

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE FORMATURA

"TRANSPORTE PNEUMÁTICO"
"SISTEMA DE DESCARGA DE GRANELEIROS DE TRIGO"

9.5
[Handwritten signature]

AUTOR: EDUARDO SACCARO - Nº 6157725
ORIENTADOR: PROF. MARCOS DE M. PIMENTA

- 1980 -

P R E F Á C I O

O objetivo deste trabalho é sintetizar, na medida do possível, algumas informações sobre o transporte pneumático de materiais a granel. Não tem este a pretensão de esgotar o assunto nem de se apresentar como algo inovador no campo, visto que se baseia em matérias contidas em bibliografia existente. Por outro lado, essa bibliografia, embora escassa, fornece dados e informações distintas que foram aqui resumidas e classificadas segundo capítulos que acompanham uma subdivisão considerada apropriada para o sistema como um todo. Assim, cada capítulo trata de uma fase do sistema, a saber, partida, transporte e recepção. Inclui-se ainda um capítulo onde são propostos métodos para o cálculo da perda de carga na tubulação e, no final, um capítulo onde é efetuado o pré-cálculo de um sistema de transporte combinado vácuo-pressão para a descarga de graneleiros de trigo em portos marítimos.

Deve-se esclarecer aqui que este trabalho foi realizado em conjunto com a colega MARCIA MARIE NII e que, portanto, este se apresenta bastante semelhante àquele por ela apresentado, diferenciando-se fundamentalmente no enfoque final que, no seu trabalho, foi dado ao transporte de materiais pulverizados.

O autor agradece ainda à Marilda (NÊ) e às bibliotecárias do Departamento de Engenharia Química da EPUSP pela colaboração prestada nas diversas fases deste trabalho, além, obviamente, do nosso orientador Prof. MARCOS DE MATTOS PIMENTA.

EDUARDO SACCARO
ESCOLA POLITÉCNICA DA USP
DEZEMBRO DE 1980

Í N D I C E

I. INTRODUÇÃO	1
- TRANSPORTADORES DE LINHA	1
- TRANSPORTADORES POR GRAVIDADE AR-ATIVADOS	1
- TRANSPORTADORES TUBULARES	2
II. TIPOS DE SISTEMAS TRANSPORTADORES DE LINHA	3
1. CLASSIFICAÇÃO QUANTO À PRESSÃO	3
1.1 - Sistemas de vácuo (ou de sucção)	3
1.2 - Sistemas de pressão positiva	4
1.3 - Sistemas combinados vácuo-pressão	5
2. CLASSIFICAÇÃO QUANTO À FORMA DE COMBINAÇÃO	5
2.1 - Sistemas "material-no-ar"	5
2.2 - Sistemas com mistura na entrada da tubulação	10
2.3 - Sistemas "ar-no-material"	11
3. RESUMO	16
III. FUNDAMENTOS DO PROJETO	20
1. INTRODUÇÃO	20
2. LISTA DE SÍMBOLOS	20
3. MÉTODO PROPOSTO POR SPIVAKOVSKY E DYACHKOV	21
3.1 - Determinação do comprimento equivalente	21
3.2 - Determinação da velocidade da corrente de ar	22
3.3 - Determinação da concentração em peso da mistura	23
3.4 - Determinação do consumo de ar e diâmetro do tubo	23
3.5 - Determinação da pressão necessária	24
3.6 - Determinação da potência do motor do compressor	25
4. MÉTODO PROPOSTO POR STEPANOFF	26
4.1 - Concentração da mistura	26
4.2 - Função ϕ	27
4.3 - Velocidade de deposição	27
4.4 - Equação de Durand para misturas sólido-gás	27
4.5 - Resultados experimentais	33
4.6 - Perda de pressão na aceleração dos sólidos	33
4.7 - Perda de pressão em curvas	33
4.8 - Cálculo da diferença de pressão	34
4.9 - Determinação da potência do compressor	35
IV. EQUIPAMENTOS DE ALIMENTAÇÃO E RECEPÇÃO	36
1. RECEPÇÃO	36
1.1 - Pesagem	36



1,2 - Amostragem	36
1.3 - Descarga	36
2. ARMAZENAGEM	36
2.1 - Enchimento	36
2.2 - Controle de nível	36
2.3 - Saída do ar	36
2.4 - Descarga	36
3. REMESSA	37
4. ALIMENTADORES	37
4.1 - Bocais de sucção e cones de captação	37
4.2 - Alimentador rotativo "air-lock"	37
4.3 - Gavetas de descarga com dupla portinhola	40
4.4 - Válvula tipo "flap"	41
4.5 - Alimentadores "air-slide"	41
4.6 - Alimentadores de parafuso	43
4.7 - Gavetas tipo "cut-off"	44
5. RECEPTORES	45
5.1 - Ciclones	45
5.2 - Filtros de pó	48
6. RESERVATÓRIOS DE ESTOCAGEM	52
6.1 - Fatores para seleção de um reservatório	52
6.2 - Reservatórios cilíndricos	53
6.3 - Reservatórios de fundo ativo	54
7. CARROS VAGÕES	55
7.1 - Carro tipo "box" standard	55
7.2 - Carro tipo silo com fundo cônico	55
7.3 - Carro recipiente	56
7.4 - Carros tanques pressurizados compartimentados	56
7.5 - Carro-silo ar-ativado com descarga por gravidade	56
7.6 - Carros-silos multicompartimentados	57
7.7 - Carro-silo com pressão diferencial e descarga fluidiz.	58
8. CAMINHÕES DE TRANSPORTE	
8.1 - Furgões com silo de descarga por gravidade ar-ativado	59
8.2 - Caminhão com tanque de pressão diferencial	59
V. EQUIPAMENTOS DE TRANSPORTE	60
1. TUBULAÇÃO DE TRANSPORTE	60
2. IMPULSORES DE AR	61
2.1 - Sopradores centrífugos	63
2.2 - Sopradores de deslocamento positivo	64
2.3 - Compressores de ar alternativos	66
2.4 - Compressores de palheta deslizante	68

2.5 - Ventiladores	69
2.6 - Capacidade dos impulsores de ar	70
2.7 - Geradores de gás inerte	70
3. VÁLVULAS DE DESVIO	71
VI. PRÉ-PROJETO DE UM SISTEMA DE DESCARGA DE GRANELEIROS	75
1. INTRODUÇÃO	75
2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA	75
3. ESTIMATIVA DAS VÁLVULAS ROTATIVAS	75
4. DIMENSIONAMENTO DAS TUBULAÇÕES	77
4.1 - Dados considerados para o trigo	77
4.2 - Cálculos para o trecho de vácuo	78
4.3 - Cálculos para o trecho de pressão	80
4.4 - Potência do compressor	82
BIBLIOGRAFIA	83

- C A P Í T U L O I -

INTRODUÇÃO:

Apesar do seu emprego datar de há muito e embora os fabricantes e usuários já tenham gasto muitos anos em pesquisas e estudos sobre o assunto, o transporte pneumático ainda é atualmente, um processo basicamente artesanal.

A maior parte dos dados teóricos e empíricos obtidos até hoje foram obtidos com certas características particulares e na medida que as condições para o transporte são extremamente influenciadas por características tais como tipo de material, tamanho médio das partículas, composição dimensional, densidade do granel, forma geométrica, estes dados não podem ser generalizados extrapolados de um para outro material, não existindo portanto, uma lei universal regendo os fenômenos.

Dessa maneira, visto que a tecnologia existente atualmente está quase que concentrada totalmente nas empresas fornecedoras desse tipo de equipamento, sendo ainda bastante precária quando se trata de projetos para fins diversos dos já bem conhecidos, torna-se difícil a seleção apropriada do equipamento ou mesmo a garantia de que o equipamento fornecido atenderá às necessidades do usuário.

Os transportadores pneumáticos podem ser divididos em três categorias básicas:

- TRANSPORTADOR DE LINHAS (tubulação)

O princípio de funcionamento desse tipo de transportador é a conversão da energia cinética do gás de transporte (geralmente ar) em pressão dinâmica e em sustentação aerodinâmica. Esta categoria abrange a maioria dos transportadores pneumáticos existentes atualmente e é utilizado para transportar partículas a granel tanto horizontal quanto verticalmente.

-TRANSPORTADOR POR GRAVIDADE AR-ATIVADO ("air-slide")

Este consiste de uma calha levemente inclinada, contendo no fundo uma membrana permeável ao ar (Figura I.1). O ar é injetado sob a membrana e, ao atravessá-la, altera o ângulo de repouso normal da partícula, fazendo com que ela deslize para baixo pela calha e, na medida que toda a calha está aerada, esse processo se repetirá até a chegada do material fluidizado ao seu destino.

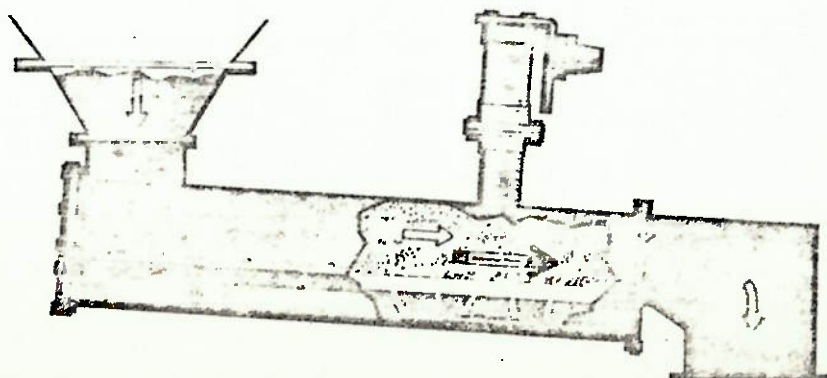


Fig. I.1 -
Transportador
gravitacional
"air-slide"

- TRANSPORTADORES TUBULARES

Esse equipamento funciona como um tubo, contendo em seu interior, um pacote de material especialmente embalado e dotado de um anel de vedação de ar em seu contorno. A aplicação da pressão no tubo, antes do pacote faz com que este se desloque, analogamente ao pistão de um motor a explosão no ciclo de expansão. Esse tipo de equipamento possui utilização muito restrita na área industrial.

Esse trabalho trata de um pré-projeto de um transportador de linha que é, como já foi dito, o tipo mais utilizado. Esse equipamento apresenta algumas vantagens sobre os outros meios convencionais de transporte, a saber:

- grande alcanca - até 100 m na vertical com 1800 m na horizontal, mesmo em condições poucas propícias.
- ausência de perdas no transporte, para os pós, devido à hermeticidade das tubulações.
- economia de espaço da instalação.
- dirigibilidade da descarga.
- pequena exigência de mão-de-obra.
- facilidade de automatização.
- economia das despesas com embalagem.
- economia no frete da remessa a granel
- armazenagem fácil em silos ou reservatórios, em locais onde a armazenagem de material embalado seria inviável.
- eliminação da poeira de materiais, onde esta não é desejável.
- redução da contaminação do material pelo manuseio.

= C A P I T U L O I I -

TIPOS DE SISTEMAS TRANSPORTADORES DE LINHA

Devido ao elevado número de características que podem diferenciar um e outro sistema, existem várias formas de classificação dos transportadores, tais como:

- Velocidade do escoamento
- Pressão na tubulação
- Densidade na mistura, etc.

Entretanto, atualmente, as classificações mais utilizadas são quanto à pressão e quanto à forma de combinação de material com o ar. Veremos então:

1. CLASSIFICAÇÃO QUANTO À PRESSÃO
 - 1.1 Sistemas de vácuo (ou de sucção)
 - 1.2 Sistemas de pressão positiva
 - Sistemas de baixa pressão
 - Sistemas de média pressão
 - Sistemas de alta pressão
 - 1.3 Sistemas combinados vácuo-pressão
2. CLASSIFICAÇÃO QUANTO À FORMA DE PRESSÃO
 - 2.1 Sistemas com mistura na corrente (material no ar)
 - 2.2 Sistemas com mistura na entrada da tubulação
 - 2.3 Sistemas com mistura na aeração (ar no material)

Essas classificações não são exclusivas entre si. Portanto, na classificação quanto à pressão, daremos as características gerais de cada tipo, enquanto que, na segunda classificação, faremos para cada tipo, uma nova separação segundo a pressão, na medida em que essa separação for possível.

1. Classificação quanto à pressão:
 - 1.1 Sistemas de vácuo (ou de sucção)

A figura II.1 ilustra o princípio de funcionamento desse tipo de sistema.

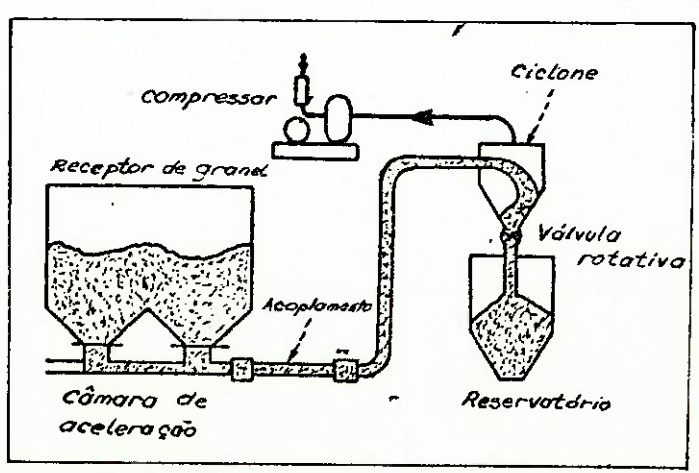


Fig. II.1.a - Sistema de vácuo

Na figura II.1.a, o material é retirado de tanques pela parte de baixo, por meio de tubulação de captação; enquanto que na II.1.b, há um bocal de sucção mergulhado no material a granel que retira

o material por cima. O funcionamento consiste em provocar-se vácuo no reservatório de recepção, o que induzirá uma corrente de ar a partir da fonte de material para o reservatório. Esta corrente arrastará as partículas para o reservatório, onde elas serão separadas do ar e coletadas. Este sistema é utilizado, principalmente, quando se quer transportar de um ou mais pontos, fixos ou móveis, para um único ponto.

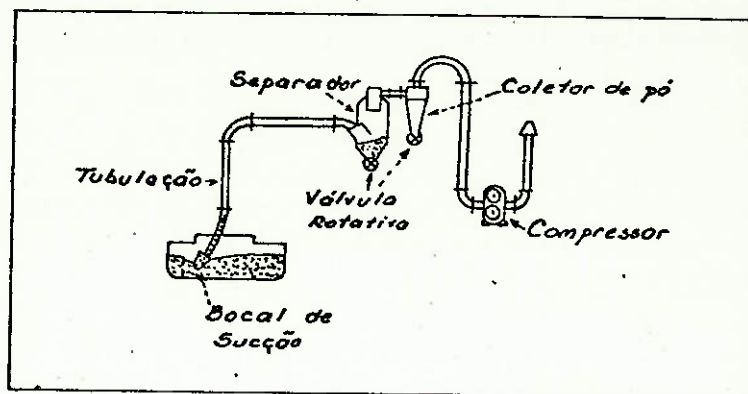


Fig II.1.b - Sistema de vácuo c/ bocal de sucção

1.2 Sistemas de pressão positiva

Este sistema está esquematizado na figura II.2, e seu funcionamento consiste em pressurizar o ar antes da passagem pelo material, que é tomado num ponto e pode ser distribuído para vários pontos diferentes.

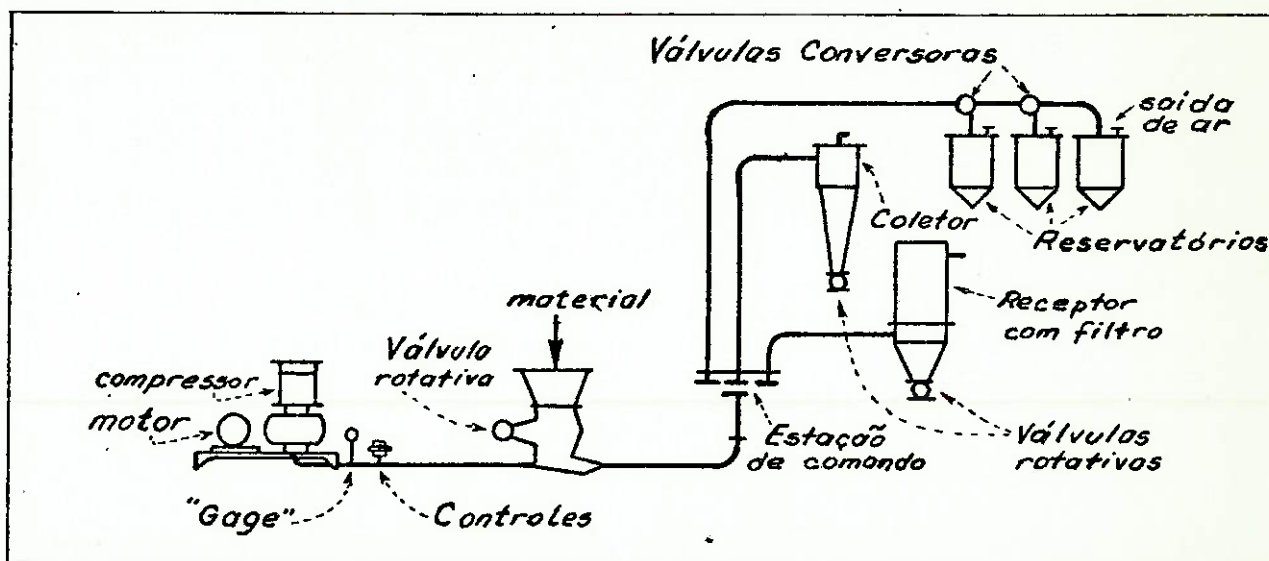


Fig. II.2 - Sistema de pressão positiva

Estes sistemas são divididos em baixa, média e alta pressão. A figura II.3, mostra uma divisão proposta por Segler (1) para transportadores de cereais.

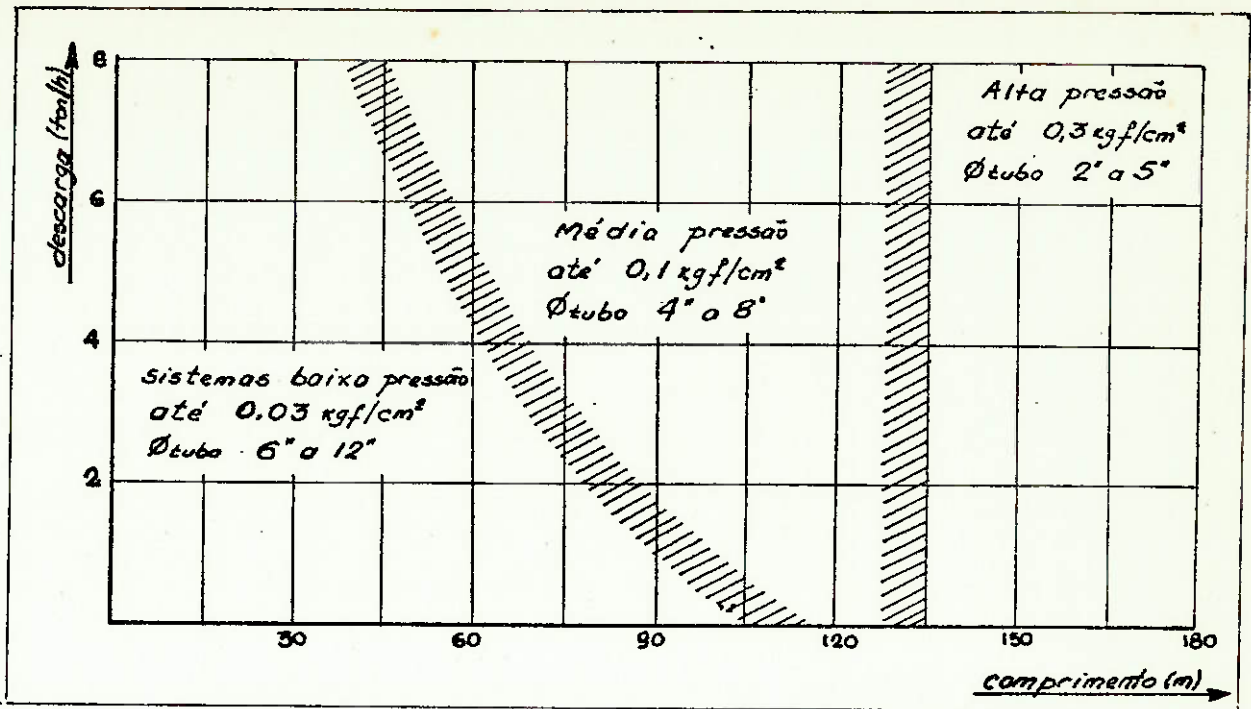


Fig. II.3 - Aplicação de sistemas de pressão positiva

1.3 Sistemas combinados vácuo-pressão

Como o próprio nome assinala, este sistema utiliza, os princípios de funcionamento dos dois tipos vistos anteriormente. Isso faz com que esse transportador possa ser utilizado para transportar os vários pontos e descarregar em vários outros pontos. A fig. II.4 mostra o esquema de funcionamento desse transportador.

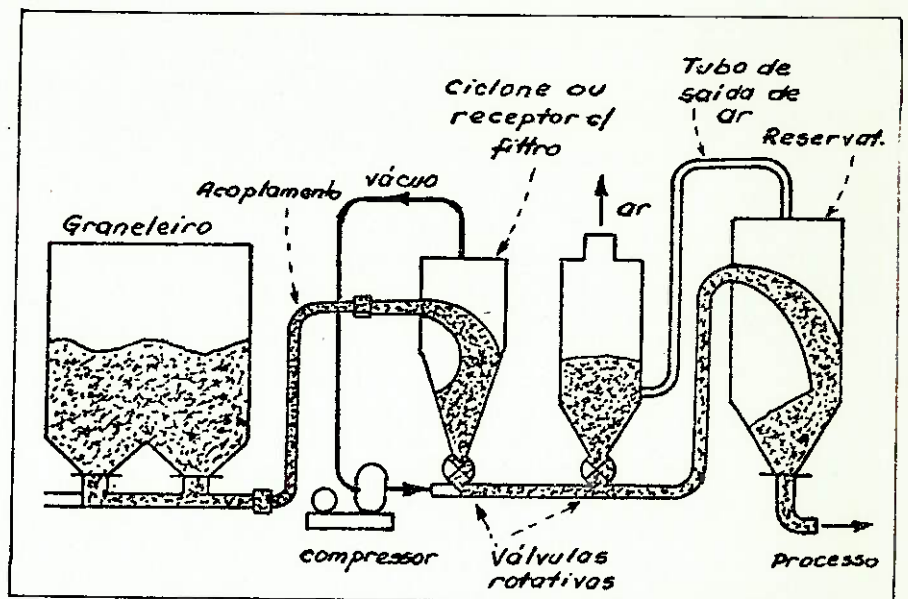


Fig. II.4 - Sistema combinado vácuo-pressão

2. Classificação quanto à forma de combinação

2.1 Sistemas com mistura na corrente (material no ar)

Esse tipo de mistura é o mais versátil dos três citados nessa classificação e pode trabalhar como qualquer um dos tipos de pressão, com uma grande variedade de materiais e um largo campo de velocidades. Essa variação possível na velocidade, permitem que estas sejam baixas o suficiente para transportar materiais frágeis sem danos ou materiais muito abrasivos, sem erosão excessiva da tubulação e dos equipamentos. Além disso, as baixas relações material-ar utilizáveis, fazem com que as partículas sejam transportadas praticamente sem interagirem entre si, o que possibilita o transporte de partículas de várias formas e dimensões, tais como: aparas, flocos, contas, cereais e sólidos granulados ou pulverizados.

As pressões utilizadas nesses sistemas são limitadas pela necessidade de utilizar-se um compressor de deslocamento positivo

de grande volume. Nos sistemas de pressão positiva a pressão máxima é de cerca de $1,1 \text{ kgf/cm}^2$ efetivos, enquanto que o vácuo máximo é de cerca de $0,45 \text{ kgf/cm}^2$ (55%). Nos sistemas combinados, (V-P) pode-se obter ambos os limites individuais. A seguir veremos, dentro desta classificação, a divisão quanto à pressão.

- Sistemas de pressão positiva

Com o princípio de funcionamento já citado no item II.1.2, temos na figura II.5 um esquema mais detalhado de um sistema de pressão positiva com mistura do tipo material no ar.

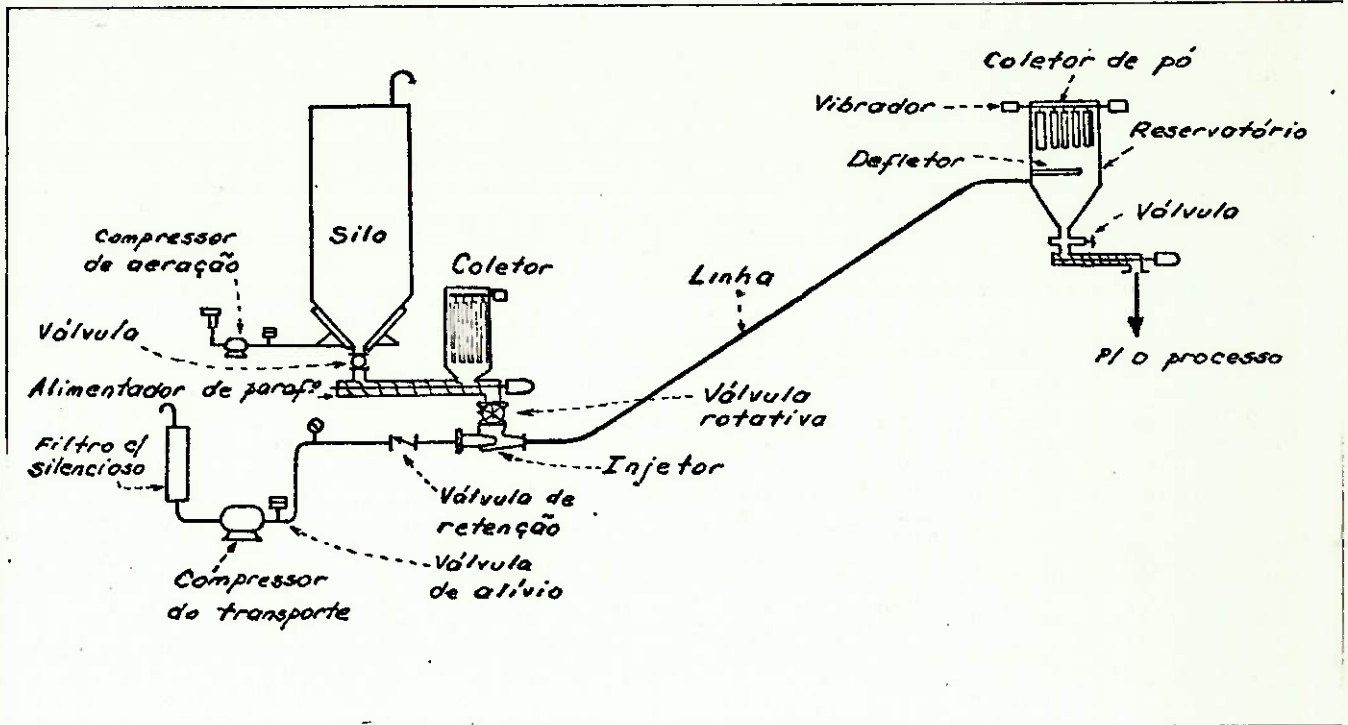


Fig. II.5 - Transportador de pressão-positiva tipo material-no-ar

O material é retirado do vaso de armazenagem, ventilado no bocal de saída para evitar-se o bloqueio, por meio de um alimentador de parafuso e é jogado numa válvula rotativa de vedação do ar. A válvula, segundo a rotação, dosará uma certa quantidade de material e o despejará na corrente de ar de alta velocidade, de onde ele será transportado para o reservatório de recepção, onde é feita a separação e há a saída do ar.

A divisão do transporte para vários pontos pode ser feita por meio de válvulas conversoras ou acionamento manual de um acoplamento de uma para outra conexão, numa estação de acoplamento.

A purificação do ar por meio de filtros é necessária em dois pontos: primeiro na válvula rotativa ou próximo a ela para evitar aumento de pressão neste ponto, devido ao ar que vaza pela válvula, proveniente da corrente de ar de transporte; segundo, no receptor, também para evitar aumento de pressão e, também, a saída de pó para a atmosfera local. A ventilação na alimentação pode ser dispensada no caso de a válvula rotativa situar-se abaixo do reservatório de saída, se a pressão no reservatório for baixa o suficiente para evitar a condensação da umidade do ar. Os receptores são, geralmente, reservatórios com uma saída de ar para a atmosfera ou para um filtro de pó, simples ou multicompartimentado, dependendo das características do material, podendo ainda conter o filtro em seu próprio interior, o que faz com que o pó coletado no filtro seja depositado junto ao material transportado, o que reduz sensivelmente as perdas no caso de transporte de material pulverizado.

Esse tipo de sistema é geralmente aplicado quando o material deve ser enviado para vários receptores separados entre si, por grandes distâncias, assim como do ponto de remessa.

Em comparação com os sistemas de vácuo, os sistemas de pressão positiva levam algumas vantagens do ponto de vista econômico, visto que, por exemplo, exige menor gasto com tubulações, por trabalharem com diferencial de pressão (A_p) cerca de 1,5 a 2,0 vezes maior que aqueles. Ainda mais, a quantidade de material transportado num sistema de pressão, pode atingir até o dobro da quantidade de ar daquela conseguida num sistema de vácuo, chegando até 20kg de material por kg de ar (aproximadamente 26kg/m³ standard de ar), com o mesmo gasto de potência.

Entretanto, esse sistema possui o defeito, comum a todos os transportadores do tipo material-no-ar, de absorver uma grande quantidade dispendida num transportador mecânico. Em alguns casos, se a manutenção dos alimentadores não for bem feita, pode-se perder até 20% do suprimento de ar, por vazamento na válvula rotativa.

- Sistemas de vácuo

A figura II.6 mostra um esquema detalhado desse sistema, cujo princípio de funcionamento já foi visto no item II.1.1. O material é injetado diretamente na corrente de ar, provocada pelo vácuo no reservatório, por meio de um bocal de sucção ou de um funil com válvula rotativa, ou alimentador mecânico, na saída. O material é então transportado para um receptor-separador, de onde é enviado para um ou mais reservatórios de armazenagem, enquanto o ar de transporte passa por um filtro pela bomba de vácuo e, daí, para a atmosfera. Este sistema, além da possibilidade de coletar o material de vários pontos, possibilita quase ausência de perdas de material pulverizado pois, em eventuais pontos de vazamento, ocorrerá entrada de ar em vez de saída do material. Embora este tipo de sistema possa transportar de vários pontos para um único ponto, uma modificação no arranjo pode ser feita, de maneira a possibilitar o transporte para vários pontos distantes, como se mostra na figura II.7. Entretanto, cada novo ponto de descarga requer uma válvula rotativa e um par de válvulas conversoras, uma para conectar o receptor à linha principal e outra para conectá-lo à linha de retorno. Este sistema é denominado de circuito fechado.

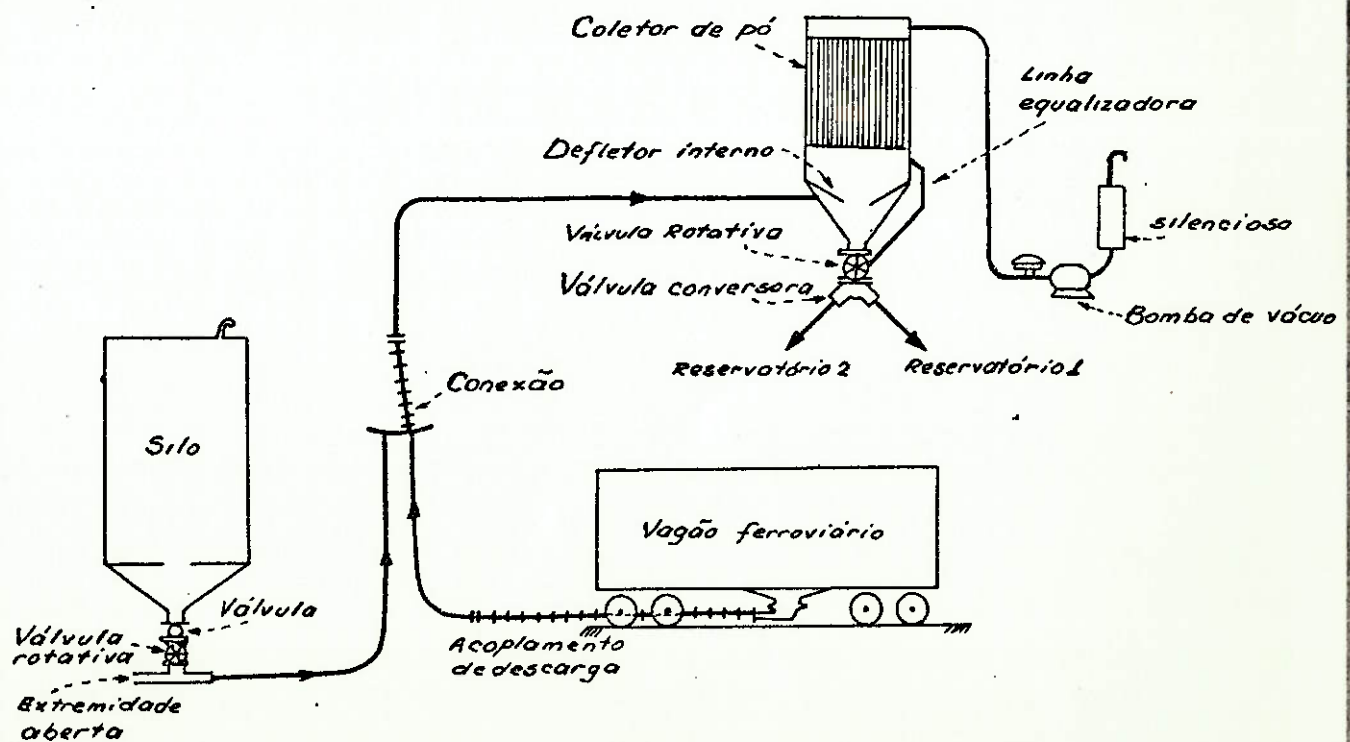


Fig. II. 6 - Sistema de vácuo com mistura material-no-ar

Este sistema é considerado ideal para a descarga de veículos de granel, os quais, na sua maioria, são equipados com bocais de sucção, o que exige apenas a conexão de um acoplamento para a descarga.

O receptor-separador (também chamado recipiente filtrante) usado em sistemas de vácuo são, geralmente, uma combinação de filtro e ciclone. O fluxo de ar e material entra tangencialmente, formando um espaço anular na parte conica do reservatório, sendo então, o material, forçado para baixo pelos defletores e alcançando a descarga, enquanto o ar é filtrado e retirado na parte superior. Estes receptores são ainda bastante largos, necessitando de plataformas de acesso e suportes para vários níveis. Além disso, o equipamento de descarga deve ficar abaixo do reservatório e a bomba de vácuo deve estar o mais próximo possível para economizar-se tubulação.

