
5,0	705,7	11,76	0,026	0,47	0,255	8,85	0,012
10,0	1290	21,50	0,067	0,47	0,657	41,71	0,056
12,5	1513	25,22	0,083	0,47	0,814	60,57	0,081
15,0	1809	30,15	0,111	0,47	1,088	96,87	0,13
17,5	2064	34,40	0,144	0,47	1,413	143,54	0,193
20,0	2335	38,92	0,183	0,47	1,795	206,31	0,277

22,5	2625	43,75	0,223	0,47	2,187	282,55	0,379
25,0	2889	48,15	0,265	0,47	2,599	369,55	0,496
27,5	3216	53,60	0,310	0,47	3,041	481,35	0,646
30,0	3381	56,35	0,345	0,47	3,384	563,12	0,756

Pode ser vista na Figura 4.3 a potência consumida em função da velocidade de descarga de ar. Nota-se que o aumento da velocidade de ar ocasionou um maior consumo de energia. Este comportamento é característico do sistema, o aumento na rotação de 706 para 3381 rpm acarretou uma elevação da potência consumida de 0,012 para 0,756 hp. A literatura consultada não apresenta trabalhos que representem a curva de potência em função da velocidade de ar que caracteriza o sistema pneumático.

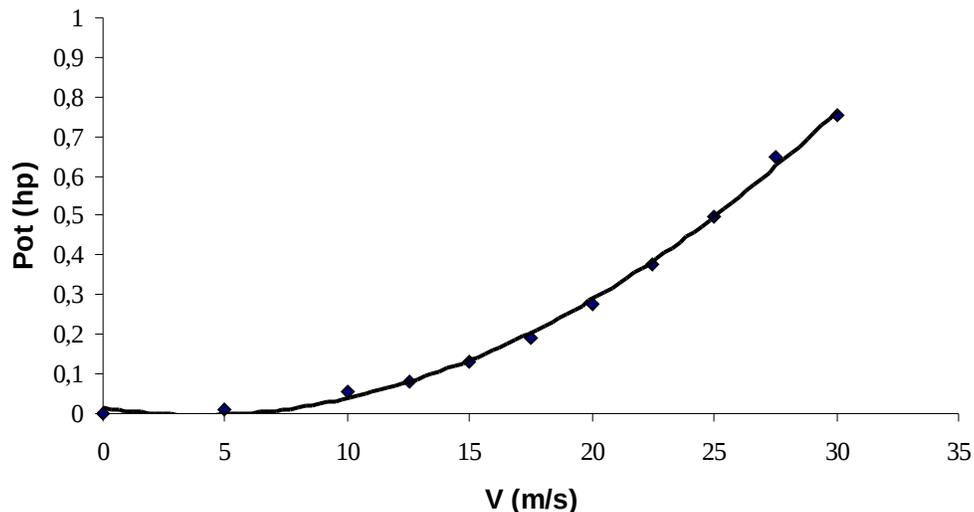


Figura 4.3 – Potência consumida e velocidade de descarga do ar

4.4 Determinação da vazão de sólidos

As vazões mássicas dos sólidos, polietileno, poliestireno e polipropileno foram determinadas pela variação do potenciômetro ligado à válvula rotativa. O potenciômetro variou de 20% a 90% e a rotação de 550 a 3674 rpm, para cada rotação da válvula rotativa. Marcou-se o tempo, para uma massa fixa de material e obteve-se as vazões mássicas dos sólidos respectivamente, de acordo com as Tabelas 4.9, 4.10 e 4.11.

A Tabela 4.9 fornece os resultados dos ensaios realizados para a determinação da vazão mássica de polietileno para as diferentes rotações na válvula de alimentação.

Tabela 4.9– Vazão mássica do polietileno (válvula rotativa)

Rotação (rpm)	Tempo 1 (s)	Tempo 2 (s)	Tempo 3 (s)	Tempo 4 (s)	Tempo Médio	Vazão* (kg/s)	Vazão (kg/h)
1011	20,3	20,27	20,19	20,67	20,25	0,064	231,54
1258	15,36	15,38	15,25	15,35	15,33	0,085	305,89
1484	14,12	14,49	14,30	14,58	14,30	0,091	327,85
1909	11,83	11,47	11,40	11,39	11,42	0,114	410,63
2341	9,79	9,77	9,53	9,77	9,78	0,133	479,65
2758	7,8	8,00	8,12	7,88	8,00	0,163	586,17
3248	7,57	7,29	7,48	7,43	7,49	0,174	625,80
3674	6,73	6,80	6,50	6,65	6,73	0,194	697,13

*massa fixa de polietileno de 1,3026 kg

A Tabela 4.10 mostra os dados obtidos para determinação da vazão mássica de poliestireno para várias rotações.

Tabela 4.10– Vazão mássica de poliestireno (válvula rotativa)

Rotação (rpm)	Tempo 1 (s)	Tempo 2 (s)	Tempo 3 (s)	Tempo Médio (s)	Vazão* (kg/s)	Vazão (kg/h)
550	37,01	36,93	36,99	36,98	0,054	194,72
1011	23,56	23,59	23,51	23,55	0,085	305,69
1484	16,12	16,15	16,19	16,15	0,124	445,73
1677	15,12	15,09	15,07	15,09	0,133	477,03
1909	12,67	12,64	12,54	12,62	0,159	570,67
2341	11,55	11,54	11,59	11,56	0,173	622,84

2758	9,09	9,01	9,06	9,05	0,221	795,29
3248	7,97	8,03	7,89	7,96	0,251	904,14
3674	7,15	7,17	7,12	7,15	0,280	1007,46

* massa fixa de poliestireno de 2,0 kg

Os dados obtidos para determinar a vazão mássica do polipropileno para diversas rotações estão reunidos na Tabela 4.11.

Tabela 4.11- Vazão mássica de polipropileno (válvula rotativa)

Rotação (rpm)	Tempo 1 (s)	Tempo 2 (s)	Tempo 3 (s)	Tempo Médio (s)	Vazão* (kg/s)	Vazão (kg/h)
550	49,43	49,15	49,16	49,25	0,040	145,5
1011	27,73	27,73	27,9	27,79	0,072	257,9
1194	13,49	23,19	23,25	23,31	0,085	307,4
1258	22,61	22,63	22,67	22,64	0,088	316,6
1484	19,93	19,59	19,67	19,73	0,101	363,2
1677	16,84	16,93	17,01	16,93	0,118	423,3
1909	15,47	15,48	15,27	15,41	0,129	465,1
2125	13,68	13,82	13,74	13,75	0,145	521,3
2341	13,47	13,26	13,27	13,33	0,149	537,4
2547	11,57	11,52	11,52	11,54	0,173	621,1
2758	11,13	11,29	11,15	11,19	0,178	640,4
3248	9,89	10,0	9,97	9,95	0,200	719,9
3674	9,16	8,76	9,13	9,02	0,221	794,7

* massa fixa de polipropileno de 1,9905 kg

Todos os resultados foram obtidos a partir da média dos tempos para uma massa de sólidos (polietileno ou poliestireno ou polipropileno) constante.

Uma vez que os sólidos empregados possuem densidade, forma e tamanho diferentes, pode-se observar que as vazões mássicas não foram iguais para uma mesma rotação na válvula rotativa. Como por exemplo para 3674 rpm, as vazões do polietileno, poliestireno e polipropileno foram respectivamente, 0,194, 0,280 e 0,221 kg/s.

Adotou-se para os ensaios experimentais na unidade piloto as vazões de sólidos de 0,085 kg/s, 0,13 kg/s e 0,17 kg/s em função da quase equidistância entre os valores, da possibilidade de leitura para o polietileno, poliestireno e polipropileno e da semelhança com unidades industriais.

4.5 Determinação da densidade aparente dos sólidos

A densidade aparente dos sólidos foi determinada inserindo uma quantidade de massa em uma proveta de 2 litros. A partir da relação entre a massa e o volume obteve-se a referida densidade aparente. A Tabela 4.12 apresenta os dados obtidos da densidade aparente para cada sólido em estudo adivindos desses ensaios.

Tabela 4.12 – Densidade aparente dos sólidos

Tipo de Sólido	Massa (kg)	Volume (m³)	Densidade aparente (kg/ m³)
Polietileno	1,109	0,002	554,45
Poliestireno	1,272	0,002	635,90
Polipropileno	1,115	0,002	557,35

Pode-se notar que a diferença entre os valores calculados da densidade aparente dos polímeros polietileno e polipropileno foi muito pequena provavelmente devido a semelhança nas características dos materiais como forma, tamanho e diâmetro.

4.6. Perda de carga e distribuição de sólidos

a) Polietileno

As Tabelas de 4.13 a 4.15 fornecem dados experimentais de perda de carga para vazões de polietileno de 0,085, 0,13 e 0,17 kg/s e rotações de 1258, 2341 e 3248 rpm, respectivamente. Também mostram a quantidade de massa obtida em cada saco coletor. Nas tabelas a seguir, L_x , L_y , L_z e L_w são as variações do nível da água nos manômetros inclinados acoplados nos pontos x, y, z e w da Figura 3.1.

Tabela 4.13– Dados de perda de carga para a vazão de 0,085 kg/s de polietileno

$V_{\text{sucção}}$ (m/s)	V_{descarga} (m/s)	F (Hz)	η (rpm)	Variação do líquido no manômetro inclinado			
				L_x	L_y	L_z	L_w
1,2	5,0	12,04	705,7	1,1	1,1	0	0
2,9	10,0	22,00	1290	3,5	3,5	0	0
3,6	12,5	25,86	1513	5,1	5,1	0	0
4,4	15,0	30,82	1809	6,2	6,0	2,2	0,7
5,1	17,5	35,37	2064	6,6	4,8	3,6	2,5
5,8	20,0	40,06	2335	8,1	6,1	4,5	3,3
6,5	22,5	44,76	2625	9,7	7,0	5,2	4,0
7,2	25,0	49,60	2889	11,2	8,3	6,3	4,8
8,0	27,5	55,00	3216	14,0	9,8	7,3	5,6
8,2	30,0	58,60	3381	15,6	11,0	8,3	6,5

Massa dos coletores (g)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	AC*	Total
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1400,3	1400,3
0	0	0	0	0	0	13,0	42,8	12,8	2255,8	2324,4
4,52	6,68	5,32	18,92	20,15	23,91	103,4	202,6	91,6	1509,1	1986,2
46,4	62,6	46,6	200,8	150,7	209,6	720,5	1488,5	706,4	3804,1	7436,2
126,4	182,9	124,3	474,6	438,2	485,54	1240,0	2471,4	1174,3	709,67	7427,4
123,8	170,9	119,8	402,1	358,6	400,8	1426,7	3229,5	1206,5	-	7438,7
155,0	214,3	156,5	496,2	427,6	524,9	1382,3	2698,8	1371,4	-	7427,0
192,2	283,2	197,3	525,8	440,7	585,4	1310,9	2449,5	1461,6	-	7446,6
257,9	381,2	257,5	627,9	499,2	678,8	1253,7	2062,4	1275,5	-	7294,1
323,9	483,2	321,9	713,2	532,3	737,0	1275,6	1904,8	1166,3	-	7458,2

*AC é a quantidade de sólido acumulada na tubulação (Figura 3.23).

Tabela 4.14 – Dados de perda de carga para a vazão de 0,13 kg/s de polietileno

V _{sucção} (m/s)	V _{descarga} (m/s)	F (Hz)	η (rpm)	Variação do líquido no manômetro inclinado			
				L _x	L _y	L _z	L _w
1,2	5,0	12,04	705,7	0,8	0,8	0	0
2,9	10,0	22,00	1290	3,4	3,4	0	0
3,6	12,5	25,86	1513	5,0	5,0	0	0
4,4	15,0	30,82	1809	6,1	6,1	0	0
5,1	17,5	35,37	2064	7,0	5,4	3,5	2,1
5,8	20,0	40,06	2335	8,7	6,3	5,4	3,3
6,5	22,5	44,76	2625	10,3	7,4	5,5	4,2
7,2	25,0	49,60	2889	12,9	10,0	7,9	5,1
8,0	27,5	55,00	3216	14,1	10,8	7,5	5,2
8,2	30,0	58,60	3381	16,3	12,0	8,3	6,3

Massa dos coletores (g)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	AC*	Total
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1371,2	1371,2
0	0	0	0	0	0	4,1	16,9	4,8	1837,9	1863,7
0	0	0	5,3	8,2	7,1	29,0	64,1	27,8	2530,2	2671,6
9,1	11,9	8,3	46,7	48,6	47,9	182,0	376,0	176,4	4489,3	5396,2
64,65	90,1	63,7	262,8	256,3	279,5	772,3	1546,8	750,7	3334,7	7421,5
162,8	237,7	160,0	540,5	484,1	561,9	1416,6	2399,1	1400,8	-	7363,5
117,1	161,3	118,6	405,7	363,3	413,5	1416,0	3207,2	1228,8	-	7431,5
108,0	166,9	129,8	330,8	347,9	434,3	1362,2	3133,6	1352,8	-	7366,3
194,9	285,3	200,0	516,3	437,6	521,6	1267,2	2492,7	1330,8	-	7246,4
236,0	357,3	236,6	580,3	453,7	621,8	1273,6	2369,4	1239,5	-	7368,2

*AC é a quantidade de sólido acumulada na tubulação (Figura 3.23).