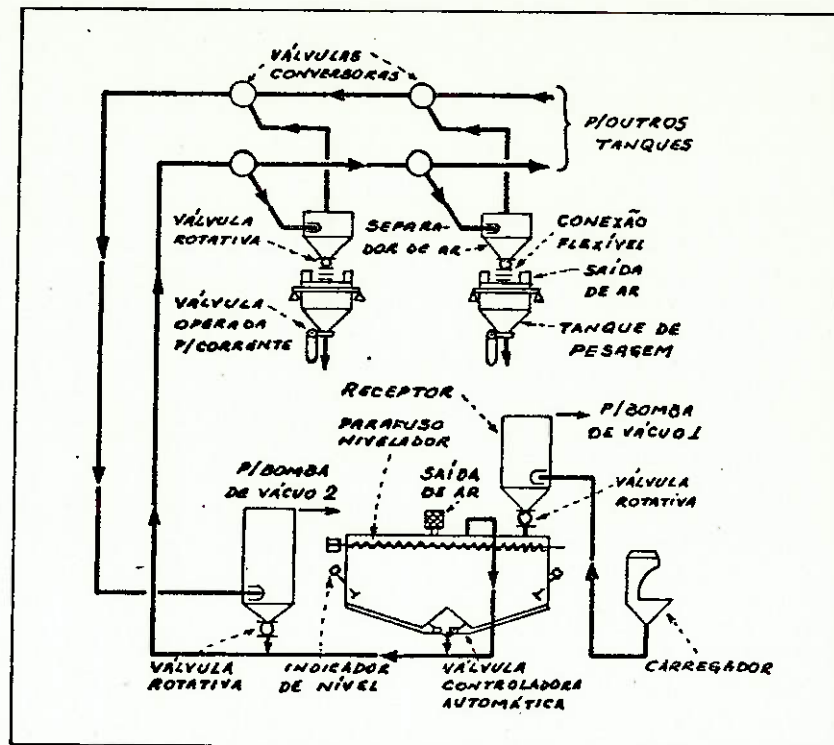


Fig. II.7 - Sistema de vácuo em circuito fechado

Assim sendo, as condições de instalação são extremamente importantes na seleção de um sistema deste tipo, na medida que as dimensões do abrigo e as fundações devem comportar ou suportar todo o sistema. Essas condições são ainda mais problemáticas quando se trata com filtros que necessitam de vibradores, devido ao natural aumento da carga provocada pelo impacto das massas vibrantes.

Como já foi visto, o tamanho da tubulação é maior nesse sistema que nos de pressão positiva, para uma mesma carga, devido à diminuição da densidade do ar e assim como nos de pressão positiva, os controles podem ser economizados se, em lugar de válvulas conversoras, utilizarmos uma estação de acoplamento manual.

-Sistemas combinados vácuo-pressão

Como já vimos, este sistema utiliza as propriedades dos outros dois já mencionados e sua principal aplicação consiste na descarga de veículos e distribuição para diversos pontos, como mostra a figura II.8. O material é retirado por vácuo do vagão por sucção, no mesmo princípio já visto. Entretanto, o ar ao passar pelo filtro e pelo compressor é realimentado numa linha de transporte sob pressão, alimentada pela válvula rotativa do receptor da linha de vácuo, sendo então distribuído para vários pontos pelas válvulas conversoras.

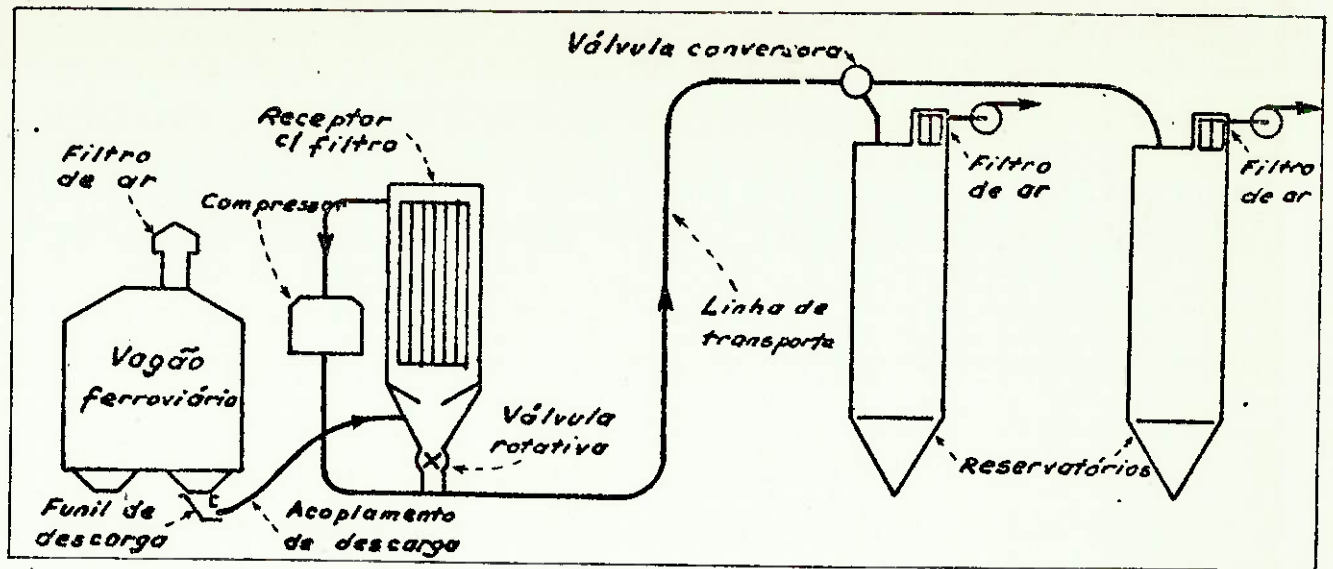


Fig. II.8 - Sistema combinado c/ mistura material-no-ar

Atualmente, os transportadores pneumáticos mais complexos encontrados nas indústrias são agrupamentos de vários sistemas combinados e o número de operações funcionais possíveis é consideravelmente extenso. Os fatores que determinam a seleção desse equipamento são os mesmos aplicáveis aos sistemas isolados. Uma análise das exigências do sistema indicará qual das duas características predominará, mas, sempre que possível, deve-se impor que o mesmo compressor atenda às duas características.

- Sistemas de circuito fechado

Este tipo de sistema é uma variação do sistema de pressão positiva e consiste do sistema típico mostrado na figura II.5, com a diferença de que quando o ar, ou gás transportador, depois de filtrado não é expelido para a atmosfera, e sim, recolhido por uma tubulação e reenviado para a entrada (sucção) do compressor. A figura II.7 mostra um sistema de circuito, porém, para serviço com vácuo.

Este arranjo de reciclagem é utilizado em várias situações; como por exemplo:

- (a) quando o material precisar ser isento de contaminação ou umidade
- (b) quando for necessária a utilização de gás inerte para transportar materiais perigosos, como por exemplo, materiais altamente inflamáveis.
- (c) quando o ar na saída não puder ou não precisar passar por um filtro.
- (d) quando a carga de pó na saída é muito pequena, porém, deve ser confinada ao circuito

Este tipo de sistema, quando utilizado para gases inertes necessita de equipamentos adicionais não usados normalmente. Os gases inertes são obtidos pela queima de gás natural ou propano numa fornalha pressurizada. Os gases obtidos (CO_2 , H_2O e N_2) são resfriados e a água é retirada. Esse dispositivo é chamado "gerador de gás inerte". Quando for necessária uma baixa taxa de umidade, o gás é comprimido ou refrigerado e passado por um secador dissecante continuamente reativado. Um filtro de tecido deve ser então instalado para coletar o pó e as partículas do dissecante. Quando se necessita a operação do transportador por nitrogênio o sistema torna-se ainda mais complexo, uma vez que é necessária a adsorção química da mistura para retenção do CO_2 que é então enviado, para a atmosfera, enquanto a água é retirada num trocador de calor, por condensação.

O equipamento usado para transporte com gás inerte deve ser hermeticamente fechado e todas as entradas e saídas do material devem ser equipados com válvulas rotativas.

2.2 Sistemas com mistura na entrada da tubulação:

Esses sistemas, nos quais o ar e o material são misturados em um alimentador especial, são essencialmente, sistemas de pressão positiva, operando com pressões relativamente altas e altas taxas material/ar e diferenciando-se destes, a partir do ponto de alimentação, apenas pelo menor diâmetro de tubulação e menor tamanho de filtro.

Normalmente, utilizam-se dois tipos de alimentadores especiais. Um deles consiste em um alimentador rotativo especial que recebe o material diretamente de um funil raso e oscilante que é alimentado por meio mecânico ou pneumático, como pode ser visto na figura II.9.

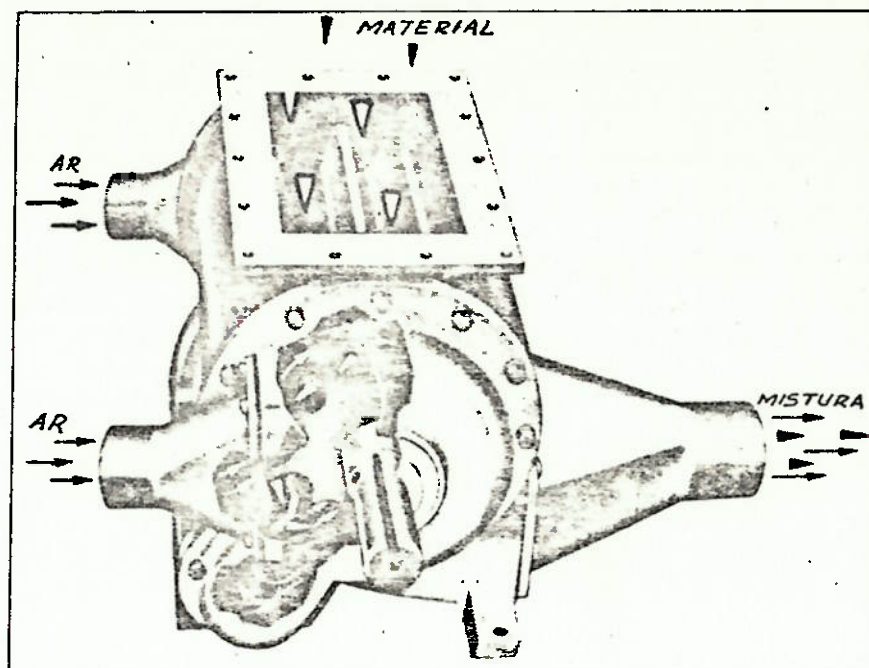


fig. II.9
vista interior
de um alimenta-
dor rotativo de
duas entradas

O ar é fornecido para as entradas nas tampas laterais do alimentador por um compressor de alta pressão e entra por cada lado da bolsa do alimentador rotativo, logo após esta bolsa ser encheida, passando pela entrada de material. Na entrada da linha de transporte, a mistura é forçada pela tubulação pela alta pressão existente. O ar residual que possivelmente permaneça na bolsa do alimentador é descarregado para dentro do funil de carga, por meio de um conexão de pré-ventilação, de modo que todo o espaço da bolsa esteja disponível para receber o material. Esse tipo de alimentador é sensivelmente influenciado pela altura da coluna de material no funil, que, se for muito grande, evita a efetiva ventilação e faz com que o transporte seja interrompido.

Outro tipo de alimentador especial utilizado é mostrado na fig. II.10 e utiliza um parafuso de passo gradualmente decrescente que recebe o material de um funil alimentado por gravidade ou por transportador mecânico ou pneumático. Esse parafuso "estrangulador" comporta o material à medida que o força contra a carcaça e contra a válvula de retenção na entrada da câmara de mistura. Esta câmara é munido de vários bocais supridos com ar a alta pressão de um compressor centrífugo ou de hélice e dirigidos para a entrada da linha de transporte. O material despejado pelo parafuso cai diretamente na corrente de ar e é forçado através da tubulação.

A aplicação desse tipo de sistema é restrita ao transporte de material pulverizado, devido à alta taxa material/ar e sua dependência da capacidade de fluidização do material para um bom transporte. Estes sistemas são usados para o transporte de materiais

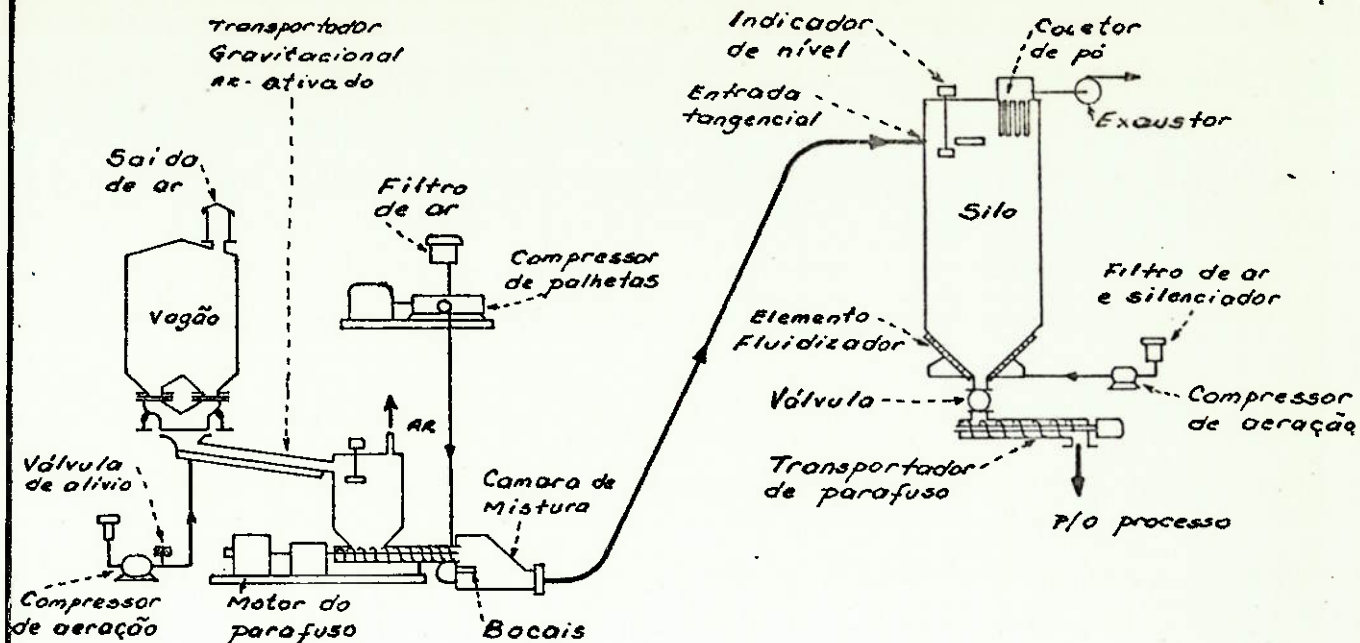


fig. II.10 sistema com câmara de mistura

semi-abrasivos, a distâncias relativamente longas, com um mínimo de ar e em mistura de alta densidade.

A pressão máxima de operação dos sistemas utilizando a alimentador rotativo é de $1,1 \text{ kgf/cm}^2$, que é limitada pelas pressões possíveis com compressores de deslocamento positivo de baixo volume, que são utilizados em série para alcançar essa pressão. Nos sistemas que utilizam alimentadores de parafuso, a pressão máxima chega a $2,9 \text{ kgf/cm}^2$, enquanto a pressão no compressor é de $0,3$ a $0,4 \text{ kgf/cm}^2$ maior, sendo essa perda justificada pela queda de pressão nos bocais localizados na câmara de mistura.

Os sistemas de alimentador rotativo perde uma considerável quantidade de ar através deste, devido à alta pressão atuante. Entretanto, a alta taxa de transporte compensa com sobras esta perda de energia. Por sua vez, os sistemas com alimentador de parafuso absorvem uma quantia variável de energia, dependendo da carga na linha de transporte. O parafuso consome energia devido à compressão do material e, assim sendo, quando não há material entrando no parafuso a potência é baixa, havendo séria redução na eficiência da retirada de material do funil quando este estiver com uma quantidade muito grande de ar.

2.3. Sistemas do tipo ar-no-material (blow-tank):

Esse tipo de sistema está esquematizado nas figuras II.11 e II.12 e consiste de um tanque pressurizado, soprado por ar, o que provoca agitação e fluidização do material. Geralmente, o sistema, além do tanque e do compressor, apresentam os seguintes equipamentos:

- uma válvula de entrada de material de grande diâmetro acionada por um cilindro pneumático, instalada no topo do tanque e com vedação externa por anel.
- uma válvula de saída de ar no topo do tanque, também acionada por cilindro pneumático.
- um medidor de nível no topo do tanque, balanças ou suportes de molas para determinar quando o tanque está cheio de material.
- bocais distribuídos na lateral e próximos ao fundo do tanque, para admissão do ar de transporte, de tal forma que o material é quase fluidizado.
- um tubo de descarga selado, com ou sem um bocal auxiliar, para completar a fluidização e auxiliar no transporte do material.

(f) um painel de controle, para operação sequencial das válvulas para esvaziar ou encher o tanque, em operação intermitente, automático ou manual, conforme as necessidades.

Um compressor de alta pressão é utilizado para fornecer o ar para um receptor, que descarrega para o tanque por meio de uma válvula solenóide. O ar pode ser fornecido diretamente pelo compressor, ou por uma linha de ar comprimido já existente, desde que haja capacidade suficiente e o ar seja limpo e isento de óleo.

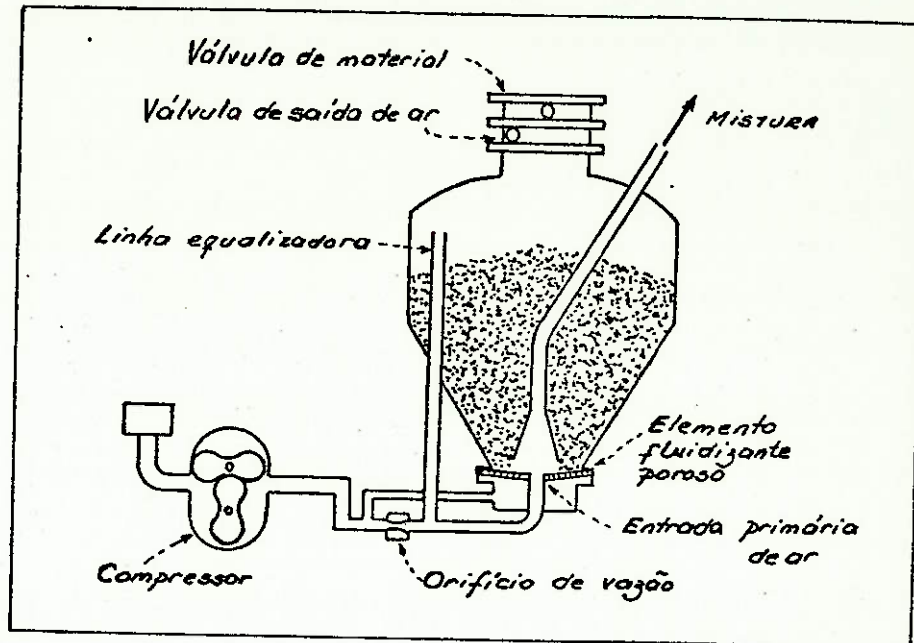


Fig. II.11 - "Blow-tank" de baixa pressão

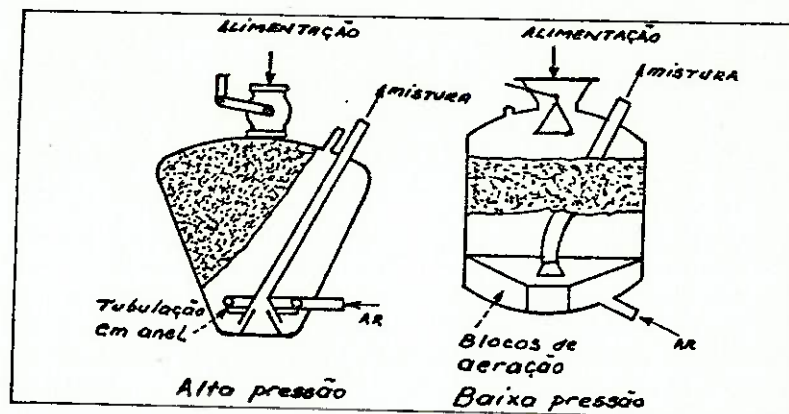


Fig. II.12 - Variações de "blow-tank"

A figura II. 13 ilustra a seqüência de funcionamento desse sistema, partindo do tanque vazio; com as válvulas de entrada de material e saída de ar abertas, o material entra até completar o nível, o que é detectado por um dos possíveis instrumentos de controle. O ar deslocado é descarregado através da válvula de saída, passando pela alimentação ou pela linha de transporte. O detector de nível ou o relê atuado pelo peso agem sobre os controles elétricos para o fechamento das duas válvulas e abertura da válvula solenóide do ar de fluidização, que entra no tanque e atravessa o material e aumenta a pressão, até que a parte mais fluidizada começa a escoar pela linha de transporte.

Quando todo o material deixou o tanque e existe apenas escoamento de ar, o relê operado pelo peso (acionado pelo controle

de nível ou pelos suportes de molas) atua sobre os controles elétricos para fechar o solenóide do suprimento de ar e abrir as válvulas de entrada do material e saída de ar, para o início de um novo ciclo. Quando for utilizada alimentação direta do compressor, este deve ser desligado ou "by-passado" durante a etapa de carga.

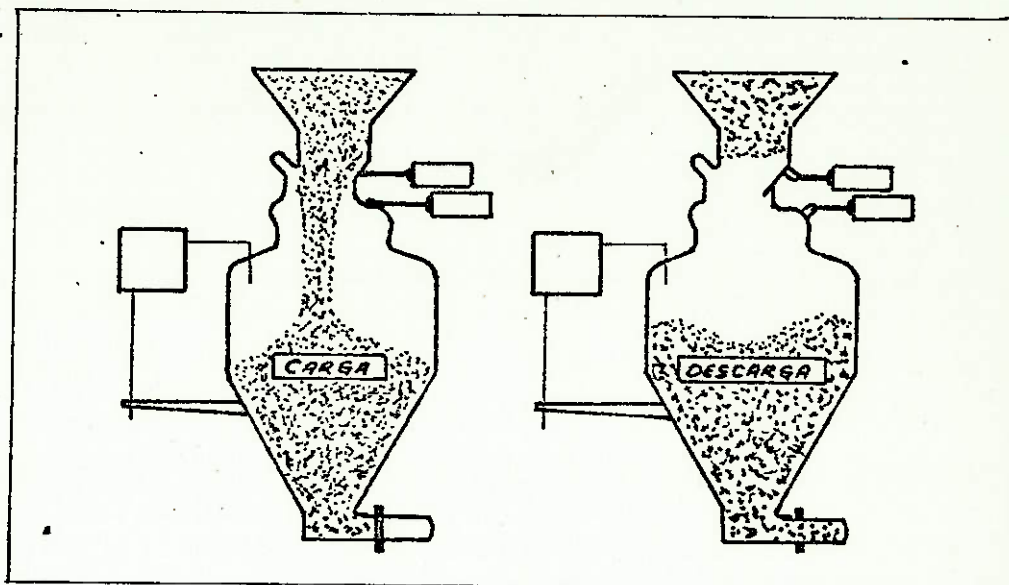


Fig. II.13 - Ilustração do ciclo de um "blow-tank"

O gráfico da figura II. 14 mostra as variações típicas do fluxo de transporte, e da pressão no tanque e no receptor de ar durante o período de transporte. Estas curvas mostram a perform-

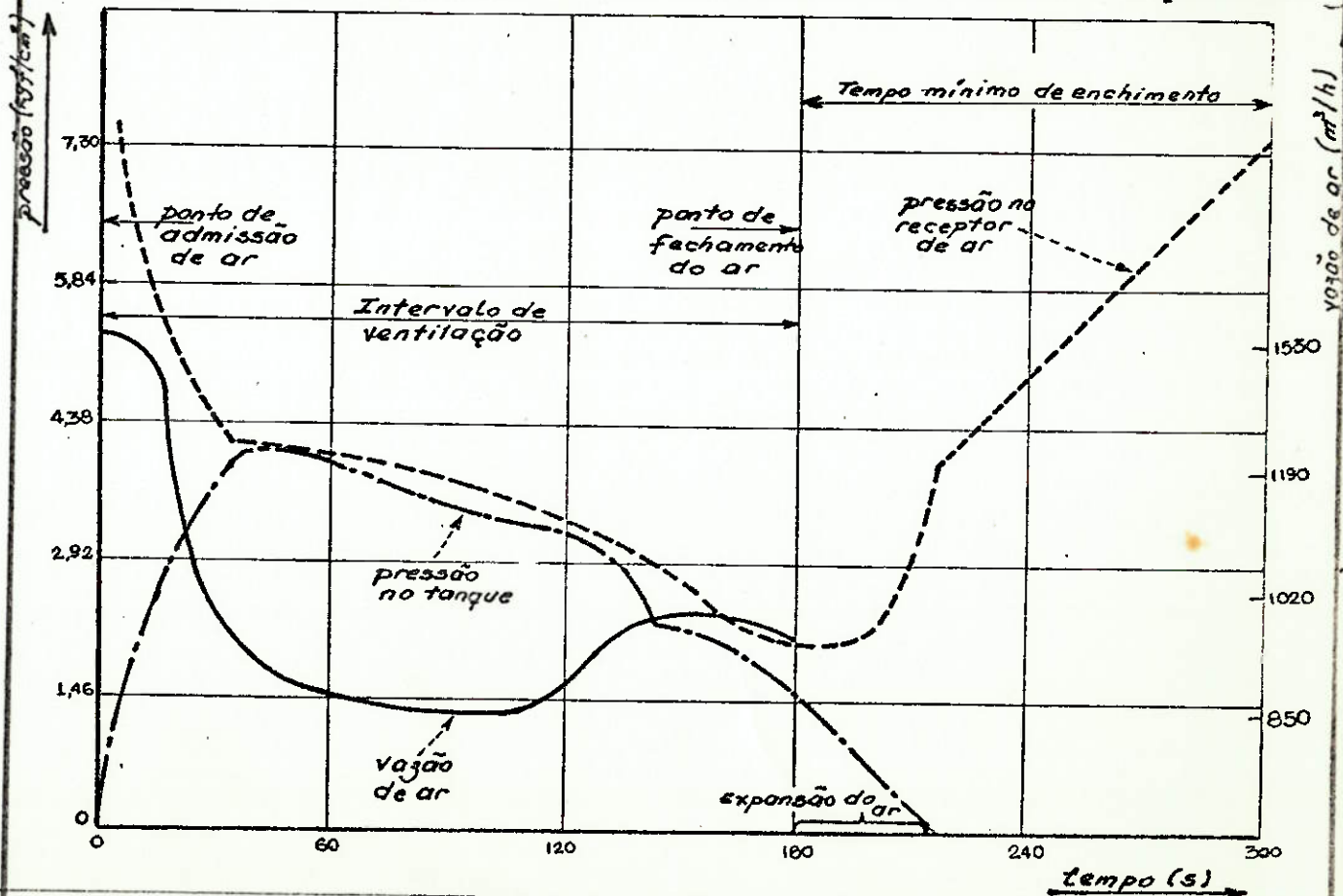


Fig. II.14 - Ciclo de operação de um "blow-tank" de alta pressão

mance de um sistema de alimentação livre, em que a taxa material/ar é baixa no começo e fim da descarga, uma vez que o fluxo de ar é alto nestes pontos. No caso de alimentação controlada, onde a taxa material/ar é constante e, portanto, a velocidade de descarga constante são mantidas por meio de um controle da perda de peso do tanque (controle diferencial), agindo sobre a entrada de ar, temos o comportamento típico mostrado na figura II. 15.

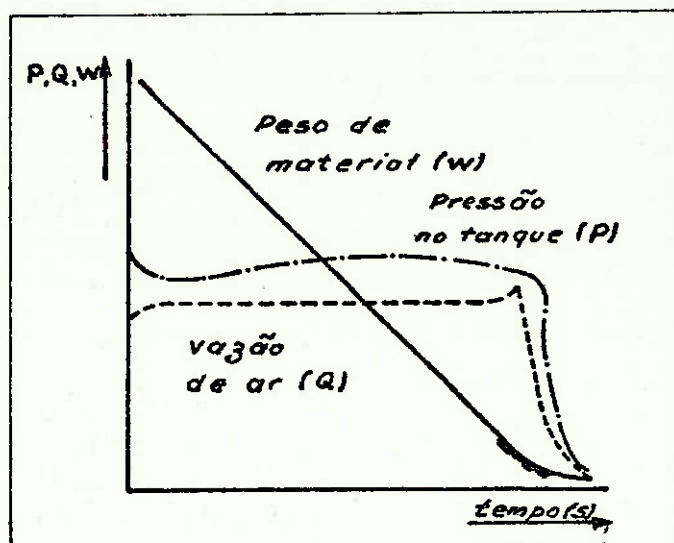


Fig. II.15 - Ciclo de um "blow tank"
c/ alimentação controlada

Esse tipo de sistema, como pode ser percebido pelo já exposto, depende consideravelmente da fluidizabilidade do material, sendo, portanto, aplicável apenas a materiais pulverizados ou granulados misturados. Entretanto, alguns materiais de maior dimensão ou materiais que, normalmente, não são fluidizáveis podem ser transportados por um sistema ideal para o transporte de materiais pulverizados abrasivos ou frágeis, podendo ser usados também para outros materiais.

Novos tipos de sistemas de alimentação controlada têm sido desenvolvidos para permitir a descarga de materiais altamente abrasivos ou frágeis a velocidades muito baixas, tais como 0,76 m/seg, e altas taxas de material/ar, até 500 : 1. Isso pode ser feito de várias maneiras, dependendo do fabricante, como se segue:

(a) todo o ar é injetado no tanque proporcionalmente à perda de peso no tanque

(b) parte do ar é introduzido no tanque e o restante é admitido periféricamente na linha de transporte, por bocais convenientemente instalados. Estes bocais são espaçados de 3 a 12m, conforme as características do material. A baixa pressão do escoamento provoca alta pressão na câmara do auxiliar ("booster"), admitindo então o ar suplementar para manter o escoamento uniforme.

(c) utiliza-se o mesmo princípio de (b) com cada bocal controlado por uma válvula controladora de vazão, um filtro e um regulador de pressão. Cada regulador é operado a partir do auxiliar seguinte a montante, para manter constante a queda de pressão. Embora esse sistema apresente um ciclo intermitente, pode-se obter descarga constante com a instalação de um par de tanques operando alternativamente, ou seja, enquanto um é carregado, o outro envia o material. O fato de a descarga ser intermitente não limita a capacidade desse sistema. Os volumes atingíveis pelos tanques chegam a $11m^3$, enquanto se alcançam até pressões da ordem de 10 Kg/cm^2 , dependendo

da aplicação. As circunstâncias que exigiriam o uso de dois tanques em paralelo são:

(a) onde o pé direito da instalação é tal que não seja possível a colocação de um sistema simples de grande volume

(b) quando a capacidade do alimentador de entrada do material é muito pequena para alcançar a quantidade de material necessária para um ciclo com um único tanque.

(c) quando a velocidade de descarga é tão baixa que atinge o tempo limite do ciclo de um tanque, sem completar a carga total.

(d) quando um tanque de reserva é necessário para assegurar uma alimentação contínua do processo.

Esse tipo de sistema, como já foi dito, pode ser operado dentro de uma larga faixa de pressão, sendo que os sistemas de baixo custo em sua maioria, trabalham com pressão de até $1,1 \text{ Kgf/cm}^2$ estando, portanto, livres da necessidade de obediência ao "Código de Vasos Pressurizados sem Combustão" da ASME ("ASME Unfired Pressure Vessel Code"). Entretanto, para longas distâncias pode-se obter, na maioria dos tanques de alta pressão, até $7,3 \text{ kgf/cm}^2$, sendo que a pressão de transporte é um pouco menor, devido às perdas no bocal.

Assim como nos sistemas de pressão positiva, este tipo pode descarregar para vários pontos, apresentando ainda a vantagem de possibilitar a fácil pesagem do material, pela simples instalação de uma balança abaixo do tanque, o que permite um controle mais fácil e rigoroso do material a ser transportado.

Em seguida, serão apresentadas algumas características que influem na seleção de um sistema desse tipo:

- Proteção:

(a) Sistemas operando acima de $1,1 \text{ Kgf/cm}^2$ devem obedecer à "ASME - U.P.V.C. ou norma equivalente

(b) devem ser instaladas válvulas de segurança, para prevenir pressões superiores àquelas para qual o tanque foi dimensionado, diretamente no tanque

- Enchimento:

(a) a válvula de entrada do material deve fechar-se após o bloqueio do material por uma válvula borboleta externa, o que evita a presença de material entre o obturador e o assento, não permitindo vazamento de ar durante a pressurização

(b) o fluxo de entrada do material no tanque deve ser bloqueado por meio de medidores de nível e nunca por temporizadores, uma vez que um aumento desse fluxo, que é variável provocaria superenchimento e portanto quebra da válvula de entrada de material.

(c) a saída de ar deve ser feita diretamente por tubo vertical do tanque para um reservatório com filtro e sob vácuo, evitando-se ao máximo a colocação de curvas ou uniões que podem ser bloqueadas pelo pó.

(d) prover de conexões flexíveis os tanques montados sobre balanças ou suportes de molas, para suportar o abaixamento do tanque quando carregado.

(e) prover uma abertura no topo do tanque, para controle visual.

(f) sempre que possível, deve-se colocar um alimentador na entrada do tanque, para controlar o fluxo de material durante a carga

(g) evitar o uso de válvulas borboleta como válvula de entrada do material, pois o vazamento de ar pode ser grande ou em último caso, utilizar duas válvulas em série.

(h) instalar os cilindros pneumáticos de fechamento das válvulas na parte externa do tanque, pois um vazamento num deles pode causar sobrepessão no tanque e provocar a abertura das válvulas

de segurança

- Suprimento de ar:

(a) o compressor ou ventilador deve alcançar pressão e vazão suficientes para as necessidades do ciclo, incluindo o uso de bocais auxiliares ("boosters")

(b) quando da utilização de compressores, deve-se ter um resfriador ("after-cooler") e/ou outra forma de secagem do ar, para evitar excesso de umidade

(c) quando for necessário um receptor de ar, deve-se dimensioná-lo para alcançar a máxima pressão antes do fechamento da válvula de entrada de material

(d) deve-se ter uma linha de lubrificação pneumática, para lubrificar os cilindros de acionamento das válvulas

(e) em cada conexão do suprimento de ar deve haver uma válvula de retenção para evitar a entrada de material nessas linhas

(f) deve-se ter a certeza de que a pressão disponível é suficiente para limpar uma linha de transporte entupida.

- Descarga:

(a) deve haver uma válvula na linha de descarga, quando o material for difícil de fluidizar ou quando o material for altamente fluidizável, para controlar o escoamento

(b) a saída de ar deve passar por filtros de pó limpos mecanicamente ou por jato de ar reverso.

(c) deve-se dimensionar a linha de descarga de forma a transportar a máxima quantidade de material com o mínimo de ar, na diferencial de pressão correspondente à máxima pressão de trabalho do sistema.

3. Resumo:

A tabela II. A apresenta um resumo dos possíveis sistemas descritos neste capítulo, com menção feita às vantagens de cada um extraídas de Kraus.

Tabela II. A

SISTEMA	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Material no ar	<p>1. Pode trabalhar com uma grande variedade de materiais inclusive com formas irregulares</p>	<p>1. Utiliza relações material/ar mais baixas que outros sistemas</p> <p>2. Requer mais equipamento que outros sistemas - ventiladores ou compressores, tubulações, filtros, etc.</p>
Pressão positiva	<p>1. Distribui o material de uma tubulação para diversos pontos.</p> <p>2. Usa tubulações menores, se comparada com sistema de vácuo.</p> <p>3. Os vazamentos são de dentro para fora, o que impede a entrada de umidade</p>	<p>1. Requer alimentador com vedação e filtros em cada entrada do material, devido ao retorno de ar.</p> <p>2. Requer filtros maiores em cada ponto de descarga.</p> <p>3. A descarga de graneleiros exige o uso de válvulas rotativas portáteis e adaptáveis.</p>
Vácuo	<p>1. Fácil descarga de graneleiros utilizando funis ou bocais de sucção.</p> <p>2. O material pode entrar da mesma tubulação em vários pontos.</p> <p>3. O material pode entrar na tubulação por meio de uma válvula rotativa, tanque de alimentação controlada ou funil.</p>	<p>1. O material só pode chegar a um ponto.</p> <p>2. São necessários filtro e descarregador com vedação (válvula rotativa) no ponto de chegada.</p> <p>3. Umidade e ar externo podem entrar na linha nos pontos de vazamento.</p> <p>4. Requer maiores tubos e equipamentos que o de pressão positiva devido a baixa densidade do ar.</p> <p>5. O compressor (ventilador) e o receptor com filtro devem ser instalados acima dos silos.</p>
Vácuo com Retorno	<p>1. Distribui material para diversos pontos.</p> <p>2. O pó é retornado para um único e bem localizado filtro para a re-entrada na linha ou no silo.</p>	<p>1. Requer um coletor e uma válvula rotativa em cada ponto de descarga.</p> <p>2. Requer válvulas conversoras nas linhas de transporte e de retorno em cada ponto de descarga.</p>
Ar no material	<p>1. Utiliza a relação material/ar mais alta possível em comparação aos outros sistemas.</p>	<p>1. A operação é intermitente.</p> <p>2. Sistemas de alta pressão requerem tanques</p>

<p>Alimentação livre</p>	<p>2. Requer equipamentos menores que os outros sistemas. 3. Baixas velocidades e misturas densas permitem o transporte de materiais abrasivos ou frágeis. 4. Sistemas de alta pressão podem transportar a longas distâncias. 5. Distribui o material para diversos pontos de descarga. 6. Cada remessa pode ser pesada antes do transporte.</p> <p>1. Unidades de descarga pelo fundo podem operar com materiais irregulares, fluidizáveis ou não. 2. Essas mesmas unidades podem ser completamente esvaziadas quando operando com materiais higiênicos.</p>	<p>construídos segundo a ASME-U.F.V.C. 3. Um funil oscilante é requerido quando a capacidade do alimentador auxiliar é limitada. 4. Um filtro é necessário para a saída de ar do funil e do tanque. 5. O material deve ser despejado no tanque numa razão maior que a de transporte, devido ao tempo limitado de enchimento entre dois ciclos de transporte.</p>
<p>Alimentação Controlada</p>	<p>1. A relação material/ar é variável. 2. unidades de descarga pelo topo deixam resíduos que podem causar contaminação.</p>	<p>1. O seu uso é limitado aos materiais fluidizados ou granulares.</p>
<p>Mistura na entrada</p>	<p>1. A relação material/ar é alta mas não tanto quanto nos sistemas ar no material. 2. O transporte é contínuo. 3. Distribui o material para diversos pontos, a partir de uma única tubulação. 4. Sistemas de alta pressão permitem transportar a longas distâncias com tubos menores.</p>	<p>1. Uso limitado aos materiais fluidizáveis, pulverizáveis ou granulares. 2. Não pode transportar materiais frágeis. 3. O material deve ser enviado à combinação por transportadores auxiliares. 4. O funil de alimentação deve ter nível controlado e saídas de ar com filtro. 5. O funil deve ser mantido cheio quando operando com materiais abrasivos.</p>
<p>Alimentador de parafuso</p>	<p>1. Requer transportadores auxiliares menores que os ar no material. 2. Requer menor pé-direito que os ar no material.</p>	<p>1. Sujeito à erosão e à perda de capacidade quando operando com materiais abrasivos. 2. Requer manutenção especializada. 3. Deve funcionar completamente carregado</p>

quando operando com materiais abrasivos.

4. Requer alta pressão - compressor de palhetas ou recíproco.

5. Os compressores necessitam de resfriamento por água. Deve ser instalado um separador de óleo do ar.

1. Pressão limite de 1,5 Kgf/cm², necessitando de ventiladores de pequeno volume e deslocamento positivo, em paralelo.

2. A capacidade de transporte varia com a altura do material no reservatório.

1. Pode ser feito com pás cortantes para o perar com materiais aderentes como açúcar ou detergentes.

Alimentador rotativo

- C A P Í T U L O I I I -

FUNDAMENTOS DO PROJETO

1. INTRODUÇÃO

Nesse capítulo apresentaremos alguns métodos para o dimensionamento das tubulações e avaliação das perdas de carga na linha de transporte. Embora este equipamento já seja bastante utilizado, fica extremamente difícil o estabelecimento de uma lei universal, devido à grande dependência do comportamento do escoamento de cada um dos fatos envolvidos.

Assim sendo, apresentaremos métodos teóricos e/ou experimentais para a determinação da tubulação e potência do soprador.

2. LISTA DE SÍMBOLOS

(Os índices "a", "s" e "m" referem-se, respectivamente ao ar, aos sólidos e à mistura.)

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	UNIDADE
C	Concentração volumétrica da mistura	-
C_w	Concentração em peso da mistura	-
C_a	Coefficiente de arraste	-
d	Diâmetro da esfera equivalente à partícula	m
D	Diâmetro interno do tubo	m
H	Altura de transporte na vertical	m
J	Gradiente hidráulico	mca/m
L_{ec}	Comprimento equivalente das curvas	m
L_{ev}	Comprimento equivalente das válvulas	m
L_{eq}	Comprimento equivalente total	m
L_h	Comprimento horizontal de tubulação	m
L_v	Comprimento vertical ou inclinado de tubul.	m
N_c	Potência do compressor	kW
P_o	Pressão atmosférica	kgf/cm ²
P_i	Pressão no início da tubulação	kgf/cm ²
P_f	Pressão no final da tubulação	kgf/cm ²
P_{cv}	Pressão devida à coluna vertical	kgf/cm ²
P_c	Pressão no compressor	kgf/cm ²
P_t	Pressão de trabalho do compressor	kgf/cm ²
P_p	Perda de pressão no suprimento principal	kgf/cm ²
Q	Vazão em volume	m ³ /s
Q_c	Vazão em volume do compressor	m ³ /s
R	Raio da curva	m

LISTA DE SÍMBOLOS (continuação)

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	UNIDADE
Re	Número de Reynolds	-
S	Gravidade específica referida à água	-
V	Velocidade	m/s
V_d	Velocidade de deposição do material	m/s
W	Vazão em massa	kg/s
α	Fator de perdas na entrada do compressor	-
γ	Peso específico	kg/m ³
ϵ	Rugosidade da tubulação	-
λ	Coefficiente de resistência ao escoamento	-
μ	Relação de carga (Material/ar)	-
ν	Viscosidade cinemática	m ² /s
θ	Ângulo de inclinação da tubulação	graus
τ_c	Trabalho teórico do compressor	kgm/m ³
η	Rendimento do compressor	-

3. MÉTODO PROPOSTO POR SPIVAKOVSKY E DYACHKOV [8]

As características iniciais determinantes de um transportador pneumático são a capacidade de transporte, o comprimento e a configuração da linha (diagrama de trajetória). As propriedades mecânicas e físicas do material também são muito importantes e devem ser determinadas experimentalmente.

Os principais parâmetros a serem determinados são o volume de ar necessário para o transporte, a pressão e o diâmetro interno da tubulação. Para a determinação desses parâmetros, entretanto, é necessária a obtenção de parâmetros auxiliares, tais como o comprimento equivalente, a concentração em peso da mistura, a velocidade de deposição do material e a velocidade da corrente de ar.

3.1 - DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO EQUIVALENTE (L_{eq})

O comprimento equivalente da linha de transporte é obtido pela soma dos comprimentos da tubulação e dos comprimentos equivalentes correspondentes às válvulas, curvas, etc. O comprimento equivalente das restrições depende das propriedades do material transportado e das características geométricas e quantidade das restrições. A tabela III.A fornece alguns comprimentos equivalentes para curvas de 90°, sendo que os menores valores são tomados no caso de baixa velocidade de transporte e materiais não abrasivos. No caso de válvulas de conver-

R/D \ MATERIAL	4	6	10	12
Pulverizado	4 - 8	5 - 10	6 - 10	8 - 10
Granular homogêneo	-	8 - 10	12 - 16	16 - 20
Aglomerados pouco irreg.	-	-	28 - 35	38 - 45
Aglomerados muito irreg.	-	-	60 - 80	70 - 90

Tabela III.A - Valores de L_{ec} (m) para curvas de 90°

são, normalmente de duas vias, o comprimento correspondente, para materiais pulverizados, é assumido como sendo de 8 metros. Quando o material transportado não for pulverizado, deve-se utilizar válvulas conversora de secção transversal idêntica à da tubulação, para eliminar altas restrições localizadas.

O comprimento equivalente total será, então:

$$L_{eq} = \Sigma L_h + \Sigma L_v + \Sigma L_{ec} + \Sigma L_{ev} \quad (III.1)$$

3.2 - DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DA CORRENTE DE AR.

A velocidade do ar no transporte deve dar condições para que o material mova-se uniformemente, não pode ser muito alta, para que não haja desperdício de energia e não pode ser inferior a um certo valor, no qual qualquer pequena variação acidental pode provocar o bloqueio da linha.

A propriedade da partícula a ser tomada e transportada pela corrente de ar é determinada pela velocidade de deposição (V_d), isto é, a velocidade na qual o peso da partícula é neutralizado pela ação da força de sustentação sobre a mesma.

A velocidade da corrente de transporte depende desta velocidade, que deve ser levada em consideração também no projeto de separadores e/ou ciclones.

A velocidade de deposição é maior, quanto maiores forem o tamanho e o peso específico da partícula e quanto menor for a densidade do ar, ou seja:

$$V_d = K \cdot \sqrt{\frac{10^{-3} \cdot \gamma_s}{\gamma_a} \cdot d} \quad (III.2)$$

sendo K uma constante que depende da forma geométrica, do tamanho e das características superficiais da partícula e que varia entre 10 e 170, sendo menor quanto menor for o diâmetro da partícula. Este campo de variação dos valores de K corresponde a partículas de 0,00001 até 0,07 m., sendo que $K = 170$ é assumido para partículas esféricas de 0,005 a 0,07 m. de diâmetro.

O peso específico do ar à pressão atmosférica é igual a $1,2 \text{ kg/m}^3$, mas, no transporte, o peso específico real será menor ou maior, respectivamente, em sistemas de vácuo ou de pressão positiva. Para efeito de pré-cálculo, assume-se $\gamma_a = 1,6$ a $2,0 \text{ kg/m}^3$ nos sistemas de pressão positiva e $\gamma_a = 0,80$ a $0,95 \text{ kg/m}^3$ para vácuo.

A velocidade do ar não permanece constante ao longo da linha de transporte, mas varia com o inverso da pressão (supondo o ar como sendo um gás perfeito). Tanto nos sistemas de pressão como nos de vácuo, a pressão cai ao longo da linha, o que provoca uma diminuição da densidade e conseqüentemente, um aumento na velocidade. Como a capacidade de transporte é proporcional à densidade e ao quadrado da velocidade, a capacidade de transporte é menor na secção inicial que na final ou em qualquer uma subsequente.

Numa secção submetida a pressão próxima da atmosférica, como, por exemplo, a descarga em sistemas de pressão positiva ou o bocal de sucção em sistemas de vácuo, assumindo $\gamma_a = 1,0 \text{ kg/m}^3$, a velocidade do ar será:

$$V_a = A \cdot \sqrt{10^{-3} \cdot \gamma_s} + B \cdot L_{eq}^2 \quad (III.3)$$

onde A é um fator influenciado pelo tamanho das partículas, que é mostrado na tabela III.B, enquanto B é assumido como $(2 \text{ a } 5) \times 10^{-5}$, com a atribuição dos menores valores para materiais pulverizados e secos.

Quando o sistema for de vácuo, a parcela segunda da soma da expressão (III.3) é desprezada, uma vez que o comprimento raramente excede 100 m.

MATERIAL	TAMANHO MÁX DA PART. (MM)	A
Pulverizado	0,001 - 1	10 - 16
Granular homogêneo	1 - 10	17 - 20
Pequenos aglomerados homog.	10 - 20	17 - 22
Grandes aglomerados homog.	40 - 80	22 - 25

Tabela III.B - Valores de "A" para vários materiais

3.3 - DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO EM PESO DA MISTURA

A concentração em peso da mistura não será aqui utilizada e, em seu lugar, utilizaremos a relação de carga (μ), que é definida a seguir:

$$\mu = \frac{W_s}{W_a} \quad (\text{III.4})$$

Na maioria das instalações, a melhor relação de carga depende do diâmetro do tubo, da pressão e do comprimento equivalente. Como uma dada instalação trabalha com uma pressão definida, o valor da relação de carga deve ser determinado de acordo com o comprimento equivalente. A figura III.1 ilustra a variação da relação ótima com o comprimento equivalente, tendo, em (a), a curva 1 para materiais secos e de peso específico entre 2500 e 3200 kg/m³ e a curva 2 para materiais abrasivos e úmidos, com peso específico entre 1800 e 2500, enquanto em (b) é mostrada a curva para grãos de cereais. Estas curvas foram obtidas a partir de testes e dados operacionais, podendo ser utilizadas como orientação.

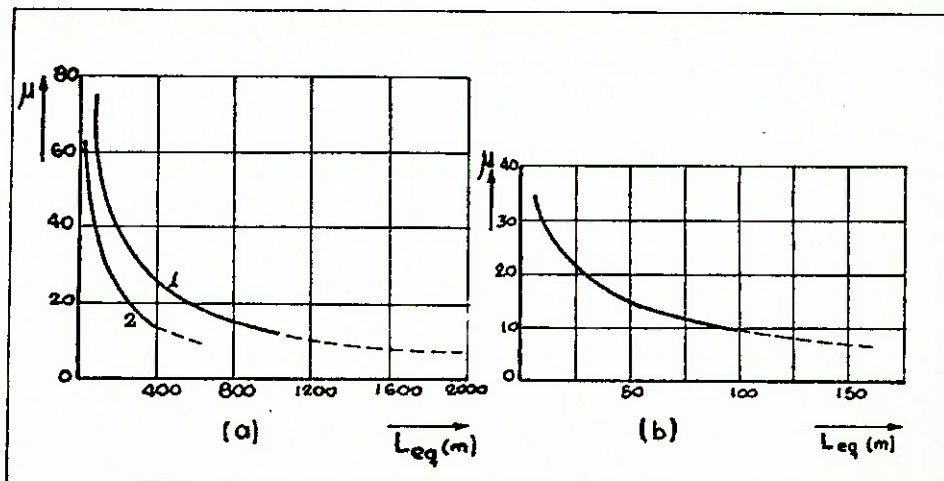


Fig. III.1 - Gráficos de μ em função do comp. equivalente

3.4 - DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DE AR E DO DIÂMETRO DO TUBO

A vazão de ar necessária pode ser deduzida a partir da expressão (III.4), da qual se obtém:

$$Q_a = \frac{W_s}{\gamma_a \cdot \mu} \quad (\text{III.5})$$

Sendo a secção circular, sabemos que:

$$Q_a = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot V_a \quad \text{e então,}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_a}{\pi \cdot V_a}} \quad (\text{III.6})$$

O diâmetro obtido a partir da equação (III.6) pode não ser disponível comercialmente, caso em que seria necessário utilizar-se aquele comercial mais próximo possível. A espessura de parede a ser utilizada depende da abrasividade e da pressão, embora este último fator seja menos influente que o primeiro, devido às baixas diferenças de pressão utilizadas.

3.5 - DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO NECESSÁRIA

As investigações teóricas e experimentais do escoamento de ar comprimido em tubos, fornecem as seguintes relações:

- para sistemas de pressão

$$P_i = P_f \cdot \sqrt{1 + \frac{\lambda_a \cdot L_{eq} \cdot V_a^2}{D}} \quad (\text{III.7})$$

- para sistemas de vácuo

$$P_f = P_i \cdot \sqrt{1 - \frac{\lambda_a \cdot L_{eq} \cdot V_a^2}{D}} \quad (\text{III.8})$$

Para o escoamento de misturas sólido-ar, o valor de λ_m dependerá de vários fatores, mas, principalmente, da relação de carga. Podemos então escrever:

$$\lambda_m = \beta \cdot \mu \quad (\text{III.9})$$

sendo β um fator que depende de: $X = \frac{\mu \cdot L_{eq} \cdot V_a^2}{D}$

Para sistemas de pressão positiva, testes operacionais mostraram uma relação entre β e X , que é mostrada na figura III.2, enquanto que, para sistemas de vácuo, assume-se um valor constante de β igual a:

$$\beta = 1,5 \times 10^{-7}$$

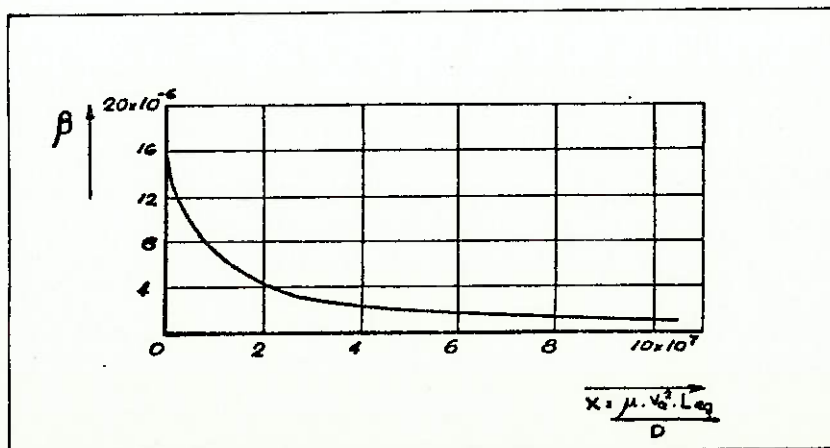


Fig. III.2 - Gráfico de $\beta \times X$

Se o trajeto de transporte incluir trechos verticais, além das perdas por atrito, já incluídas pelo cálculo do comprimento equivalente, deve-se levar em consideração a diferença de pressão devida à coluna de mistura ar+material e que pode ser calculada por:

$$P_{cv} = \frac{H \cdot \gamma'_a \cdot \pi}{10^4} \quad (\text{III.10})$$

sendo γ'_a o peso específico para a pressão avaliada na secção.

Considerando que, em sistemas de vácuo, a pressão na entrada é aproximadamente igual à atmosférica e, nos sistemas de pressão positiva, a pressão na saída também o é e sendo:

$$P_o = 1,0 \text{ kgf/cm}^2, \quad \text{obtemos:}$$

$$P_i = \sqrt{1 + \frac{\beta \cdot \mu \cdot L_{eq} \cdot V_a^2}{D}} \pm P_{cv} \quad (\text{III.7a})$$

$$P_f = \sqrt{1 - \frac{\beta \cdot \mu \cdot L_{eq} \cdot V_a^2}{D}} \mp P_{cv} \quad (\text{III.8a})$$

sendo que o sinal superior de P_{cv} significa transporte de baixo para cima e o inferior o inverso.

3.6 - DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA DO MOTOR DO COMPRESSOR

Sendo a pressão de trabalho do compressor:

$$P_t = P_i \quad - \quad \text{para sistemas de pressão positiva}$$

$$P_t = P_f \quad - \quad \text{para sistemas de vácuo,}$$

a pressão no compressor será:

$$P_c = \alpha \cdot P_t + P_p \quad (\text{III.11})$$

onde $\alpha \approx 1,15$ a $1,25$ depende da construção do injetor e $P_p = 0,3 \text{ kgf/cm}^2$ é a perda de pressão no suprimento principal de ar.

Tomando agora uma compressão isotérmica para um volume de $1,0 \text{ m}^3$, teremos o trabalho teórico do compressor que será dado por:

$$\tau_c = 23030 \cdot P_o \cdot \log\left(\frac{P_c}{P_o}\right) \quad (\text{III.12})$$

A vazão do compressor será:

$$Q_c = Q_a \cdot \alpha' \quad (\text{III.13})$$

sendo α' um fator que compensa as perdas por vazamentos, assumido como sendo igual a 1,1.

De posse dos valores calculados pelas expressões (III.12) e (III.13), a potência do motor do compressor será:

$$N_c = \frac{\tau_c \cdot Q_c}{102 \cdot \eta} \quad (\text{III.14})$$

sendo que a eficiência do compressor é tomada entre 55% e 75%.

4. MÉTODO PROPOSTO POR STEPANOFF [9]

Este método é baseado numa analogia entre o transporte pneumático e o escoamento de misturas de sólidos e água, estudado por Durand por cerca de 10 anos. Considera-se aqui o escoamento em regime permanente, sem deposição, em tubulação horizontal. Em comparação ao transporte hidráulico, o transporte pneumático é bem mais difícil de ser estudado, devido à compressibilidade do gás, às altas velocidades atingidas e à baixa queda de pressão ao longo da tubulação, o que acarreta grandes erros experimentais, nas medições efetuadas. Em testes a maior parte do tubo utilizado é necessária para que se atinja o regime permanente, restando apenas um curto trecho para as observações. Dessa forma, algumas variações tornam-se desprezíveis em comparação aos erros experimentais, como, por exemplo, é desprezível a variação de volume do ar na saída da tubulação, uma vez que o erro introduzido com essa simplificação situa-se bem abaixo dos níveis de incerteza das medições.

Como já foi dito, este item trata apenas de escoamento horizontal. Entretanto, no caso de escoamento vertical ou inclinado, deve-se apenas somar às perdas por atrito aqui calculadas, a pressão devida à coluna de material+ar na vertical, como veremos mais adiante.

4.1 - CONCENTRAÇÃO DA MISTURA

Além da relação de carga (μ) já definida no item 3, no transporte pneumático pode-se utilizar ainda os conceitos de concentração volumétrica ou de concentração em peso, como serão definidos a seguir:

- CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA

É a relação entre o volume de sólidos transportado e o volume total da mistura, ou seja:

$$C = \frac{W_s/\gamma_s}{W_s/\gamma_s + W_a/\gamma_a} = \left(\frac{1 + \gamma_s/\gamma_a}{\mu} \right)^{-1}$$

como,

$$\frac{\gamma_s}{\gamma_a} = \frac{S_s}{S_a} \cong \frac{S_s}{1/832} = 832 \cdot S_s, \text{ temos:}$$

$$C = \frac{\mu}{1 + 832 \cdot S_s} \quad (\text{III.15})$$

- CONCENTRAÇÃO EM PESO

$$C_w = \frac{W_s}{W_s + W_a} = \frac{\mu}{\mu + 1} \quad (\text{III.16})$$

- GRAVIDADE ESPECÍFICA DA MISTURA

$$S_m = \frac{\gamma_s \cdot C + \gamma_a \cdot (1-C)}{\gamma_a} = 1 + \mu \cdot (1 - \gamma_a/\gamma_s)$$

$$S_m = 832 \cdot \frac{1 + \mu}{832 + \mu} \quad (\text{III.17})$$

4.2 - FUNÇÃO ϕ

A função ϕ fornece uma medida da relação entre os coeficientes de resistência ao escoamento da mistura e do ar puro e é definida como:

$$\phi = \frac{J_m - J_a}{J_a \cdot \mu} = \frac{\lambda_m - \lambda_a}{\lambda_a \cdot \mu} \quad (\text{III.18})$$

sendo λ_a obtido a partir de Re e ϵ para o escoamento de ar puro para um dado diâmetro de tubo.

4.3 - VELOCIDADE DE DEPOSIÇÃO

A velocidade de deposição da partícula é definida como a velocidade de queda livre da partícula no ar e pode ser calculada por:

$$V_d = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{g \cdot d \cdot 832 \cdot S_s}{Ca}} \cong \sqrt{1110 \cdot \frac{g \cdot d \cdot S_s}{Ca}} \quad (\text{III.19})$$

O coeficiente de arraste Ca é função do nº de Reynolds:

$$Re = \frac{V_d \cdot d}{\nu} \quad (\text{III.20})$$

Entretanto, para obter-se o número de Reynolds, como se observa em (III.20) seria necessário o conhecimento da velocidade de deposição. Isso tornaria o processo iterativo, mas, com alguns rearranjos, podemos ter:

nece: $V_d = \frac{Re \cdot \nu}{d}$, que substituído na equação (III.19) for-

$$Re^2 \cdot Ca = 1110 \cdot \frac{g \cdot d^3 \cdot S_s}{\nu} \quad (\text{III.21})$$

No caso de transporte com ar, substituindo os valores de ν e g , temos:

$$Re^2 \cdot Ca = \frac{1110 \times 9,78 \cdot d^3 \cdot S_s}{(1,6 \times 10^{-5})^2} = 4,24 \times 10^{13} \cdot d^3 \cdot S_s \quad (\text{III.22})$$

Substituindo, então, os valores de d e S_s , conhecidos, podemos extrair da figura III.3 o valor de Ca .

A figura III.4 mostra valores da velocidade de deposição (velocidade mínima de transporte) obtidos por SEGLER em suas experiências com o transporte de trigo.

4.4 - EQUAÇÃO DE DURAND PARA MISTURAS SÓLIDO-GÁS

A equação de Durand para o escoamento de misturas de sólidos em gases tem forma análoga àquela utilizada para misturas de sólidos em água e é escrita:

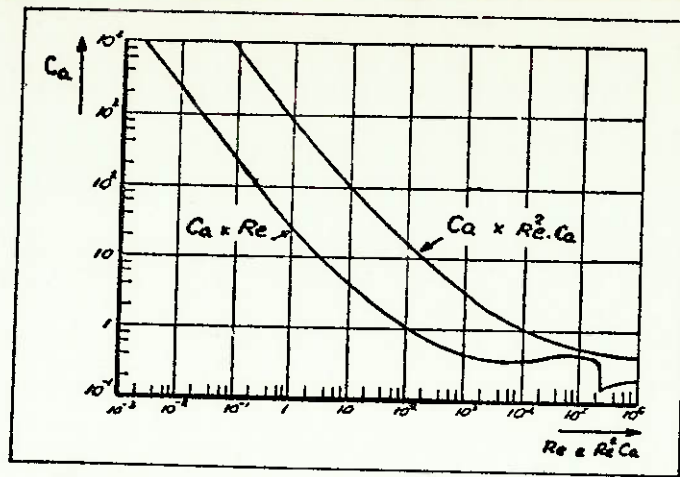


Fig. III.3 - Coeficiente de arraste p/esferas

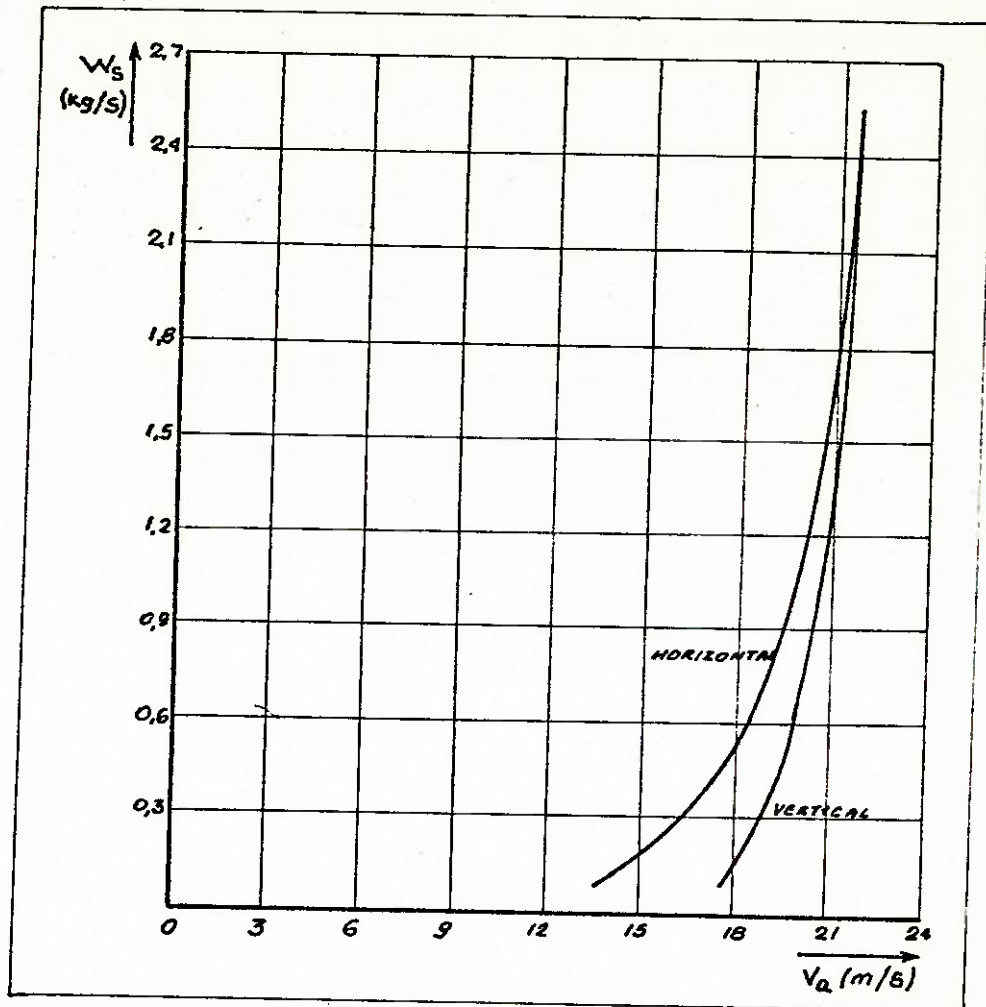


Fig. III.4 - Velocidade minima para trigo

$$\phi = \frac{\lambda_m - \lambda_a}{\lambda_a \cdot \mu} = 2340 \cdot \left[\frac{g \cdot D}{V_a^2} \cdot \frac{S_s^{1/3}}{Ca^{1/2}} \right]^{3/2} \quad (\text{III.23})$$

Esta equação, quando comparada com os valores obtidos experimentalmente, fornece valores exatos quando $V/\sqrt{gD} \approx 31,2$; valores maiores se $V/\sqrt{gD} < 31,2$ e valores menores caso contrário.

Para corrigir essa distorção, foi determinada experimentalmente uma relação, que é:

$$\phi = \frac{\lambda_m - \lambda_a}{\lambda_a \cdot \mu} = 81 \cdot \frac{g \cdot D}{V_a^2} \cdot \frac{S_s}{\sqrt{Ca}} \quad (\text{III.24})$$

A figura III.5 mostra a diferença entre a curva obtida a partir da equação (III.23) e aquela obtida a partir de (III.24) e confirmada por diversos pesquisadores.