Tabela 4.15 – Dados de perda de carga para a vazão de 0,17 kg/s de polietileno

V _{sucção} (m/s)	V _{descarga} (m/s)	F (Hz)	η (rpm)	Variação do líquido no manômetro inclinado			
				L _x	L _y	L _z	L _w
1,2	5,0	12,04	705,7	0,9	0,9	0,0	0,0
2,9	10,0	22,00	1290	3,2	3,2	0,0	0,0
3,6	12,5	25,86	1513	5,0	5,0	0,0	0,0
4,4	15,0	30,82	1809	6,6	6,6	0,0	0,0
5,1	17,5	35,37	2064	7,4	5,8	3,6	2,1
5,8	20,0	40,06	2335	9,1	6,5	5,4	3,2
6,5	22,5	44,76	2625	10,5	7,6	5,5	4,0
7,2	25,0	49,60	2889	12,4	9,3	6,8	4,3
8,0	27,5	55,00	3216	15,2	12,0	7,9	5,7
8,2	30,0	58,60	3381	16,7	12,7	8,3	6,3

Massa dos coletores (g)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	AC*	Total
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1437,4	1437,4
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,1	12,0	3,0	1389,9	1413,0
0,0	0,0	0,0	3,2	2,9	5,2	15,7	20,4	15,6	2241,9	2304,9
3,0	6,3	3,7	21,4	22,6	21,9	94,8	171,1	87,0	4170,1	4601,9
29,1	38,7	27,9	126,0	129,0	122,0	376,4	794,0	372,4	5396,9	7412,3
114,5	165,8	108,5	403,0	377,5	417,4	886,7	1724,3	863,9	2306,7	7368,3
93,6	132,2	93,4	356,5	310,9	355,8	1371,7	3511,3	1207,9	-	7433,3
121,5	160,7	116,9	384,4	344,5	433,6	1318,0	3074,9	1369,9	-	7324,4
170,1	244,8	171,9	471,8	407,8	522,0	1296,4	2803,7	1348,8	-	7437,3
195,1	280,6	193,4	514,5	423,1	543,5	1288,2	2586,5	1305,5	-	7330,4

*AC é a quantidade de sólido acumulada na tubulação (Figura 3.23).

b) Poliestireno

As Tabelas 4.16 a 4.18 apresentam os dados experimentais de perda de carga para vazões de sólido de 0,085, 0,13 e 0,17 kg/s e rotações de 1011, 1677 e 2341 rpm,

respectivamente. Mostram também, a massa obtida nos 9 sacos coletores. Os pontos L_x , L_y , L_z e L_w representam o desnível do líquido no manômetro inclinado.

Tabela 4.16 – Dados de perda de carga para a vazão de 0,085 kg/s de poliestireno

11	$V_{descarga}$ (m/s)	F (Hz)	η (rpm)	Variação do líquido no manômetro inclinado			
				L_x	L_y	L_z	L_w
1,2	5,0	12,04	705,7	0,9	0,9	0	0
2,9	10,0	22,00	1290	3,5	3,5	0	0
3,6	12,5	25,86	1513	4,7	4,7	0	0
4,4	15,0	30,82	1809	5,0	3,6	2,0	1,6
5,1	17,5	35,37	2064	6,7	5,2	4,3	3,4
5,8	20,0	40,06	2335	7,2	5,0	4,2	3,2
6,5	22,5	44,76	2625	9,7	7,1	5,0	3,7
7,2	25,0	49,60	2889	11,0	8,2	6,7	5,3
8,0	27,5	55,00	3216	14,2	10,1	7,5	6,2
8,2	30,0	58,60	3381	15,4	10,6	8,2	6,1

Massa dos coletores (g)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	AC*	Total
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1638,2	1638,2
0	0	0	4,2	4	4,1	36,9	103,4	36,6	2413,1	2602,3
8,3	10,04	8,56	31,6	32,6	32,1	192,9	381,2	185,3	4114,3	4996,9
79,7	27,1	78,6	348,9	327,3	355,9	1103,8	2276,2	1070,5	2266,4	7934,4
81,4	110,4	83,3	313,4	286,6	330,6	1423,8	4287,9	1332,3	-	8249,7
80,1	111,2	82,2	308,9	276,5	319,3	1528,5	3639,3	1445,3	-	7791,3
114,4	165,7	117,6	376,8	377,8	441,7	1438,8	2554,4	1663,8	-	7250,9
139,0	217,3	145,6	411	411,9	441,4	1311,2	3269,6	1447,9	-	7794,9
241,1	373,3	240,2	663,8	582,5	648,4	1451,9	2786,1	1265,4	-	8252,6
278,9	416,4	267,5	721,8	567,1	689,6	1394,2	2299,9	1163,4	-	7798,8

*AC é a quantidade de sólido acumulada na tubulação (Figura 3.23).

Tabela 4.17 – Dados de perda de carga para a vazão de 0,13 kg/s de poliestireno

$V_{\text{sucção}}$ (m/s)	V_{descarga} (m/s)	F (Hz)	η (rpm)	Variação do líquido no manômetro inclinado			
				L_x	L_y	L_z	L_w
1,2	5,0	12,04	705,7	1,2	1,2	0	0
2,9	10,0	22,00	1290	3,5	3,5	0	0
3,6	12,5	25,86	1513	5,0	5,0	0	0
4,4	15,0	30,82	1809	6,7	4,0	2,8	1,2
5,1	17,5	35,37	2064	6,5	5,0	3,4	2,6
5,8	20,0	40,06	2335	8,5	6,3	6,1	4,0
6,5	22,5	44,76	2625	9,9	7,2	5,2	3,9
7,2	25,0	49,60	2889	11,9	8,9	6,3	5,2
8,0	27,5	55,00	3216	14,7	10,4	7,3	5,7
8,2	30,0	58,60	3381	16,0	11,5	8,3	6,1

Massa dos coletores (g)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	AC*	Total
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1479,8	1479,8
0	0	0	0	0	0	12,8	46,5	13,2	2114,4	2186,9
0	0	0	11,4	11,2	10,6	83,1	242,7	77,9	3199	3635,9
33,1	47,9	33,2	165,5	159,5	169,4	1290,8	1412,7	621,8	4881,6	8815,5
43,8	65,4	47,6	210,2	212,4	238,9	1427,4	4589,7	1413,4	-	8248,8
81,4	103,7	77,2	327,1	292,6	322,3	1534,6	4095,3	1324,4	-	8158,6
92,68	128,6	92,2	331,3	328,2	378,5	3839,2	1480,9	1580,4	-	8252,0
125,6	182	127	399,2	398,6	431,6	1366,8	3665,6	1562,2	-	8258,6
189,4	290,3	188,1	555,1	506,6	558,1	1441,9	3202,8	1318,5	-	8250,85
232,1	361,2	236,2	652,6	544	637,2	1458,1	2869,5	1279,4	-	8270,3

*AC é a quantidade de sólido acumulada na tubulação (Figura 3.23).

Tabela 4.18 – Dados de perda de carga para a vazão de 0,17 kg/s de poliestireno

V _{sucção} (m/s)	V _{descarga} (m/s)	F (Hz)	η (rpm)	Variação do líquido no manômetro inclinado			
				L _x	L _y	L _z	L _w
1,2	5,0	12,04	705,7	1,0	1,0	0	0
2,9	10,0	22,00	1290	3,4	3,4	0	0
3,6	12,5	25,86	1513	4,8	4,8	0	0
4,4	15,0	30,82	1809	6,1	6,1	0	0
5,1	17,5	35,37	2064	8,0	8,0	3,1	2,8
5,8	20,0	40,06	2335	8,3	6,4	3,9	2,2
6,5	22,5	44,76	2625	10,6	7,9	4,5	4,0
7,2	25,0	49,60	2889	12,5	8,9	5,3	4,6
8,0	27,5	55,00	3216	15,2	11,3	6,4	5,7
8,2	30,0	58,60	3381	16,4	12,5	7,1	6,4

Massa dos coletores (g)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	AC*	Total
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1629,6	1629,6
0	0	0	0	0	0	7,1	28,5	7,1	2036	2078,7
0	0	0	5,15	5,44	4,8	46,9	151,3	43,6	2894,7	3151,9
11,2	15,9	11,8	59,7	61,3	62,3	297,3	768,2	293,3	4526,9	6107,9
92,4	132,4	89,2	395,8	387,2	403,6	1000,0	2117,2	976,4	2655	8249,3
63,2	81	57,9	275,6	243,3	269,6	1447,7	4380,0	1329,0	-	8147,3
75,6	105,2	79,2	314,7	307,1	350,8	1481,9	4110,1	1427,0	-	8251,6
97,2	142	99,5	338,3	337,8	375,6	1353,6	3858,9	1545,2	-	8148,1
147,4	220,4	142,6	453,7	436,8	452,5	1408,7	3626,6	1362,3	-	8251,1
201,6	300,2	196,4	583,9	501,3	567,5	1465,9	3062,4	1277,9	-	8157,1

*AC é a quantidade de sólido acumulada na tubulação (Figura 3.23).

c) Polipropileno

As Tabelas 4.19 a 4.21 apresentam os dados experimentais de perda de carga para vazões de sólido de 0,085, 0,13 e 0,17 kg/s e rotações de 1194, 1909 e 2547 rpm. Pode ser

visto nas tabelas a seguir a variação do líquido no manômetro inclinado nos pontos em estudo representados por L_x , L_y , L_z e L_w .

Tabela 4.19 – Dados de perda de carga para a vazão de 0,085 kg/s de polipropileno

$V_{\text{sucção}}$ (m/s)	V_{descarga} (m/s)	F (Hz)	η (rpm)	Variação do líquido no manômetro inclinado			
				L_x	L_y	L_z	L_w
1,2	5,0	12,04	705,7	1,0	1,0	0	0
2,9	10,0	22,00	1290	3,4	3,4	0	0
3,6	12,5	25,86	1513	4,7	4,7	0	0
4,4	15,0	30,82	1809	4,4	3,4	2,7	2,0
5,1	17,5	35,37	2064	6,0	4,4	3,5	2,6
5,8	20,0	40,06	2335	7,7	5,5	4,2	3,2
6,5	22,5	44,76	2625	9,3	6,6	5,0	3,9
7,2	25,0	49,60	2889	11,1	7,9	6,1	4,6
8,0	27,5	55,00	3216	13,5	9,2	7,3	5,2
8,2	30,0	58,60	3381	14,9	10,7	8,2	6,3

Massa dos coletores (g)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	AC*	Total
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1404,7	1404,7
1	1,1	0,8	4,5	4,9	4,6	31,1	73,2	27,8	2486,2	2635,2
8,12	10,98	8,2	39,5	39,31	40,78	204,3	506,4	192,4	3975,5	5025,4
49,8	69,1	49,9	230,2	212,7	244,5	1410,1	3582,7	1348,8	-	7197,8
109,7	146,5	105,7	337,3	324,8	338,75	1262,0	3423,9	1224,6	-	7273,2
133,2	186,9	126	419,7	360,9	408,8	1490,3	2874,7	1201,1	-	7201,6
156,5	216,4	158,7	499,5	427,2	542,1	1353,5	2508,9	1430,8	-	7293,6
180,5	264,2	181,2	515,2	458,7	571,0	1283,1	2320,3	1432,6	-	7206,7
240,6	350,8	235,4	629,1	532,4	672,1	1261,9	2086,6	1288,4	-	7297,3
276,6	422,1	272	680,9	564,2	699,0	1225,9	1916,9	1151,6	-	7209,2

*AC é a quantidade de sólido acumulada na tubulação (Figura 3.23).

Tabela 4.20 – Dados de perda de carga para a vazão de 0,13 kg/s de polipropileno

$V_{\text{sucção}}$ (m/s)	V_{descarga} (m/s)	F (Hz)	η (rpm)	Variação do líquido no manômetro inclinado
------------------------------	--------------------------------	-----------	-----------------	--

				L_x	L_y	L_z	L_w
1,2	5,0	12,04	705,7	1,1	1,1	0,0	0,0
2,9	10,0	22,00	1290	3,5	3,5	0,0	0,0
3,6	12,5	25,86	1513	4,8	4,8	0,0	0,0
4,4	15,0	30,82	1809	5,4	5,4	0,0	0,0
5,1	17,5	35,37	2064	6,3	4,6	3,4	2,4
5,8	20,0	40,06	2335	7,6	6,3	4,3	3,7
6,5	22,5	44,76	2625	9,7	6,8	5,2	3,8
7,2	25,0	49,60	2889	12,8	10,2	7,4	6,6
8,0	27,5	55,00	3216	14,0	10,0	7,5	5,7
8,2	30,0	58,60	3381	16,0	11,6	8,2	6,4

Massa dos coletores (g)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	AC*	Total
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1434,8	1434,8
0,0	0,0	0,0	2,6	2,9	5,4	18,7	41,1	16,3	2144,1	2231,1
2,6	3,4	3,3	13,7	12,9	14,0	79,0	211,4	76,4	3190,4	3607,3
48,3	62,2	45,6	206,3	186,7	205,0	687,1	1357,0	651,2	3916,5	7365,9
68,3	93,5	67,9	252,1	246,4	271,4	1289,1	3679,6	1314,0	-	7282,2
124,2	165,5	118,9	387,6	344,3	374,9	1446,7	3264,5	1154,4	-	7381,0
140,5	192,4	138,5	440,6	474,2	386,2	1406,2	2787,0	1327,7	-	7293,3
153,1	210,2	131,2	449,8	386,6	417,0	1363,1	2665,5	1415,0	-	7191,5
213,5	308,1	215,8	573,9	498,3	628,8	1286,7	2253,5	1321,8	-	7300,4
245,9	359,7	242,4	615,6	519,1	643,7	1241,6	2112,2	1210,7	-	7190,9

*AC é a quantidade de sólido acumulada na tubulação (Figura 3.23).