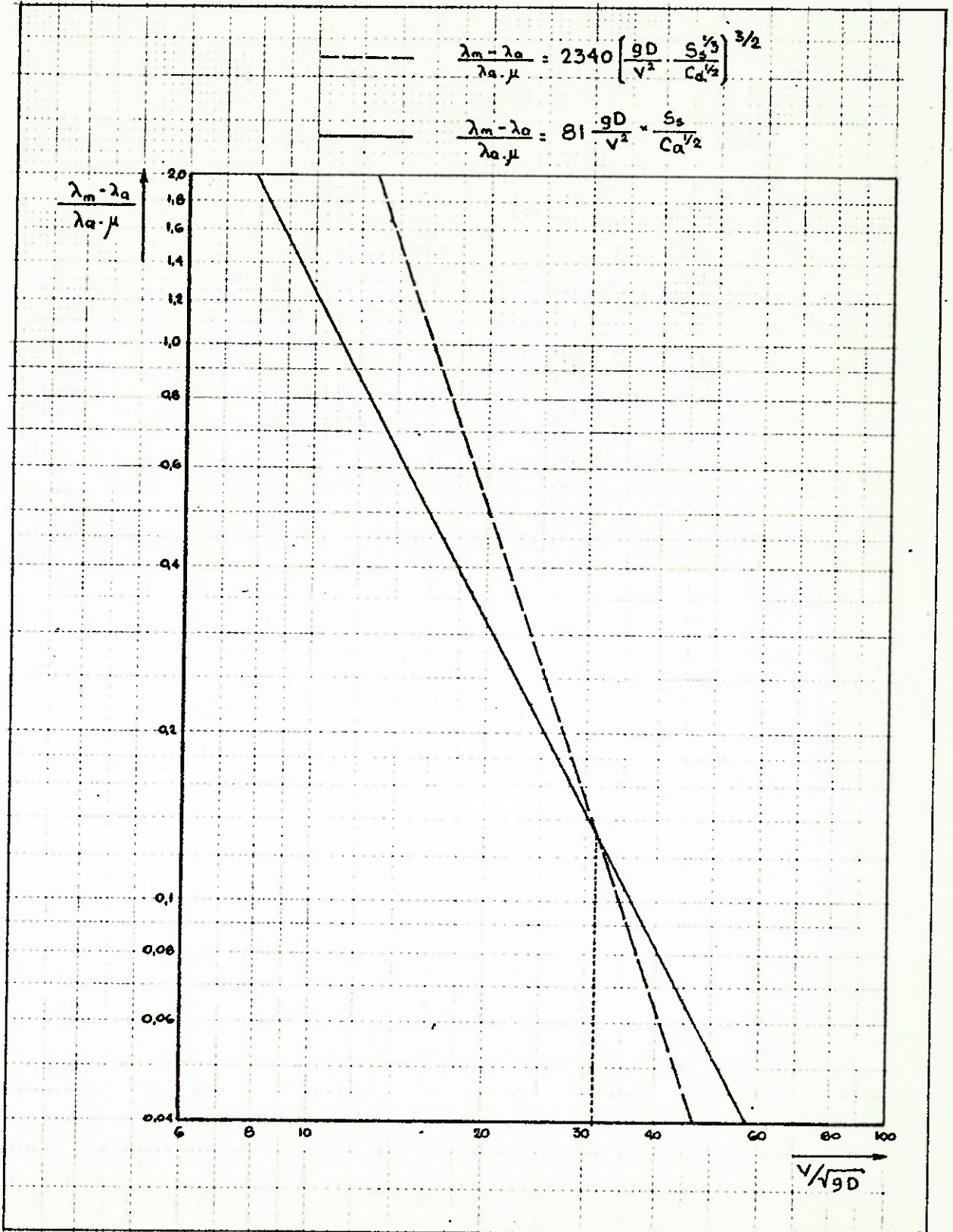


Fig III.5 - Valores da função ϕ para suspensões de trigo

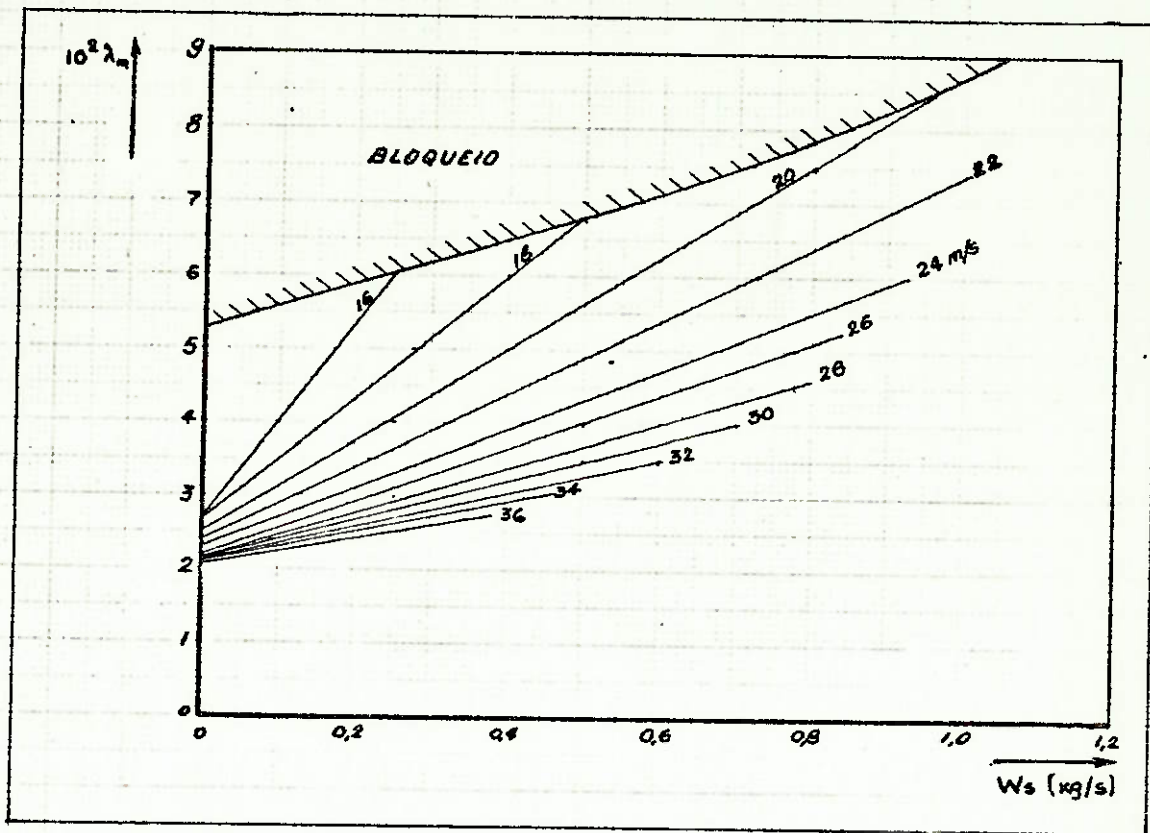


Fig. III.6 - Valores de λ_m para $D=46$ mm. e trigo

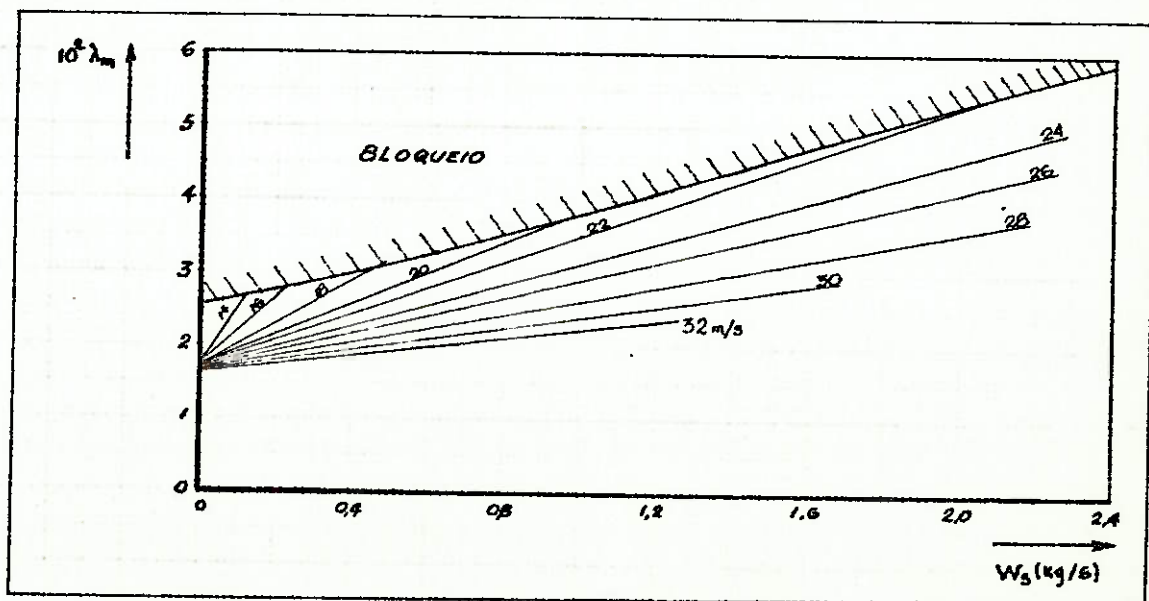


Fig. III.7 - Valores de λ_m para $D=113$ mm. e trigo

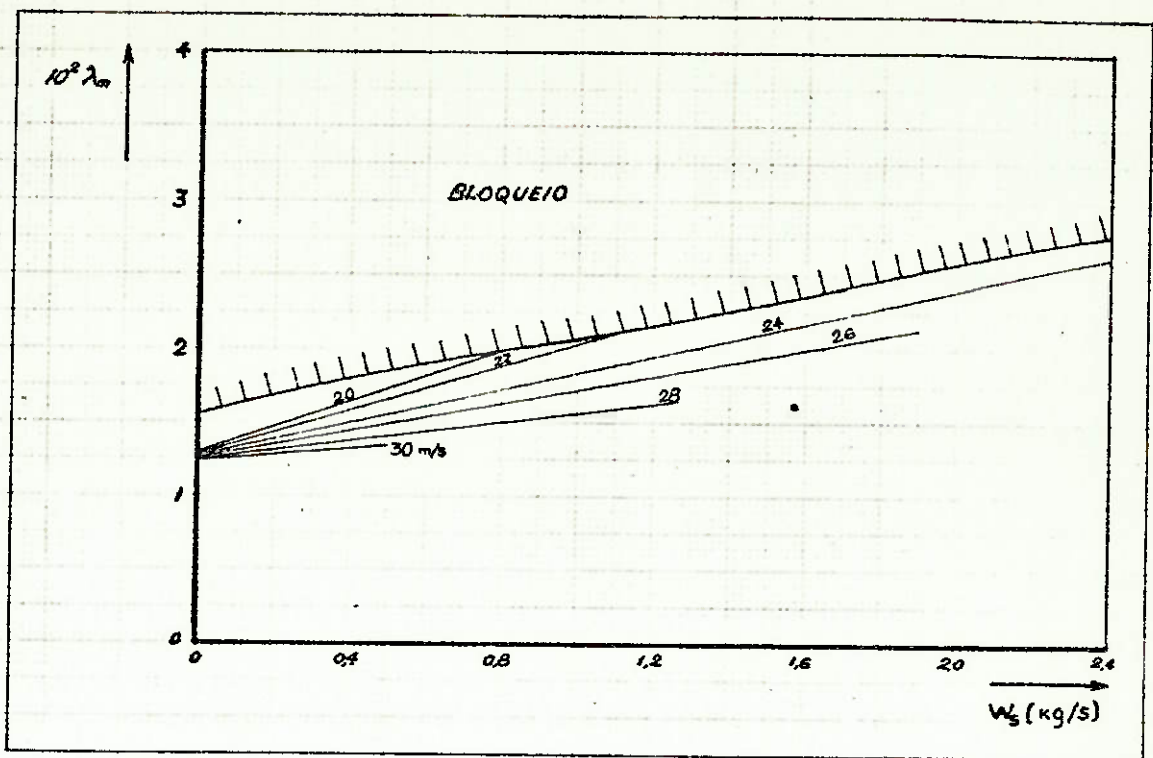


Fig. III.8 - Valores de λ_m para $D=295$ mm. - trigo

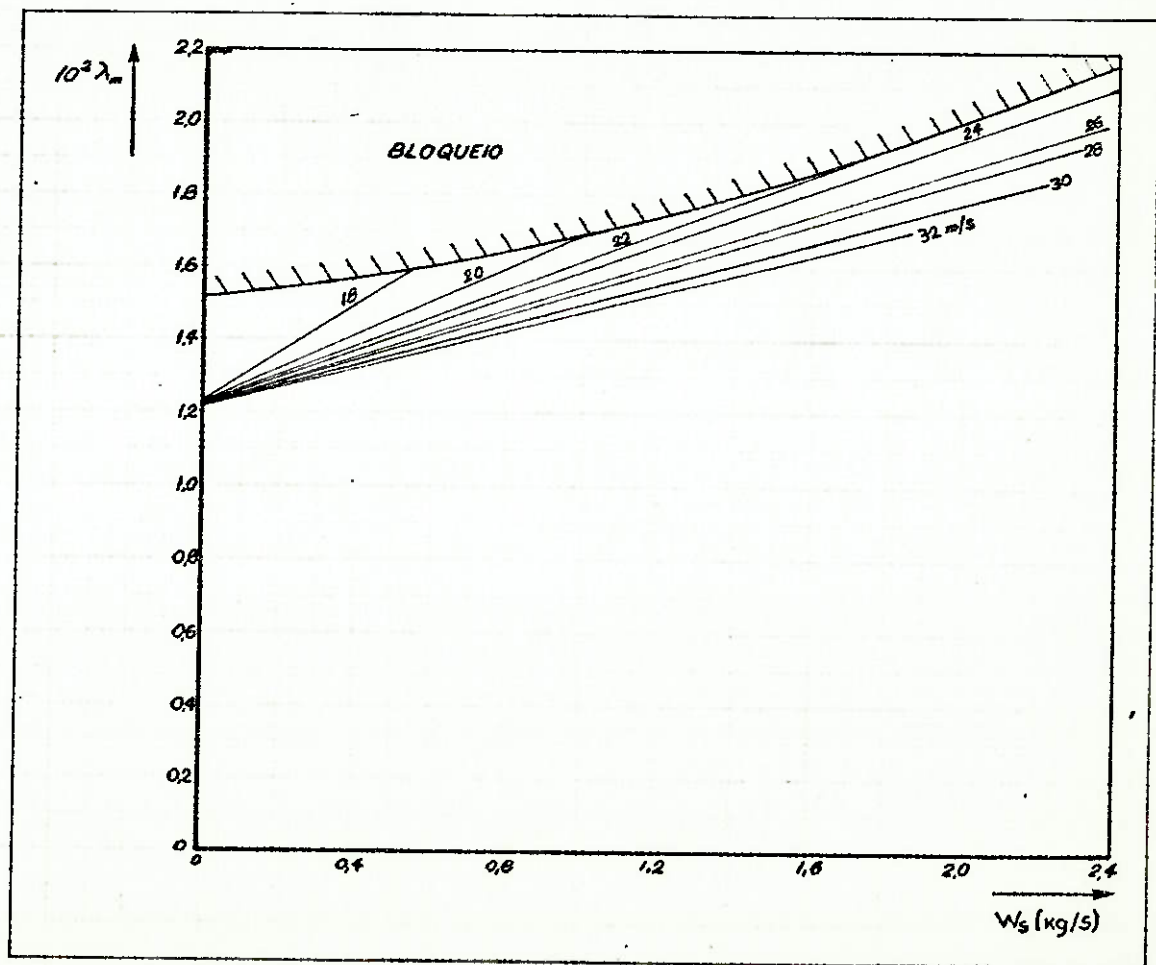


Fig. III.9 - Valores de λ_m para $D=420$ mm - trigo

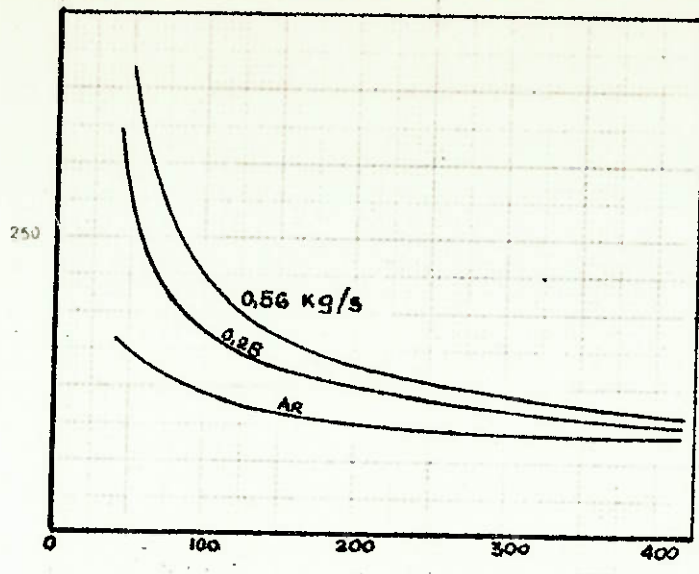


Fig. III.10 - $V_a = 19$ m/s

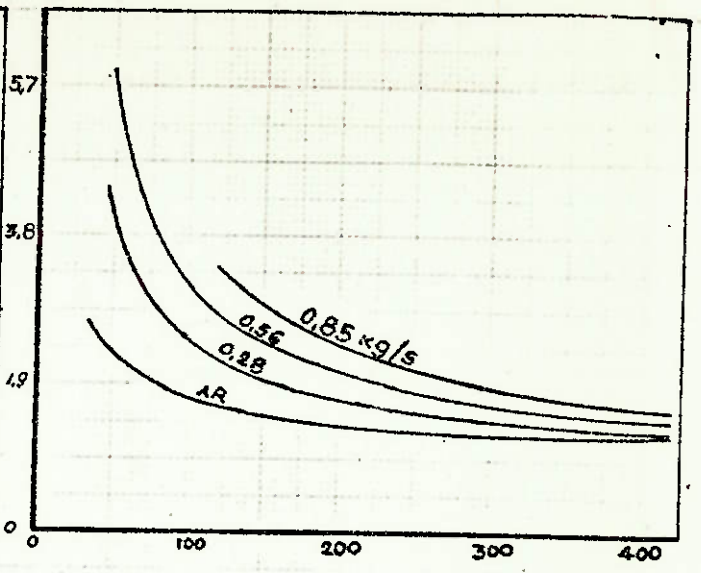


Fig. III.11 - $V_a = 20$ m/s

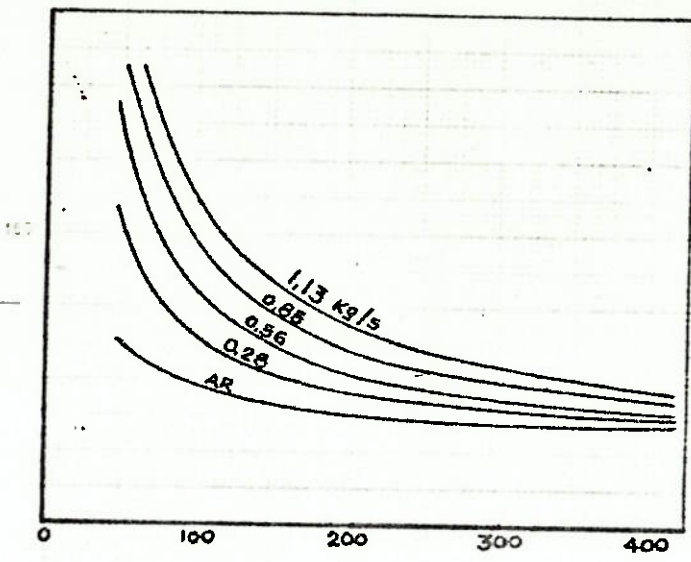


Fig. III.12 - $V_a = 21$ m/s

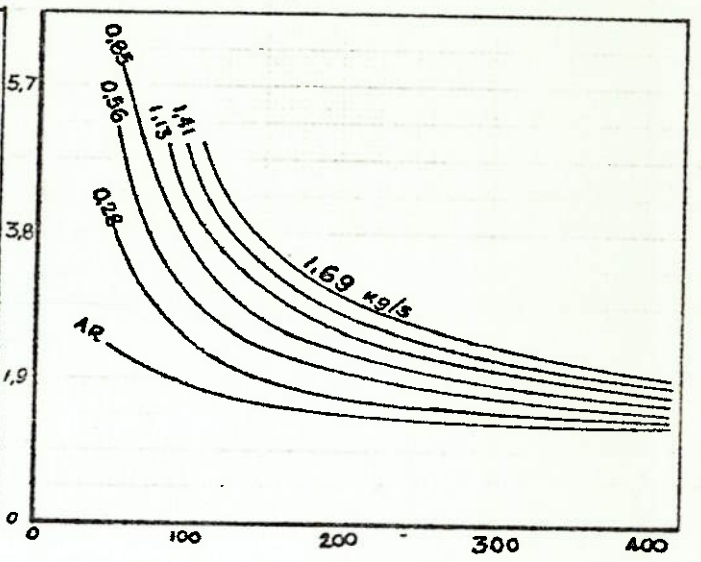


Fig. III.13 - $V_a = 22$ m/s

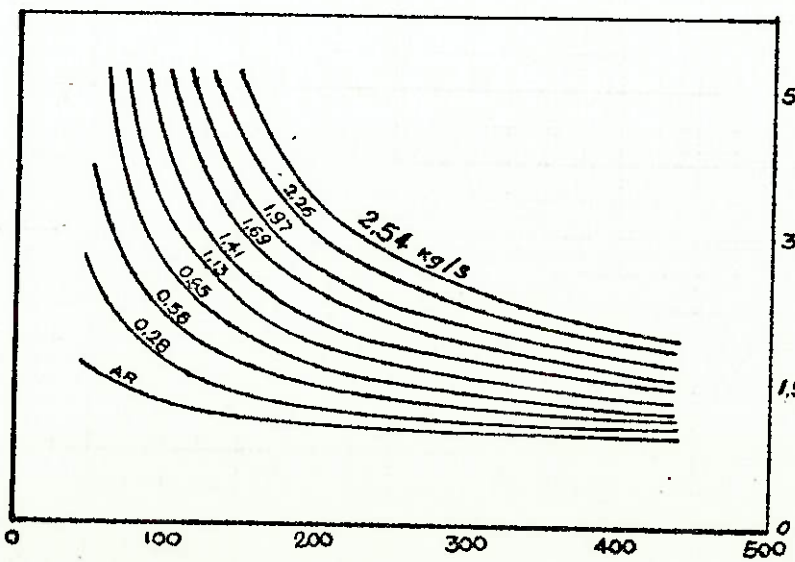


Fig. III.14 - $V_a = 23$ m/s

Gráficos
 $10^2 \lambda_n \times D$ (mm)

4.5 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nas páginas anteriores são mostrados alguns gráficos de resultados obtidos por SEGLER em suas pesquisas com trigo. Os gráficos das figuras III.6 a III.9 mostram a variação do coeficiente de resistência ao escoamento da mistura em função da descarga, para um dado diâmetro e várias velocidades. As figuras de III.10 até III.14 mostram essa variação em função do diâmetro do tubo, para uma dada velocidade e várias descargas.

4.6 - PERDA DE PRESSÃO NA ACELERAÇÃO DOS SÓLIDOS

Os sólidos, ao entrarem na tubulação, possuem, quando isso acontece, uma velocidade muito pequena na direção do escoamento, de vendo, portanto, serem acelerados até a velocidade média de transporte. A perda de pressão devida à aceleração é muito grande e não deve, em hipótese alguma, ser desprezada. Segler em pesquisas com tubos de 46, 113, 295 e 420 mm e velocidade do ar de 21 m/s, com trigo, obteve o gráfico mostrado na figura III.15, avaliando o comprimento equivalente de tubulação para a aceleração dos sólidos, para qualquer dos diâmetros. Ao aumentar-se a velocidade, a tendência é de o comprimento equivalente diminuir, porém, com variação muito pequena. O fato de a velocidade aumentar e o comprimento equivalente diminuir pode parecer estranho à primeira vista, porém, deve-se notar que não é a queda de pressão que diminui e sim a relação entre essa queda e a perda de pressão por atrito na tubulação.

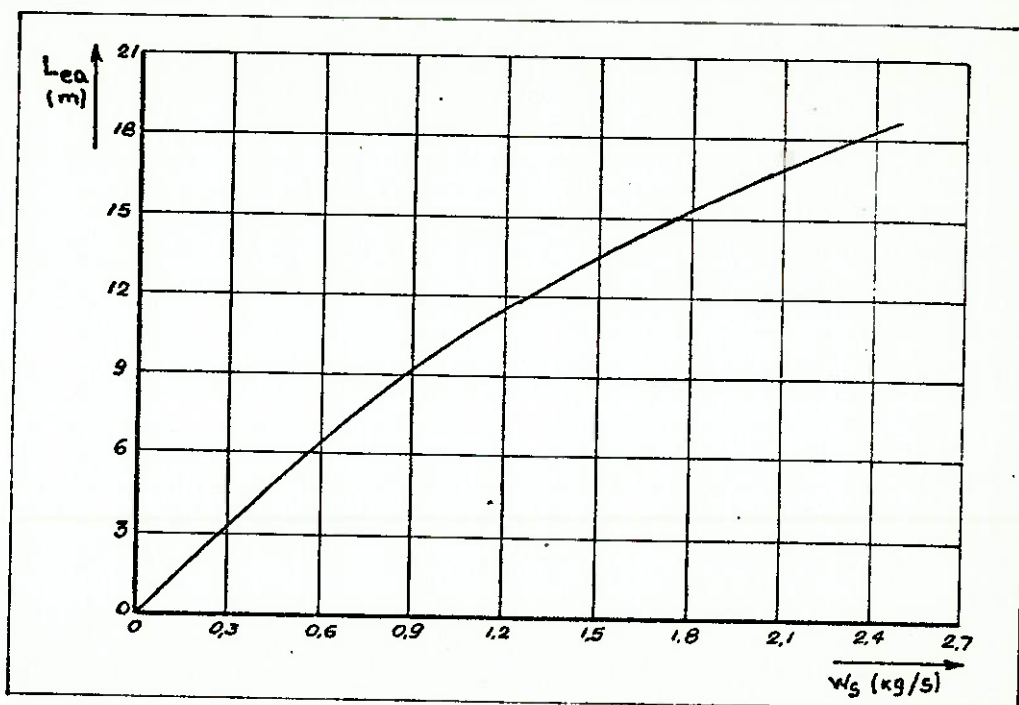


Fig. III.15 - Comprimento equivalente / aceleração do trigo

4.7 - PERDA DE PRESSÃO EM CURVAS

A obtenção de resultados decisivos para a queda de pressão em curvas é extremamente dificultada por uma série de fatores, tais como o raio da curva ou a forma de instalação. Assim, por exemplo, duas curvas colocadas uma logo após a outra apresentam menor

perda total que as mesmas duas curvas instaladas com um trecho de tubo retilíneo entre elas. Verificou-se que isso se justifica pela necessidade de, no segundo caso, ocorrerem duas reacelerações dos sólidos, após cada uma das curvas, enquanto que no primeiro caso o material passa da primeira para a segunda curva sem ser reacelerado. A partir disso, algumas experiências feitas com curvas de ângulo reto mostraram que existe uma relação entre o comprimento equivalente de curvas e aquele devido à aceleração dos sólidos. O resultado dessas experiências levaram à conclusão de que o comprimento equivalente para curvas de 90° pode ser tomado como 50% daquele devido à aceleração após a alimentação. Entretanto, a essa perda deve-se somar aquela devida ao atrito na curva, cujo comprimento equivalente pode ser calculado pelo comprimento do arco de circunferência correspondente. A figura III.16 mostra esses resultados em função da descarga, para alguns tubos e para uma relação R/D = 6.

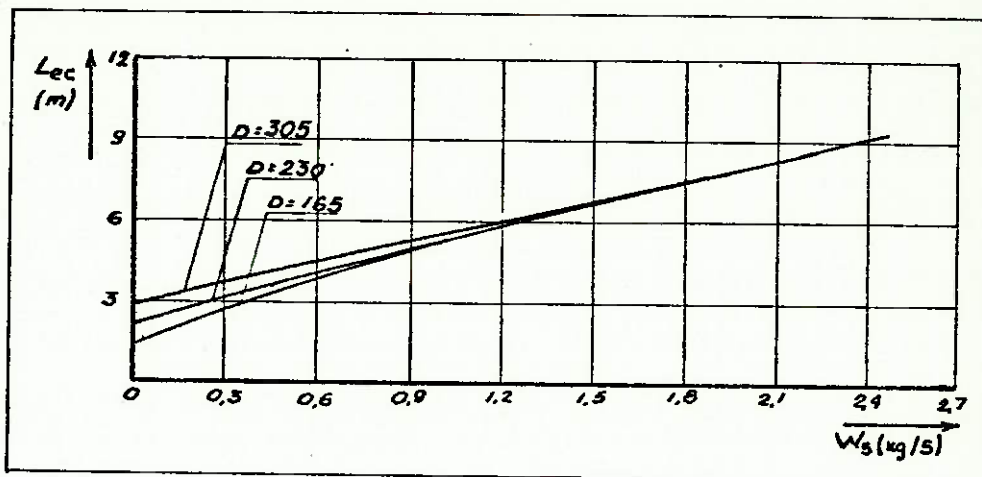


Fig. III.16 - Valores de Lec $\gamma/90^\circ$ e $R/D = 6$; trigo

4.8 - CÁLCULO DA DIFERENÇA DE PRESSÃO

SEGLER propõe para o cálculo da diferença de pressão a seguinte expressão:

$$\frac{P_i^2 - P_f^2}{2 \cdot P_f} = \lambda_m \cdot \frac{L_{eq}}{D} \cdot \frac{V_a^2}{2g} \cdot \gamma_a \cdot 10^{-4} \quad (\text{III.25})$$

sendo L_{eq} a soma de todos os comprimentos (geométricos ou equivalentes) envolvidos.

A essa pressão deve-se adicionar a pressão correspondente à coluna de material em transporte vertical ou inclinado, que pode ser obtida por:

$$P_{cv} = \gamma_a \cdot (1 + \mu) \cdot L_v \cdot \text{sen}\theta \cdot 10^{-4} \quad (\text{III.26})$$

Assim sendo, a pressão total na entrada será:

$$P_i = P_i' + P_{cv} \quad (\text{III.27})$$

4.9 - DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA DO COMPRESSOR

Para a determinação da potência necessária para o compressor, pode-se utilizar também aqui, o mesmo método proposto no item 3.6 deste mesmo capítulo.

- C A P Í T U L O I V -

EQUIPAMENTOS DE ALIMENTAÇÃO E RECEPÇÃO

Quando é utilizado um transportador pneumático, o produto deve passar por sucessivas etapas de preparo para se iniciar o transporte: recepção, armazenamento e remessa.

1. RECEPÇÃO

As operações de recepção envolvem considerações que devem ser consideradas para o bom desempenho de todo o sistema:

1.1 - PESAGEM:

- a. o transporte deve ser pesado na entrada e na saída.
- b. os materiais que necessitam ser pesados após descarregar, porém, antes de entrar no silo, requerem uma considerável quantidade de equipamentos de grandes dimensões e deve passar pela seguinte seqüência: entrar num receptor contendo um funil oscilante superior, um taque de pesagem, um funil oscilante inferior e em seguida no silo.

1.2 - AMOSTRAGEM:

- a. a carga deve ser amostrada para assegurar a concordância com a especificação.
- b. o tempo de espera para descarregamento deve ser aumentada, quando é rigoroso o controle do tamanho das partículas.
- c. deve haver um sistema de rejeição de material.

1.3 - DESCARGA:

- a. a escolha dos controles necessários pode ser: manual simples para áreas de descarga e armazenagem adjacentes; semi-automático quando descarga e armazenagem são distantes.
- b. a taxa de descarga e o tempo total de descarga devem ser avaliados.

2. ARMAZENAGEM

2.1. ENCHIMENTO : o volume mínimo de armazenamento necessário deve ser maior que 1,5 vezes a capacidade de máximo transporte.

2.2. CONTROLE DE NÍVEL: o controle pode ser manual ou automático, com indicador contínuo ou de alto, médio e baixo nível.

2.3. SAÍDA DO AR: ocorre a necessidade de um sistema coletor de pó, estudar a sua localização e tipo.

2.4. DESCARGA: deve ser estudada a taxa de descarga, meio de descarga (por gravidade, transportador mecânico ou pneumático), bloqueios dos sistemas de enchimento e descarga.

3. REMESSA

A alimentação para o processo pode ser feita por gravidade nos funis de alimentação, mas é necessário o controle do nível para manter baixa a altura de coluna, garantindo uniformidade da densidade do produto e livre escoamento; pode ser feita por um sistema proporcional, sendo que nesse caso, o tipo de alimentador deve ser cuidadosamente selecionado para evitar o super enchimento.

O produto transportado deve sofrer novamente novas etapas para serem estoçadas ou empacotados: recepção, separação e armazenamento (análogo às condições de entrada).

Em seguida serão citados os diversos equipamentos utilizados para alimentação e recepção dos produtos transportados pneumaticamente.

4. ALIMENTADORES

Existem diversos tipos de alimentadores, os quais devem ser selecionados em função das condições de operação.

Em linhas com pressão negativa a alimentação é feita através de bocais de sucção.

Em linhas com pressão positiva podem ser utilizados:

- alimentadores rotativos tipo "air lock"
- gaveta de descarga de dupla portinhola
- válvula tipo "flap"
- transportador parafuso
- transportador "air-slide"

4.1. BOCAIS DE SUCÇÃO E CONES DE CAPTAÇÃO: são usados para carregar material nos tubos de sistemas de vácuo. O funcionamento de um bocal de sucção é o seguinte. O bocal (fig.IV.1.a e b) montado numa junção flexível conectada ao tubo, é introduzido na massa a ser transportada. A diferença de pressão cria uma corrente de ar que passa, parte pelo material e parte pela abertura anular do bocal, através de uma válvula controlada. O ar que passa pelo material carrega as partículas e lança-as no tubo.

Existem outros tipos de alimentação para sistemas de sucção.

Na fig.IV.1.c temos um outro tipo de alimentação com bocal; na extremidade inferior é adaptado um diafragma para selar o bocal no momento em que o silo receptor está cheio.

Os silos de alimentação de sistemas negativos devem ser equipados com portas de acesso selados de fácil remoção prevendo manutenção do bocal de sucção e remoção de obstruções que entopem a entrada da linha de transporte.

4.2. ALIMENTADOR ROTATIVO "AIR LOCK": o principal dispositivo para colocar ou tirar material de um sistema de transporte pneumático continuamente com um mínimo de perda do ar de transporte é o alimentador rotativo tipo "air lock" (fig.IV.2).

O alimentador rotativo mais comum é aquele que apresenta alimentação no topo e saída no fundo. Os rotores podem ser com extremidade aberta - onde a palheta é fixada ao eixo - ou do tipo fechado - onde cada extremidade da palheta é coberta com um disco. Os componentes de um alimentador rotativo pode ser visto na fig.IV.3.

Rotores abertos são mais econômicos mas eles apresentam desvantagens devido ao desgaste na extremidade cônica da carcaça; não são tão resistentes quando os fechados (podem quebrar no eixo devido a flexões); um produto pode ficar preso entre as extremidades das palhetas e carcaça. Rotores fechados tem todas as palhetas presas juntas e suportadas por um envoltório. Isto elimina a corrosão da carcaça pois esta não entra em contato com o produto.

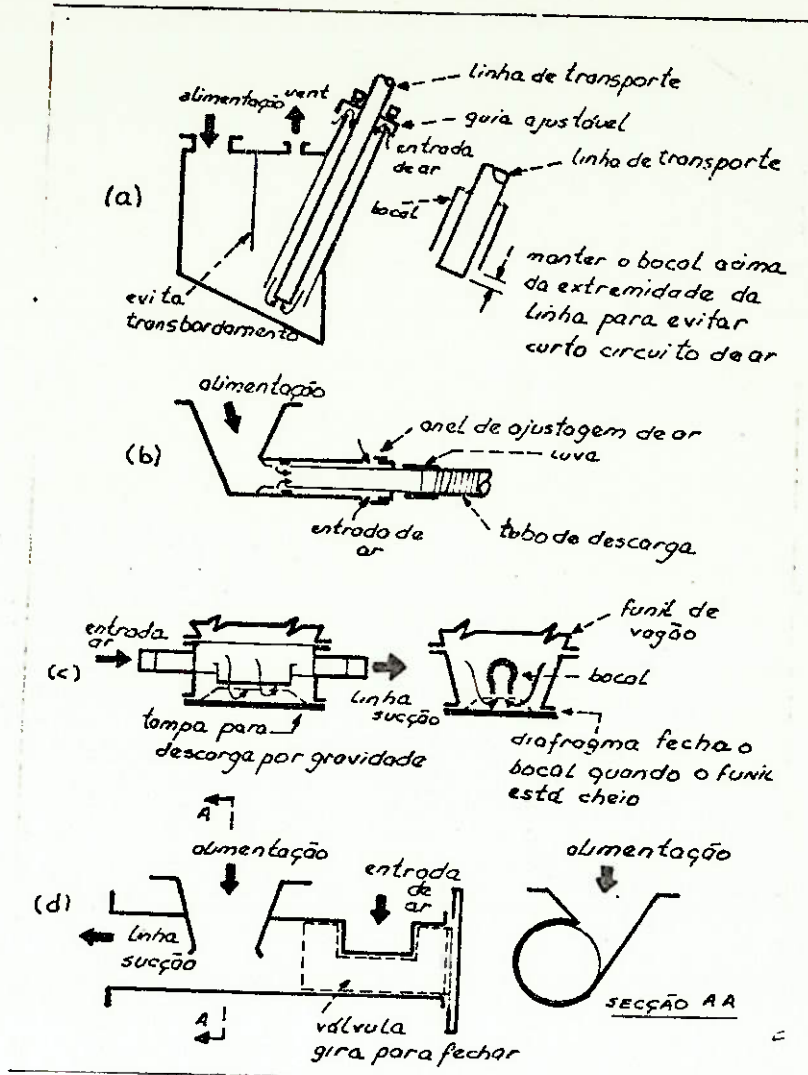


fig.IV.1 vários arranjos de alimentação para sistemas a vácuo

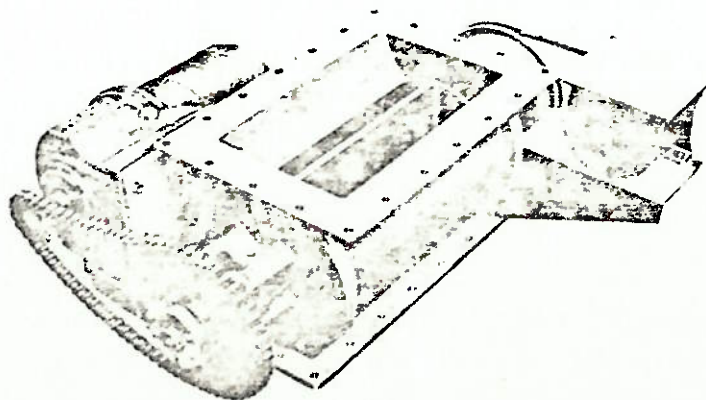


fig.IV.2 alimentador rotativo com transmissão

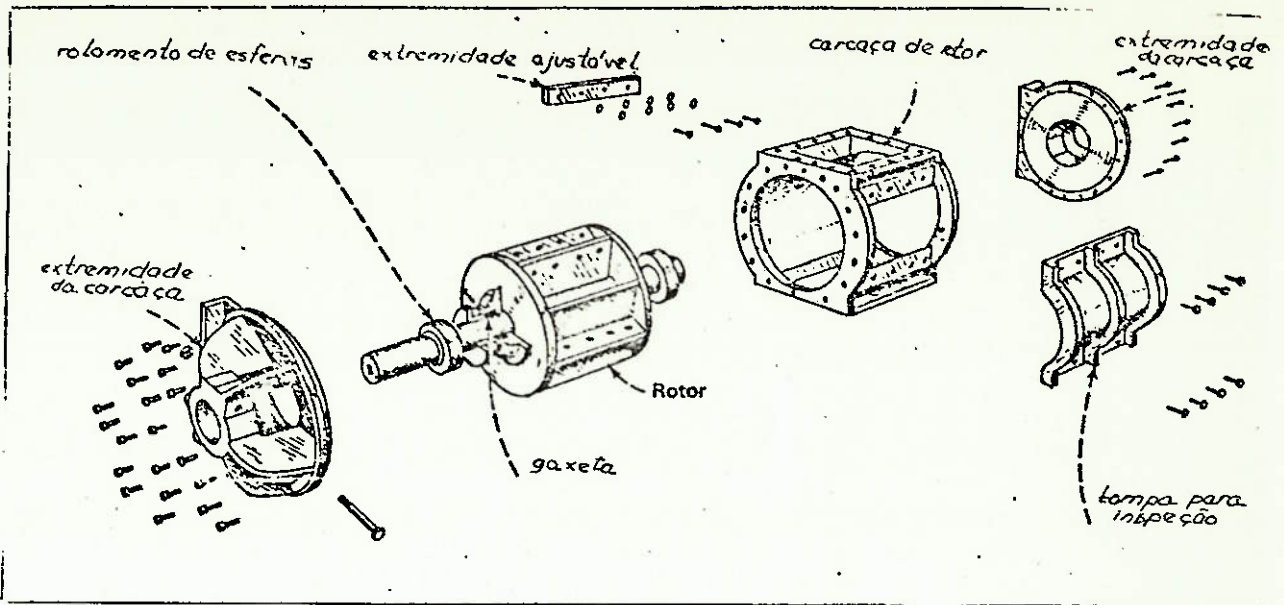


fig. IV.3 componentes da válvula de alimentação rotativa

Quando um rotor fechado é usado em um sistema negativo - com vácuo no topo da válvula e condição ambiente no fundo - um purgador de ar natural pode minimizar o desgaste na área coberta (en-voltório). A vedação do eixo é omitida e o tampão do purgador na extremidade da carcaça é aberto para a atmosfera. O ar que penetra "lava" a área coberta e evita corrosão.

A fig. IV.4 apresenta diferentes formas de rotores.

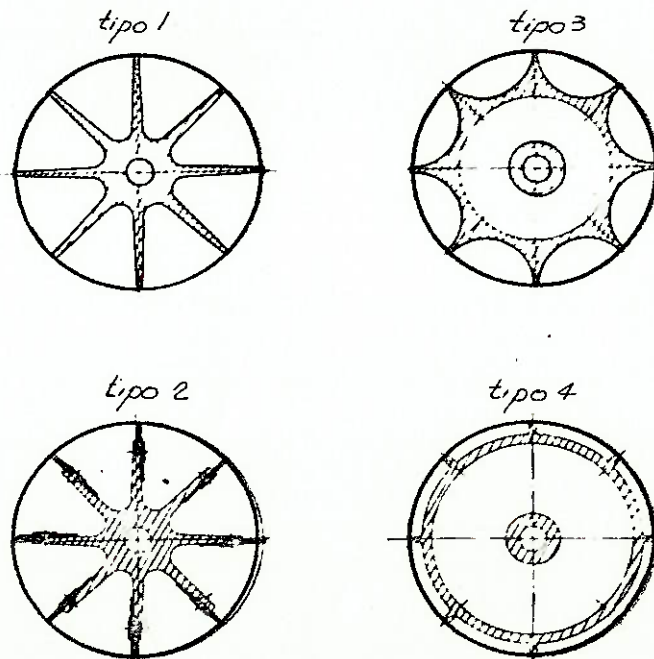


fig. IV.4 tipos de rotores do alimentador rotativo

O tipo 1 tem alojamentos profundos e máximo deslocamento volumétrico. O tipo 2, semelhante ao 1 tem pontas removíveis e ajustáveis fabricadas de diversos materiais. O tipo 3 com alojamento raso e aproximadamente metade do deslocamento volumétrico do 1. É um alimentador (quando uma válvula grande é necessária no fundo de um vaso de descarga) que permite uma rotação maior para carregar menor quantidade de material; tem também sido usado com sucesso em materiais que grudam nos alojamentos dos rotores.

Uma profunda investigação deve ser feita para garantir que o projeto de um alimentador rotativo seja compatível com as características do material a ser transportado.

Os detalhes de projeto influenciam no tamanho do alimentador necessário: por exemplo, se o escape de ar do lado de alta para baixa pressão é grande, provocará a redução da densidade média do material transportado. Materiais de forma irregular podem requerer maior tempo para encher o alojamento e requerer uma alimentação mais lenta.

4.3. GAVETAS DE DESCARGA COM DUPLA PORTINHOLA

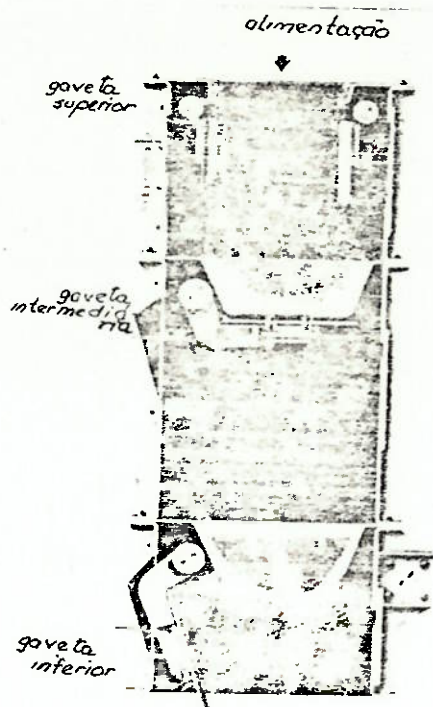


fig. IV.5 vista interna de uma gaveta de descarga com dupla portinhola

Este tipo de alimentador é menor comum que a rotativa pois sua ação é intermitente. É usado principalmente para transportar produtos de alta temperatura, abrasivos, ou de fácil desintegração, de um silo para a corrente de ar.

Não pode ser aplicado para silos com fundo cônico (funil) cheios que tenderam a "inundar" a gaveta e manter a porta aberta. É ideal para aplicação em coletores de pó seco e ciclones tendo um permanente carregamento de pó (fig. IV.5).

Basicamente a gaveta consiste de 2 portas contrabalançadas montadas uma acima da outra. O espaço entre as portas forma o compartimento "air lock". As portas podem ser movidas por gravidade, motor, camo ou pneumáticamente.

Numa gaveta operada gravitacionalmente o peso do material na gaveta superior força a portinhola, o material é derramado no "air lock" assim que a pressão é igualada e a portinhola retorna sozinha novamente para cima. A portinhola inferior, então, é sobrecarregada e o material cai.

abrindo-se. A pressão de ar é igualada e o material cai. A máxima diferença de pressão nesse tipo de gaveta é 150 mm de água.

Em gavetas operadas com motor ou camo, as portinholas são abertas alternativamente a uma velocidade que depende da redução feita. Assim elas abrem havendo ou não material. Uma mola ou contrapesos mantêm as portinholas na posição fechada; qualquer material colocado na parte superior da portinhola força-a para baixo permitindo escoamento de ar para a gaveta; isso evita a saída de material.

A máxima diferença de pressão nesse tipo de alimentador é 300mm de água.

Para diferenças de pressão mais elevadas são utilizadas portinholas acionadas pneumaticamente, com cilindros separados para atuar em cada portinhola.

A operação dos cilindros é controlada por um temperizador remoto que pode ser ajustado para obter uma variedade de ciclos de alimentação.

As diferenças de pressão podem atingir de 200 a 500mm de água. Colocando-se válvulas equalizadoras de pressão entre as portinholas a diferença de pressão pode atingir de 0,50 a 1,10 atmosferas. A válvula equalizadora de pressão (de alívio) é atuada com um camo. Antes da porta superior abrir a válvula de alívio abre para a câmara de sucção (de onde o material é arrastado) e um vácuo é estabelecido no "air lock". Depois que a porta superior é retornada e a inferior aberta, a válvula de alívio admite ar atmosférico para o "air lock" possibilitando a queda rápida do material assim que a portinhola abre.

4.4. VÁLVULA TIPO "FLAP"

Válvulas tipo "flap" são algumas vezes chamadas de válvulas de pinto ou gotas devido à sua ação. Esta válvula é essencialmente uma câmara de descarga adaptada com uma aba de metal; é acoplada à sucção do equipamento (fig. IV.6).

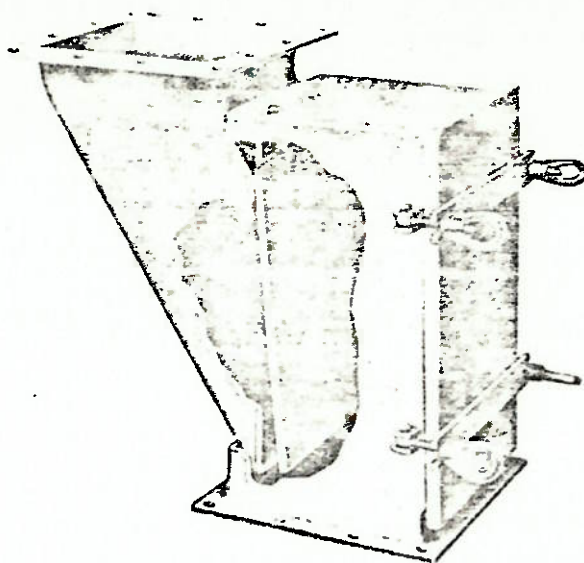


fig. IV.6 válvula tipo "flap"

a limpeza mas a aba fechará fortemente durante a operação normal de filtragem.

Quando o peso do material coletado aumenta, superando a força de assentamento do vácuo, abre-se a porta (a aba gira) e o material é descarregado.

Este tipo de válvula pode ser usado para descarregar pó em equipamentos operando a pressão de sucção muito baixa. Em muitos casos, uma extensão em forma de calha cônica pode ser usada para aumentar a camada de pó acima da aba para tornar o seu peso mais efetivo.

A melhor aplicação para esse tipo de válvula é em filtros multicompartimentados de pó onde a sucção é consideravelmente reduzida e cada compartimento é isolado durante a limpeza. O pó escoará então, livremente durante

4.5. ALIMENTADORES "AIR SLIDE"

Servem para transportar materiais pulverizados e secos (fig. IV.7). Parte-se do princípio que o material aerado se movimentará ao longo do transportador com pequeno ângulo de inclinação em relação à horizontal.

O "air slide" consiste de duas chapas de aço moldadas e parafusadas (seções 1 e 2). Um elemento poroso 3 é colocado entre as duas seções, podendo ser de cerâmica ou metal poroso, ou fibra sintética. O material fluidizado se desloca sobre a superfície do

elemento poroso.

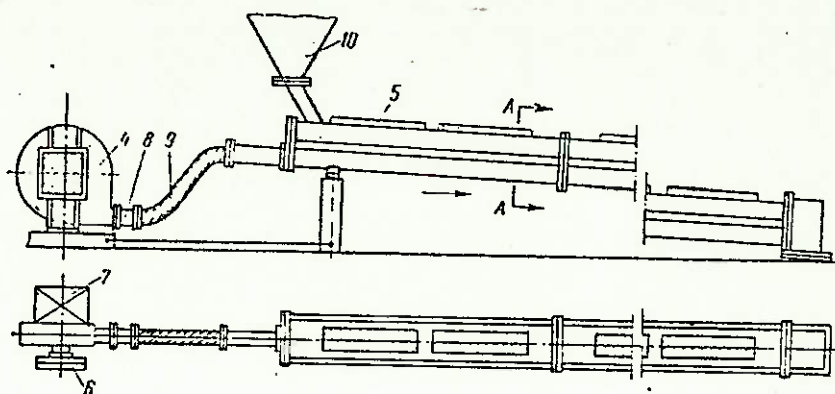
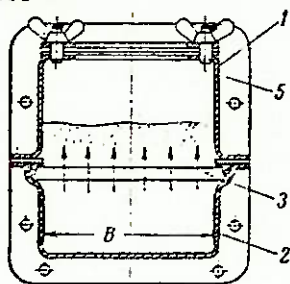


fig. IV.7 esquema de um alimentador "air slide"

secção A-A



1. suporte superior
2. suporte inferior
3. elemento poroso
4. ventilador
5. filtros
6. filtro de sucção
7. motor elétrico
8. ajuste
9. tubo flexível
10. alimentador

fig. IV.8 vista da seção transversal de um alimentador "air slide"

O ar é alimentado na secção 2 por um ventilador 4 e é distribuído ao longo de todo o elemento poroso. Passando através do elemento, o ar fluidiza a câmara de material e então escapa através dos tecidos filtrantes 5 na parte superior da secção 1 ao longo de todo o comprimento.

O "air slide" é de baixo custo, o projeto é simples, o consumo de potência é baixo, tem alta capacidade de transporte combinada com pequenas dimensões (fig. IV.8)

Dois fatores causam problemas: a distribuição do tamanho das partículas e a umidade. O tamanho da partícula deve variar entre 20 MESH ou mais fino. A umidade deve ser menor que 1% mas materiais mais úmidos têm sido transportados (misturado com material seco).

Um dos propósitos em se usar um transportador desse tipo é obter um transportador quase horizontal. Assim, o ângulo de inclinação é projetado o menor possível em função do ar necessário e pressão requerida para transporte.

O material a ser transportado escoava de silos cheios para o alimentador; assim o fluxo deve ser controlado por válvulas gavetas, que operam de maneira semelhante às válvulas gavetas para fluídos (OS & Y) só que assentam em um meio poroso (membrana por onde escoava o ar). Ver fig. IV.9.

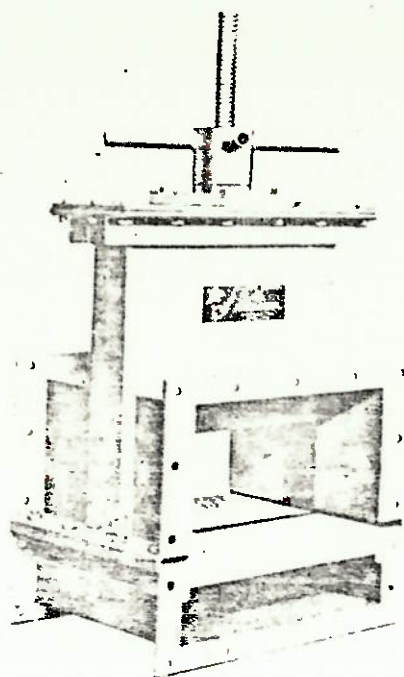


fig. IV.9 válvula gaveta de controle manual

4.6. ALIMENTADOR PARAFUSO

Alimentadores de parafuso estacionário são largamente empregados para cimento e outros materiais pulverizados (fig. IV.10)

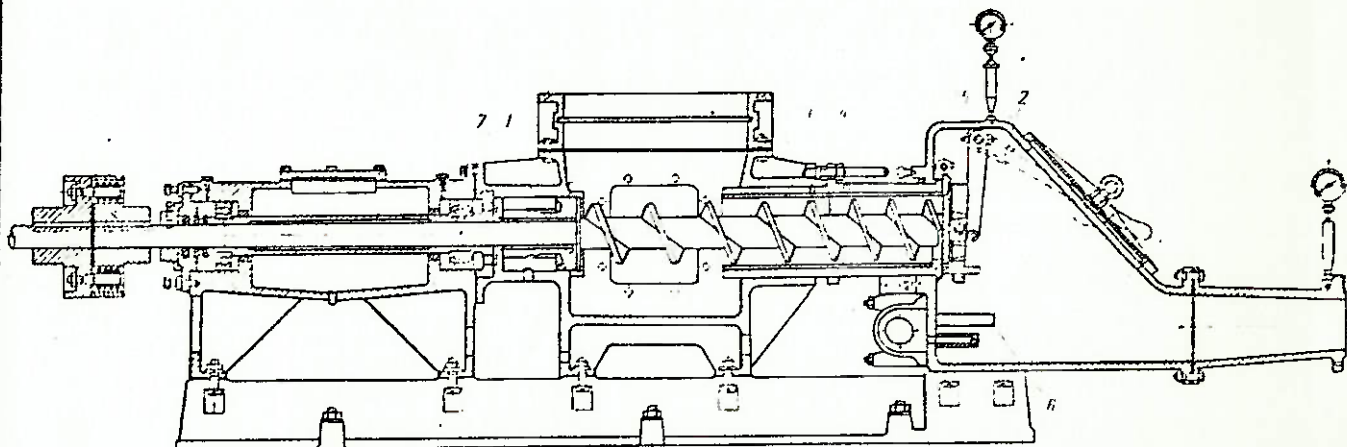


fig. IV.10 transportador parafuso

O material do reservatório é forçado por um parafuso (3) acionado por um motor de alta rotação através do funil (1) para a câmara de mistura (2). O parafuso, girando com rotação de até 1000rpm, numa carcaça cilíndrica com insertos substituíveis (4), tem passo diferencial, decrescendo no sentido do deslocamento da carga. Esta característica faz com que haja uma compactação da carga junto à descarga, impedindo o escape do ar comprimido pela alimentação. O grau de compactação obtido no alimentador é ajustado pela válvula (5) que

evita a penetração de ar no reservatório pelo parafuso, quando o sistema está limpo.

A parte de baixo da câmara de mistura contém dois conjuntos de bocais (6) tubulares (11 a 13 cm cada) através dos quais o ar comprimido penetra na câmara. O ar então incide sobre o material e carrega-o através do tubo para a extremidade de descarga.

Os mancais são protegidos com selos (7) que evitam o ingresso de pó da câmara que circunda o parafuso.

Os alimentadores de parafuso contínuo garantem uma alimentação contínua e tem baixo peso, porém consomem uma grande quantidade de energia para girar o parafuso. Uma outra desvantagem é o rápido desgaste por abrasão, do parafuso e dos inertes da carcaça.

Os vagões ferroviários são normalmente descarregados com alimentadores parafusos. Alimentadores suspensos por guindastes são utilizados para descarregar embarcações.

4.7. GAVETAS TIPO "CUT-OFF"

Calhas são usadas para descarregar, por gravidade, materiais de funis, silos e receptores para o sistema de transporte ou para outros equipamentos de processo ou estocagem. São construídos de tal modo a adaptar à condições de transporte e tipo de material. Não existe uma norma de fabricação.

A descarga de silos através de calhas é precedido por uma gaveta tipo "cut-off" (fig. IV.11).

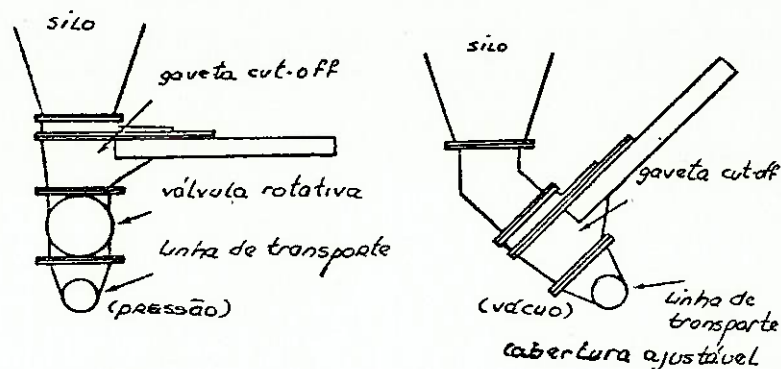


fig. IV.11 gaveta tipo "cut-off"

Elas são do tipo "on-off". Ocasionalmente, é requerido um ajuste de abertura particularmente na alimentação em sistemas à vácuo.

Existem diversos tipos de válvulas gavetas. Alguns são leves, fabricados com estruturas soldadas, outras são rígidas, mais pesadas. A maioria tem entrada e saída retangulares flangeadas que exigem o uso de uma conexão para obter extremidade cilíndrica.

A gaveta "cut-off" deslizante é a mais usada (fig. IV.12) que é operada pela aplicação direta de uma força em uma haste presa à tampa. A força pode ser aplicada manualmente, por acionamento pneumático ou por motor elétrico.

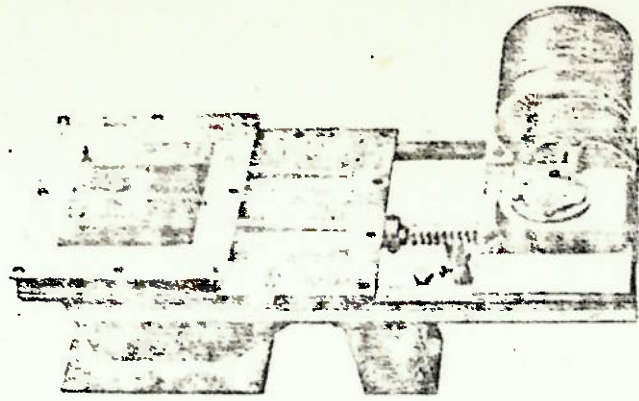


fig. IV.12 gaveta "cut-off" deslizante

5. RECEPTORES

A recuperação de material de uma corrente de ar de transporte requer separação do ar e material transportado. Isto pode ser efetuado em um tipo de receptor projetado para se adaptar às características do pó do material coletado. Os materiais sem pó podem ser coletados em um tanque cilíndrico com uma tampa em forma de funil e um ventilador aberto para a atmosfera. Materiais granulados contendo pó grosso podem ser recuperados em um ciclone com uma voluta projetada para efetuar a separação da maior parte do pó através da força centrífuga com o ar soprado para a atmosfera. Diretamente ou através de um exaustor. Produtos em pó muito finos requerem equipamento adicional para a sua separação. Podem ser coletados de diferentes maneiras: (1) com um ciclone tipo coletor como ar soprado para um filtro; (2) em um filtro projetado para transportar o pó; (3) em uma unidade combinada filtro-receptor que atende em um só equipamento a função de um receptor tipo ciclone e um filtro de pó.

Em todos os tipos de receptores, o material é descarregado através de gaveta projetada para evitar a entrada ou perda de ar dependendo do receptor ser sob pressão ou em vácuo.

5.1. CICLONES: a alta velocidade de transporte e a carga uniforme de pó em um sistema de transporte pneumático permite uma aspiração efetiva do material em receptores tipo ciclone. A eficiência de um ciclone depende da forma e tamanho do ciclone. Estas eficiências podem ser altas (podem atingir até 95%) (fig. IV.13)

O ciclone coletor mais simples é usado na saída de um sistema com pressão positiva; apresenta um exaustor curvo no topo ou uma cobertura para soprar o ar transportador para a atmosfera. Por isso, o coletor não é usado para grande diferença de potencial; normalmente não existe um porta de acesso e é feita com construção soldada.

Para aplicações extremamente abrasivas, um ciclone pesado é usado, com um cilindro de 3/8" de espessura de parede de um material resistente a abrasão e um cone com 3/16" de espessura.

Algumas vezes é desejável promover a separação de partículas muito finas. Para fazer isso, um ciclone "ineficiente" é usado. Esta unidade é construída da mesma maneira que os outros, exceto que o tubo central de sucção é ajustado (quanto mais baixo o tubo, mais baixa é a eficiência do ciclone).

Em sistemas com pressão negativa pode ser incluído um exaustor "fan" com acionamento por motor montado verticalmente na sua extremidade inferior formando uma parte integral da unidade; ou o material pode ser descarregado em uma unidade combinada receptor-filtro que é limpa continuamente durante o período de transporte.

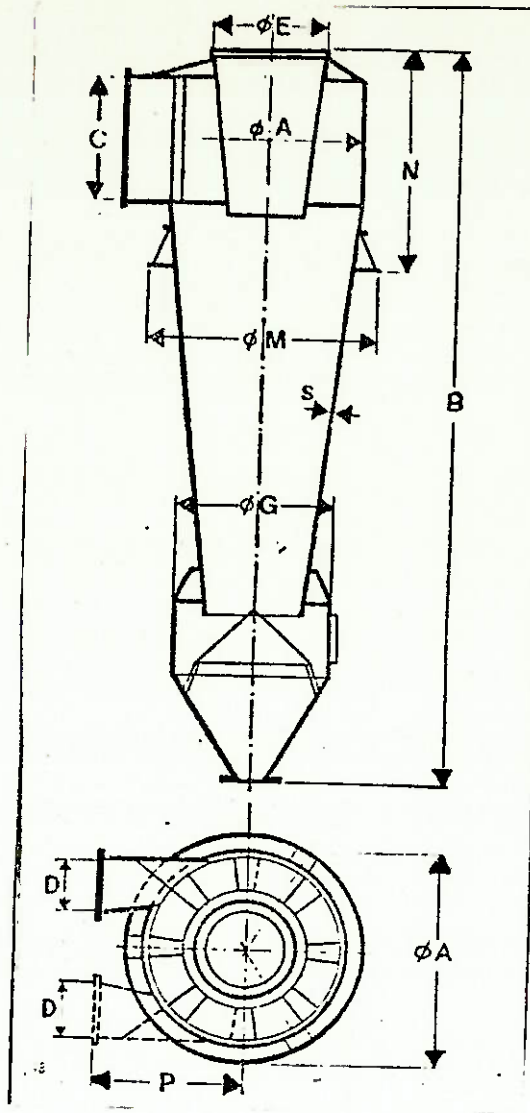


fig. IV.13 esquema de um ciclone separador

Os tamanhos mínimos das partículas para a coleta por meio de ciclones é:

- ciclones de diâmetro grande 40 a 60μ
- ciclones de diâmetro pequeno 20 a 30μ
- ciclones conjugados com ventiladores 15 a 30μ

São de construção simples, compacta; operação fácil e de grau de purificação elevado para partículas maiores que 90μ .

O cálculo teórico de um ciclone é duvidoso devido ao movimento complicado do ar e fornece valores elevados.

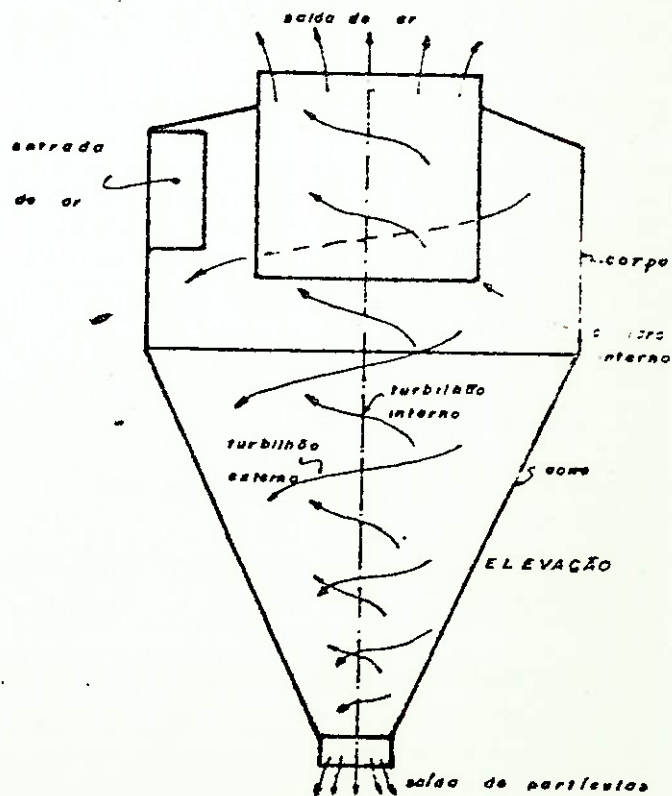
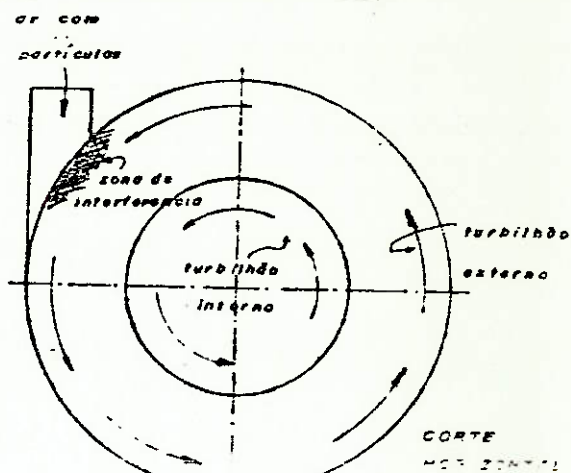


fig. IV.14 ciclone cilíndrico

O ciclone mais comum é o cilíndrico com a parte inferior cônica (fig. IV.14).

O ar com partículas entra tangencialmente, faz várias voltas no corpo e no cone depositando suas partículas e sai, ainda girando, através de um tubo cilíndrico axial.

Sob a ação da força centrífuga, as partículas em suspensão tendem a se concentrar na fina camada de ar junto à parede externa. O movimento helicoidal ascendente do ar e a descarga de pequena quantidade de ar através da saída de pó tendem a projetar as partículas separadas no depósito de partículas.

5.1.1. CICLONES DE TAMANHO GRANDE: é o caso dos ciclones com diâmetro 3,5 a 6 vezes o diâmetro do duto de entrada. São úteis no caso de grandes vazões de ar e onde não há necessidade de grande eficiência de separação - pó de esmeris, fibras textéis.

5.1.2 CICLONE DE PEQUENO DIÂMETRO: devido ao pequeno diâmetro e ao grande comprimento, a eficiência é alta para partículas até 30μ . Seu diâmetro raramente ultrapassa 1,2 m e portanto a capacidade do ar é pequena. (fig. IV.15).

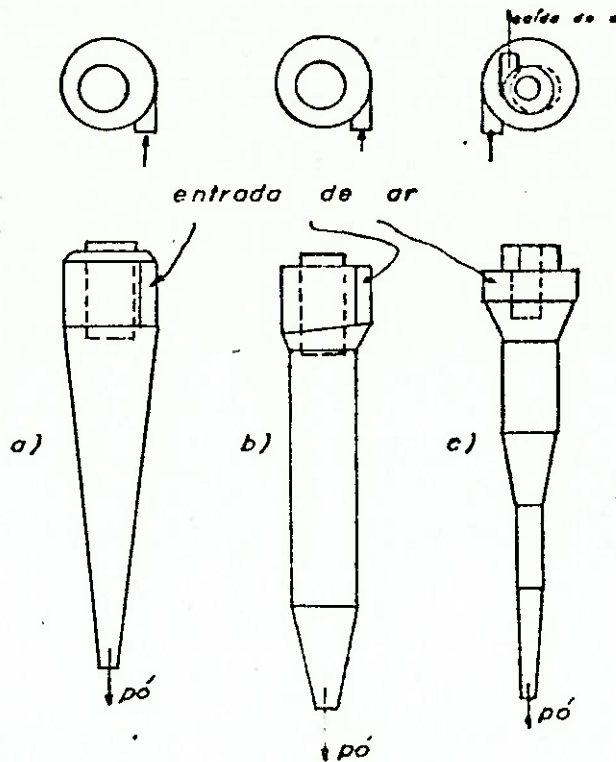


fig. IV.15 ciclones de pequeno diâmetro

5.1.3. CICLONE MINIATURA: obtêm-se eficiências elevadas se o diâmetro não ultrapassar 500mm. Para a separação ser máxima, o interior do ciclone tem que ser bem polido, não devendo haver nenhuma irregularidade que perturbe o movimento do ar. Devido à sua pequena capacidade os ciclones miniatura são instalados em grupos de 4 a 20 alimentados por um mesmo duto.

5.1.4 CICLONE ASSOCIADO COM VENTILADOR: o rotor da fig. IV. 16 imprime um movimento rotativo às partículas; ao mesmo tempo, devido ao fato de as pás não serem paralelas ao eixo, as partículas são lançadas na periferia, na face do rotor onde se prende o eixo.

Na voluta saem o ar de um lado e o pó (mais ar) do outro. A eficiência de separação é elevada para partículas superiores a 10 e 30μ .

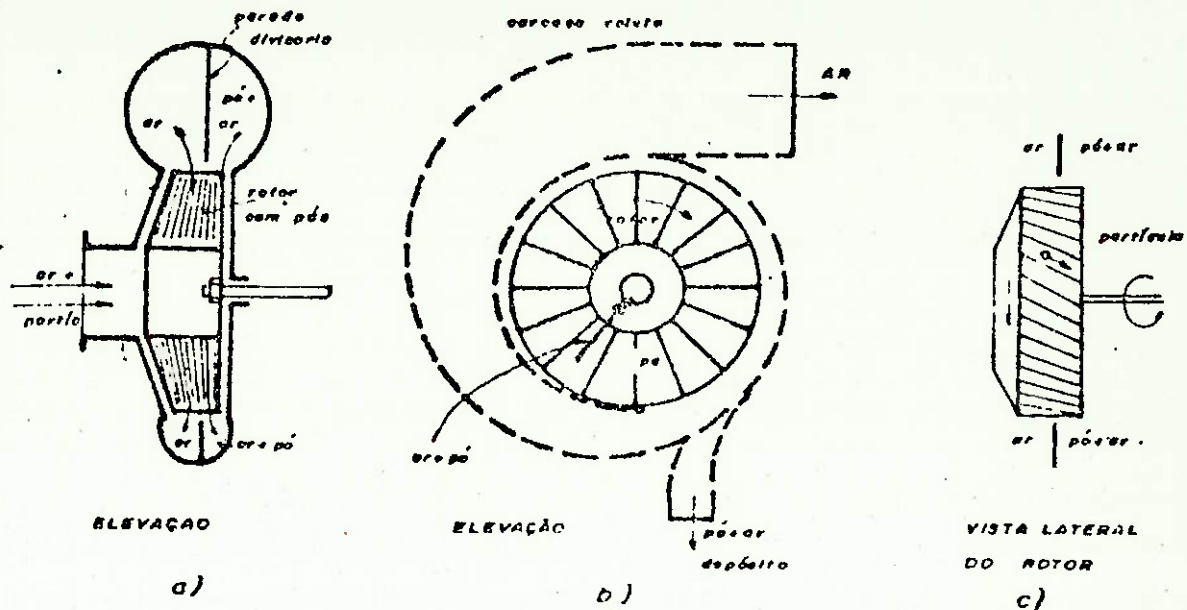


fig. IV.16 ciclone associado com ventilador

5.2. FILTROS DE PÓ: um dos assuntos mais importantes em transporte pneumático é a filtração de pó.

Os filtros de pó são necessários sempre que o ar tenha que ser descarregado de um sistema de transportes de material em pó (para recuperá-lo ou controlá-lo). O tamanho pode variar de filtros com silo-vent pequenos até filtros grandes multicompartimentados.

Todas as filtrações de pó em serviços de transporte pneumático é realizado da seguinte forma: o ar de transporte e o pó passam através do tecido filtrante, em forma de mangas (fig. IV.17) ou de sacos (fig. IV.18). Assim que o ar passa através do tecido o pó é retido na superfície formando um bolo que funciona como próprio meio filtrante. Para reduzir a resistência do ar de tal modo que não prejudique a taxa de transporte, o bolo deve ser removido periodicamente através de vibrações ou fluxo de ar contrário provocando a sua queda em um compartimento inferior. O método de limpeza do tecido representa a diferença de fabricação dos filtros. Quanto maior a área filtrante para uma dada carga de pó em um tipo específico de filtro mais tempo será necessário para formar um bolo que afete o escoamento.

A velocidade do ar através do tecido é geralmente menor que 13m/min. e frequentemente desce a 3m/min. Os valores são escolhidos de modo que a perda de carga varie de 50mm água até 125mm água entre o início e fim da limpeza.

Os filtros de pano são limitados para os casos em que o ar é seco o suficiente para evitar compensação ou umidade sobre o pano. As temperaturas máximas permitidas são:

- para pano de algodão - 80 C
- para pano de lã - 90 C

Para temperaturas maiores podem ser usados tecidos sintéticos inclusive nylon, orlon, malha de vidro ou malha fina metálica.

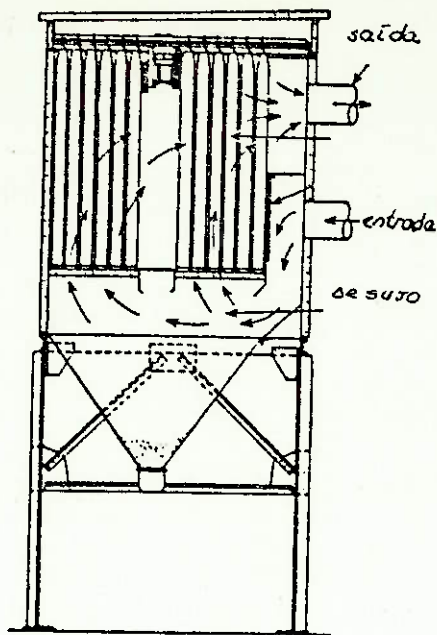


fig. IV.17 filtro de manga

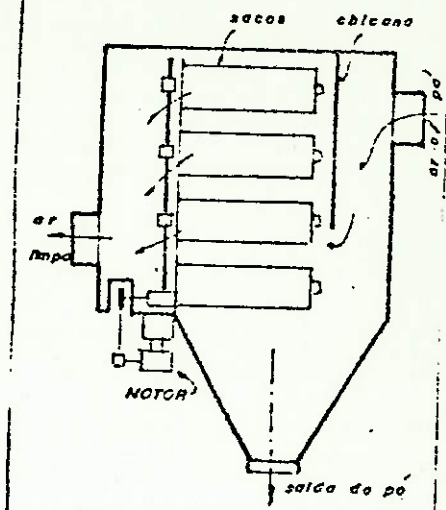


fig. IV.18 filtro de pó tipo manga

5.2.1. MÉTODOS DE LIMPEZA DOS FILTROS:

- **PARADA DA CIRCULAÇÃO DE AR E SACUDIMENTO MECÂNICO:** A limpeza é geralmente realizada de 4 em 4 minutos. Os filtros podem ser: (1) tipo saco, montado sobre um espaçador de metal com uma extremidade presa a uma grade vibratória (fig. IV.18) e a outra volta para a entrada de ar; (2) tipo manga, com a extremidade superior fixada a uma barra vibratória (fig. IV.17) e a extremidade inferior aberta para a entrada de ar e pó. O ciclo de limpeza pode ser iniciado por: (a) um temporizador para um período específico de limpeza; (b) um sensor de pressão diferencial; (c) um botão de parada manual conectada a um relé temporizador. Desse modo o exaustor para permitindo que a pressão interna atinja a pressão atmosférica e o motor vibrador opera por um dado intervalo de tempo. Após a limpeza, a operação do coletor de pó pode ser restabelecido automaticamente ou manualmente, dependendo do tipo de serviço.

- **SACUDIMENTO DO PANO E INTRODUÇÃO DE AR EXTERNO EM SENTIDO CONTRÁRIO:** este método pode ser utilizado nos filtros descritos anteriormente, no entanto, para serviços contínuos os elementos filtrantes devem ser distribuídos entre dois ou mais compartimentos e o exaustor deve permanecer em funcionamento durante o ciclo de limpeza. Cada compartimento tem seu próprio mecanismo de vibração e uma válvula de fechamento de ar contrário. Cada aparelho é equipado com uma válvula de fechamento ligada ao exaustor e uma válvula menor aberta diretamente para a atmosfera. Uma adequação dos temporizadores permite a limpeza dos compartimentos sucessivamente.