Tabela 4.21– Dados de perda de carga para a vazão de 0,17 kg/s de polipropileno

$V_{\text{sucção}}$ (m/s)	V_{descarga} (m/s)	F (Hz)	η (rpm)	Variação do líquido no manômetro inclinado			
				L_x	L_y	L_z	L_w

1,2	5,0	12,04	705,7	1,0	1,0	0,0	0,0
2,9	10,0	22,00	1290	3,5	3,5	0,0	0,0
3,6	12,5	25,86	1513	4,9	4,9	0,0	0,0
4,4	15,0	30,82	1809	6,3	6,3	0,0	0,0
5,1	17,5	35,37	2064	6,7	4,8	3,6	2,2
5,8	20,0	40,06	2335	8,5	6,5	4,5	3,3
6,5	22,5	44,76	2625	10,1	7,7	5,4	4,0
7,2	25,0	49,60	2889	12,2	9,2	6,6	4,9
8,0	27,5	55,00	3216	14,4	10,3	7,5	5,6
8,2	30,0	58,60	3381	15,6	12,3	8,6	6,5

Massa dos coletores (g)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	AC*	Total
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1444,2	1444,2
0	0	0	0	0	0	8,9	22,5	6,9	1971,2	2009,4
0	0	0	10,15	10,25	8,7	54,6	134,8	53,8	1374,3	1646,5
15,1	25,3	18,85	81	80,6	88,1	328,8	714,4	311,5	4444,6	6108,5
105,2	146,6	105,7	395,2	362,8	421,3	964,5	1808,1	941,4	2081,2	7332
101,7	139,9	102,6	344,7	318,3	342,8	1349,1	3302,0	1224,2	-	7225,3
131,9	176,7	128,4	422,1	362,1	428,9	1426,2	2986,3	1229,6	-	7292,2
147,0	213,1	152,8	448,3	409,2	510,6	1298,1	2623,8	1417,3	-	7220,2
196,2	278,5	196,9	536,9	473,3	598,8	1277,1	2386,2	1359,1	-	7303
225,5	336,1	223,9	600,2	502,1	625,6	1257,8	2220,5	1245,3	-	7237

*AC é a quantidade de sólido acumulada na tubulação (Figura 3.23).

A perda de carga por unidade de comprimento em função da vazão mássica de ar pode ser observada na Tabela 4.22. A elevação gradativa da velocidade do ar ocasionou um aumento na queda de pressão ao longo do sistema pneumático pelo contato entre as moléculas do fluido e destas com as paredes do duto.

Tabela 4.22– Perda de carga em função da vazão mássica do ar

Sem sólidos

V_{descarga} (m/s)	P_y (mm)	P_w (mm)	$\Delta P = P_y - P_w$ (mm)	$\Delta P/L$ (mm/m)
0	0	0	0,0	0,0
5	2,5	0	2,5	0,9
10	7,5	5,0	2,5	0,9
15	13,0	8,0	5,0	1,9
20	27,0	20,5	6,5	2,5
25	31,0	23,0	8,0	3,0
30	43,5	31,0	12,5	4,7

As Tabelas 4.23 a 4.25 apresentam os resultados experimentais para os sólidos polietileno, poliestireno e polipropileno, sendo P_y e P_w as pressões medidas nos pontos L_y e L_w da Figura 3.1. Os valores foram obtidos através de manômetros inclinados e corrigidos para indicar as pressões em milímetros de coluna de água (mmca) por unidade de comprimento (m). O comprimento do transportador pneumático do ponto y ao ponto w é de 2,65 m.

A pressão registrada no ponto w (no final do coletor) para as velocidades de ar de 5, 10, 12,5 e 15 m/s foi zero para as vazões de polietileno de 0,085, 0,13 e 0,17 kg/s devido ao entupimento da seção do duto, conforme a Tabela 4.23. Estes valores foram descartados para a determinação da perda de carga por unidade de comprimento.

Tabela 4.23 – Perda de carga em função da vazão mássica de polietileno

Vazão mássica de 0,085 kg/s

$V_{descarga}$ (m/s)	P_y (mm)	P_w (mm)	$\Delta P = P_y - P_w$ (mm)	$\Delta P/L$ (mm/m)
5,0	5,5	0	-	-
10,0	17,5	0	-	-
12,5	25,5	0	-	-
15,0	30,0	3,5	26,5	10,0
17,5	24,0	12,5	11,5	4,3
20,0	30,5	16,5	14,0	5,3
22,5	35,0	20,0	15,0	5,7
25,0	41,5	24,0	17,5	6,6
27,5	49,0	28,0	21,0	7,9
30,0	55,0	32,5	22,5	8,5
Vazão mássica de 0,13 kg/s				
$V_{descarga}$ (m/s)	P_y (mm)	P_w (mm)	$\Delta P = P_y - P_w$ (mm)	$\Delta P/L$ (mm/m)
5,0	4,0	0	-	-
10,0	17,0	0	-	-
12,5	25,0	0	-	-
15,0	30,5	0	30,50	11,51
17,5	27,0	10,5	16,50	6,23
20,0	31,5	16,5	15,00	5,66
22,5	37,0	21,0	16,00	6,04
25,0	50,0	27,5	22,50	8,49
27,5	54,0	26,5	27,50	10,38
30,0	60,0	31,5	28,50	10,75
Vazão mássica de 0,17 kg/s				
$V_{descarga}$ (m/s)	P_y (mm)	P_w (mm)	$\Delta P = P_y - P_w$ (mm)	$\Delta P/L$ (mm/m)
5,0	4,5	0	-	-
10,0	16,0	0	-	-
12,5	25,0	0	-	-
15,0	33,0	0	33,0	12,5
17,5	29,0	10,5	18,5	7,0
20,0	32,5	16,0	16,5	6,2
22,5	38,0	20,0	18,0	6,8
25,0	46,5	21,5	25,0	9,4
27,5	60,0	28,5	31,5	11,9
30,0	63,5	31,5	32,0	12,1

Na Tabela 4.24 pode-se observar que a perda de carga por unidade de comprimento para as velocidades de ar de 5, 10, 12,5 e 15 m/s foram descartadas para algumas vazões de poliestireno devido ao bloqueio da seção da tubulação do transportador.

Tabela 4.24 - Perda de carga em função da vazão mássica de poliestireno

Vazão mássica de 0,085 kg/s				
V_{descarga} (m/s)	P_y (mm)	P_w (mm)	ΔP = P_y - P_w (mm)	ΔP/L (mm/m)
5,0	4,5	0	-	-
10,0	17,5	0	-	-
12,5	23,5	0	23,5	8,9
15,0	18,0	8,0	10,0	3,8
17,5	26,0	17,0	9,0	3,4
20,0	25,0	16,0	9,0	3,4
22,5	35,5	23,5	12,0	4,5
25,0	41,0	26,5	14,5	5,5
27,5	50,5	31,0	19,5	7,4
30,0	53,0	30,5	22,5	8,5
Vazão mássica de 0,13 kg/s				
V_{descarga} (m/s)	P_y (mm)	P_w (mm)	ΔP = P_y - P_w (mm)	ΔP/L (mm/m)
5,0	6,0	0	-	-
10,0	17,5	0	-	-
12,5	25,0	0	25,0	9,4
15,0	20,0	6,0	14,0	5,3
17,5	25,0	13,0	12,0	4,5
20,0	31,5	20,0	11,5	4,3
22,5	36,0	19,5	16,5	6,2
25,0	44,5	26,0	18,5	7,0
27,5	5,2	2,85	23,5	8,9
30,0	5,75	3,05	27,0	10,2
Vazão mássica de 0,17 kg/s				
V_{descarga} (m/s)	P_y (mm)	P_w (mm)	ΔP = P_y - P_w (mm)	ΔP/L (mm/m)
5,0	5,0	0	-	-
10,0	17,0	0	-	-
12,5	24,0	0	-	-
15,0	30,5	0	30,5	11,5
17,5	40,0	14,0	26,0	9,8
20,0	32,0	16,0	16,0	6,0
22,5	39,5	20,0	19,5	7,4
25,0	44,5	23,0	21,5	8,1
27,5	56,5	28,5	28,0	10,6
30,0	62,5	32,0	30,5	11,5

Para as mesmas condições de velocidades (5, 10, 12,5 e 15 m/s) e vazões mássicas (0,085, 0,13 e 0,17 kg/s) pode-se observar o mesmo comportamento apresentado pelos outros sólidos polietileno e poliestireno, (Tabela 4.25).

Tabela 4.25 - Perda de carga em função da vazão mássica de polipropileno

Vazão mássica de 0,085 kg/s				
V_{descarga} (m/s)	P_y (mm)	P_w (mm)	ΔP = P_y - P_w (mm)	ΔP/L (mm/m)
5,0	5,0	0	-	-
10,0	17,0	0	-	-
12,5	23,5	0	23,5	8,9
15,0	17,0	10,0	7,0	2,6
17,5	22,0	13,0	9,0	3,4
20,0	27,5	16,0	11,5	4,3
22,5	33,0	19,5	13,5	5,1
25,0	39,5	23,0	16,5	6,2
27,5	46,0	26,0	20,0	7,5
30,0	53,5	31,5	22,0	8,3

Vazão mássica de 0,13 kg/s				
V_{descarga} (m/s)	P_y (mm)	P_w (mm)	ΔP = P_y - P_w (mm)	ΔP/L (mm/m)
5,0	5,5	0	-	-
10,0	17,5	0	-	-
12,5	24,0	0	-	-
15,0	27,0	0	27,0	10,2
17,5	23,0	12,0	11,0	4,2
20,0	31,5	18,5	13,0	4,9
22,5	34,0	19,0	15,0	5,7
25,0	51,0	33,0	18,0	6,8
27,5	50,0	28,5	21,5	8,1
30,0	58,0	32,0	26,0	9,8

Vazão mássica de 0,17 Kg/s				
V_{descarga} (m/s)	P_y (mm)	P_w (mm)	ΔP = P_y - P_w (mm)	ΔP/L (mm/m)
5,0	5,0	0	-	-
10,0	17,5	0	-	-
12,5	24,5	0	-	-
15,0	31,5	0	31,5	11,9
17,5	24,0	11,0	13,0	4,9
20,0	32,5	16,5	16,0	6,0
22,5	38,5	20,0	18,5	7,0
25,0	46,0	24,5	21,5	8,1
27,5	51,5	28,0	23,5	8,9
30,0	61,5	32,5	29,0	10,9

A Tabela 4.26 mostra as frações mássicas por unidade de área do polietileno para as vazões de 0,085, 0,13 e 0,17 kg/s. Os pontos de 1 a 9 são os indicados na Figura 3.18. As frações mássicas foram calculadas pela relação entre a massa das partículas e a somatória da massa dos sólidos ambas por unidade de área (Tabelas de 4.13 a 4.15).

Tabela 4.26 – Fração mássica por unidade de área para o polietileno

Vazão mássica de 0,085 kg/s										
V _{descarga} (m/s)	FR % nos Coletores									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total
10,0	0	0	0	0	0	0	27,55	49,71	22,74	100
12,5	1,13	1,04	1,40	2,83	2,73	3,71	30,95	33,24	22,98	100
15,0	1,54	1,29	1,62	3,99	2,71	4,31	28,62	32,40	23,52	100
17,5	2,32	2,07	2,38	5,19	4,33	5,50	27,10	29,60	21,51	100
20,0	2,04	1,74	2,07	3,96	3,20	4,09	28,10	34,87	19,92	100
22,5	2,55	2,18	2,69	4,86	3,79	5,33	27,09	28,99	22,53	100
25,0	3,14	2,86	3,38	5,13	3,89	5,92	25,58	26,20	23,91	100
27,5	4,34	3,96	4,53	6,30	4,53	7,06	25,15	22,68	21,45	100
30,0	5,34	4,93	5,56	7,02	4,74	7,52	25,11	20,55	19,24	100
Vazão mássica de 0,13 kg/s										
V _{descarga} (m/s)	FR % nos Coletores									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total
10,0		0	0	0	0	0	23,58	53,28	23,14	100
12,5	0	0	0	2,72	3,80	3,76	29,73	36,08	23,90	100
15,0	1,22	0,98	1,16	3,72	3,51	3,96	29,02	32,86	23,58	100
17,5	1,94	1,67	2,00	4,70	4,14	5,18	27,60	30,30	22,49	100
20,0	2,68	2,42	2,76	5,31	4,31	5,72	27,85	25,85	23,09	100
22,5	1,94	1,65	2,05	4,00	3,24	4,23	27,92	34,66	20,31	100
25,0	1,79	1,71	2,25	3,27	3,12	4,45	26,96	33,99	22,44	100
27,5	3,29	2,98	3,53	5,20	3,99	5,45	25,54	27,53	22,48	100
30,0	3,94	3,69	4,13	5,78	4,09	6,42	25,37	25,87	20,70	100
Vazão mássica de 0,17 kg/s										
V _{descarga} (m/s)	FR % nos Coletores									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total
10,0	0	0	0	0	0	0	47,12	38,26	14,63	100
12,5	0	0	0	3,51	2,88	5,91	34,46	24,54	28,70	100
15,0	0,83	1,08	1,07	3,53	3,38	3,75	31,31	30,97	24,08	100
17,5	1,77	1,46	1,78	4,57	4,24	4,59	27,33	31,60	22,67	100
20,0	2,81	2,51	2,78	5,89	4,99	6,32	25,92	27,62	21,16	100
22,5	1,56	1,36	1,62	3,54	2,79	3,66	27,21	38,18	20,09	100
25,0	2,03	1,66	2,05	3,83	3,11	4,48	26,30	33,63	22,91	100
27,5	2,81	2,50	2,97	4,65	3,64	5,33	25,55	30,28	22,28	100
30,0	3,29	2,17	3,41	5,17	3,85	5,66	25,91	28,51	22,01	100

A Tabela 4.27 mostra as frações mássicas por unidade de área do poliestireno para as vazões de 0,085, 0,13 e 0,17 kg/s. As frações mássicas foram determinadas a partir da equação 3.29, a qual relaciona a massa das partículas e a somatória da massa dos sólidos ambas por unidade de área (Tabelas de 4.16 a 4.18).

Tabela 4.27 – Fração mássica por unidade de área para o poliestireno

Vazão mássica de 0,085 kg/s										
V_{descarga} (m/s)	FR % nos Coletores									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total
10,0	0	0	0	1,61	1,39	1,63	28,32	43,50	23,55	100
12,5	1,11	0,83	1,20	2,53	2,36	2,67	30,91	33,48	24,89	100
15,0	1,71	0,36	1,76	4,47	3,79	4,72	28,26	31,94	22,98	100
17,5	1,23	1,03	1,32	2,83	2,34	3,09	25,67	42,37	20,13	100
20,0	1,25	1,07	1,34	2,87	2,33	3,08	28,43	37,10	22,53	100
22,5	1,88	1,68	2,02	3,69	3,35	4,48	28,18	27,42	27,31	100
25,0	2,20	2,13	2,41	3,88	3,52	4,32	24,77	33,85	22,92	100
27,5	3,62	3,47	3,78	5,95	4,72	6,02	26,03	27,38	19,02	100
30,0	4,42	4,08	4,44	6,82	4,85	6,76	26,36	23,83	18,44	100

Vazão mássica de 0,13 kg/s										
V_{descarga} (m/s)	FR % nos Coletores									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total
10,0	0	0	0	0	0	0	25,94	51,64	22,42	100
12,5	0	0	0	1,91	1,70	1,85	27,92	44,69	21,94	100
15,0	0,95	0,85	1,00	2,84	2,48	3,02	44,35	26,60	17,91	100
17,5	0,66	0,61	0,75	1,89	1,73	2,22	25,65	45,20	21,29	100
20,0	1,23	0,97	1,22	2,95	2,39	3,01	27,69	40,50	20,03	100
22,5	1,16	0,99	1,20	2,47	2,21	2,92	57,21	12,09	19,74	100
25,0	1,88	1,68	1,99	3,56	3,22	3,99	24,41	35,88	23,38	100
27,5	2,85	2,70	2,96	4,98	4,11	5,19	25,87	31,50	19,83	100
30,0	3,48	3,35	3,70	5,83	4,40	5,90	26,06	28,11	19,17	100

Vazão mássica de 0,17 kg/s										
V_{descarga} (m/s)	FR % nos Coletores									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total
10,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
12,5	0	0	0	1,48	1,42	1,43	26,97	47,69	21,02	100
15,0	0,87	0,76	0,96	2,76	2,56	2,98	27,48	38,91	22,72	100
17,5	2,05	1,81	2,07	5,23	4,63	5,52	26,42	30,65	21,62	100
20,0	0,96	0,76	0,92	2,51	2,00	2,54	26,34	43,68	20,27	100
22,5	1,13	0,97	1,24	2,81	2,48	3,25	26,48	40,25	21,38	100
25,0	1,48	1,33	1,58	3,06	2,77	3,52	24,51	38,30	23,45	100
27,5	2,22	2,05	2,25	4,08	3,55	4,22	25,34	35,75	20,54	100
30,0	3,06	2,82	3,12	5,28	4,10	5,32	26,53	30,38	19,39	100

A Tabela 4.28 apresenta as frações mássicas por unidade de área do polipropileno para as vazões de sólidos estudadas. A partir da equação 3.29, a qual relaciona a massa das partículas e a somatória da massa dos sólidos ambas por unidade de área foi obtida a fração mássica por unidade de área (Tabelas de 4.19 a 4.20).

Tabela 4.28 – Fração mássica por unidade de área para o polipropileno

Vazão mássica de 0,085 kg/s										
------------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

$V_{descarga}$ (m/s)	FR % nos Coletores									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total
10,0	0,81	0,55	0,68	2,17	2,14	2,30	30,06	38,75	22,52	100
12,5	0,94	0,79	1,00	2,74	2,47	2,93	28,32	38,47	22,35	100
15,0	0,84	0,72	0,88	2,32	1,94	2,55	28,41	39,56	22,78	100
17,5	1,87	1,54	1,89	3,43	2,99	3,57	25,67	38,17	20,88	100
20,0	2,24	1,95	2,22	4,22	3,28	4,26	29,95	31,66	20,23	100
22,5	2,61	2,23	2,76	4,96	3,84	5,58	26,89	27,31	23,82	100
25,0	3,05	2,76	3,20	5,19	4,18	5,96	25,85	25,62	24,19	100
27,5	4,05	3,65	4,15	6,32	4,84	6,99	25,34	22,97	21,69	100
30,0	4,74	4,47	4,88	6,96	5,22	7,41	25,08	21,49	19,75	100

Vazão mássica de 0,13 kg/s

$V_{descarga}$ (m/s)	FR % nos Coletores									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total
10,0	0	0	0	2,16	2,18	4,64	31,01	37,36	22,66	100
12,5	0,77	0,62	1,02	2,40	2,04	2,53	27,65	40,54	22,42	100
15,0	1,70	1,35	1,68	4,33	3,54	4,46	28,83	31,21	22,90	100
17,5	1,16	0,98	1,20	2,55	2,25	2,84	26,04	40,74	22,25	100
20,0	2,07	1,70	2,07	3,84	3,09	3,85	28,70	35,49	19,19	100
22,5	2,35	1,99	2,42	4,39	4,27	3,99	28,01	30,43	22,17	100
25,0	2,58	2,19	2,31	4,52	3,51	4,34	27,38	29,35	23,83	100
27,5	3,58	3,20	3,79	5,74	4,51	6,52	25,76	24,72	22,18	100
30,0	4,21	3,81	4,34	6,29	4,80	6,81	25,36	23,65	20,73	100

Vazão mássica de 0,17 kg/s

$V_{descarga}$ (m/s)	FR % nos Coletores									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total
10,0	0	0	0	0	0	0	32,98	45,59	21,43	100
12,5	0	0	0	2,70	2,47	2,40	29,07	39,35	24,00	100
15,0	1,10	1,14	1,44	3,53	3,18	3,98	28,68	34,16	22,78	100
17,5	2,46	2,12	2,59	5,52	4,58	6,10	26,93	27,67	22,03	100
20,0	1,73	1,47	1,83	3,50	2,92	3,61	27,38	36,73	20,83	100
22,5	2,21	1,83	2,25	4,22	3,27	4,44	28,49	32,70	20,59	100
25,0	2,48	2,22	2,70	4,51	3,73	5,33	26,14	28,96	23,92	100
27,5	3,29	2,89	3,45	5,37	4,28	6,21	25,55	26,16	22,79	100
30,0	3,83	3,53	3,98	6,09	4,61	6,58	25,52	24,69	21,18	100

As Figuras de 4.4 a 4.6 apresentam a distribuição das partículas na seção da tubulação de nove pontos experimentais e a curva característica de perda de carga por unidade de comprimento em função da velocidade de ar e vazão de sólidos, polietileno, poliestireno e polipropileno, respectivamente conforme citado no item 4.4.

As vazões mássicas de sólidos selecionadas para o estudo foram 0,085 kg/s, 0,13 kg/s e 0,17 kg/s nomeadas respectivamente de G_1 , G_2 e G_3 . A velocidade variou de 0 a 30 m/s. A partir da massa retida em cada saco do módulo de coleta localizado no final do

transportador, pode-se calcular a fração mássica por unidade de área e, assim, verificar a dispersão de cada sólido na seção do duto para as condições descritas.

Os softwaers empregados na contrução dos gráficos de queda de pressão, velocidade do ar e vazão mássica, e de distribuição de partículas na seção do duto foram o Origin 6.0 e o Excel 2003, respectivamente.

Na Figura 4.4 para o polietileno curva A'B' mostra a queda de pressão ocasionada pelo escoamento do ar (sem sólido, vazão $G_0 = 0$) ao longo da linha de transporte horizontal. Pode-se notar que a perda de carga aumenta com o aumento da velocidade, devido ao atrito interno, atrito do ar contra as paredes e perturbações no escoamento. Na velocidade limite de 30 m/s a perda de carga está próxima a 5 mmca por metro de tubo.

A curva ABC representa o perfil de perda de carga para uma vazão de sólidos de 0,085 kg/s (G_1). Para a máxima velocidade de ar de aproximadamente 30m/s, tem-se uma queda de pressão por unidade de comprimento relativamente alta em torno de 8,5 mm/m. À medida que a velocidade de ar foi reduzida para a vazão de sólido constante (G_1), a perda de carga diminui e passa por um ponto mínimo denominado velocidade de saltitação (próxima a 17,5 m/s com perda de 4,3 mmca/m, Figura 4.4). A partir desse ponto, a área disponível para o fluxo de ar é restringida pelo acúmulo de sólido na parte inferior dos tubos horizontais acarretando novamente o aumento da pressão, atingindo 10 mm/m para uma velocidade de 15 m/s. Após este ponto alguns dos sólidos podem se mover em fluxo de fase densa no fundo do duto, enquanto que outros escoam ainda em fase diluída na parte superior do tubo, até que ocorra a obstrução total da seção da tubulação.

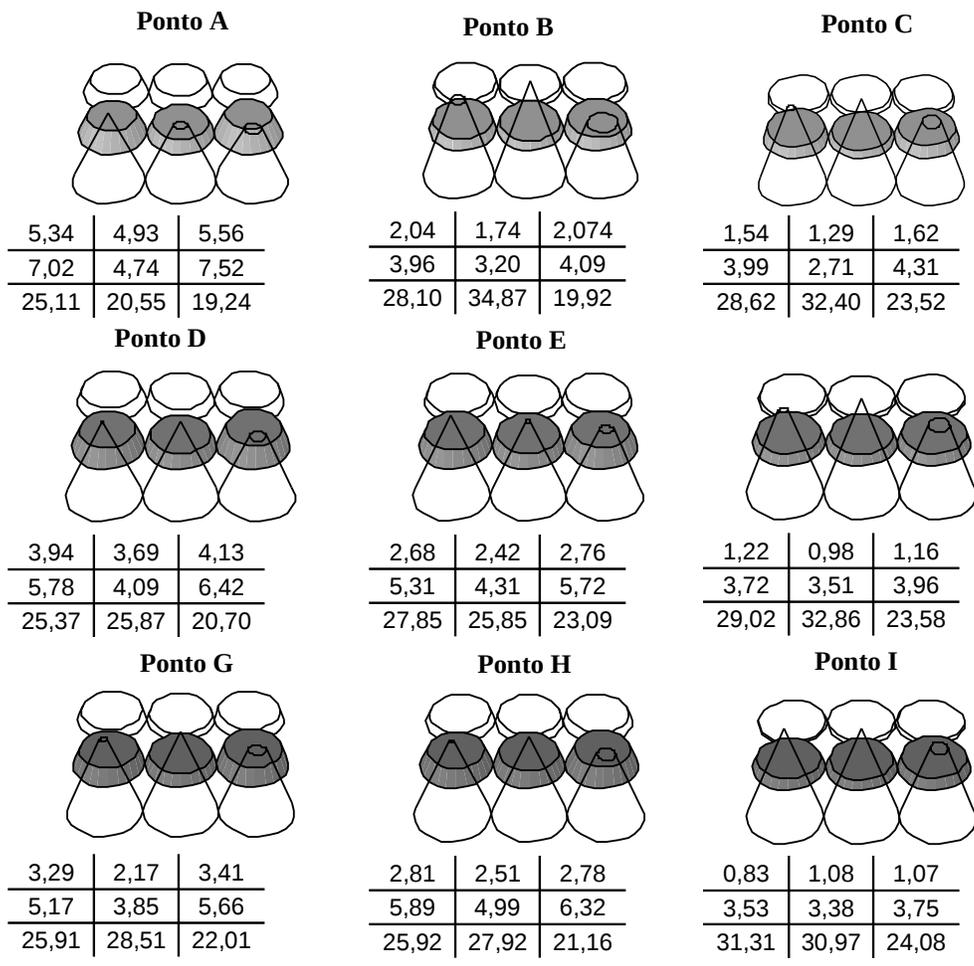
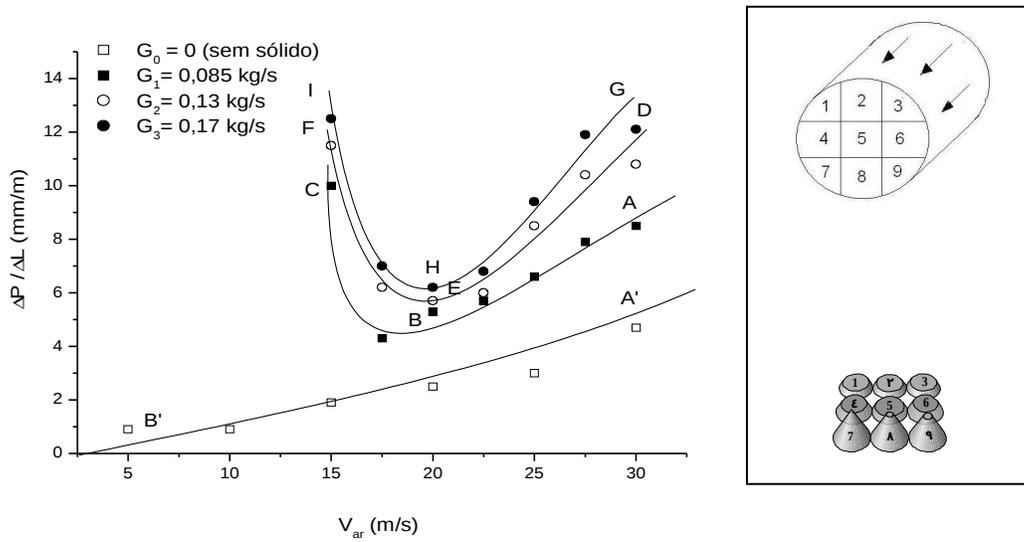


Figura 4.4 - Diagrama de fases do polietileno – Perda de carga por unidade de comprimento em função da velocidade do ar e da vazão de sólidos. Distribuição de sólidos na secção da tubulação.