Durante a limpeza, o temporizador ativa o posicionador da válvula de fechamento para bloquear a saída de ar limpo para o ventilador e simultaneamente abre a válvula para entrada de ar externo. A secção do compartimento arrasta o ar através dos sacos em direção contrária. Chaves limitadores garantem que as válvulas estão posicionadas corretamente e inicia-se a vibração. Após o período de vibração o posicionador de ar contrário abre a válvula de saída do ar externo, reativando o compartimento. A fig. IV.19 mostra um filtro de 2 compartimentos usado para ventilar um silo que recebe material de um sistema de transporte pneumático durante a limpeza.

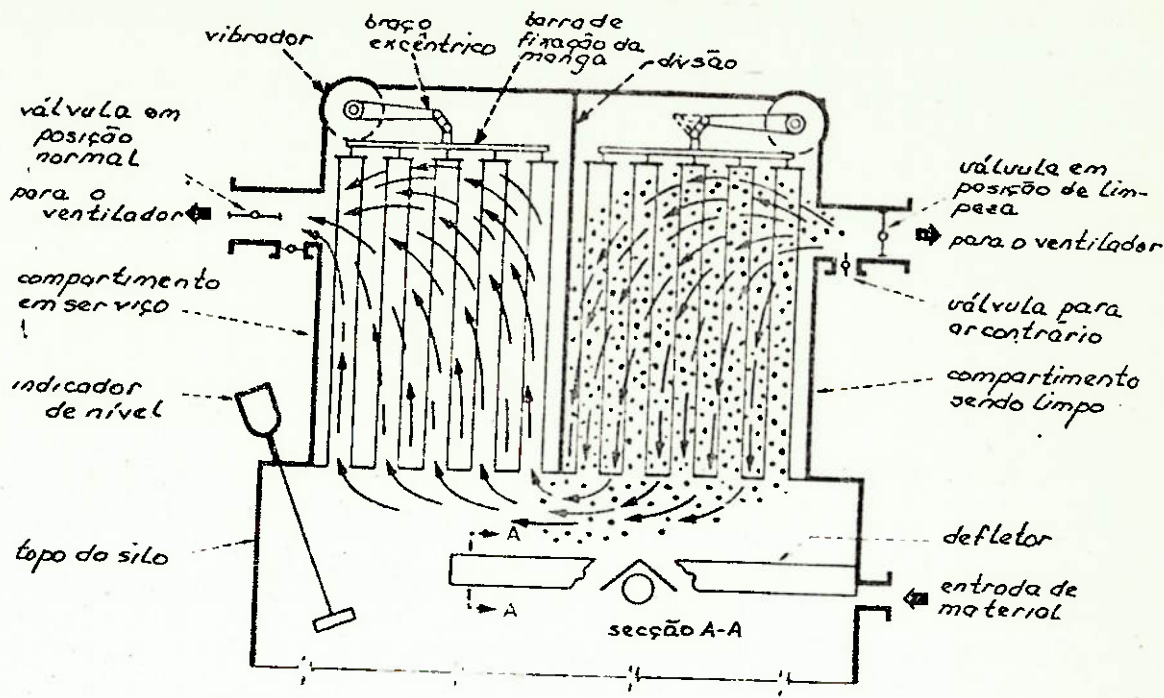


fig. IV.19 coletor de pó durante a limpeza por vibração e ar contrário

A fig. IV.20 mostra a variação de pressão no silo de sucção durante o ciclo de limpeza para este coletor.

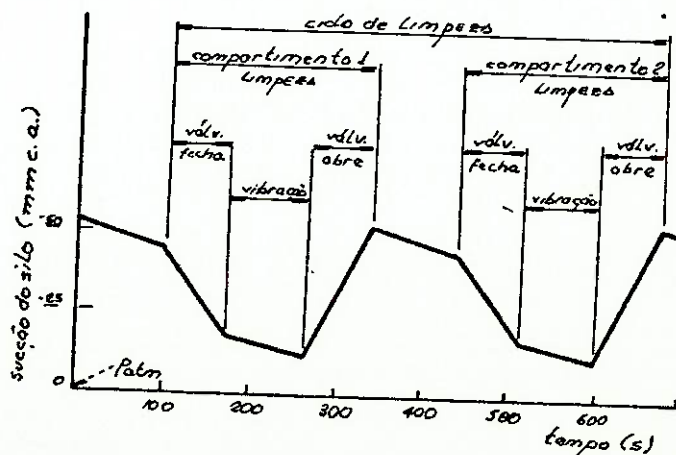


fig. IV.20 variação da pressão no silo durante a limpeza de um filtro com dois compartimentos

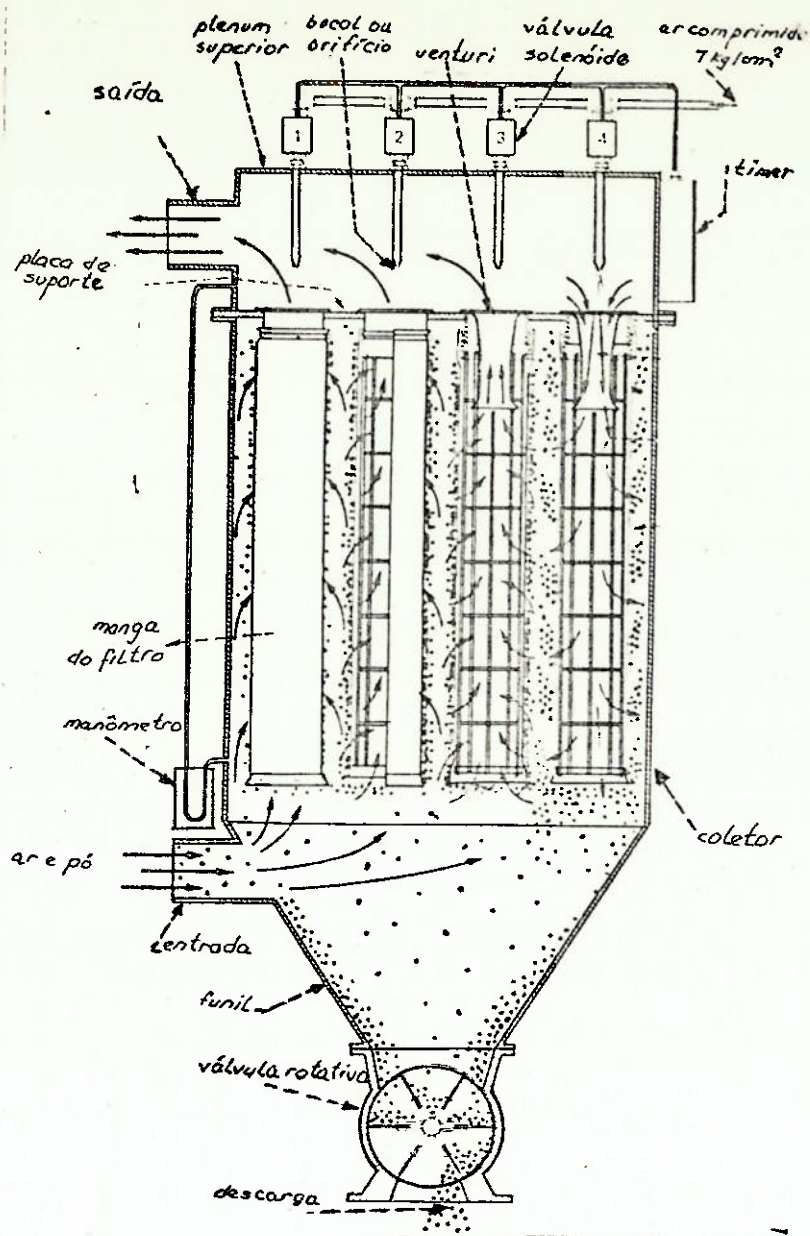


fig. IV. 21 filtro de pó com ar contrário a alta pressão

- LIMPEZA COM AR CONTRÁRIO: é usado para todo tipo de filtro. Existem muitos arranjos para criar o ar contrário (para serviço contínuo): (1) um bocal de ar comprimido na descarga de ar limpo de cada saco (ou manga) injeta ar a alta pressão em direção contrária ao escoamento normal do ar em pulsos de curta duração (1/10 a 1/25 de segundo). Os pulsos são controlados por temporizadores externos que operam válvulas solenóides para suprimento de ar especial (ver fig. IV.22). (2) uma câmara movida a motor recebendo ar de um compressor separado, entrega ar contrário aos sacos ou mangas do filtro. O "plenum" gira e sopra ar contrário na extremidade de descarga de ar limpo de cada saco (fig. IV.22 e IV.23

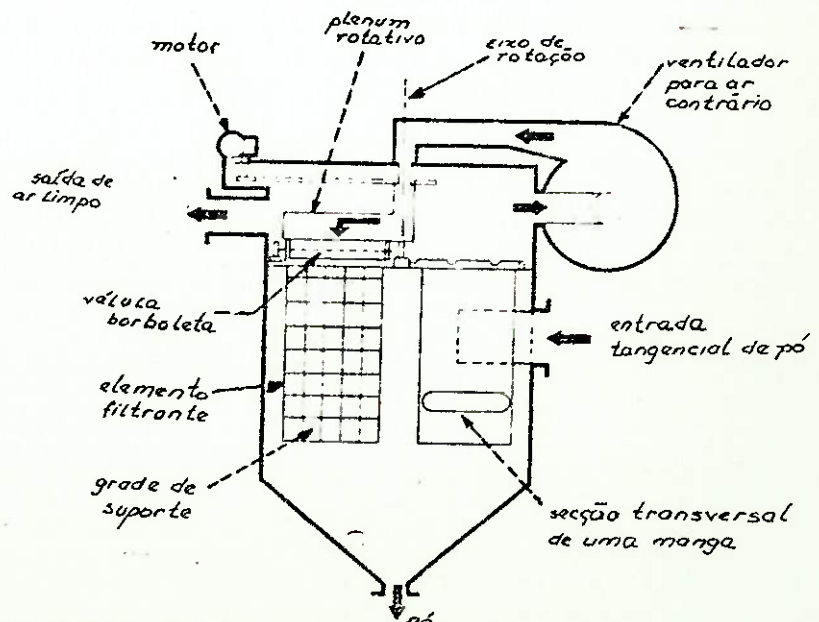
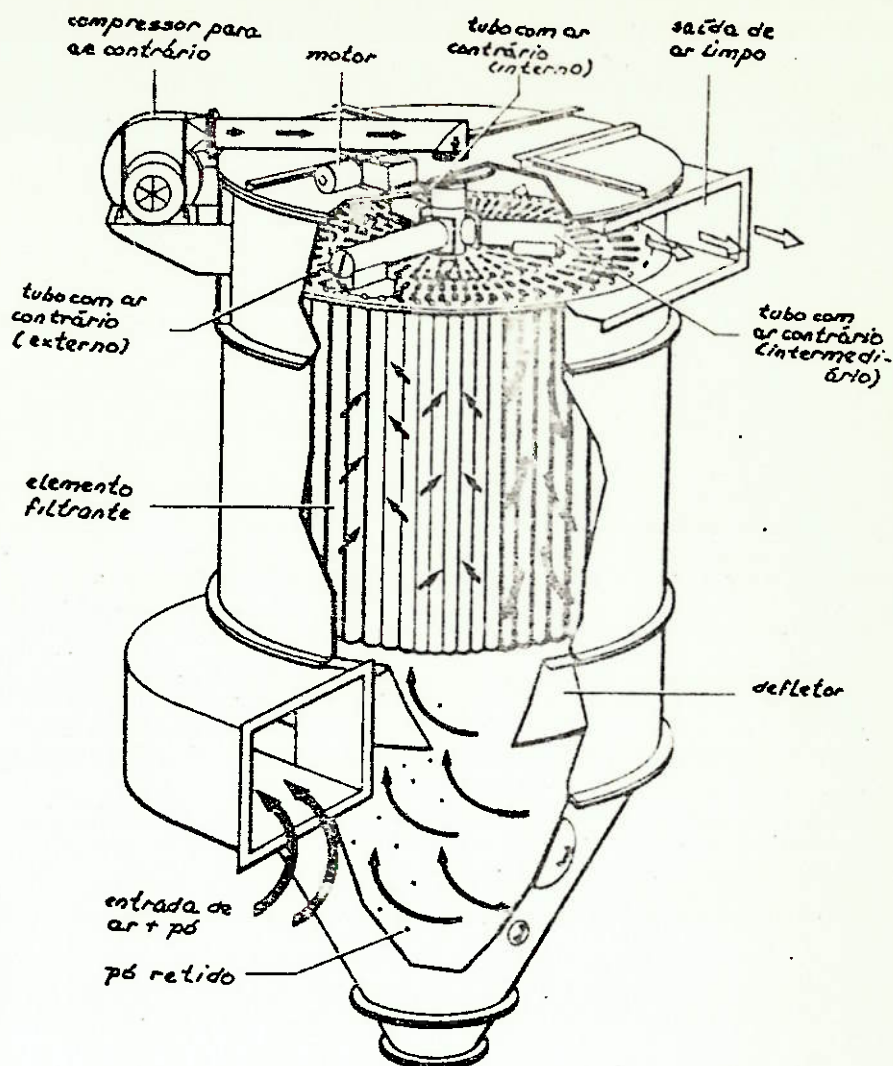


fig. IV.22 filtro de pó com ar contrário a baixa pressão

fig. IV.23 filtro de pó com ar contrário a baixa pressão com "ple-num" rotativo



5.2.2. FILTROS MULTICOMPARTIMENTADOS: Na aplicação de um filtro multicompartimentado, a área total da camisa selecionada para uma instalação específica deve ser aumentada prevendo vazamentos de um compartimento durante a limpeza. Se um filtro de pó de 2 compartimentos é colocado em serviço contínuo, a queda de pressão no filtro durante a limpeza de um compartimento é maior que o dobro já que o ar total e sua carga de pó deve passar através do segundo compartimento, tendo somente meia área de tecido filtrante, e às válvulas e dutos a ele associado. A queda de pressão varia diretamente com o fluxo de ar (ver fig. IV.20).

6. RESERVATÓRIOS DE ESTOCAGEM

6.1. FATORES PARA SELEÇÃO DE UM RESERVATÓRIO

Antes de selecionar um reservatório de estocagem, devem ser dados todos os fatores de estocagem e características do material que podem afetar suas propriedades e escoabilidades durante a estocagem. Especialmente importantes são os fatores de estocagem que afetam a escoabilidade tais como: absorção de umidade, compressão do material em estocagem, efeito de vibrações externas, efeitos de mudanças da temperatura e umidade. Os fatores que afetam a escoabilidade do material quando descarregado do reservatório são: a pressão lateral do material nas paredes do reservatório, o coeficiente de atrito das partículas contra partículas adjacentes e parede lateral. Estas informações podem ser obtidas através de ensaios ou de

fornecedores.

6.2. RESERVATÓRIOS CILÍNDRICOS:

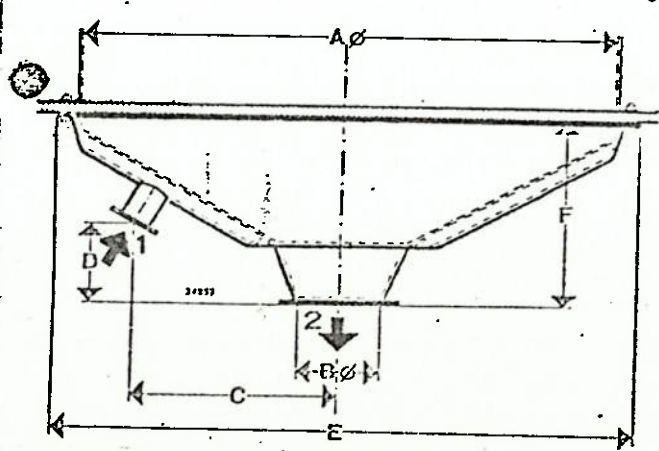
Reservatórios cilíndricos com o fundo em forma de cone e descarga por gravidade são mais comumente usados para materiais transportados pneumaticamente, apesar da tendência de alguns materiais transbordar ou grudar. Este tipo de reservatório tem baixo custo, pode ser obtido em diâmetros e alturas "standard" para ser adaptado em qualquer local.

Esses reservatórios podem ser adaptados com indutores de escoamento para permitir descarga contínua; pode ter seu funil modificado para adaptar-se a qualquer condição de descarga; pode ser obtido com revestimento para evitar corrosão. Formas especiais de reservatórios devem ser consideradas somente onde espaço e pé-direito são limitados.

Independente da forma do reservatório, os meios para garantir o escoamento para a conexão de descarga devem ser analisados e selecionados para se adaptar às características do material. A inclinação das paredes dever ser a máxima possível, nunca menor que o ângulo de deslizamento do material. Ângulos muito inclinados aumentam a altura do reservatório e podem limitar o espaço para a instalação de alimentadores de descarga (válvulas rotativas, por exemplo).

INDUTORES DE ESCOAMENTO: os tipos de indutores de escoamento usados e sua locação devem ser selecionados para se adaptar às características do material estocado e à configuração do reservatório.

Um indutor de escoamento é qualquer meio ou dispositivo usado para provocar o movimento relativo das partículas no reservatório. Vibradores elétricos ou pneumáticos podem ser usados. Eles podem ser arrançados para operar somente quando o material pode escoar livremente para a saída do reservatório já que a vibração sem escoamento livre provocará a compactação do material. Pode ser instalado um sistema de fluidização com ar a baixa pressão que deve ser projetado de tal modo que o ar injetado agite as partículas somente para induzir o escoamento e não torná-las incontroláveis. (ver figura IV.24).



1. válvula para entrada de ar
2. saída do material

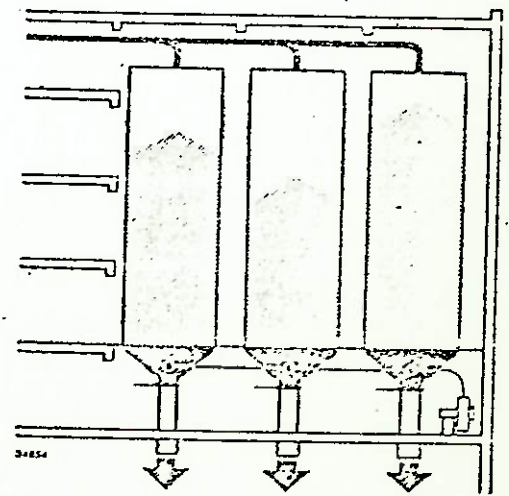


fig. IV.24 Fundo de um tanque com elemento poroso de fluidização



6.3. RESERVATÓRIOS DE FUNDO ATIVO:

Quando materiais com características não comuns são usados e nenhum tipo de indutor é eficaz o reservatório pode ser construído com um fundo ativo. Este é em forma de um ou mais transportadores parafusos arranjados para arrastar o material, ou então são dispositivos patenteados, como os os silos com fundo vibratório.

6.3.1. RESERVATÓRIO COM FUNDO VIBRATÓRIO: um tipo de reservatório com fundo vibratório que tem sido usado com sucesso no transporte de material "especial" consiste de um funil adaptado com um prato defletor centrado, acima da saída, de tal modo que o material passa através da carcaça e o prato. O bocal de descarga é conectada ao equipamento receptor com conexão flexível para isomento. A agitação é estabelecida através de um sistema de alavancas acionado por um motor. (figura IV.25).

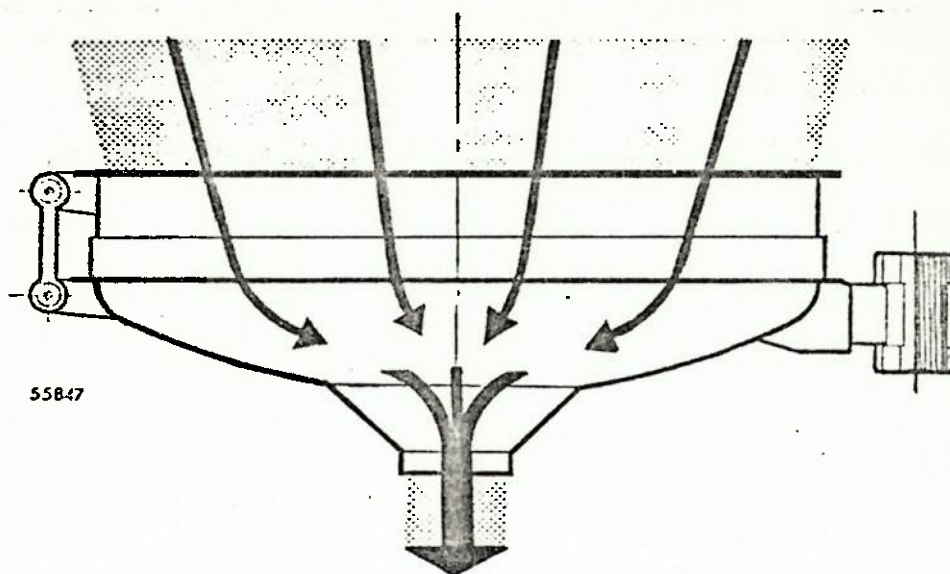


fig. IV.25 Reservatório com fundo vibratório

6.3.2. RESERVATÓRIO HORIZONTAL COM TRANSPORTADOR PARAFUSO:

Esses reservatórios tem o fundo em V adaptado com um transportador parafuso contínuo. Um defletor em V invertido é colocado após cada parafuso para descarregar o material estocado no eixo do parafuso e para obter uma alimentação lateral de material. O parafuso pode ser arranjado para uma descarga central, fora do centro ou com extremidade única ou dupla de descarga (fig. IV.26). Extremidade única de descarga reduz a capacidade de descarga do reservatório.

A extremidade de descarga de uma linha de transporte pneumático alimenta um reservatório de diversas maneiras dependendo da velocidade do material transportado e de suas características. Um bocal de entrada pode ser suficiente para encher todo o reservatório. Se não, a linha transportadora pode se estender ao longo da linha longitudinal do reservatório formando um duto de distribuição.

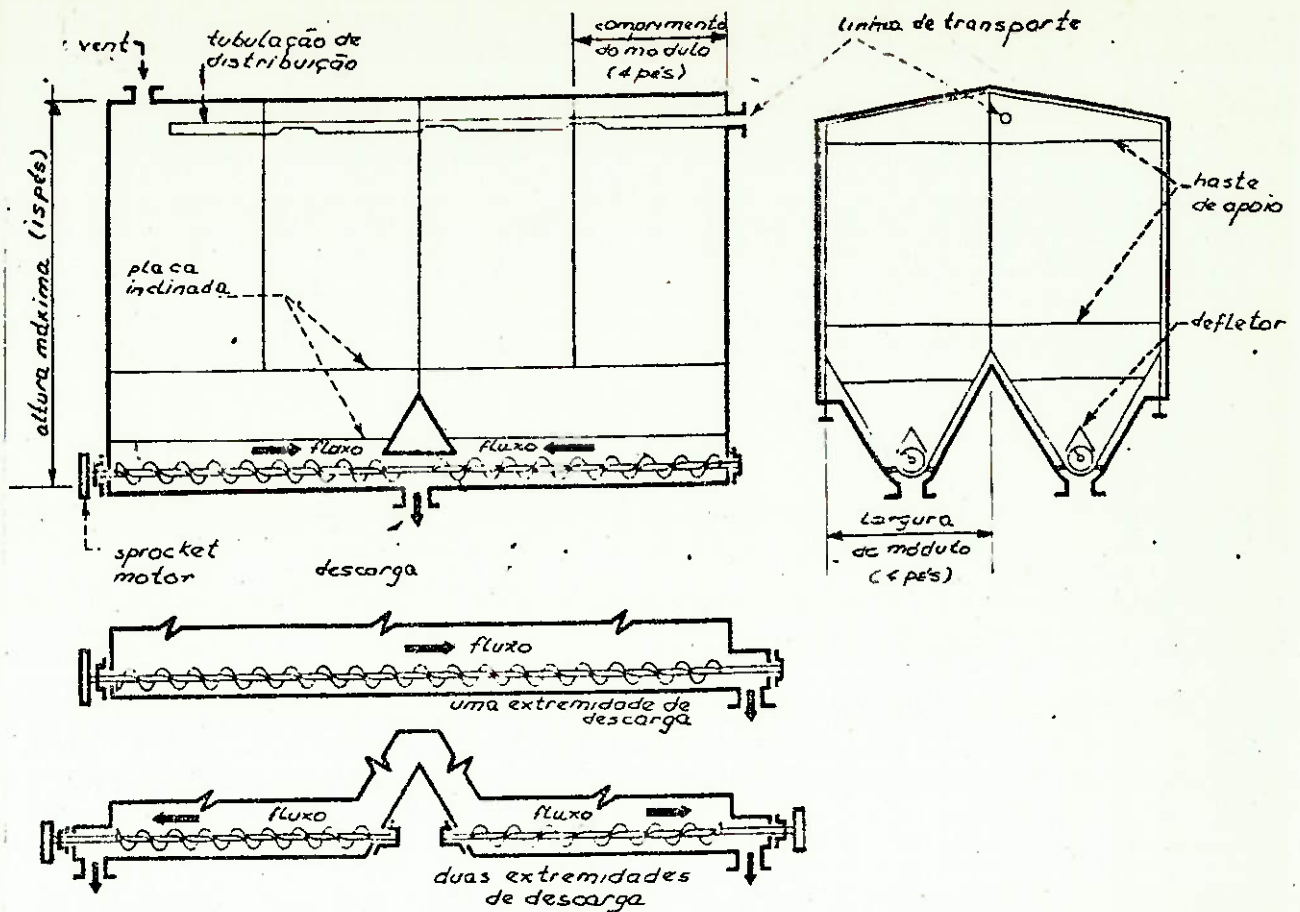


fig. IV.26 reservatório com parafuso e diversos pontos de descarga

7. CARROS VAGÕES

Carros vagões são adequados para o transporte de muitos materiais que utilizam o transporte pneumático. Alguns carros são especificamente projetados para descarga por gravidade mas alguns podem ser adaptados com conexões para descarregar material em um sistema de transporte pneumático; alguns são projetados para fazer parte de um sistema pneumático (tanque de alimentação); e alguns são projetados de tal modo que tornam-se sistemas completos de transporte pneumático somente necessitando de um alimentador de ar. A seguir será dada uma breve descrição dos tipos de carros vagões existentes.

7.1. CARRO TIPO "BOX" STANDARD:

A aplicação do carro tipo "box" é muito pequena, mas tem sido usada desde a muito tempo para transportar grãos. O material é descarregado no carro pelo topo. À medida que vai se formando a camada de material, placas são colocadas até que o material atinge o topo. Para a descarga a sequência é oposta: um bocal de sucção adaptado a uma mangueira é colocado no carro, à medida que o nível diminui as placas são retiradas.

Este carro é usado para materiais, como o sal, que não podem ser estocados em reservatórios comuns pois se agregam formando pelotas. Seu custo é muito baixo em relação aos outros tipos de carros.

7.2. CARRO TIPO SILO COM FUNDO CÔNICO:

Este tipo de carro era usado somente para transporte de cimento e outros materiais pulverizados afetados por chuvas ou mudanças climáticas. É projetado para descarregar por gravidade e al-

gumas vezes com auxílio de um vibrador adaptado no fundo do silo. O ponto de descarga se acha num ponto de difícil acesso: embaixo do vagão, próximo dos trilhos.

Este tipo de carro é satisfatório para o transporte de materiais sem pó.

7.3. CARRO RECIPIENTE;

Consiste de cinco ou seis tanques de pressão com ar ativado montados em um vagão. Cada recipiente é um tanque de sopro de 7m³ utilizando ar a alta pressão para ativar as partículas e soprá-las para uma linha de transporte. O tanque é alimentado pelo topo por gravidade. É descarregado adaptando-se um tubo para alimentação de ar e um tubo de descarga conectado ao sistema de transporte.

Este tipo de carro é utilizado para transportar materiais caros ou de rigoroso controle de qualidade.

7.4. CARROS TANQUES PRESSURIZADOS COMPARTIMENTADOS

Este tipo de carro tem 3 ou 4 tanques cilíndricos de pressão com um fundo cônico aerado montados permanentemente em um vagão. Cada tanque tem um volume de 22,5m³ e usam ar comprimido externo para ativar as partículas.

A pressão de operação é aproximadamente 3 kgf/cm², suficientemente alto para descarregar o material em qualquer ponto da instalação. Pode transportar qualquer material transportável pneumaticamente, incluindo materiais abrasivos (fig. IV.27).

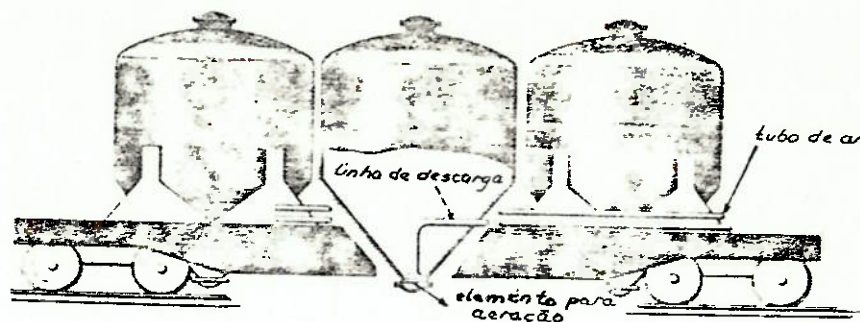


fig. IV.27 Carro-vagão com tanques pressurizados compartimentados

7.5. CARRO-SILO A ARATIVADO COM DESCARGA POR GRAVIDADE:

Este tipo de carro serve para transportar materiais fluidizáveis, secos granulados ou pulverizados transportáveis pneumaticamente. Estes carros são adequados em 2 tamanhos: 70m³ e 130m³. O menor é mais usado (fig. IV.28).

Consiste de um único compartimento com 4 silos que descarregam em 2 pontos.

Um tecido que deixa o ar atravessá-lo forma a saída dos silos e opera segundo o princípio de que o material aerado escoar procurando o seu ângulo de deposição. Este ângulo é bem diferente do ângulo de deposição de uma partícula não fluidizada. A partícula, não achando o seu ângulo de deposição continua a escoar (desde que o ângulo de inclinação do fundo seja maior que o ângulo de deposição).

A taxa de fluxo de material desse carro é limitado somente pela capacidade de descarga do sistema do qual é conectado. A utilização desse carro elimina a necessidade do operador entrar em seu interior para procurar materiais não descarregados, pois sua descar-

ga é uniforme e contínua, exceto para limpeza de válvulas e conexões

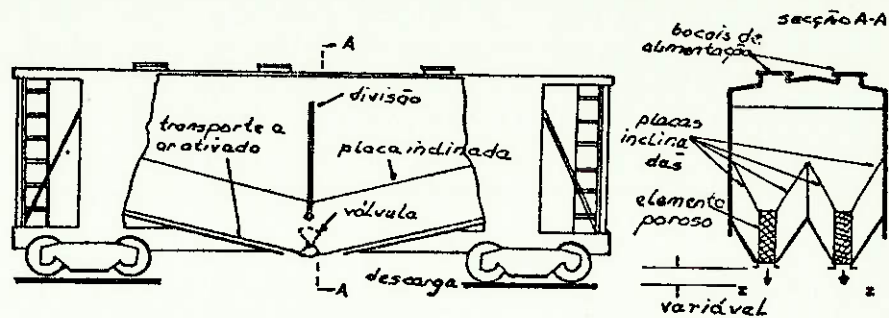


fig. IV.28 vista de um carro-vagão com silo a ar ativado com descarga por gravidade

7.6. CARROS-SILOS MULTICOMPARTIMENTADOS COM DESCARGA À VÁCUO:

Este tipo carro vagão foi projetado especialmente para transportar grãos secos e material pulverizados transportáveis pneumaticamente. Os compartimentos são fabricados com paredes verticais, fundo dos silos bem inclinados (fig. IV.29).

As saídas são equipadas com tubos de descarga em vácuo conectados em mangueiras a vácuo.

A taxa de fluxo de material para o tubo de descarga é controlada por um tubo ou gaveta rotativo na descarga de material ou por uma gaveta deslizante, dependendo da fabricação do carro (fig. IV.30).

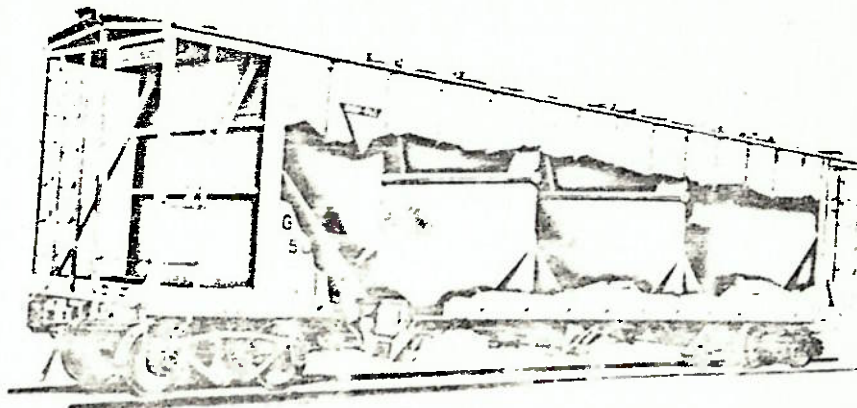


fig. IV.29 carro-silo multicompartimentado com descarga e vácuo

Os carros são fabricados em 5 tamanhos que variam de $80m^3$ para materiais com densidade igual a 1100 a 1600 kg/m^3 para $160m^3$ para materiais com densidade menores que 600kg/m^3 .

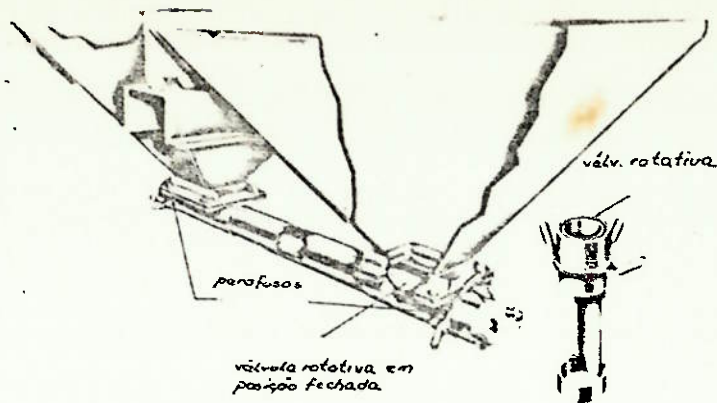


fig. IV.30 válvula rotativa para descarga pneumática a vácuo

7.7. CARRO-SILO COM DESCARGA FLUIDIZADA E PRESSÃO DIFERENCIAL

Este tipo de carro é feito em 4 tamanhos: $80m^3$, $130m^3$, $150m^3$ e $160m^3$ em volume. É equipado com placas porosas de aço inoxidável em cada funil de descarga. Cada silo é adaptado com um tubo de suprimento de ar com uma válvula de retenção e conectadas à linha de descarga onde o ar é injetado para transportar o produto.

Este tipo de carro é praticamente um sistema de transporte pneumático e ar externo é requerido. É ideal para transferência do material de um carro vagão para um caminhão (fig. IV.31).

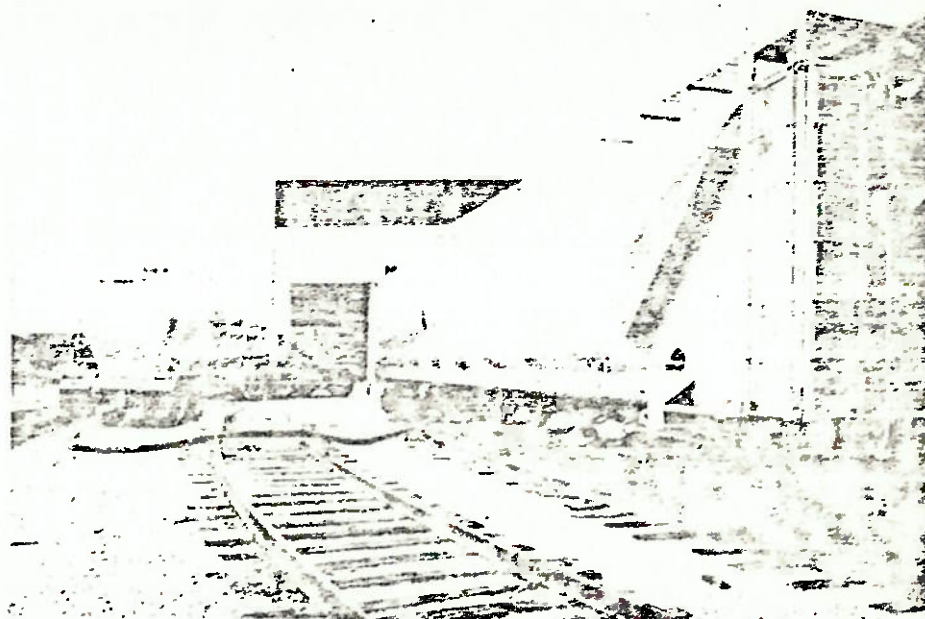


fig. IV.31 transferência do produto de um carro vagão com pressão diferencial para um caminhão

8. CAMINHÕES DE TRANSPORTE

Os caminhões de transporte são basicamente iguais aos carros vagões.