Este comportamento pode ser também observado para as outras duas vazões de sólidos estudadas, G_2 de 0,13 kg/s e G_3 de 0,17 kg/s representadas pelas curvas DEF e GHI, respectivamente. É interessante ressaltar que para uma velocidade constante de ar, o gradiente de pressão total aumenta com o aumento da vazão mássica de sólidos. Para uma velocidade de 15 m/s, a perda de carga por comprimento ($\Delta P/\Delta L$) nos pontos C (0,085 kg/s), F (0,13 kg/s) e I (0,17 kg/s) foi de 10,0 mm/m, 11,5 mm/m e 12,5 mm/m. O aumento da perda de carga para vazões de sólidos elevadas pode ser atribuído a uma maior concentração de partículas na seção transversal do duto, dificultando o escoamento do ar pela tubulação.

As correlações para se prever a perda de carga, conforme GOMIDE 1983, apresentaram (cálculo no Apêndice B) valores de 130,4 mmca e 5,3 mmca, bastante discrepantes entre si e com desvios de 1906,3 % e 18,0 % em relação ao valor experimental aproximado de 6,5 mmca/m. Os cálculos foram realizados para uma vazão de 0,17 kg/s de polietileno, velocidade de 21,8 m/s e comprimento de 2,65 m.

Para os outros sólidos em estudo, poliestireno (Figura 4.5) e polipropileno (Figura 4.6) foi observado o mesmo comportamento típico em relação a perda de carga, em função da variação da velocidade do ar e da vazão mássica. Entretanto, pode-se observar que a perda de carga na curva de polietileno para uma velocidade mínima de ar de 15 m/s e vazão máxima de 0,17 kg/s é maior que a dos demais sólidos.

A velocidade de saltitação para todos os materiais estudados foi determinada pelo ponto de inflexão na curva de perda de carga em função da velocidade de ar e vazão de sólidos (diagrama de fases). Para a vazão de polietileno de 0,085 kg/s a velocidade de saltitação foi de 17,5 m/s, e para as demais vazões 0,13 e 0,17 kg/s foi de 20 m/s, conforme mostra a Figura 4.4. Para o poliestireno observa-se duas velocidades de saltitação, para uma vazão mássica de 0,085 kg/s e 0,13 kg/s foi determinada uma velocidade de 17,5 m/s e para 0,17 kg/s foi obtida uma velocidade de 20 m/s (Figura 4.5). O polipropileno apresentou também duas velocidades de saltitação distintas de 17,5 m/s para vazões mássicas de 0,13 e 0,17 kg/s e de 15 m/s para uma vazão de 0,085 kg/s (Figura 4.6).

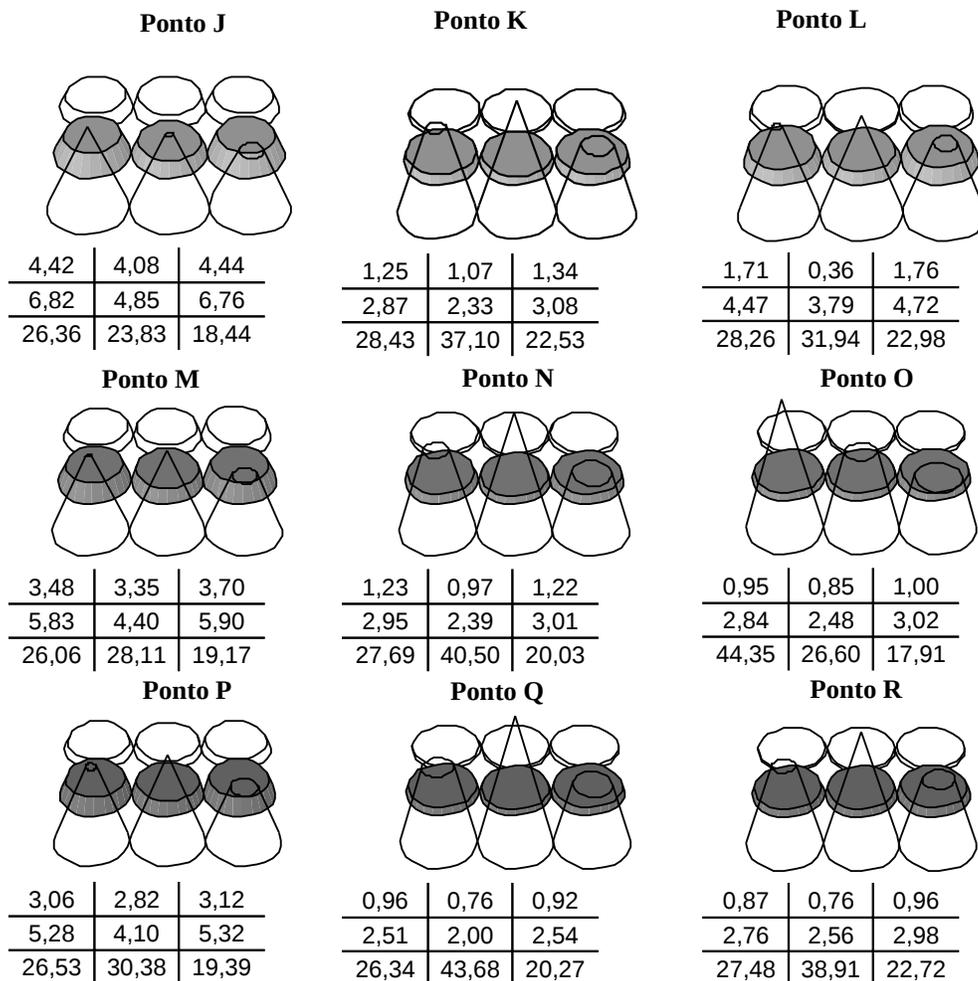
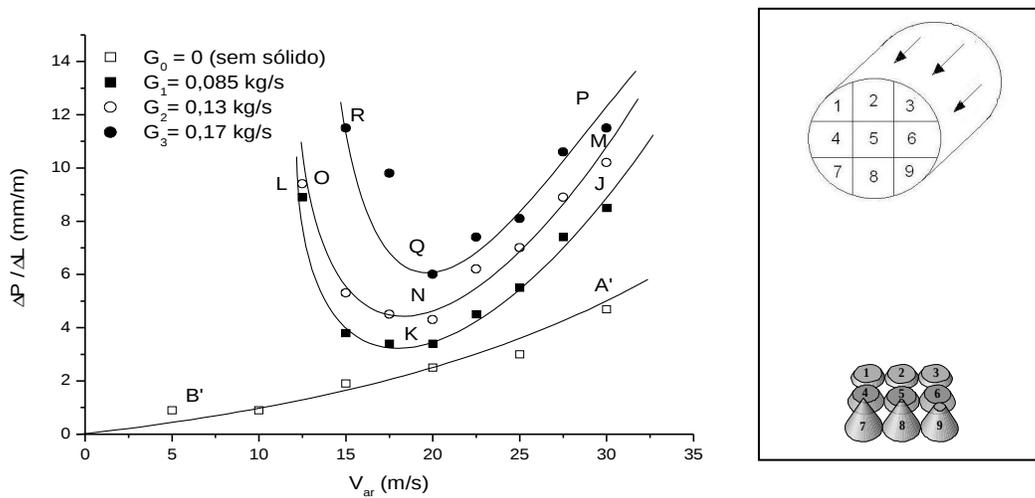


Figura 4.5 - Diagrama de fases do poliestireno – Perda de carga por unidade de comprimento em função da velocidade do ar e da vazão de sólidos. Distribuição de sólidos na secção da tubulação.

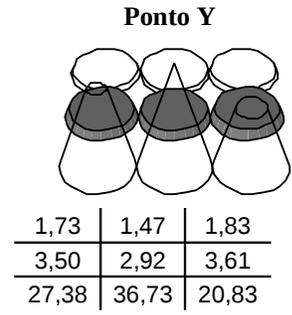
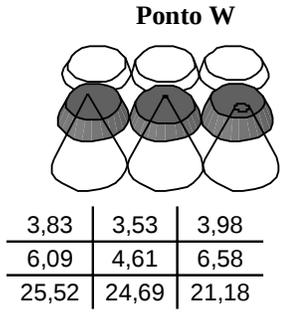
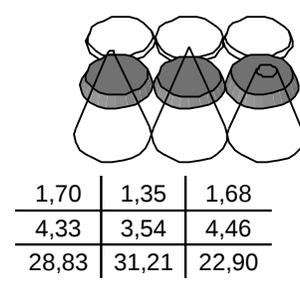
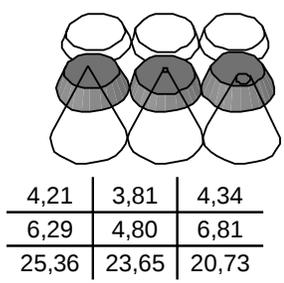
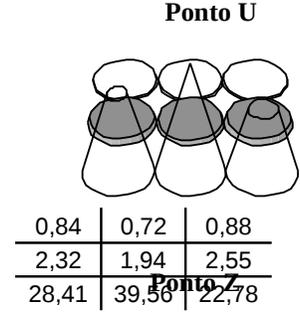
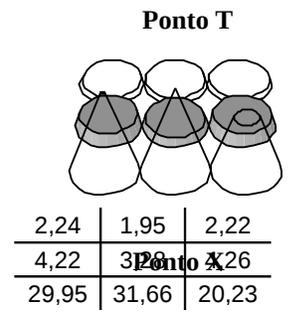
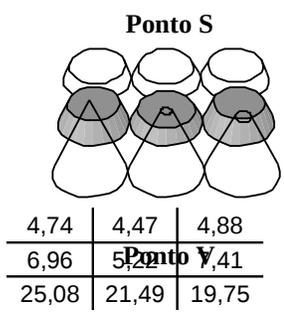
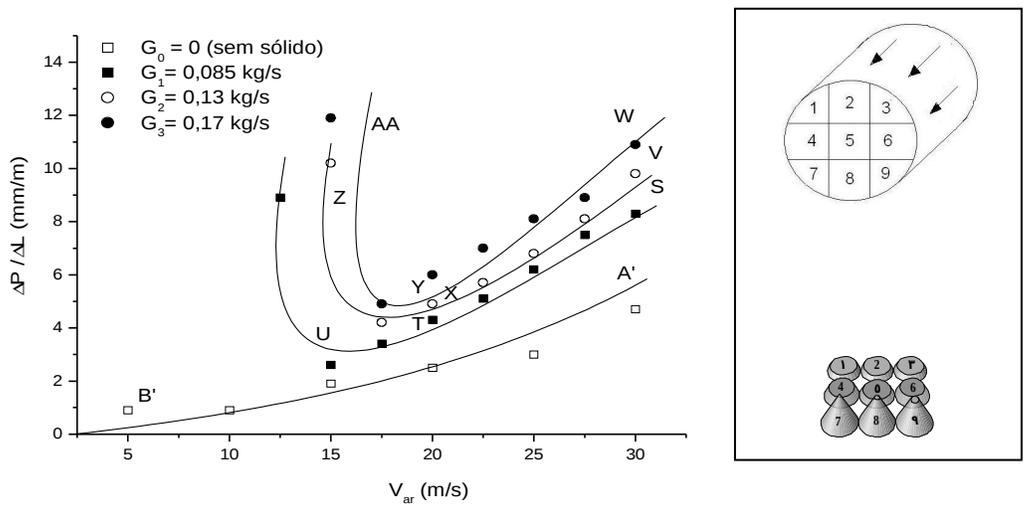


Figura 4.6 - Diagrama de fases do polipropileno – Perda de carga por unidade de comprimento em função da velocidade do ar e da vazão de sólidos. Distribuição de sólidos na secção da tubulação.

As Tabelas 4.29 e 4.30 forneceram os resultados dos cálculos da velocidade de saltitação pelas correlações de RIZK (1973) e MATSUMOTO (1975), Apêndice B. Todas as velocidades obtidas pelas correlações foram menores que as velocidades experimentais de saltitação (Figuras 4.4, 4.5 e 4.6). Pode-se dizer então, que essas correlações são contra a segurança, o sistema está comatando antes do previsto provocando erros de projeto e prejuízos financeiros em função dos lucros cessantes (parada da unidade).

Tabela 4.29 – Velocidade de saltitação (m/s) pela correlação de RIZK, 1973.

Material	0,085 kg/s	0,13 kg/s	0,17 kg/s
Polietileno	13,2	13,8	14,3
Poliestireno	11,9	12,7	13,2
Polipropileno	13,2	13,8	14,3

Tabela 4.30 – Velocidade de saltitação (m/s) pela correlação de MATSUMOTO, 1975.

Material	0,085 kg/s	0,13 kg/s	0,17 kg/s
Polietileno	8,5	9,3	9,8
Poliestireno	8,7	9,5	10,1
Polipropileno	8,4	9,3	9,8

Conforme citado na revisão bibliográfica por ZENZ, 1964, RIZK, 1973 e, LEUNG e JONES, 1978, as correlações para se prever as velocidades de saltitação disponíveis apresentam erros elevados sendo, portanto, difícil prever teoricamente as condições sob as quais ocorrerá a velocidade de saltitação, o início da deposição de sólidos. Recomenda-se por conseguinte determinar esta velocidade a partir de experimentos em unidades piloto de transporte pneumático.

Os resultados apresentados pela literatura (LI e TOMITA, 2000) em relação às curvas de perda de carga em função da velocidade de ar indicam apenas de maneira qualitativa a dispersão dos sólidos durante o transporte pneumático em fase diluída, fator

recomendado para estimar possíveis desgastes em tubulações e prever paradas industriais. No entanto, não apresenta valores quantitativos que demonstrem realmente como as partículas estão distribuídas ao longo do trajeto para diversas velocidades de ar e diferentes vazões mássicas de sólidos.

GOMIDE (1983) sugere algumas correlações para a determinação da velocidade ideal de transporte de sólidos relacionando a densidade aparente. Utilizando estes equacionamentos pode-se determinar as seguintes velocidades para o polietileno, poliestireno e polipropileno (equação 2.2), 27, 5 m/s, 29,5 m/s e 27,6 m/s e por outra técnica (equação 2.6) 24,5 m/s, 24,97 m/s e 24, 56 m/s (Apêndice B). Os perfis de distribuição de partículas para a velocidade recomendada pelo autor apresentaram uma péssima dispersão onde a grande maioria dos sólidos foram arrastados pela parte inferior da tubulação até o fim do percurso do transportador, de aproximadamente 70%.

As Figuras 4.4 a 4.6 mostram que pode ocorrer uma distribuição não uniforme na seção da tubulação mesmo longe dos pontos de mínima perda de carga para qualquer vazão de sólido (0,085 kg/s, 0,13 kg/s e 0,17 kg/s) e velocidades variando de 10 a 30 m/s. Pode-se notar que mesmo para a maior velocidade de ar, cerca de 30 m/s e, menor vazão de sólidos de 0,085 kg/s com perda de carga variando da mínima à máxima, os sólidos foram transportados em grande parte pela seção inferior da tubulação, apresentando uma elevada fração de sólido por unidade de área nos coletores de números 7, 8 e 9. Mais de 64,90%, 68,63% e 66,32% para o polietileno, poliestireno e polipropileno respectivamente estão no terço inferior da tubulação (coletores 7, 8 e 9).

Verificou-se também que quanto maior a velocidade e menor a vazão de sólido melhor a distribuição dessas partículas no duto. No entanto, a melhor distribuição ao longo do sistema para cada sólido foi determinada pelo emprego do desvio padrão entre os pontos selecionados para análise, conforme apresentado nas Tabelas 4.31 a 4.33, respectivamente.

Tabela 4.31 – Desvio padrão do polietileno para os pontos A, B, C, D, E, F, G, H e I

Pontos	Desvio (σ)	Pontos	Desvio (σ)	Pontos	Desvio (S)
A	8,09	D	9,80	G	10,95

B	12,97	E	10,99	H	10,62
C	13,04	F	13,29	I	13,46

Tabela 4.32 – Desvio padrão do poliestireno para os pontos J, K, L, M, N, O, P, Q e R

Pontos	Desvio (σ)	Pontos	Desvio (σ)	Pontos	Desvio (S)
J	9,11	M	10,31	P	11,13
K	14,18	N	14,68	Q	15,50
L	12,74	O	15,45	R	14,58

Tabela 4.33 – Desvio padrão do polipropileno para os pontos S, T, U, V, X, Z, W, Y e AA

Pontos	Desvio (σ)	Pontos	Desvio (σ)	Pontos	Desvio (S)
S	8,42	V	9,23	W	9,64
T	12,54	X	13,19	Y	13,53
U	14,99	Z	12,64	AA	13,42

Os menores desvios padrão calculados determinaram os pontos de melhor distribuição para cada tipo de sólido. Dentre os pontos estudados para polietileno, poliestireno e polipropileno os que apresentaram o menor desvio padrão foram os pontos A (8,09), J (9,11) e S (8,42) para uma menor vazão mássica de 0,085 kg/s e velocidade de ar de 30 m/s e conseqüentemente, uma melhor dispersão das partículas, validando os dados qualitativos mencionados. Pode-se verificar também que todos os sólidos apresentaram uma boa dispersão para vazões menores (0,085 kg/s) e velocidades de ar de 20 e 30 m/s, de acordo com os desvios padrões calculados (Tabelas 4.31 a 4.33).

A partir de uma comparação dos menores desvios padrões dos três materiais empregados pode-se observar que o polietileno apresentou uma melhor distribuição de suas partículas na seção do tubo, seguidos pelo polipropileno e o poliestireno, isto devido provavelmente às diferentes características dos sólidos, tais como índice de fluidez, granulometria e forma.

Os resultados sugerem que as curvas de perda de carga em função da velocidade do ar e da vazão de sólidos sejam acompanhadas dos dados de distribuição das partículas na

seção transversal da tubulação para o projeto e análise de unidades de transporte pneumático em fase diluída. Através das curvas apresentadas o projetista obterá mais parâmetros para reduzir o desgaste das tubulações e otimizar o consumo de energia.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Pode-se concluir, para as condições estudadas que:

- a) Foi projetada e montada uma unidade piloto de transporte pneumático em fase diluída e desenvolvidos os métodos para caracterização do ventilador centrífugo, determinação da velocidade de ar, potência consumida, vazão de sólidos e densidade aparente e obtenção da curva de perda de carga em função da velocidade do ar e a vazão de sólidos, e da distribuição dos polímeros polietileno, polipropileno e poliestireno granulados na seção transversal do transportador com diâmetro industrial.
- b) A velocidade de saltitação obtida pelo ponto de inflexão das curvas para o polietileno para a vazão mássica de 0,085 kg/s foi de 17,5 m/s e para as demais vazões 0,13 e 0,17 kg/s foi de 20 m/s. Para o poliestireno a velocidade de saltitação, para uma vazão mássica de 0,085 kg/s e 0,13 kg/s foi de 17,5 m/s e para 0,17 kg/s foi de 20 m/s. O polipropileno apresentou duas velocidades de saltitação distintas de 17,5 m/s para vazões mássicas de 0,13 e 0,17 kg/s e de 15 m/s para uma vazão de 0,085 kg/s .
- c) Para velocidades de 10 a 30 m/s e carga de sólidos de 0,085 kg/s até 0,17 kg/s, quanto maior a vazão de ar e menor a capacidade, melhor a distribuição das partículas. Também para as condições com perdas de carga superior à mínima, os três coletores da parte inferior das tubulações horizontais apresentaram uma elevada fração de sólido por unidade de área cerca de mais de 64,90%, 68,63% e 66,32% para o polietileno, poliestireno e polipropileno, respectivamente.
- d) Os pontos A (8,09), J (9,11) e S (8,42) para polietileno, poliestireno e polipropileno foram os que apresentaram o menor desvio padrão para uma menor vazão mássica de 0,085 kg/s e a maior velocidade de ar (30 m/s) e, conseqüentemente, uma melhor dispersão das partículas.

- e) O polietileno apresentou uma melhor distribuição de suas partículas quando comparado aos demais sólidos para uma vazão mássica de 0,085 kg/s e velocidade de ar 30 m/s.
- f) Comumente ao se projetarem as unidades industriais de transporte pneumático em fase diluída mais de 70% dos sólidos estão no terço inferior da tubulação gerando desgastes nestas regiões com paradas e lucros cessantes para manutenção.
- g) O estudo da dispersão é importante para completar as informações da curva característica para o projeto e análise das unidades de transporte pneumático com minimização dos desgastes dos dutos.

CAPÍTULO 5

SUGESTÕES

Visando a continuidade do estudo, sugere-se:

- a) Verificar o comportamento de um alimentador contínuo do tipo helicoidal de maior uniformidade de alimentação.
- b) Automatizar os medidores de pressão e velocidade de ar para que a análise seja contínua ao longo do transportador. Manter os medidores atuais para aferição.
- c) Estudar a influência de uma chapa de sacrifício horizontal no centro do tubo, abaixo do alimentador de sólido tendo em vista que as partículas chocam-se com a parte inferior da tubulação e precisam ser re-aceleradas. Verificar a alimentação em Y (ângulo menor que 90°)
- d) Quantificar a perda de carga em função da velocidade de ar e distribuição das partículas em trechos verticais.
- e) Analisar o comportamento dos sólidos empregando singularidades como curvas de raio longo, tês cegos no sistema pneumático em fase diluída.
- f) Pesquisar outros materiais (tubo e partículas de interesse econômico) e a influência da umidade e temperatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ALBUQUERQUE J. A. C. **O plástico na prática**, Porto Alegre: Ed. Sagra Luzzatto, 1999, p.35.

ASME. Test code for fans. **New York**, 1946, p.5-17.

BARTON S., MASON D. J. The effect of pipeline flow conditioning on low velocity gas-solids flow (paper nº901).

BICALHO F. S. Propriedades Físicas do Poliestireno e Poli (Metacrilato de Metila) modificados com óleo de Buriti (mauritia flexuosa). Bélem (Pa): Faculdade de Física, Universidade Federal do Pará/UFPA, 2006. **Dissertação de Mestrado**.

COUTINHO F. M. B., MELLO I. L., SANTA MARIA L. C. Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.13, p.1-13, 2003.

CURTIS J. S., KIMBERLY H. S., PARK K. Effect of particle characteristics on particle pickup velocity. **Powder Technology**, v.131, p.7-14, 2003.

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

DOW CHEMICAL COMPANY – Solids Processing Lab., DHODAPKAR S., MERRICK D., HAUCH D., GROENEWALD H., THEUERKAUF J. **MET -Pneumatic Conveying – Selection of Optimal Conveying Concept**, Dec. 2000.

DOW CHEMICAL COMPANY – Solids Processing Group Engineering Sciences & Market Development, DHODAPKAR S., MERRICK D., HAUCH D., GROENEWALD H., **MET – For Pneumatic Conveying Systems – Dilute Phase Conveying**, Dec. 2000.

DYNAMIC AIR LTDA. Conveying Systems. Nazaré Paulista, SP, Princípios fundamentais do transporte pneumático, *Bulletin 9515-4-BR*, 2005.

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

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

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

GHADIRI M., SAMIMI A., BOEREFIJN R., GROOT A., KOHLUS. Effect of structural characteristics on impact breakage of agglomerates. *Powder Technology*, v.130, p.428-435, 2003

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

GOMIDE R. **Operações Unitárias**. São Paulo: R. Gomide, v.1, 1983. Cap. 4: Transporte de sólidos, p.164-182.

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

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

HINKLE, B.L. **PhD Thesis**, Georgia Institute of Technology, 1953.

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*, v.134, p.156-166, 2003.

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

KLINZING G. E., CABREJOS F. J. Pick-up and saltation relationships and interrelationships in pneumatic conveying (paper nº 78 h), 1991.

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

KNOWLTON T. M., MOUNTZIARIS T. J. The effect of pipe length on the gravity flow of granular materials in vertical standpipes. *Powder Technology*, v.47, p.115-128, 1986.

KONAMI M., TANAKA S., MATSUMOTO K. Attrition of granules during repeated pneumatic transport. *Powder Technology*, v.125, p.82-88, 2002.

KONNO H., SAITO S. J. Pneumatic conveying of solids through straight pipes. *Chemical Engineering*, Japan, v.2, p.211-217, 1969.

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

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

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

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

MATSUMOTO S., HARADA S., SAITO S., MAEDA S. J. *Chemical Engineering*, Japan, v.7, 425, 1975.

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

MOLODTSOF Y, MOTTE JÉRÔME. Predicting transport velocities. *Powder Technology*, v.120, 120-126, 2001.

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

MONTENEGRO R. S. P. Poliestireno e Polipropileno: Área de Operações Industriais da Química do BNDES (A01/GESET4), 1997.

MORAES Jr. D., SILVA E. L., MORAES M. S. **Aplicações de estática e dinâmica dos fluidos**, Santos: UNISANTA, 2008.

NEVES C. J. A. **Resistência Química de PE's a vários reagentes químicos**, Boletim Técnico nº 13 – OPP Petroquímica S.A, 1999.

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**, v.6, p.317-324, 1995.

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

PUNWANI D. V, MODI M. V and TARMAN P. B. Paper presented at the International Powder and Bulk Solids Handling and Processing Conference (Chicago). 1976.

RETO M. A. S., **Revista plástico moderno**, p.22, 2000.

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

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.

SALMAN A.D., VERBA A., HOUNSLOW M. J. Particle fragmentation in dilute phase pneumatic conveying. **Powder Technology**, v.126, p.109-115, 2002.

SAVAGE S. B, PFEFFER R. and ZHAO Z. M. Solids transport, separation and classification. **Powder Technology**, v.88, p.323-333, 1996.

SCHIAVON F. L. Aplicação de técnicas de controle ativo em transportadores pneumáticos de sólidos. São Carlos (SP): Faculdade de Engenharia Mecânica, EESC/USP, 2000. **Dissertação de Mestrado**.

SOMMERFELD M., KUSSIN J. Wall roughness effects on pneumatic conveying of spherical particles in a narrow horizontal channel. **Powder Technology**, v.142, p.180-192, 2004.

UNION CARBIDE CORPORATION. **Technology Methods and Standards**,
Process Engineering Methods, 1983, 145p.

WEN C. Y. Flow Characteristics in solids-gas transportation systems, US Dept of
the Interior, **Bureau of Mines**, Pennsylvania, IC 8314, p.62-72, 1959.

ZENZ F. A. *Ind. Eng. Chem.*, v. 41, p.2801-6, 1949.

APÊNDICE A

Características dos Polímeros

a) Polietileno

Polietileno é um derivado do gás eteno ou etileno (hidrocarboneto olefínico) obtido através do “cracking” da nafta do petróleo. NEVES (1999) relata que este termoplástico é inerte face à maioria dos produtos químicos comuns devido à sua natureza parafínica, seu alto peso molecular e sua estrutura parcialmente cristalina. Em temperaturas abaixo de 60°C, é parcialmente solúvel em todos os solventes. É de fácil processamento, atóxico, inodoro, excelente isolante e pouco sensível à água e à umidade, da qual absorve menos de 0,005%. Possui uma resistência à corrosão muito elevada e resistência à corrosão externa em solos agressivos (ácidos ou alcalinos), não precisando de proteção.

Por ser um material extremamente versátil, não é necessário o uso de plastificantes ou outros aditivos para diferenciar as suas características. Por este motivo, é considerado o polímero sintético menos perigoso em relação ao seu impacto ambiental durante a sua produção, uso e descarte.

Dependendo das condições reacionais e do sistema catalítico empregado na polimerização, cinco tipos diferentes de polietileno podem ser produzidos: Polietileno de Baixa Densidade (PEBD), Polietileno de Alta Densidade (PEAD), Polietileno Linear de Baixa Densidade (PELBD), Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (PEUAPM) e Polietileno de Ultra Baixa Densidade (PEUBD).

A Tabela A1 apresenta as características e aplicações dos diferentes tipos de polietileno (COUTINHO, 2003).

Tabela A1- As características e aplicações dos diferentes tipos de polietileno (COUTINHO, 2003).