8.1. FURGÕES COM SILOS DE DESCARGA POR GRAVIDADE A AR ATIVADO

Este tipo de caminhão é construído do mesmo modo que o carro vagão, no entanto sua capacidade é menor devido às limitações de peso. (fig. IV.32).

É equipado com um soprador de ar e dois alimentadores rotativos acionado por um motor.

Variações desse tipo de projeto omitem os alimentadores rotativos e pressuriza o tanque para uma descarga direta na linha de transporte.

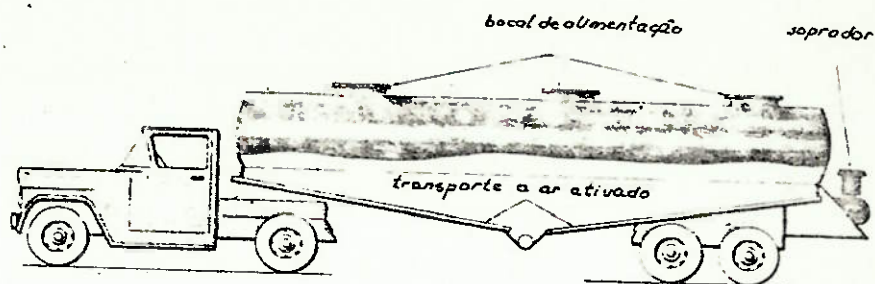


fig. IV.32 furgão com silos de descarga por gravidade e ar ativado

8.2. CAMINHÃO COM TANQUE DE PRESSÃO DIFERENCIAL E DECLIVE FLUIDIZADO:

Este tipo de caminhão é semelhante ao carro vagão mas também é de menor capacidade e altura. Pode descarregar por gravidade com auxílio de ar ativado em cada "colchão" adaptado a cada silo (fig. IV.33).

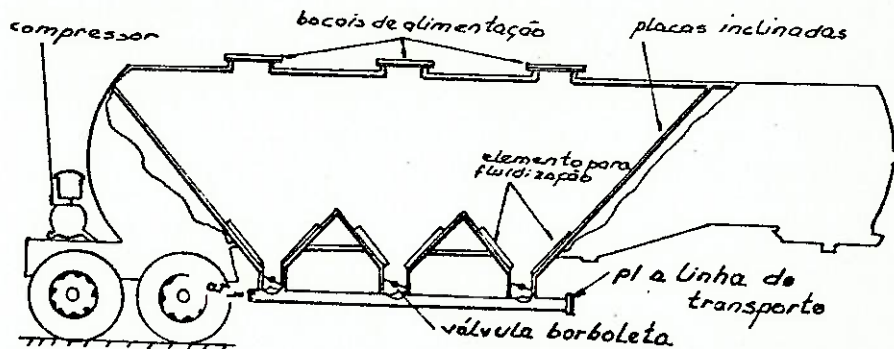


fig. IV.33 caminhão com tanque de pressão diferencial e declive fluidizado

- C A P Í T U L O V -

EQUIPAMENTOS DE TRANSPORTE

Em um sistema de transporte pneumático existem alguns equipamentos de transporte usuais, bem como tubulações e conexões. Entre os equipamentos existem:

- impulsores de ar (compressores, ventiladores, sopradores)
- válvulas de desvio

Na tubulação temos:

- dutos de transporte
- conexões e curvas

1. TUBULAÇÃO DE TRANSPORTE:

A tubulação de transporte pode ser fabricada de diversos materiais tais como: aço carbono, aço inoxidável, monel, alumínio e plástico. O material e espessura de parede são selecionados para adaptar às características e propriedades do material a ser transportado e de vez em quando baseando-se no custo.

Muitos materiais inertes podem ser transportados em tubos de aço carbono sem danificar o tubo ou o material transportado. Quando um material quimicamente ativo é transportado, materiais resistentes à corrosão tais como, aço inoxidável ou monel são utilizados. Quando a contaminação do transportado não pode ocorrer (por fragmentos do metal do tubo) é usado aço inoxidável.

Tamanhos "standard" de tubos são usados em diversas espessuras de parede, de alumínio ou de aço carbono. Tubos de aço carbono, schedule 40 são usados em todos os tamanhos de tubos, mas tubos mais finos com schedule 10 ou 20 podem ser selecionados para diminuir o custo.

CURVAS E CONEXÕES: toda mudança na direção é feita com uma curva tendo raio de 6 a 12 vezes o diâmetro nominal do tubo, dependendo da abrasividade ou característica de compactação do material transportado. Quanto maior o raio da curva, maior é a resistência à abrasão, menor é a possibilidade de compactação na curva e menor é a perda de carga na curva. Alguns materiais altamente abrasivos podem requerer reforço especial de sobremetal na curva. O reforço é normalmente na saída do raio da curva onde a corrosão é concentrada.

Alguns materiais podem entupir uma tubulação e a linha tem que ser ventilada com ar comprimido. Conexões para sopro de ar a alta pressão podem ser instaladas em locais estratégicos em uma tubulação. Estas conexões podem ser feitas com uma união de tubos e uma válvula de retenção localizada o mais próximo possível da linha de transporte para evitar que o pó entupa a conexão de ar. Para evitar que o ar a alta pressão escape através de alimentadores rotativos ou abra linhas fechadas, um bloqueio de linha pode ser instalado em uma linha de transporte próximo ao alimentador.

Bloqueios de linhas são essencialmente flanges pivotados entre flanges fixos forçados o suficiente para permitir que os flanges móveis possam se posicionar, ora abrindo, ora fechando o duto.

Em serviço, a extremidade vazada da flange é alinhada com a tubulação e os parafusos são apertados. Quando usado para soprar a linha, os parafusos abrem o espaço entre as flanges fixas de tal modo que o lado de bloqueio da flange possa ser alinhada à linha de transporte (figura V.1).

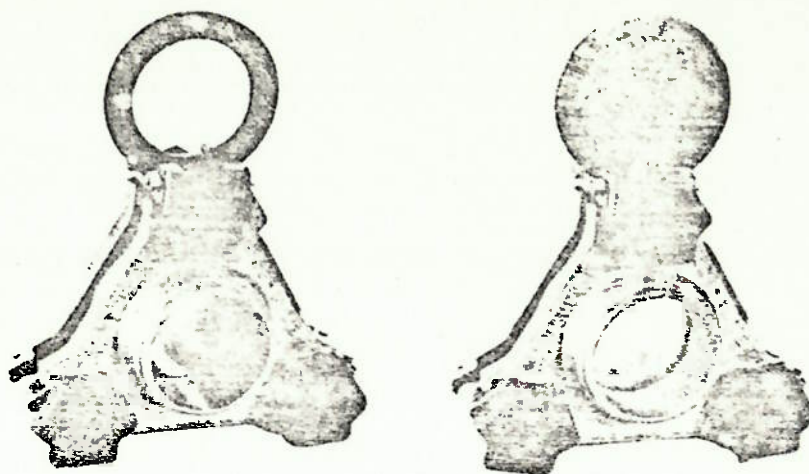


fig. V. 1 Bloqueio para limpeza

2. IMPULSORES DE AR

O tipo de impulsor de ar é selecionado para o transporte pneumático em função da capacidade e pressão requerida para transportar o material em uma tubulação a uma dada taxa de concentração.

Os sistemas impulsores de ar comumente usados numa instalação de transporte pneumático são:

- soprador de deslocamento positivo com motor elétrico, transmissão por correia V, filtro de entrada, silenciadores de entrada e descarga, válvula de alívio de pressão ou vácuo, válvula de retenção indicadores de pressão, base para montar a unidade.

- soprador centrífugo com motor elétrico, transmissão por correia V.

- compressor alternativo com motor elétrico, transmissão por correia V ou plana, receptor de ar com uma chave de controle ligada-desliga no seu topo, resfriador interno para uma unidade multiestagiada, resfriador (after-cooler), válvula de alívio de pressão, indicadores de pressão, dreno, lubrificação mecânica.

Geralmente os motores são superdimensionados para:

- aumentar a velocidade do ar para garantir que o transporte ocorrerá sem deposição de material;

- para ter uma potência de reserva para soprar linhas de transporte entupidas.

Sistemas, onde o material entra na corrente de ar, requerem grande volume de ar a pressões relativamente baixas, devido à alta taxa ar-material usada. Estes sistemas operando com pressão positiva ou negativa são geralmente fornecidos com sopradores de

de deslocamento positivo para alta rotação, ou sopradores centrífugos, dependendo da preferência do cliente. Podem ser obtidos em diversos tamanhos e são movidos por correia para operar a qualquer velocidade, dependendo das características de transporte. Os sopradores de deslocamento positivo são mais utilizados pois pode desenvolver pressões altas (acima de 1,3 atmosferas) e capacidade suficiente para mover o material quando a linha de transporte entope. As características de um soprador centrífugo são tais que a vazão de ar diminui rapidamente com o aumento da resistência do sistema (ver figura V. 2).

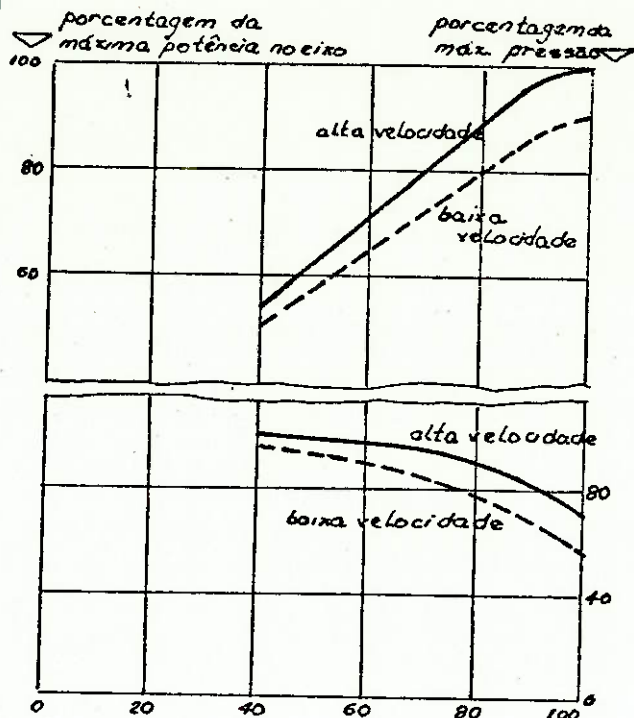


fig. V. 2 Curva de performance para um soprador centrífugo

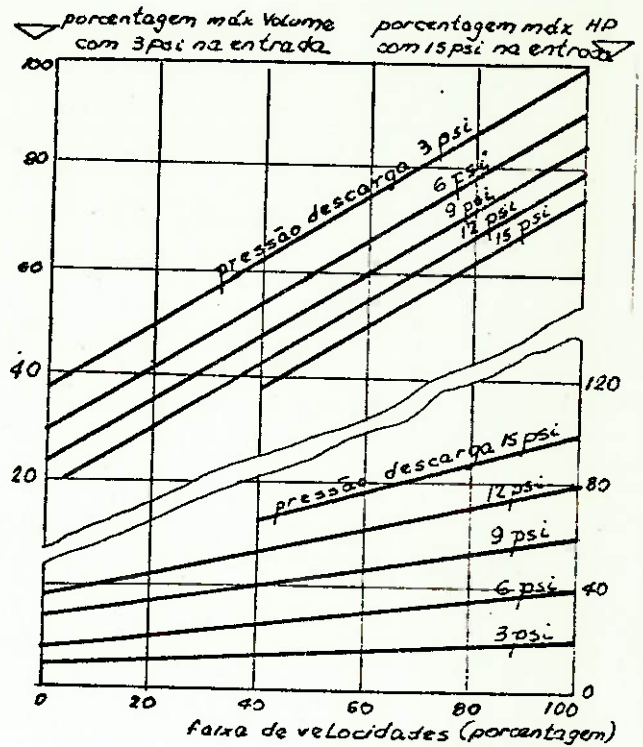


fig. V.3 Curva de performance de de um soprador de deslocamento positivo.

Sistemas onde o ar entra na massa de material, são geralmente fornecidos com sopradores de deslocamento positivo devido ao baixo fluxo de ar, necessidade de média pressão para serviços de tanques pressurizados e sistemas de sopro a baixa pressão. Entretanto, para baixo fluxo de ar mas alta pressão para os tanques de sopro com baixa taxa de material é aconselhado o uso de um compressor de ar com movimento alternativo ou um compressor de palheta deslizante. Ambos requerem filtros de ar e óleo e um resfriador de água para o cilindro do compressor.

Na fig. V.3 são dadas as curvas de performance de um soprador de deslocamento positivo.

Sistemas, onde ar e material são simultaneamente misturados e a taxa de ar material é baixa, são fornecidos com 2 sopradores de deslocamento positivo em paralelo para serviço a pressão média (acima de 1,5 atm) com baixo fluxo de ar ou com compressores de palhetas deslizantes para baixo fluxo de ar e serviço a alta pressão (acima de 3 atm).

Os alimentadores parafuso para um sistema de mistura podem usar compressores alternativos ou de palheta deslizante.

2.1. SOPRADORES CENTRÍFUGOS:

Ventiladores centrífugos foram usados para transportes pneumáticos de lascas de madeira, algodão, pedaços de papel e ou materiais leves e macios. Estes materiais, na realidade, passam através de um ventilador para um tubo de transporte e é descarregado em um ciclone receptor.

O tipo de roda mais comum é constituído de pás retas radiais igualmente espaçadas. A roda tem dois discos laterais sendo que uma delas forma o suporte para o cubo da roda.

Estes tipos de sopradores e o antiquado método sistema de transporte associado a eles são ainda utilizados atualmente para transportar partículas pulverizadas e grânulos. Entretanto, sempre que possível, os materiais são transportados sem passar pelo ventilador.

A roda em movimento impõe velocidade para o ar que escoar através das pás, esta energia é convertida em energia potencial requerida para vencer a resistência do sistema (na carcaça do ventilador). A pressão desenvolvida no ventilador e o volume de ar transportado a um dada velocidade varia com a resistência do escoamento. A curva que nos dá esta relação é chamada de curva característica do ventilador. Associada a essa curva, para a mesma velocidade é feita uma curva a variação da potência com o volume de ar transportado. Estas curvas características aplicam somente para escoamento de ar através do soprador, não para escoamento de ar e material.

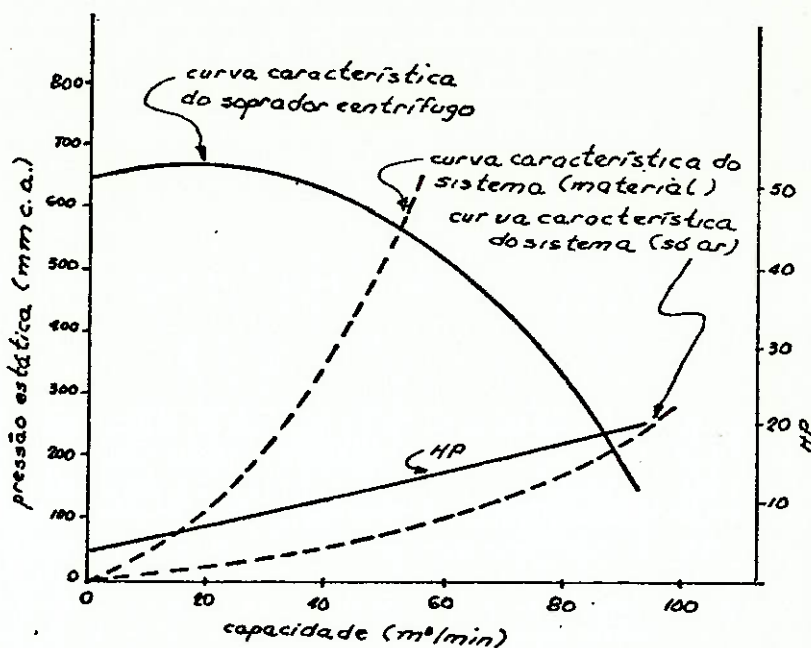


fig. V.4 curva característica de um soprador centrífugo e o efeito do sistema

A principal aplicação de sopradores centrífugos em transporte pneumático é em sistemas pequenos operando com alta taxa de ar-material, a pressão positiva ou negativa. Nestes sistemas, a possibilidade de ocorrer um entupimento na linha é remota. Um exemplo de aplicação de um ventilador centrífugo é mostrado na fig. V.5 para um sistema misto.

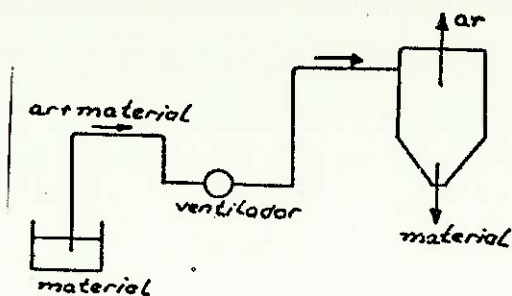


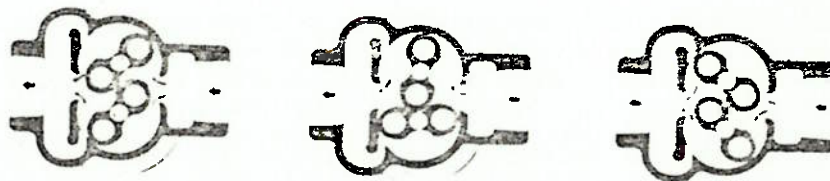
fig. V.5 exemplo de aplicação de um ventilador centrífugo

2.2. SOPRADORES DE DESLOCAMENTO POSITIVO:

O soprador de deslocamento positivo é essencialmente um equipamento de velocidade constante que descarrega um certo volume relativamente constante de ar em um faixa de pressão de descarga. A resistência do sistema ao qual será aplicado, determina a pressão de operação do soprador. O ar descarregado no sistema de transporte desenvolve uma pressão igual à resistência devido ao atrito. Adicionando material na corrente de ar aumenta a resistência, aumentando assim, a pressão de operação do soprador. O ar não pode ser estocado no receptor nem estrangulado na descarga; deve ser utilizado instantaneamente. Se for parar o escoamento de ar, o ventilador deve ser desligado ou deve ser aberta uma válvula de alívio. Em alguns casos o ar pode ser resfriado e recirculado para evitar excessos de partida do soprador.

Sopradores de deslocamento positivo têm dois rotores lobulados que giram "engrenados" com sentidos contrários em uma carcaça. O ar é alojado entre os lóbulos e descarregado a uma pressão relativamente alta. Os rotores não entram em contato um com o outro (mesmo na posição de maior aproximação existe um pequeno espaço entre eles). Um motor único ou um eixo com transmissão por correia V acionam os rotores sincronizados. As correias são mais utilizadas pois permitem mudanças de rotação.

Existem dois tipos básicos de rotores: os lóbulos em forma de uma "figura 8" (ver fig. V.6 e V.7) e o tipo mais recente (com



o ar de entrada (direita) é captado pelos impulsores. Simultaneamente ar (esquerda) está sendo descarregado.

quando o impulsor inferior passa entre as flanges, a pressão é igualada entre o ar captado e a área de descarga.

os impulsores deslocam o ar para área de descarga (esquerda).

fig. V.6 princípio de operação de um soprador de deslocamento positivo

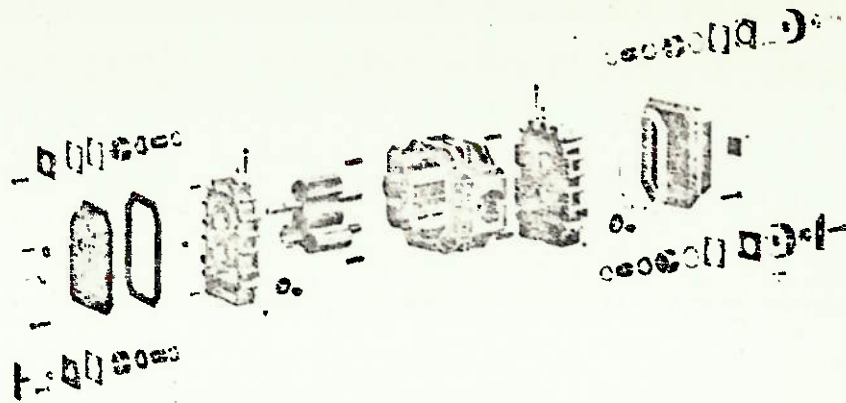


fig. V.7 vista explodida de um soprador de deslocamento positivo com lóbulos em "figura 8"

escoamento axial) que apresenta rotores lobulados espiralmente (fig. V.8).

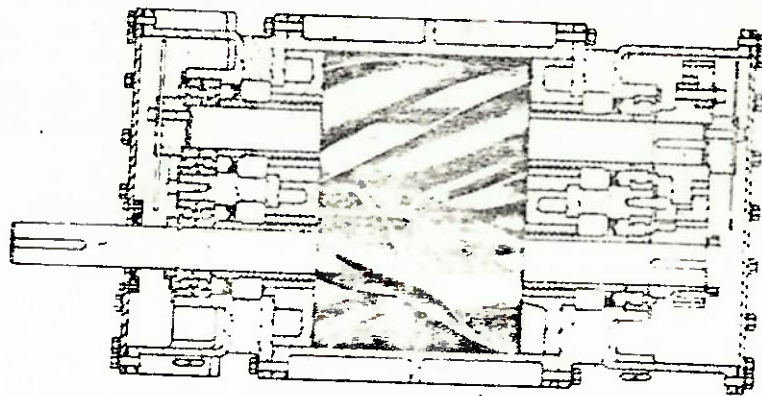


fig. V.8 soprador de deslocamento positivo com rotor lobulado espiralmente

A carcaça do soprador é geralmente de ferro fundido ou aço fundido projetada para resistir a pressões limitadas. Os fabricantes costumam dividir em três grupos: (1) de baixa pressão, até 0,4 atmosferas; (2) média pressão, até 0,7 atm e (3) alta pressão, até 1,1 ou 1,3 atm.

Sopradores grandes são fabricados com a carcaça horizontal e com os impulsores também no plano horizontal. Assim as conexões de entrada e saída são verticais exigindo uma fundação ou um apoio para a flange de baixo. Sopradores pequenos e médios são construídos com carcaças horizontais ou verticais.

Os sopradores de deslocamento provocam considerável barulho havendo portanto necessidade de utilizar silenciadores na entrada e saída do soprador.

Para proteger o soprador devem ser instalados alguns acessórios: (1) válvulas de alívio de pressão ou vácuo para proteger a carcaça (fig. V.9); (2) instalar uma válvula de retenção na linha de descarga em sistemas de pressão positiva colocando-a o mais próximo possível do ponto de entrada do material; (3) instalar um filtro de ar de baixa resistência na sucção em todo soprador de sistemas de pressão positiva ou negativa.

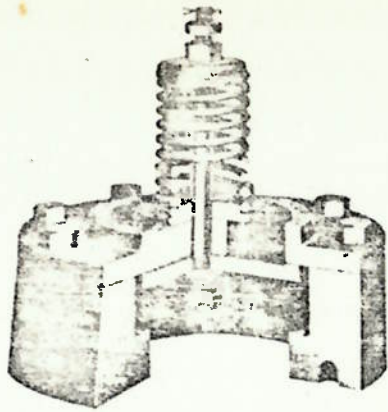
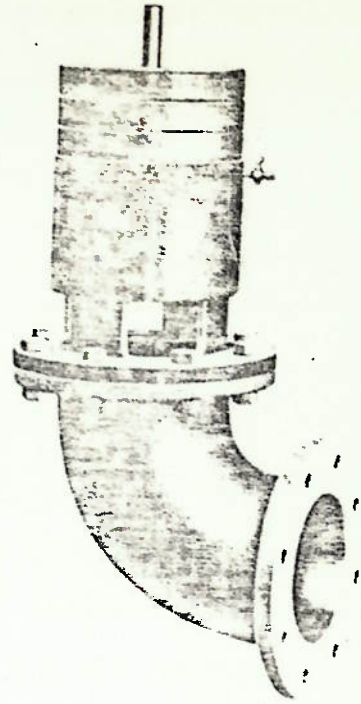


fig. V.9 válvulas de alívio de pressão para proteger o soprador



2.3. COMPRESSORES DE AR ALTERNATIVOS (fig. V.10)

O compressor alternativo é um equipamento cuja construção é muito conhecida, no entanto certas precauções devem ser tomadas quando aplicado em um sistema de transporte pneumático com "blow tank". A unidade deve ser isenta de óleo com anéis de pistão de teflon ou grafitado. Deve ser equipado com um receptor de ar emparelhado com o deslocamento do compressor. Um "after cooler" e um secador de ar são necessários para assegurar a não umidade do ar para transporte.

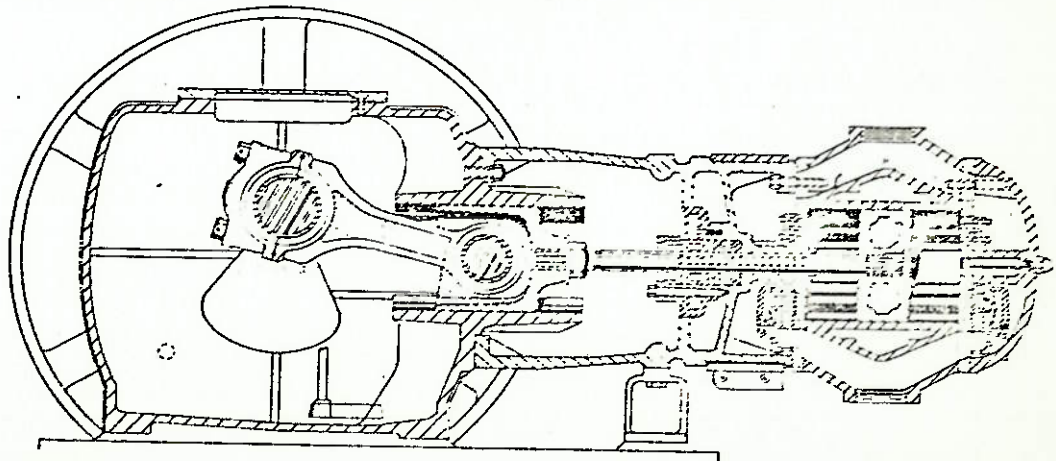


fig.V.10 compressor alternativo resfriado a água

A figura V.11 o ciclo completo de um compressor de ar ideal. P_1 e P_2 são as pressões na entrada e descarga respectivamente que são funções das condições externas de operação. O volume que não é comprimido na descarga V_c é conhecido como espaço nocivo (espaço destinado às válvulas). E é função do volume total do cilindro V_s .

Normalmente:

$$100. \frac{V_c}{V_s} \approx 2\% \quad \text{em compressões grandes}$$

$$100. \frac{V_c}{V_s} \approx 12\% \quad \text{em compressores pequenos}$$

O espaço nocivo reduz o volume de ar arrastado para o cilindro a cada ciclo. Os fatores que reduzem a quantidade de ar no cilindro são:

- perda de carga através das válvulas de entrada e descarga;
- aquecimento do ar devido às paredes quentes do cilindro;
- expansão do ar a alta pressão no espaço nocivo.

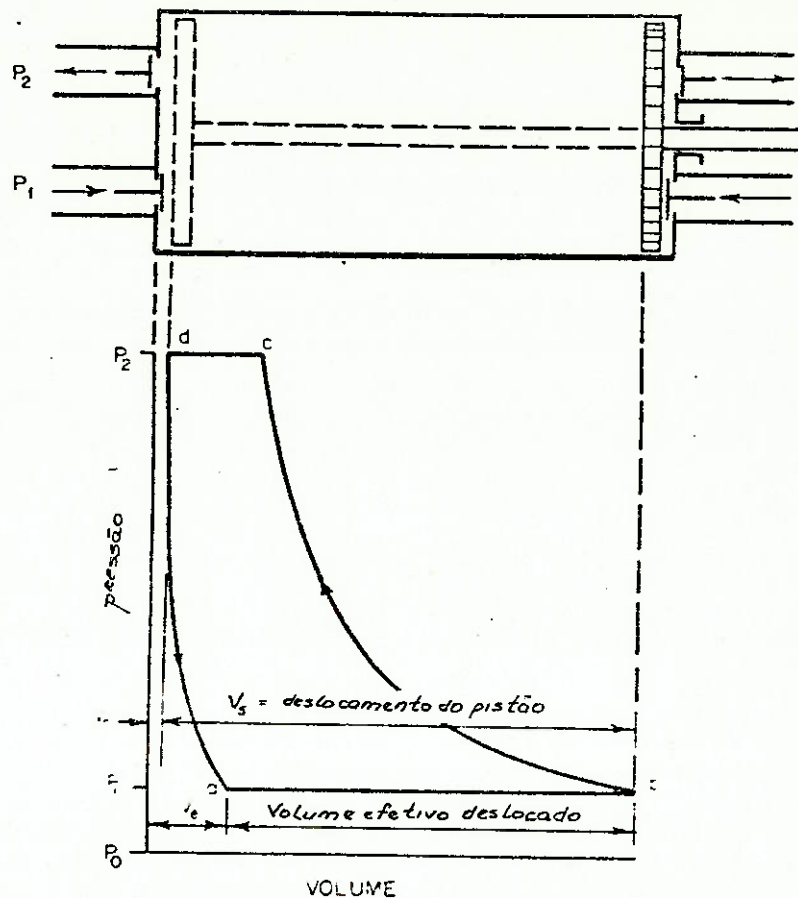


fig. V.11 Diagrama de um ciclo ideal de funcionamento de um compressor alternativo

O volume V_e representa o estado do ar no espaço nocivo após a expansão e no instante em que a válvula de admissão é aberta. A curva de expansão d-a é geralmente uma curva exponencial $PV^{1,2} = C$ para compressor com camisa de resfriamento. A curva a-b representa a etapa do ciclo em que o ar atmosférico é arrastado para o cilindro. A curva b-c representa a compressão da massa total de ar no cilindro; é geralmente uma curva exponencial $PV^{1,35} = C$ para um cilindro com resfriamento. A linha c-d é a pressão no cilindro durante a descarga logo após a compressão.

A potência requerida por ciclo é dada pela área do diagrama ideal:

$$\int_b^c V \cdot dP - \int_a^d V \cdot dP = \text{trabalho requerido por ciclo}$$

onde:

$$\int_b^c V \cdot dP = \frac{n}{n-1} P_b V_b \left[\left(\frac{P_c}{P_b} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad \text{para } n = 1,35$$

$$\int_a^d V \cdot dP = \frac{n'}{n'-1} P_a V_a \left[\left(\frac{P_d}{P_a} \right)^{\frac{n'-1}{n'}} - 1 \right]$$

Se $n = n'$: o trabalho requerido por ciclo é

$$\frac{n}{n-1} P_b (V_b - V_d) \left[1 + C - C \left(\frac{P_c}{P_b} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{P_c}{P_b} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

onde:

$V_b - V_d$ = deslocamento do pistão

$1 - C + C \left(\frac{P_c}{P_b} \right)^{\frac{1}{n}}$ = eficiência volumétrica do compressor

$$C = \frac{V_c}{V_s}$$

Em termos de pressão média P_m temos:

Potência indicada = $P_m \cdot L \cdot A \cdot N$

onde: L = comprimento do pistão

A = área do pistão

N = rotação para um compressor simples

$N = 2 \times$ rotação para um compressor de dupla ação

2.4. COMPRESSOR DE PALHETA DESLIZANTE:

O compressor de palheta deslizante é geralmente usado somente em sistemas onde o material e o ar são misturados em uma câmara na entrada de um duto de transporte. O compressor fornece ar para uma série de bocais e o escoamento de ar é relativamente constante.

Este tipo de compressor requer lubrificação. Um filtro de ar na entrada deve trabalhar continuamente para garantir a remoção de toda sujeira na entrada do compressor. Uma acumulação de su-

jeira abaixo da palheta pode travá-la, danificando o compressor. (fg. V.12).

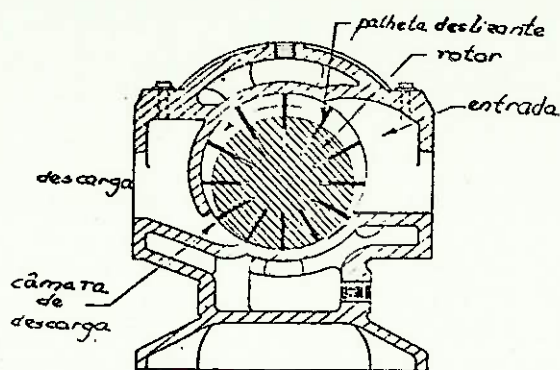


fig. V.12 compressor de palheta deslizante.

2.5. VENTILADORES:

A maioria dos ventiladores usados para transporte pneumático usados como exaustores para o vent, são do tipo radial com uma roda de pás retas (fig. V.13).

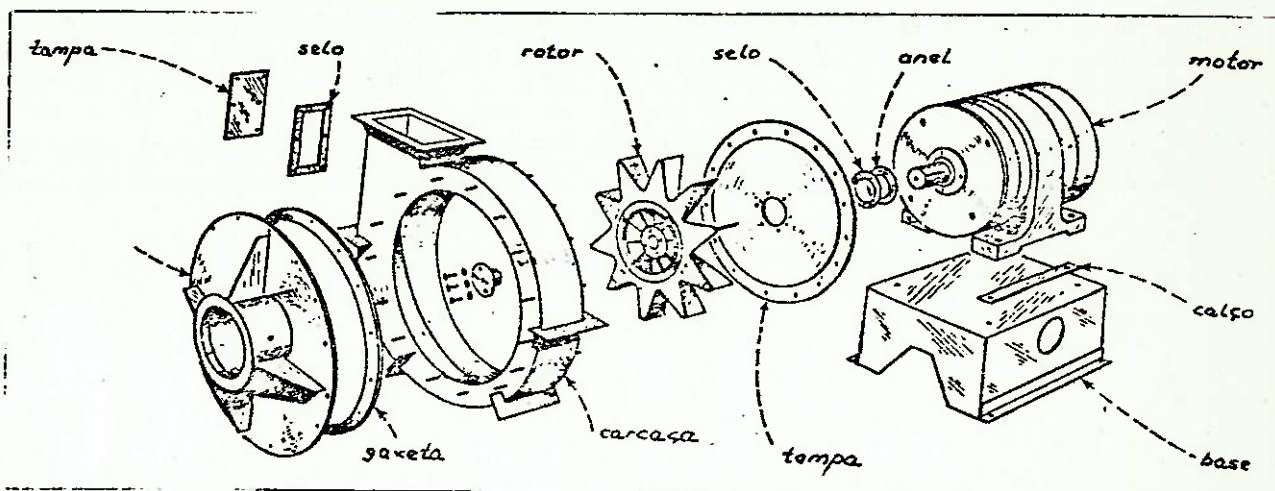


fig. V.13 componentes de um ventilador

Na maioria dos sistemas com pressão negativa um ventilador é montado no topo de um ciclone, montado verticalmente e é acionado diretamente por um motor. A flange de entrada é conectada no bocal de saída do ciclone. Em operação, a linha de transporte de sucção pode receber material de vários pontos e despejá-lo em um ciclone que descarrega através de uma válvula rotativa. O ar sem material passa através do ventilador para a atmosfera. Em sistemas em "loop" o ventilador descarrega em um filtro e retorna para a linha de sucção. Quando é transportado material muito fino um filtro de pó é instalado entre o ciclone e o ventilador. Na partida o ventilador trabalhará com capacidade máxima pois a resistência dos tubos do equipamento acoplado são muito baixas. À medida que o material é arrastado na linha de transporte a resistência aumenta. O ventilador tenderá a operar em um outro ponto da curva, com menor capacidade e maior pressão, de acordo com a resistência do sistema. A potência também diminuirá.

Se muito material é arrastado para a linha de transporte, o volume de ar arrastado pelo ventilador diminuirá para um ponto onde o material se depositará na linha devido à baixa velocidade. Esta característica exige um controle da alimentação de material rigoroso para garantir uma taxa de material constante.

Ventiladores centrífugos toleram temperaturas relativa-

mente altas mas à medida que aumentam, deve-se aumentar a velocidade para compensar a baixa resistência (pois o gás a alta temperatura tem uma densidade mais baixa).

Ventiladores bem projetados têm carcaças removíveis para a troca fácil do rotor.

Quando é especificado um ventilador, as condições de entrada e saída devem ser completamente descritas, isto é, temperatura do gás, pressão e condições ambientais. Se uma velocidade constante ou volume constante é requerido, isto deve ser explicado pois instrumentos especiais e válvulas de controle de vazão são necessários.

2.6. CAPACIDADE DOS IMPULSORES DE AR:

A capacidade dos compressores, sopradores e ventiladores é dada em metro cúbico do gás ou ar nas condições de entrada (temperatura e pressão).

Um erro comum é especificar um soprador para uma dada pressão diferencial. Se o ventilador trabalhar em um sistema vácuo-pressão, este será superdimensionado.

Quando ar é arrastado da atmosfera para o equipamento, e o seu volume é aumentado em função do aumento de temperatura ou perda de carga (devido ao atrito) ou devido à variação da pressão devido à altitude, deve ser aumentada a capacidade do compressor para manter a mesma razão em peso:

$$q = \frac{\text{peso (kg/min)}}{\text{densidade do ar na entrada (Kg/m}^3\text{)}}$$

Correções da densidade do ar em função da variação de:

- temperatura: multiplica-se a densidade do ar no ponto de suprimento pela razão entre as temperaturas absolutas no ponto de suprimento de ar e na entrada.
- pressão: multiplica-se a densidade do ar no ponto de suprimento pela razão entre as pressões absolutas no ponto de suprimento e no ponto de suprimento e na entrada.
- altitude: multiplica-se a densidade do ar a nível do mar pela razão entre a pressão barométrica àquela altitude e a pressão barométrica a nível do mar.

2.7. GERADORAS DE GÁS INERTE:

A aplicação do gás inerte para um circuito fechado foi descrito no capítulo II, ítem 2.1. Estes sistemas usam sopradores centrífugos e compressores alternativos para fornecer gás inerte para um sistema de transporte ou para um tanque de estocagem.

O fluxograma de um típico sistema de baixa pressão é mostrado na figura V.14. A operação do sistema é o seguinte: o ar filtrado é comprimido por um soprador e sua vazão é medida em uma placa de orifício. A quantidade de ar é determinada pela demanda a jusante do gerador. Gás combustível (como propano ou gás natural) entram nos reguladores e passam através do orifício limitador de gás. Q quantidade de gás fornecida é determinada pela combustão do ar que passa através do regulador. Ar e gás são alimentados separadamente para o queimador, misturados e queimados em uma câmara de combustão fechada. Após a combustão, gases são resfriados em uma torre de resfriamento direto a água ou indiretamente em um trocador tipo "shell-and tube".

O vapor de água condensado é separado do gás por um "demister" de aço inoxidável e removido.

O pacote gerador termina com o separador, logo o jusante do trocador de calor. Uma segunda unidade consiste de um refrigerador de gás para resfriar o gás descarregado para um ponto abaixo

de 5°C. O gás inerte de um sistema é normalmente admitido no lado da sucção de um soprador centrífugo num sistema de transporte.

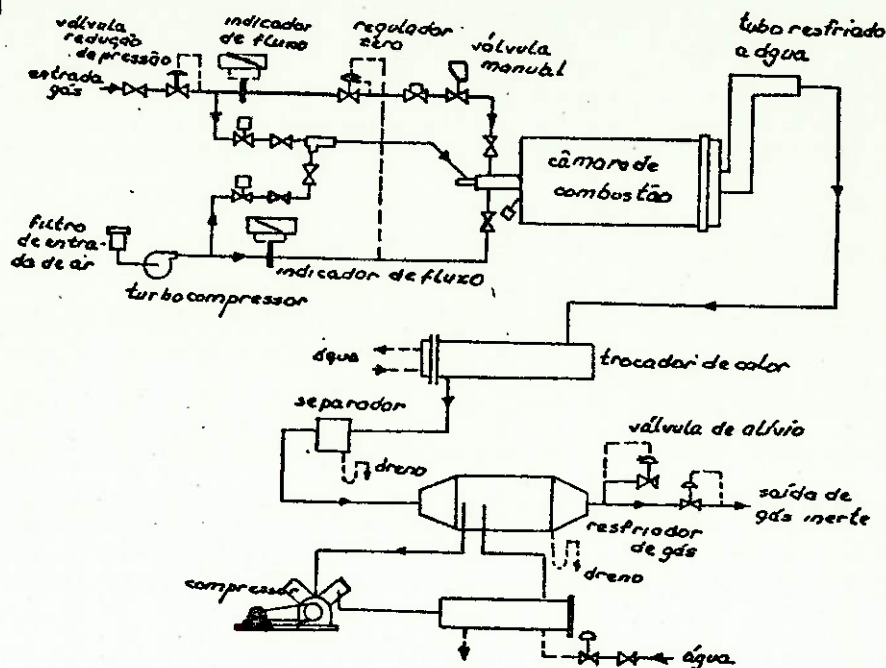


fig. V.14 fluxograma de um sistema de geração de gás inerte a baixa pressão

Na figura V.16 temos o fluxograma de um gerador de gás inerte a alta pressão. O gás descarregado de um gerador entra em um compressor alternativo passando antes por um tanque oscilante e é descarregado em diversos secadores de ar, antes de entrar em um receptor para estocagem.

O sistema a alta pressão quase sempre seca o gás até uma temperatura de 5°C para manter um gás seco na linha ou no receptor para estocagem.

O gás "fabricado" pode ser admitido em um sistema de transporte por um regulador de pressão que abre quando a pressão de sucção no ventilador é reduzido, ou por um regulador de fluxo que abre quando gás adicional é requerido, fornecendo a quantidade necessária para completar as fugas do sistema.

Embora a informação se aplique para sistemas fechados é possível utilizar o gerador de gás inerte para um sistema aberto. No entanto, o sistema fechado é mais econômico.

.3. VÁLVULAS DE DESVIO:

Válvulas de desvio são requeridas para direcionar o fluxo de material para a linha de transporte quando o material deve ser transportado de um ponto para diferentes pontos de descarga ou de diferentes pontos para um único ponto de descarga. A válvula torna-se um mecanismo complicado pois torna-se parte da linha de transporte e deve evitar vazamentos de materiais de uma linha ativada para uma linha não ativada. Também em muitas aplicações é operada a distância. Existem muitos projetos de válvulas adequadas.

Dois tipos de desvios de linha de transporte são adequados comercialmente: (a) desvios de linha que interrompem o escoamento de material para a linha de transporte ou reservatório. São normalmente ativados quando nenhum material está escoando na linha.

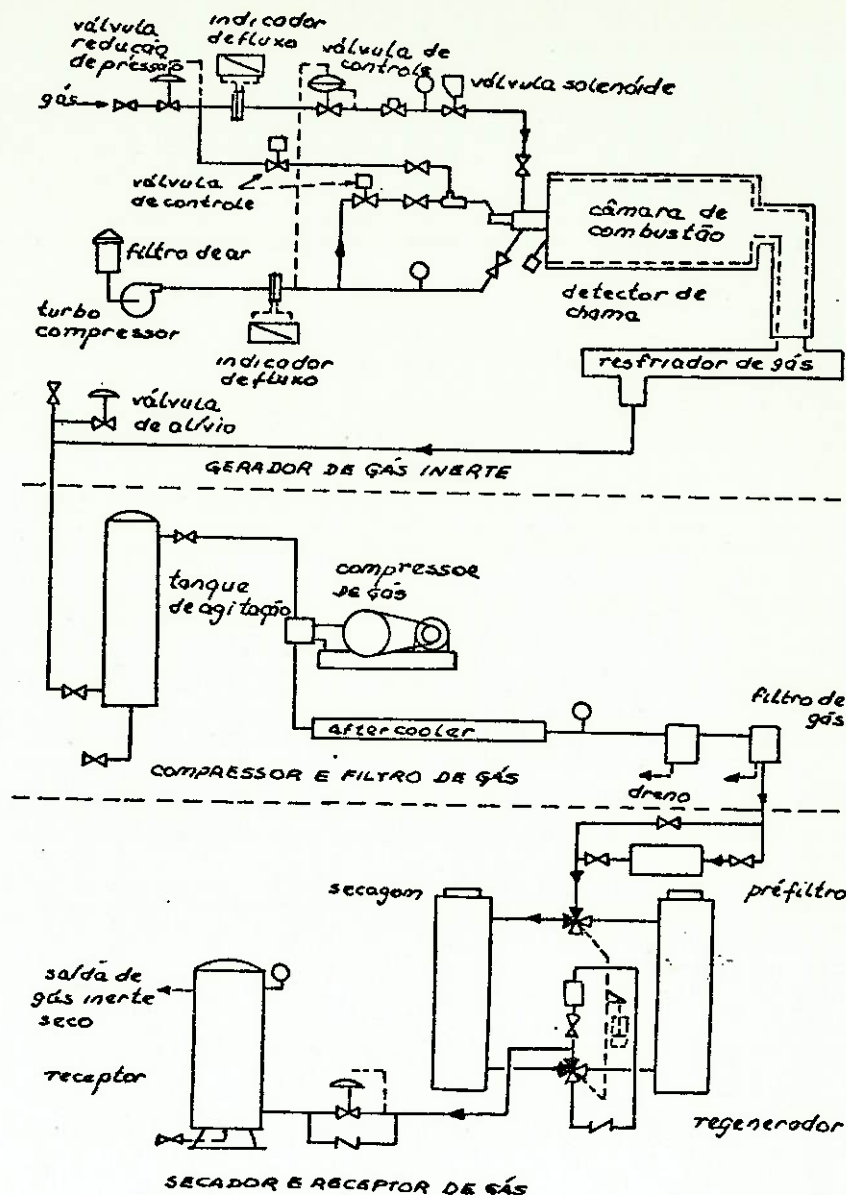


fig. V.15 fluxograma de uma sistema de geração de gás inerte a alta pressão

(b) desvios de ação dupla que desviam o escoamento de material de um silo de recepção para outro durante um enchimento sequencial. Devido ao grande número de tipos torna-se difícil classificar as válvulas. A fig. V.16 mostra alguns dos tipos adequados e indica os princípios de operação.

As figuras V.17 e V.18 mostram algumas dessas válvulas.

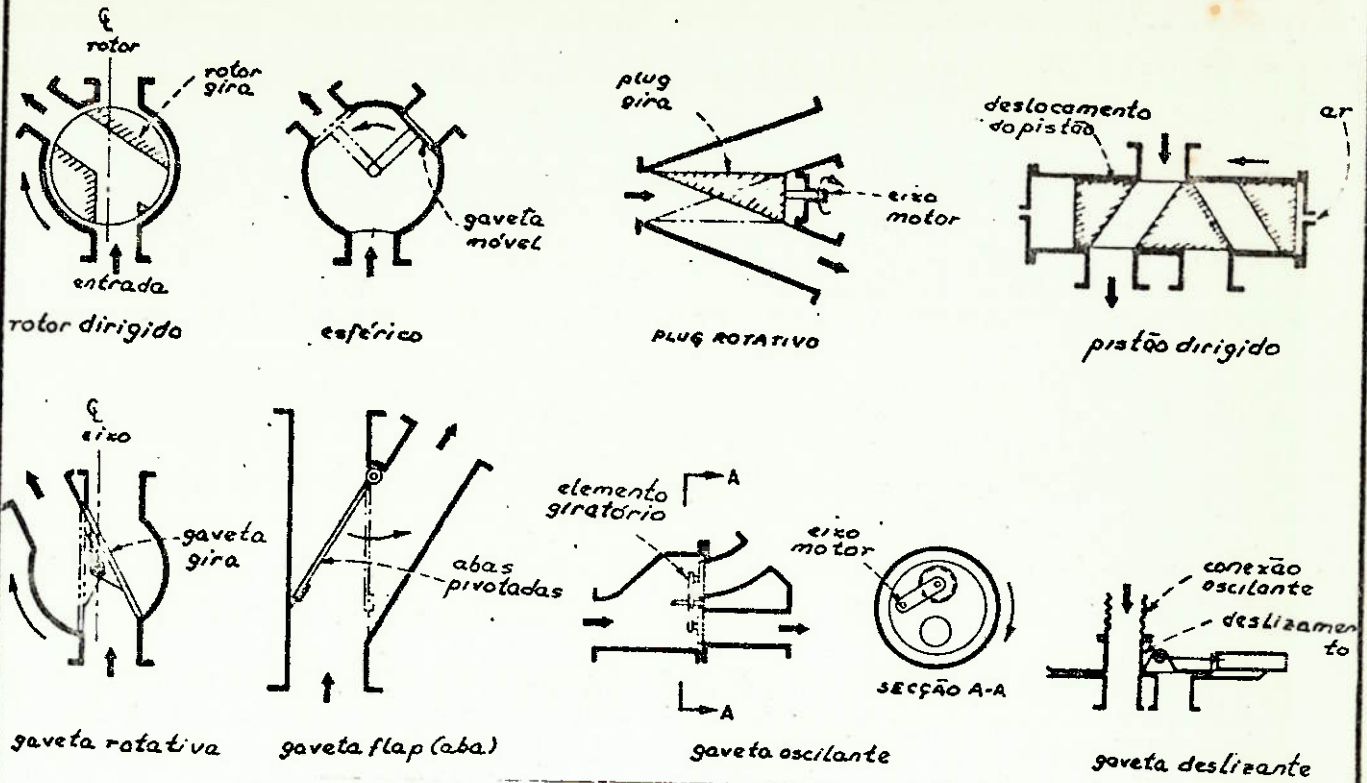


fig. V.16 tipos adequados e princípio de operação de válvulas de desvio

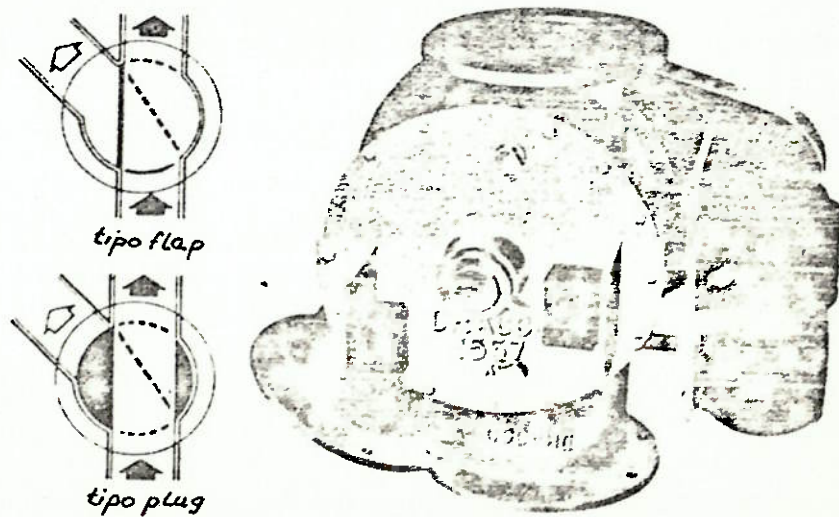


fig. V.17 válvula rotativa de desvio operada com motor

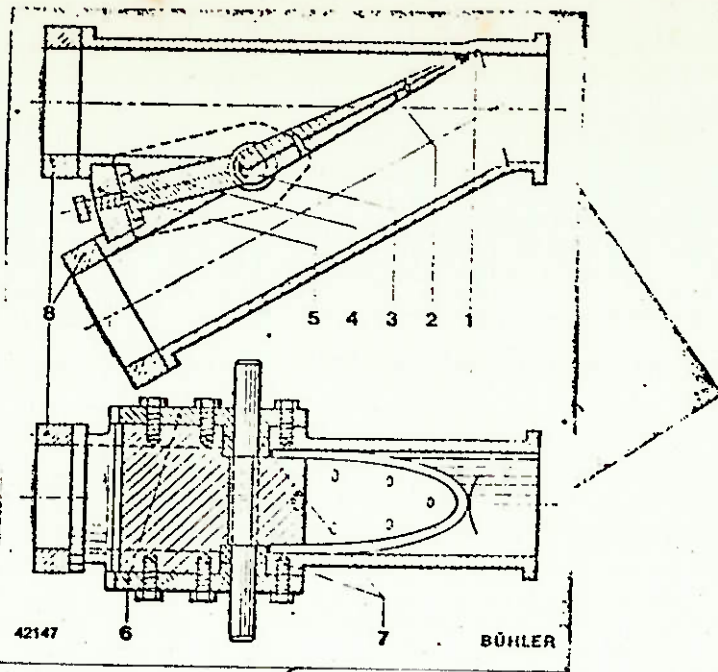


fig. V.18 válvula tipo "flap"
para desvio

- C A P Í T U L O V I -

PRÉ-PROJETO DE UM SISTEMA DE DESCARGA DE GRANELEIROS DE TRIGO

1. INTRODUÇÃO

A descarga de navios graneleiros normalmente é efetuada através de um sistema de transporte pneumático operando sob vácuo. Atualmente existem muitos sistemas de grande capacidade operando pelo mundo todo. Entre eles, podemos citar o do porto de Santos com capacidade de 120 ton/h, o do porto de Marselha, na França, com capacidade de 200 ton/h, o do Rio de Janeiro com 80 ton/h ou o de Salvador com 50 ton/h.

Estes sistemas podem ser fixos ou montados sobre rodas, tendo a capacidade de deslocar-se ao longo do comprimento do navio, atingindo mais facilmente os seus vários compartimentos, como, por exemplo, o do porto de Marselha que pode deslocar-se de até 90 metros sobre trilhos.

Como já foi dito, estes sistemas operam sob vácuo, fazendo, após a separação do ar, o transporte imediato, por meio ferroviário ou rodoviário ou então o envio do material para pontos remotos através de transportadores de correia e elevadores de canecas.

O objetivo deste pré-projeto é possibilitar essa descarga através de um sistema de vácuo, porém, com envio para pontos remotos por meio de um sistema de pressão positiva, constituindo-se, assim, num sistema combinado vácuo-pressão.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Na página seguinte temos uma representação esquemática do sistema proposto para a descarga de graneleiros.

A taxa de retirada de trigo foi fixada em 90 ton/h, situado na média dos transportadores encontrados atualmente.

Para efeito do pré-cálculo, foi fixada uma parcela a ser remetida para pontos remotos na base de 60 ton/h. Essa parcela não necessita obrigatoriamente ser obervada, constituindo-se apenas num limite de operação do trecho sob pressão. A variação dessas quantidades pode ser obtida por meio de variações na rotação das válvulas rotativas existentes em cada saída.

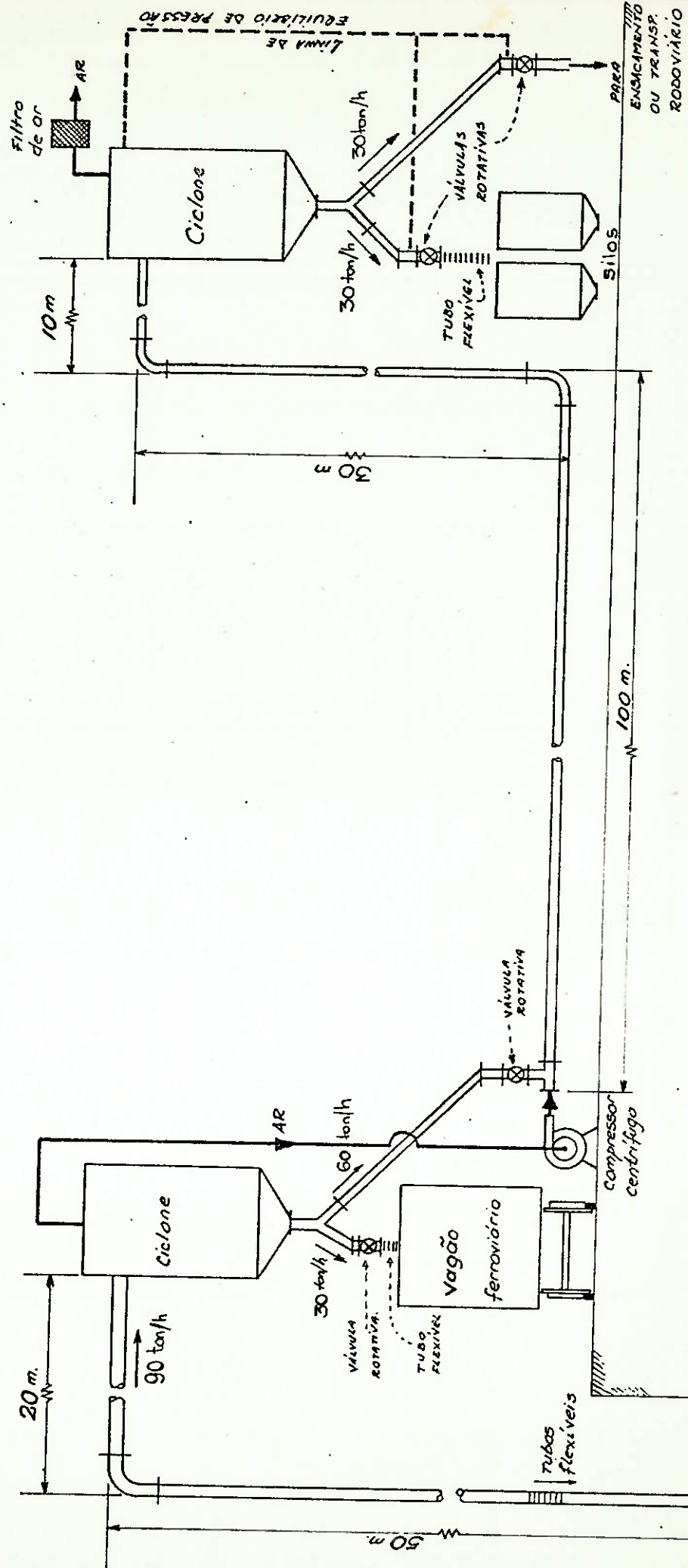
Dentro da divisão proposta, teríamos 30 ton/h sendo descarregadas a partir do receptor primário diretamente para o embarque em vagões graneleiros enquanto que as restantes 60 ton/h seriam remetidas a ponto remoto onde seriam novamente divididas em duas partes iguais, uma delas para a armazenagem em silos portuários enquanto a outra seria enviada para o ensacamento ou transporte rodoviário a granel.

3. ESTIMATIVA DAS VÁLVULAS ROTATIVAS

As válvulas rotativas são dispositivos que trabalham, geralmente a baixas rotações, evitando assim uma velocidade de saída do material muito grande na direção normal ao escoamento do ar.

Para o sistema proposto, escolheremos as quatro válvulas idênticas, havendo apenas variação da rotação daquela onde a descarga é maior (60 ton/h)

ESQUEMA DA INSTALAÇÃO



- 7 -

Estimando-se em 500 mm o diâmetro das válvulas e em 400 mm a sua largura e ainda, supondo que cerca de 10% do volume total seja ocupado pelo eixo e pelas paredes das células, temos:

$$V = \frac{\pi \cdot (0,5)^2}{4} \times 0,4 \times 0,9 = 0,07 \text{ m}^3/\text{rotação}$$

Sendo o peso hectolítrico do trigo cerca de 80 kg/hl, ou seja, 800 kg/m³, temos:

$$M = 0,07 \times 800 = 56 \text{ kg/rotação}$$

Assim, necessitaríamos nas válvulas de 30 ton/h cerca de 20 rpm, enquanto que nas de 60 ton/h cerca de 40 rpm.

4. DIMENSIONAMENTO DAS TUBULAÇÕES

Conforme já foi visto, no trecho de vácuo temos uma descarga de 90 ton/h enquanto que no trecho de pressão temos 60 ton/h.

4.1 - DADOS CONSIDERADOS PARA O TRIGO

Segundo STEPANOFF, para o trigo temos:

$$d = 4 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$S_s = 1,21$$

Tomando-se a densidade da água como 1000 kg/m³, temos:

$$\gamma_s = 1210 \text{ kg/m}^3$$

A expressão (III.22) fornece:

$$Re^2 \cdot Ca = 4,24 \times 10^{13} \cdot d^3 \cdot S_s$$

então: $Re^2 \cdot Ca = 4,24 \times 10^{13} \times (4 \times 10^{-3})^3 \times 1,21$

ou: $Re^2 \cdot Ca = 3,28 \times 10^6$

Entrando com este valor de $Re^2 \cdot Ca$ na figura III.3, obtemos

$$Ca = 0,5$$

A velocidade de deposição será, pela equação (III.19):

$$V_d = \sqrt{1110 \frac{g \cdot d \cdot S_s}{Ca}} = \sqrt{1110 \cdot \frac{9,78 \times 4 \times 10^{-3} \times 1,21}{0,5}}$$

ou seja,

$$V_d = 10,3 \text{ m/s}$$

Pela equação (III.26):

$$P_{cv} = \gamma_a \cdot (1 + \mu) \cdot L \cdot \text{sen}\theta \cdot 10^{-4}$$

$$P_{cv} = 1,2 \cdot (1 + 7,2) \cdot 50 \cdot 1 \cdot 10^{-4}$$

donde

$$P_{cv} = 0,05 \text{ kgf/cm}^2$$

Substituindo agora na equação (III.27), temos:

$$P_f = P'_f - P_{cv}$$

ou

$$P_f = 0,870 \text{ kgf/cm}^2$$

4.3 - CÁLCULOS PARA O TRECHO DE PRESSÃO

Neste trecho a descarga é de 60 ton/h, ou seja,

$$W_s = 16,67 \text{ kg/s}$$

Como a massa de é praticamente a mesma, temos:

$$W_a = 3,47 \text{ kg/s}$$

e então

$$\mu = \frac{16,67}{3,47} \rightarrow \mu = 4,80$$

Supondo que a pressão na tomada do material seja 25% maior que a pressão atmosférica, temos (considerando ar como gás perfeito):

$$\gamma_a = \frac{1,25 \times 1,2}{1,0} \rightarrow \gamma_a = 1,5 \text{ kg/m}^3$$

Então,

$$Q_a = \frac{W_a}{\gamma_a} = \frac{3,47}{1,2} \rightarrow Q_a = 2,31 \text{ m}^3/\text{s}$$

Mantendo a mesma velocidade de 23 m/s, teríamos:

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 2,31}{\pi \times 23}} = 0,358 \text{ m}$$

Adotando $D = 350 \text{ mm}$, temos:

$$V_a = \frac{4 \times 2,31}{\pi \times (0,35)^2} \rightarrow V_a = 24 \text{ m/s}$$

Para essa velocidade, segundo SEGLER, temos:

$$\lambda_a = 1,18 \times 10^{-2}$$

Então, pela equação (III.24):

$$\frac{\lambda_m - 1,18 \times 10^{-2}}{1,18 \times 10^{-2} \times 4,8} = 81 \times \frac{9,78 \times 0,35}{24^2} \times \frac{1,21}{0,5}$$

donde,

$$\lambda_m = 5,85 \times 10^{-2}$$

Tomando neste trecho também, duas curvas de 90° com $R/D = 6$, analogamente ao trecho de vácuo, teremos:

$$L_h = 110 \text{ m}$$

$$L_v = 30 \text{ m}$$

$$L_{ea} = 20 \text{ m}$$

$$L_{ec} = 20 \text{ m} \quad (\text{duas curvas})$$

Então, o comprimento equivalente total será:

$$L_{eq} = 110 + 30 + 20 + 20$$

$$L_{eq} = 180 \text{ m}$$

temos:

Substituindo os valores encontrados na equação (III.25),

$$\frac{P_i^2 - 1,0}{2 \times 1,0} = 5,85 \times 10^{-2} \times \frac{180}{0,35} \times \frac{24^2}{2 \times 9,8} \times 1,5 \times 10^{-4}$$

e então,

$$P_i = 1,265 \text{ kgf/cm}^2$$

Pela equação (III.26), temos:

$$P_{cv} = 1,5 \times (1 + 4,8) \times 30 \times 10^{-4}$$

$$P_{cv} = 0,026 \text{ kgf/cm}^2$$

Substituindo na equação (III.27):

$$P_i = 1,265 + 0,026$$

$$P_i = 1,291 \text{ kgf/cm}^2$$

Comparado com a estimativa feita no início deste item, teríamos um erro de aproximadamente 3% que é bastante aceitável.

4.4 - POTÊNCIA DO COMPRESSOR

Sendo P_e a pressão na entrada do compressor e P_s a pressão na saída do mesmo, teremos uma pequena modificação na expressão (III.12) que assume a forma:

$$\tau_c = 23030 \cdot P_e \cdot \log\left(\frac{P_s}{P_e}\right)$$

(III.11): Tomando $\alpha = 1,20$ e $P_p = 0,03 \text{ kgf/cm}^2$, temos pela equação

$$P_s = 1,291 \times 1,2 + 0,03$$

$$P_s = 1,579 \text{ kgf/cm}^2$$

Segundo SPIVAKOVSKY, para sistemas de vácuo, podemos ter $\alpha = 1,10$ e $P_p = 0,02 \text{ kgf/cm}^2$, então,

$$1,0 - P_e = (1,0 - 0,870) \times 1,1 + 0,02$$

donde

$$P_e = 0,837 \text{ kgf/cm}^2$$

Então, temos:

$$\tau_c = 23030 \times 0,837 \times \log\left(\frac{1,579}{0,837}\right)$$

$$\tau_c = 5313,6 \text{ kgm/m}^3$$

Este trabalho refere-se ao volume na entrada do compressor, onde temos:

$$\gamma_a = \frac{1,2}{1,0} \times 0,837 = 1,0 \text{ kg/m}^3$$

então,
$$Q_c = \frac{3,47}{1,0} = 3,47 \text{ m}^3/\text{s}$$

Assim, a potência do motor do compressor, segundo a equação (III.14), será, supondo um rendimento total de 70%:

$$N_c = \frac{\tau_c \cdot Q_c}{102} = \frac{5313,6 \times 3,47}{102 \times 0,70}$$

donde

$$N_c = 258 \text{ kW}$$

ou

$$N_c = 351 \text{ CV}$$

Devido à alta vazão de ar necessária e à diferença de pressão relativamente baixa utilizadas, o compressor mais indicado para a aplicação é o do tipo centrífugo.

4.2 - CÁLCULOS PARA O TRECHO DE VÁCUO

Pelo gráfico da figura III.1, vemos que devemos ter um valor de μ da ordem de 7, enquanto que o gráfico da figura III.4 indica que a velocidade do ar deve ser da ordem de 23 m/s.

Como a descarga é de 90 ton/h, temos inicialmente:

$$W_s = 25 \text{ kg/s}$$

Pela expressão (III.4)

$$\mu = \frac{W_s}{W_a} \rightarrow W_a = \frac{W_s}{\mu} = \frac{25}{7} = 3,6 \text{ kg/s}$$

Como na tomada do material a pressão é aproximadamente igual à pressão atmosférica, podemos dizer que:

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

então:
$$Q_a = \frac{W_a}{\gamma_a} = \frac{3,6}{1,2} = 3,0 \text{ m}^3/\text{s}$$

e pela equação (III.6)

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_a}{\pi \cdot V_a}} = \sqrt{\frac{4 \times 3}{\pi \times 23}} = 0,408 \text{ m}$$

Assumindo, então, a mesma velocidade do ar e o diâmetro do tubo comercial mais próximo, temos:

$$V_a = 23 \text{ m/s}$$

e

$$D = 400 \text{ mm}$$

obtemos então:

$$Q_a = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot V_a = \frac{\pi \times (0,4)^2}{4} \times 23$$

$$Q_a = 2,89 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$W_a = Q_a \cdot \gamma_a = 2,89 \times 1,2 \rightarrow W_a = 3,47 \text{ kg/s}$$

$$\mu = \frac{W_s}{W_a} = \frac{25}{3,47} \rightarrow \mu = 7,20$$

Pelo gráfico da figura III.14, temos

$$\lambda_a = 1,24 \times 10^{-2}$$

Para o cálculo do coeficiente de resistência da mistura, a equação (III.24) fornece:

$$\frac{\lambda_m - \lambda_a}{\lambda_a \cdot \mu} = 81 \cdot \frac{g \cdot D}{V_a^2} \cdot \frac{S_s}{\sqrt{Ca}}$$

Substituindo os valores encontrados, temos:

$$\frac{\lambda_m \cdot 1,24 \times 10^{-2}}{1,24 \times 10^{-2} \times 7,2} = 81 \times \frac{9,78 \times 0,4}{23^2} \times \frac{1,21}{0,5}$$

e então,

$$\lambda_m = 10,39 \times 10^{-2}$$

Para o cálculo dos comprimentos equivalentes, devido às baixas descargas apresentadas nos gráficos das figuras correspondentes, extrairemos os valores de L_{ec} da tabela III.A. Assim, para material granular e $R/D = 6$, temos:

$$L_{ec} = 10 \text{ m}$$

Para o comprimento equivalente da aceleração, utilizaremos o dobro do valor do comprimento equivalente da curva (conforme item 4.7 do capítulo III), ou seja,

$$L_{ea} = 20 \text{ m}$$

Tendo então:

$$L_h = 20 \text{ m}$$

$$L_v = 50 \text{ m}$$

$$L_{ea} = 20 \text{ m}$$

$$L_{ec} = 10 \text{ m} \quad (\text{uma curva})$$

o comprimento equivalente total será:

$$L_{eq} = 20 + 50 + 20 + 10 \quad \text{ou seja,}$$

$$L_{eq} = 100 \text{ m}$$

Utilizando agora a relação (III.25):

$$\frac{P_i^2 - P_f^2}{2 \cdot P_f} = \lambda_m \cdot \frac{L_{eq}}{D} \cdot \frac{V_a^2}{2 \cdot g} \cdot \gamma_a \cdot 10^{-4}$$

temos:
$$\frac{1,0 - P_f^2}{2 \cdot P_f} = 10,39 \times 10^{-2} \times \frac{100}{0,4} \times \frac{23^2}{2 \times 9,78} \times 1,2 \times 10^{-4}$$

ou
$$\frac{1,0 - P_f^2}{2 \cdot P_f} = 8,43 \times 10^{-2}$$

Resolvendo-se esta equação, obtemos:

$$P_f = 0,92 \text{ kgf/cm}^2$$

BIBLIOGRAFIA

- [1] BAUER, L.A. FALCÃO - coord.
"Materiais de construção"
Livros Técnicos e Científicos - Rio de Janeiro - 1979
- [2] GOVIER, G.W. e AZIZ, K.
"The flow of complex mixtures in pipes"
Van Nostrand Reinhold Co. - New York - 1973
- [3] KRAUS, MILTON N.
"Pneumatic conveying of bulk materials"
McGraw-Hill Book Co - New York - 1980
- [4] LAMBRETE, A.
"Les transports pneumatiques"
Dunod Éditeur - Paris - 1935
- [5] PERRY, ROBERT H. e CHILTON, CECIL H.
"Chemical engineers' handbook"
McGraw-Hill Kogakusha Ltd - Tokyo - 1973
- [6] SCHULTE, ERNESTO A.A.
"Granos y elevadores en la Republica Argentina"
Talleres Graficos Emilio Fenner S.R.L. - Rosário - 1947
- [7] SEGLER, G.
"Pneumatic grain conveying"
Prof.Dr.Ing. G. Segler - Braunschweig - 1951
- [8] SPIVAKOVSKY A. e DYACHKOV, V.
"Conveyors and related equipment"
Peace Publishers - Moscou - 1966
- [9] STEPANOFF, ALEXEY J.
"Gravity flow of bulk solids and transportation of solids
in suspension"
John Wiley & Sons Inc - New York - 1969