Tipos de Polietileno	Características	Aplicações
PEBD	<p>Apresenta uma grande quantidade de ramificações de cadeia pelo fato da sua reação ser altamente exotérmica em altas pressões.</p> <p>É um polímero parcialmente cristalino (50 a 60%), cuja temperatura de fusão está na região de 110 a 115°C. Tem uma combinação única de propriedades: tenacidade, alta resistência ao impacto, alta flexibilidade, boa processabilidade, estabilidade e propriedades elétricas notáveis.</p>	<p>Usado como filmes para embalagens industriais e agrícolas, filmes destinados a embalagens de alimentos líquidos e sólidos, filmes laminados e plastificados para alimentos, embalagens para produtos farmacêuticos e hospitalares, brinquedos e utilidades domésticas, revestimento de fios e cabos, tubos e mangueiras.</p>
PEAD	<p>Emprega no seu processo de polimerização, catalisadores no sentido de controlar o ordenamento dos átomos na cadeia molecular final, possibilitando a obtenção de polietileno à baixa pressão. É altamente cristalino (acima de 90%), pois apresenta um baixo teor de ramificações. Sua temperatura de fusão cristalina é de aproximadamente 132°C e seu peso molecular médio fica na faixa de 50.000 a 250.000.</p>	<p>É utilizado em bombonas, embalagens, caixas d'água, assentos sanitários, potes para alimentação, brinquedos, materiais hospitalares, tubos para distribuição de água e gás, esgoto e emissários, tanques de combustível automotivos, dutos para proteção de cabos subterrâneos, tubos, drenos, entre outras.</p>
PELBD	<p>Apresenta estrutura molecular de cadeias lineares com ramificações curtas e distribuição de peso molecular estreita quando comparada com a do polietileno de baixa densidade. A maior resistência ao cisalhamento e a maior susceptibilidade à fratura do fundido fazem com quem o seu processamento seja mais difícil. Mas, as ótimas propriedades mecânicas e às boas características ópticas, mostram que vale a pena tentar vencer essas dificuldades encontradas.</p>	<p>Empregado em filmes para uso industriais, fraldas descartáveis e absorventes, lonas em geral, brinquedos, artigos farmacêuticos e hospitalares, revestimento de fios e cabos.</p>

continua

Tabela A1- As características e aplicações dos diferentes tipos de polietileno (continuação).

PEUAPM	Possui alta densidade, é branco e opaco, com	Adequado para o uso em aplicações
--------	--	-----------------------------------

	<p>uma temperatura de transição vítrea que varia entre -100°C e -125°C e uma temperatura de fusão de 135°C, com cristalinidade em torno de 45%. É um polímero de cadeia essencialmente linear, com peso molecular atingindo valores de peso molecular viscosimétrico médio em torno de 3×10^6. As características de resistência a abrasão, ao impacto e a produtos químicos, autolubrificação, baixo coeficiente de atrito, absorção de ruídos e outras.</p>	<p>industriais diversificadas como a mineração, química, alimentícia, papel e celulose e têxtil desde que a temperatura de trabalho não exceda 80°C.</p> <p>Outras aplicações: galvanoplastia, transportadores industriais, artigos esportivos, ortopédicos e cirúrgicos.</p>
PEUBD	<p>Adicionado aos polietilenos e ao polipropileno melhora a resistência ao impacto, a flexibilidade e a resistência ao rasgamento desses polímeros.</p> <p>Possui uma melhor propriedade óptica em relação ao polietileno linear de baixa densidade.</p>	<p>O principal uso como resina modificadora. As resinas de polietileno de ultra baixa densidade produzidas pela Dow Chemical oferecem maior resistência e flexibilidade a baixa temperatura, sendo são ideais para produzir filmes para embalagens de líquidos, pois além de evitar infiltrações e derramamentos, a embalagem apresenta alta resistência ao rasgo.</p>

Reprojetado em função da globalização, o mercado brasileiro de polietileno ganhou novo perfil em volume e qualidade, gerando maior oferta e tipos de melhor desempenho e produtividade para a indústria de transformação. De acordo com RETO (2000) as poliolefinas representam aproximadamente 60% da demanda mundial de termoplásticos, onde os polietilenos se encaixam no patamar dos 40%. No Brasil, as poliolefinas representam cerca de 65%, dos quais 43% correspondem aos polietilenos.

A estrutura da oferta de polietilenos no mercado brasileiro é bastante difusa. Atualmente, nove fabricantes vendem resinas de polietileno no país, tendo como principais representantes a Braskem, Dow Química, dentre outros.

ALBUQUERQUE (1999) apresenta na Tabela A2 a comparação das propriedades físicas entre os tipos de polietileno.

Tabela A2- Comparação das propriedades físicas dos diferentes tipos de polietileno (ALBUQUERQUE, 1999).

Testes DIN, ASTM	Propriedades	Densidade dos PE's			Peso molecular ultra elevado (PEUAPM)
		Baixa	Média	Alta	
Físicas					
D(53479)	Densidade (g/cm ³)	0,910-0,925	0,926-0,940	0,941-0,965	0,928-0,941
D(53473)	Absorção de água 24h, 3mm de espessura (%)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Mecânicas					
D(53455)	Resistência à tração (10 ³ Kgf/cm ²)	0,4-1,4	0,8-2,4	2,1-3,8	2,8-4,2
D(53455)	Alongamento na ruptura (%)	90/800	50/600	20/1000	200/500
D(53457)	Módulo de flexão (10 ⁴ Kgf/cm ²)	0,06-0,5	0,5-1,0	0,7-1,5	0,7-1,2
D256 (ASTM)	Resistência ao impacto (Kg)	Não quebra	—	—	Não quebra
D785 (ASTM)	Dureza Rockwell R	10	15	65	67
Térmicas					
D(52612)	Condutividade térmica (10 ⁻⁴ cal/s cm ² °C/cm)	8,0	8,0-10,0	11,0-12,4	11,0
D(52328)	Expansão térmica linear (10 ⁻³ cm ³ /°C)	20	15	14	15
D(53461)	Temperatura de deflexão (°C)	32-42	42-50	45-55	50
Ópticas					
D542 (ASTM)	Índice de refração	1,51	1,52	1,52	—
D1003 (ASTM)	Transmitância (%)	4-50	40-50	10-50	—

b) Polipropileno

O polipropileno é uma resina termoplástica, pertencente ao grupo das poliolefinas que inclui os polietilenos e polibutenos, com ampla faixa de propriedades e grande facilidade de processamento. Estas características têm permitido o crescimento contínuo no consumo mundial deste material.

O polipropileno é um dos plásticos de maior venda e que mostra a maior taxa de crescimento anual no mundo, devido às suas excepcionais propriedades e [versatilidade para inúmeras aplicações](#).

É um termoplástico semicristalino, produzido através da polimerização do monômero propeno ou propileno, usando um catalisador estereoespecífico formando

cadeias longas. O termo estereoespecífico do catalisador se refere à característica de controlar a posição do grupo metila na cadeia polimérica de forma ordenada. Os tipos de polipropileno podem ser vistos na Tabela A3.

Tabela A3 – Tipos, obtenção e características dos propilenos

Tipos	Obtenção	Características
Homopolímeros (HOMO):	Polimerização do propeno.	Elevada cristalinidade, brilho, alta rigidez, dureza e resistência ao calor.
Copolímeros Heterofásicos (HECO):	São produzidos em dois reatores em série, onde no primeiro se polimeriza somente o propeno e no segundo uma fase elastomérica composta de propeno e eteno.	Excelente resistência ao impacto e flexibilidade tanto à temperatura ambiente como a baixas temperaturas, sendo largamente utilizado na produção de peças automobilísticas, móveis e aplicações industriais.
Copolímeros Random (RACO):	São obtidos quando se adiciona ao propeno um segundo monômero (normalmente eteno) no reator. As moléculas de eteno são inseridas aleatoriamente, o que reduz a cristalinidade do material, produz-se um material que alia excelentes propriedades óticas (brilho, transparência) à boa resistência e menor temperatura de fusão.	Estes produtos são largamente utilizados na produção de utensílios domésticos embalagens e filmes flexíveis.

Entre as inúmeras propriedades físicas e químicas do polipropileno, podem ser destacadas na Tabela A4.

Tabela A4 – Características básicas, aplicações e propriedades físico-química.

Características Básicas	Aplicações	Propriedades Físico-químicas

<ul style="list-style-type: none"> - Apresenta elevada rigidez, superior à da maioria dos plásticos comerciais; - Boa resistência ao impacto à temperatura ambiente para todos os tipos de polipropileno; - Excelente transparência por contacto; - Elevada resistência á fadiga por flexão, tornando-o adequado a aplicações em dobradiças integrais; - Alta dureza superficial; - Elevada resistência química, não sendo atacado pela grande maioria de produtos químicos à temperatura ambiente; - Baixíssima absorção de água; - Baixa permeabilidade ao vapor de água; - Baixíssima condutividade elétrica. 	<ul style="list-style-type: none"> - Embalagem para massas (macarrão), biscoitos, salgadinhos, condimentos, embalagens industriais e para confecção, componente em embalagens laminadas; - Peças técnicas da indústria automobilística, móveis de jardim, eletrodomésticos, eletroeletrônica. Cordas trançadas de polipropileno e algodão utilizadas por fabricantes de bolsas promocionais para butiques, confecções e chaveiros; - O elevado ponto de amolecimento do PP e sua inércia química indicaram-no para a fabricação de dutos, revestimentos de tanques e tubulações para a indústria química, especialmente para as que trabalham em altas temperaturas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aparência: Incolor à leitosa - Odor: Baixo, não perceptível - Densidade: 0,89–0,91 g/cm³ - Estado: Sólido / grão ou pó - Ponto de Fusão: 165 – 175 °C (faixa) - Solubilidade: Insolúvel em água - Dureza: 71 – 75 (escala D)
---	---	---

As principais características do PP que garantem essa grande versatilidade são a resistência à alta temperatura, a resistência química, a excelente resistência à fissura ambiental e a boa processabilidade, além de sua baixa densidade e seu baixo custo, se comparado ao de outras resinas. O PP não apresenta riscos ao meio ambiente, podendo o polímero ser descartado, reciclado ou incinerado. No caso da reciclagem, ela pode se dar por processo mecânico ou pela reciclagem energética, através de sua queima.

c) Poliestireno

O polímero de estireno é originário da reação de etileno com benzeno na presença de cloreto de alumínio, obtendo-se o etilbenzeno, que hidrogenado forma o estireno.

BICALHO (2006) relata que o poliestireno (PS) pertence ao grupo das resinas termoplásticas e é o pioneiro entre elas. Foi em 1831 que um polímero vítreo transparente foi descoberto e, pouco tempo depois, proposto para uso prático. Mas seu desenvolvimento comercial demorou até o momento em que os métodos satisfatórios para a produção do monômero do estireno, fossem encontrados, e até a descoberta de um meio de evitar a polimerização durante o carregamento ou estocagem.

De acordo com MONTENEGRO (1997) a produção comercial do poliestireno foi iniciada em 1930, apresentando-se sob várias formas como mostra a Tabela A5.

Tabela A5 – Formas, descrição e aplicação dos poliestirenos (MONTENEGRO (1997))

Forma	Descrição	Aplicação
Resina Cristal ou “standard”	Apresenta excelente propriedade de brilho e transparência. Adequado para peças que estejam sujeitas à ação do calor e que necessitem de uma excelente estabilidade dimensional. Indicado para extrusão de chapas transparentes, em mistura com poliestireno alto impacto, extrusão de espuma com melhor flexibilidade das bandejas e uma melhor produtividade.	Embalagens, principalmente copos descartáveis e potes para indústria alimentícia. Caixas de CD’s / fitas cassetes. Componentes eletrônicos, artigos para escritório e para análises laboratoriais.
PS resistente ao calor	Maior peso molecular, o que torna seu processamento mais difícil.	Usado em peças de máquinas ou automóveis, gabinetes de rádios e TV, grades de ar condicionado, peças internas e externas de eletrodomésticos e aparelhos eletrônicos, circuladores de ar, ventiladores e exaustores.

continua

Tabela A5 – Formas, descrição e aplicação dos poliestirenos (continuação).

Poliestireno expandido ou EPS (mais	Espuma rígida obtida através da expansão da resina PS durante sua polimerização por meio de um agente químico.	Embalagem protetora e isolante térmico.
-------------------------------------	--	---

conhecido no Brasil pela marca comercial Isopor, da Basf)		
Poliestireno de alto impacto (HIPS)	PS modificado com elastômeros de polibutadieno.	Alguns “grades” desta resina podem competir com alguns plásticos de engenharia, como o ABS (acrilonitrila butadieno estireno) por exemplo, no segmento de vídeo cassetes e componentes de refrigeradores e televisores.

As principais características do poliestireno são o processamento fácil por moldagem a quente, a fácil coloração, o baixo custo, semelhante ao vidro, elevada resistência a álcalis e ácidos, baixa densidade e absorção de umidade, baixa resistência a solventes orgânicos, calor e intempéries e altamente resistente à impactos, as chapas de poliestireno são largamente utilizadas em diversas aplicações como: comunicação visual, embalagens, peças técnicas, etc. Devido a suas propriedades especiais, o PS pode ser utilizado para diversas aplicações. Na Tabela A6 foram listadas algumas propriedades físicas do poliestireno (BICALHO, 2006).

Tabela A6 – Principais propriedades físicas do poliestireno (BICALHO, 2006)

Constante Dielétrica	2,4 a 3,1
----------------------	-----------

Densidade	1,05 g/cm ³
Resistência a Radiação	Boa
Resistência ao UV	Ruim
Índice de Refração	1,59-1,60
Coefficiente de Expansão Térmica	30 a 210 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹
Calor Especifico	1200 J K ⁻¹ Kg ⁻¹
Condutividade Térmica (T ambiente)	0,1 a 0,13 W m ⁻¹ K ⁻¹
Difusividade Térmica (T ambiente)	11,5 x 10 ⁻⁴ cm ² /s
Máxima Temperatura de Trabalho	50 a 95 °C

Apêndice B

Cálculo da velocidade de saltitação

a) Correlação de Rizk

a1. Polietileno e Polipropileno

$$V_{gs} = \left[\frac{w_s \cdot 3^\delta}{A \cdot \rho_f} \cdot (\sqrt{g \cdot D})^x \right]^{\frac{1}{x+1}}$$

$$\text{Dados: } dp = 4,4 \text{ mm} = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$A = 1,07 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$\rho_f = 1,2 \text{ kg/m}^3$$

$$D = 0,117 \text{ m}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\delta = 1,44 \cdot dp + 1,96$$

$$\delta = 1,44 \cdot 4,4 + 1,96$$

$$\delta = 8,296$$

$$x = 1,1 \cdot dp + 2,5$$

$$x = 1,1 \cdot 4,4 + 2,5$$

$$x = 7,34$$

Para $w_s = 0,085 \text{ kg/s}$

$$V_{gs} = \left[\frac{0,085 \cdot 10^{8,296}}{1,07 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2} \cdot (\sqrt{9,81 \cdot 0,117})^{7,34} \right]^{\frac{1}{7,34+1}}$$

$$V_{gs} = 13,2 \text{ m/s}$$

Para $w_s = 0,13 \text{ kg/s}$

$$V_{gs} = \left[\frac{0,13 \cdot 10^{8,296}}{1,07 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2} \cdot (\sqrt{9,81 \cdot 0,117})^{7,34} \right]^{\frac{1}{7,34+1}}$$

$$V_{gs} = 13,85 \text{ m/s}$$

Para $w_s = 0,17 \text{ kg/s}$

$$V_{gs} = \left[\frac{0,17 \cdot 10^{8,296}}{1,07 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2} \cdot (\sqrt{9,81 \cdot 0,117})^{7,34} \right]^{\frac{1}{7,34+1}}$$

$$V_{gs} = 14,31 \text{ m/s}$$

a2. Poliestireno

$$\left| \begin{array}{l} \text{Dados: } dp = 3,2 \text{ mm} = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ m} \\ \delta = 1,44 \cdot dp + 1,96 \\ \delta = 1,44 \cdot 3,2 + 1,96 \\ \delta = 6,568 \\ x = 1,1 \cdot dp + 2,0 \\ x = 1,1 \cdot 3,2 + 2,0 \\ x = 7,52 \end{array} \right.$$

Para $w_s = 0,085 \text{ kg/s}$

$$V_{gs} = \left[\frac{0,085 \cdot 10^{6,568}}{1,07 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2} \cdot (\sqrt{9,81 \cdot 0,117})^{6,02} \right]^{\frac{1}{6,02+1}}$$

$$V_{gs} = 11,97 \text{ m/s}$$

Para $w_s = 0,13 \text{ kg/s}$

$$V_{gs} = \left[\frac{0,13 \cdot 10^{6,568}}{1,07 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2} \cdot (\sqrt{9,81 \cdot 0,117})^{6,02} \right]^{\frac{1}{6,02+1}}$$

$$V_{gs} = 12,7 \text{ m/s}$$

Para $w_s = 0,17 \text{ kg/s}$

$$V_{gs} = \left[\frac{0,17 \cdot 10^{6,568}}{1,07 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2} \cdot (\sqrt{9,81 \cdot 0,117})^{6,02} \right]^{\frac{1}{6,02+1}}$$

$$V_{gs} = 13,21 \text{ m/s}$$

b) Correlação de Matsumoto, para $dp \geq dp^*$.

$$V_{gs} = \left[\left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right)^{-1,06} \cdot \left(\frac{Fr_p}{10} \right)^{3,7} \cdot \frac{w_s \cdot 10^{3,61} \cdot (\sqrt{g \cdot D})^{3,61}}{(0,373) \cdot (A \cdot \rho_f)} \right]^{\frac{1}{3,61+1}}$$

b1. Polietileno

Dado: $\rho_p = 921 \text{ kg/m}^3$

$\rho_f = 1,2 \text{ kg/m}^3$

$dp = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

$$\frac{dp^*}{D} = 1,39 \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right)^{-0,74} = \frac{dp^*}{0,117} = 1,39 \cdot \left(\frac{921}{1,2} \right)^{-0,74}$$

$$dp^* = 1,19 \cdot 10^{-3} < dp$$

$$V_t = 1,73 \cdot \frac{\sqrt{g \cdot dp \cdot (\rho_p - \rho_f)}}{\rho_f}$$

$$V_t = 1,73 \cdot \frac{\sqrt{9,81 \cdot 4,4 \cdot 10^{-3} \cdot (921 - 1,2)}}{1,2}$$

$$V_t = 9,08 \text{ m/s}$$

$$Fr_p = \frac{V_t}{\sqrt{g \cdot dp}}$$

$$Fr_p = \frac{9,08}{\sqrt{9,81 \cdot 4,4 \cdot 10^{-3}}}$$

$$Fr_p = 43,7$$

Para $w_s = 0,085 \text{ kg/s}$

$$V_{gs} = \left[\left(\frac{921}{1,2} \right)^{-1,06} \cdot \left(\frac{43,7}{10} \right)^{3,7} \cdot \frac{0,085 \cdot 10^{3,61} \cdot \left(\sqrt{9,81 \cdot 0,117} \right)^{3,61}}{(0,373) \cdot (1,07 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2)} \right]^{\frac{1}{4,61}}$$

$$V_{gs} = 8,47 \text{ m/s}$$

Para $w_s = 0,13 \text{ kg/s}$

$$V_{gs} = \left[\left(\frac{921}{1,2} \right)^{-1,06} \cdot \left(\frac{43,7}{10} \right)^{3,7} \cdot \frac{0,13 \cdot 10^{3,61} \cdot \left(\sqrt{9,81 \cdot 0,117} \right)^{3,61}}{(0,373) \cdot (1,07 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2)} \right]^{\frac{1}{4,61}}$$

$$V_{gs} = 9,29 \text{ m/s}$$

Para $w_s = 0,17 \text{ kg/s}$

$$V_{gs} = \left[\left(\frac{921}{1,2} \right)^{-1,06} \cdot \left(\frac{43,7}{10} \right)^{3,7} \cdot \frac{0,17 \cdot 10^{3,61} \cdot \left(\sqrt{9,81 \cdot 0,117} \right)^{3,61}}{(0,373) \cdot (1,07 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2)} \right]^{\frac{1}{4,61}}$$

$$V_{gs} = 9,85 \text{ m/s}$$

b2. Polipropileno

Dado: $\rho_p = 905 \text{ kg/m}^3$

$\rho_f = 1,2 \text{ kg/m}^3$

$d_p = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

$$\frac{d_p^*}{D} = 1,39 \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right)^{-0,74} = \frac{d_p^*}{0,117} = 1,39 \cdot \left(\frac{905}{1,2} \right)^{-0,74}$$

$$d_p^* = 1,21 \cdot 10^{-3} < d_p$$

$$V_t = 1,73 \cdot \frac{\sqrt{g \cdot d_p \cdot (\rho_p - \rho_f)}}{\rho_f}$$

$$V_t = 1,73 \cdot \frac{\sqrt{9,81 \cdot 4,4 \cdot 10^{-3} \cdot (905 - 1,2)}}{1,2}$$

$$V_t = 9,004 \text{ m/s}$$

$$Fr_p = \frac{V_t}{\sqrt{g \cdot dp}}$$

$$Fr_p = \frac{9,004}{\sqrt{9,81 \cdot 4,4 \cdot 10^{-3}}}$$

$$Fr_p = 43,34$$

Para $w_s = 0,085 \text{ kg/s}$

$$V_{gs} = \left[\left(\frac{905}{1,2} \right)^{-1,06} \cdot \left(\frac{43,34}{10} \right)^{3,7} \cdot \frac{0,085 \cdot 10^{3,61} \cdot (\sqrt{9,81 \cdot 0,117})^{3,61}}{(0,373) \cdot (1,07 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2)} \right]^{\frac{1}{4,61}}$$

$$V_{gs} = 8,45 \text{ m/s}$$

Para $w_s = 0,13 \text{ kg/s}$

$$V_{gs} = \left[\left(\frac{905}{1,2} \right)^{-1,06} \cdot \left(\frac{43,34}{10} \right)^{3,7} \cdot \frac{0,13 \cdot 10^{3,61} \cdot (\sqrt{9,81 \cdot 0,117})^{3,61}}{(0,373) \cdot (1,07 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2)} \right]^{\frac{1}{4,61}}$$

$$V_{gs} = 9,26 \text{ m/s}$$

Para $w_s = 0,17 \text{ kg/s}$

$$V_{gs} = \left[\left(\frac{905}{1,2} \right)^{-1,06} \cdot \left(\frac{43,34}{10} \right)^{3,7} \cdot \frac{0,17 \cdot 10^{3,61} \cdot (\sqrt{9,81 \cdot 0,117})^{3,61}}{(0,373) \cdot (1,07 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2)} \right]^{\frac{1}{4,61}}$$

$$V_{gs} = 9,82 \text{ m/s}$$

b3. Poliestireno

$$\text{Dado: } \rho_p = 1050 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_f = 1,2 \text{ kg/m}^3$$

$$d_p = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\frac{d_p^*}{D} = 1,39 \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right)^{-0,74} = \frac{d_p^*}{0,117} = 1,39 \cdot \left(\frac{1050}{1,2} \right)^{-0,74}$$

$$d_p^* = 1,08 \cdot 10^{-3} < d_p$$

$$V_t = 1,73 \cdot \frac{\sqrt{g \cdot d_p \cdot (\rho_p - \rho_f)}}{\rho_f}$$

$$V_t = 1,73 \cdot \frac{\sqrt{9,81 \cdot 3,2 \cdot 10^{-3} \cdot (1050 - 1,2)}}{1,2}$$

$$V_t = 8,27 \text{ m/s}$$

$$Fr_p = \frac{V_t}{\sqrt{g \cdot d_p}}$$

$$Fr_p = \frac{8,27}{\sqrt{9,81 \cdot 3,2 \cdot 10^{-3}}}$$

$$Fr_p = 46,67$$

Para $w_s = 0,085 \text{ kg/s}$

$$V_{gs} = \left[\left(\frac{1050}{1,2} \right)^{-1,06} \cdot \left(\frac{46,67}{10} \right)^{3,7} \cdot \frac{0,085 \cdot 10^{3,61} \cdot \left(\sqrt{9,81 \cdot 0,117} \right)^{3,61}}{(0,373) \cdot (1,07 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2)} \right]^{\frac{1}{4,61}}$$

$$V_{gs} = 8,67 \text{ m/s}$$

Para $w_s = 0,13 \text{ kg/s}$

$$V_{gs} = \left[\left(\frac{1050}{1,2} \right)^{-1,06} \cdot \left(\frac{46,67}{10} \right)^{3,7} \cdot \frac{0,13 \cdot 10^{3,61} \cdot (\sqrt{9,81 \cdot 0,117})^{3,61}}{(0,373) \cdot (1,07 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2)} \right]^{\frac{1}{4,61}}$$

$$V_{gs} = 9,5 \text{ m/s}$$

Para $w_s = 0,17 \text{ kg/s}$

$$V_{gs} = \left[\left(\frac{1050}{1,2} \right)^{-1,06} \cdot \left(\frac{46,67}{10} \right)^{3,7} \cdot \frac{0,17 \cdot 10^{3,61} \cdot (\sqrt{9,81 \cdot 0,117})^{3,61}}{(0,373) \cdot (1,07 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2)} \right]^{\frac{1}{4,61}}$$

$$V_{gs} = 10,07 \text{ m/s}$$

Cálculo da perda de carga (Gomide, 1983), recomendado por Fan Engineering.

Dados: material = polietileno

$$D = 0,117 \text{ m}$$

$$L_t = 2,65 \text{ m}$$

$$\phi = 0,5$$

$$\Delta P_e = 0$$

$$C = 0,17 \text{ kg/s} = 0,612 \text{ t/h}$$

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

$$c = \frac{C}{S} = \frac{0,612}{1,07 \cdot 10^{-2}}$$

$$c = 57,2 \text{ m/s}$$

$$V = \left(\frac{c}{0,14} \right)^{\frac{1}{1,95}}$$

$$V = \left(\frac{57,2}{0,14} \right)^{\frac{1}{1,95}}$$

$$V = 21,83 \text{ m/s}$$

$$Q = V.A$$

$$Q = 21,83 \cdot 1,07 \cdot 10^{-2}$$

$$Q = 0,23 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$X = \frac{C}{4,29.Q}$$

$$X = \frac{0,612}{4,29 \cdot 0,23}$$

$$X = 0,6202$$

$$\Delta P_t = \left[1,68 \cdot 2,65 \cdot (0,6202 + 3,5) \cdot \frac{21,83^{1,8}}{117^{1,22}} + 0,138 \cdot 0,5 \cdot 0,6202 \cdot 21,83^2 + 0 \right] \cdot 10^{-4}$$

$$\Delta P_t = 0,03457 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \quad \rightarrow \quad \Delta P_t = 345,7 \text{ mmca}$$

$$\frac{\Delta P_t}{L} = \frac{345,7}{2,65} \quad \rightarrow \quad \frac{\Delta P_t}{L} = 130,4 \frac{\text{mmca}}{\text{m}}$$

Outro cálculo da perda de carga (Gomide, 1983) por unidade de comprimento

$$\frac{\Delta P}{L} = 1,68 (X + 3,5) \frac{V^{1,8}}{D^{1,22}}$$

$$\frac{\Delta P}{L} = 1,68(06202 + 3,5) \cdot \frac{21,83^{1,8}}{117^{1,22}}$$

$$\frac{\Delta P}{L} = 5,33 \frac{\text{mmca}}{\text{m}}$$